



Analyse des retards troposphériques GPS sur la zone Nord-Atlantique dans le cadre de la campagne NAWDEX

Olivier Ntayagabiri

► To cite this version:

Olivier Ntayagabiri. Analyse des retards troposphériques GPS sur la zone Nord-Atlantique dans le cadre de la campagne NAWDEX. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2018. dumas-02093846

HAL Id: dumas-02093846

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02093846>

Submitted on 9 Apr 2019

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 DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Olivier NTAYAGABIRI

Analyse des retards troposphériques GPS sur la zone Nord-Atlantique dans le
cadre de la campagne NAWDEX

Soutenu le 05 juillet 2018

JURY

PRESIDENT : M. Laurent MOREL

Président du jury

**MEMBRES : M. Stéphane DURAND
M. Pierre BOSSER**

**Examineur
Maître de stage**

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le Tout Puissant et miséricordieux qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Ensuite je remercie vivement mon maître de stage, Mr Pierre Bosser, pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de son expertise au quotidien. Il fut d'une aide précieuse dans les moments les plus délicats.

J'exprime ma gratitude à Mr Laurent MOREL, mon professeur référent et directeur de l'ESGT, qui a pris le temps de discuter de mon sujet. Chacun de ses conseils m'a aidé à faire avancer mon travail.

Mes plus profonds remerciements vont à tous les membres de l'association Géomètres Sans Frontière et plus particulièrement à sa présidente Mme Claire GALPIN. Tout au long de mon cursus, ils m'ont toujours soutenu, encouragé et aidé. Ils ont su me donner toutes les chances pour réussir. Qu'ils trouvent, dans la réalisation de ce travail, l'aboutissement de leurs efforts ainsi que l'expression de ma plus affectueuse gratitude.

Je remercie plus intimement ma femme Justine NDAYIHANZAMASO et ma fille Nicky-Anaëlle ISHIMWE pour leur compréhension, leur accompagnement et leur soutien sans faille durant ces trois années.

Ce stage a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du projet DIP-NAWDEX (ANR-17-CE01-0010).

Liste des sigles utilisés

ANR : Agence Nationale de la Recherche.

DIP-NAWDEX : DIabatic Processes during North Atlantic Waveguide Downstream impact EXperiment.

CEPMMT : Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme.

ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

ERA-Interim : ECMWF Reanalyse Interim.

GMF : Global Mapping Fonction.

GNSS : Global Navigation Satellite System.

GPS : Global Positioning System.

IERS : International Earth Rotation and Reference Systems Service.

IGS : International GNSS Service.

IMF : Isobaric Mapping Fonction.

IWV : Integrated Water Vapor.

JPL : Jet Propulsion Laboratory.

LEO : Low Earth Orbit.

NASA : National Aeronautics and Space Administration.

NAWDEX : North Atlantic Waveguide Downstream impact EXperiment.

NMF : Niell Mapping Fonction.

NWM : Numerical Weather Models.

PPP : Precise Point Positioning

RMS : Root Mean Square.

RS : Radiosondage.

RS_UWYO : Radiosondage de l'Université du Wyoming.

RTS : Real-time Service.

SHD : Slant Hydrostatic Delay.

SPP : Single Point Positioning.

STD : Slant Total Delay.

SWD : Slant Wet Delay.

UTC : Coordinated Universal Time.

UWYO : Université du Wyoming.

VMF : Vienna Mapping Fonction.

WVR : Water Vapor Radiometer.

ZHD : Zenith Hydrostatic Delays.

ZTD : Zenith Total Delays.

ZWD : Zenith Wet Delays.

Glossaires

Courant-jet d'altitude ou jet stream : Vents à grandes vitesses (300 à 400 km/h) résultant de la rencontre de l'air froid et de l'air chaud à des altitudes de 5 000 à 10 000 m, où les différences de température et de pression atmosphérique sont plus prononcées.

GPS : Global Positioning System, aussi connu sous le nom de Navstar GPS est le premier système de géolocalisation mondial utilisant des signaux radio émis par une constellation de satellites. Il a été mis en place par le département de la Défense des États-Unis à partir de 1973.

Triangulation : Technique permettant de déterminer la position d'un point en mesurant les angles entre ce point et d'autres points de référence dont la position est connue, et ceci plutôt que de mesurer directement la distance entre les points. Ce point peut être considéré comme étant le troisième sommet d'un triangle dont on connaît deux angles et la longueur d'un côté.

Multilatération : Calcul similaire à la triangulation mais n'utilisant que les mesures de distances.

Table des matières

Remerciements	3
Liste des sigles utilisés	5
Glossaire	7
Introduction	11
I Traitement GPS, PPP	15
I.1 Introduction	15
I.2 Modélisation du Positionnement Ponctuel Précis	16
I.3 Modélisation de la troposphère	18
I.3.1 Importance de la correction de la troposphère pour le positionnement GPS	18
I.3.2 Paramètres troposphériques	19
II Le GPS pour la météorologie	25
II.1 Utilisation du GNSS en météorologie	25
II.2 Re-calcul GPS dans le cadre de campagne météorologique	26
II.3 Adéquation avec le GPS	27
III Qualité de la solution GPS NAWDEX	29
III.1 Introduction	29
III.2 Traitement des données de la campagne NAWDEX	29
III.3 Qualité intrinsèque de la solution GPS NAWDEX	30
III.3.1 Ecart aux positions à priori	31
III.3.2 Les résidus quadratiques moyens	33
III.3.3 Qualité des séries ZTD	34
III.3.4 Taux de résolution des ambiguïtés	36
III.3.5 Répétabilité de la position verticale	37
III.3.6 Bilan	38
III.4 Évaluation de la solution à partir des données externes	39
III.4.1 Comparaisons de la solution GPS avec les observations des RS_UWYO	39
III.4.2 Comparaison de la solution GPS avec le modèle météorologique de l'ECMWF	43
III.4.3 Bilan	45
IV Tests de sensibilité	47
IV.1 Introduction	47
IV.2 Impact des paramètres du traitement	47

V Études des variations spatio-temporelles	51
V.1 Variation spatio-temporelle des ZTD	51
V.2 Variation spatiale des biais entre les ZTD GPS et ZTD ERA-Interim	53
V.3 Regard sur les gradients horizontaux	55
Conclusion et perspectives	59
Bibliographie	61
ANNEXES	65
A Le positionnement GPS	68
A.1 Principe du positionnement GPS	68
A.2 Les signaux et mesures GPS	68
B Combinaison linéaire des mesures	71
B.1 La combinaison ionosphere-free	71
B.2 Combinaison Wide lane	71
B.3 Combinaison Narrow lane	72
B.4 Combinaison Melbourne-Wübbena	72
C Tests d'hypothèse	73
C.1 Hypothèse nulle - hypothèse alternative.	73
C.2 Statistique et Seuil de signification du test	73
D Stations éliminées du réseau NAWDEX	76
E Résultats des comparaisons	79
E.1 Statistiques de comparaison du réseau NAWDEX avec les RS	79
E.2 Statistiques de comparaison du réseau de référence avec ERAI	81
E.3 Séries temporelles des ZTD et biais : Réseau de référence	82
F Test de sensibilité	87
F.1 Pondération en sinus	87
F.2 Pondération en racine du sinus	88
F.3 Random Walk de 1 mm	89
F.4 Random Walk de 10 mm	90
Liste des figures	91
Liste des tableaux	94

Introduction

Les prévisions des événements météorologiques extrêmes, comme les fortes précipitations ou les tempêtes de vent, constituent encore un véritable défi, surtout aux latitudes tempérées.

Les bandes transporteuses chaudes (warm conveyor belt), qui correspondent à des masses d'air qui s'enrichissent en humidité lorsqu'elles sont proches de la surface de l'océan et subissent une forte ascension au cœur des dépressions, connaissent des changements d'état de l'eau vers les phases liquide et solide lors de leur ascension. Ces masses d'air aboutissent à un fort dégagement de chaleur latente qui est à l'origine de l'intensification de la dépression de surface et affecte aussi le courant-jet d'altitude au niveau de l'Atlantique Nord-ouest. Ce phénomène engendre des erreurs de prévision météorologique en aval, sur l'Atlantique Nord-Est et sur l'Europe, et détériore ainsi la prévision d'événements à fort impact. Ainsi, l'un des axes de recherche pour améliorer ces prévisions est de mieux comprendre et quantifier les processus humides qui se produisent au sein des perturbations atmosphériques des latitudes tempérées [Rivière et al., 2016].

NAWDEX est une campagne de mesures aériennes et de surfaces issue d'un consortium international regroupant des organismes issus des États-Unis, du Canada, du Royaume-Uni, de France et d'Allemagne, dont l'objectif principal est justement de comprendre et de quantifier les effets de ces processus diabatiques sur les perturbations du courant-jet d'altitude sur la zone nord-américaine, leur influence en aval sur la zone Nord Atlantique et leurs conséquences sur les conditions météorologiques.

Cette campagne comporte un volet GPS visant la collecte et le traitement d'un ensemble de mesures GPS issues de plusieurs stations permanentes situées dans cette zone afin de récupérer les données sur les retards troposphériques. L'information sur les retards troposphériques des signaux GPS va permettre de décrire la distribution spatio-temporelle de la vapeur d'eau atmosphérique. Cette information est utilisée pour mieux comprendre les phénomènes de perturbation atmosphérique qui s'observent dans cette partie de la Terre. Ces données GPS ont été collectées à partir de 1367 stations GNSS, appartenant à 19 réseaux nationaux et internationaux [Voir la figure .1].

Problématique

Les systèmes globaux de positionnement par satellite ou systèmes GNSS sont actuellement très utilisés dans plusieurs applications de mesure comme la topographie et la géodésie grâce à l'amélioration de leur précision allant de quelques mètres jusqu'à quelques millimètres.

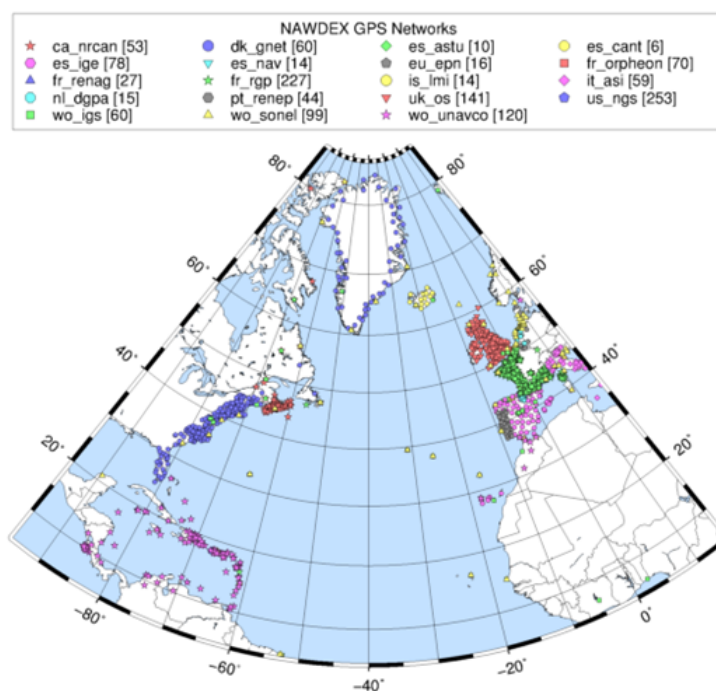


FIGURE .1 – Le réseau GPS de la campagne NAWDEX qui s’appuie sur les réseaux GNSS permanente déjà existant

L’objectif de ces systèmes de positionnement est de fournir à un récepteur sa position, sa vitesse de déplacement et l’heure à n’importe quelle heure et à n’importe quel endroit sur la terre. Les mesures des systèmes GNSS sont basées sur des signaux émis par des satellites en orbite autour de la Terre. Ces signaux subissent, lors de la traversée de l’atmosphère, des phénomènes de réfraction (par l’ionosphère et la troposphère) provoquant un allongement de leurs chemins-optiques.

La détermination précise de la position du récepteur nécessite donc, la modélisation et/ou l’estimation de ces retards à la propagation des signaux dans l’atmosphère et entre autres les retards troposphériques qui sont fonction de la teneur de l’atmosphère en vapeur d’eau et permettent aussi la description de l’état de la basse atmosphère. Ces retards troposphériques sont actuellement utilisés dans les prévisions numériques du temps et leur adéquation avec des observations issues des instruments météorologiques classiques, comme les radiomètres, est aujourd’hui confirmée. A titre d’exemple, [Kačmařík et al., 2017] montrent une bonne adéquation entre le retard troposphérique estimé par méthode GNSS, les modèles numériques de prévision du temps (NWM) ainsi que les données des contenus intégrés en vapeur d’eau (Voir section II.2), mesurées par des radiomètres micro-sondes (WVR).

Plusieurs outils ont été développés pour effectuer les prévisions météorologiques et informer le public sur le changement du temps. Si le GPS est le moins lourd en mise en place, sa précision, sa continuité et la disponibilité de ses mesures constituent également les points forts de son utilisation en météorologie.

DIP-NAWDEX est un projet français financé par l’ANR et s’articule autour de la campagne NAWDEX. Ce projet a pour objectif de mieux comprendre la dynamique et la prévision des

perturbations atmosphériques et d'étudier leur rôle dans la formation d'événements météorologiques extrêmes sur l'Atlantique Nord. Le projet comporte un volet GPS visant à fournir un jeu de données de retards troposphériques, complet et de qualité, sur l'arc Atlantique Nord. Ce jeu de données devra permettre une description précise de la distribution spatio-temporelle de la vapeur d'eau atmosphérique, en particulier lors de phénomènes extrêmes.

La problématique de ce travail consiste donc à mettre en évidence la qualité des données GPS issues de la campagne NAWDEX, leur adéquation avec les modèles météorologiques de la prévision numérique du temps et à produire des outils permettant une interprétation globale de ces données.

Objectif

Comme l'indique déjà le titre de ce mémoire, l'objectif principal de ce travail est d'analyser les retards troposphériques des mesures GPS issues de la campagne expérimentale NAWDEX. Il comprend :

- Une analyse des résultats issus d'un traitement PPP à l'aide du logiciel Gipsy-Oasis II v6.4, de plusieurs centaines de stations permanentes (plus de 1300 stations GNSS) situées autour de l'arc Atlantique Nord (de la Floride au Portugal en passant par le Groenland), qui consiste à la vérification de la qualité intrinsèque du traitement. Il s'agit dans cette partie d'analyser les résidus du traitement, le taux de résolution des ambiguïtés, les erreurs d'estimation des délais troposphériques, les écarts aux positions a priori, etc.
- Une étude d'adéquation de la solution GPS de la campagne NAWDEX avec les données externes des radiosondages et de modèle météorologique de l'ECMWF pour évaluer la pertinence des retards troposphériques GPS de cette campagne dans le domaine de la prévision météorologique.
- Un retraitement d'un sous réseau de la campagne afin d'évaluer l'impact des paramètres du traitement sur les résultats et le développement d'outils complémentaires facilitant l'exploitation de ces données sous formes de graphes et de cartes.

Organisation du mémoire

Le présent travail est subdivisé en cinq chapitres :

- Le premier chapitre relate la théorie GPS en général mais surtout le traitement GPS en mode PPP. Il reprend les deux grands modes de positionnement GPS, la modélisation mathématique du traitement PPP et la modélisation de la troposphère dans le traitement GPS.
- Le second chapitre explique l'utilisation des données GPS dans les prévisions numériques du temps et le re-calcul GPS dans le cadre d'une campagne météorologique. Il présente également les conclusions des études déjà menées sur l'adéquation des obser-

uations météorologiques et des données GPS.

- Dans le troisième chapitre, une analyse de la qualité intrinsèque de la solution GPS de la campagne NAWDEX sera effectuée. Cette analyse va permettre de valider le traitement GPS de la campagne en analysant un certain nombre de paramètres de sortie du traitement. Puis une comparaison des données ZTD de cette solution avec des données externes sera effectuée afin de mettre en évidence la bonne adéquation des paramètres troposphériques GPS avec ceux des modèles météorologiques.
- Des tests de sensibilité seront envisagés dans le quatrième chapitre afin de vérifier si les paramètres d'entrée utilisés dans le traitement de la campagne sont optimaux. Ces derniers ont pour objectif de refaire le traitement avec de nouveaux paramétrages et de comparer la solution avec celle du calcul de référence.
- Le cinquième et dernier chapitre se focalisera sur l'étude des variations des paramètres troposphériques dans le temps et dans l'espace. Il s'agira d'une analyse plus globale des séries ZTD sur toute la zone d'étude et sur toute la période d'acquisition de la campagne NAWDEX pour étudier les variations en rapport avec l'emplacement des stations mais également pour essayer de comprendre certains effets régionaux voir même saisonniers qui s'observent dans les données de la campagne. Pour cela, des produits visuels seront utilisés afin de faciliter la détection et la compréhension de ces phénomènes.

I Traitement GPS, PPP

I.1 Introduction

Il existe deux grands modes de positionnement GPS (ou GNSS) qui peuvent être réalisés en statique ou en cinématique, en temps réel ou en temps différé (figure I.1) .

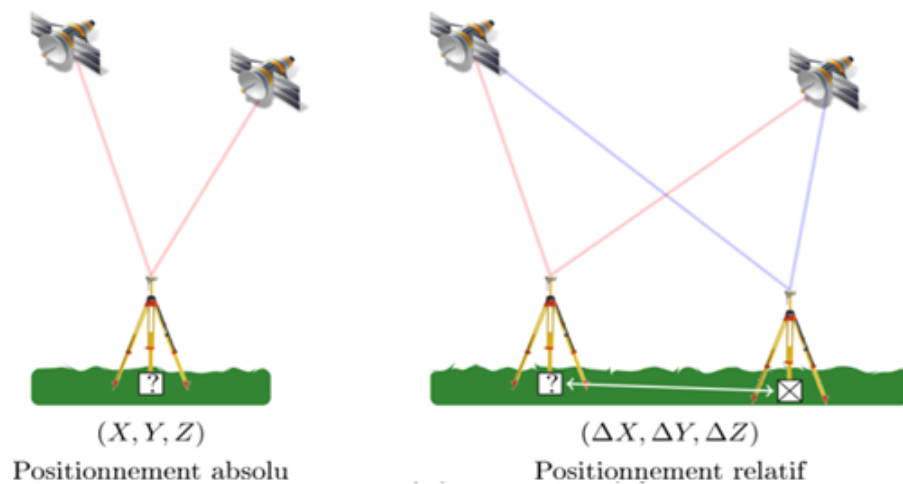


FIGURE I.1 – Positionnement absolu et différentiel. En positionnement absolu un récepteur calcule sa position uniquement à partir de ses observations alors qu'en positionnement relatif le récepteur utilise ses observations et les corrections ou observations envoyées par une station de base pour construire des doubles différences et calculer par la suite sa position. Source : [Bosser, 2017a].

- Le positionnement absolu réalisé à partir de mesures de code et/ou de phase issues d'un minimum de quatre satellites sur un seul récepteur. La position du récepteur est déterminée par multilatération directe à partir de ces mesures et des positions des satellites. Ce mode de positionnement offre l'avantage d'être autonome mais la précision du positionnement n'est pas bonne si les mesures sont uniquement des mesures de code (5 à 10 m). Avec la combinaison des mesures de code et de phase (positionnement PPP), on peut atteindre une précision similaire à celle du positionnement différentiel ;
- Le positionnement différentiel (ou relatif) pour lequel les observations sont utilisées pour calculer les lignes de base séparant l'antenne dont on veut déterminer la position et une ou plusieurs stations de référence connues en coordonnées. Ce mode de positionnement offre l'avantage d'éliminer les erreurs d'horloge récepteur et de réduire considérablement les autres sources d'erreurs affectant le positionnement pour les lignes de

bases courtes (35 à 50 km). Le traitement différentiel est réalisé par différenciation des observations entre deux satellites (simples différences), deux récepteurs (doubles différences) et éventuellement deux époques (triples différences). Avec l'élimination des erreurs, ce mode de positionnement permet d'atteindre une meilleure précision (2 à 5 cm) et l'utilisation courante du GPS en géodésie et en topographie GNSS.

Au début des années 2000, on observe un développement et une densification des réseaux GNSS permanents. Les observations issues de ces réseaux sont en général acquises et traitées en mode différentiel avec de plus en plus de données induisant ainsi à une augmentation des temps de calcul qui deviennent un facteur très limitant pour ce mode de positionnement.

Au milieu des années 1990, le Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA, proposait déjà une alternative [Zumberge et al., 1997], fournissant une précision proche du traitement différentiel avec une diminution significative du temps de calcul et une facilité de mise en œuvre : le Precise Point Positioning (PPP) pour Positionnement Ponctuel Précis.

I.2 Modélisation du Positionnement Ponctuel Précis

Le Positionnement Ponctuel Précis (PPP) est une version avancée de la technique de positionnement absolu qui utilise à la fois les mesures de phases (observations principales) et de pseudo-distance (observations secondaires) [Teunissen and Montenbruck, 2017] n'exigeant pas de station de base (référence connue en position), mais une connaissance précise des données d'orbite, de la position et des horloges des satellites. Contrairement au positionnement relatif, pour éliminer les erreurs de synchronisation des horloges et de position des satellites, le traitement PPP utilise des modèles précis des horloges et des orbites au lieu de faire la différenciation d'observation entre les récepteurs. Ce mode de positionnement permet une diminution sensible du temps de calcul puisqu'on ne traite que les observations d'une seule station. Il permet également de réaliser des mesures même dans des zones reculées non couvertes par les réseaux GNSS mais aussi de réduire le coût lié à l'instrumentation puisqu'un seul récepteur suffit pour se positionner.

Cette technique impose que toutes les erreurs affectant le positionnement qui s'éliminent par différenciation des mesures, en positionnement relatif, soient prises en compte de manière optimale, soit par l'utilisation de produits externes (les modèles), soit par estimation de ces erreurs comme paramètres d'ajustement de la solution GPS. Le tableau I.1 reprend les principaux termes d'erreurs, leur ordre de grandeur ainsi que les solutions pour les prendre en considération dans les traitements GNSS. Compte tenu du bilan d'erreurs présenté dans le tableau I.1, les expressions développées d'une observation de phase et de pseudo-distance sur le canal c pour un récepteur i observant un satellite j sont respectivement données par les équations I.1 et I.2 ci-dessous [Leandro, 2009] :

$$L_{ci}^j = \rho_i^j + C\Delta t_i^j + T_i^j - I_i^j - \lambda_c N_{ci}^j + dL_{wup,c} + dL_{rel,c} + B_{ci}^j + dr_{tides} + dr_c^j + dr_{ci} + \epsilon L_c \quad (I.1)$$

$$R_{ci}^j = \rho_i^j + C\Delta t_i^j + T_i^j + I_i^j + dR_{rel,c} + b_{ci}^j + dr_{tides} + dr_{ci} + \epsilon R_c \quad (I.2)$$

Avec :

- $\rho_i^j = \sqrt{(X^j - X_i)^2 + (Y^j - Y_i)^2 + (Z^j - Z_i)^2}$: la distance géométrique entre le récepteur et le satellite, où (X_i, Y_i, Z_i) est la position du récepteur et (X^j, Y^j, Z^j) celle du satellite ;

- $\Delta t_i^j = dt_i - dt^j$: l'écart entre le décalage d'horloge récepteur et satellite ;
- T_i^j et I_i^j : le retard troposphérique et ionosphérique ;
- $dL_{wup,c}$: le déphasage phase wind-up lié au changement de l'orientation relative des antennes émettrice et réceptrice en raison de la polarité circulaire des ondes portant les signaux GNSS ;
- $dL_{rel,c} = dR_{rel,c}$: décalage lié aux effets relativistes ;
- $B_{ci}^j = B_{ci} - B_c^j$: différence entre biais de phase récepteur et satellite ;
- $b_{ci}^j = b_{ci} - b_c^j$: différence entre biais de code récepteur et satellite ;
- N_{ci}^j : l'ambiguïté sur la mesure de phase ;
- dr_{tides} : déplacement du récepteur dû aux marées terrestre et surcharge océanique ;
- dr_c^j : variation du centre de phase de l'antenne émetteur (satellite) ;
- dr_{ci} : variation du centre de phase de l'antenne réceptrice ;
- ϵL_c et ϵR_c : les bruits de mesures de phase et de code.

	Erreur	Ordre de grandeur	Solution
Satellite	Orbites	1 m en temps réel 2.5 cm en temps différé	Produits IGS
	Horloges	5 ns en temps réel 0.2 ns en temps différé	Produits IGS
	Effet relativiste	[0.15 – 0.45] m	Modèle
	Centre de phase	3 m et variations de +/- 5mm	IGS-Fichier ANTEX de calibration
	Phase Wind-up	[2 - 4] cm	Modèle
Propagation	Troposphère	2.3 m au zénith	Modélisation et estimation
	Ionosphère	14 m au zénith	Produits externes ou combinaison linéaire
Récepteur	Centre de phase	Jusque 20 cm et variations de +/- 10 mm	IGS- Fichier ANTEX de calibration
	Marée solide	12 cm en vertical	Modèle (IERS 2010)
	Marée polaire	2.5 cm en vertical	Modèle (IERS 2010)
	Surcharge océanique	5 cm en vertical	Modèle (IERS 2010)
	Rotation de la terre	3 cm	Modèle (IERS 2010)

TABLE I.1 – Principaux termes d'erreurs des mesures GNSS, ordre de grandeur et méthode de prise en compte dans le traitement GNSS. (Source : [Morel et al., 2014a].)

La combinaison ionosphere-free sur les deux porteuses L_1 et L_2 permet d'éliminer l'effet ionosphérique. Même si elle permet d'éliminer le retard ionosphérique, la combinaison ionosphere-free présente l'inconvénient de dépendre d'une ambiguïté réelle. Pour résoudre les ambiguïtés en PPP, il est nécessaire de reformuler le modèle mathématique avec des équations d'observations dépendant d'une ambiguïté entière. Pour cela, trois autres combinaisons Wide lane , Narrow lane et Melbourne-Wübbena sont souvent utilisées.

Il existe plusieurs méthodes de résolution des ambiguïtés entières. Dans ce travail, le traitement des mesures GPS a été effectué à l'aide du logiciel GIPSY-OASIS II. Pour résoudre les ambiguïtés entières, ce logiciel utilise la méthode présentée par [Bertiger et al., 2010].

La résolution des ambiguïtés en PPP est un sujet crucial qui peut impacter les résultats du traitement. Ce paramètre sera utilisé par la suite pour analyser et valider la solution GPS de la campagne NAWDEX.

Le modèle mathématique du traitement PPP se résume donc à un problème d'optimisation qui peut être résolu, soit par moindres carrés, soit par filtrage de Kalman ou toute autre méthode d'optimisation avec comme paramètres à ajuster :

- La position du récepteur (X_i, Y_i, Z_i) ;
- Le décalage d'horloge récepteur dt_i ;
- Le retard troposphérique T_i^j ;
- Les biais de phase et de code $B_{ci}^j et b_{ci}^j$;
- Et l'ambiguïté N_{3i}^j ;

I.3 Modélisation de la troposphère

I.3.1 Importance de la correction de la troposphère pour le positionnement GPS

La majeure partie des erreurs affectant le positionnement par GPS peut être éliminée ou modélisée. Les mesures GPS restent donc entachées que par le délai troposphérique et les biais de phase et de code du récepteur et du satellite. La troposphère retarde la propagation des signaux GPS et dégrade principalement la composante verticale de la position. Il est donc important de quantifier cette dégradation afin d'en tenir compte lors du traitement GPS pour avoir un positionnement précis. Le délai (ou retard) troposphérique peut être décomposé en trois composantes : une composante sèche, appelée également retard hydrostatique, une composante humide et les termes de gradients troposphériques décrivant les variations azimutales de ce retard.

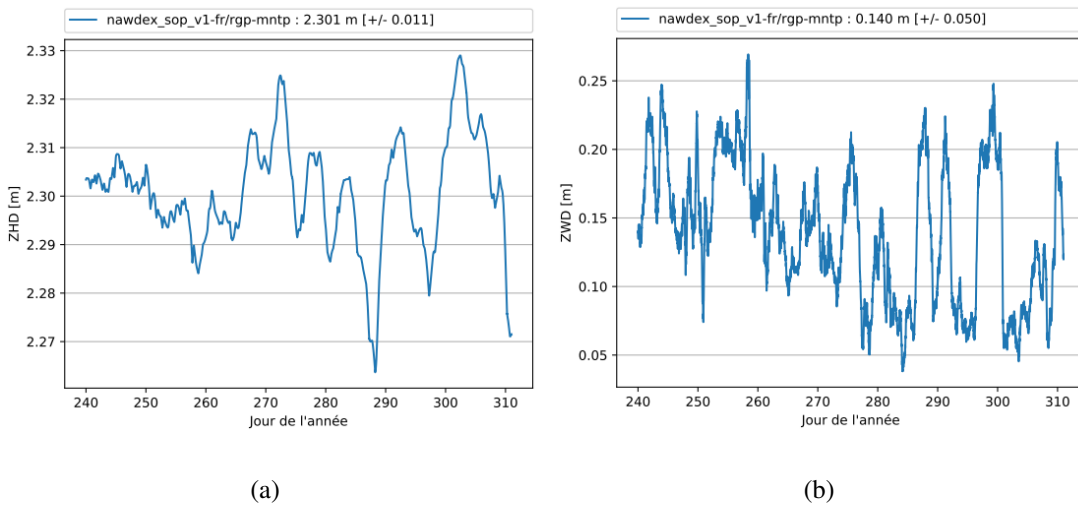


FIGURE I.2 – Variation temporelle des retards hydrostatique (I.2(a)) et humide (I.2(b)) de la station MNTP lors de la campagne NAWDEX (octobre à novembre 2016). Le retard humide est plus faible ($ZWD = 0.140\text{m}$) que le retard hydrostatique ($ZHD = 2.301\text{m}$) mais plus dispersé avec un écart type de 5 cm contre 1 cm pour la partie hydrostatique.

La composante hydrostatique qui représente environ 90% du retard troposphérique, soit environ

2.3 m, est due principalement à une réfraction du signal GPS au voisinage du sol. Elle est peu variable dans le temps (figure I.2(a)) et ne dépend que de la densité totale de l'air. La connaissance des données météorologiques de surface (la pression atmosphérique, la température et l'humidité) et de l'élévation du satellite permet de la modéliser de façon précise.

Par contre, la composante humide est très variable dans le temps (figure I.2(b)) et très complexe à modéliser car elle est très peu corrélée aux données météorologiques de surface et dépend du profil de densité de vapeur d'eau. Sa variation peut attendre 5 à 25 cm au cours d'une journée et dépend également de l'élévation du satellite.

Si les autres erreurs affectant les mesures GPS peuvent être modélisées et corrigées, la partie humide du retard troposphérique reste une limite si un positionnement millimétrique est exigé. Pour de tels positionnements, une estimation numérique de ce paramètre s'impose.

I.3.2 Paramètres troposphériques

I.3.2.1 Modèle mathématique du retard troposphérique

Le chemin optique d'un signal se déplaçant dans un milieu d'indice de réfraction n s'écrit :

$$L = \int_s n(s) ds \quad (\text{I.3})$$

Où ds est une longueur élémentaire le long de la trajectoire S du signal.

La réfraction du signal GPS lors de la traversée de la troposphère se traduit par un retard de propagation et une courbure de leur trajectoire. En négligeant l'effet de la courbure qui est généralement faible avec une valeur nulle pour une visée au zénith [Bosser, 2008], mathématiquement, ce retard est exprimé comme la différence entre chemin optique suivi par le signal et la distance géométrique ρ séparant le satellite et le récepteur GPS ; c'est-à-dire le chemin qu'aurait suivi le signal s'il se propageait dans le vide :

$$\Delta L = \int_s n(s) ds - \rho \simeq \int_s (n(s) - 1) ds \quad (\text{I.4})$$

On peut exprimer l'indice de réfraction par la réfractivité N :

$$N = 10^{-6}(n - 1) \quad (\text{I.5})$$

Et l'équation de définition du retard troposphérique devient :

$$\Delta L = 10^{-6} \int_s N ds \quad (\text{I.6})$$

Cette réfractivité peut être exprimée en fonction de la pression partielle de l'air sec (P_h en hPa),

de la température (T en degrés Kelvin), de la pression partielle de la vapeur d'eau présent dans l'atmosphère (P_w en hPa) et des facteurs de compressibilité de l'air sec (Z_d) et de la vapeur d'eau (Z_w) [Thayer, 1974] :

$$N = k_1 \left[\frac{P_h}{T} \right] Z_d^{-1} + k_2 \left[\frac{P_w}{T} \right] Z_w^{-1} + k_3 \left[\frac{P_w}{T^2} \right] Z_w^{-1} \quad (\text{I.7})$$

Avec :

- $k_1 = 77,604 \pm 0,014 K.mbar^{-1}$
- $k_2 = 64,790 \pm 0,080 K.mbar^{-1}$
- $k_3 = 3,776 \pm 0,004 K.mbar^{-1}$

Cette décomposition de la réfractivité en partie sèche et humide permet de faire la même chose pour le retard troposphérique. L'allongement apparent du trajet du signal GPS à la traversée de la troposphère ΔL qu'on note également STD (Slant Total Delay pour retard total oblique) peut donc être modélisé comme une composition de deux termes : l'une sèche (SHD : Slant Hydrostatic Delay) et l'autre humide (SWD : Slant Wet Delay) selon la relation suivante :

$$\Delta L = \Delta L_h + \Delta L_w \quad (\text{I.8})$$

On peut également écrire :

$$STD = SHD + SWD \quad (\text{I.9})$$

Le délai troposphérique $STD(e)$ dans une direction donnée est proportionnel au délai troposphérique ZTD dans la direction zénithale, à un terme angulaire près, décrivant sa dépendance à l'élévation (e) (figure I.3) :

$$STD(e) = ZTD.mf(e) \quad (\text{I.10})$$

Avec :

$$mf(e) = \frac{\Delta STD(e)}{\Delta ZTD} \quad (\text{I.11})$$

Où $ZTD = ZHD + ZWD$ est la somme des composantes sèche (ZHD) et humide (ZWD) du délai total au zénith, $mf(e)$ une fonction angulaire appelée fonction de projection et e l'élévation du satellite au-dessus de l'horizon. Généralement, on utilise une fonction différente pour la partie hydrostatique et humide.

L'expression du délai troposphérique devient alors :

$$STD(e) = ZHD.mf_H(e) + ZWD.mf_W(e) \quad (\text{I.12})$$

Enfin des gradients troposphériques peuvent être introduits dans la relation précédente pour décrire les variations azimutales du retard troposphérique. Ainsi, le retard troposphérique dans une direction azimutale Az et d'élévation e est modélisé par la relation suivante [Petit and Luzum, 2010] :

$$STD(e, Az) = ZHD.mf_H(e) + ZWD.mf_W(e) + [G_{NS} \cdot \cos(Az) + G_{EW} \cdot \sin(Az)].mf_G(e) \quad (\text{I.13})$$

Avec :

- G_{NS} : La composante Nord-Sud du gradient horizontal ;
- G_{EW} : La composante Est-Ouest du gradient horizontal ;
- $mf_G(e)$: Une fonction globale de projection à l'angle d'élévation ;
- $mf_W(e), mf_H(e)$: Les fonctions de projections des délais humide et hydrostatique.

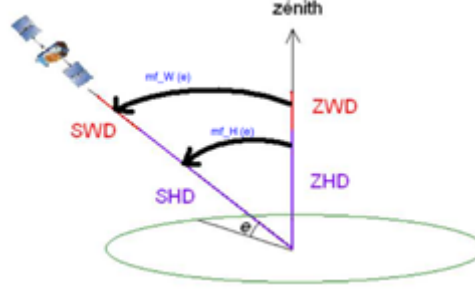


FIGURE I.3 – Projection du délai troposphérique au zénith grâce aux fonctions « mapping-function » dites fonctions de projection. Source : [Morel, 2017]

I.3.2.2 Les fonctions de projection

Comme déjà mentionné ci-dessus, les fonctions de projection permettent la description de la dépendance en élévation du retard troposphérique. C'est donc une fonction qui dépend de l'angle d'élévation du satellite. La plupart des fonctions de projections utilisées sont basées sur une fonction en $1/\sin(e)$ tel que défini par [Herring, 1974] :

$$mf(e, a, b, c) = \frac{1 + \left[\frac{a}{(1+b)/(1+c)} \right]}{\sin(e) + \left[\frac{a}{\sin(e) + (b/\sin(e) + c)} \right]} \quad (I.14)$$

Où a , b et c sont des paramètres dépendant de la température au niveau du sol, de la latitude et de la hauteur du récepteur. Les ensembles de coefficients (a_h, b_h, c_h) et (a_w, b_w, c_w) respectivement pour les parties hydrostatique et humide permettent d'avoir une fonction de projection pour chacune de ces parties. Différents modèles de fonctions de projection ont été développés à partir de l'équation I.14 :

- NMF : Niell Mapping Fonction [Niell, 1996] ;
- IMF : Isobaric Mapping Fonction [Niell, 2000] ;
- VMF : Vienna Mapping Fonction [Boehm et al., 2006b] ;
- GMF : Global Mapping Fonction [Boehm et al., 2006a] .

I.3.2.3 Les gradients

En raison des conditions météorologiques, à la même angle d'élévation (e), le retard troposphérique varie avec la direction azimutale [Teunissen and Montenbruck, 2017]. Cette variation qui traduit les asymétries de l'atmosphère selon l'azimut est modélisée au premier ordre par des gradients horizontaux Nord-Sud et Est-Ouest.

En supposant que la variation de la réfractivité au sein d'une couche atmosphérique soit linéaire

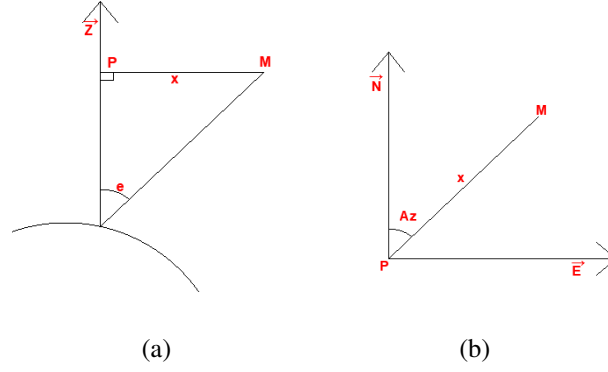


FIGURE I.4 – Modélisation des gradients atmosphériques : géométrie du problème : Vue de face [I.4(a)] et vue de dessus [I.4(b)] . Le point M est observé avec un angle d'élévation e à l'azimut Az . Source : [Bosser, 2008]

[Boehm and Schuh, 2012], on peut exprimer, d'après la figure I.4, la réfractivité au point M par la relation I.15 :

$$N(M) = N(P) + \vec{x} \cdot \vec{\nabla} N \quad (\text{I.15})$$

En tenant compte des équations I.6 et I.15 , on peut définir la partie du retard atmosphérique due aux gradients horizontaux (humide et hydrostatique) selon l'équation I.16 :

$$\Delta L_{Az} = 10^{-6} \int_s \vec{x} \cdot \vec{\nabla} N(s) ds \quad (\text{I.16})$$

La prise en compte de ces gradients horizontaux lors du traitement GPS permet de réduire les répétabilités d'environ 1 mm en planimétrie et de 0.5 mm sur la composante verticale [Miyazaki et al., 2003].

I.3.2.4 Calcul des retards troposphériques en traitement GPS

Lors du traitement GPS, la composante hydrostatique du délai zénithal ZHD peut être modélisée à l'aide de la relation de Saastamoinen. Elle ne dépend que de la pression au voisinage du sol (P_0), de la latitude du lieu (ϕ) et de la hauteur au-dessus du géoïde (h) :

$$ZHD = 2,2768 \cdot 10^{-3} \pm 1,5 \cdot 10^{-6} \left[\frac{P_0}{f(\phi, h)} \right] \quad (\text{I.17})$$

Avec :

$$f(\phi, H) = 1 - 0,00265 [\cos(2\phi) - 0,000285h] \quad (\text{I.18})$$

Par contre, la composante humide du délai troposphérique est difficile à quantifier. Des modèles atmosphériques standards sont utilisés pour avoir une première approximation du retard humide [Saastamoinen, 1972] en utilisant, soit des mesures météorologiques de surface comme pour la

partie sèche, soit des paramètres d'atmosphère standard au niveau de la mer. Le délai zénithal humide peut être approximé à l'aide de la relation suivante :

$$ZWD = 10^{-6} \int (k_2 \frac{P_w}{T} + k_3 \frac{P_w}{T^2}) dz \quad (\text{I.19})$$

L'emploi de ces modèles ne permet pas d'atteindre des précisions de l'ordre du centimètre [Doerflinger, 2001]. La valeur du délai zénithal humide est par conséquent ajustée lors du calcul de la position. A partir des valeurs ZHD et ZWD, on en déduit la valeur ZTD en additionnant le délai zénithal humide estimé et la partie hydrostatique, calculée selon la relation I.17.

$$ZTD = ZWD + ZHD \quad (\text{I.20})$$

II Le GPS pour la météorologie

De nos jours, le positionnement GPS a tendance à devenir un outil de recherche scientifique utilisé en météorologie pour la détermination du cycle de l'eau atmosphérique. La densification des réseaux GNSS permet de quantifier sur de très grandes étendues la vapeur d'eau disponible dans l'atmosphère à partir de la partie humide des délais troposphériques, ce qui peut servir d'intrant pour initialiser les modèles de prévision numérique du temps et ainsi faire de meilleures prévisions météorologiques.

II.1 Utilisation du GNSS en météorologie

L'application du GPS en météorologie est une technique de météorologie utilisant les propriétés de réfraction de la vapeur d'eau, de variation de la pression et de la température sur le signal venant des satellites du système de navigation par satellites (GPS).

A l'origine, le GPS était utilisé en météorologie pour le positionnement des mesures (positionnement des sondes de radiosondage) et comme une référence temporelle pour des mesures nécessitant une parfaite synchronisation. Mais aujourd'hui, il existe des applications pour la prévision numérique du temps et l'étude des changements climatiques dérivant de l'analyse des données GPS et se basant sur la propriété de la réfraction atmosphérique qui affecte les signaux GPS. On peut citer :

- Le système de radio-occultation (figure II.1) qui consiste à embarquer des récepteurs GPS sur des satellites en orbite basse (LEO), et à exploiter la mesure du retard des signaux émis par les satellites GPS, lorsque ces signaux traversent l'atmosphère. Ces mesures apportent une information sur les profils de la température et de l'humidité dans la basse stratosphère et la troposphère [[Doerflinger, 2001](#)].
- L'autre système permet, à partir de récepteurs GPS installés au sol, d'apporter de l'information sur la quantité de vapeur d'eau atmosphérique à la verticale du récepteur. L'implantation d'un réseau dense de stations GPS permet d'avoir une information sur la distribution spatiale de la vapeur d'eau atmosphérique et donc sur les dynamiques météorologiques qui en résultent.

Les deux systèmes se complètent bien. La radio-occultation permet d'obtenir de l'information à grande échelle (modèles globaux), alors qu'un réseau dense de récepteurs GPS au sol permet localement de restituer des détails de petite échelle de l'humidité atmosphérique. C'est ce deuxième système qui fait l'objet de ce travail.

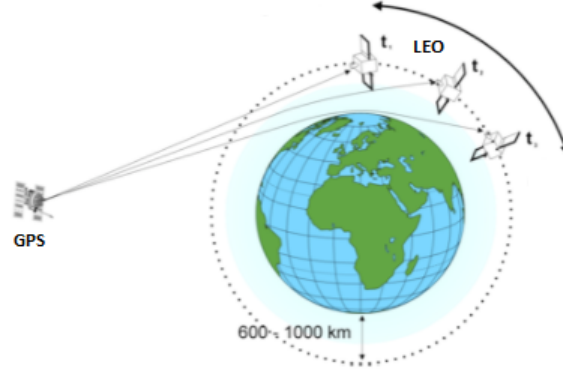


FIGURE II.1 – Principe de la mesure par radio-occultation.

La difficulté dans la prévision météorologique résulte en partie des fortes variations temporelles et spatiales de la vapeur d'eau atmosphérique. L'obtention et l'exploitation d'observations plus redondantes et de haute qualité sur l'humidité se sont avérées essentielles pour la prévision météorologique et la surveillance du climat.

C'est dans cette optique qu'une étude de EU COST Action ES1206 "Advanced Global Navigation Satellite Systems tropospheric products for monitoring severe weather events and climate (GNSS4SWEC)" a été menée [Guerova et al., 2016]. Cette action vise le développement de nouveaux produits troposphériques avancés sur l'estimation de la vapeur d'eau, sur un large éventail d'échelles temporelles et spatiales, afin de fournir des produits de référence. Cette récente étude révèle l'intérêt croissant de l'utilisation du GPS en météorologie.

II.2 Re-calcul GPS dans le cadre de campagne météorologique

Le contenu intégré en vapeur d'eau IWV au-dessus d'un point de la surface terrestre est la masse totale de vapeur d'eau contenue dans la colonne atmosphérique de section unité située à la verticale de ce point. Si $\rho_w(z)$ est la densité de la vapeur d'eau à l'altitude z , on exprime IWV par la relation :

$$IWV = \int_z \rho_w \cdot dz \quad (\text{II.1})$$

Lors du traitement GPS, les paramètres atmosphériques ajustés sont le délai zénithal total (ZTD) ainsi que les gradients horizontaux. A partir de ce délai zénithal total (ZTD) ajusté, une valeur du délai zénithal humide (ZWD) est calculée (équation I.20). Le contenu intégré en vapeur d'eau (IWV) est proportionnel à cette quantité ZWD à un facteur près K [Bevis et al., 1992]. A partir de la relation I.19 on peut écrire :

$$\begin{aligned} ZWD &= 10^{-6} \int_z \left(k_2 + \frac{k_3}{T_z}\right) \frac{P_w}{T_z} dz \\ ZWD &\simeq 10^{-6} \cdot \left(k_2 + \frac{k_3}{T_m}\right) \cdot R_w \int_z \rho_w \cdot dz \end{aligned} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

- R_w : la constante spécifique de la vapeur d'eau ;
- T_m : la température moyenne de la colonne d'air au dessus du récepteur GPS définie par :

$$T_m = \frac{\int_z \frac{P_w}{T_z}}{\int_z \frac{P_w}{T_z^2}}; \quad (\text{II.3})$$

[Bevis et al., 1992] propose une formule de T_m avec une couverture terrestre globale à partir de la température au sol :

$$T_m = 70.2 + 0.72T_{sol}; \quad (\text{II.4})$$

En posant $1/K = 10^{-6} \cdot (k_2 + \frac{k_3}{T_m}) \cdot R_w$, on peut écrire, à partir des relations II.1 et II.2, la formule exprimant le contenu intégré en vapeur d'eau en fonction du retard zénithal humide :

$$IWV[kg.m^{-2}] = K.ZWD[mm] \quad (\text{II.5})$$

Le coefficient de proportionnalité K est de l'ordre de $1/6.5$ [Bosser et al., 2009]. Il dépend essentiellement du profil de température au dessus du point considéré.

II.3 Adéquation avec le GPS

Depuis le début des années 1990, un grand nombre d'études de comparaison des contenus intégrés en vapeur d'eau issues des modèles météorologiques et celles résultant des conversions des retards troposphériques au zénith issus du traitement GPS ont été réalisées. Parmi les plus récentes de ces études, on peut citer [Kačmařík et al., 2017], [Bock et al., 2016], [Bock, 2014] et [Ning et al., 2011]. Bien que ces études présentent parfois des écarts variables de biais et des écarts types, elles arrivent toutes à la même conclusion : une bonne cohérence entre ces deux jeux de données.

Ces intercomparaisons réalisées entre les IWV estimés par GPS et des observations météorologiques ont permis de valider les estimations IWV des GPS en évaluant leurs exactitudes entre 1 et $2 kg.m^{-2}$ (soit environ 6,5 et 13 mm de ZWD) mais aussi de mettre en évidence des erreurs sur les autres techniques de mesure.

III Qualité de la solution GPS NAWDEX

III.1 Introduction

Dans le cadre de la campagne NAWDEX, des observations de plus de 1300 stations GPS permanentes réparties sur l'arc Atlantique Nord ont été récupérées et recalculées en post-traitement afin de récupérer l'information sur les retards troposphériques zénithaux ZTD. Il est important de s'assurer à l'avance de la bonne qualité de l'information GPS avant de l'utiliser en prévision numérique du temps.

Cette partie se focalise sur le traitement ainsi que sur l'analyse et la validation des résultats post-traitement des observations de la campagne NAWDEX. Après cette analyse de la qualité intrinsèque du traitement, une comparaison des valeurs des séries ZTD issue du traitement GPS, avec celles des modèles classiques utilisés en prévision météorologique, sera effectuée afin de mettre en évidence l'aptitude des données de la campagne à être utilisées en prévision numérique du temps.

III.2 Traitement des données de la campagne NAWDEX

Le traitement a préalablement été effectué en mode PPP à l'aide du logiciel GIPSY-OASIS II v6.4. Les mesures GPS enregistrées par les 1367 récepteurs placés au sol comportent des signaux de phase et de code émis par les satellites. Leur traitement repose sur l'estimation de paramètres (position, retards troposphériques au zénith, gradients horizontaux des retards troposphériques etc) à l'aide d'une méthode d'optimisation d'un système d'équations d'observations de phase et de code.

Les données de la campagne NAWDEX ont été acquises sur une période de 71 jours à partir du 27 août jusqu'au 05 novembre 2016 sur des sessions de 24 heures, démarrant à 0 h UTC le jour J et finissant à 0 h UTC le jour J + 1 avec un pas d'échantillonnage de 5 minutes. Lors du traitement, une position par jour et trois paramètres troposphériques (ZWD, et deux gradients horizontaux) toutes les 5 minutes ont été estimés. Le traitement est réalisé avec l'environnement Gipsy-Oasis II basé sur le noyau *my_goa* qui a été développé par [\[Bossier, 2017b\]](#).

La première étape du traitement consiste à initialiser l'environnement Gipsy-Oasis II. Il s'agit d'indiquer au logiciel les chemins des répertoires qui vont être utilisés par le logiciel lors du traitement. Il s'agit :

- du répertoire GOA d'installation du logiciel ;
- du répertoire GOA_VAR de données et métadonnées de GIPSY-OASIS ;

- du répertoire GOA_WRK contenant les arborescences des fichiers de traitement ;
- du répertoire GOA_DAT contenant les fichiers de données d'orbites, de troposphère et les fichiers RINEX d'observations ,
- et des répertoires GOA_TMP, GOA_BIN, GOA_LIB_PERL et GOA_LIB_PYTH contenant respectivement les fichiers temporaires utilisés à différentes étapes de la préparation et de l'analyse des données, les scripts constituant le noyau et les librairies perl et python du noyau.

L'initialisation renseigne également sur la disponibilité des produits qui seront utilisés pour les éphémérides (JPL) et les modèles atmosphériques. On travaille, ici, avec des données de l'IGS. Après l'initialisation de l'environnement de travail, il faut créer une étude par la commande **mk_work** en précisant la date du début des observations à traiter. Il s'agit à cette étape de créer un dossier qui contiendra l'ensemble des paramètres et les résultats de traitement.

Ensuite, un nouveau calcul est créé par la commande **mk_job** tout en précisant les paramètres de traitement. Il faut indiquer à cette étape les noms des stations à traiter, la période du traitement (-d), l'angle de coupure (-c), les modèles des fonctions de projection(-mf) et des retards troposphériques (-zhd -zwd), le repère de référence (-nf) et le cas échéant le type de pondération des observations et les valeurs des marches aléatoires des retards humides et des gradients si ces derniers ne sont pas pris par défaut. Le tableau III.1 montre les valeurs des paramètres utilisés lors du traitement des données de la campagne NAWDEX.

Paramètre	Description	Valeur
[-co]	Angle de coupure	7°
[-rate]	Résolution de la solution	300sec
[-mf]	Fonction de projection	VMF
[-zhd]	ZHD	VMF
[-zwd]	ZWD a priori	VMF
[-rw_zwd]	Marche aléatoire sur ZWD	5mm/ $\sqrt{h}$
[-rw_grd]	Marche aléatoire sur les gradients	0.5mm/ $\sqrt{h}$
[-sig_zwd]	Précision a priori sur ZWD	10 ⁻¹ m
[-sig_grd]	Précision a priori sur les gradients	10 ⁻² m
[-wght_val]	Pondération des observations	10 ⁻² m

TABLE III.1 – Les paramètres du traitement PPP à l'aide de Gipsy-Oasis II v6.4. utilisés pour le calcul NAWDEX.

Après le paramétrage, le traitement peut être lancé en utilisant la commande **run_ppp**. Une fois le traitement terminé, on récupère la solution issue du traitement par la commande **get_sol**, le rapport de traitement par la commande **mk_sum** ainsi que les graphes visualisant le résultat par **mk_plot**. Le détail du traitement avec toutes les commandes utilisées est présenté en annexe.

III.3 Qualité intrinsèque de la solution GPS NAWDEX

Bien que la vérification de la qualité et le rejet des valeurs aberrantes soient réalisés au cours du traitement GPS, un regard et une analyse des résultats sont toujours nécessaires pour détecter et éliminer les erreurs grossières résiduelles après ajustement des paramètres.

Avant de passer à l'analyse paramètre par paramètre, une sélection globale des résultats du traitement GPS a été effectuée afin d'alléger les traitements ultérieurs. Cette sélection consiste à identifier et éliminer les stations qui ont été analysées plusieurs fois car appartenant à plusieurs réseaux GNSS. Des stations ne présentant pas des données assez redondantes ont été aussi mises de côté.

La qualité des séries ZTD dépend de la précision de ZHD a priori utilisé. La valeur ZHD dépend elle aussi de la valeur de la pression mais aussi de la valeur approchée de la hauteur qui doit donc être vérifiée. De plus, il est important d'effectuer la vérification et l'élimination des mesures présentant des valeurs aberrantes de taux de résolution des ambiguïtés entières, des répétabilités de la position (et surtout la position verticale), des résidus de la phase post-traitement etc qui peuvent influencer la qualité des ZTD. En référence à [Bock et al., 2016], une série de filtres, dont l'objectif principal est justement de fournir un ensemble des données ZTD propre et fiable qui peut être converti en IWV et utilisé en prévision numérique du temps, a été mise en place.

III.3.1 Ecarts aux positions à priori

Le traitement PPP à l'aide du logiciel GIPSY-OASIS II v6.4 est basé sur le principe d'optimisation par moindres carrés. Il s'agit d'un ajustement des paramètres à partir des valeurs approchées. La valeur approchée du retard troposphérique au zénith (ZTD) est déterminée par un calcul a priori de sa partie hydrostatique (ZHD) et l'approximation de sa partie humide (ZWD) à partir des formules I.17 et I.19 de Saastamoinen (section I.3.2.4). Afin de minimiser les effets du défaut de linéarité sur la solution ajustée, il est nécessaire que la solution approchée choisie soit suffisamment proche de la solution ajustée.

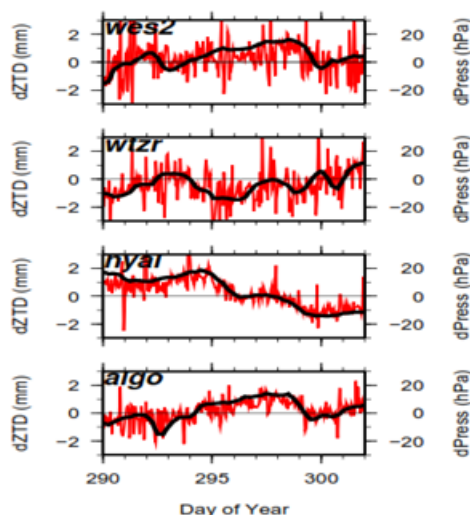


FIGURE III.1 – Sensibilité du retard troposphérique au zénith à la variation de pression. On constate que la variation des séries ZTD suit celle de la pression à un facteur prêt, 0.2 mm/hPa. Source : [Tregoning and Herring, 2006].

De plus, la partie hydrostatique de retard troposphérique est une fonction qui dépend de la pression de l'air et de la hauteur au-dessus du géoïde (Equation I.17). Or la pression de l'air est variable dans l'espace et surtout en fonction de l'altitude. Il est donc compréhensible qu'à

deux hauteurs très différentes ou à deux positions planimétriques très différentes, les mesures de pression ne peuvent être les mêmes.

Une grande différence entre les positions a priori et celles ajustées implique une erreur sur la mesure de pression (variation de la pression en fonction de la hauteur) et de fait, une erreur sur l'estimation de ZHD. [Tregoning and Herring, 2006] montrent, qu'une erreur de 20 hPa sur la mesure de pression au niveau de l'antenne induit une erreur de 4 mm sur l'estimation de ZTD (voir figure III.1).

Cela a conduit à vérifier les écarts entre les positions approchées des stations calculées en mode SPP et celles ajustées par le logiciel GIPSY-OASIS II. Compte tenu des informations tirées de l'article précédemment cité, un seuil d'écart entre les positions (verticales) approchées et ajustées a été fixé à 10 m et les stations avec un écart supérieur à ce seuil ont été mises de côté. De tels écarts peuvent induire des incertitudes de 2 mm sur la composante verticale.

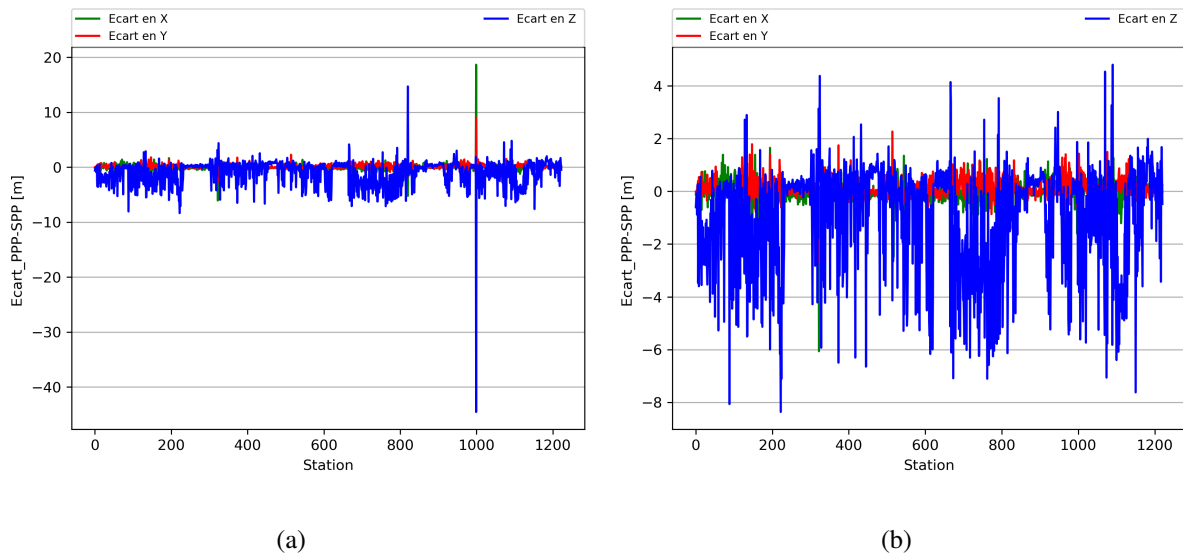


FIGURE III.2 – Écart entre les positions approchées (SPP) et celles estimées (PPP) avant (figure III.2(a)) et après filtrage (figure III.2(b)).

La figure III.2 montre les écarts de positions avant et après le filtrage sur toutes les stations du réseau NAWDEX. On constate qu'avant filtrage, certaines stations présentent de forts pics allant jusqu'à 40 m avec un impact de ± 4 mm sur l'estimation des ZTD. Ces pics ont été éliminés au détriment de deux stations du réseau.

Id Station	Écart en X (m)	Écart en Y (m)	Écart en Z (m)
dunn_us_ngs	-5.225	-1,676	14,692
gaau_us_ngs	18,647	8.994	-44,548

TABLE III.2 – Écarts entre les positions approchées et celles estimées des stations filtrées

À l'issue de travail, un nouveau traitement sera relancé pour ces deux stations avec comme valeurs approchées, les valeurs du premier traitement qui seront cette fois-ci, proche de la solution.

III.3.2 Les résidus quadratiques moyens

Cette partie s'intéresse aux résidus quadratiques moyens (RQM ou RMS en anglais) sur les observations issus de chaque station. Ces derniers nous renseignent sur la qualité du traitement des données GPS. Plus elle est grande, plus le modèle s'écarte des observations et moins la qualité du traitement est bonne.

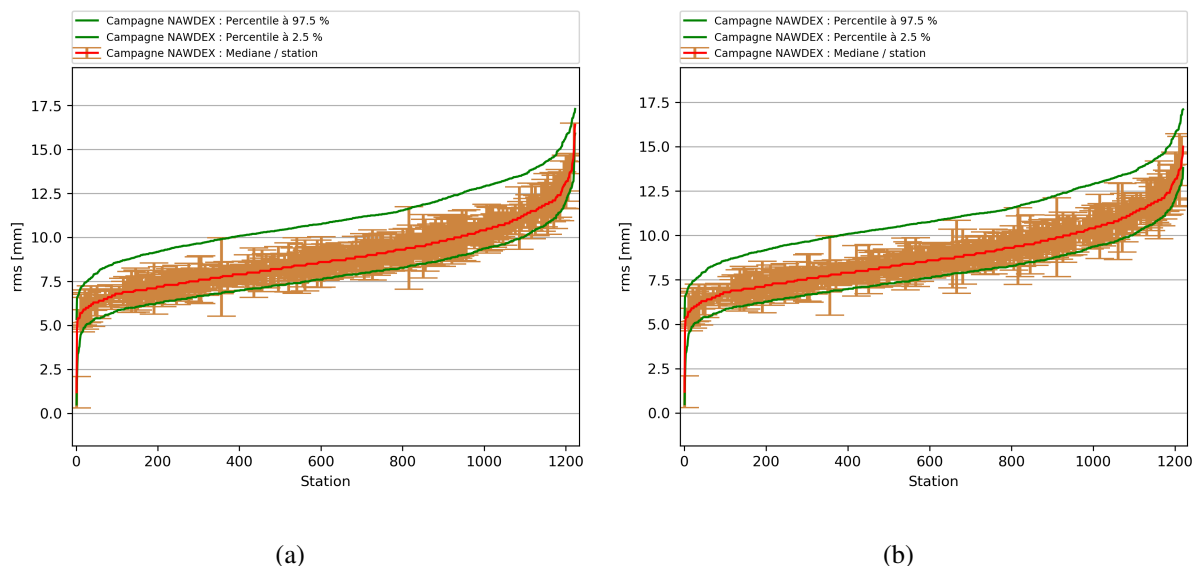


FIGURE III.3 – Percentiles et écarts types des résidus quadratiques moyens de toutes les stations de la campagne NAWDEX avant (figure III.5(a)) et après (figure III.3(b)) filtrage. Les lignes représentent respectivement les 97^{me}, 50^{me} (la médiane) et 2^{me} percentile, de haut en bas. Les stations sont ordonnées par ordre croissant des valeurs médianes des RMS.

La figure III.3 montre une dispersion variable des résidus avec des valeurs médianes variant entre 0 et 15 mm. La dispersion par session est assez faible comme le montre les valeurs des centiles. Seules quelques stations ont une valeur supérieure à 15 mm comme le montre la figure III.4.

Afin de garder que des données plus fiables, un seuil de 15 mm a été fixé de afin de mettre de côté toutes les stations avec un résidu supérieur à cette valeur. A l'issue de ce filtrage, trois stations ont été écartées du réseau NAWDEX.

La mauvaise qualité des RMS sur ces stations peut être due aux erreurs liées aux trajets multiples, à une mauvaise qualité du récepteur et de l'antenne GPS. Une analyse plus poussée de l'environnement et de l'état des récepteurs et des antennes de ces stations pourrait donner plus d'explication à ce phénomène.

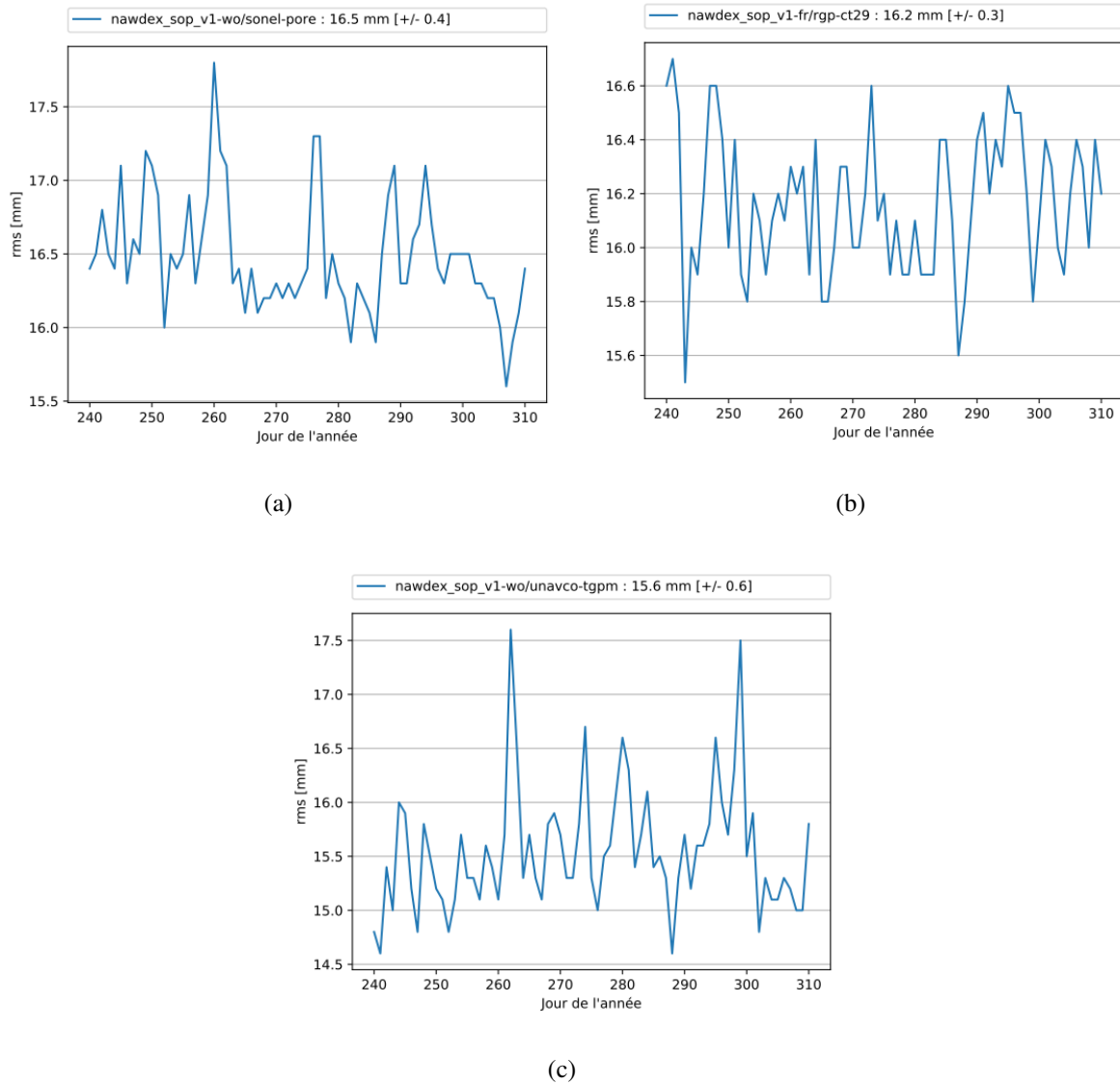


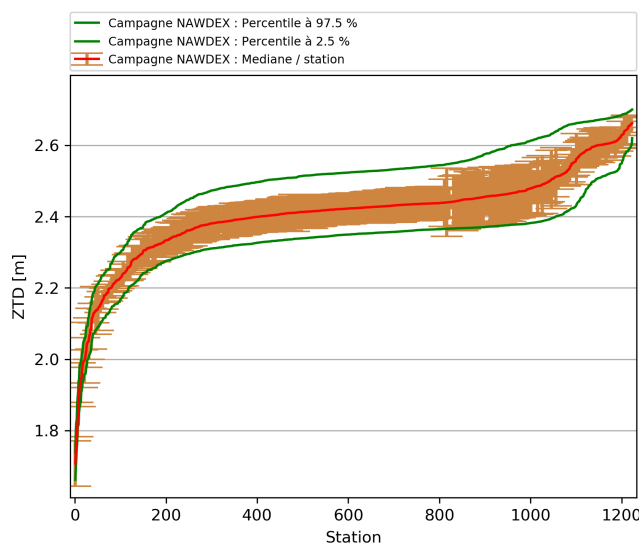
FIGURE III.4 – Séries temporelles des résidus des stations de la campagne NAWDEX avec un RMS supérieur à 15 mm.

III.3.3 Qualité des séries ZTD

Comme rappelé précédemment, le retard troposphérique au zénith est habituellement divisé en deux composantes :

- Une partie hydrostatique ZHD, liée à l'atmosphère en équilibre hydrostatique. Elle est peu variable et sa valeur est d'environ 2,3 m. Cette valeur est proportionnelle à la pression atmosphérique au voisinage de l'antenne GPS à une précision millimétrique [Bosser et al., 2009].
- La deuxième partie dit humide ZWD est beaucoup plus faible (≈ 30 cm) mais très variable avec des variations pouvant atteindre plusieurs centimètres sur 1 heure.

Par conséquent, la valeur maximale de séries ZTD devrait osciller autour de 2,6 m. Des valeurs des ZTD supérieures à 3 m paraissent suspectes et doivent être mises de côté.



(a)

FIGURE III.5 – Percentiles et écarts types des séries ZTD de toutes les stations de la campagne NAWDEX. Les lignes représentent respectivement les 97^{me}, 50^{me} (la médiane) et 2^{me} percentile, de haut en bas. Les stations sont ordonnées par ordre croissant des valeurs médianes des ZTD.

La figure III.5 montre qu'aucune station n'atteint la valeur seuil de 3 m. Ce test n'a donc supprimé aucune station de la campagne. Par contre, on observe des valeurs très faibles de ZTD (en dessous de 2 m) qui correspondent à des stations de la région polaire plus ou moins sèche (voire section V.1). Même si les valeurs des séries ZTD paraissaient cohérentes, une autre procédure de vérification impliquant les erreurs formelles sur les valeurs des ZTD a été effectuée.

Les valeurs fortes des erreurs formelles sont dues à une mauvaise configuration du réseau des satellites ou à une mauvaise redondance dans les observations. Le test consiste à identifier et à mettre de côté toutes les stations dont l'erreur formelle sur le ZTD est supérieure à 6 mm. Cette valeur seuil a été inspirée d'une analyse similaire sur les données GPS faite par [Bock et al., 2016].

A l'issu de ce test, deux stations ont été identifiées et supprimées des données à utiliser ultérieurement. Les séries temporelles de ces deux stations (figure III.7) montrent des erreurs formelles d'ordre de 6,4 mm de moyenne pour la station CBRA du réseau RENEP avec une dispersion de $\pm 2,1$ mm (III.7(a)) et 22,4 mm de moyenne pour la station VAL1 du réseau SONEL avec une dispersion de $\pm 13,2$ mm (III.7(b)) alors que le reste des stations du réseau présentent une erreur formelle plus ou moins stable et d'ordre de 1,5 mm (figure III.6).

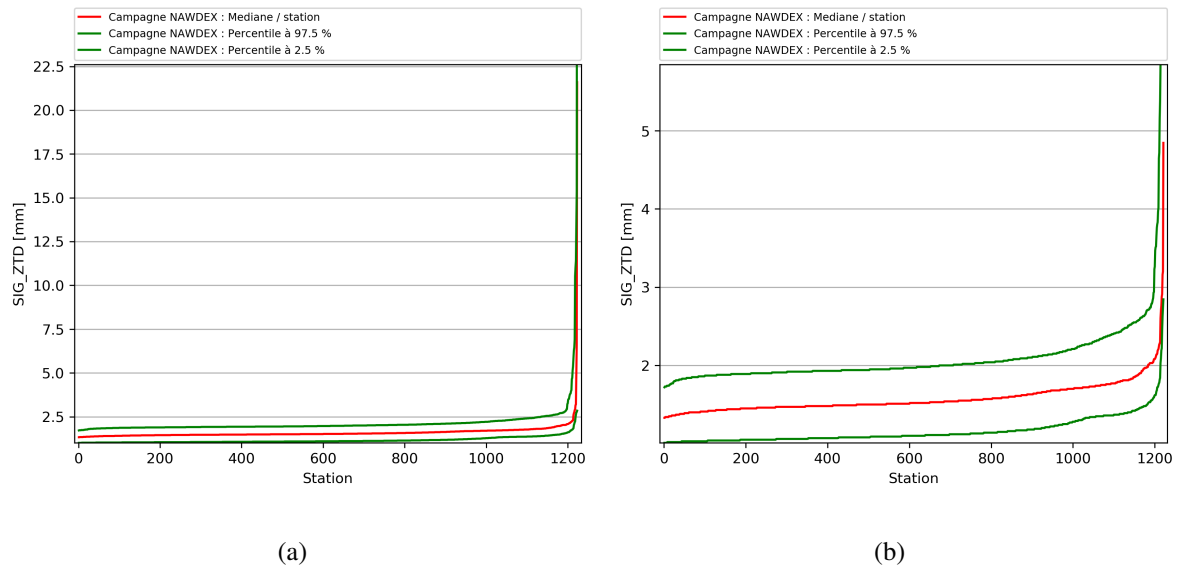


FIGURE III.6 – Percentiles des erreurs formelles sur ZTD de toutes les stations de la campagne Nawdex (Avant filtrage : figure III.6(a), Après filtrage : figure III.6(b)). Les lignes représentent respectivement les 97^{me}, 50^{me} (la médiane) et 2^{me} percentile, de haut en bas. Les stations sont ordonnées par ordre croissant des valeurs médianes des erreurs formelles.

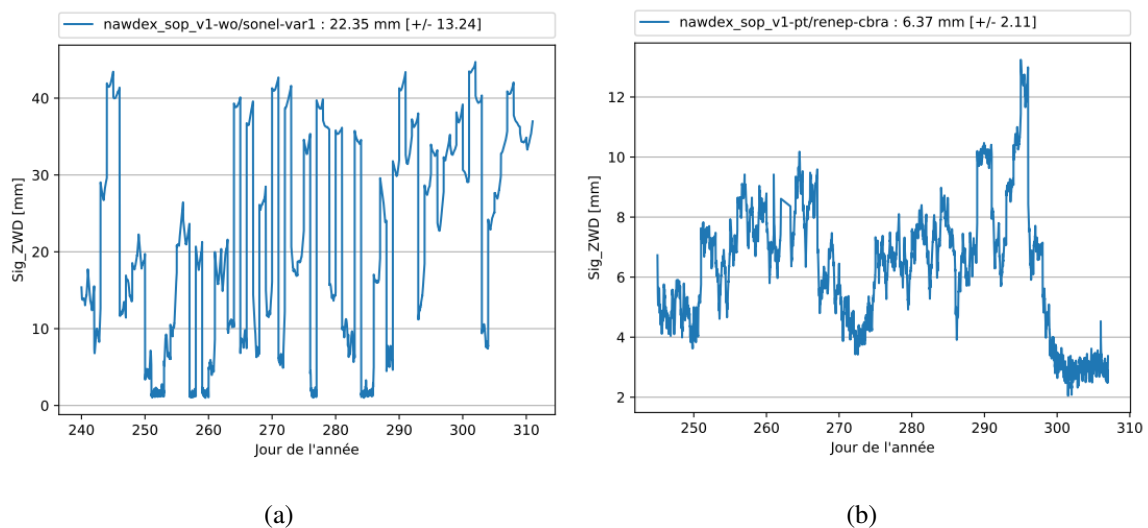


FIGURE III.7 – Séries temporelles des erreurs formelles des stations avec une moyenne supérieure à 6 mm.

III.3.4 Taux de résolution des ambiguïtés

Le taux de résolution des ambiguïtés est un autre indicateur de la bonne qualité de la solution GPS. Plus il est élevé, meilleure est la qualité de la solution. Un taux supérieur à 90% serait un bon indicateur. Sont considérés dans ce travail, des taux de résolution avec une erreur d'estimation inférieure à 2 cm.

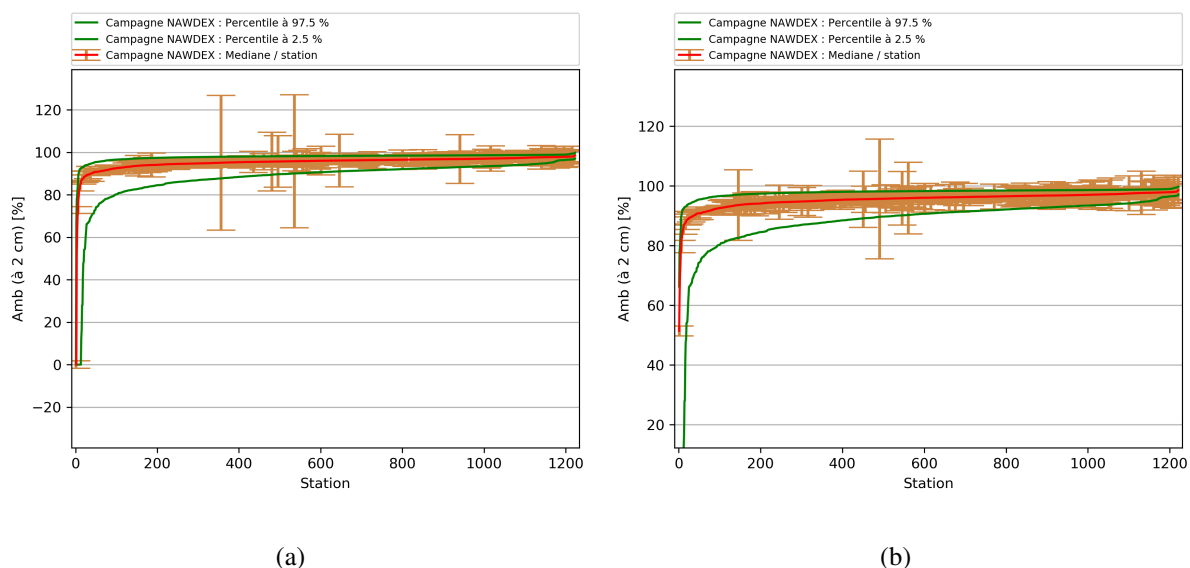


FIGURE III.8 – Percentiles et écarts types des taux de résolution des ambiguïtés de toutes les stations de la campagne Nawdex. Les lignes représentent respectivement les 97^{me}, 50^{me} (la médiane) et 2^{me} percentile, de haut en bas. Les stations sont ordonnées par ordre croissant des valeurs médianes des taux de résolution des ambiguïtés.

Après analyse des taux de résolution des ambiguïtés des stations du réseau d'étude, il a été constaté qu'une des stations de la campagne présente un problème avec un taux de résolution d'ambiguïtés nul (Figure III.8(a)). Cette station présente également une forte dispersion sur le positionnement vertical avec un écart type élevé de 26,6 mm. L'analyse des observations montre que cette station ne présente que seulement deux observations d'où ce problème.

Pour identifier et éliminer d'autres stations pouvant présenter le même problème, un test de recherche des stations avec un taux de résolution des ambiguïtés inférieur à 20% a été construit (même valeur seuil que [Bock et al., 2016]). Après ce test, la plupart des stations présentent des taux de résolution des ambiguïtés supérieurs à 80% (Figure III.8(b)).

III.3.5 Répétabilité de la position verticale

En raison de la corrélation importante entre retard à la propagation et hauteur GPS, il est nécessaire de vérifier aussi la qualité du positionnement vertical du réseau d'étude en s'intéressant à sa dispersion [Bossert, 2008]. L'analyse des écarts types sur la position verticale révèle une station avec un écart type énorme dépassant 40 m (figure III.9(a)) alors que les autres écarts sont autour de 5 à 10 mm en général. De telles stations paraissent suspectes et doivent être mises de côté.

Pour cela, les écarts types sur la position verticale sont analysés afin de permettre l'identification et l'élimination des stations avec une valeur d'écart type supérieur à 30 mm. Les séries temporelles de la figure III.10 montrent des exemples d'une forte dispersion de la position verticale au cours du temps sur les stations filtrées

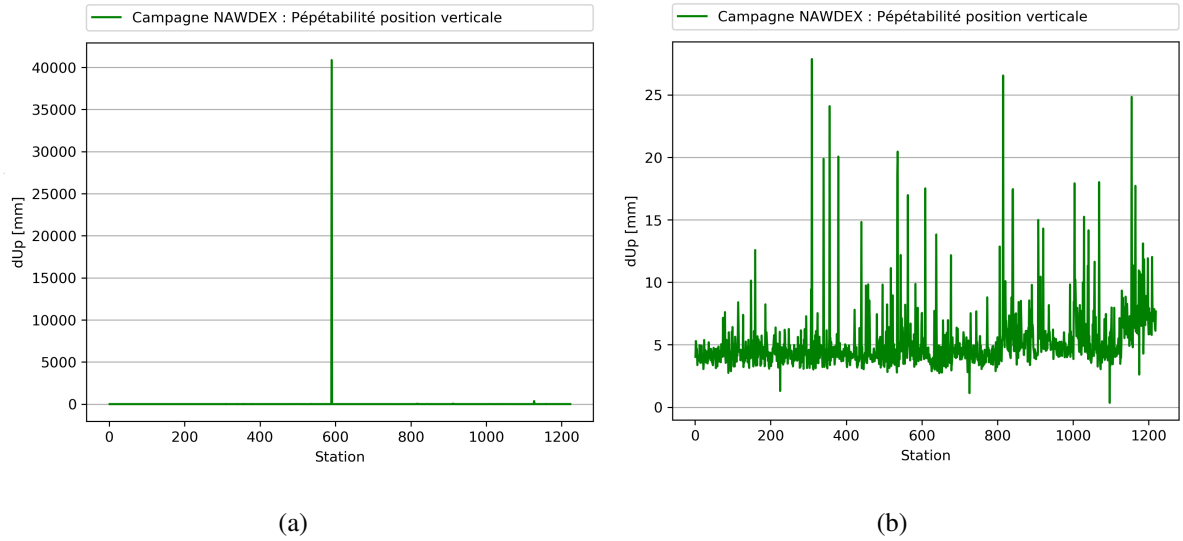


FIGURE III.9 – Écarts types sur la position verticale avant (figure III.9(a)) et après (figure III.9(b)) filtrage. On remarque des stations avec des écarts types de plus de 40 m avant filtrage.

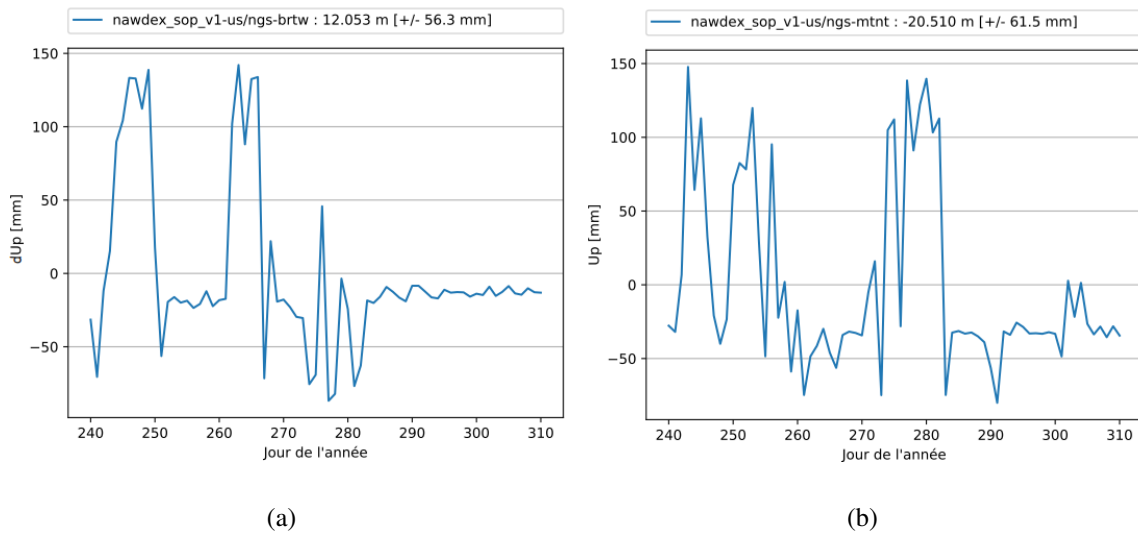


FIGURE III.10 – Série temporelle des écarts type des trois stations présentant une forte dispersion sur la position verticale.

III.3.6 Bilan

Une liste noire de 154 stations a été constituée sur base de séries de tests ci-haut cités. Parmi ces stations, seules 11 (moins de 1%) ont été éliminées à cause de la mauvaise qualité de certains paramètres de sortie du traitement (taux de résolution des ambiguïtés, RMS, ZTD, répétabilité etc). A l'issue de ce stage, l'analyse des données de ces 11 stations sera approfondie pour tenter de les conserver en gardant que la partie des observations ne présentant pas de problème. C'est le cas de la station BRTW (figure III.10(a)) où on peut récupérer que les observations à partir de la 285^{me} journée. Le reste des stations éliminées sont soit des stations reprises plus d'une fois (138 stations) ou soit des stations présentant peu d'observations (5 stations).

Notons que la plupart des valeurs limites utilisées comme critère de rejet pour la vérification des données sont similaires à celles utilisées par [Bock et al., 2016]. Ces valeurs dépendent du logiciel GIPSY-OASIS II et sont applicables pour les données traitées par ce logiciel. La méthodologie peut cependant être transposée avec des valeurs seuils différentes [Bock et al., 2014].

Paramètre	Critère	Nombre de station
Écart SPP-PPP	> 10m	2
RMS	> 15 mm	3
ZTD	> 3 m	0
σ ZTD	> 6 mm	2
Ambiguïtés	< 20 %	1
Répétabilité	> 30 mm %	3

TABLE III.3 – Synthèse des stations rejetées et leurs critères de rejet.

III.4 Évaluation de la solution à partir des données externes

Cette partie compare les valeurs des séries ZTD estimées lors du traitement GPS et celles des données externes pour évaluer la cohérence entre ces différents jeux de données. Cette comparaison a pour but de mettre en évidence la fiabilité des données GPS de la campagne à être utilisées dans la prévision numérique du temps. La comparaison a été effectuée sur les séries ZTD des 1213 stations validées par le premier test sur la qualité du traitement. A ce stade, l'écart par rapport aux données des modèles externes est considéré comme exempté de toute erreur de traitement et est interprété comme un biais entre ces deux jeux de données en considérant les données externes fiables. Notons cependant que les données externes utilisées ne sont pas vraiment exemptées d'erreurs systématiques. Les résultats des comparaisons sont à considérer avec précaution.

III.4.1 Comparaisons de la solution GPS avec les observations des RS_UWYO

III.4.1.1 Recensement des RS et comparaison des observations

L'université du Wyoming (UWYO) des États-unis diffuse des données de radiosondages sur internet (weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html). En se basant sur le réseau GPS et les dates d'acquisition de la campagne NAWDEX, des données des séries IWV correspondant aux radiosondages présents dans la région concernées par la campagne NAWDEX ont été téléchargées et reconverties en séries ZTD, en utilisant la formule empirique de [Bevis et al., 1992] (équation II.5). Ces données des RS sont à basse résolution avec moins de 150 points du sol jusqu'à 35 km.

Au total, quatre-vingt-dix stations de radiosondages ont été recensées. Les données de ces radiosondages ont été récupérées sur la même période que les acquisitions GPS de la campagne. Les positions des radiosondages recensés ne correspondaient pas avec celles des stations GPS.

Une fonction de recherche, pour chaque radiosondage, de la station GPS la plus proche s'avère donc indispensable.

Cette correspondance doit se faire sur un domaine limité dans l'espace afin de minimiser les erreurs liées à la variation spatial de l'humidité atmosphérique (surtout en fonction de l'altitude). La recherche a été donc limitée à un rayon de 50 km en planimétrie et à une différence d'altitude de 50 m entre la station GPS et la station de lancement.

[Tregoning and Herring, 2006] ont montré que la variation d'altitude a un impact sur l'estimation des ZTD. Les données des radiosondages collectées, ont été donc corrigées de cette variation en interpolant les valeurs des séries ZTD des observations des radiosondages à la hauteur de l'antenne GPS correspondante par la formule de [Steigenberger et al., 2009]. Cette interpolation consiste à calculer l'impact de la variation de la hauteur sur les ZTD.

Enfin, une synchronisation de ces deux jeux de données a été effectuée afin d'éviter des biais liés à une variation temporelle de l'humidité, puisque la résolution temporelle des données comparées n'est pas la même. Une mesure toutes les 5 minutes pour le réseau GPS et toutes les 12 heures pour les radiosondages. Cette synchronisation consiste donc à sélectionner que les mesures GPS correspondant à la même époque d'acquisition que les observations des radiosondages.

La correspondance des radiosondages avec les stations GPS a réduit le nombre de radiosondages. Seuls 45 radiosondages sur les 90 recensés ont été reliés à une station GPS et une première analyse des séries temporelles des ZTD issues de ces deux techniques a été effectuée sur les 45 stations.

III.4.1.2 Comparaison des ZTD issue des RS et du réseau GPS NAWDEX

A titre d'exemple, la figure III.11 montre un biais moyen de 13,3 mm avec une dispersion de ± 15 mm, un coefficient de corrélation de 0,836 et une pente d'ajustement linéaire de 0,709. On constate que le graphe des biais présente un pic très élevé avec un écart proche de 200 mm. Ce genre de pic est dû à une valeur aberrante présente dans les données des radiosondages car aucun contrôle préalable de qualité n'a été effectué sur ces données.

En se basant sur les propriétés des probabilités, un test de contrôle des séries ZTD issues des radiosondages a été mis en place afin de supprimer les valeurs aberrantes et enfin d'améliorer les statistiques de la comparaison.

Les biais de la comparaison suivent une loi normale de valeur moyenne égale à la moyenne des biais et d'écart-type égale à sa dispersion. Le test repose donc sur la règle de décision et est construit de façon à éliminer toutes les mesures dont l'écart à la valeur moyennes soit supérieur à γ fois l'écart type, avec γ le seuil de signification qui limite le domaine de rejet de l'hypothèse nulle (voir annexe C pour plus d'explication).

$$|x - \mu| > \gamma \cdot \sigma_{ZTDrad} \quad (\text{III.1})$$

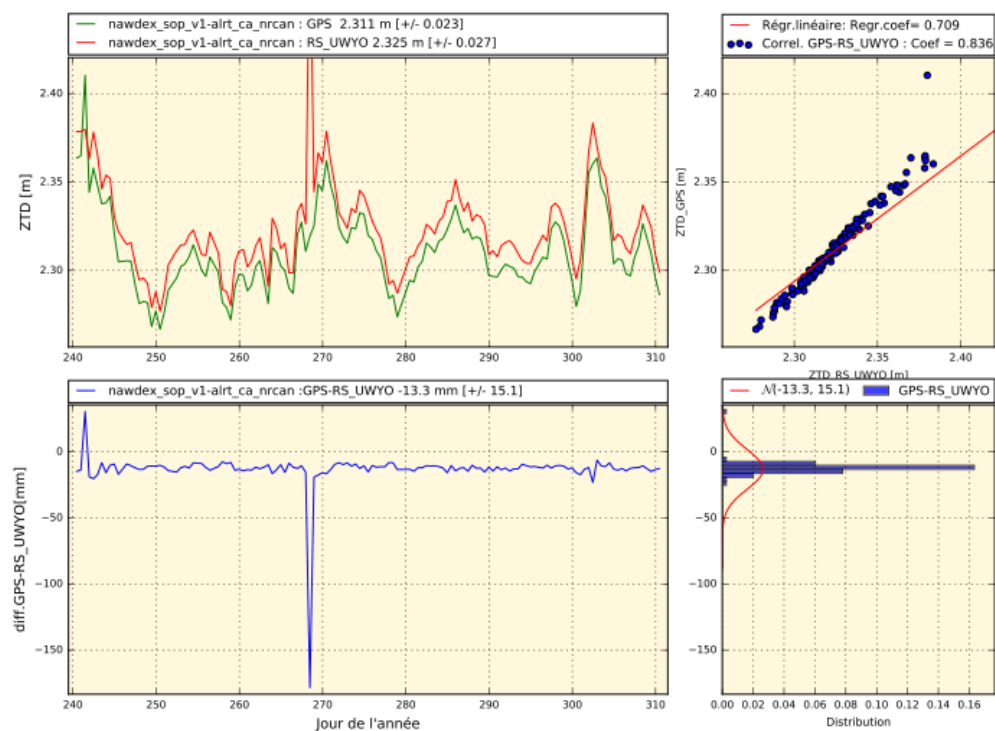


FIGURE III.11 – Évolutions et écarts des retards zénithaux totaux GPS et les observations issues des radiosondages de l’UWYO sur la station Alrt du réseau GNSS NRCAN du Canada avant filtrage .

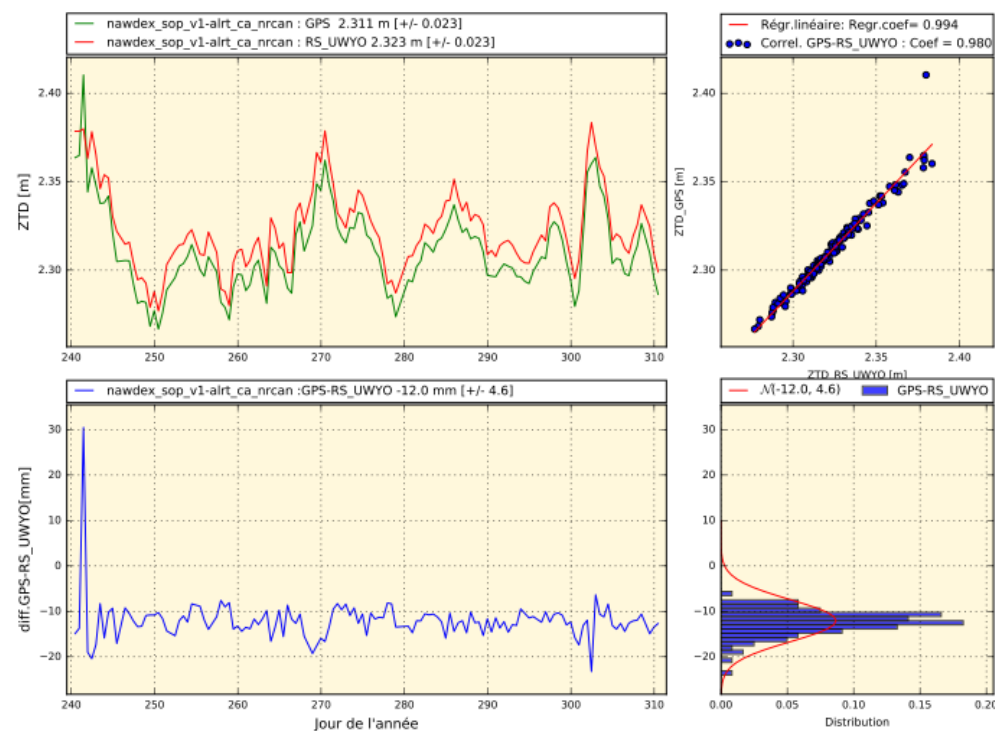


FIGURE III.12 – Évolutions et écarts entre les retards zénithaux totaux GPS et les observations issues des radiosondages de l’UWYO sur la station Alrt du réseau GNSS NRCAN du Canada après filtrage .

Les résultats après le filtrage (figure III.12) montrent une amélioration considérable des statistiques de la comparaison. La moyenne des écarts passe de 13,3 à 12 mm et sa dispersion passe de 15 à 4,6 mm. Les valeurs aberrantes peuvent donc fausser la comparaison d'où la nécessité d'un contrôle préalable de la qualité des données.

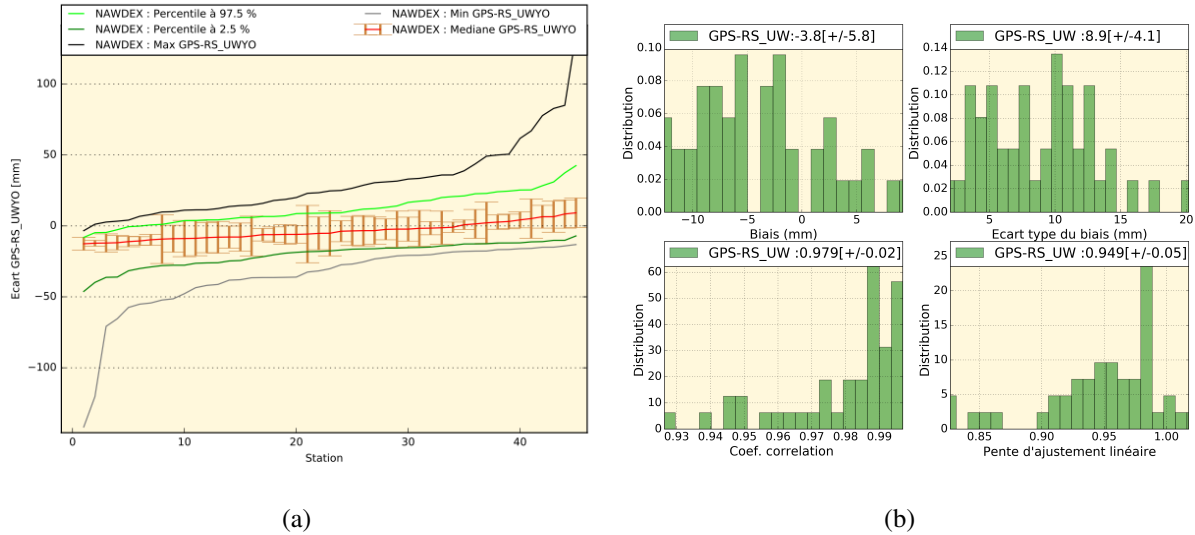


FIGURE III.13 – Percentiles et écarts types des écarts des ZTD GPS avec les observations des radiosondages de l'UWYO sur toutes les stations de la comparaison (figure III.13(a)). Les statistiques de comparaison des ZTD GPS avec les observations des radiosondages de l'UWYO sur toutes les stations de la comparaison durant la période acquisition de la campagne NAWDX (figure III.13(b)).

La figure III.13 illustre les écarts entre les retards humides GPS et les observations des radiosondages de l'UWYO sur les 45 stations retenues. La valeur médiane du biais varie de -12,6 mm à 9,2 mm avec un écart type de ± 2 à 20 mm. Cette variabilité avec des biais tantôt secs, tantôt humides est due en partie à des effets régionaux. Le réseau de la campagne s'étendant de la zone tropicale plus humide à la zone polaire plus sec, la comparaison comporte donc des biais secs et humides dont les amplitudes sont fonction des valeurs de ZTD de la région considérée. L'analyse plus complète de ce genre d'effet sera reprise plus loin dans la section V qui traite la visualisation spatiale des ZTD. Toutefois, la valeur moyenne du biais reste faible, -3,8 mm, avec un écart type de $\pm 8,9$ mm.

[Wang and Zhang, 2007] ont effectué une telle comparaison sur 169 stations réparties de façon homogène avec plusieurs types de radiosondages et sur une longue période d'acquisition (de 1997 à 2006). Le biais moyen de cette comparaison est d'ordre de 1 mm et varie en fonction du type de radiosondage considéré. [Wang and Zhang, 2007] utilisent un réseau bien réparti sur le globe terrestre avec des observations très redondantes (acquisition sur 10 ans) alors que pour la comparaison de la campagne NAWDEX, la répartition des stations est plus ou moins hétérogène et les observations sont de courte période (environ 2 mois).

[Bock et al., 2007] ont également effectué ce genre de comparaison et ont obtenu un biais plus

élevé que [Wang and Zhang, 2007] (environ 3 Kg.m^{-2} soit 19,5 mm). Par contre leur étude ne concernait que 9 stations IGS se trouvant sur le continent africain où l'humidité est plus forte. On verra plus loin que la variation spatiale de ces biais dépend aussi de la latitude.

La confrontation de ces études précédemment évoquées explique les valeurs des biais obtenus dans ce travail (biais de -3,8 mm) et on peut dire que ces résultats sont conformes à ce que l'on peut attendre. Avec une telle distribution spatiale et autant d'observations, ces résultats nous paraissent cohérents.

III.4.2 Comparaison de la solution GPS avec le modèle météorologique de l'ECMWF

III.4.2.1 Les données ERA-Interim

ERA-Interim est une réanalyse atmosphérique globale du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMET ou ECMWF en anglais) constituée depuis 1979 et continuellement mise à jour. Les réanalyses ERA-Interim comprennent un jeu détaillé de variables décrivant la surface et la couche limite atmosphérique (la troposphère). Parmi ces variables, on y retrouve l'humidité atmosphérique (contenu intégré en vapeur d'eau atmosphérique) qui nous intéresse dans ce travail. La résolution spatiale des données ERA-Interim est d'environ 80 km. Ces données sont disponibles sur l'interface publique de l'ECMWF.

Les données ERA-Interim sont disponibles sur le site internet <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/> d'ECMWF. Il suffit de renseigner la période d'acquisition et le paramètre recherché pour les télécharger. [Dee et al., 2011] décrit le modèle de prévision, la méthode d'assimilation des données et les ensembles de données en entrées utilisées pour produire ERA-Interim.

III.4.2.2 Comparaison des ZTD des données ERA-Interim et du réseau GPS NAWDEX

L'évaluation de la qualité des données de la campagne NAWDEX a été également réalisée par comparaison avec les données de l'ERA-Interim. En référence à [Bock et al., 2007], les mêmes traitements que la comparaison précédente ont été réalisés pour détecter les valeurs aberrantes. Par ailleurs, une synchronisation temporelle a été également effectuée en sélectionnant que les mesures GPS correspondant à la même période d'acquisition que les données ERA-Interim.

La figure III.14 illustre un biais moyen particulièrement fort de -20,3 mm sur la station BLVA avec un écart type de $\pm 16,6$ mm alors qu'on a un biais très faible (presque nul) de 0,01 mm sur la station CN14 avec un écart type de $\pm 19,9$ mm (figure III.15). Cette variation est similaire à la comparaison avec les radiosondages de l'UWYO. On a un biais très élevé sur la station BLVA du réseau italien situé en zone plus ou moins humide alors que l'écart le plus faible s'observe sur la station CN14 située plus au Nord dans une région plus ou moins sèche.

Ces deux stations présentant des valeurs de biais extrêmes (-20,3 mm pour BLVA et 0,01 mm pour CN14) ont des écarts-types proches (16,6 et 19,9 respectivement). Considérant l'ensemble des stations, le biais moyen est de -3,5 mm $\pm 4,1$ mm ; l'écart-type moyen est de 14,2 mm $\pm 4,2$ mm ; ces écarts sont comparables avec ceux cités dans la littérature (3,25 mm pour

[Bock et al., 2007] à titre d'exemple). La variation spatiale de ces écarts sera étudiée de manière plus approfondies dans la suite de ce manuscrit.

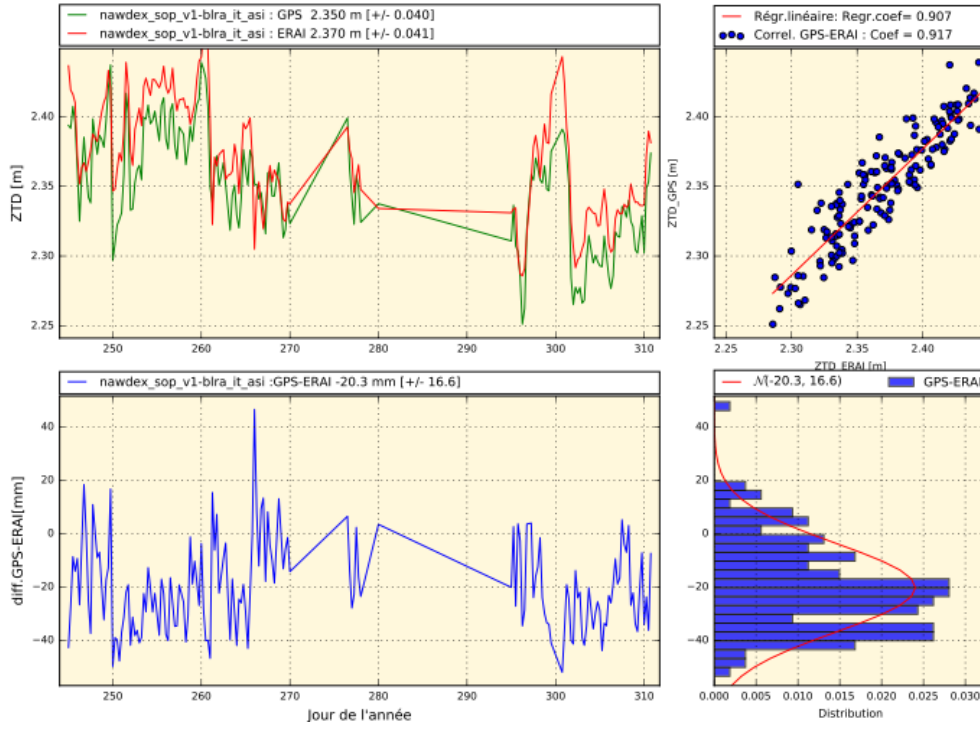


FIGURE III.14 – Évolutions et écarts entre les retards zénithaux totaux GPS et les données ERA-Interim de la station BLVA.

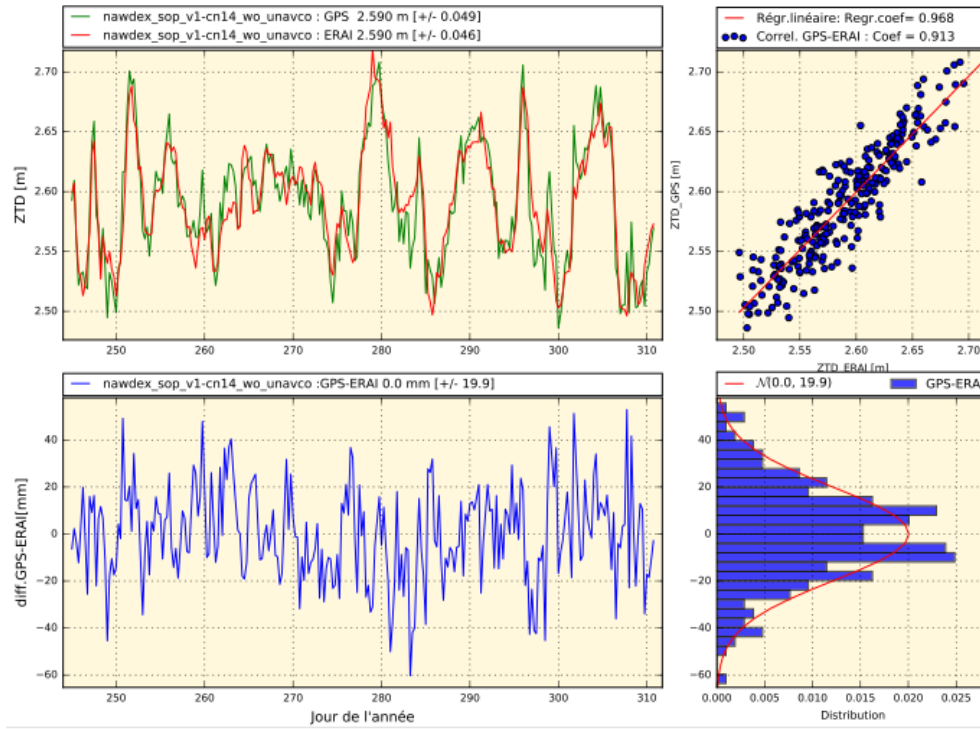


FIGURE III.15 – Évolutions et écarts entre les retards zénithaux totaux GPS et les données ERA-Interim de la station CN14 .

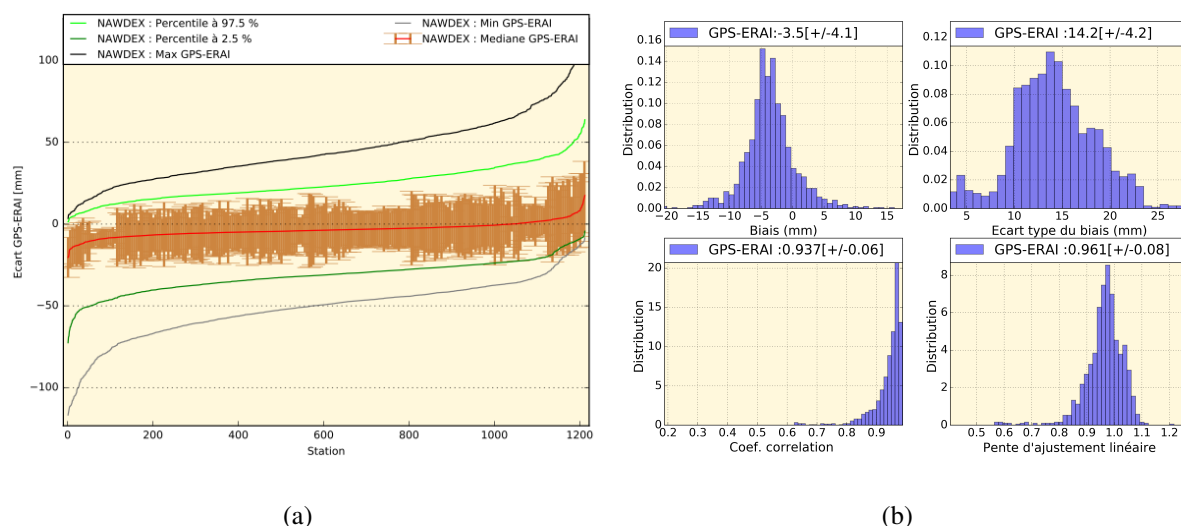


FIGURE III.16 – Percentiles et écarts types des écarts des ZTD GPS avec les données ERA-Interim sur toutes les stations de la comparaison (figure III.16(a)). Les statistiques de comparaison des ZTD GPS avec les données ERA-Interim sur toutes les stations de la comparaison durant la période acquisition de la campagne NAWDX (figure III.16(b)) .

III.4.3 Bilan

Au regard des résultats il apparaît que les valeurs des ZTD obtenues par GPS et celles des radiosondages et du modèle météorologique ECMWF sont cohérentes entre elles. Notons que les observations des radiosondages présentent un biais plus élevé avec la solution GPS que le modèle ERA-Interim. Le biais moyen de la comparaison est de -3,8 mm avec un écart type de $\pm 8,9$ mm pour les radiosondages, tandis que pour le modèle ERA-Interim le biais est de -3,5 mm avec un écart type de $\pm 12,9$ mm. Ces valeurs des biais ont été calculées sur le même réseau de stations et à la même époque (tableau III.4).

Comparaison	Biais [mm]	Écart type [mm]	Coef. corr.	Pente	Nb stations
GPS-RS_UWYO	-3,8 $\pm$ 5,8	8,9 $\pm$ 4,1	0,979	0,949	45
GPS-ERA-I	-3,5 $\pm$ 3,2	12,9 $\pm$ 4,9	0,957	0,947	45
GPS-ERA-I	-3,5 $\pm$ 4,1	14,2 $\pm$ 4,2	0,937	0,961	1212

TABLE III.4 – Les statistiques de comparaison des ZTD GPS avec les radiosondages de l'UWYO (RS_UWYO) et les données ERA-Interim.

Ces statistiques montrent que le biais et l'écart type sont plus ou moins stables pour chaque technique. L'écart type important sur les données ERA-Interim est dû à la tendance du modèle à lisser les données . Nous verrons par la suite qu'il a aussi des différences zonales dans les données. Les figures III.16(a) et III.13(a) montrent la présence des biais secs et humides dans les deux comparaisons. La répartition de ces biais est liée à l'emplacement des stations utilisées. Nous verrons également par la suite que ces biais peuvent être liés aux valeurs des ZTD et à la latitude de la station en question.

IV Tests de sensibilité

IV.1 Introduction

L'exactitude des ZTD estimés par GPS dépend de la qualité du modèle paramétrique, de la qualité des produits auxiliaires (orbites et horloges des satellites, modèles de correction) et du choix des options de paramétrage utilisés lors du traitement (angle de coupure, fonction de projection, pondération des observations). L'objectif ici est de refaire le traitement avec de nouveaux paramétrages et de comparer la solution avec celle du calcul de référence.

La solution GPS de référence de la campagne NAWDEX utilisée dans ce travail a été calculée à l'aide du logiciel GIPSY-OASIS II v6.4. en mode PPP avec des paramètres tels que définis dans le tableau III.1 de la section III.2.

Afin de s'assurer si ces paramètres utilisés lors du traitement sont optimaux, quelques tests de sensibilité ont été réalisés. Ces tests ont été effectués sur toute la période de la campagne NAWDEX (71 jours : du 27 août au 05 novembre 2016). On utilise pour ces tests, un sous réseau de 35 stations du réseau IGS.

Les stations du sous réseau de référence ont été choisies sur base de la géométrie du réseau. Le réseau de ces station est reparti de manière homogène sur la zone d'étude. De plus, ces stations appartiennent toutes au réseau IGS présentant une bonne qualité des observations.

IV.2 Impact des paramètres du traitement

Les paramètres sont modifiés lors de la création du calcul. Pour chacun des tests un seul paramètre a été modifié afin d'apprécier son influence sur la solution de référence qui utilise les paramètres définis dans la section III.2. Les renseignements des différents tests réalisés sont les suivants :

- **Pondération en sinus de l'angle d'élévation (sin)** : Lors du calcul standard, la pondération des observations a été fixée à $P_i = \frac{1}{0,01^2}$ et a été considérée comme constante peu importe l'élévation du satellite GPS. Ce test consiste donc à changer le type de pondération en considérant que cette dernière est une fonction en sinus de l'angle d'élévation (el).

$$P_i = \frac{\sin(el)}{0,01^2} \quad (IV.1)$$

- **Pondération en racine du sinus de l'angle d'élévation (sqrt ou sqrtsin) :** Comme pour le test précédent, ce test consiste à changer le type de pondération mais en considérant cette fois-ci que cette dernière est une fonction de la racine du sinus de l'angle d'élévation (el).

$$P_i = \frac{\sqrt{\sin(el)}}{0,01^2} \quad (IV.2)$$

- **Les tests Random Walk (RW_) :** Il s'agit ici de tester l'impact des contraintes qu'on peut imposer sur les ZWD et les gradients horizontaux. Les paramètres de retard humide et les gradients horizontaux sont modélisés comme des processus de marche aléatoire. Les valeurs par défaut des coefficients de ce marche aléatoire ont été données dans le tableau III.1. La marche aléatoire sur les gradients est 10 fois plus petite que celle du retard humide [Bosser et al., 2009]. Le premier test consiste à diminuer cette valeur en la considérant égale à $1mm/\sqrt{h}$ au lieu de $5mm/\sqrt{h}$ pour le retard humide. Un autre test a été également réalisé avec une valeur plus élevée de coefficient random work égale à $10mm/\sqrt{h}$.

En gros, la pondération et la marche aléatoire ont un impact sur l'estimation des paramètres. [Selle and Desai, 2016] étudient l'impact et font des comparaisons avec des radiomètres micro-ondes, les conclusions sont un peu limitées car peu de stations sont utilisées. Dans ce travail, un autre approche a été réalisé : il s'agit de quantifier l'impact de ces paramètres d'entrées sur les paramètres du traitement.

Les valeurs de références, dans ce travail, ont été dictées par l'étude de [Selle and Desai, 2016]. Toutefois, [Hadas et al., 2017] proposent que les valeurs de marche aléatoires soient adaptées à la zone géographique en question, mais cette étude est basée sur un nombre faible de stations et il serait intéressant de l'étendre sur un réseau plus dense afin de s'assurer de la bonne prise en compte des variations régionales.

La figure IV.2 illustre les résultats des quatre tests réalisés sur un sous réseau de 35 stations pour quelques paramètres de traitement.

La pondération des observations en fonction du sinus de l'angle d'élévation permet d'augmenter le taux de résolution des ambiguïtés de 1,17% et améliore sa répétabilité. Elle permet également d'améliorer la répétabilité sur la position verticale de 0,5 mm. L'effet sur l'estimation des ZTD est presque nul avec une variation de 1/10 mm en moyenne.

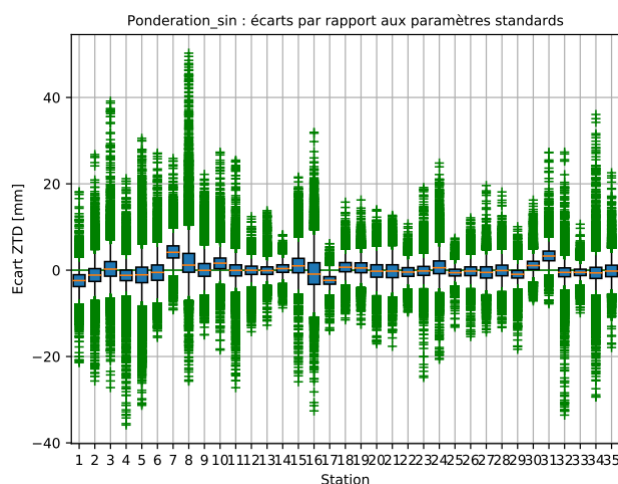
Une pondération des observations en fonction de la racine carrée du sinus de l'angle d'élévation produit des effets presque similaires à ceux produits par la pondération en fonction du sinus. Pour les deux tests, le degré d'amélioration du taux de résolution des ambiguïtés est le même mais la pondération en sinus donne la meilleure répétabilité sur la position verticale.

Le changement de la marche aléatoire par une diminution de sa valeur permet de réduire la dispersion des gradients horizontaux. Cela est normal puisqu'on réduit la contrainte sur ce paramètre et sur les ZTD. Mais, cette opération ne produit aucun effet significatif sur l'estimation

des ZTD et pire encore tend à dégrader la solution GPS puisqu'il réduit le taux de résolution des ambiguïtés de 2,06%. De plus la répétabilité sur la position verticale augmente de 0,6 mm.

L'augmentation de la valeur de la marche aléatoire ne produit aucun effet significatif par rapport au traitement de référence. Les valeurs du taux de résolution des ambiguïtés, de la répétabilité sur position verticale ainsi que des ZTD reste presque inchangées.

Même si la valeur médiane des ZTD varie peu pour tous les tests, l'analyse des écarts par rapport à la solution de référence montre une présence d'outliers pouvant aller jusqu'à 40 mm sur l'estimation des ZTD (exemple de la figure IV.1 pour une pondération des observations en sinus de l'élévation).



(a)

FIGURE IV.1 – Écart des ZTD entre la solution GPS de référence avec une pondération des observations constante et la solution issue du test avec une pondération en sinus de l'élévation.

Au final, ces résultats permettent de conclure que la pondération des observations en fonction du sinus de l'angle d'élévation apparait comme la plus optimale car les paramètres de sorties du traitement (pourcentage de résolution des ambiguïtés entières, la répétabilité sur la position verticale) sont les plus satisfaisants. L'impact moyen sur les ZTD est faible mais des écarts résiduels sont observés. Une telle solution, globale, pourrait être privilégiée pour retraiter toutes les données de la campagne NAWDEX.

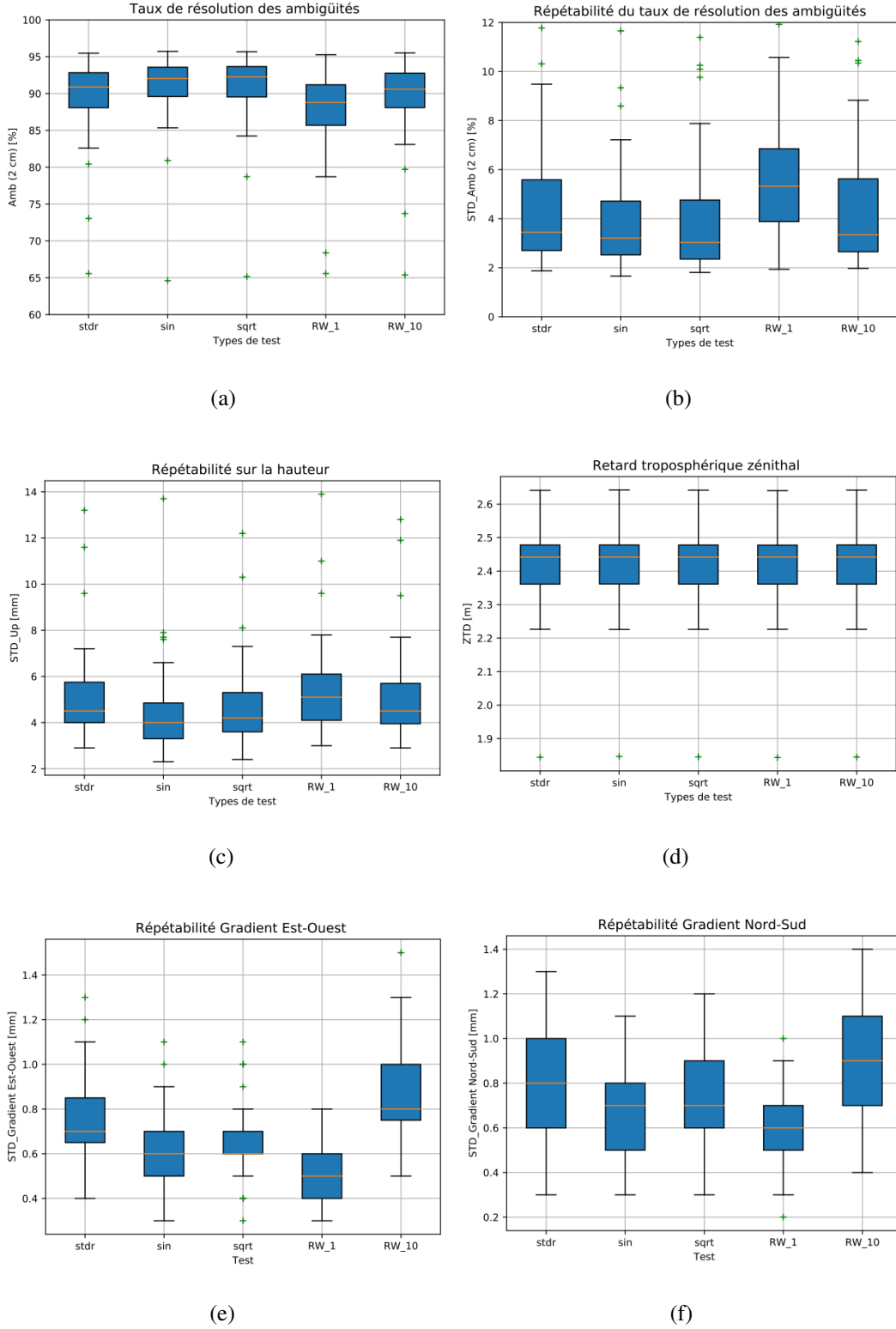


FIGURE IV.2 – Estimation du taux de résolution des ambiguïtés (figure IV.2(a)), de la répétabilité sur le taux de résolution des ambiguïtés (figure IV.2(b)), de la répétabilité sur la position verticale (figure IV.2(c)), de ZTD IV.2(d) et de la répétabilité des gradients horizontaux (figure IV.2(e) et IV.2(f)) pour chaque test réalisé.

V Études des variations spatio-temporelles

L'analyse et la compréhension de la variation spatiale et temporelle des retards troposphériques humides permet d'identifier les effets régionaux et les perturbations atmosphériques résultants de ces variations.

V.1 Variation spatio-temporelle des ZTD

La figure V.1 montre les valeurs moyennes, sur toute la période de la campagne NAWDEX, des retards troposphériques ainsi que leur dispersion pour chacune des stations du réseau NAWDEX.

On peut constater, sur cette figure, une diminution globale des valeurs des retards troposphériques de l'équateur vers le pôle nord. Cette variation est principalement liée à la variation des retards humides (figure V.2(a)) puisque les retards hydrostatiques varient peu dans l'espace (figure V.2(c)) et dans le temps (figure V.2(d)) et dépend principalement de la pression au niveau du sol et non de l'humidité.

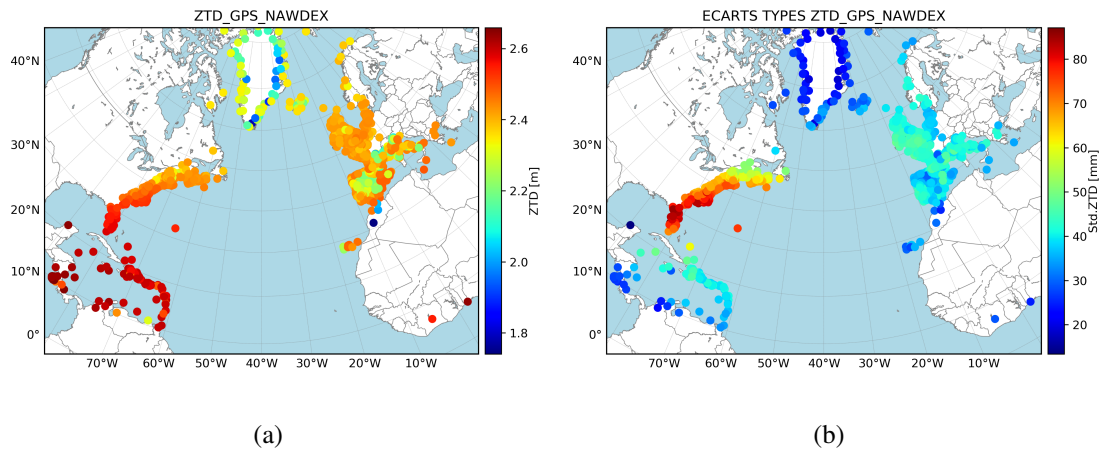


FIGURE V.1 – Moyenne (figure V.1(a)) et écart type (figure V.1(b)) des retards troposphériques totaux au zénith (figure V.1(a) et V.1(b)) du réseau NAWDEX.

L'analyse des écarts types des retards troposphériques révèle une forte variation temporelle de l'humidité sur la côte Est Américaine et dans le Golf du Mexique. Cette région se trouve au cœur d'une dépression atteinte souvent par des ouragans pouvant affecter aussi d'autres États côtiers de l'Atlantique. Ces phénomènes s'observent souvent sur la période de juin à novembre

qui correspond à la période des acquisitions de la campagne NAWDEX, ce qui explique la mise en évidence de tels écarts sur cette zone pendant cette période.

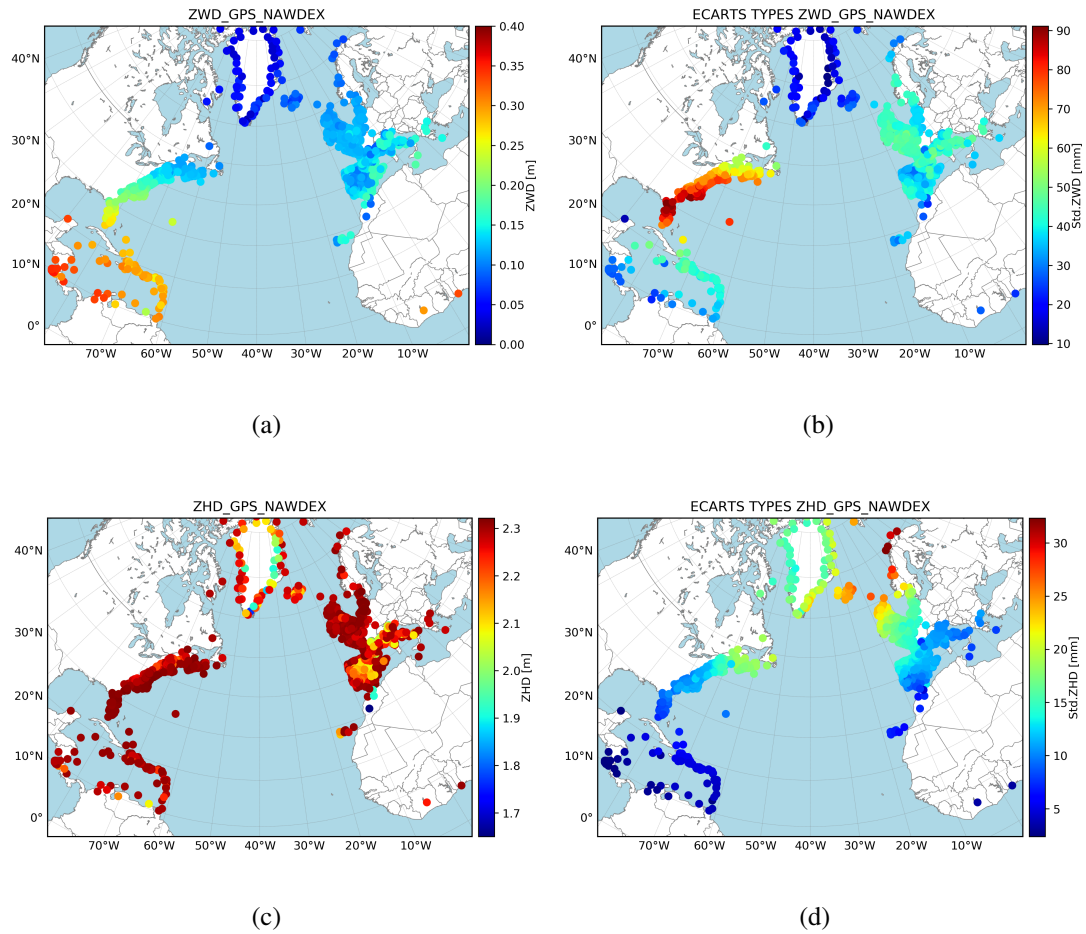


FIGURE V.2 – Moyenne et écart type des retards zénithaux humides (figure V.2(a) et V.2(b)) et des retards zénithaux hydrostatiques (figure V.2(c) et V.2(d)) du réseau NAWDEX.

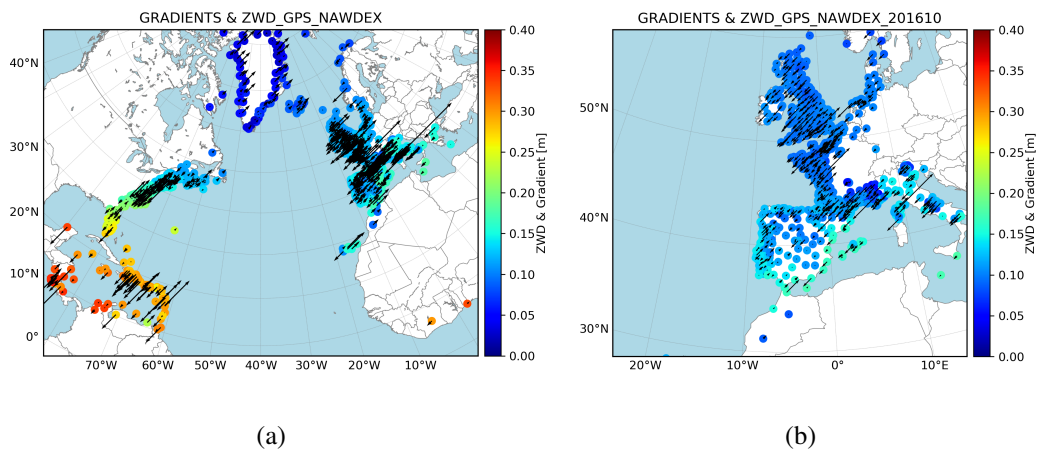


FIGURE V.3 – Gradients horizontaux GPS sur toute la zone d'étude (figure V.3(a)) et un zoom sur la partie Europe (figure V.3(b)).

La figure V.2(d) montre une forte dispersion des données ZHD en Scandinavie. Selon la relation I.17, cette dispersion est forcément liée à une fluctuation de la pression pendant la période d'acquisition puisque même le modèle ERA-Interim montre le même phénomène sur cette période. Ce phénomène est lié à une perturbation météorologique sur cette région où est positionné un anticyclone et qui connaît aussi des perturbations liées aux échanges Terre-Océan.

V.2 Variation spatiale des biais entre les ZTD GPS et ZTD ERA-Interim

Dans la section III.4.2.2, des ZTD issues du calcul GPS et ceux dérivés du modèle ERA-Interim ont été comparés. Cette section présente les résultats statistiques de la comparaison d'une façon globale sur toutes les stations du réseau NAWDEX. Dans la présente section, nous nous intéressons, à partir des produits visuels, à une étude sur la distribution spatiale de ces écarts .

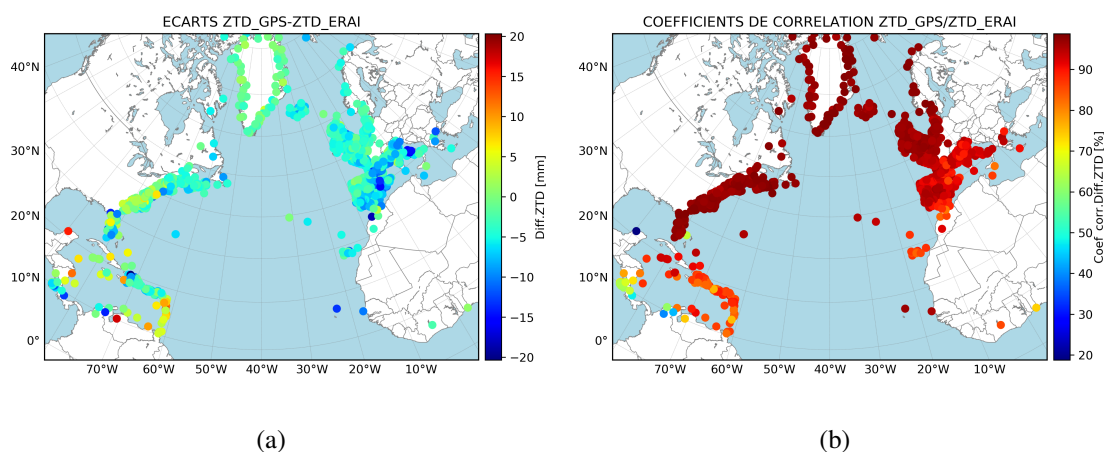


FIGURE V.4 – Moyennes des écarts entre les ZTD GPS et ZTD ERA-Interim (V.4(a)) ainsi que leurs coefficients de corrélation(V.4(b))

La figure V.4 montre une meilleure corrélation entre les ZTD GPS et les ZTD de l' ERA-Interim sur la région polaire où le coefficient de corrélation est proche de 1 et des stations présentant une mauvaise corrélation dans le Golf du Mexique se trouvant dans une zone équatoriale plus humide.

Toutefois, certaines stations du Golf présentent une très mauvaise corrélation en dessous de 0,50. C'est le cas des stations VMAG et MERI avec respectivement un coefficient de corrélation de 0,397 et 0,188. De telles stations nécessitent d'être analysées de plus près.

Comme le montre les séries temporelles des ZTD de la station MERI (figure V.5), l'inadéquation sur cette dernière est liée au nombre de points de comparaison. Seuls cinq observations plus ou moins dispersées sont disponibles pour les deux jeux de données .

Pour la station VMAG (figure V.6), l'inadéquation entre les données GPS et le modèle ERA-Interim est due à une variation haute fréquence autour de la valeur moyenne (environ 2,63 m).

Le modèle qui a tendance à lisser les données restitue moins bien les hautes fréquences d'où un écart type très élevé (± 23 mm) sur le biais de cette station.

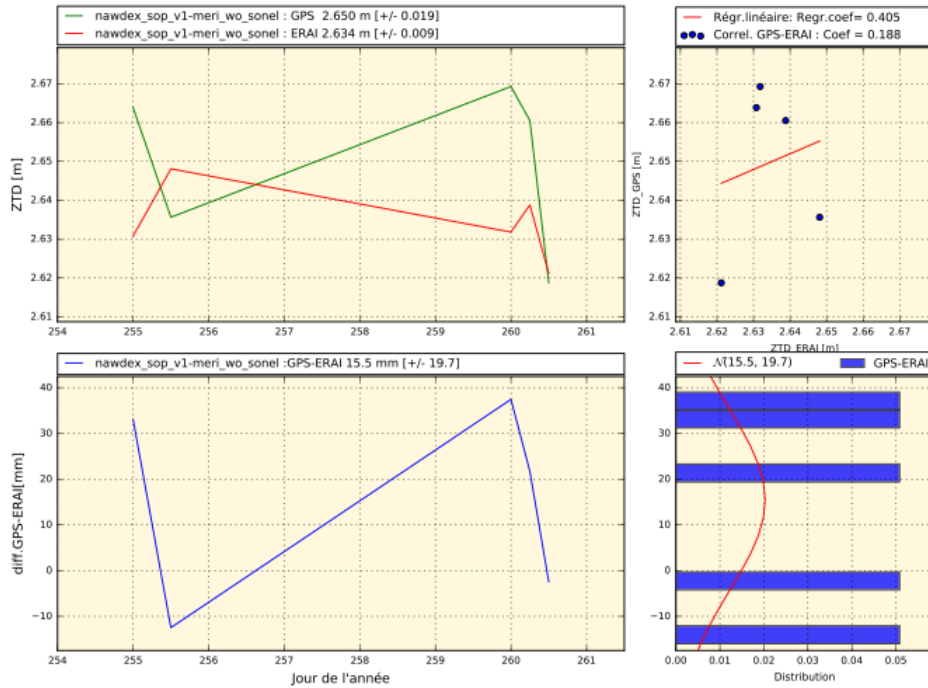


FIGURE V.5 – Évolutions et écarts des retards zénithaux totaux GPS et les données ERA-Interim sur la station MERI du réseau GNSS SONEL.

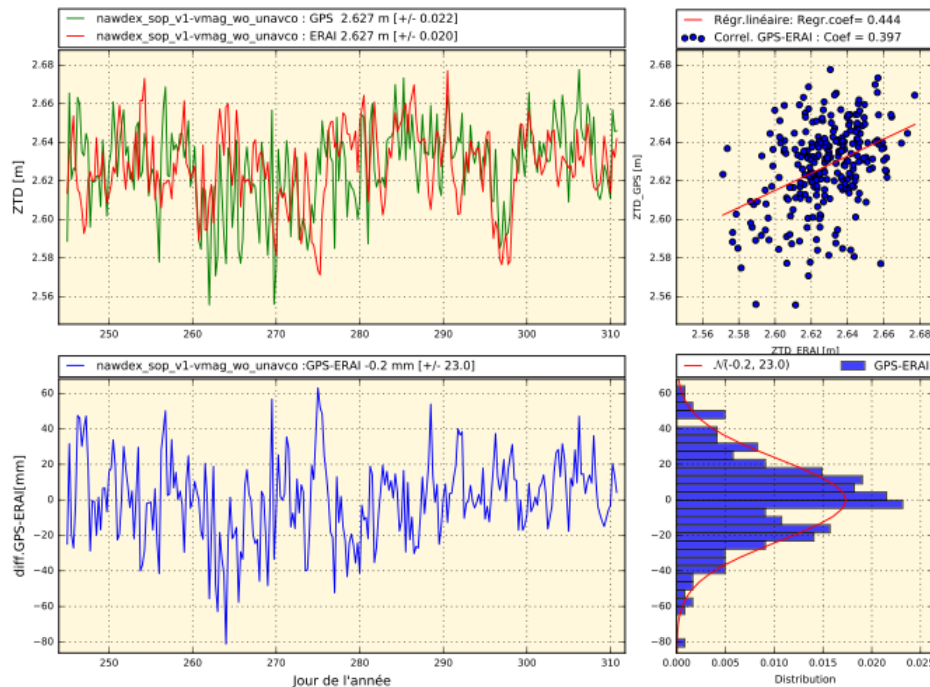


FIGURE V.6 – Évolutions et écarts entre les retards zénithaux totaux GPS et les données ERA-Interim sur la station VMAG du réseau GNSS UNAVCO.

Avec la figure V.7(b) on peut dire que, d'une façon générale, l'évolution des écarts entre ces deux jeux de données suit celle de l'humidité. Plus on est en zone très humide, plus les écarts

sont énormes. Comme l'humidité varie aussi en fonction de la latitude, on peut également dire que ces écarts diminuent avec la latitude. La figure V.7(a) montre que, de manière générale, on a une dispersion bien plus importante aux basses latitudes où les valeurs des ZWD sont plus fortes et qu'elle diminue avec la latitude.

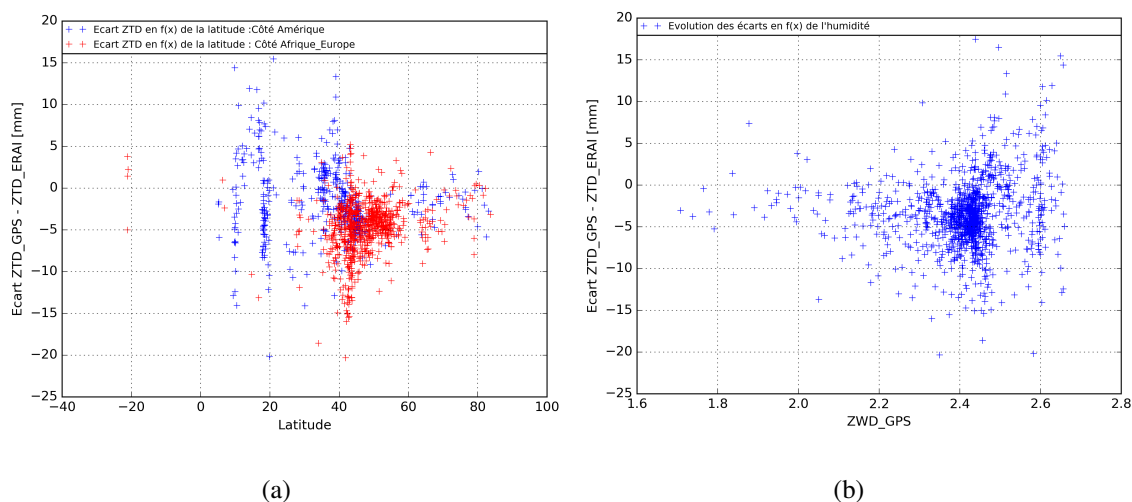


FIGURE V.7 – Distributions des écarts entre les ZTD GPS et ZTD ERA-Interim en fonction de la latitude (V.7(a)) et en fonction de la valeur des ZTD (V.7(b))

On remarque sur la figure V.4(a) des biais secs plus forts autour de la Méditerranée avec des valeurs absolues proches de celles observées plus au sud dans le Golf du Mexique. Cela fait penser à des effets régionaux liés à la présence d'une zone de dépression près du Golf de Mexique et d'un anticyclone à la rive européenne de l'Atlantique. Toutefois, ces phénomènes ne peuvent pas être étudiés ici, puisque les stations GPS du réseau NAWDEX sont réparties de façon inégale des deux côtés de l'Atlantique. Du côté Amérique, les stations GPS sont plus ou moins bien réparties en latitude alors que sur le côté Afrique-Europe, presque toutes les stations sont concentrées autour de l'Europe. Ainsi, on a une forte dispersion des biais autour de l'Europe (figure V.7(a)) mais aussi dans la partie du Golf de Mexique où on a également une forte concentration de stations GPS.

V.3 Regard sur les gradients horizontaux

Les gradient horizontaux représentent la variation du retard troposphérique en fonction de l'azimut. Comme le retard hydrostatique varie peu, on pourrait penser que ces gradients sont forcément liés à la variation du retard humide. A partir des données continues sur l'humidité du modèle ERA-Interim, on a calculé le retard zénithal humide par la formule de [Bevis et al., 1992]. Le calcul a été effectué sur la période du mois d'octobre 2016. Le résultat de ce calcul montre bien que ces données sont cohérentes avec les ZWD du réseau GPS NAWDEX (figure V.8).

La figure V.3 illustre les amplitudes et les directions des gradients horizontaux des retards troposphériques. [Morel et al., 2014b] ont montré que la variation des amplitudes des gradients horizontaux sur la Corse est corrélée avec le comportement saisonnier de l'humidité et qu'ils

sont, dans cette région, plus élevés en été qu'en hiver comme pour les ZWD. Cependant, la campagne NAWDEX ne couvrant qu'une période de deux mois, le jeu de données disponible ne permet pas d'effectuer une telle vérification sur ces données.

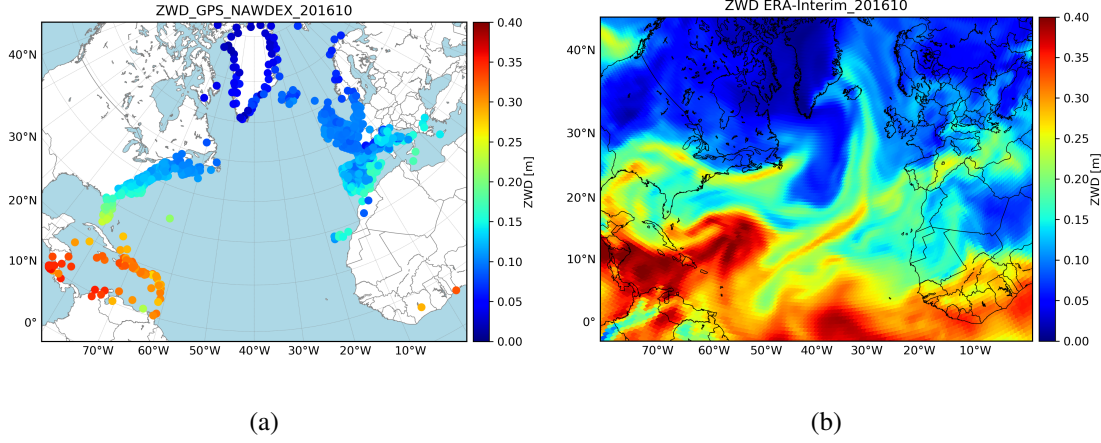


FIGURE V.8 – Moyennes des retards zénithaux humides GPS (V.8(a)) et ceux issus du modèle ERA-Interim (V.8(b)) sur le mois de septembre 2016.

Comme on dispose également de la position planimétrique de ces données, nous avons cherché à estimer les gradients horizontaux d'humidité en fonction de la direction Nord-Sud et Est-Ouest respectivement par les formules V.1 et V.2 et à les comparer avec les gradients GPS.

$$G_{NS_i} = \frac{ZWD_{i+1} - ZWD_i}{n_{i+1} - n_i} \quad (V.1)$$

$$G_{EW_i} = \frac{ZWD_{i+1} - ZWD_i}{e_{i+1} - e_i} \quad (V.2)$$

Toutefois, cette approche n'est qu'une approximation puisqu'elle ne tient compte que de la variation du retard troposphérique en fonction d'une direction alors que ces gradients horizontaux varient aussi en fonction du gradient de la réfractivité à l'altitude considérée dans les directions Est-Ouest et Nord-Sud. Pour rappel, la modélisation des gradients horizontaux dans le calcul GPS est donnée par les formules suivantes de [Chen and Herring, 1997] :

$$G_{NS} = \int_0^\infty z \cdot \nabla N_Z^{ns} dz \quad (V.3)$$

$$G_{EW} = \int_0^\infty z \cdot \nabla N_Z^{ew} dz \quad (V.4)$$

Avec G_{NS} , G_{EW} les gradients intégrés dans les directions Nord-Sud et Est-Ouest; z l'altitude et ∇N_Z^{ns} , ∇N_Z^{ew} les gradients de réfractivité à l'altitude z dans les directions Nord-Sud et Est-Ouest.

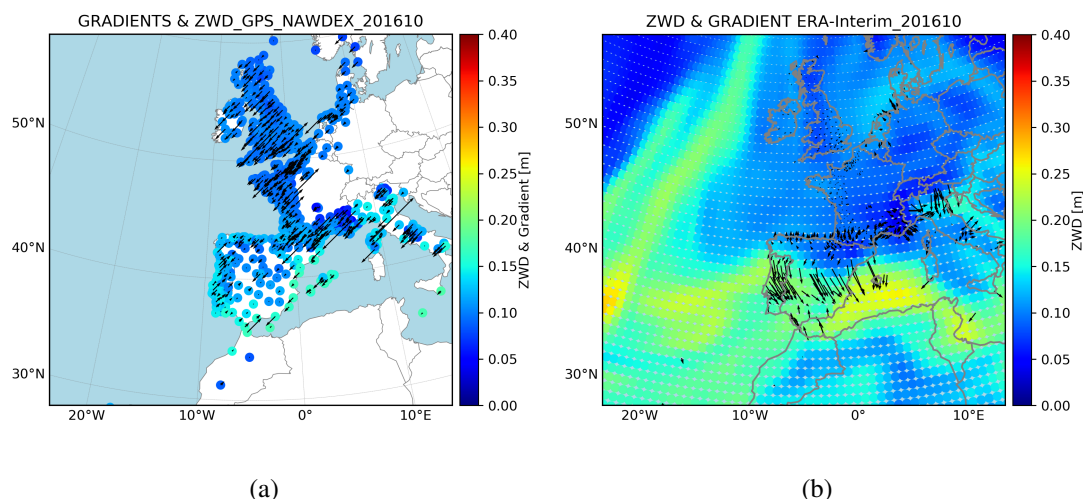


FIGURE V.9 – Retards zénithaux humides et gradients GPS (figure V.9(a)) ; Retards zénithaux humides du modèle ERA-Interim et gradients d’humidité calculés sur la base des formules V.1 et V.2 (figure V.9(b))

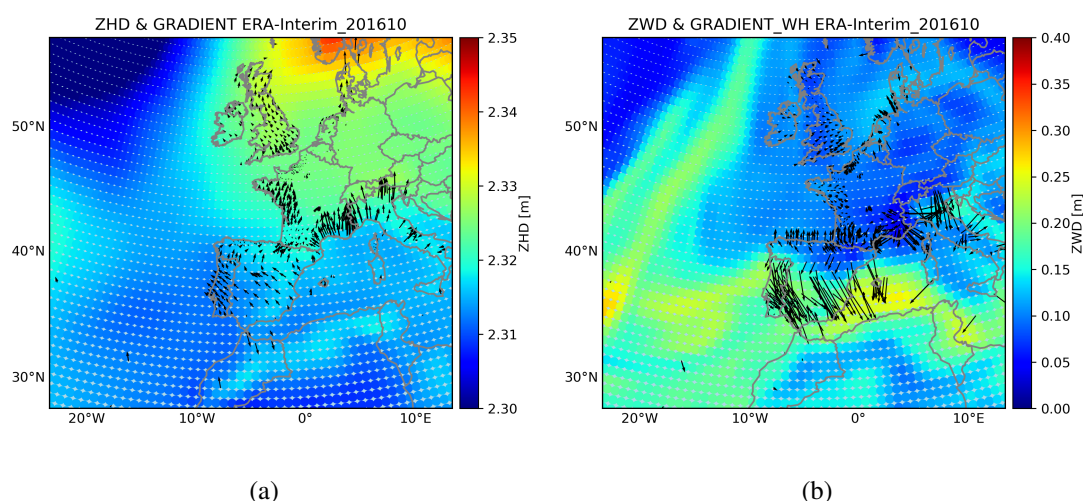


FIGURE V.10 – Retards zénithaux hydrostatiques et gradients ZHD du modèle ERA-Interim ; (V.10(a)) ; Retards zénithaux humides du modèle ERA-Interim et combinaison des gradients ZHD et ZWD du modèle ERA-Interim((V.10(b)).

La figure V.9 montre l’absence d’adéquation entre les gradients d’humidités calculés à l’aide des formules V.1 et V.2 ci dessus et les gradients GPS calculés selon les relations V.3 et V.4. Comme on l’a déjà mentionné à la section V.1, cette inadéquation pourrait être due à la contribution du retard hydrostatique.

A partir de l’équation I.17 de Saastamoinen, une estimation des retards hydrostatiques ZHD du modèle ERA-Interim a été effectuée. L’information sur les ZHD ainsi obtenue nous a permis de calculer, par le même principe que celui utilisé pour les ZWD, les valeurs approximatives des gradients des ZHD de ce modèle. Une combinaison des gradients ZWD et ZHD pourrait se

rapprocher des gradients GPS.

On peut constater sur la figure V.10 que malgré la prise en compte des retards hydrostatiques, les incohérences avec les gradients horizontaux estimés à partir des données GPS subsistent.

Une bonne estimation des gradients horizontaux à partir du modèle ERA-Interim se ferait donc en prenant en compte les profils d'humidité et de pression le long de la couche atmosphérique, ce qui nécessiterait une reformulation des relations V.1 et V.2 pour modéliser ces gradients. Pour trouver une cohérence, il faudrait revenir à la modélisation plus formelle des gradients définie par les équations V.3 et V.4. C'est ce qui avait été fait dans [Bosser, 2008] avec des résultats très concluants. Cet aspect demanderait une étude plus poussée sur la variabilité des paramètres troposphériques, mais le temps qui nous a été imparti lors de ce stage n'a pas été suffisant pour effectuer ce travail. Il serait donc intéressant de le reprendre ultérieurement.

Conclusion et perspectives

Conclusion

Ce travail dédié à une analyse des séries temporelles des retards troposphériques GPS fait suite à la campagne NAWDEX, dont l'objectif est de comprendre, à partir des mesures (dont les mesures GPS), les perturbations atmosphériques sur la zone Nord-Atlantique. Il s'agissait d'un traitement des mesures GPS en mode PPP, d'une validation de ce traitement par une analyse d'un certain nombre de paramètres de sortie, d'une confrontation des paramètres troposphériques issus du traitement GPS avec les données externes issues des mesures météorologiques et des modèles classiques et d'une analyse de variation spatiale de ces paramètres troposphériques. Ce travail nous a donc permis d'aborder différentes thématiques relevant de différentes disciplines comme la géodésie, la météorologie et les statistiques.

Une analyse a été effectuée dans le but de contrôler le résultat du traitement afin de fournir une information fiable sur les paramètres troposphériques, pouvant être utilisés comme des données d'entrées dans les modèles de prévision numérique du temps dans la partie Nord de l'Atlantique. Pour cela, une suite de filtres basés sur des valeurs seuils de certains paramètres de traitement a été mise en place. Sur les 1367 stations du réseau GPS NAWDEX, 143 stations qui étaient reprises deux fois ont été détectées et mises de côté pour alléger les traitements ultérieurs. Onze autres stations ont été éliminées pour différentes causes liées à la qualité du traitement. Au final 1213 stations ont été retenues comme ayant des paramètres troposphériques de bonne qualité.

Afin de s'assurer que ces paramètres troposphériques peuvent être utilisés en météorologie, une comparaison des ces derniers avec des observations des radiosondages et des produits dérivés du modèle météorologique ERA-Interim a également été réalisée. Des valeurs des retards troposphériques zénithaux du réseau GPS NAWDEX (ZTD_{GPS}) et celles dérivant des radiosondages se trouvant dans la zone concernée par la campagne ont été confrontées. Ces séries ZTD_{GPS} ont été aussi comparées aux contenus intégrés en vapeur d'eau du modèle ERA-Interim. Des biais moyens de $-3,5 \pm 4,1$ et $-3,8 \pm 5,8$ mm avec des coefficients de corrélation de 0,937 et 0,979 ont été respectivement obtenus pour la première et la deuxième comparaison. Ces comparaisons ont révélé l'existence des biais GPS humides dans la partie tropicale plus humide et des biais secs dans la partie tempérée et polaire. Cette étude montre également que les biais les plus faibles se retrouvent dans la zone polaire beaucoup plus sèche.

Le traitement GPS nous a permis une prise en main du logiciel GIPSY-OASIS II et nous a conduit également à étudier et à évaluer l'impact des paramètres de traitement sur la solution GPS et plus particulièrement sur les paramètres troposphériques. Cette étude a montré qu'une pondération des observations en fonction du sinus de l'angle d'élévation serait plus optimale lors du traitement PPP sous GIPSY-OASIS avec une augmentation du taux de résolution des

ambiguïtés d'environ 1,7% et une amélioration de la répétabilité sur la position verticale de 0,5 mm .

Enfin, pour faciliter l'analyse et l'exploitation des données de la campagne NAWDEX, des outils permettant la visualisation des paramètres troposphériques de la campagne ainsi que leurs biais par rapport aux données externes ont été développés. Ces produits visuels nous ont permis de nous rendre compte de l'existence des effets régionaux qu'on ne pouvait pas détecter avec de simples calculs. Ils nous ont été également utiles pour comprendre et expliquer l'évolution et la dispersion spatio-temporelle de ces paramètres troposphériques.

Perspectives

A l'issue de l'analyse des données de la campagne NAWDEX, 143 stations reprises deux fois ont été détectées et mises sur la liste noire. Il serait intéressant d'effectuer une analyse plus poussée sur ces stations ainsi que leur homologues afin de vérifier, pour chaque couple de stations, si la station mise en quarantaine correspond bien à celle présentant une qualité moindre des observations ou si on a toujours les mêmes observations sur ces stations homologues.

Onze stations ont été également écartées du réseau NAWDEX lors de l'analyse sur la qualité intrinsèque du traitement. Les observations de ces stations nécessitent également une analyse et une recherche plus poussée des données aberrantes pour tenter de les conserver en gardant que la partie des observations ne présentant pas de problème.

Les mesures GPS de la campagne NAWDEX ont été effectuées au mois de septembre et octobre 2016 et ne couvrent donc qu'une partie de l'année. Pour faire un bilan plus complet sur les processus humides de la zone d'étude, il aurait fallu aussi analyser les paramètres troposphériques à l'échelle annuelle afin d'étudier l'effet du cycle saisonnier de la température qui peut conduire à une forte variation de l'humidité au cours de l'année (froid et sec en hiver et chaud et humide en été) .

La figure V.7(a) nous montre une répartition inégale des stations GPS sur les deux rives de l'Atlantique. Cette inégalité de la densité des données rend difficile l'analyse des effets régionaux, ce qui ne nous permet pas de conclure si les écarts énormes entre les données GPS de la campagne et celles des produits externes qu'on observe à certains endroits sont liés ou pas aux effets régionaux. Il serait donc intéressant de disposer d'une bonne géométrie du réseau afin de compléter cette étude.

L'analyse des gradients horizontaux évoquée à la section V.3 mérite également une étude complémentaire pour voir le lien entre ces gradients et les variations spatio-temporelles des paramètres troposphériques GPS et étudier les effets des parties hydrostatiques et humides sur ces gradients.

Bibliographie

- [Bertiger et al., 2010] Bertiger, W., Desai, S. D., Haines, B., Harvey, N., Moore, A. W., Owen, S., and Weiss, J. P. (2010). Single receiver phase ambiguity resolution with gps data. *Journal of Geodesy*, 84 :327–337. 17
- [Bevis et al., 1992] Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., and H., W. R. (1992). Gps meteorology :remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of geophysical research*, 95(D14) :15787–15801. 26, 27, 39, 55
- [Bock, 2014] Bock, O. (2014). Les systèmes de positionnement et de navigation par satellite, application à la météorologie et à la climatologie. *La Météorologie*, 86 :38–48. 27
- [Bock et al., 2016] Bock, O., Bosser, P., Parione, R., Nuret, M., Fourrié, N., and Parracho, A. (2016). A high quality reprocessed ground based gps dataset for atmospheric process studies, radiosonde and model evaluation, and reanalysis of hymex special observing period. *Royal Meteorological Society*, 142 :56–71. 27, 31, 35, 37, 39
- [Bock et al., 2007] Bock, O., Bouin, M. N., Walpersdorf, A., Lafore, J. P., Janicot, S., and Guichard, F. (2007). Comparison of ground-based gps precipitable water vapour to independent observations and nwp model reanalyses over africa. *Journal of the Royal Meteorological Society*, 133 :2011–2027. 42, 43, 44
- [Bock et al., 2014] Bock, O., Willis, P., Wang, J., and Mears, C. (2014). A high-quality, homogenized, global, long-term(1993–2008) doris precipitable water data set for climate monitoring and model verification. *Journal of geophysical research*, 119 :7209–7230. 39
- [Boehm et al., 2006a] Boehm, J., Niell, A E. and Tregoning, P., and Schuh, H. (2006a). Global mapping function (gmf) : A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Journal of geophysical research*, 33,L07304. 21
- [Boehm and Schuh, 2012] Boehm, J. and Schuh, H. (2012). *Atmospheric Effects in Space Geodesy*. Springer Atmospheric Sciences. 22
- [Boehm et al., 2006b] Boehm, J., Werl, B., and Schuh, H. (2006b). Troposphere mapping functions for gps and very long baseline interferometry from european centre for medium-range weather forecasts operational analysis data. *Journal of geophysical research*, 111,B024406. 21
- [Bosser, 2008] Bosser, P. (2008). *Développement et validation d’une méthode de calcul GPS intégrant des mesures de profils de vapeur d’eau en visée multi-angulaire pour l’altimétrie de haute précision*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie. 19, 22, 37, 58, 91
- [Bosser, 2017a] Bosser, P. (2017a). Le positionnement ponctuel précis. Notes de cours - Cycle PPMD de l’ENSTA-Brétagne. 15, 91
- [Bosser, 2017b] Bosser, P. (2017b). Utilisation du calcul gps / gipsy-oasis ii 6.2-6.4. Notes de version. 29

- [Bossier et al., 2009] Bossier, P., Bock, O., Thom, C., Pelon, J., and Willis, P. (2009). A case study of using raman lidar measurements in high-accuracy gps applications. *Journal of Geodesy*, (84(4)) :251–265. 27, 34, 48
- [Chen and Herring, 1997] Chen, G. and Herring, T. (1997). Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data. *Journal of geophysical research*, 119 :20489–20502. 56
- [Dee et al., 2011] Dee, D. P., Uppalaa, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A C M. Van de Berg, L., Bidlot, J. and Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Holm, E. V., Isaksen, L., Kallberg, P., Kohler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. J., Park, B. K., Peubey, C., De Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J. N., and Vitart, F. (2011). The era-interim reanalysis : configuration and performance of the data assimilation system. *Journal of the Royal Meteorological Society*, 137 :553–597. 43
- [Doerflinger, 2001] Doerflinger, E. (2001). Les applications météorologiques du système de positionnement satellitaire gps. *Météo et Climat*. 23, 25
- [Guerova et al., 2016] Guerova, G., Jones, J., Douša, J., Dick, G., De Haan, S., Pottiaux, E., Bock, O., Pacione, R., Elgered, G., Vedel, H., and Bender, M. (2016). Review of the state of the art and future prospects of the ground-based gnss meteorology in europe. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9 :5385–5406. 26
- [Hadas et al., 2017] Hadas, T., Teferle, F. N., Kazmierski, K., Hordyniec1, P., and Bosy, J. (2017). Optimum stochastic modeling for gnss tropospheric delay estimation in real-time. *GPS Solut*, 21 :1069–1081. 48
- [Herring, 1974] Herring, T. A. (1974). Modelling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data. In *Symposium on refraction of transatmospheric signals in geodesy*, pages 157–164. 21
- [Kačmařík et al., 2017] Kačmařík, M., Douša, J., Dick, G., Zus, F., Brenot, H., Möller, G., Pottiaux, E., Kaplon, J., Hordyniec, P., Václavovic, P., and Morel, L. (2017). Inter-technique validation of tropospheric slant total delays. *Atmospheric Measurement Techniques*. 12, 27
- [Leandro, 2009] Leandro, R. (2009). *Precise Point Positioning with GPS : A new approach for positioning,atmospheric studies, and signal analysis*. PhD thesis, University of New Brunswisk. 16
- [Miyazaki et al., 2003] Miyazaki, S., Iwabuchi, T., Heki, K., and Naito, I. (2003). An impact of estimating tropospheric delay gradients on precise positioning in the summer using the japanese nationwide gps array. *Journal of geophysical research*, 108,B7 :2335–+. 22
- [Morel, 2017] Morel, L. (2017). Gnss et géoréférencement. Notes de cours - Cycle d'ingénieur de l'ESGT. 21, 91
- [Morel et al., 2014a] Morel, L., Fund, F., Legros, R., Durand, S., and Flacelière, B. (2014a). Ppp,la maturité. *Revue XYZ*, (138) :40–47. 17, 94
- [Morel et al., 2014b] Morel, L., Pottiaux, E., Durand, F., Fund, F., Boniface, K., Junior, P. S. d. O., and Van Baelen, J. (2014b). Validity and behaviour of tropospheric gradients estimated by gps in corsica. *Advances in Space Research*, 55 :135–149. 55
- [Niell, 1996] Niell, A. E. (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of geophysical research*, 101(B2) :3227–3246. 21

- [Niell, 2000] Niell, A. E. (2000). Improved atmospheric mapping functions for vlbi and gps. *Earth Planets Space*, 52(10) :699–702. 21
- [Ning et al., 2011] Ning, T., Elgered, G., and Willén, U. (2011). Multi-technique comparisons of 10 years of wet delay estimates on the west coast of sweden. *Journal of Geodesy*, 86 :565–575. 27
- [Petit and Luzum, 2010] Petit, G. and Luzum, B. (2010). *IERS Conventions 2010 (IERS Technical Note No. 36)*. Frankfurt am Main. 20
- [Rivière et al., 2016] Rivière, G., Delanoë, J., Pelon, J., Arbogast, P., and Chaboureau, J.-P. (2016). La campagne nawdex. *La météorologie*, (95) :5–7. 11
- [Saastamoinen, 1972] Saastamoinen, J. (1972). Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. *Geophysics Monograph*, 15,16 :247–251. 22
- [Selle and Desai, 2016] Selle, C. and Desai, S. (2016). Optimization of tropospheric delay estimation parameters by comparison of gps-based precipitable water vapor estimates with microwave radiometer measurements. IGS Workshop 2016, Sydney. 48
- [Steigenberger et al., 2009] Steigenberger, P., Boehm, J., and Tesmer, V. (2009). Comparison of gmf/gpt with vmf1/ecmwf and implications for atmospheric loading. *Journal of Geodesy*, pages 1–11. 40
- [Teunissen and Montenbruck, 2017] Teunissen, P. J. and Montenbruck, O. (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer International Publishing. 16, 21
- [Thayer, 1974] Thayer, G. D. (1974). An improved equation for the radio refractive index of air. *Radio Science*, 9 :803–807. 20
- [Tregoning and Herring, 2006] Tregoning, P. and Herring, P. (2006). Impact of a priori zenith hydrostatic delay errors on gps estimates of station heights and zenith total delays. *American Geophysical Union*. 31, 32, 40, 91
- [Wang and Zhang, 2007] Wang, J. and Zhang, L. (2007). Systematic errors in global radio-sonde precipitable water data from comparisons with ground-based gps measurements. *Journal of climate*, 21 :2218–2238. 42, 43
- [Zumberge et al., 1997] Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., and Watkins, M. M. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of gps data from large networks. *Journal of geophysical research*, 102 :5005–5017. 16

Annexes

Table des annexes

A	Le positionnement GPS	68
A.1	Principe du positionnement GPS	68
A.2	Les signaux et mesures GPS	68
B	Combinaison linéaire des mesures	71
B.1	La combinaison ionosphere-free	71
B.2	Combinaison Wide lane	71
B.3	Combinaison Narrow lane	72
B.4	Combinaison Melbourne-Wübbena	72
C	Tests d'hypothèse	73
C.1	Hypothèse nulle - hypothèse alternative.	73
C.2	Statistique et Seuil de signification du test	73
D	Stations éliminées du réseau NAWDEX	76
E	Résultats des comparaisons	79
E.1	Statistiques de comparaison du réseau NAWDEX avec les RS	79
E.2	Statistiques de comparaison du réseau de référence avec ERAI	81
E.3	Séries temporelles des ZTD et biais : Réseau de référence	82
F	Test de sensibilité	87
F.1	Pondération en sinus	87
F.2	Pondération en racine du sinus	88
F.3	Random Walk de 1 mm	89
F.4	Random Walk de 10 mm	90

Annexe A Le positionnement GPS

A.1 Principe du positionnement GPS

Le principe général de la mesure GPS consiste à réaliser une multilatération dans l'espace sur un minimum de quatre satellites connus en coordonnées dans un repère terrestre. Un récepteur au sol reçoit donc simultanément les signaux en provenance de plusieurs satellites GPS, évalue les distances d_i satellite-récepteur en supposant que ces signaux voyagent à la vitesse de la lumière. Le signal GPS se propageant dans toutes les directions, le lieu géométrique des points vérifiant la distance d_i pour chaque satellite est une sphère centrée sur celui-ci. C'est le front du signal. L'intersection des fronts de deux signaux émis simultanément par deux satellites est un cercle. Ce cercle représente l'ensemble des positions que peut avoir le récepteur. Si on se sert d'un troisième satellite, on obtient un segment de droite, donc deux positions possibles du récepteur. Dans le cas où le récepteur se trouve sur la terre, un des deux points est donc cohérent. Ainsi, la position du récepteur est déduite en éliminant le point incohérent.

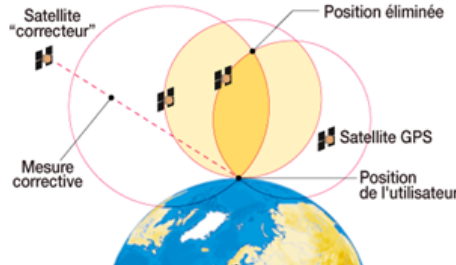


FIGURE I.1 – Positionnement par GPS avec synchronisation parfaite des horloges.

Théoriquement, trois satellites suffisent pour se positionner avec un récepteur GPS, mais pour avoir une bonne précision, il faut que la mesure du temps soit plus précise car une faible erreur sur cette dernière engendre une erreur énorme sur la position, environ 300 m pour une erreur de $10^{-6} \mu s$ d'où la nécessité d'un quatrième satellite pour la mesure précise du temps de propagation qui nécessite une synchronisation parfaite des satellites entre eux d'une part et des satellites avec le récepteur d'autre part .

A.2 Les signaux et mesures GPS

Les signaux des satellites GPS sont composés de deux ondes porteuses, $L_1(1575.42 MHz)$ et $L_2(1227.60 MHz)$, chacune modulée par des codes pseudo-aléatoires : C/A ($\lambda \sim 300m$) sur L_1 et L_2 et P ($\lambda \sim 30m$) sur L_2 . En plus de ces codes pseudo-aléatoires, les signaux GPS sont également modulés à l'aide des messages de navigation contenant des informations sur la

position et l'état des satellites (les éphémérides), sur les décalages des horloges satellites et sur le modèle paramétrique de l'ionosphère.

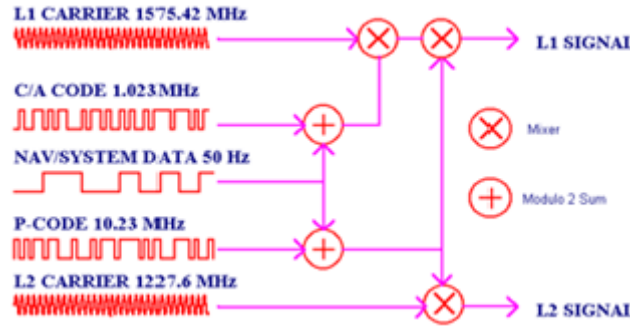


FIGURE I.2 – Les signaux des satellites GPS.(Sources : <http://sed.inrialpes.fr/Presentations>)

La mesure de base effectuée par les récepteurs GNSS est le temps de propagation Δt_i^j d'un signal se propageant du satellite j au récepteur i . Pour les mesures de code, le récepteur estime ce temps de propagation par auto-corrélation entre le signal reçu du satellite et celui généré par le récepteur. Puisque le signal se propage à vitesse de la lumière C , le récepteur en déduit la distance satellite-récepteur par la relation suivante :

$$R_i^j = C \cdot \Delta t_i^j \quad (\text{A.1})$$

Cette équation n'est valable que si on considère que l'horloge du récepteur et celui du satellite sont synchronisées et que l'atmosphère (ionosphère et la troposphère) qui normalement retarde le signal n'existe pas. En outre, que la mesure est parfaite et exemptée de toute imprécision.

Dans ces conditions idéales, l'équation A.1 traduirait la distance géométrique entre le satellite et le récepteur. En réalité, le temps de propagation Δt_i^j est entaché d'une erreur liée à la désynchronisation de l'horloge du satellite GPS avec celle du récepteur. De plus l'atmosphère agit sur le signal et allonge le temps de propagation entre le satellite et le récepteur. Une incertitude due au bruit du récepteur, au décalage des centres de phase du satellite et du récepteur, aux éventuels trajets multiples, aux erreurs d'orbite et à la déformation de l'écorce terrestre (marée terrestre et surcharge océanique) affecte également les mesures GPS. L'équation d'observation des mesures de code ou de pseudo-distances tenant compte de toutes ces sources d'erreurs s'écrit comme suit :

$$R_i^j = \rho_i^j + C \Delta t_i^j + T_i^j + I_i^j + e_i^j \quad (\text{A.2})$$

Où R_i^j est la mesure de pseudo-distance, Δt_i^j et Δt^j sont respectivement les décalages d'horloge récepteur et satellite, T_i^j et I_i^j le retard troposphérique et ionosphérique, C la célérité de la lumière, ρ_i^j la distance géométrique entre le récepteur et le satellite $\rho_i^j = \| r_i - s^j \|$ avec $r_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ la position du récepteur et $s^j = (x^j, y^j, z^j)^T$ celle du satellite et e_i^j un modèle d'erreurs incluant le bruit du récepteur, les trajets multiples et autres petites erreurs affectant la mesure.

La mesure de phase est similaire à celle de code sauf que la mesure se fait sur les ondes porteuses L_1 et L_2 . Le principe de cette mesure est la comparaison de phase du signal reçu avec celle du signal généré par le récepteur qui est une réplique du signal émis par le satellite. Le récepteur GPS mesure par corrélation la différence de phase entre la porteuse du signal reçu et celle du signal généré. Le déphasage entre ces signaux correspond au nombre de cycles écoulé entre l'émission par le satellite et la réception par le récepteur. Cependant, seule la partie fractionnaire de la durée de propagation du signal entre le satellite GPS et récepteur comptée en nombre de cycle peut être mesurée par le récepteur. Le nombre entier de cycles quant à lui inconnu, confère à la mesure de phase sa propriété ambiguë. Cette ambiguïté entière est un paramètre qui est estimé simultanément aux autres paramètres lors des traitements des données GPS. L'équation d'observation des mesures de phase est semblable à celle de mesure de pseudo-distance :

$$L_i^j = \rho_i^j + C\Delta t_i^j + T_i^j - I_i^j + \lambda N_i^j + e_i^j \quad (\text{A.3})$$

Avec L_i^j la partie décimale du déphasage ramené en termes de distance, N_i^j l'ambiguïté entière et λ la longueur d'onde de la porteuse. La plupart des termes des équations d'observations de phase et de code sont identiques mais le retard ionosphérique est négatif dans l'équation de mesure de phase. Cela est dû du fait qu'à la traversée de l'ionosphère, la phase de la porteuse est avancée.

Annexe B Combinaison linéaire des mesures

Les systèmes de positionnement par satellite utilisent tous plusieurs fréquences porteuses pour l'émission de leur signaux. Les mesures peuvent donc être réalisées sur ces différentes fréquences. Afin d'aider à la fixation des ambiguïtés et à réduire certains termes d'erreurs comme l'effet de l'ionosphère, il est possible de réaliser des combinaisons linéaires des mesures.

B.1 La combinaison ionosphere-free

La combinaison LC , ou Iono-Free, est utilisée pour résoudre les ambiguïtés entières. Il s'agit d'une combinaison entre deux fréquences (L_1 et L_2) qui permet d'éliminer les effets ionosphériques du premier ordre. Cette combinaison vaut, pour les mesures de phase :

$$L_{LC} = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} \cdot (f_1^2 \cdot L_1 - f_2^2 \cdot L_2) \quad (\text{B.1})$$

Cette combinaison conduit à un terme d'ambiguïté réelle, d'où la nécessité d'autres combinaisons pour pouvoir résoudre les ambiguïtés entières.

B.2 Combinaison Wide lane

Cette combinaison permet d'avoir une grande longueur d'onde λ_w de la porteuse afin de faciliter la détection des sauts de cycles. Elle s'écrit selon la relation suivante :

$$L_w = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} L_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} L_2 \quad (\text{B.2})$$

$$R_w = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} R_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} R_2 \quad (\text{B.3})$$

La longueur d'onde λ_w et l'ambiguïté N_w correspondantes à cette combinaison sont :

$$\lambda_w = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \simeq 0.859m \quad (\text{B.4})$$

$$N_w = N_1 - N_2 \quad (\text{B.5})$$

B.3 Combinaison Narrow lane

La combinaison Narrow lane est une combinaison à courte longueur d'onde λ_n permettant de reformuler l'ambiguïté de phase sur la mesure ionsphere-free. Elle est donnée par les relations :

$$L_n = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_1} L_1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_1} L_2 \quad (\text{B.6})$$

$$R_n = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_1} R_1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_1} R_2 \quad (\text{B.7})$$

La longueur d'onde λ_n et l'ambiguïté N_n correspondantes à cette combinaison sont :

$$\lambda_n = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_1} \simeq 0.107m \quad (\text{B.8})$$

$$N_n = N_1 + N_2 \quad (\text{B.9})$$

B.4 Combinaison Melbourne-Wübenna

La combinaison dite de Melbourne-Wübenna permet de combiner les observations de phase et de code en une seule relation :

$$L_{mi}^j = \lambda_w \left[\frac{L_{1i}^j}{\lambda_1} - \frac{L_{2i}^j}{\lambda_2} \right] - \frac{f_1 P_{1i}^j + f_2 P_{2i}^j}{f_1 + f_2} \quad (\text{B.10})$$

Cette relation peut s'écrire aussi de la façon suivante :

$$\frac{L_{mi}^j}{\lambda_w} = N_{wi}^j + \frac{B_{1i}^j}{\lambda_1} - \frac{B_{2i}^j}{\lambda_2} - \frac{\lambda_n}{\lambda_w} \left(\frac{b_{1i}^j}{\lambda_1} + \frac{b_{2i}^j}{\lambda_2} \right) \quad (\text{B.11})$$

Où λ_n et λ_w sont les longueurs d'onde issues des combinaisons Narrow lane et Wide lane, N_{wi}^j l'ambiguïté Wide lane.

Annexe C Tests d'hypothèse

Un test d'hypothèse est un procédé permettant de contrôler (accepter ou rejeter) à partir de l'étude d'un ou plusieurs échantillons aléatoires, la validité d'hypothèses relatives à une ou plusieurs populations. Le principe des tests d'hypothèse est de poser une hypothèse de travail et de prédire les conséquences de cette hypothèse pour la population ou l'échantillon. On compare ces prédictions avec les observations et l'on conclut en acceptant ou en rejetant l'hypothèse de travail à partir de règles de décisions objectives. Définir les hypothèses de travail, constitue un élément essentiel des tests d'hypothèses de même que vérifier les conditions d'application de ces dernières.

C.1 Hypothèse nulle - hypothèse alternative.

Un phénomène aléatoire est modélisé par une variable aléatoire à propos de laquelle deux hypothèses sont émises : une hypothèse nulle, notée H_0 et une hypothèse alternative, notée H_1 .

L'hypothèse nulle H_0 est l'hypothèse que l'on désire contrôler : elle consiste à dire qu'il n'existe pas de différence entre les paramètres comparés ou que la différence observée n'est pas significative et est due aux fluctuations d'échantillonnage. L'hypothèse alternative notée H_1 est la "négarion" de H_0 , elle est équivalente à dire « H_0 est fausse ». La décision de rejeter H_0 signifie que H_1 est réalisée ou H_1 est vraie.

C.2 Statistique et Seuil de signification du test

Une statistique S est une fonction des variables aléatoires représentant l'échantillon. La valeur numérique de la statistique obtenue pour l'échantillon considéré permet de distinguer entre H_0 vraie et H_0 fausse.

Connaissant la loi de probabilité suivie par la statistique S sous l'hypothèse H_0 , il est possible d'établir une valeur seuil, S_{seuil} de la statistique pour une probabilité donnée appelée le niveau de signification α du test.

A ce seuil de signification, on fait correspondre sur la distribution d'échantillonnage de la statistique une région de rejet de l'hypothèse nulle ($R_c = f(S_{seuil} = [\gamma_1, \gamma_2])$) appelée également région critique). L'aire de cette région correspond à la probabilité α lié à l'erreur de première espèce.

$$\begin{aligned} P(S \notin R_c) &= \alpha \\ P(\gamma_1 \leq S \leq \gamma_2) &= 1 - \alpha \end{aligned} \quad (C.1)$$

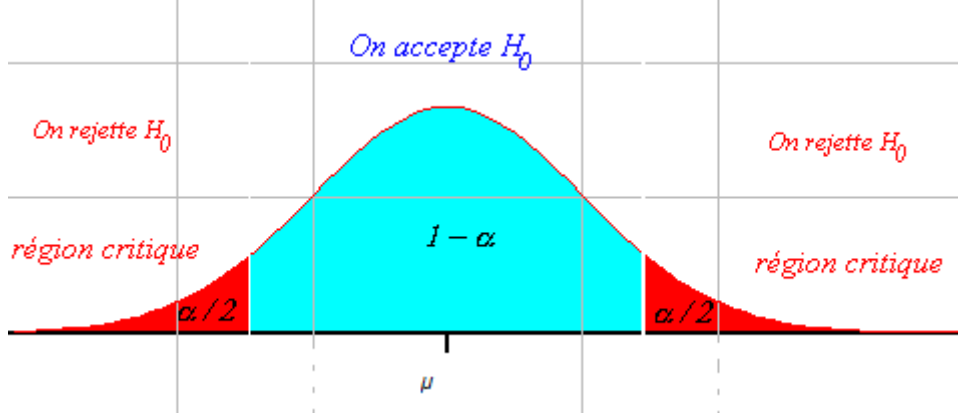


FIGURE III.1 – Région d'acceptation et région critique. (Sources : <http://homeomath2.immingo.net/testbilateral3.htm>)

Pour le cas de ce travail, il s'agit de contrôler un échantillon X de n mesures suivant une loi normale de moyenne μ et d'écart type σ .

$$X \sim N(\mu, \sigma) \quad (C.2)$$

L'erreur de première espèce correspond ici à la probabilité qu'une mesure n'appartienne pas à la région d'acceptation (ou appartienne à la région critique). C'est à dire que toute mesure située à l'extérieur de la région d'acceptation a une probabilité de réalisation inférieure à $\frac{1}{n}$.

La loi suivie par le statistique S sous l'hypothèse H_0 étant une loi normale et symétrique, on rajoute à l'équation C.3 une contrainte de risque symétrique qu'on peut traduire par $\gamma = \gamma_2 = -\gamma_1$ et l'équation devient :

$$\begin{aligned} 1 - \frac{1}{n} &= P(-\gamma \leq S \leq \gamma) \\ 1 - \frac{1}{n} &= P(S \leq \gamma) - P(S \leq -\gamma) \\ 1 - \frac{1}{n} &= P(S \leq \gamma) - P(S \geq \gamma) \\ 1 - \frac{1}{n} &= P(S \leq \gamma) - (1 - P(S \leq \gamma)) \\ 1 - \frac{1}{n} &= 2P(S \leq \gamma) - 1 \end{aligned} \quad (C.3)$$

D'où :

$$P(S \leq \gamma) = 1 - \frac{1}{2n} \quad (C.4)$$

Déterminer un intervalle de confiance pour toute mesure x_i revient donc à déterminer un intervalle réel ω centré sur x_i ($\omega = [x_i - \gamma.\sigma, x_i + \gamma.\sigma]$) tel que la valeur moyenne μ de la mesure appartienne à cet intervalle :

$$P(\mu \in [x_i - \gamma.\sigma, x_i + \gamma.\sigma]) = 1 - \frac{1}{2n} \quad (\text{C.5})$$

On en déduit que les outliers sont ici des observations x_i telles que :

$$|x_i - \mu| > \gamma.\sigma \quad (\text{C.6})$$

Annexe D Stations éliminées du réseau NAWDEX

NOM STATION	CAUSE DE REJET
brux_eu_epn	Station sans observations
redu_eu_epn	Station sans observations
opme_fr_rgp	Station sans observations
pimi_fr_rgp	Station sans observations
scub_wo_igs	Station sans observation
dunn_us_ngs	Ecart PPP_SPP énorme
gaau_us_ngs	Ecart PPP_SPP énorme
ct29_fr_rgp	RMS élevé
pore_wo_sonel	RMS élevé
tgpm_wo_unavco	RMS élevé
cbra_pt_renep	Sigma ZTD élevée
var1_wo_sonel	Sigma ZTD élevée
brsg_us_ngs	Taux de résolution des Ambiguïtés < 20%
ocra_it_asi	Ecart-type dUp > 30 mm
brtw_us_ngs	Ecart-type dUp > 30 mm
mntnt_us_ngs	Ecart-type dUp > 30 mm
kulu_wo_sonel	Doublon
qaq1_wo_igs	Doublon
qaq1_wo_sonel	Doublon
scor_dk_gnet	Doublon
scor_wo_igs	Doublon
scor_wo_sonel	Doublon
thu3_dk_gnet	Doublon
thu2_wo_igs	Doublon
thu3_wo_igs	Doublon
thu2_wo_sonel	Doublon
thu3_wo_sonel	Doublon
alrt_wo_sonel	Doublon
baie_wo_igs	Doublon
frdn_wo_igs	Doublon
hlfx_wo_igs	Doublon
hlfx_wo_sonel	Doublon
iqal_wo_igs	Doublon
nain_wo_sonel	Doublon
sch2_wo_igs	Doublon
stjo_wo_igs	Doublon
stjo_wo_sonel	Doublon
cant_es_ige	Doublon
acor_wo_sonel	Doublon
ceul_wo_sonel	Doublon
lpal_wo_igs	Doublon
lpal_wo_unavco	Doublon
meli_wo_igs	Doublon
meli_wo_sonel	Doublon
meli_wo_unavco	Doublon
yebe_wo_igs	Doublon
como_it_asi	Doublon
eijs_nl_dgpa	Doublon
kos1_nl_dgpa	Doublon
rove_it_asi	Doublon
tori_it_asi	Doublon
zouf_it_asi	Doublon
aruf_fr_rgp	Doublon
bann_fr_rgp	Doublon
chiz_fr_rgp	Doublon

cral_fr_rgp	Doublon
lroc_fr_rgp	Doublon
lroc_wo_igs	Doublon
mars_fr_rgp	Doublon
mars_wo_sonel	Doublon
mich_fr_rgp	Doublon
pali_fr_rgp	Doublon
pard_fr_rgp	Doublon
rotg_fr_rgp	Doublon
rst2_fr_rgp	Doublon
smtg_fr_rgp	Doublon
stmr_fr_rgp	Doublon
bgbc_wo_sonel	Doublon
brst_wo_igs	Doublon
brst_wo_sonel	Doublon
fft2_wo_sonel	Doublon
guip_wo_sonel	Doublon
iryl_wo_sonel	Doublon
koug_wo_igs	Doublon
lmmf_wo_igs	Doublon
lmmf_wo_sonel	Doublon
lmmf_wo_unavco	Doublon
prie_wo_sonel	Doublon
tlse_wo_igs	Doublon
tlsg_wo_igs	Doublon
hofn_wo_igs	Doublon
reyk_wo_igs	Doublon
reyk_wo_sonel	Doublon
gari_wo_sonel	Doublon
geno_wo_sonel	Doublon
genu_wo_sonel	Doublon
cag1_wo_sonel	Doublon
ucag_wo_sonel	Doublon
ven1_wo_sonel	Doublon
dlf5_nl_dgpa	Doublon
ijmu_wo_sonel	Doublon
ters_wo_sonel	Doublon
txe2_wo_sonel	Doublon
vlis_wo_sonel	Doublon
wsrt_nl_dgpa	Doublon
casc_wo_sonel	Doublon
flrs_wo_igs	Doublon
flrs_wo_sonel	Doublon
func_wo_igs	Doublon
func_wo_sonel	Doublon
pdel_wo_igs	Doublon
pdel_wo_sonel	Doublon
aber_wo_sonel	Doublon
hers_wo_igs	Doublon
hert_wo_igs	Doublon
new1_wo_sonel	Doublon
shee_wo_sonel	Doublon
swtg_wo_sonel	Doublon
barh_wo_igs	Doublon
bggy_wo_unavco	Doublon
brmu_wo_igs	Doublon
brmu_wo_sonel	Doublon

brsq_wo_sonel	Doublon
cbmd_wo_unavco	Doublon
cn00_wo_unavco	Doublon
cn07_wo_unavco	Doublon
cn12_wo_sonel	Doublon
cn12_wo_unavco	Doublon
cn15_wo_unavco	Doublon
cn16_wo_unavco	Doublon
cn37_wo_unavco	Doublon
cn40_wo_unavco	Doublon
cro1_wo_unavco	Doublon
cupr_wo_unavco	Doublon
gcea_wo_unavco	Doublon
gode_wo_igs	Doublon
godz_wo_igs	Doublon
hnpt_wo_igs	Doublon
lcsb_wo_unavco	Doublon
mayz_wo_unavco	Doublon
mipr_wo_unavco	Doublon
ncdu_wo_sonel	Doublon
npri_wo_sonel	Doublon
p780_wo_unavco	Doublon
rdsd_wo_unavco	Doublon
scha_wo_sonel	Doublon
smrt_wo_unavco	Doublon
stvi_wo_unavco	Doublon
vikh_wo_unavco	Doublon
zsu4_wo_sonel	Doublon
cpvg_wo_sonel	Doublon
dakr_wo_sonel	Doublon
kour_wo_sonel	Doublon
madr_wo_igs	Doublon
oak2_wo_igs	Doublon
roap_wo_unavco	Doublon
scub_wo_unavco	Doublon
stj3_wo_sonel	Doublon
unbj_wo_igs	Doublon
wdc5_wo_igs	Doublon
wdc6_wo_igs	Doublon
bysp_wo_unavco	Doublon
prcg_wo_unavco	Doublon
ttuw_wo_unavco	Doublon

Annexe E Résultats des comparaisons

E.1 Statistiques de comparaison du réseau NAWDEX avec les RS

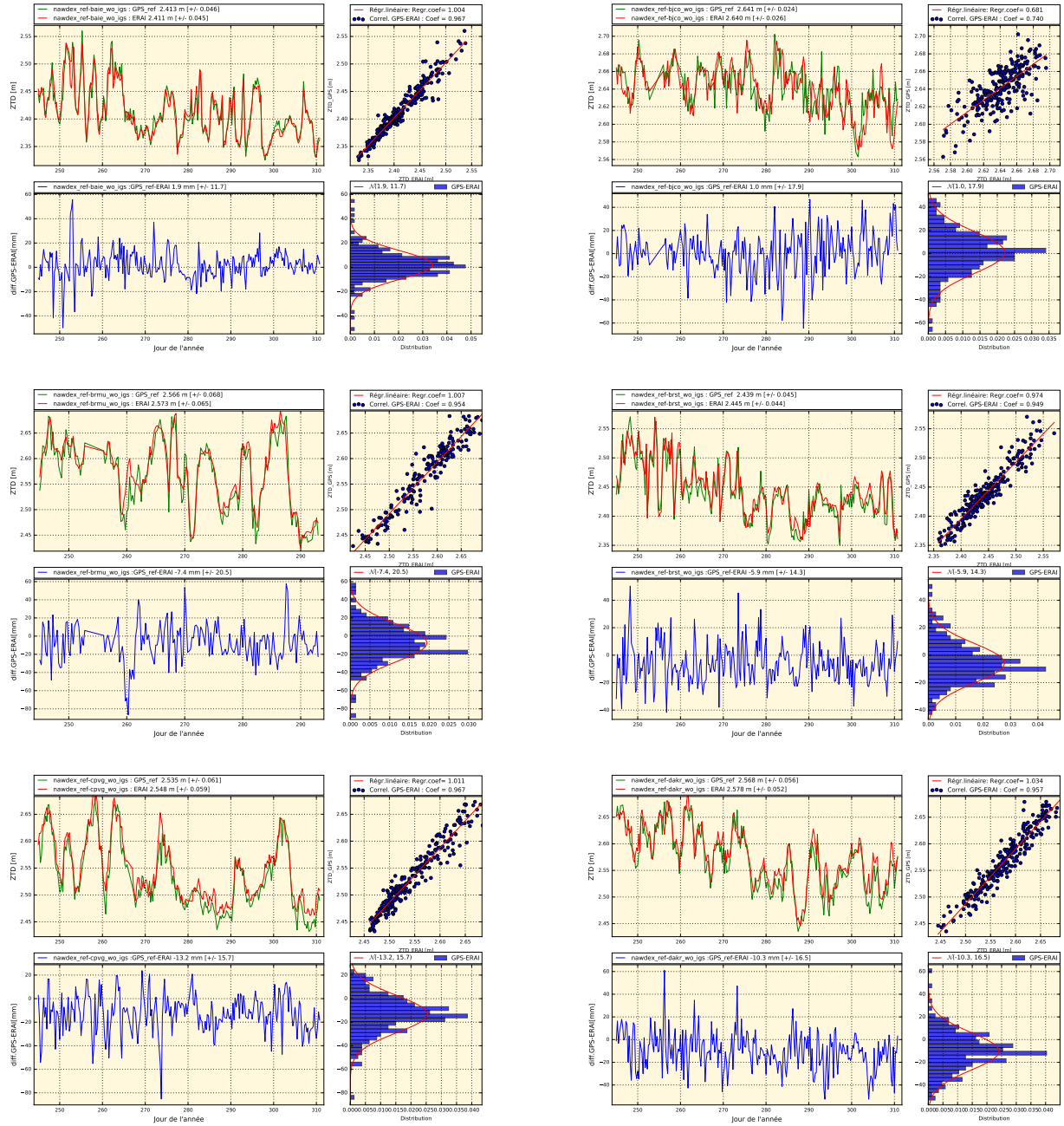
Nom de la Station	ZTD [m]		ZTD_GPS - ZTD_RS_UWYO			
	GPS	RS UWYO	Biais [mm]	Ecart type [mm]	Coef. Corr	Pente
alrt_ca_nrcan	2.311	2.323	-12.050	4.599	0.981	0.995
eur2_ca_nrcan	2.322	2.331	-8.998	2.029	0.996	0.982
sabl_ca_nrcan	2.449	2.452	-2.257	6.443	0.996	0.986
tskt_ca_nrcan	2.442	2.443	-0.924	4.995	0.997	0.988
aasi_dk_gnet	2.332	2.341	-8.748	3.616	0.985	0.965
dmhn_dk_gnet	2.346	2.355	-9.755	2.975	0.995	0.985
sco2_dk_gnet	2.344	2.352	-7.833	3.884	0.990	0.987
camp_fr_rgp	2.466	2.475	-8.875	17.220	0.939	0.827
ctx5_fr_rgp	2.431	2.443	-11.828	9.482	0.973	0.975
cubx_fr_rgp	2.453	2.465	-12.584	12.787	0.964	0.849
guip_fr_rgp	2.416	2.428	-12.173	12.247	0.974	0.860
sgil_fr_rgp	2.443	2.449	-6.146	10.644	0.980	0.927
m0se_it_asi	2.450	2.452	-1.569	11.138	0.971	0.897
medi_it_asi	2.470	2.476	-6.132	7.740	0.985	0.947
pavi_it_asi	2.437	2.441	-3.512	9.882	0.975	0.925
usal_it_asi	2.467	2.466	0.836	13.988	0.948	0.938
camo_uk_os	2.416	2.419	-3.339	4.434	0.995	0.980
hert_uk_os	2.435	2.441	-5.740	5.461	0.993	0.951
keyw_uk_os	2.419	2.425	-5.984	6.877	0.988	0.957
leri_uk_os	2.397	2.401	-3.328	6.326	0.988	0.964
brmu_us_ngs	2.579	2.581	-2.436	20.182	0.949	0.929
ccv6_us_ngs	2.584	2.578	6.477	11.546	0.989	1.018
gcea_us_ngs	2.588	2.587	1.415	15.904	0.945	0.910
hipt_us_ngs	2.417	2.412	4.252	7.390	0.994	0.999
lwx1_us_ngs	2.460	2.453	6.490	10.295	0.988	0.983
mcd5_us_ngs	2.563	2.554	9.227	10.731	0.992	1.007
megeo_us_ngs	2.422	2.419	3.139	9.620	0.987	0.979
mepi_us_ngs	2.383	2.385	-2.250	7.340	0.989	0.955
ncbe_us_ngs	2.533	2.535	-1.700	12.700	0.988	0.961
nyrh_us_ngs	2.467	2.471	-3.739	8.417	0.996	0.940
nyst_us_ngs	2.430	2.428	2.695	12.660	0.977	0.979
rdsd_us_ngs	2.615	2.623	-7.945	4.683	0.993	0.985
scha_us_ngs	2.525	2.520	5.181	11.714	0.990	1.000
yfb1_us_ngs	2.353	2.361	-8.222	3.630	0.993	0.959

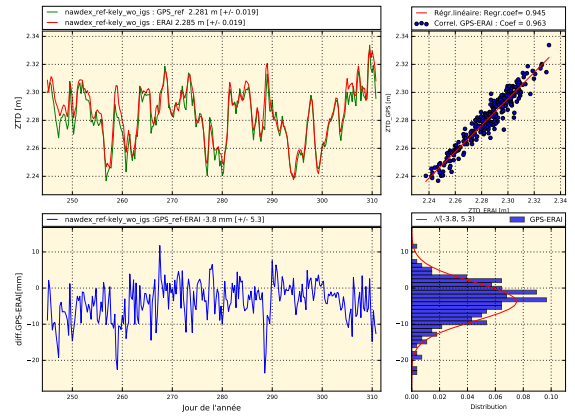
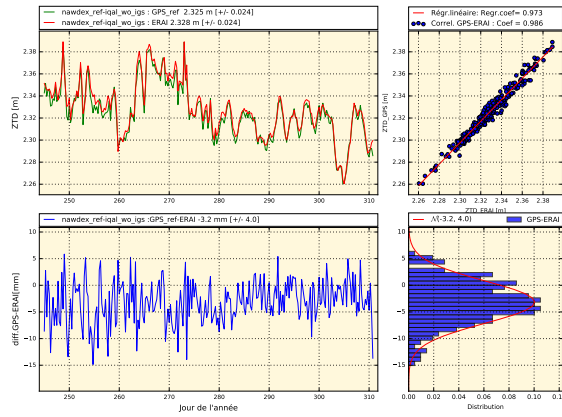
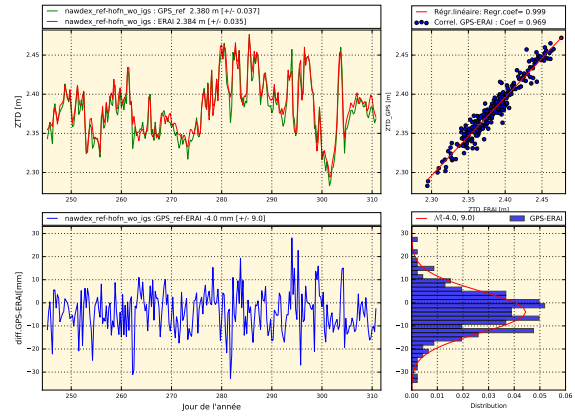
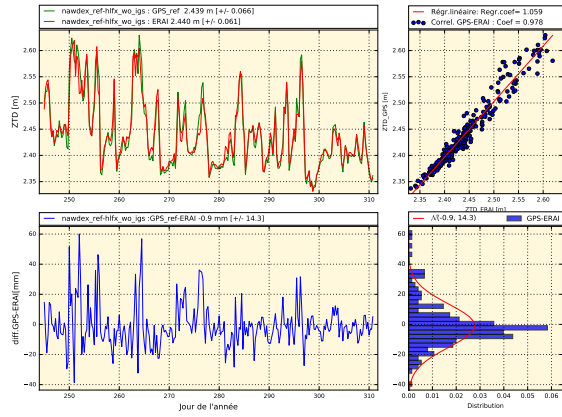
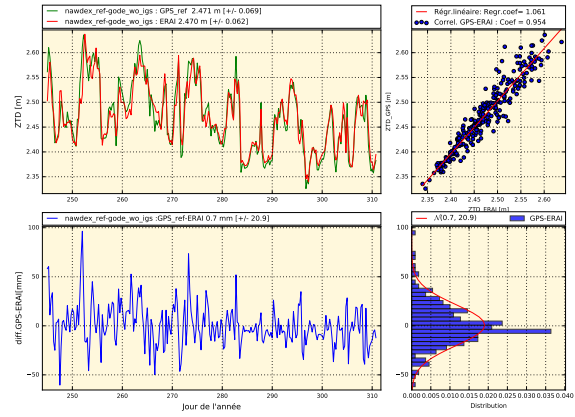
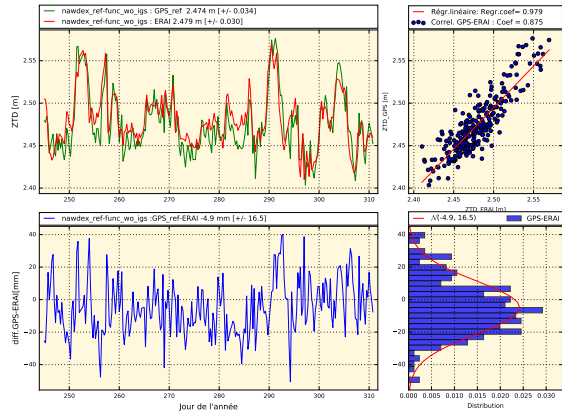
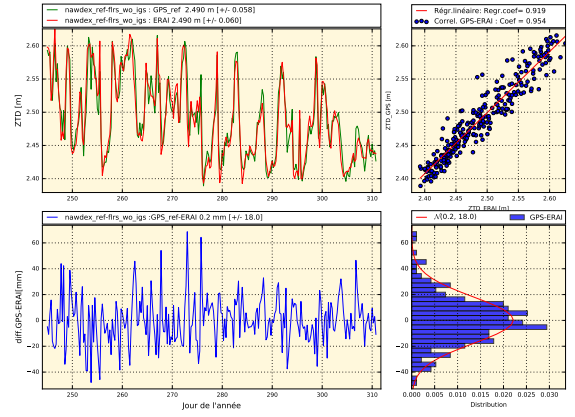
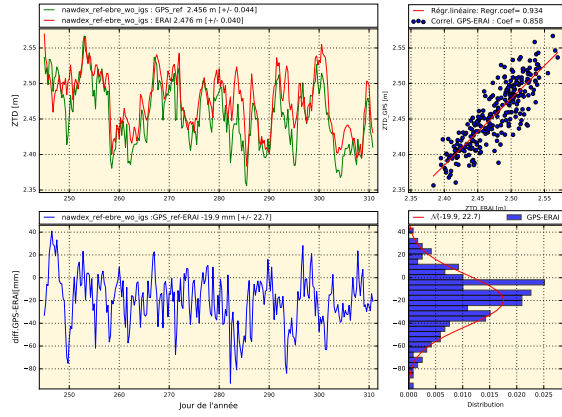
Nom de la Station	ZTD [m]		ZTD_GPS - ZTD_RS_UWYO			
	GPS	RS_UWYO	Biais [mm]	Ecart type [mm]	Coef. Corr	Pente
yyr1_us_ngs	2.385	2.390	-5.249	3.324	0.996	0.983
zma1_us_ngs	2.574	2.583	-9.286	10.185	0.990	0.949
zsu4_us_ngs	2.598	2.609	-11.047	14.655	0.926	0.828
nyal_wo_igs	2.356	2.364	-7.833	5.014	0.985	0.942
stj3_wo_igs	2.391	2.392	-1.292	5.161	0.995	0.983
and1_wo_sonel	2.399	2.406	-7.118	5.636	0.987	0.953
argi_wo_sonel	2.393	2.390	2.184	13.837	0.945	0.856
stas_wo_sonel	2.411	2.422	-10.587	8.018	0.982	0.919
tgem_wo_sonel	2.440	2.446	-5.980	10.922	0.961	0.914
ttuw_wo_sonel	2.598	2.603	-5.163	9.972	0.956	0.920
prml_wo_unavco	2.609	2.600	8.411	10.396	0.967	0.951

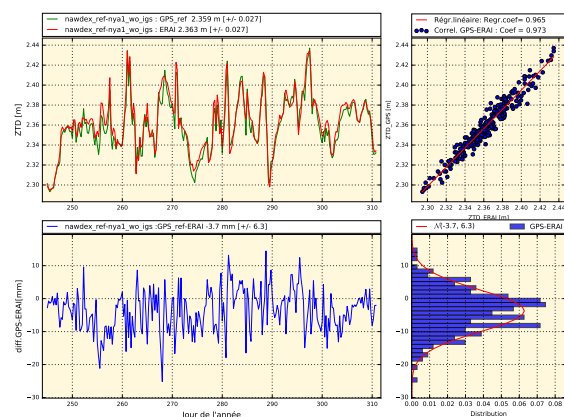
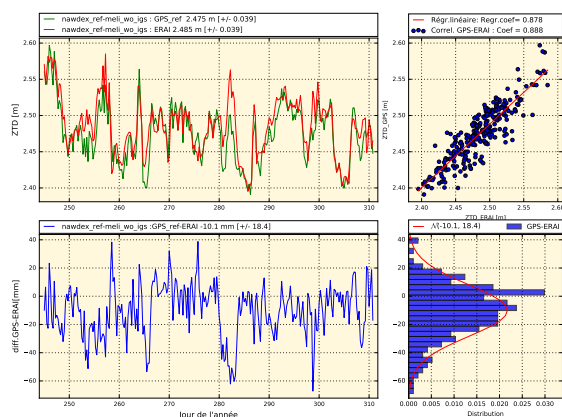
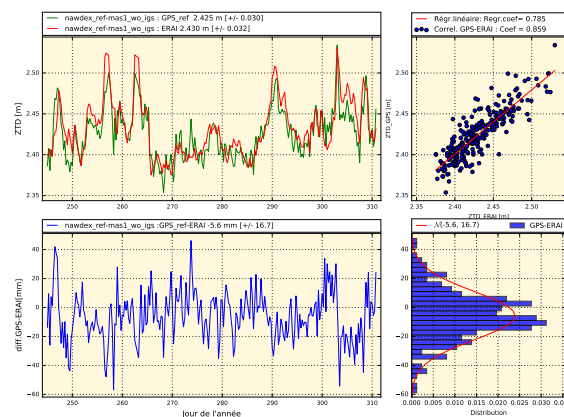
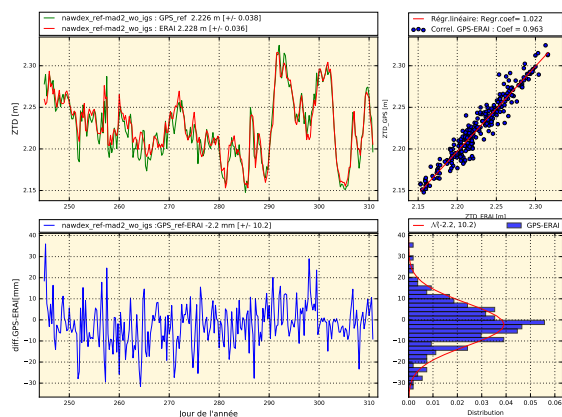
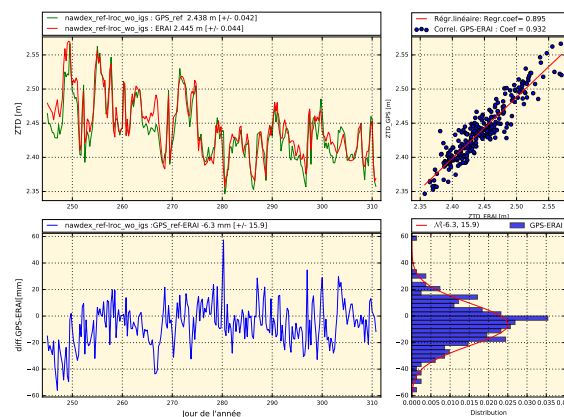
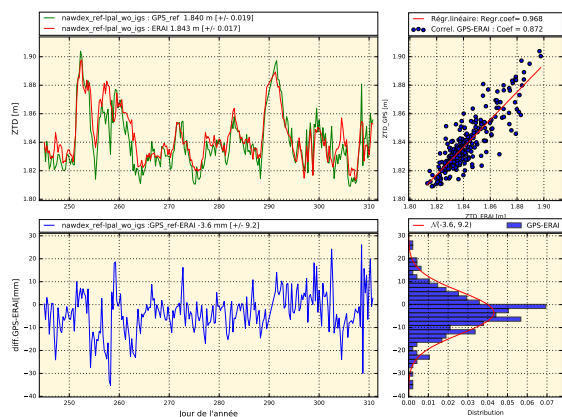
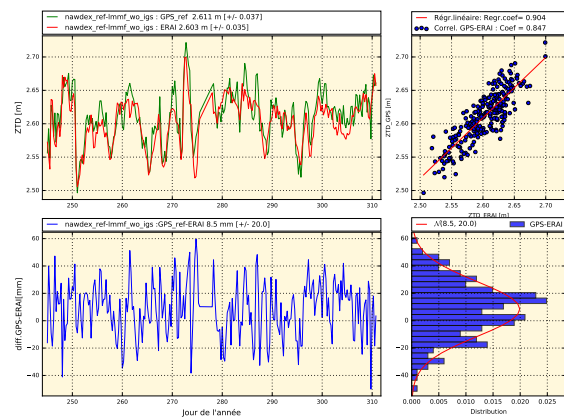
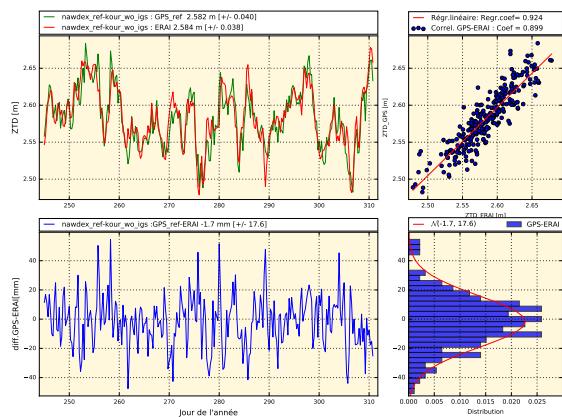
E.2 Statistiques de comparaison du réseau de référence avec ERAI

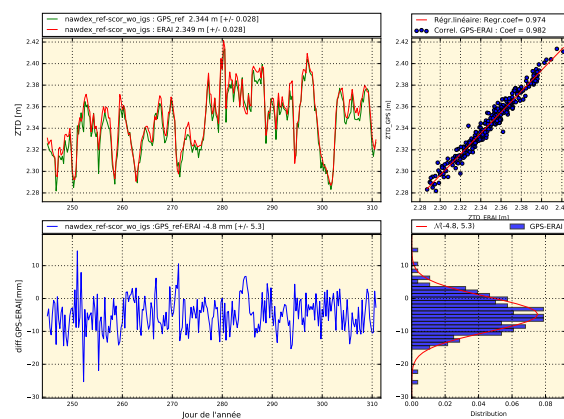
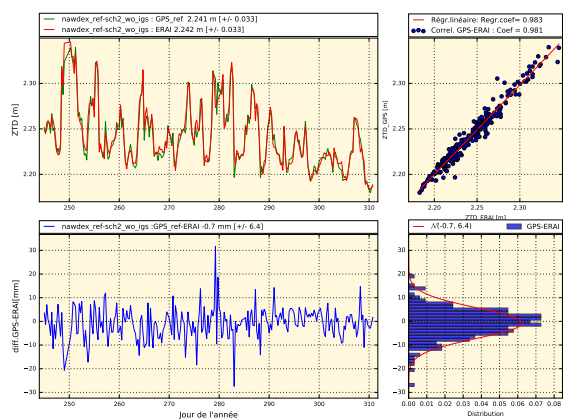
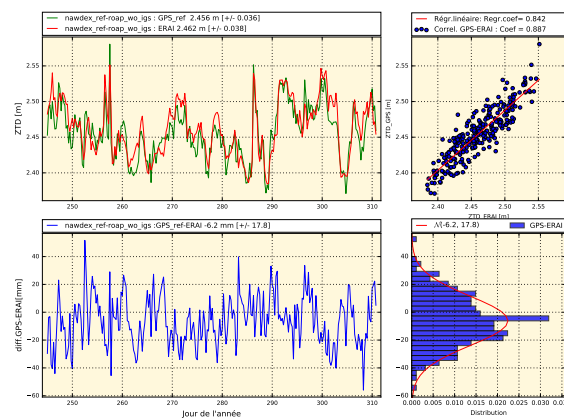
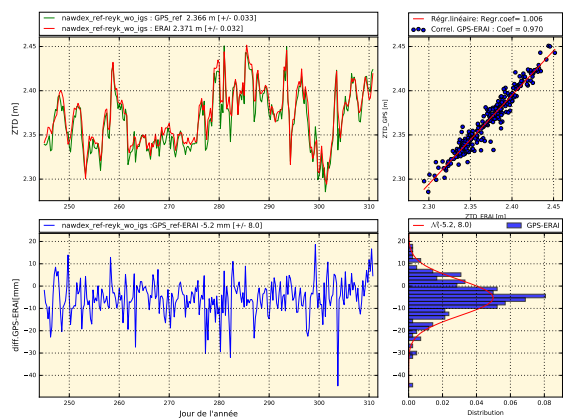
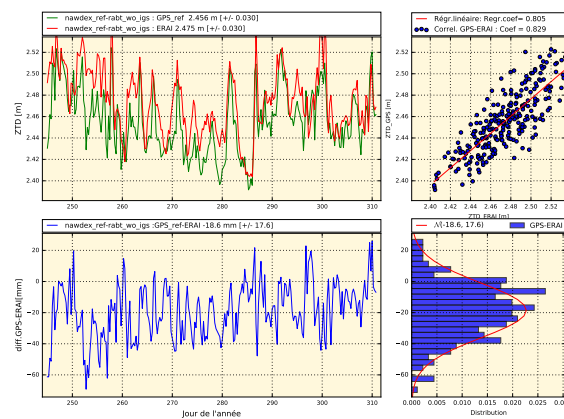
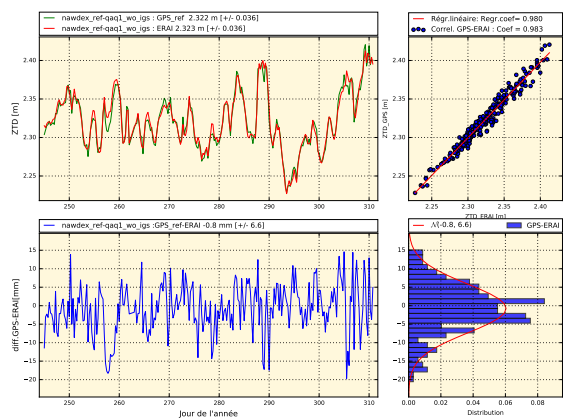
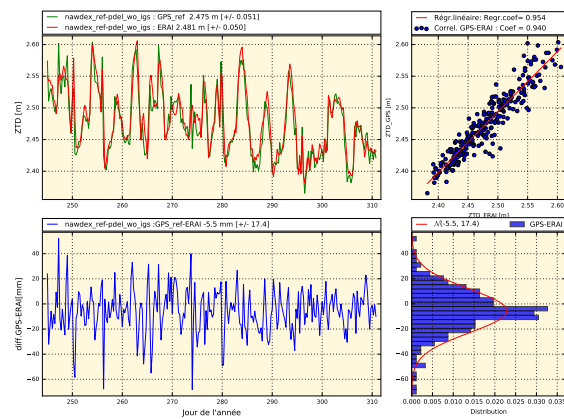
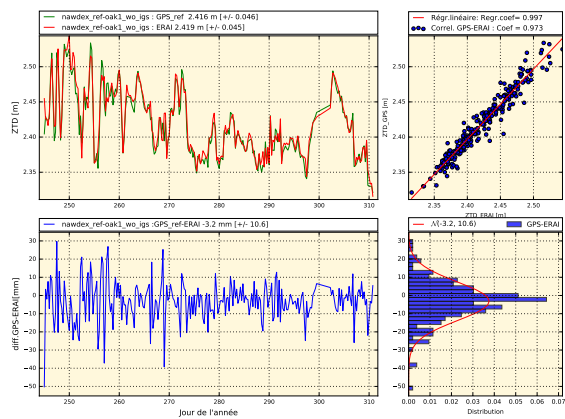
Nom de la Station	ZTD [m]		ZTD_GPS -ZTD_ERAI			
	GPS	ERA-Interim	Biais [mm]	Ecart type [mm]	Coef. Corr	Pente
baie_wo_igs	2.413	2.411	1.907	11.718	0.967	1.004
bjco_wo_igs	2.641	2.640	0.962	17.921	0.740	0.681
brmu_wo_igs	2.566	2.573	-7.400	20.490	0.954	1.007
brst_wo_igs	2.439	2.445	-5.850	14.323	0.949	0.974
cpvg_wo_igs	2.535	2.548	-13.155	15.703	0.967	1.011
dakr_wo_igs	2.568	2.578	-10.332	16.502	0.957	1.035
ebre_wo_igs	2.456	2.476	-19.946	22.689	0.858	0.934
flrs_wo_igs	2.490	2.490	0.190	18.021	0.954	0.919
func_wo_igs	2.474	2.479	-4.862	16.469	0.875	0.979
gode_wo_igs	2.471	2.470	0.671	20.910	0.954	1.061
hlfx_wo_igs	2.440	2.440	-0.854	14.346	0.978	1.060
hofn_wo_igs	2.380	2.384	-3.962	8.972	0.969	0.999
iqal_wo_igs	2.325	2.328	-3.156	3.969	0.986	0.973
kely_wo_igs	2.281	2.285	-3.769	5.295	0.963	0.945
kour_wo_igs	2.582	2.584	-1.681	17.585	0.899	0.924
lmmf_wo_igs	2.611	2.603	8.541	20.028	0.847	0.904
lpal_wo_igs	1.840	1.843	-3.559	9.215	0.872	0.968
lroc_wo_igs	2.438	2.445	-6.316	15.870	0.932	0.896
mad2_wo_igs	2.226	2.228	-2.212	10.190	0.963	1.022
mas1_wo_igs	2.425	2.431	-5.622	16.665	0.859	0.785
meli_wo_igs	2.475	2.485	-10.142	18.371	0.888	0.878
nyal_wo_igs	2.359	2.363	-3.713	6.349	0.973	0.965
oak1_wo_igs	2.416	2.419	-3.181	10.606	0.973	0.997
pdel_wo_igs	2.475	2.481	-5.514	17.396	0.940	0.954
qaql_wo_igs	2.322	2.323	-0.755	6.603	0.983	0.980
rabt_wo_igs	2.456	2.475	-18.580	17.568	0.830	0.806
reyk_wo_igs	2.366	2.371	-5.241	7.985	0.970	1.006
roap_wo_igs	2.456	2.462	-6.192	17.795	0.887	0.842
sch2_wo_igs	2.241	2.242	-0.730	6.373	0.981	0.983
scor_wo_igs	2.344	2.349	-4.816	5.291	0.982	0.974
sfer_wo_igs	2.447	2.458	-11.225	17.576	0.890	0.849
stjo_wo_igs	2.389	2.395	-5.299	13.647	0.971	0.946
thu2_wo_igs	2.322	2.324	-2.374	4.614	0.972	0.930
tlse_wo_igs	2.407	2.417	-10.484	14.310	0.939	0.975
ykro_wo_igs	2.547	2.550	-2.399	15.201	0.855	0.957

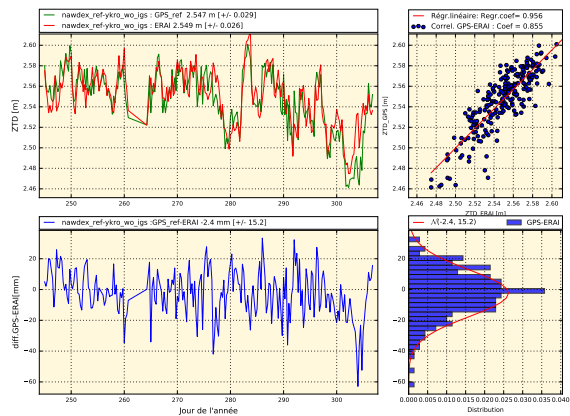
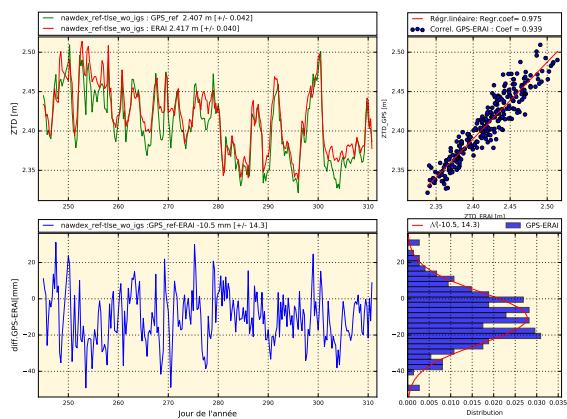
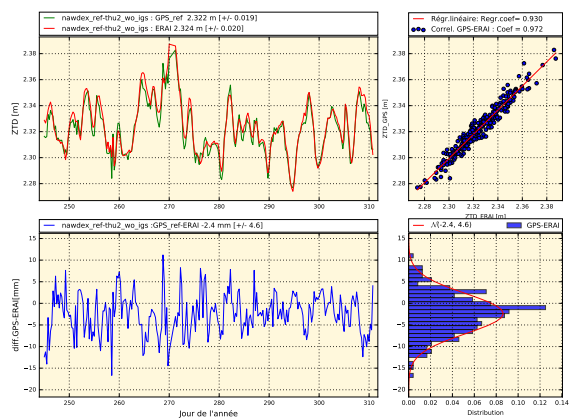
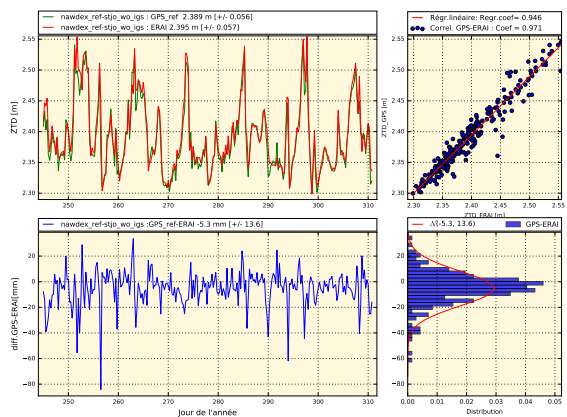
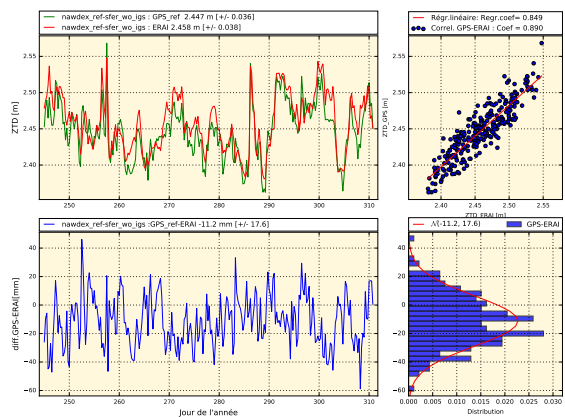
E.3 Séries temporelles des ZTD et biais : Réseau de référence





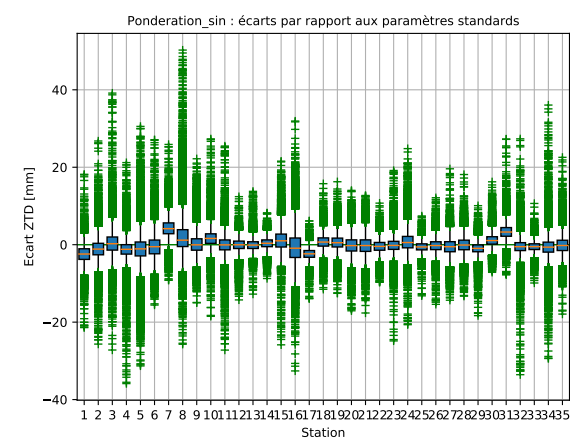
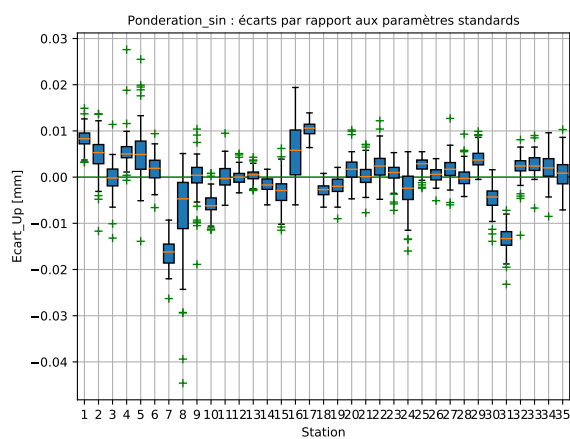
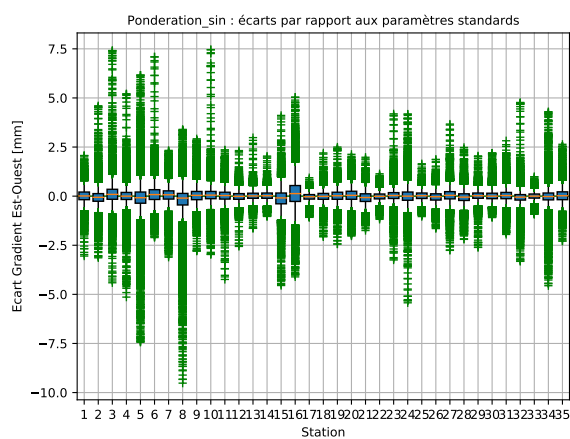
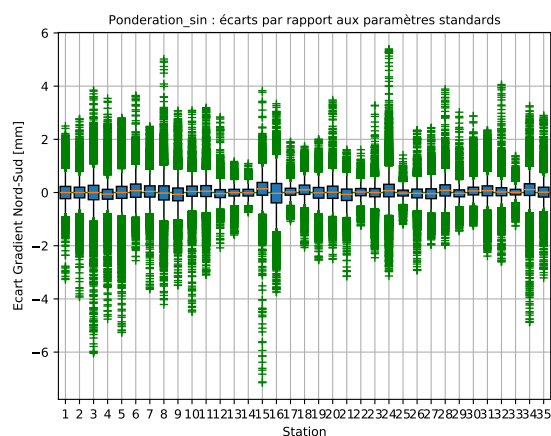
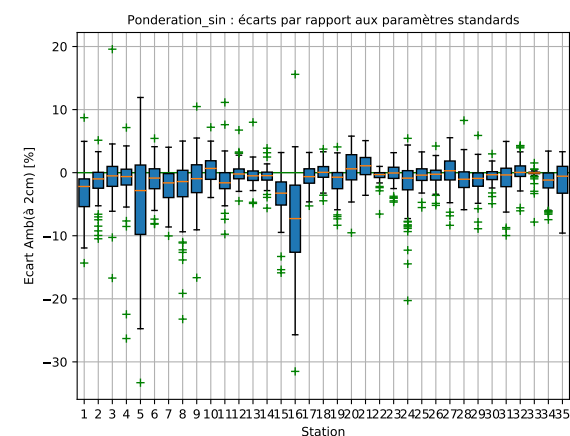




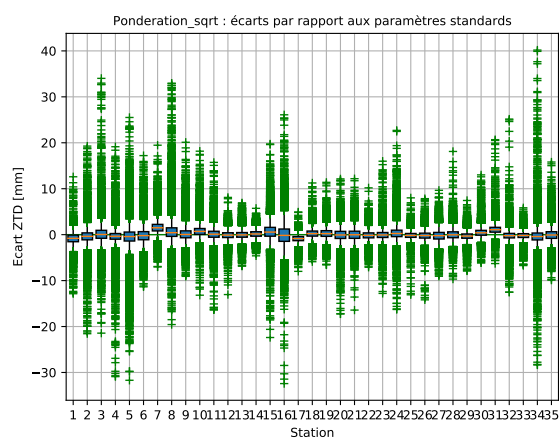
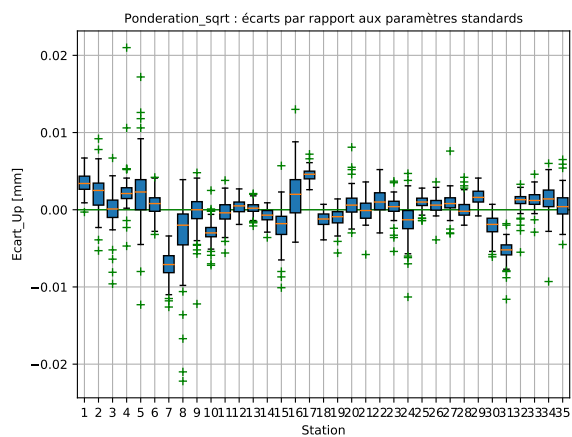
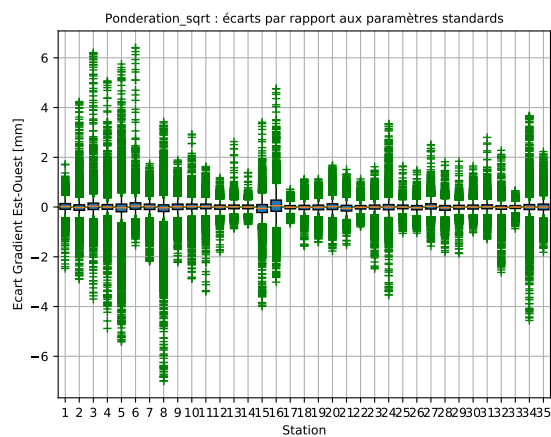
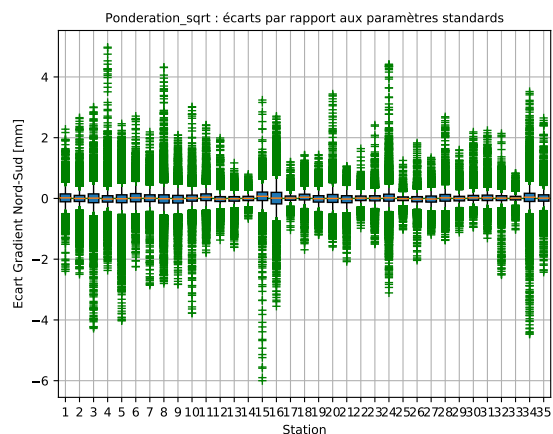
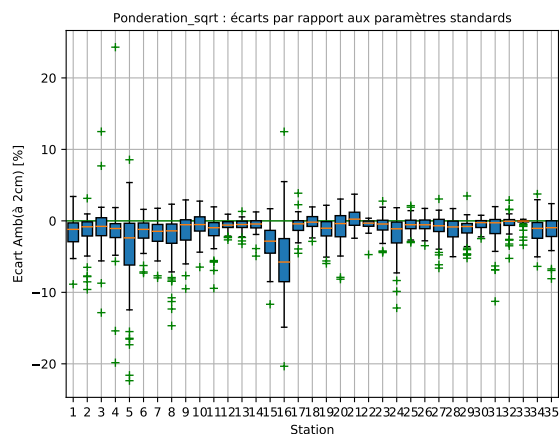


Annexe F Test de sensibilité

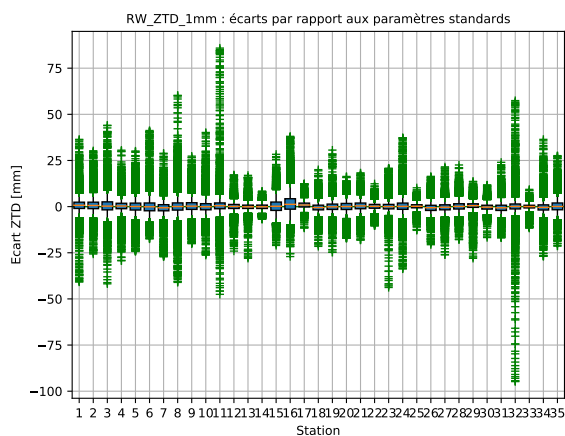
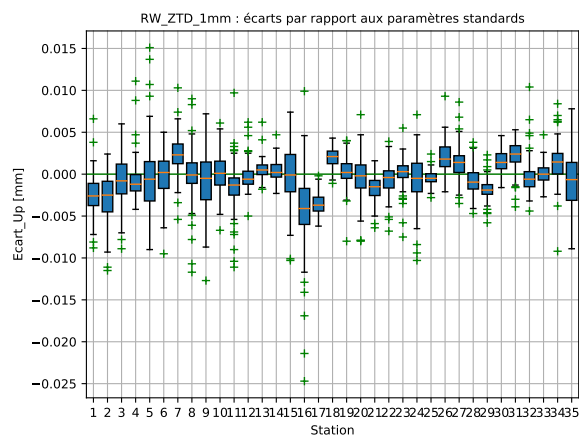
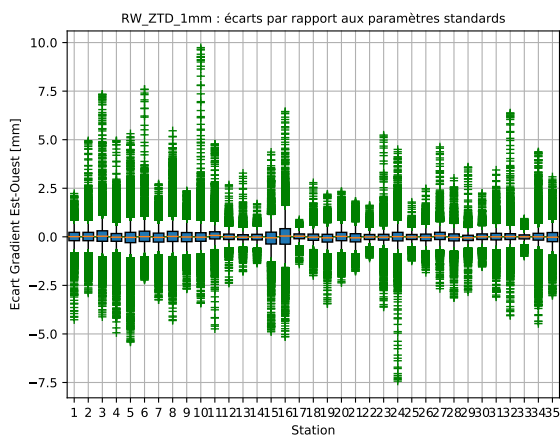
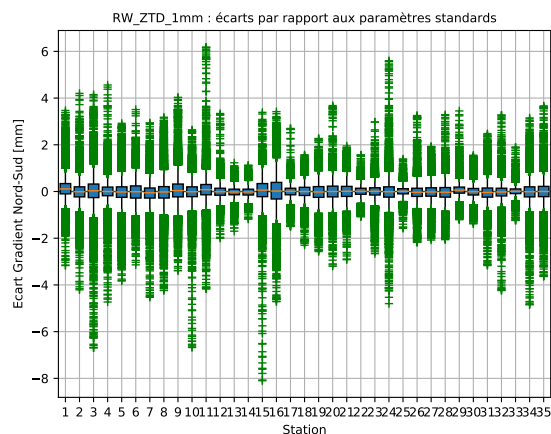
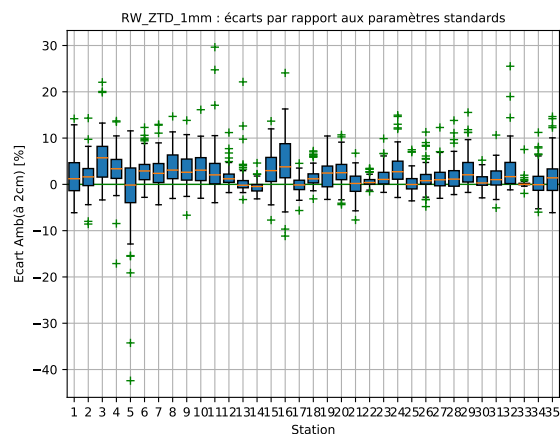
F.1 Pondération en sinus



F.2 Pondération en racine du sinus



F.3 Random Walk de 1 mm



F.4 Random Walk de 10 mm

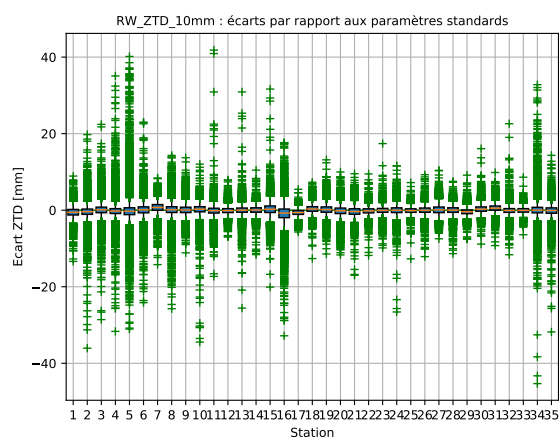
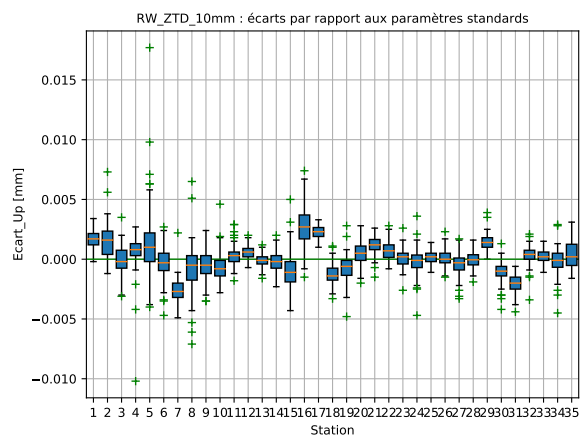
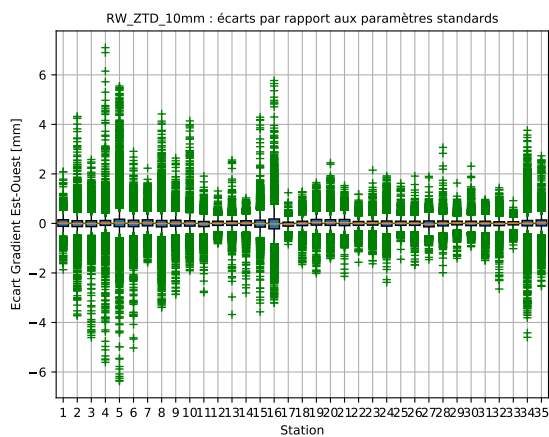
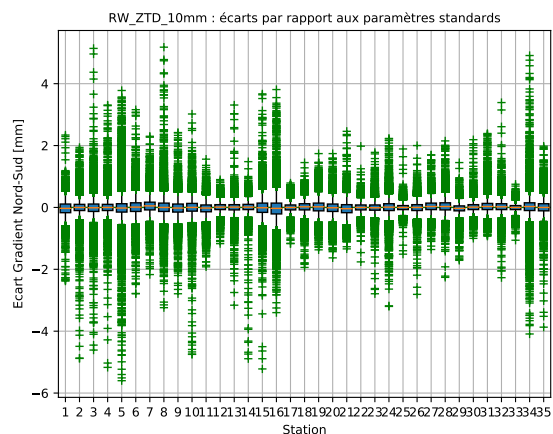
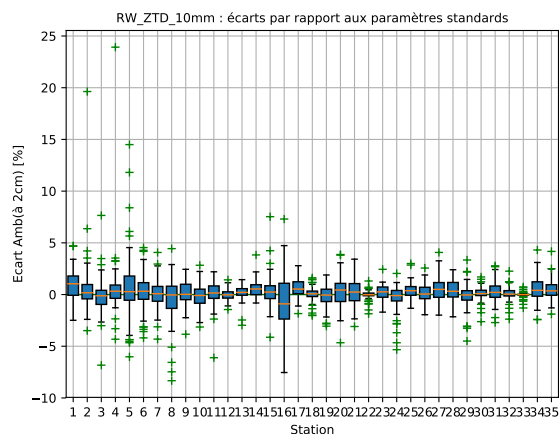


Table des figures

.1	Le réseau GPS de la campagne NAWDEX qui s'appuie sur les réseaux GNSS permanente déjà existant	12
I.1	Positionnement absolu et différentiel. En positionnement absolu un récepteur calcule sa position uniquement à partir de ses observations alors qu'en positionnement relatif le récepteur utilise ses observations et les corrections ou observations envoyées par une station de base pour construire des doubles différences et calculer par la suite sa position. Source : [Bosser, 2017a].	15
I.2	Variation temporelle des retards hydrostatique (I.2(a)) et humide(I.2(b)) de la station MNTF lors de la campagne NAWDEX(octobre à novembre 2016). Le retard humide est plus faible ($ZWD = 0.140\text{m}$) que le retard hydrostatique ($ZHD = 2.301\text{m}$) mais plus dispersé avec un écart type de 5 cm contre 1 cm pour la partie hydrostatique.	18
I.3	Projection du délai troposphérique au zénith grâce aux fonctions « mapping-function » dites fonctions de projection. Source : [Morel, 2017]	21
I.4	Modélisation des gradients atmosphérique : géométrie du problème : Vue de face [I.4(a)] et vue de dessus [I.4(b)] . Le point M est observé avec un angle d'élévation e à l'azimut Az . Source : [Bosser, 2008]	22
II.1	Principe de la mesure par radio-occultation.	26
III.1	Sensibilité du retard troposphérique au zénith à la variation de pression. On constate que la variation des séries ZTD suit celle de la pression à un facteur prêt, 0.2 mm/hPa. Source : [Tregoning and Herring, 2006].	31
III.2	Ecart entre les postions approchées (SPP) et celles estimées (PPP) avant (figureIII.2(a)) et après filtrage (figureIII.2(b)).	32
III.3	Percentiles et écarts types des résidus quadratiques moyens de toutes les stations de la campagne NAWDEX avant (figureIII.5(a)) et après (figureIII.3(b)) filtrage. Les lignes représentent respectivement les 97 ^{me} , 50 ^{me} (la médiane) et 2 ^{me} percentile, de haut en bas. Les stations sont ordonnées par ordre croissant des valeurs médianes des RMS.	33
III.4	Séries temporelles des résidus des stations de la campagne NAWDEX avec un RMS supérieur à 15 mm.	34
III.5	Percentiles et écarts types des séries ZTD de toutes les stations de la campagne NAWDEX. Les lignes représentent respectivement les 97 ^{me} , 50 ^{me} (la médiane) et 2 ^{me} percentile, de haut en bas. Les stations sont ordonnées par ordre croissant des valeurs médianes des ZTD.	35

III.6	Percentiles des erreurs formelles sur ZTD de toutes les stations de la campagne Nawdex (Avant filtrage : figure III.6(a), Après filtrage : figure III.6(b)). Les lignes représentent respectivement les 97 ^{me} , 50 ^{me} (la médiane) et 2 ^{me} percentile, de haut en bas. Les stations sont ordonnées par ordre croissant des valeurs médianes des erreurs formelles.	36
III.7	Séries temporelles des erreurs formelles des stations avec une moyenne supérieure à 6 mm.	36
III.8	Percentiles et écarts types des taux de résolution des ambiguïtés de toutes les stations de la campagne Nawdex. Les lignes représentent respectivement les 97 ^{me} , 50 ^{me} (la médiane) et 2 ^{me} percentile, de haut en bas. Les stations sont ordonnées par ordre croissant des valeurs médianes des taux de résolution des ambiguïtés.	37
III.9	Écarts types sur la position verticale avant (figure III.9(a)) et après (figure III.9(b)) filtrage. On remarque des stations avec des écarts types de plus de 40 m avant filtrage.	38
III.10	Série temporelle des écarts type des trois stations présentant une forte dispersion sur la position verticale.	38
III.11	Évolutions et écarts des retards zénithaux totaux GPS et les observations issues des radiosondages de l'UWYO sur la station Altrt du réseau GNSS NRCAN du Canada avant filtrage	41
III.12	Évolutions et écarts entre les retards zénithaux totaux GPS et les observations issues des radiosondages de l'UWYO sur la station Altrt du réseau GNSS NRCAN du Canada après filtrage	41
III.13	Percentiles et écarts types des écarts des ZTD GPS avec les observations des radiosondages de l'UWYO sur toutes les stations de la comparaison (figure III.13(a)). Les statistiques de comparaison des ZTD GPS avec les observations des radiosondages de l'UWYO sur toutes les stations de la comparaison durant la période acquisition de la campagne NAWDX (figure III.13(b))	42
III.14	Évolutions et écarts entre les retards zénithaux totaux GPS et les données ERA-Interim de la station BLVA.	44
III.15	Évolutions et écarts entre les retards zénithaux totaux GPS et les données ERA-Interim de la station CN14	44
III.16	Percentiles et écarts types des écarts des ZTD GPS avec les données ERA-Interim sur toutes les stations de la comparaison (figure III.16(a)). Les statistiques de comparaison des ZTD GPS avec les données ERA-Interim sur toutes les stations de la comparaison durant la période acquisition de la campagne NAWDX (figure III.16(b))	45
IV.1	Écart des ZTD entre la solution GPS de référence avec une pondération des observations constante et la solution issue du test avec une pondération en sinus de l'élévation.	49
IV.2	Estimation du taux de résolution des ambiguïtés (figure IV.2(a)), de la répétabilité sur le taux de résolution des ambiguïtés (figure IV.2(b)), de la répétabilité sur la position verticale (figure IV.2(c)), de ZTD IV.2(d) et de la répétabilité des gradients horizontaux (figure IV.2(e) et IV.2(f)) pour chaque test réalisé.	50
V.1	Moyenne (figure V.1(a)) et écart type (figure V.1(b)) des retards troposphériques totaux au zénith (figure V.1(a) et V.1(b)) du réseau NAWDEX.	51

V.2	Moyenne et écart type des retards zénithaux humides (figure V.2(a) et V.2(b)) et des retards zénithaux hydrostatiques (figure V.2(c) et V.2(d)) du réseau NAW-DEX.	52
V.3	Gradients horizontaux GPS sur toute la zone d'étude (figure V.3(a)) et un zoom sur la partie Europe (figure V.3(b)).	52
V.4	Moyennes des écarts entre les ZTD GPS et ZTD ERA-Interim (V.4(a)) ainsi que leurs coefficients de corrélation(V.4(b))	53
V.5	Évolutions et écarts des retards zénithaux totaux GPS et les données ERA-Interim sur la station MERI du réseau GNSS SONEL.	54
V.6	Évolutions et écarts entre les retards zénithaux totaux GPS et les données ERA-Interim sur la station VMAG du réseau GNSS UNAVCO.	54
V.7	Distributions des écarts entre les ZTD GPS et ZTD ERA-Interim en fonction de la latitude (V.7(a)) et en fonction de la valeur des ZTD (V.7(b))	55
V.8	Moyennes des retards zénithaux humides GPS (V.8(a)) et ceux issus du modèle ERA-Interim (V.8(b)) sur le mois de septembre 2016.	56
V.9	Retards zénithaux humides et gradients GPS (figure V.9(a)); Retards zénithaux humides du modèle ERA-Interim et gradients d'humidité calculés sur la base des formules V.1 et V.2 (figure V.9(b))	57
V.10	Retards zénithaux hydrostatiques et gradients ZHD du modèle ERA-Interim; (V.10(a)); Retards zénithaux humides du modèle ERA-Interim et combinaison des gradients ZHD et ZWD du modèle ERA-Interim((V.10(b)).	57
I.1	Positionnement par GPS avec synchronisation parfaite des horloges.	68
I.2	Les signaux des satellites GPS.(Sources : http://sed.inrialpes.fr/Presentations)	69
III.1	Région d'acceptation et région critique.(Sources : http://homeomath2.immingo.net/testbilateral3.htm)	74

Liste des tableaux

I.1	Principaux termes d'erreurs des mesures GNSS, ordre de grandeur et méthode de prise en compte dans le traitement GNSS. (Source : [Morel et al., 2014a].) .	17
III.1	Les paramètres du traitement PPP à l'aide de Gipsy-Oasis II v6.4. utilisés pour le calcul NAWDEX.	30
III.2	Écart entre les positions approchées et celles estimées des stations filtrées . . .	32
III.3	Synthèse des stations rejetées et leurs critères de rejet.	39
III.4	Les statistiques de comparaison des ZTD GPS avec les radiosondages de l'UWYO (RS_UWYO) et les données ERA-Interim.	45

Analyse des retards troposphériques GPS sur la zone Nord-Atlantique dans le cadre de la campagne NAWDEX.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2018

RESUME

De nos jours, le positionnement GPS a tendance à devenir un outil de recherche scientifique utilisé en météorologie pour la détermination du cycle de l'eau atmosphérique. La partie humide des délais troposphériques GPS peut servir d'intrant pour initialiser les modèles de prévision numérique du temps et ainsi faire de meilleures prévisions météorologiques.

L'objectif visé par ce travail, est d'évaluer la qualité des séries ZTD d'un réseau de plus de 1300 stations GNSS à être utilisées dans la prévision numérique du temps. Il s'agit de fournir un ensemble des données ZTD propre et fiable qui peut être utilisé en prévision numérique du temps. Pour ce faire, plusieurs analyses ont été réalisées. En premier lieu, une analyse de la qualité intrinsèque du traitement GPS a été réalisé dans le but d'éliminer les erreurs grossières résiduelles après ajustement des paramètres. En second lieu, les données ZTD du réseau NAWDEX ont été comparées aux données classiques météorologiques afin de valider leur adéquation. Une optimisation du traitement PPP sous Gipsy-Oasis II a été également réalisée. Enfin, une étude de la distribution et des variations spatio-temporelles a été réalisée à l'aide des outils de visualisation développés sous Python.

Mots clés: Géodésie spatiale, GNSS, Météorologie, Statistiques, Programmation scientifique.

SUMMARY

Nowadays, GPS positioning tends to become a scientific research tool used in meteorology for the determination of the atmospheric water cycle. The GPS wet tropospheric delay can be used as an input to initialize numerical weather models and thus make better weather forecasts.

The objective of this work is to evaluate the quality of the ZTD series of a network of more than 1300 GNSS stations to be used in numerical weather prediction. This is to provide a clean and reliable set of ZTD data that can be used in numerical weather prediction. To do this, several analyzes were performed. First, an analysis of the intrinsic quality of the GPS treatment was carried out in order to eliminate residual errors after adjusting the parameters. Second, ZTD data from the NAWDEX network was compared with conventional meteorological data to validate their adequacy. An optimization of PPP treatment under Gipsy-Oasis II was also performed. Finally, a study of the distribution and the spatio-temporal variations was carried out using the visualization tools developed under Python.

Key words: Space geodesy, GNSS, Meteorology, Statistics, Scientific programming.