



HAL
open science

TOMO-PITON : Restitution du champ de vapeur d'eau 3-D par tomographie GNSS sur la zone du Piton de la Fournaise, île de La Réunion

Nicolas Bastien

► **To cite this version:**

Nicolas Bastien. TOMO-PITON : Restitution du champ de vapeur d'eau 3-D par tomographie GNSS sur la zone du Piton de la Fournaise, île de La Réunion. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2022. dumas-03978888

HAL Id: dumas-03978888

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03978888v1>

Submitted on 8 Feb 2023

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

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

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

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Nicolas BASTIEN

**TOMO-PITON : Restitution du champ de vapeur d'eau 3-D par tomographie
GNSS sur la zone du Piton de la Fournaise, île de La Réunion**

Soutenu le 08 septembre 2022

JURY

Monsieur DURAND Stéphane	Président du jury
Monsieur DURAND Frédéric	Maître de stage
Monsieur VAN BAELEN Joël	Maître de stage
Monsieur MOREL Laurent	Maître de stage
Madame NICOLAS-DUROY Joëlle	Enseignant référent

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement mes maîtres de stages, Frédéric DURAND, Joël VAN BAELEN et Laurent MOREL, leur disponibilité, leur écoute, leur aide et leur bonne humeur m'ont permis de mener à bien ce mémoire (malgré mes analyses préliminaires parfois hasardeuses).

Je tiens également à remercier Soline BIELLI-BOUSQUET pour son aide relative à l'acquisition et aux traitements des données Météo-France via le système d'exploitation Linux.

Je remercie ma professeure référente, Joëlle NICOLAS-DUROY pour son écoute, la relecture de ce mémoire et ses conseils.

Je remercie l'ensemble des stagiaires et des doctorants, que ce soit au LaCY ou à l'ESGT avec qui j'ai pu discuter afin d'avoir des avis extérieurs.

Je remercie tous les membres du LaCY, pour leur accueil, leur bonne humeur et tous les conseils de randonnées/plages.

Je remercie l'ensemble des membres de l'OVPF, pour leur aide et pour l'accès aux données nécessaires au fonctionnement du logiciel TSAAR.

Je souhaite également remercier ma famille qui m'a soutenu dans tous mes projets et qui a pris le temps de relire/corriger ce mémoire.

Enfin, je remercie toutes les personnes pour leur contribution de loin ou de près au bon déroulement de ce stage.

Ce mémoire porte un point final à ma formation d'ingénieur à l'ESGT et conclut un chapitre. Je remercie tous les membres du personnel de l'ESGT qui font de cette formation, de cette école, un endroit convivial et chaleureux.

Liste des abréviations

ART : Algebraic Reconstruction Technique

BIRA-IASB : Royal Belgian Institute for Space Aeronomy

CIVE : Contenu Intégré de Vapeur d'Eau

CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques

ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecast

ESGT : École Supérieure d'Ingénieurs Géomètres et Topographes

GAMIT : Global positioning system At Massachusetts Institute of Technology

GMF : Global Mapping Function

GNSS : Global Navigation Satellite System

HRES : High-Resolution Forecasts

IFS : Integrated Forecasting System

IPGP : Institut de Physique du Globe de Paris

IWV : Integrated Water Vapour

LaCY : Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones

Laero : Laboratoire d'Aérodynamique

MMCPA : Méthode des Moindres Carrés Pondérés Amortis

MESO-NH : Non-Hydrostatic MESOScale atmospheric model

MNT : Modèle Numérique de Terrain

Nw : Wet Refractivity

OSSE : Observing System Simulation Experiments

OVPF : Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise

Pwv : Profil Wet Vapor

SHD : Slant Hydrostatic Delay

SIWV : Slant Integrated Water Vapour

STD : Slant Total Delay

SVD : Singular Value Decomposition

SWD : Slant Wet Delay

TFE : Travail de Fin d'Étude

TSAAR : Tomography Software for wAter vApour Retrieval

TSVD : Truncated Singular Value Decomposition

TUW : Université Technique de Vienne

VZHD : Vienna Zenith Hydrostatic Delay

WD : Wet Delay

WUELS : Wroclaw University of Environnement and Life Sciences

ZHD : Zenith Hydrostatic Delay

ZTD : Zenith Total Delay

ZWD : Zenith Wet Delay

Glossaire

- ART : Méthode tomographique permettant la reconstruction d'image via une ensemble de projections angulaires.
- $A*B*C$: A et B représentent la discrétisation horizontale (A: la latitude, B : la longitude), C fait référence à la discrétisation verticale.
- SVD : Méthode de factorisation d'une matrice K en trois matrices de la forme : $K = U\Sigma V^T$ avec U et V contenant les vecteurs singuliers de K à gauche et à droite. Σ est une matrice diagonale.
- TSVD : Méthode qui permet de tronquer la décomposition de K éliminant les valeurs singulières trop faibles. Régularise les problèmes mal conditionnés.
- Ordre de discrétisation définit dans le logiciel TSAAR :

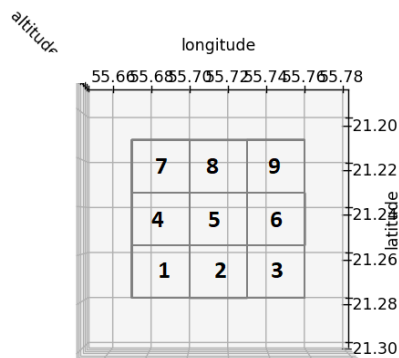


Table des matières

Remerciements.....	2
Liste des abréviations.....	3
Glossaire.....	5
Table des matières.....	6
Introduction.....	8
I État de l’art : GNSS, Tomographie et l’île de La Réunion.....	9
I.1 PROPRIÉTÉS DE L’ATMOSPHÈRE.....	9
I.1.1 IONOSPHERE.....	9
I.1.2 TROPOSPHERE.....	9
I.2 GNSS ET INFLUENCE DE L’ATMOSPHÈRE.....	10
I.2.1 PRINCIPE DU GNSS.....	10
I.2.2 RETARD TROPOSPHERIQUE.....	11
I.2.2.1 COMPOSANTES DU RETARD TROPOSPHERIQUE.....	11
I.2.2.2 MAPPING FUNCTION.....	11
I.2.2.3 GRADIENTS HORIZONTAUX.....	12
I.2.2.4 ZHD, FONCTION DE PROJECTION ET MODELES METEOROLOGIQUES.....	13
I.3 TOMOGRAPHIE 3-D.....	14
I.3.1 PRINCIPES GENERAUX.....	14
I.3.1.1 DETERMINATION DES IWV (CIVE) A PARTIR DES ZWD.....	15
I.3.1.2 DETERMINATION DES SIWV A PARTIR DES IWV.....	15
I.3.1.3 MISE EN PLACE DE L’INVERSION TOMOGRAPHIQUE.....	16
I.3.1.3.1 DISCRETISATION 3-D : LES VOXELS.....	16
I.3.1.3.2 RESOLUTION MATHEMATIQUE.....	17
I.3.2 DIFFERENTS MODELES TOMOGRAPHIQUES ET CROSS-VALIDATION.....	18
I.3.3 LOGICIEL TSAAR.....	20
I.3.3.1 PRESENTATION GENERALE.....	20
I.3.3.2 PARAMETRAGE DU LOGICIEL TSAAR, INITIALISATION DES DONNEES ET VALEURS INITIALES.....	20
I.4 L’ILE DE LA REUNION.....	22
I.4.1 RESEAUX DISPONIBLES SUR L’ILE DE LA REUNION.....	22
I.4.2 ADAPTATION AU CONTEXTE DE L’ILE DE LA REUNION ET SUR TOUTE L’ILE.....	23
II Paramétrages et premières comparaisons du logiciel TSAAR.....	24
II.1 PARAMETRAGES DU RESEAU GNSS.....	24
II.1.1 DISCRETISATION HORIZONTALE.....	24
II.1.2 DISCRETISATION VERTICALE.....	28
II.1.3 EFFET DE BORD ET GEOMETRIE DU RESEAU.....	33
II.2 COMPARAISON : MESO-NH ET TSAAR.....	36
II.2.1 LES MODELES METEOROLOGIQUES.....	36
II.2.2 LE MODELE MESO-NH.....	37
II.2.3 COMPARAISON ENTRE LE MODELE METEO MESO-NH ET TSAAR.....	37
III Cas d’étude et première approche de l’OSSE.....	42
III.1 CAS D’ETUDE : LE CYCLONE BATSIRAL.....	42
III.2 PREMIERE APPROCHE DE L’OSSE.....	45

III.2.1 PRÉSENTATION DES FICHIERS D'ENTRÉE DE TSAAR.....	45
III.2.2 CRÉATION DES DIFFÉRENTS FICHIERS TSAAR.....	46
III.2.2.1 COMPARAISON ENTRE LES FICHIERS GAMIT ET LES FICHIERS CALCULÉS.....	46
III.2.3 VALIDATION DU PROCESSUS DE MISE EN PLACE.....	49
III.2.3.1 SIMULATION DES IWV DE MESO-NH.....	49
III.2.3.2 SIMULATION COMPLÈTE DU RÉSEAU EXISTANT.....	50
III.2.3.2.1 VALIDATION DU PROCESSUS DE CRÉATION DE L'ATMOSPHÈRE SYNTHÉTIQUE.....	50
III.2.3.2.2 ANALYSES DES PROFILS VERTICAUX.....	51
III.2.4 ÉTUDE APPROFONDIE DE LA GÉOMÉTRIE DU RÉSEAU.....	53
III.2.4.1 RÉSEAUX SANS POLYGONE D'INTERPOLATION.....	55
Conclusion.....	57

Introduction

La vapeur d'eau joue un rôle essentiel dans plusieurs domaines tels que les prévisions météorologiques, le climat, le cycle de l'eau, la régulation de la température. Une des méthodes pour l'étudier se fait via le GNSS (Global Navigation Satellite System). Bien que ce système soit principalement connu pour son utilité dans le positionnement par satellite, les résultats issus des observations GNSS peuvent être utilisés pour la restitution du champ de vapeur d'eau 3-D contenu dans la troposphère. En effet, une fois traitées, les observations GNSS contiennent des informations fiables sur le contenu intégré en vapeur d'eau relatif au passage de l'onde (rai) dans l'atmosphère. Ces observations présentent de nombreux avantages de part leur disponibilité, leur fiabilité et leur résolution temporelle. Si le réseau GNSS est suffisamment dense, l'ensemble des rais (satellite-récepteur) permet une restitution 3-D par inversion tomographique du champ de vapeur d'eau. L'île de la Réunion possède différentes stations GNSS dont un réseau dense sur la zone du Piton de la Fournaise permettant un suivi de l'activité volcanique, entretenu par l'OVPF. Tous les pré-traitements des observations GNSS sont faits et vérifiés par l'OVPF (Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise) et nous permet d'obtenir le retard humide (WD), composante du retard troposphérique total. Ce WD est causé par la vapeur d'eau et est utilisé pour estimer la quantité de vapeur d'eau entre la station et le satellite.

Ce TFE traitant de la restitution du champ de vapeur d'eau 3-D, comporte plusieurs objectifs. Tout d'abord, étudier les différents réseaux GNSS présents pour déterminer les limites de la discrétisation spatiale de la zone étudiée. Le deuxième objectif est d'analyser l'apport de la tomographie GNSS sur un cas concret. Enfin, nous chercherons une solution pour résoudre les problèmes d'homogénéisation et d'étendue du réseau GNSS réunionnais de manière à compléter le réseau. Le présent mémoire se compose de trois parties. La première partie sera dédiée à l'état de l'art, une présentation des différents éléments, vocabulaires, logiciels et processus utilisés tout au long de cette rédaction. La seconde partie est composée d'une étude du réseau GNSS, afin d'optimiser la paramétrisation de TSAAR. Puis une comparaison avec un modèle météorologique prévisionnel MESO-NH y est réalisée. Dans la troisième partie, une analyse des différents cas d'étude a été réalisée pour observer concrètement l'apport de la restitution du champ de vapeur d'eau 3-D. Une première approche d'OSSE (Observing System Simulation Experiments) a été effectuée de manière à améliorer l'homogénéité et la densité du réseau GNSS.

I État de l'art : GNSS, Tomographie et l'île de La Réunion

Dans cette partie, une présentation générale des différents éléments de ce TFE (Travail de Fin d'Étude) ainsi que du contexte général de l'île de La Réunion est faite.

I.1 Propriétés de l'atmosphère

Les satellites émettent des ondes qui se propagent jusqu'au récepteur en traversant les différentes couches de l'atmosphère (Figure 1). Cette traversée a pour conséquences la déviation et le ralentissement des ondes radio. En effet, lors du passage des ondes dans l'atmosphère (passage du vide vers l'air), un phénomène de réfraction a lieu. De plus, l'atmosphère se compose de plusieurs couches atmosphériques, chacune ayant des propriétés différentes. En effet, il y a les couches de l'atmosphère ionisée (ionosphère) et celles neutres (stratosphère et troposphère).

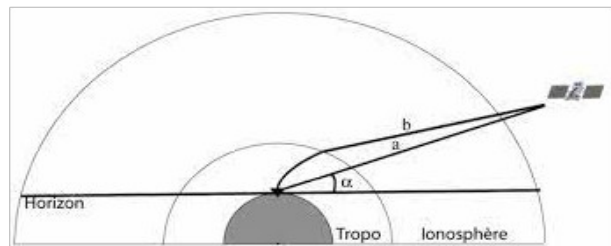


Figure 1: Retard du signal à cause de l'atmosphère (Champollion, 2005)

I.1.1 Ionosphère

L'atmosphère possède une partie haute, ionisée présente tout autour du globe s'étendant de 60 à 800 km environ, c'est l'ionosphère. Cette dernière est comprise entre la mésosphère et la magnétosphère. La sensibilité des ondes radio est due au rayonnement UV du soleil qui ionise l'oxygène et l'azote, libérant ainsi des électrons et créant une couche ionisée ([Ionosphere \(f-legrand.fr le 30/03/2022\)](https://www.f-legrand.fr/le30032022/)). C'est ce que l'on va appeler : les effets ionosphériques. L'erreur engendrée par cette traversée est comprise entre 0 et 15 m au zénith (Montibert, 2014) selon l'élévation du satellite. De manière à éliminer les erreurs ionosphériques, pour les grandes lignes de bases (> 20 km), il existe le modèle iono-free. Pour les lignes de base plus petites, ces erreurs sont supprimées par simple ou doubles différences. (Berges, 2019).

I.1.2 Troposphère

Il s'agit de la couche la plus basse de l'atmosphère, s'étendant du sol à 12 km d'altitude environ (8 km aux pôles et 16 km à l'équateur). Les ondes traversant cette couche subissent le phénomène de réfraction. La variation de l'indice de réfraction a pour conséquence : un retard de l'onde et une courbure, menant à des imprécisions (2 m au

zénith et 15 m pour une élévation de 15° (Figure1)) (Berges, 2019). Cette couche contient l'essentiel de la vapeur d'eau, à savoir que 50 % de la vapeur d'eau se trouve dans les deux premiers kilomètre d'altitude et 1.5 % se situe au-dessus de la tropopause ([GES DISC \(nasa.gov\)](https://www.nasa.gov), le 30/03/2022).

I.2 GNSS et influence de l'atmosphère

Dans cette partie, le principe du GNSS ainsi que son apport dans la modélisation de l'atmosphère, et plus précisément du champ de vapeur d'eau 3-D sont détaillés.

I.2.1 Principe du GNSS

Le système GNSS se compose de 3 segments : le segment spatial (ensemble des satellites en orbite), le segment de contrôle (ensemble des infrastructures terrestres) et le segment utilisateur (ensemble des utilisateurs du système). Le positionnement satellitaire repose sur le principe de multilatération. La position du récepteur est l'intersection des sphères, dont le centre est la position du satellite et le rayon la distance satellite-récepteur. La distance satellite-récepteur ne correspond pas à la distance euclidienne car les propriétés des différentes couches atmosphériques influent sur le trajet de l'onde radio, en plus des décalages d'horloges. Cette distance est définie par l'équation d'observation (1) (Leick, 2004).

$$\lambda \varphi_i^j = \rho_i^j + c(dt^j - dt^i) - \lambda N_i^j + \rho_i^{(j, \text{iono})} - \rho_i^{(j, \text{tropo})} \quad (1)$$

Avec : λ : la longueur d'onde du signal émise par le satellite

φ_i^j : l'observable de phase

ρ_i^j : distance euclidienne (satellite-récepteur)

dt^j, dt^i : décalage par rapport au temps GPS de l'horloge du satellite et de l'horloge du récepteur

N_i^j : l'ambiguïté entière (nombre de cycles entier)

$\rho_i^{j, \text{iono}}, \rho_i^{j, \text{tropo}}$: retard ionosphérique, retard troposphérique

Outre la détermination de la position du récepteur, cette équation (1) permet une étude spatiale et temporelle de l'atmosphère grâce aux termes : $\rho_i^{j, \text{tropo}}$ et $\rho_i^{j, \text{iono}}$, ce dernier étant corrigé grâce à la combinaison de deux fréquences : L1 et L2. (Le Coz, 2015)

I.2.2 Retard troposphérique

Dans l'équation (1), $\rho_{i, \text{tropo}}^j$ correspond au retard troposphérique total (STD) et peut être décomposé en trois composantes : composante humide, composante hydrostatique et composante hydrométéore.

I.2.2.1 Composantes du retard troposphérique

- Composante humide : cette composante dépend des propriétés chimiques des molécules d'eau. En effet, sa propriété dipolaire va induire un retard des ondes radio. Cette composante représente environ 2 à 20 % du retard troposphérique total avec des valeurs allant de 2 à 50 cm au zénith. On parlera de ZWD au zénith et de SWD dans la direction du satellite.

- Composante hydrostatique : cette composante dépend de l'épaisseur et de la densité de l'atmosphère neutre (Le Coz, 2015). Ces deux paramètres évoluent en fonction de l'altitude, des gradients de pression et de la température. La composante hydrostatique représente environ 90 % du retard troposphérique total avec des valeurs d'environ 2 m au zénith. On parlera de ZHD au zénith et de SHD dans la direction du satellite.

- Composante hydrométéore : Représentant environ 0 à 3 % du retard troposphérique total, il s'agit de la plus petite contribution. Cette composante résulte des particules d'eau présentes sous différents états (solide, liquide et gazeux). Elle engendre un retard d'environ 2.5 cm au zénith.

$$Cp_{(i, \text{Total})}^j = Cp_{(i, \text{Humide})}^j + Cp_{(i, \text{Hydrostatique})}^j + Cp_{(i, \text{Hydrométéore})}^j \quad (2)$$

Finalement, nous obtenons l'équation 2 avec :

$Cp_{i, \text{Total}}^j$: la composante totale ; $Cp_{i, \text{Humide}}^j$: la composante humide ; $Cp_{i, \text{Hydrostatique}}^j$: la composante hydrostatique et $Cp_{i, \text{Hydrométéore}}^j$: la composante hydrométéore.

Du fait que la composante hydrométéore soit très faible, elle est négligée dans la suite de ce mémoire et sera comprise dans la composante humide. De plus, elle n'est pas prise en compte dans le logiciel TSAAR.

I.2.2.2 Mapping function

Les différentes composantes du retard troposphérique surviennent dans la direction des rais. Nous pouvons alors définir les retards selon la pente : STD, SHD et SWD ; relatifs aux mesures GNSS. Ces mesures dépendent de la direction du satellite (son

azimut et son élévation) et sont exprimées en mètres. La détermination des STD ne peut se faire directement car cela engendrerait trop d'inconnues dans l'équation 1. Les retards selon la pente sont donc convertis en retards zénithaux grâce aux fonctions de projection (mapping function) (Figure 2). En analysant la structure générale d'une mapping function (3 (Won, 2010), consulté le 01/05), seul l'azimut des satellites apparaît.

Avec :

$$mf(el) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1+c}}}{\sin(el) + \frac{a}{\sin(el) + \frac{b}{\sin(el)+c}}} \quad (3)$$

el : l'élévation du satellite
a, b, c : des coefficients

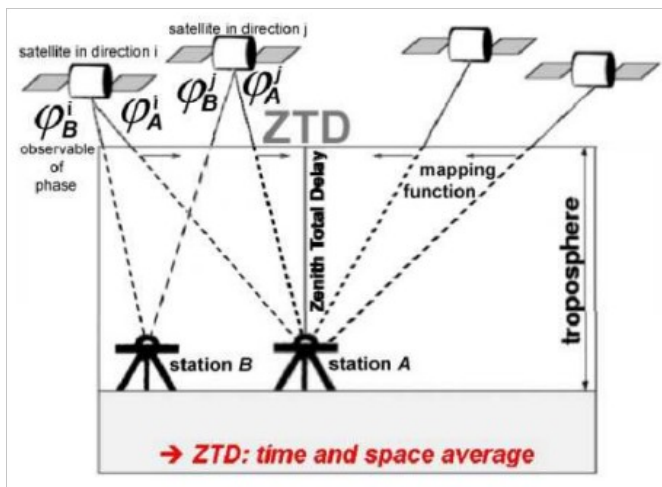


Figure 2: Projection du STD en ZTD (Brenot et al, 2008)

Les mapping functions sont spécifiques pour chaque terme des équations 6 et 7. Elles se basent sur des modèles qui sont eux-mêmes basés sur des radiosondages. La mapping function implémentée dans TSAAR est GMF (Global Mapping Function), correspondant à une modélisation empirique.

(Berges, 2019)

I.2.2.3 Gradients horizontaux

Les mapping functions ne prennent pas en compte l'hétérogénéité/l'anisotropie azimutale de l'atmosphère. Les délais de gradients horizontaux dans la directions Nord-Sud et Est-Ouest ont permis de corriger cette hétérogénéité. Ces gradients sont fonction de l'élévation, de l'azimut et sont projetables au zénith via des mapping functions spécifiques. Dans le cas du logiciel TSAAR , la mapping function des gradients horizontaux utilisée est celle de Chen et Herring (1997) (4) :

$$mf_{grad} = \frac{1}{\sin(el) * \tan(el) + q} \quad (4)$$

Avec el : l'élévation du satellite et q un coefficient égal à 0.003

Au final, nous obtenons les équations suivantes (Fund et al, 2010) :

$$STD = SHD + SWD \quad (5)$$

$$\text{SHD}(\text{el}) = \text{ZHD} \times \text{mf}_h(\text{el}) + [\text{gradNS}_h \times \sin(\text{az}) + \text{gradEW}_h \times \cos(\text{az})] \times \text{mf}_{gh}(\text{el}) \quad (6)$$

$$\text{SWD}(\text{el}) = \text{ZWD} \times \text{mf}_w(\text{el}) + [\text{gradNS}_w \times \sin(\text{az}) + \text{gradEW}_w \times \cos(\text{az})] \times \text{mf}_{gw}(\text{el}) \quad (7)$$

$$\text{ZTD} = \text{ZHD} + \text{ZWD} \quad (8)$$

Avec :

- STD, SHD, SWD : les composantes dans la direction du satellite
- ZTD, ZHD, ZWD : les composantes dans la direction du zénith
- az, el = azimut, élévation
- mf_h, mf_w : mapping function des ZHD et ZWD
- $\text{gradEW}_h, \text{gradNS}_h$: gradients hydrostatiques Est-Ouest et Nord-Sud
- $\text{mf}_{gh}, \text{mf}_{gw}$: fonctions de projections des gradients hydrostatiques et humides

I.2.2.4 ZHD, fonction de projection et modèles météorologiques

Le ZWD est estimé à partir du ZTD et du ZHD. Le ZTD (8) est issu de la projection du STD au zénith. En pratique, il est compliqué de séparer les composantes humide et hydrostatique lors des mesures GNSS. Il est donc nécessaire de connaître une de ces deux contributions de manière à en déduire l'autre. Concernant le ZWD et les gradients (6 et 7), ils ne sont pas facilement prédictibles du fait de leurs variabilités spatio-temporelle et sont estimés grâce aux observations/traitements GNSS. C'est la composante hydrostatique au zénith et les mapping function qui sont déterminés a priori. En effet, le ZHD est corrélé avec la pression atmosphérique et varie moins dans le temps. De manière globale, afin de déterminer le ZWD, nous devons connaître les ZHD, les mf_w , les mf_G , et les mf_h (Fund et al, 2010). (Figure 3)

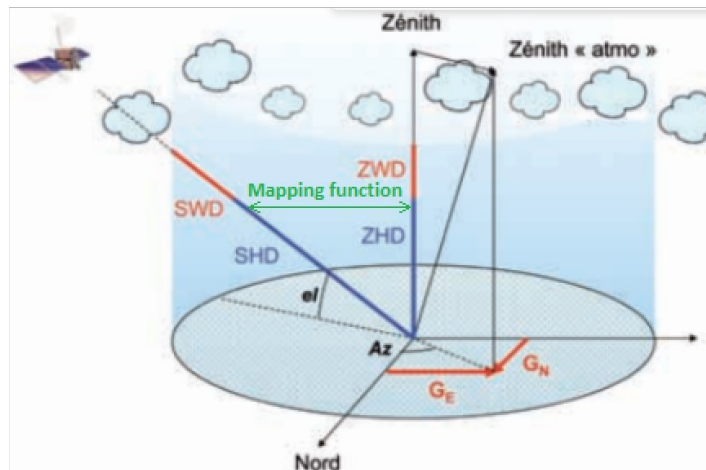


Figure 3: Décomposition classique des effets troposphériques, en bleu : les paramètres estimés, en rouge : les paramètres connus a priori (Fund et al. 2010). [modifié]

Des équations (9) permettent la détermination des ZHD, dont les variables sont issues de mesures in-situ (radiosondage). À défaut de mesures in-situ, le ZHD a priori peut

être calculé grâce aux valeurs extraites de modèle météorologique. Les modèles météorologiques peuvent être en 2-D (10) comme celui utilisé par le logiciel GAMIT (Global positioning system At Massachusetts Institute of Technology) ou en 3-D.

$$ZHD = 10^{-6} * k_1 * \int_L \left(\frac{P}{T} \right) dH \quad (9)$$

Avec k_1 : le coefficient empirique

L : épaisseur de la troposphère

P : pression à l'altitude H

T : température à l'altitude H

dH : intégration selon les couches d'épaisseur dH

$$ZHD^{apriori} = \frac{0,002277 * P_s}{f(\varphi, H)} \quad (10)$$

Avec P_s : la pression au sol

φ : la latitude

H : hauteur station au dessus du géoïde

La fonction f est en mètre

I.3 Tomographie 3-D

Le terme tomographie a pour racine les mots « tomê » et « graphein » signifiant respectivement : « tranche » et « écrire ». Cette méthode est utilisée dans de très nombreux domaines : imagerie, géophysique, astrophysique, mécanique des matériaux ... ou encore la tomographie GNSS. De manière générale, la technique tomographique permet de retranscrire un champ 3-D/volume par le biais de mesures externes et/ou de mesures 2-D. Dans le cas de cette étude, la tomographie a permis de reconstruire un champ de vapeur d'eau 3-D de la troposphère via des mesures GNSS. Le traitement GAMIT a permis d'estimer les ZWD. En convertissant les ZWD en IWV (ou CIVE), le contenu intégré en vapeur d'eau a été obtenu. La projection de ces IWV a permis d'obtenir les SIWV (contenu intégré en vapeur d'eau selon la direction des satellites : Slant Integred Water Vapour).

I.3.1 Principes généraux

Mathématiquement, le processus de tomographie se scinde en deux étapes : la mise en place d'un modèle direct puis la mise en place d'un modèle inverse. Le modèle direct va permettre de décrire le plus fidèlement possible ce qui est mesuré. Le modèle inverse permettra de restituer le champ de vapeur d'eau 3-D via le modèle direct. Afin de réaliser ce TFE, un logiciel de tomographie GNSS est nécessaire, le logiciel utilisé est celui développé par Reverdy, 2008. Pour comprendre le principe de modèle inverse, prenons l'exemple présent dans la thèse de Reverdy, 2008. En effet, avec l'équation : $T(z) = az + b$, où T représente la température, nous savons que la température augmente de façon linéaire avec la profondeur terrestre. En connaissant a et b, nous pouvons déterminer T, c'est le modèle direct (ou problème prédictif). Au contraire, en connaissant les températures aux

différentes altitudes, nous pouvons estimer a et b, c'est le modèle inverse (problème inverse) qui est plus complexe à déterminer que le modèle direct (Figure 4).

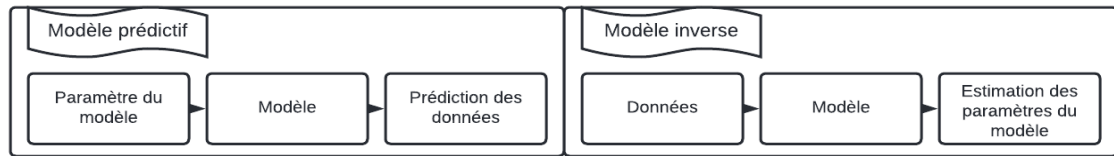


Figure 4: Modèle prédictif et modèle inverse

I.3.1.1 Détermination des IWV (CIVE) à partir des ZWD

Connaissant les ZWD, pour avoir accès aux IWV qui représentent le contenu intégré en vapeur d'eau au-dessus de chaque point, il a été nécessaire de passer d'un retard humide (en m) à un contenu intégré en vapeur d'eau (exprimé en mm ou en kg/m²). Il existe un facteur de proportionnalité (Π) mis en place par Bevis & al en 1992, adapté à l'île de La Réunion.

$$IWV = \Pi * ZWD \quad (11)$$

Il existe donc un lien de proportionnalité entre l'IWV et le ZWD : 6 mm de ZWD vaut environ 1 kg/m². L'IWV est le premier résultat obtenu, que l'on peut exploiter même si cela ne nous renseigne pas sur la répartition 3D de la vapeur d'eau. De plus, ce résultat correspond au zénith. Le ZWD qui est défini par GAMIT possède une précision de 3-4 mm, notre IWV aura une précision de 1 kg/m² (Vérèmes, 2016).

I.3.1.2 Détermination des SIWV à partir des IWV

Maintenant que nous avons accès aux IWV, nous allons déterminer les SIWV, qui correspondent à l'IWV selon la direction du satellite (direction oblique = un rai) en reprojétant grâce aux mapping function. Faire cette étape revient à supposer que le signal se propage en ligne droite. Finalement, en regroupant les équations 7 et 11, nous obtenons :

$$SIWV = \Pi * (ZWD \times mf_w(\epsilon_l) + [\text{gradNS}_w \times \sin(\text{az}) + \text{gradSW}_w \times \cos(\text{az})] \times mf_{gw}(\epsilon_l)) \quad (12)$$

Le fait de reprojeter engendre une perte de précision dues aux différentes approximations de calculs. En effet, la précision des SIWV sera d'environ 6 kg/m² (Wijaya et Brunner, 2011, consulté le 25/03/2022).

Une fois les IWV et les SIWV connus, notre modèle direct est défini.

I.3.1.3 Mise en place de l'inversion tomographique

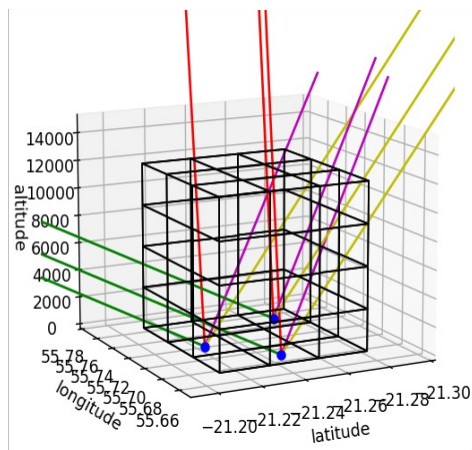


Figure 5: Discretisation de l'espace en voxels , les couleur correspondent aux directions des azimuts

Une fois le modèle direct obtenu, un intérêt particulier a été porté à l'inversion tomographique. La distribution en vapeur d'eau peut être assimilée au modèle inverse. La tomographie utilise de multiples mesures satellite-récepteur permettant d'obtenir une distribution de la vapeur d'eau proche de la réalité. Dans le processus d'inversion tomographique, il est important de connaître les azimuts, les élévations et les positions pour chaque satellite et chaque récepteur pour toutes les

époques. Le fait de connaître toutes ces informations a permis de calculer tous les rais satellite-récepteur et d'obtenir les SWD puis les SIWV. Les longueurs des rais traversant les voxels (pixels en 3-D) correspondant à la discrétisation de l'espace en 3-D ont été calculées (Figure 5).

I.3.1.3.1 Discrétisation 3-D : les voxels

Dans le cas de TSAAR, les voxels sont de formes cubiques. Leurs tailles et leurs nombres vont dépendre de la répartition des récepteurs GNSS de façon à limiter les voxels non traversés par des rais (ces derniers ne contenant pas d'information). La distribution des rais peut être assimilée à un cône inversé orienté vers le bas, induisant un nombre de voxels supérieur dans les basses couches. À faible altitude, les rais sont répartis de manière hétérogène (créant des voxels vides) et sont nombreux. Ensuite, à haute altitude, les rais sont moins nombreux mais répartis de manière plus homogène. La quantité de rais est plus élevée à basse altitude (Figure 6).

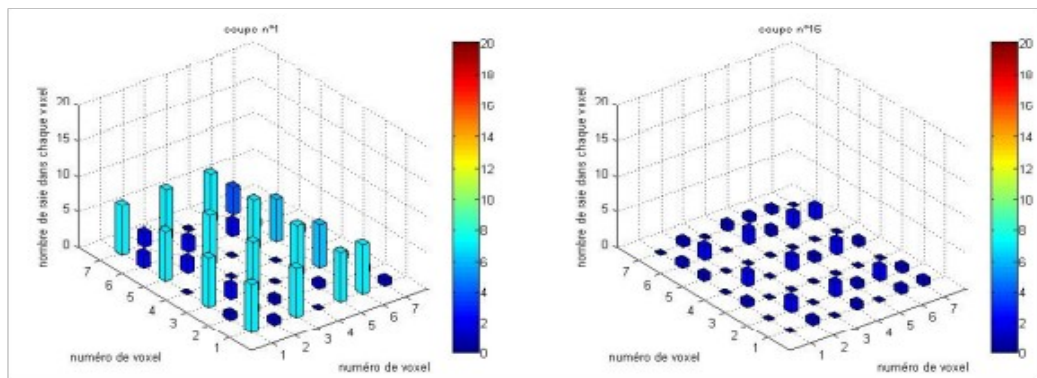


Figure 6: Répartition des rais dans les voxels à faible altitude (a) et à haute altitude (b) (Reverdy, 2008)

Afin de régler ce problème de cône inversé et de voxels vides, différentes méthodes ont été mises au point, telle que celle décrite par Berges, 2019. De plus, cette méthode consiste à faire varier la forme et la taille des voxels et de la zone à discrétiser. Il existe deux types de voxels cuboïdes : ceux réguliers (basés sur une forme géométrique type) et ceux non réguliers. La méthode incluant les voxels non réguliers peut être améliorée en prenant en compte la couverture GNSS de la zone d'étude. Dans l'étude menée par Ding et al, 2020, la première approximation consiste à déterminer la région tomographique. Une enveloppe convexe (déterminée par la méthode de « the graham scan ») est alors mise en place en fonction des signaux GNSS et de leurs intersections aux différentes couches d'altitudes (nœuds). Suite à cette enveloppe convexe, une deuxième approximation peut être effectuée : un polygone de surface minimale (un rectangle) est calculé pour chaque altitude. Ce polygone est déterminé selon le théorème défini par Freeman et Shapira, 1975, stipulant que « le rectangle de la surface minimale entourant un polygone convexe a un côté colinéaire avec l'un des bords du polygone ». Cette seconde approximation doit être un juste milieu entre la proximité des nœuds avec les signaux GNSS et la complexité de tous les nœuds. En effet, la taille des rectangles de surface

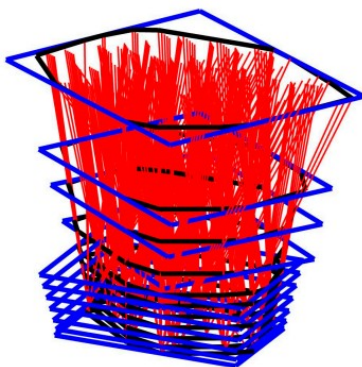


Figure 7: Méthode étudiée par Ding N. (2020)

minimale varie en fonction de l'altitude. Par exemple, le rectangle se trouvant au sommet aura une surface supérieure à celui se trouvant en bas mais le nombre de signaux GNSS traversant ces deux couches est identique. Ce constat implique une densification des signaux GNSS dans les basses couches. Ainsi, la densité des nœuds et donc le nombre de voxels doit être adapté (Figure 7). Pour cette étude, un système variant selon l'altitude et selon la

densité des signaux GNSS a été résolu avec la méthode ART (Algebraic Reconstruction Technique) (Ding et al, 2020).

I.3.1.3.2 Résolution mathématique

La discrétisation 3-D de l'espace est traversée par les rais. Certains voxels sont traversés par beaucoup de rais et contiennent beaucoup d'information. D'autres voxels sont traversés par peu ou pas de rais et contiennent peu ou pas d'information. C'est ce qu'on appelle un système surdéterminé et sous-déterminé. Le système de la présente étude peut se poser de la manière suivante :

$$d = G*m \quad (13)$$

avec : d = vecteur des SIWV, G = modèle direct (matrice de décomposition des rais) et m = les résultats (la densité de vapeur d'eau dans chaque voxel).

Afin de résoudre ce problème, Reverdy, 2008 a utilisé dans sa thèse la méthode des moindres carrés pondérés amortis, et l'a implémentée dans le logiciel TSAAR. Cette méthode permet d'attribuer plus de poids (α) aux observations GNSS ou aux valeurs initiales. La solution de l'inversion tomographique se définit comme suit :

$$m_{\text{est}} = m_0 + L * (d - G * m_0) \text{ où } L = (G^T * W_e * G + \alpha^2 * W_m)^{-1} * G^T * W_m \quad (14)$$

Avec : m_0 : l'initialisation ; m_{est} : résultat final de l'inversion tomographique ; W_e , W_r : matrices erreurs sur les données d et sur les résultats et α un coefficient ($\in [0,1]$).

Une description détaillée de cette méthode est consultable dans la thèse de Reverdy, 2008.

I.3.2 Différents modèles tomographiques et cross-validation (Hugues et al, 2018)

Bien que TSAAR utilise la méthode des moindres carrés pondérés amortis, il existe d'autres méthodes/logiciels permettant l'inversion tomographique et ayant leurs propres particularités (avantages/inconvénients). Il peut être intéressant de les aborder de manière à observer les possibilités d'amélioration du logiciel TSAAR. Une étude réalisée à Melbourne, au Sud-Est de l'Australie menée en mars 2010 et publiée en 2018 avait pour objectifs la comparaison de cinq modèles et leur validation. Cette comparaison faisait intervenir plusieurs variables (les conditions initiales/a priori...). Les résultats obtenus sont comparés à ACCESS-A (modèle météorologique de ré-analyse) et ERA-Interim (modèle météorologique prévisionnel). Parmi ces cinq modèles, un seul est un modèle 2-D mais fournit néanmoins les informations concernant Pwv (Profil Wet Vapor) et Nw (Wet Refractivity). Pwv fait référence aux profils de densité de l'eau, Nw à la réfraction humide.

Modèle tomographique	Inversion	Dimension	Résultats
BIRA	SVD avec les MMCPA	3D	Pwv, Nw
WUELS	SVD avec filtre Kalman	3D	Pwv, Nw
TUW	TSVD	3D	Nw
UBI	SART	3D	Pwv
TUO	LS	2D	Pwv, Nw

Tableau 1: Les différents modèles tomographiques

Le modèle tomographique BIRA (Royal Belgian Institute for Space Aeronomy), utilisé par IASB (Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique) se rapproche du logiciel TSAAR. De manière concise, BIRA est un modèle tomographique adapté du logiciel LOFFTK, créé par Champollion en 2005, utilisant le principe SVD associé à la méthode des moindres carrés pondérés amortis. L'objectif étant la minimisation de χ^2 dans l'équation suivante (Tarantola,2005) :

$$\chi^2 = (Gm-d)^T C_D^{-1} (Gm-d) + (m-m_0)^T C_M^{-1} (m-m_0) \quad (15)$$

Avec : Gm : modèle des Nw/Pwv ; d : observations des SWD/SIWV ; m, m_0 : solution, modèle a priori ; C_D, C_M : erreurs d'observations, matrice de covariance

Si les erreurs suivent une loi Gaussienne, la solution déterminée est optimale. Dans le cas contraire, l'inversion tomographique donnera une solution approximative. Plusieurs facteurs sont importants dans l'unicité de la solution, notamment la quantité d'observation et la géométrie du réseau. Cette méthode a plusieurs points de contrôle permettant de vérifier les résultats : la longueur des rais de chaque voxel, les éléments diagonaux de la matrice de résolution, conditionnement du système...

Un second modèle existant est mis en place par l'université WUELS (Wroclaw University of Environment and Life Sciences) qui utilise la méthode SVD associée à un filtre de Kalman composé en trois phases : la phase d'initialisation, la phase de prédiction et la phase de correction. Le filtre de Kalman permet une estimation d'état du système à un instant k en se basant sur l'instant précédent $k-1$ et des données issues de la phase de correction. Les résultats peuvent être contrôlés en étudiant le conditionnement du système.

Le modèle suivant TUW (Université Technique de Vienne) , mis en place par l'université de Vienne ressemble à la méthode BIRA. Il combine le principe des moindres carrés pondérés amortis avec la méthode TSVD (Truncated Singular Value Decomposition) et le ray-tracing 2-D permettant le rétablissement des signaux de manière itérative grâce aux délais troposphériques. En se basant sur le nombre d'observations et de contraintes, notre système sera divisé en plusieurs solutions. Les voxels les moins bien déterminés sont détectés et exclus du processus ce qui permet un meilleur conditionnement du système.

Il existe une grande variété de modèles tomographiques, chacun utilisant des méthodes d'inversion différentes.

I.3.3 Logiciel TSAAR

I.3.3.1 Présentation générale

Conçu pendant la thèse de Mathieu Reverdy (2008) et se composant de dix-sept programmes Matlab, le logiciel TSAAR permet une restitution d'un champ de vapeur d'eau 3-D par inversion tomographique sur une zone d'étude définie.

Une compréhension du logiciel est obligatoire. En effet, un des objectifs de ce TFE est l'adaptation du logiciel sur l'entièreté de l'île de La Réunion. Le guide rédigé par Longechamp (2017) fut alors scrupuleusement étudié et mis à jour. Nous nous y référerons pour les explications détaillées des programmes du logiciel TSAAR. De manière générale, nous pouvons décomposer les programmes du logiciel en trois parties : ceux permettant la mise en forme des données (issus de GAMIT), ceux permettant les calculs pré-tomographiques et ceux permettant l'obtention des résultats tomographiques à la suite de l'inversion tomographique (Figure 8, Longechamp, 2017).

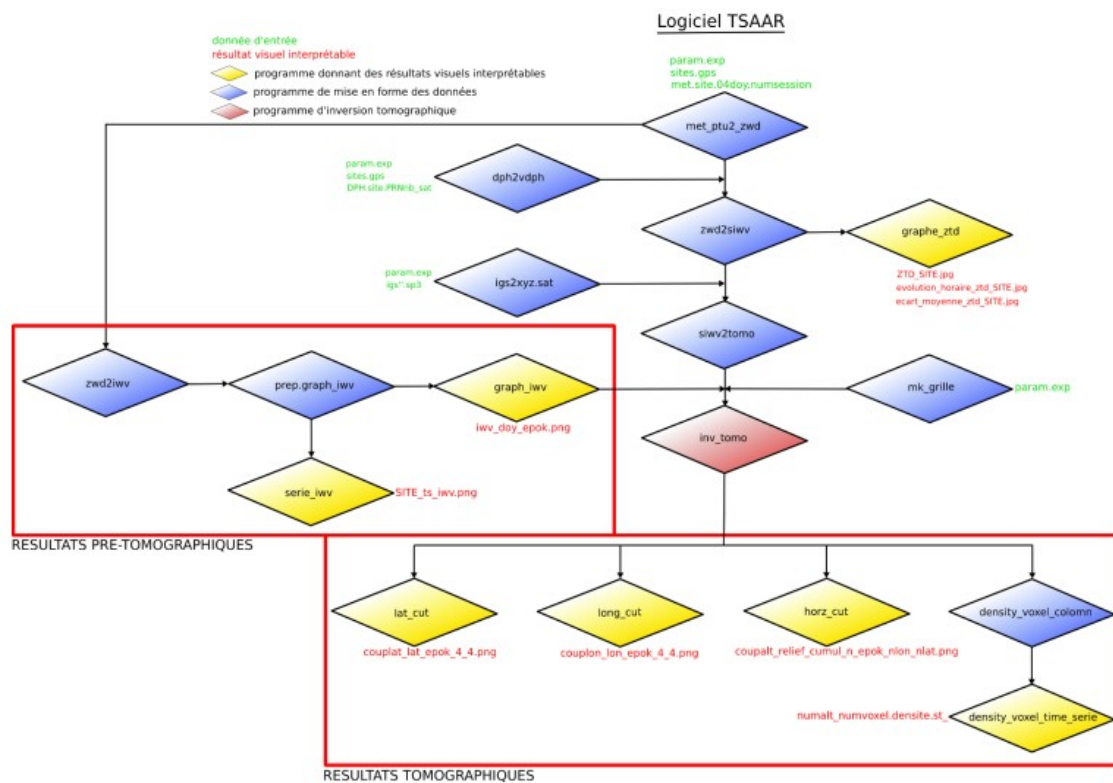


Figure 8: Description des étapes du logiciel TSAAR (Longechamp, 2017)

I.3.3.2 Paramétrage du logiciel TSAAR, initialisation des données et valeurs initiales

Avant le lancement du traitement via le logiciel TSAAR, des fichiers de paramétrage ont minutieusement été mis en place. Cette étape est importante car la moindre erreur engendre des résultats faux. Parmi ces fichiers, nous disposons des DPH

(contenant les élévations et les azimuts des satellites), les fichiers met (contenant les retards troposphériques), les fichiers sp3 (contenant les orbites des satellites, précis à 0,05 m) ainsi que les fichiers TEMP (représentant l'évolution de la température au cours du temps sur chaque station GNSS). Il y a également des fichiers de paramétrage de TSAAR : « site.GPS », « param.EXP » et « atmo_stan.PRO ». Parmi les paramètres implémentables, il y a le coefficient alpha permettant d'attribuer plus ou moins de poids aux observations, il est compris entre 0 et 1. Le coefficient pour cette étude est de 0.05 qui est un bon compromis entre les valeurs initiales et les observations (Le Coz, 2015). Prendre une valeur trop basse entraîne un mauvais conditionnement de la matrice de calcul (14). Une valeur trop haute ne prend pas en compte les observations GNSS rendant l'inversion tomographique inutile. En effet, cela reviendrait à appliquer une répartition verticale standard de la vapeur d'eau (Figure 9).

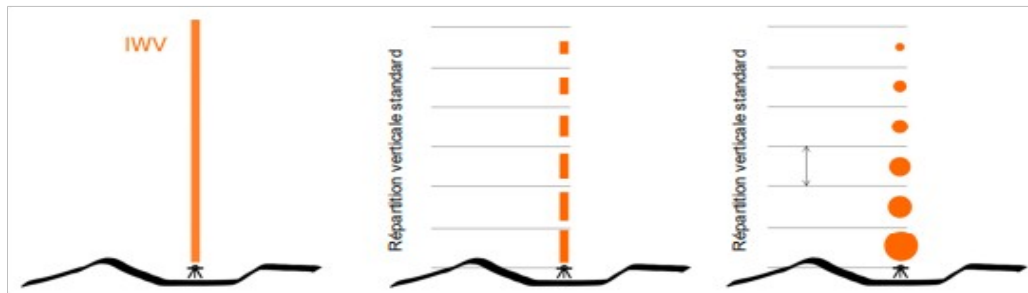


Figure 9: Répartition de la vapeur d'eau selon l'atmosphère standard, plus le trait/cercle un important, plus la quantité de vapeur d'eau est importante (Le Coz, 2015)

Les résultats pré-tomographiques sont issus de l'initialisation des données. Les observations GNSS fournissent des informations quant à la quantité totale de vapeur d'eau au-dessus des stations mais pas sur sa répartition (Longechamp, 2017). Pour corriger ce « souci », l'atmosphère standard d'humidité (g/m^2), définie par le fichier « atmo_stan.PRO » (résolution de 1 m, issu de deux mesures par jour par radiosondage pendant deux ans) et correspondant à la vapeur d'eau répartie verticalement au-dessus d'un point quelconque a été utilisée. Connaissant les IWV sur chaque station, et la répartition standard, une déduction de la répartition verticale de vapeur d'eau comme initialisation des voxels a été possible. En connaissant la position d'un voxel (selon la résolution verticale), la répartition standard selon l'altitude et IWV (Integrated Water Vapour), la quantité de vapeur d'eau présente dans chaque voxel a pu être retrouvée, avec un simple produit en croix (Berges, 2019). Mathématiquement, le recalage de l'atmosphère standard selon les IWV s'écrit de la manière suivante (16). L'atmosphère est recalée dans chaque colonne de voxels (Figure 10).

$$coeff_{correc} = \frac{\overline{IWV}}{\sum_{init}} \quad (16)$$

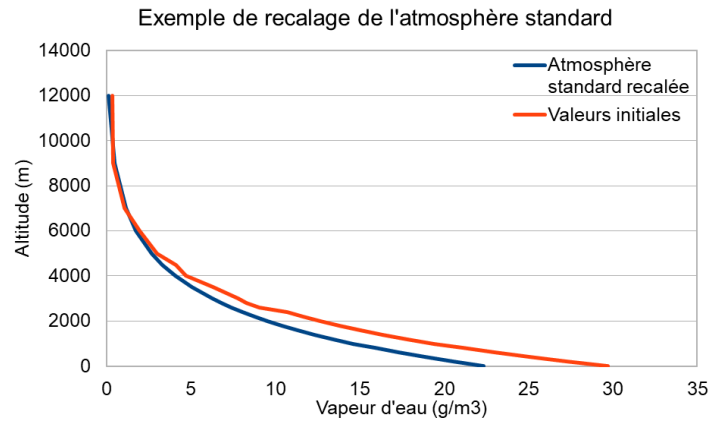


Figure 10: Obtention des valeurs initiales par recalage par l'IWV de l'atmosphère standard

I.4 L'île de La Réunion

L'île de la Réunion, département d'outre-mer, se situe à l'ouest de l'Océan Indien, d'une superficie de 2 512 km² et possédant un volcan actif : le Piton de la Fournaise.

I.4.1 Réseaux disponibles sur l'île de La Réunion

Le réseau RGP (points verts) est présent sur l'île de La Réunion et se compose de 14 stations permanentes (Figure 11). Cependant, très peu de ces stations sont présentes sur la zone du Piton de la Fournaise (en rouge) et au niveau du cirque de Salazie (en bleu) notamment à cause des difficultés d'accès. Le réseau VOLOBSIS, situé au niveau du Piton de la Fournaise et mis en place par l'IPGP, se compose de 25 stations permanentes, mais les données de toutes les stations ne sont pas toujours disponibles. En plus de ces stations, de nombreux capteurs sont présents permettant des mesures relatives à la sismologie, la gravimétrie etc. Ce réseau permet une surveillance étroite par l'OVPF du Piton de la Fournaise, un des volcans les plus actifs au monde. La densité de ce réseau (Figure 12) a permis de restituer un champ de vapeur d'eau 3D au-dessus du Piton de la Fournaise.



Figure 11: Carte des stations RGP sur le territoire réunionnais (<http://rgp.ign.fr/>), 2022

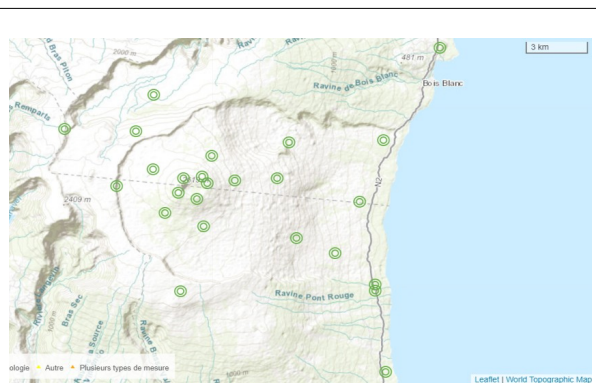


Figure 12: Carte du réseau VOLOBSIS sur le territoire réunionnais (<http://volobsis.ipgp.fr/>), 2022

I.4.2 Adaptation au contexte de l'île de La Réunion et sur toute l'île.

Une première adaptation du logiciel TSAAR au contexte de La Réunion a été réalisée par Ludovic Harter, 2021, sur la zone du Piton de la Fournaise. Son programme « met_ptu2_zwd » a permis de prendre en compte la température aux différentes stations à partir des températures de Météo-France. Le programme « decomp_rai » a permis de prendre en considération l'altitude des stations lors de la décomposition des rais. Enfin, le programme « horz_cut », fournissant des coupes horizontales suivant l'altitude et l'époque a permis de tenir compte du relief sur la zone du Piton de la Fournaise (Figure 13).

À la suite des adaptations effectuées par Ludovic Harter, ce TFE a permis la modification du logiciel TSAAR notamment en élargissement le processus d'inversion tomographique à toute l'île de La Réunion et à des zones précises. De plus, un MNT (Modele Numérique de Terrain) de plus haute résolution (30 m) a aussi été adapté à toute l'île (Figure 14). Enfin, le calcul des températures des stations GNSS depuis les fichiers Météo-France par régression linéaire est à présent possible sur toute l'île de La Réunion.

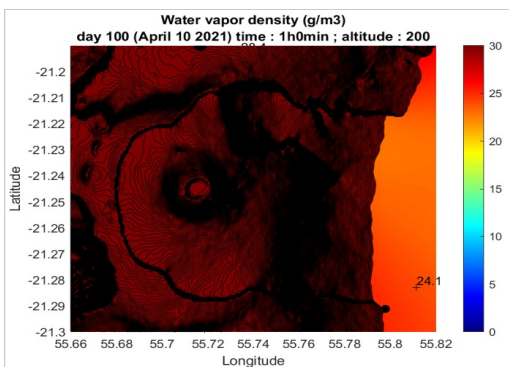


Figure 13: Exemple de coupe horizontale le 10 avril 2021 à 200 m par rapport au niveau de la mer. Zone du Piton de la Fournaise

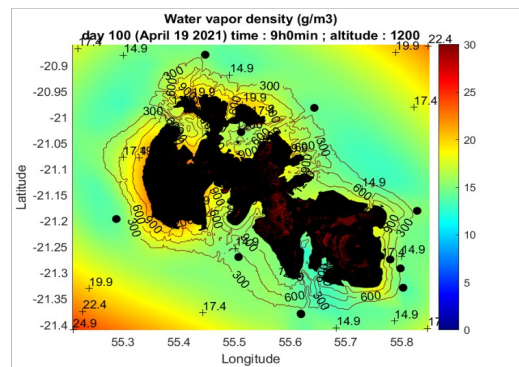


Figure 14: Adaptation du logiciel TSAAR sur toute l'île de La Réunion

Cette partie nous a permis d'apporter un aperçu global de l'état de l'art, du principe de l'inversion tomographique et du mode de fonctionnement de logiciel TSAAR. À présent, nous allons étudier le paramétrage et les limites du logiciel TSAAR ainsi que du réseau GNSS sur le contexte réunionnais. Une comparaison avec un modèle météorologique permettrait de valider ou non les résultats obtenus via le logiciel TSAAR.

II Paramétrages et premières comparaisons du logiciel TSAAR

II.1 Paramétrages du réseau GNSS

II.1.1 Discrétisation horizontale

La surface de la zone d'étude étant fixe, augmenter le nombre de voxels revient à réduire leurs tailles. Le nombre de voxels définit dans le fichier paramètre influence la qualité des résultats finaux. Dans cette partie, une attention particulière a été apportée à la discrétisation horizontale afin de comprendre ses « limites » sur une journée lambda : le 10 avril 2021. Quatre discrétisations horizontales ont été réalisées (très grossière à très fine) : 2*2, 5*5, 15*15 et 25*25, avec respectivement, 92, 575, 5 175 et 14 375 voxels par simulations, les couches de niveaux allant de 0 à 12 000 m. Notre discrétisation verticale a été de 23, avec un coefficient alpha de 0.05 (Équation 14) pour un total de 28 stations. Certaines zones géographiques sont difficiles d'accès sur le territoire réunionnais, l'implantation de stations GNSS est très hétérogène (I.4.2). De ce fait, certains voxels dans cette étude contiennent plusieurs stations, d'autres n'en contiennent pas (surdétermination/sous-détermination). (Figure 15).

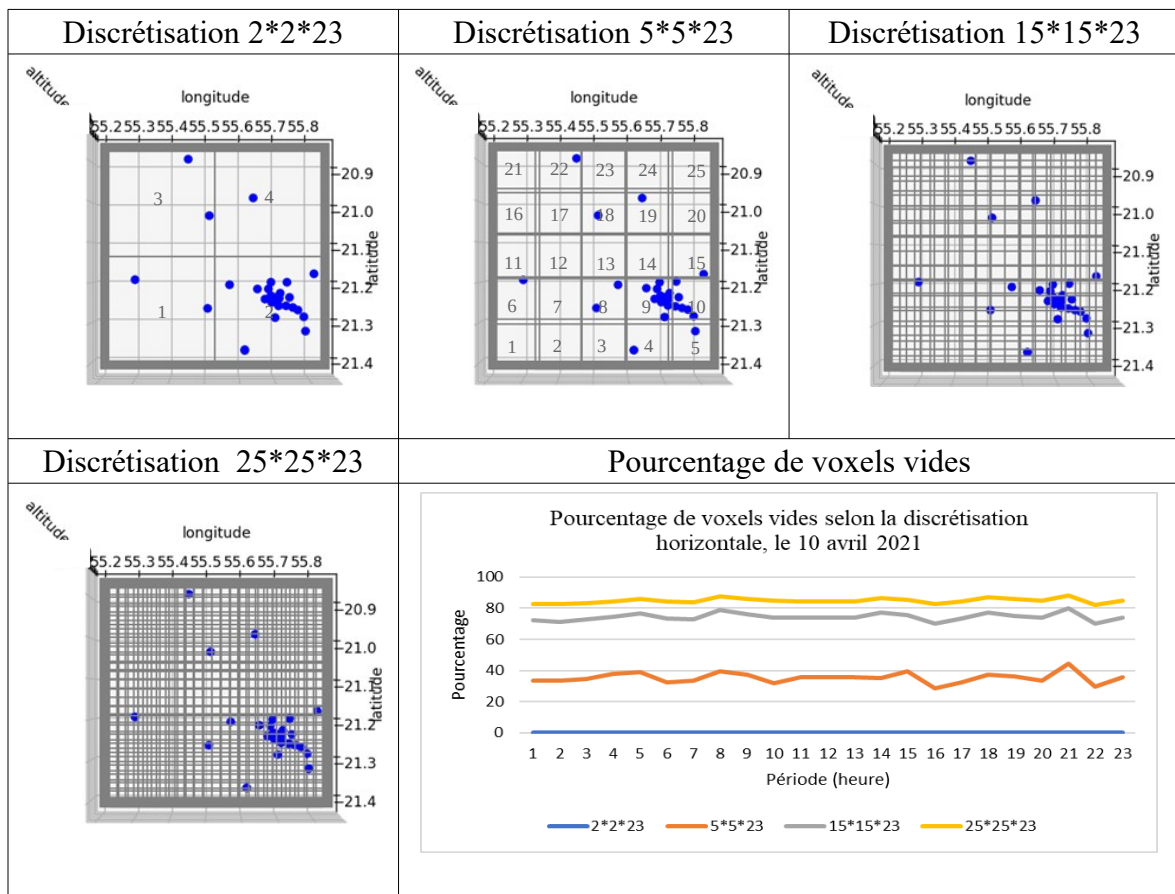


Figure 15: Représentation et pourcentage de voxels vides, les ronds bleus sont les stations et les numéros gris correspondent aux numéros des voxels.

Une première analyse visuelle a permis d'avancer que l'augmentation de la discrétisation horizontale entraîne une diminution du nombre de voxels contenant de l'information. En effet, selon le graphique (Figure 15), dans le cas d'une discrétisation de $2*2*23$, 100% des voxels sont traversés par des rais, contre 55% dans le cas d'une discrétisation $5*5*23$, 22% pour $15*15*23$ et 20% pour $25*25*23$.

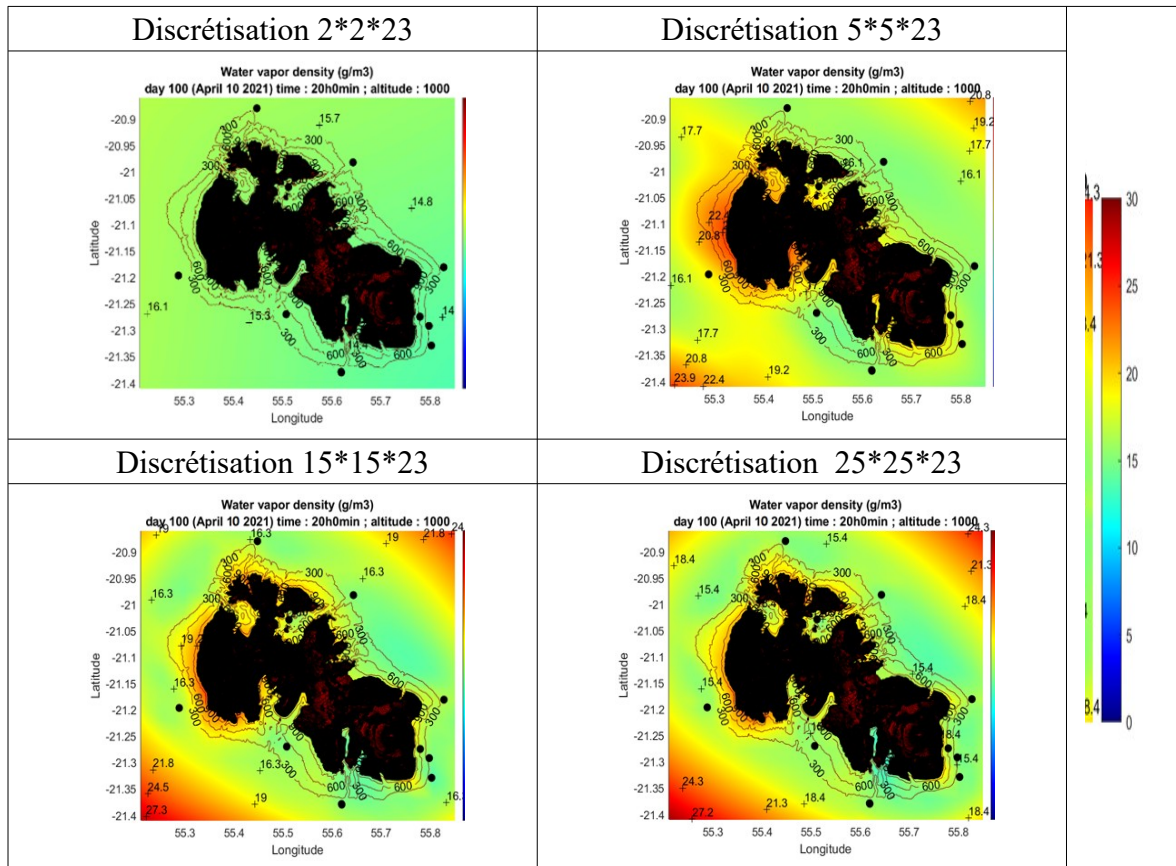


Figure 16: Répartition de la densité en vapeur le 10 avril 2021 à l'altitude 1 000 m

Visuellement, il est constaté (Figure 16) que dans le cas d'une discrétisation $2*2$, la répartition en vapeur d'eau est plus homogène car il n'y a pas de voxels vides. Cependant, une discrétisation aussi faible entraîne un lissage de données car ces voxels possèdent un grand nombre de stations. En effet, dans le résultat final, le logiciel TSAAR a moyenné les résultats de manière à ce que les voxels ne contiennent qu'une seule valeur. Cette opération a entraîné une compensation entre les valeurs hautes et basses des densités de vapeurs d'eau et donc un lissage du résultat final. De plus, lorsque les premiers voxels vides apparaissent, une hétérogénéité apparaît. Dans le cas des discrétisations $5*5$, $15*15$ et $25*25$, il est constaté visuellement des résultats tomographiques proches, surtout dans les cas des discrétisations $15*15$ et $25*25$. Il apparaît alors possible qu'il existe une discrétisation horizontale limite à partir de laquelle augmenter la discrétisation horizontale

n'apporte pas d'informations supplémentaires. Le fait que les trois derniers résultats aient des similitudes suppose que le nombre de voxels influence la façon dont la vapeur d'eau va se répartir et pas sur l'inversion tomographique (Reverdy, 2008). Outre le fait de faire varier les résultats, la durée de traitement varie aussi selon le nombre de voxels définis. En effet, pour cette journée, dans le cas d'une discrétisation $5*5*23$, la durée de calcul Matlab était de 32 minutes contre 17 heures pour la discrétisation $25*25*23$.

La Figure 17 permet de s'intéresser aux variations de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Elle montre la moyenne de la quantité de vapeur d'eau sur une journée pour différentes couches d'altitudes (basse altitude : avec beaucoup de vapeur d'eau, forte altitude : avec peu de vapeur d'eau).

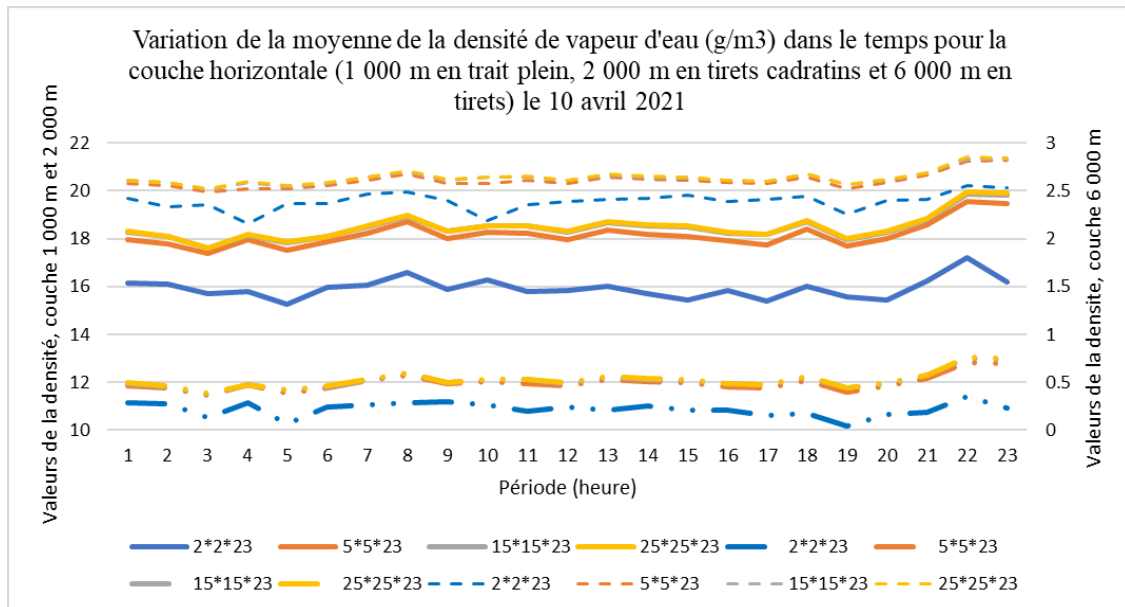


Figure 17: Variation de la densité de vapeur d'eau moyenne à l'altitude 1 000 m, 2 000 m et 6 000 m le 10 avril 2021

Plusieurs constats ont pu être amenés. Tout d'abord, quel que soit la couche et l'époque de la journée, la densité de vapeur d'eau la plus faible est pour la discrétisation $2*2$. Il y a donc une sous-estimation de sa quantité par rapport aux autres. Plus la discrétisation horizontale augmente, plus les droites représentant l'évolution moyenne de la densité de vapeur d'eau se rapprochent. Ce constat est flagrant dans le cas de la discrétisation $15*15$ et $25*25$ où les droites correspondantes se confondent (courbes en gris non discernables). Le fait que les droites correspondantes à de grandes discrétisations se rapprochent nous indique qu'il existe une limite (due à la quantité de voxels vides) ainsi augmenter la discrétisation horizontale ne permet pas d'améliorer significativement les résultats.

La Figure 18 représente les écarts-types pour chaque couche d'altitude, d'environ 0,3 g/m³, il y a une cohérence intrinsèque des résultats (Figure 18). Les écarts entre les

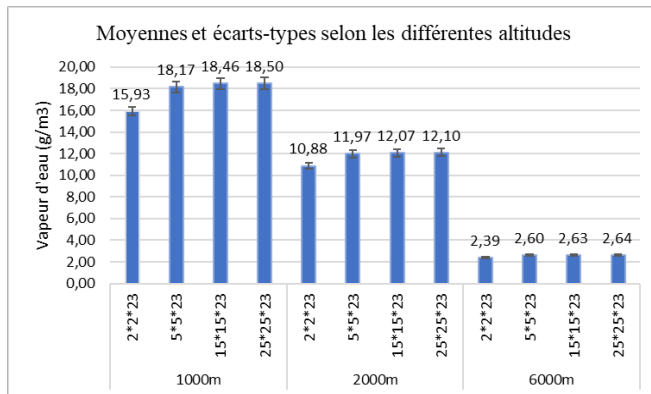


Figure 18: Moyennes et écarts-types pour les différentes couches

discretisations qui diffèrent selon les altitudes peuvent être dus au lissage des résultats. Néanmoins, quelle que soit la couche d'altitude, l'écart-type de la discretisation 2*2 ne recouvre pas les écarts-types des autres discretisations. Les résultats de cette discretisation sont donc significativement différents. Pour les

autres discretisations, les écarts-types obtenus se recouvrent. Les résultats sont significativement identiques (cas des discretisations 5*5, 15*15 et 25*25). Augmenter la discretisation (5*5 à 25*25) n'apporte donc pas d'information ou de précision supplémentaire sur les résultats finaux. La Figure 19 représente la densité moyenne de vapeur d'eau en fonction de l'heure sur toute notre zone d'étude (Figure 16 : toute l'île).

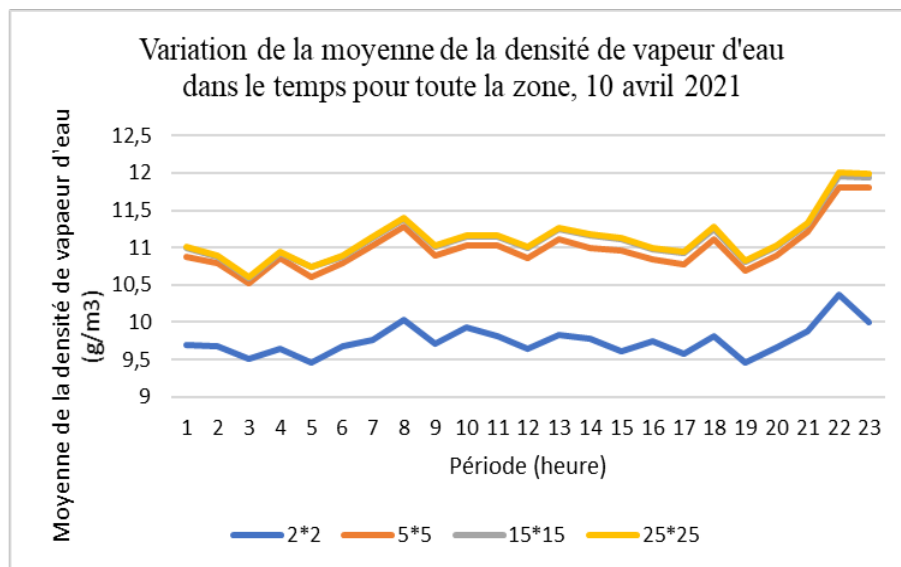


Figure 19: Variation de la densité moyenne globale de vapeur d'eau le 10 avril 2021

La discrétisation 2*2 semble assécher l'atmosphère (Figure 19). La discrétisation influence sur le résultat global de la répartition en densité de vapeur d'eau. Concernant la limite de la taille des voxels, celle-ci doit être équivalente à la distance moyenne séparant les stations (Reverdy, 2008). L'idéal pour avoir une bonne discrétisation horizontale dépend de ce que l'on souhaite obtenir et de la zone étudiée.

Pour conclure, une discrétisation trop faible permet d'avoir au minima une station par voxel sol mais entraîne une perte d'information due au surplus de stations dans chaque voxels provoqué par un lissage de la répartition de densité de vapeur d'eau (problème de sur-détermination). Une discrétisation trop haute entraîne un meilleur résultat sur les zones contenant suffisamment de stations, mais crée de nombreux voxels vides dans les zones moins bien couvertes (problème de sous-détermination). Il faut trouver le bon compromis, tout en sachant qu'une forte augmentation de la discrétisation horizontale n'apporte pas d'information supplémentaire puisqu'une limite est visible et que les temps de calculs augmentent. Au vue des analyses, une discrétisation 5*5 semble envisageable et semble un bon compromis entre le temps de calculs et les résultats obtenus.

II.1.2 Discrétisation verticale

Niveau/ Grille	fix200	fix300	fix500
xalt(1)	0	0	0
xalt(2)	200	300	500
xalt(3)	400	600	1 000
xalt(4)	600	900	1 500
xalt(5)	800	1 200	2 000
xalt(6)	1 000	1 550	2 500
xalt(7)	1 200	1 900	3 000
xalt(8)	1 400	2 300	3 500
xalt(9)	1 600	2 750	4 000
xalt(10)	1 800	3 250	4 750
xalt(11)	2 000	3 800	5 500
xalt(12)	2 200	4 400	6 250
xalt(13)	2 400	5 200	7 000
xalt(14)	2 600	6 200	8 000
xalt(15)	2 800	7 700	9 000
xalt(16)	3 000	9 800	10 000
xalt(17)	3 500	12 000	12 000
xalt(18)	4 000		
xalt(19)	4 500		
xalt(20)	5 000		
xalt(21)	6 000		
xalt(22)	7 000		
xalt(23)	9 000		
xalt(24)	12 000		

Tableau 2: Grille des discrétisations verticales (m)

Dans cette partie, nous nous limiterons à une altitude de 12 000 m car au-delà nous considérerons la quantité de vapeur d'eau comme nulle (car nous sommes largement au dessus des 2 000 m (I.1.2)). Effectuer les calculs avec des altitudes trop élevées engendrerait un surplus de temps de calcul non négligeable pour le logiciel TSAAR. Nous utilisons une discrétisation horizontale 5*5 et un coefficient alpha de 0,05. La discrétisation verticale influe surtout sur la résolution verticale et non sur les valeurs de densité de vapeur d'eau (Reverdy, 2008).

Néanmoins, nous pouvons nous demander comment le logiciel TSAAR pourrait opérer une inversion tomographique dans le cas d'une répartition de densité de vapeur d'eau inhabituelle. Ainsi, trois grilles ont été utilisées avec des pas de discrétisations différents, une avec un pas de 200 m, une autre

avec un pas de 300 m et enfin avec un pas de 500 m (Tableau 2). De manière générale, il a été considéré que la quantité de vapeur d'eau décroît de manière exponentielle en fonction de l'altitude, d'où les altitudes non constantes (Tableau 2). Cependant les trois grilles de cette étude ne suivent pas cette considération d'exponentielle. Pour une discrétisation horizontale de 5*5, nous avons respectivement pour fix200, fix300 et fix500 : 575, 400 et 400 voxels par période (Tableau 2). Le réseau actuel se compose de 20 stations réparties sur la zone du Piton de la Fournaise.

La journée étudiée est celle du 09 avril 2021 qui correspond à l'éruption volcanique ayant eu lieu avec l'ouverture d'une fissure sur le flanc Sud du volcan, laissant s'échapper du magma à 15 h (Harter, 2021). La Figure 20 représente les IWV (Integred Water Vapour) et la densité de vapeur d'eau selon la grille utilisée.

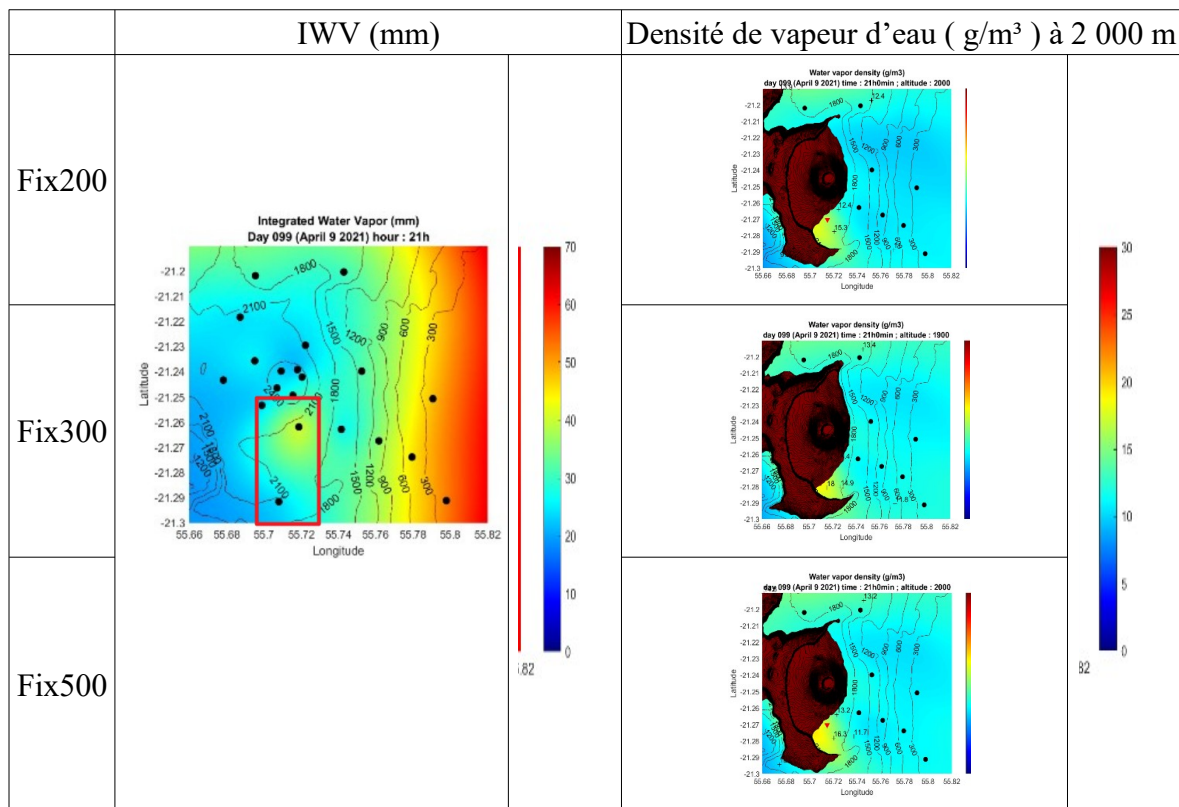


Figure 20: IWV et vapeur d'eau à 21h, voxels 2 et 7 en rouge (anomalie), 09 avril 2021

L'IWV est identique car nous sommes avant l'inversion tomographique, ces résultats sont indépendants de la discrétisation verticale mais indiquent un état général de la répartition en vapeur d'eau. L'IVW ne permet pas de conclure quant au réel impact de la discrétisation verticale, néanmoins, il a permis de fournir une information concernant une anomalie de vapeur d'eau, principalement visible à 21 h et à 2 000 m. Une restitution de vapeur d'eau à l'altitude 2 000 m a été faite de manière à comparer des couches

équivalentes (Figure 20, colonne de droite) et met un avant un répartition inhabituelle de la densité de vapeur d'eau due à l'éruption volcanique. Des tendances sont observables. La répartition de vapeur d'eau est sensiblement la même sur toute la zone pour les trois discrétisations. De plus, malgré les légères différences de valeurs d'une grille à l'autre, à l'endroit de l'éruption, l'anomalie de vapeur d'eau est visible par les trois grilles, au niveau des voxels sols 2 et 7 (Figure 20), représentés sur les profils verticaux. (Figure 21).

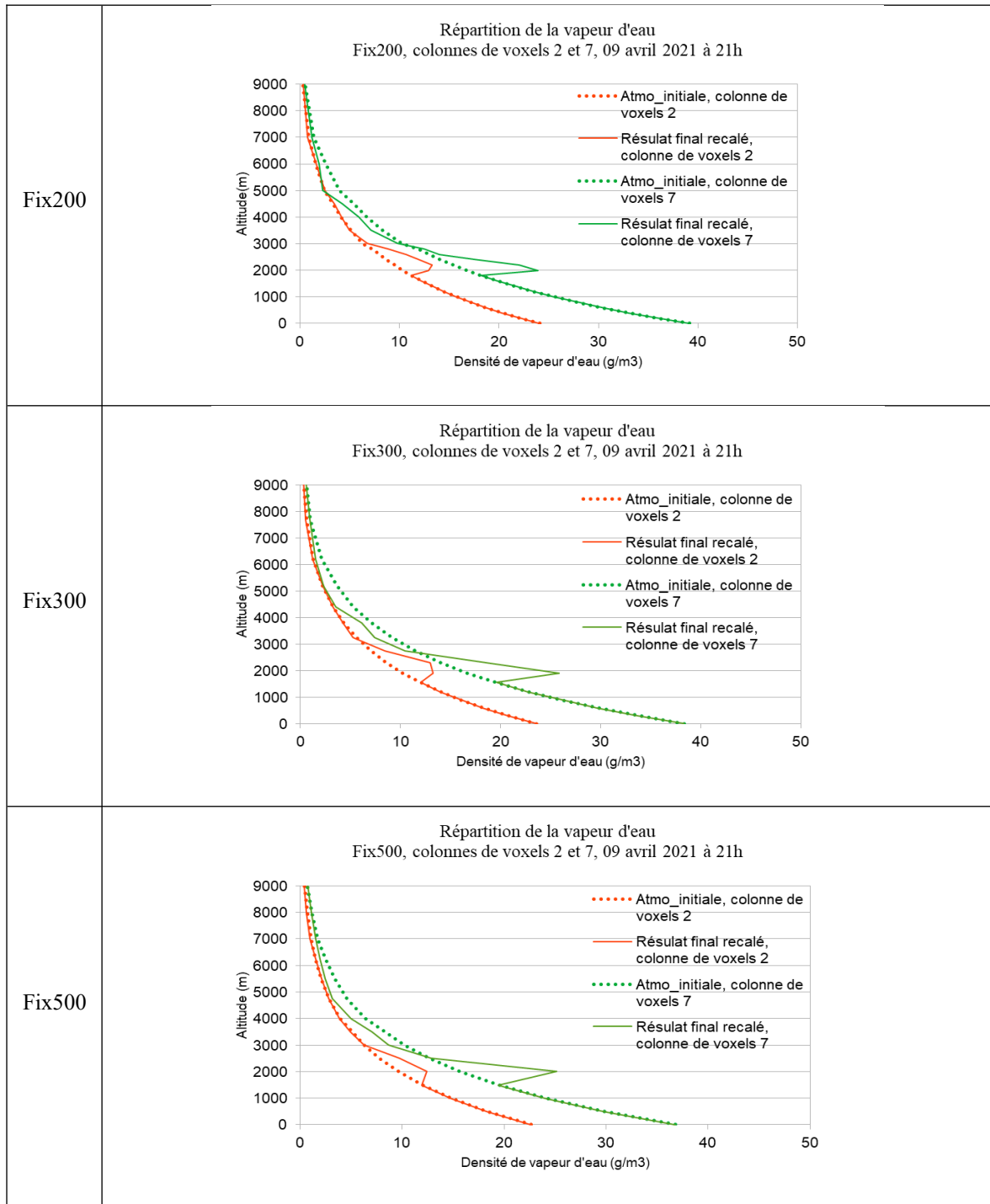


Figure 21: Répartition verticale de la densité de vapeur d'eau, voxels sols 2 et 7, atmo_initiale (recalée par les IWV) : valeurs initiales, et résultat final recalé : résultats issus de l'inversion tomographique

Dans les trois cas, TSAAR a bien pris en compte la répartition inhabituelle de la densité de vapeur d'eau et les résultats obtenus ont des aspects similaires. Pour le voxel sol 2, l'atmosphère finale recalée suit l'atmosphère initiale au dessus 3 000 m, contrairement au voxel sol 7 où un écart est observable dès 7 000 m. En dessous de 2 000 m, la répartition de la densité de vapeur d'eau suit de nouveau la répartition initiale recalée en raison d'absence de données (relief du volcan). Concernant l'anomalie évoquée sur les trois grilles, celle-ci a bien été retranscrite. En effet, il a été remarqué un pic à 2 000 m d'altitude, ce qui concorde avec les Figures 20 et 22, la Figure 22 représente des profils aux coordonnées du cône éruptif. Néanmoins, ces pics sont de valeurs différentes, avec 22.5 g/m³ pour fix200, 22 g/m³ pour fix300 et 21.1 g/m³ pour fix500 (Figure 22). Le pic présent à 2 000 m au niveau du voxel sol 7 est plus important que celui du voxel 2, ce qui est cohérent avec la Figure 20 étant donné que le voxel sol 7 contient la majorité de l'anomalie.

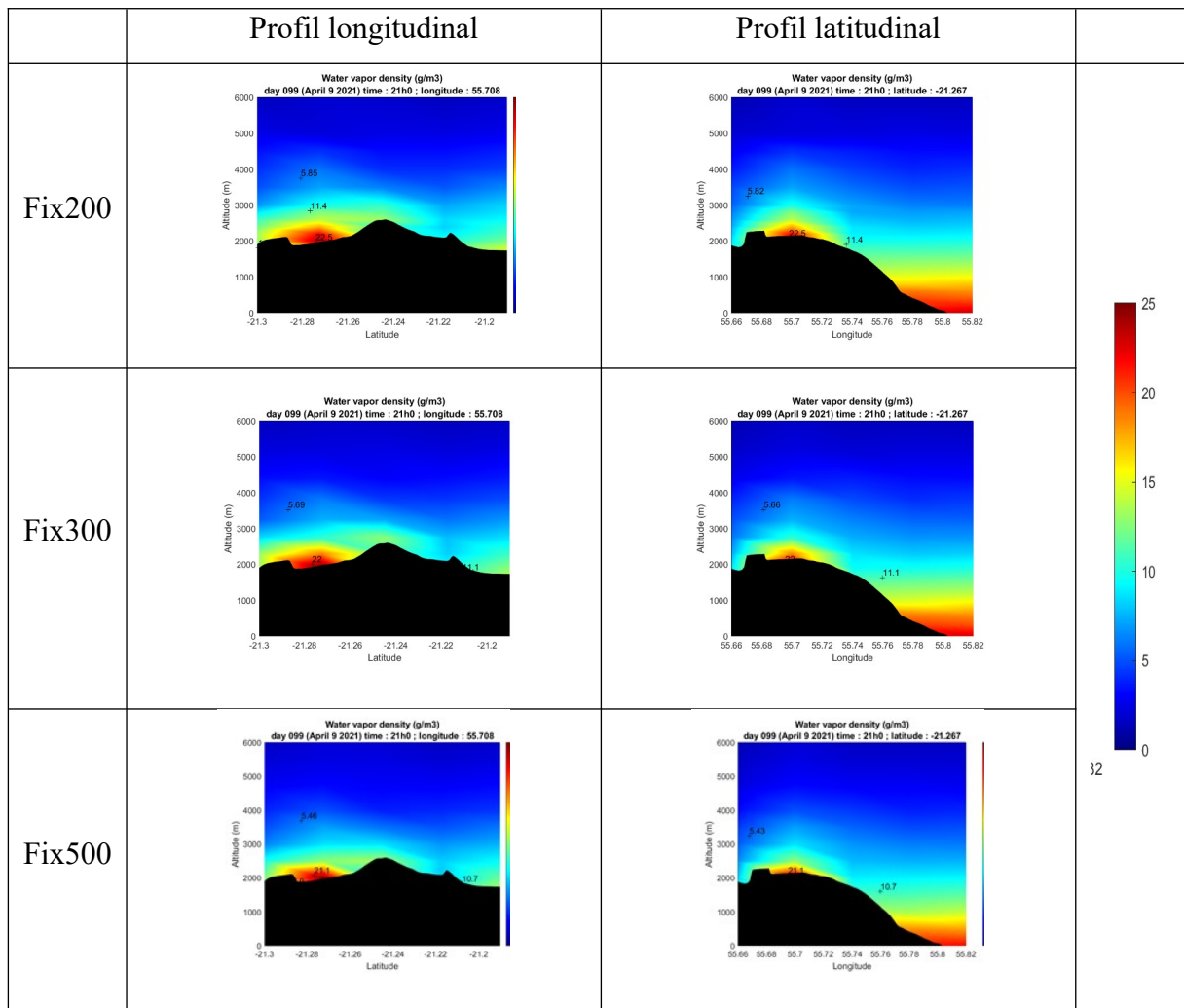


Figure 22: Profils longitudinales et latitudinales de la densité de vapeur d'eau sur la zone du Piton de la Fournaise

L'anomalie de densité de vapeur d'eau semble bien restituée malgré des formes et des valeurs différentes. Néanmoins, plus le pas de discrétisation utilisé est grossier, plus la valeur de l'anomalie est basse. Le fait que les résultats obtenus ne soient pas identiques est dû à la résolution. Utiliser une grille plus grossière (fix500 = 500 m) ne permet pas une restitution fiable de la densité de vapeur d'eau dans les basses couches de l'atmosphère où se trouve la majeure partie de la vapeur d'eau (Meunier, 2014). Une grille grossière signifie que toute la vapeur d'eau se retrouve dans les mêmes voxels. Les résultats seront moyennés car seule une valeur par voxel est possible. Enfin, diviser les voxels en sous-voxels donne une répartition plus précise (fix200 et fix300) et n'engendre pas de voxels vide car les voxels sous-divisés sont toujours traversés par les mêmes rais (il n'y a pas de perte d'informations).

Le pic de vapeur d'eau qui est apparu au niveau de la zone éruptive connaît un maximum à 21 h avant de décroître progressivement (Harter, 2021). Lors de son dégazage, le magma produit un panache qui est principalement composé de vapeur d'eau (H_2O) et de soufre sous forme de SO_2 et H_2S . (Di Muro, consulté le 22/06/22). La haute teneur de certains de ces gaz peut se révéler un risque pour l'Homme, notamment le dioxyde de soufre (SO_2) dont la concentration dans l'air est surveillée par l'OVPF. Une piste d'explication de cette anomalie de vapeur d'eau pourrait être le système hydrothermal de cette zone. En effet, de fortes précipitations ont eu lieu peu avant l'éruption (65 mm sur 7 jours), le sol étant poreux, l'eau s'y est accumulée. Cette libération de vapeur d'eau peut être due à la chaleur. Une augmentation de la température à cause de l'éruption pourrait chauffer la roche poreuse, libérant l'eau s'y trouvant sous forme de vapeur d'eau, expliquant ce pic de vapeur d'eau (Harter, 2021).

Au vu des résultats présentés, le logiciel TSAAR peut restituer les répartitions inhabituelles de densité de vapeur d'eau (Figures 21 et 22) et la discrétisation verticale influe peu sur les résultats globaux obtenus (l'inversion tomographique). La discrétisation verticale a un impact sur la résolution verticale et donc sur la précision de la répartition finale de la densité de vapeur d'eau. Utiliser une discrétisation verticale de 500 m entraîne une diminution de précision, contrairement à une discrétisation de 200 m. Étudier les basses couches de l'atmosphère nécessite donc une grille avec un pas adapté en fonction des résultats voulus tout en considérant les temps de calculs. Une discrétisation plus fine offrira une répartition plus précise et augmentera les temps de calculs. Fix200 sera utilisée pour la suite car elle présente un bon compromis.

II.1.3 Effet de bord et géométrie du réseau

Un intérêt particulier a été porté à la géométrie du réseau pour la journée du 10 avril 2021. Cette géométrie va influencer sur la répartition des SIWV dans les voxels ce qui nous amènera à obtenir des résultats différents. Une bonne répartition des récepteurs GNSS serait donc nécessaire pour obtenir des résultats proches de la vérité terrain. Pour vérifier cette hypothèse, cinq réseaux différents ont été étudiés (Figure 23) sur la zone du Piton de la Fournaise, avec une discrétisation $5 \times 5 \times 23$.

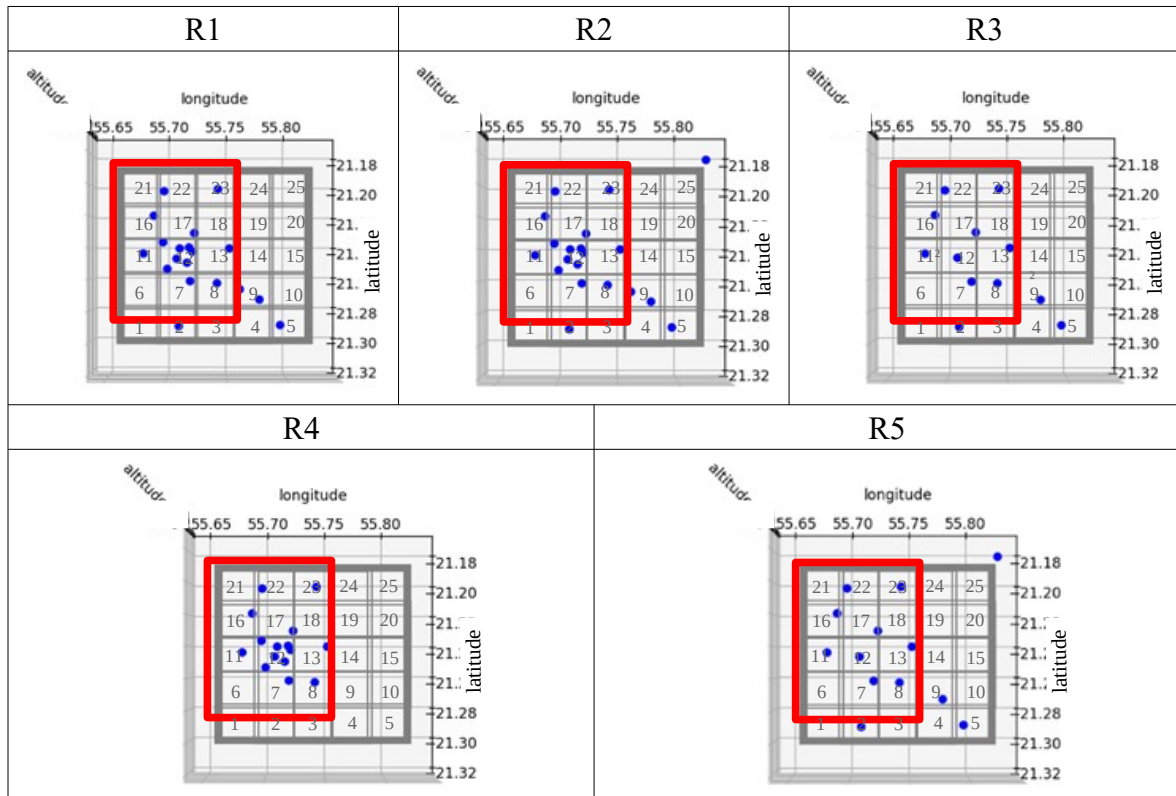


Figure 23: Réseaux utilisés pour étudier la géométrie du réseau (rouge : zone Nord-Ouest (NO))

R1 possède 19 stations GNSS correspondant au réseau utilisé par L. Harter lors de son étude en 2020. La répartition des stations GNSS n'est ni homogène ni régulière, notamment au Nord-Est. R2 est similaire à R1 mais avec CASG, hors zone d'étude au Nord-Est, son objectif est de vérifier si une station hors zone peut compléter positivement un réseau hétérogène. R3 a pour objectif de visualiser l'impact du nombre de stations par voxel, il possède 12 stations GNSS, une seule par voxel sol, issues du réseau initial. R4 a 15 stations GNSS, toutes situées au Nord-Ouest et permettra de conclure quant à l'impact de la répartition des stations sur la zone d'étude. Enfin, R5 est similaire à R3 mais avec CASG en plus.

En regardant les IWV (Figure 24), un effet de bord dû aux voxels vides est visible sur tous les réseaux. Pour R4, cet effet est plus important au Sud-Est, avec une valeur de 69 g/m^3 , provoqué par l'absence de station à l'Est et au Sud. Le manque de stations engendre des voxels vides dont la contenance en vapeur d'eau a été déterminée par extrapolation et ne reflète pas la réalité. Dans le cas de R1 et de R3 les résultats sont similaires, bien que le nombre de station est différent, l'effet de bord diminue (passant à 58 g/m^3) grâce à la présence de stations présentes au Sud, limitant l'extrapolation. L'ajout d'une station en dehors de la zone d'étude (R2 et R5) a permis d'apporter de l'information supplémentaire contraignant le domaine d'interpolation. En effet, dans le cas de R2 et de R5, les effets de bord au Nord-Ouest ont encore diminué (passant à 57 g/m^3 à 51 g/m^3) malgré le fait que cette station soit en dehors de la zone d'étude.

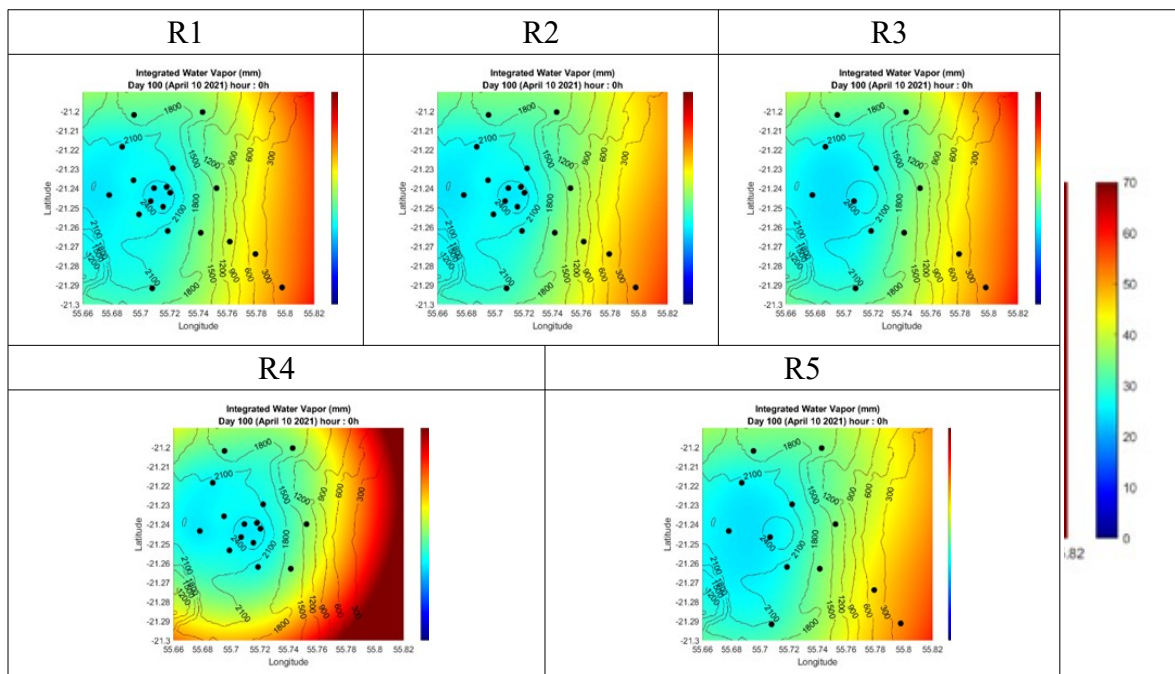


Figure 24: IWV (mm) résultant des cinq réseaux à 0:00

La Figure 25 représente l'évolution moyenne de densité de vapeur d'eau sur la zone d'étude (trait plein) et sur la zone Nord-Ouest (trait pointillé (zone rouge sur la Figure 22)). En considérant tout le secteur, la densité de vapeur d'eau dans R4 est surestimée de $3,74 \text{ g/m}^3$ en moyenne (Figures 24 et 25). Cette surestimation est contrainte par la distribution des SIWV dans les voxels. En effet, puisqu'une partie de la zone d'étude ne possède pas de station, le logiciel TSAAR n'a pu utiliser que les valeurs issues de l'initialisation pour réaliser l'inversion tomographique. Ceci a dégradé les résultats au regard des autres réseaux créant des différences considérables, notamment pour la colonne

de voxels 5 avec une différence d'environ 28 g/m^3 (entre R4 et les autres géométries). (Figures 24 et 25).

Concernant les autres réseaux (Figure 25), les moyennes de densités de vapeur d'eau ne sont pas significativement différentes (recouvrement des écarts-types) (R1 : $11,21 \text{ g/m}^3$, R2 : $11,46 \text{ g/m}^3$, R3 : $11,53 \text{ g/m}^3$ et R5 : $11,52 \text{ g/m}^3$, (Figure 26). La quantité de vapeur d'eau est la même mais que c'est sa répartition va varier.

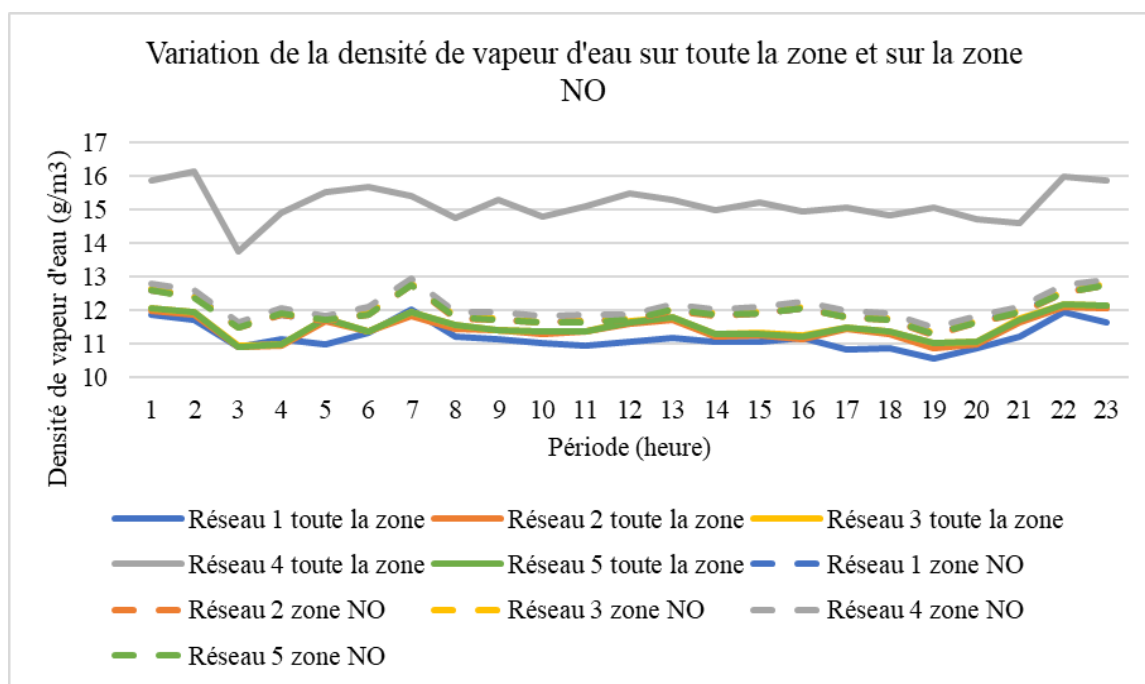


Figure 25: Évolution de la moyenne de densité de vapeur d'eau, 10 avril 2021

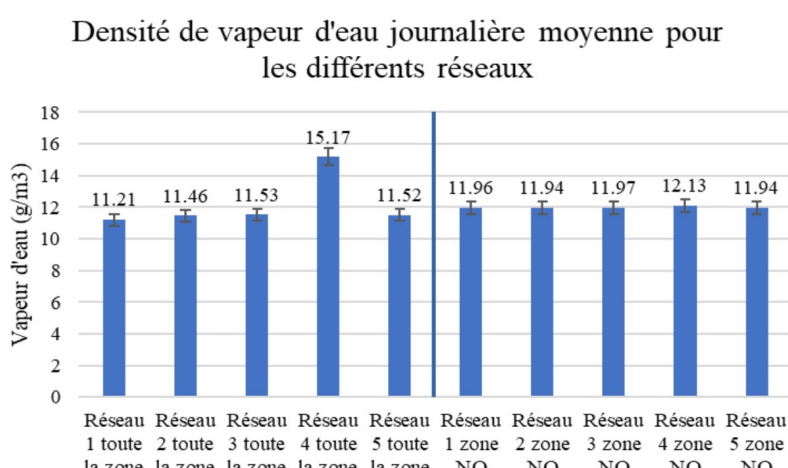


Figure 26: Variation de densité de vapeur d'eau journalière moyenne, 10 avril 2021

Dans un second temps, seule la zone Nord-Ouest, possédant suffisamment de stations pour les cinq réseaux a été étudiée (rectangle rouge, Figure 23). Tout comme précédemment, R4 (Figures 26) est

surestimé, plus faiblement car la zone d'extrapolation n'a pas été prise en compte ($0,17 \text{ g/m}^3$ en moyenne). Les autres réseaux possèdent des valeurs relativement proches.

Qu'importe le réseau, la moyenne de densité de vapeur d'eau possède des écarts-types qui se recouvrent (Figure 26), les valeurs ne sont donc pas significativement différentes (R1 : 11,96 g/m³, R2 : 11,94 g/m³, R3 : 11,97 g/m³, R4 : 12,13 g/m³ et R5 : 11,94 g/m³). Mettant en avant l'existence d'un polygone d'interpolation, dont les sommets correspondent aux stations et dans lequel l'inversion tomographique est fiable.

Pour conclure, il apparaît comme nécessaire de disposer d'un réseau uniformément réparti afin d'éviter les extrapolations (effet de bord). De plus, l'inversion tomographique n'est concluante qu'à l'intérieur du polygone d'interpolation. Dans le cas où la zone d'étude ne contiendrait pas suffisamment de stations ou que les stations seraient mal réparties, il peut être judicieux de prendre des stations hors zone de manière à limiter les effets de bords (R2 et R5). Si notre réseau est bien couvert, l'ajout de stations périphériques n'est pas nécessaire (R1/R2 et R3/R5 dans la zone rouge). Les différences entre R1/R2 et R3/R5 étant faibles (0.03 g/m³ en moyenne), une station par voxels est suffisante. Dans le cas où le voxel contiendrait un fort gradient topographique, il faudrait prendre une station GNSS à altitude moyenne ou une station GNSS représentant la tendance globale de l'altitude. L'étude du relief est donc nécessaire. Enfin, dans le cas de R4, le polygone d'interpolation (zone Nord-Ouest) est influencé par les zones extrapolées (zones Sud et Est).

II.2 Comparaison : MESO-NH et TSAAR

Dans cette partie, une première comparaison entre le logiciel TSAAR et un modèle météorologique prévisionnel, MESO-NH est apportée.

II.2.1 Les modèles météorologiques

De nos jours, pour anticiper le temps de demain, les météorologues s'appuient sur des simulations de l'atmosphère. En considérant l'atmosphère comme un système, il est nécessaire de mettre en place des équations/approximations mathématiques prenant en compte différentes variables au sol et dans l'atmosphère : vent, humidité, température, pression. Toutes ces données permettent la mise en place de modélisations météorologiques numériques permettant différentes études mais également l'accès à différentes données (ZTD, ZHD, ZWD). Il existe de nombreux modèles météorologiques, ayant chacun leurs propres caractéristiques. Ces modèles sont récapitulés dans le Tableau 3, cette liste n'est pas exhaustive (www.meteocontact.fr, consulté le 01/06/2022).

Nom du modèle	Producteur du modèle	Zone couverte	Résolution du modèle	Accès au modèle	Nombre d'initialisation par jour	Type de modèle
GFS	NCEP	États-Unis	24 à 70 km	Gratuit	4	Prévisionnel
Era-Interim	ECMW	Europe	14 km	Payant	2	Réanalyse
WRF	WRF	États-Unis	2 à 15 km	Gratuit	4	Prévisionnel
ARPEGE	Météo-France	Monde	Europe: 0.1 ° Monde:0.5°	\	4	Prévisionnel
AROME	Météo-France	France	1.3 km	\	4	Prévisionnel
CFS	NCEP, NOAA	États-Unis	\	\	\	Prévisionnel
MESO-NH	Laero , CNRM	\	2.3 km	Gratuit	\	Prévisionnel

Tableau 3: Différents modèles météorologiques (www.meteocontact.fr)

II.2.2 Le modèle MESO-NH.

Dans le cadre d'une première comparaison du logiciel TSAAR, le modèle MESO-NH (Non-Hydrostatic MESOScale atmospheric model) mis en place par Laero (Laboratoire d'Aérodynamique) et le CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) est utilisé. Il est choisi en fonction de sa disponibilité, de sa résolution et des valeurs pouvant être extraites. Ce modèle a une résolution de 2,3 km et a été développé en 1993 par des groupes de modélisation atmosphérique. Il est actuellement présent dans différents pays et comprend 37 équipes de chercheurs. L'initialisation de MESO-NH se fait par l'intégration d'observations de manière indirecte par l'intermédiaire d'un autre modèle qui assimile des données issues d'observations (radiosondage ...). MESO-NH possède un forçage aux limites¹. Différentes variables peuvent être extraites via ce modèle : les IWV, la température, les différentes composantes du vent, les ZTD, ZWD, ZHD.

II.2.3 Comparaison entre le modèle météo MESO-NH et TSAAR

À cause de la disponibilité des données, la journée du 01 février 2022 est étudiée. Les données extraites étaient sous la forme de fichier .nc, 24 fichiers sont présents : un fichier par heure. Pour les précipitations cumulées, nous avons un fichier par heure. Les principales commandes Linux sont détaillées en fin du rapport².

¹Annexe 1

²Annexe 2

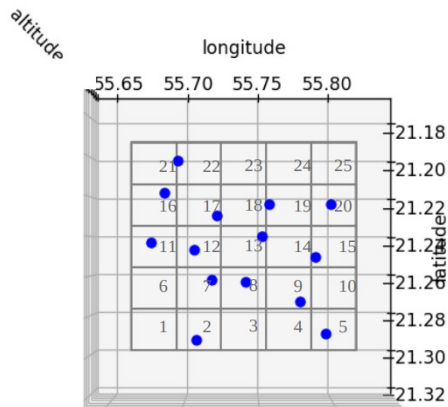


Figure 27: Réseau étudié, zone du Piton de la Fournaise, le 01 février 2022

Le figure 27 représente le réseau utilisé avec une discrétisation de 5*5*23. Le logiciel TSAAR définit les IWV (Integred Water Vapour) sur l'ensemble du secteur via une grille de 100*100 (bon compromis entre le temps de calcul et le lissage des résultats), ramenée à une grille de 6*8 correspondant à la discrétisation utilisée par MESO-NH sur le secteur.

Dans un premier temps, les différences entre TSAAR (dans le polygone d'interpolation) et MESO-NH (Figure 28) ont été étudiées. Globalement, sur l'ensemble de la journée, les IWV de MESO-NH sont sous-estimés. En regardant les écarts relatifs, les maximums sont entre 11 h et 15 h, avec un écart maximum d'IWV de 12,1 mm à 14 h. Dans un second temps, l'écart relatif minimal se situe à 18 h, où l'IWV de MESO-NH est supérieur à celui de TSAAR avec un écart de 1,99 mm. Enfin, les écarts-types sont relativement élevés à certains horaires signifiant que les écarts ne sont pas homogènes à cette période. Ainsi, à un horaire donné, certains voxels auront des valeurs très différentes. Deux horaires ont été étudié : 14 h et 18 h, correspondant aux écarts relatifs maximum et minimum (Figure 29).

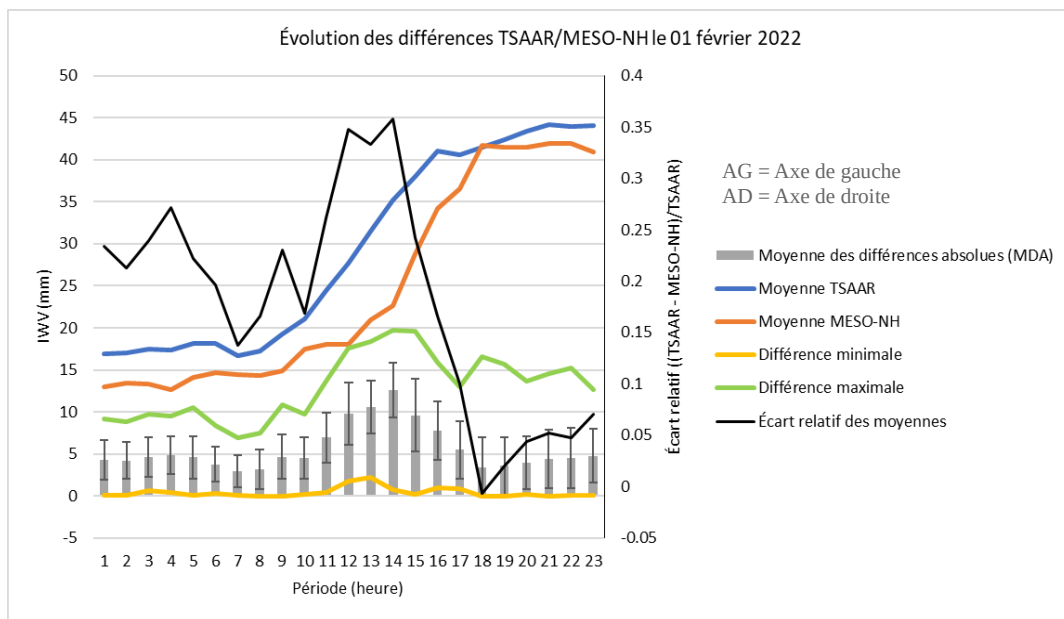


Figure 28: Différences TSAAR/MESO-NH sur la journée du 01 février 2022

Ces résultats représentent un cas en particulier : celui avant l'arrivée d'un cyclone.

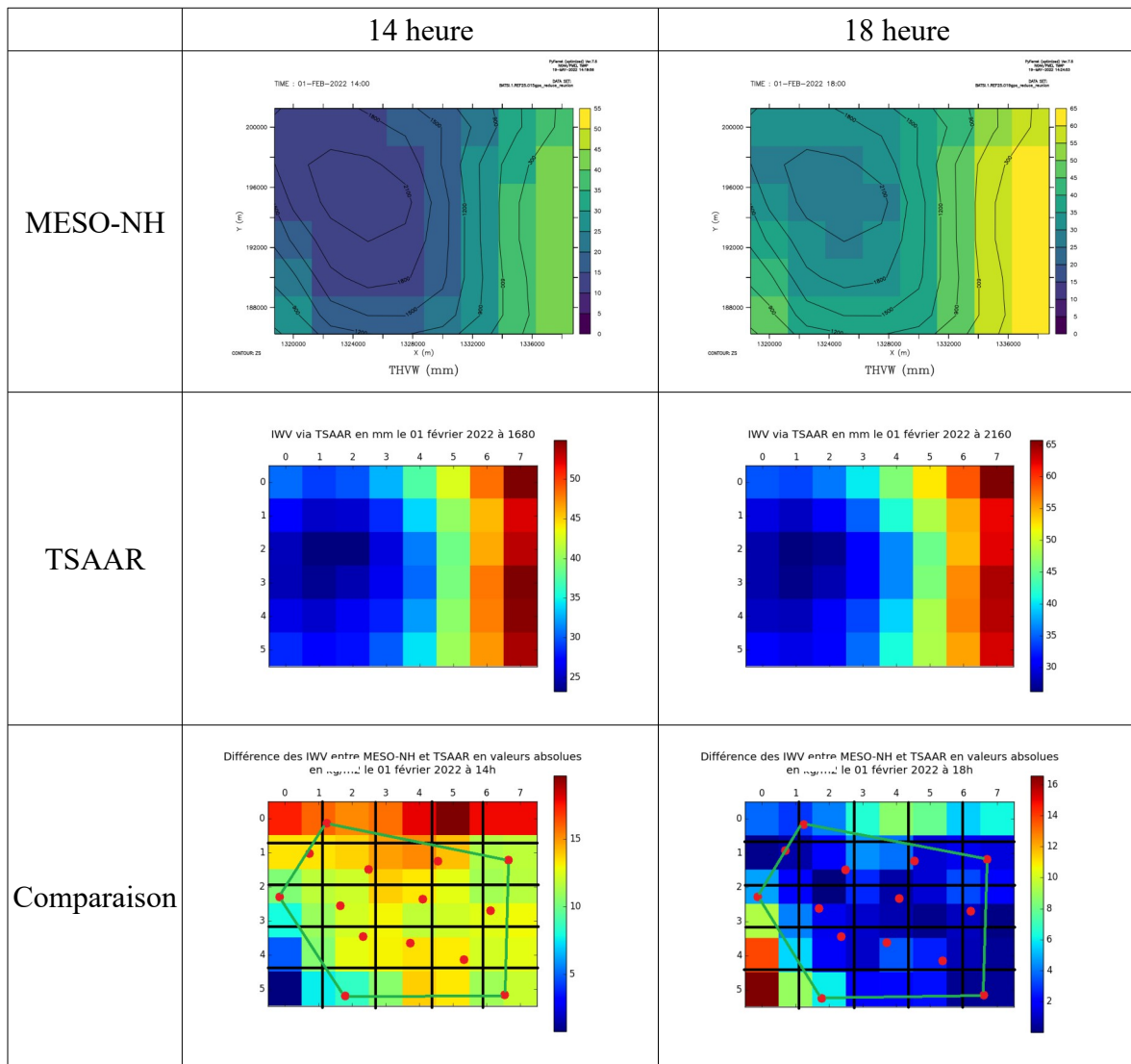


Figure 29: Résultat (TSAAR - MESO-NH) et comparaison (en vert : polygone d'interpolation), zone du Piton de la Fournaise

- 14 h le 01 février 2022

Tout d'abord, nous remarquons que dans les deux modèles nous avons des IWV repartis de la même manière avec des valeurs plus fortes à l'Est qu'à l'Ouest entraînant la mise en place d'un gradient Est-Ouest. Néanmoins, dans le cas du logiciel TSAAR, une surestimation est présente sur toute la zone. En effet, dans les six colonnes de voxels verticaux à l'Ouest (Figure 29), nous avons une moyenne de 53,9 mm pour TSAAR contre 40,8 mm pour MESO-NH, soit une différence de 13,1 mm mais un écart-type de 2,3 mm. Les valeurs obtenues entre les modèles sont cohérentes puisque l'écart-type des différences est faible. Sur l'ensemble du secteur, à cet horaire, l'écart moyen absolu est de 12,6 mm avec un écart-type plus élevé de 3,2 mm indiquant une plus grande incohérence entre les deux modèles sur l'ensemble du secteur, dès qu'on y ajoute les zones extrapolées. Avec la Figure 29, nous remarquons que la majorité des écarts se situe au Nord-Nord-Est du

secteur dans des voxels sols ne possédant pas d'information due à l'absence de station. Pourtant, une incohérence est présente au Sud-Ouest, puisque ces voxels sols ne possèdent pas de station mais ont les écarts les plus faibles. De manière générale, les différences hétérogènes se situent en dehors du polygone d'interpolation (en vert, Figure 29) et correspondent à des valeurs extrapolées par le logiciel TSAAR (effets de bord). Si nous nous intéressons aux valeurs présentes dans le polygone d'interpolation, nous obtenons des valeurs plus faibles, et plus cohérentes avec une moyenne de 12,1 mm avec un écart-type de 1,5 mm.

- 18 h le 01 février 2022

À cette horaire, nous avons toujours la présence du gradient Est-Ouest, néanmoins, la majeure partie des voxels ne sont pas surestimés. En effet, sur toute la zone, nous avons un écart-moyen de 3,4 mm et un écart-type de 3,5 mm. Avoir un écart-type aussi important par rapport à la moyenne implique que les deux modèles possèdent des différences non homogènes sur l'ensemble secteur d'étude. Au travers de la Figure 29, nous remarquons que les écarts sont maximums au Nord-Nord-Est et au Sud-Ouest ce qui correspond aux voxels sols ne contenant pas de station et étant à l'extérieur du polygone d'interpolation (en vert) et correspondant aux zones non exploitables. Dans le polygone d'interpolation, notre écart moyen est de 1,99 mm avec un écart-type de 1,6 mm, la partie extrapolation est donc à l'origine de la détérioration des résultats (II.1.3).

Les différences entre TSAAR et MESO-NH peuvent avoir différentes sources car MESO-NH est un modèle prévisionnel, il va donc se baser sur des observations (de manière indirecte) pour tenter de prédire les conditions futures. À cela s'ajoute le fait que nous sommes un jour avant l'arrivée du cyclone Batsirai sur l'île de La Réunion, prévoir les conditions futures est donc compliqué. En effet, les trajectoires des cyclones ne sont pas prédictibles de manière fiable à 100 %. Ces prédictions se font sous forme de cône montrant la trajectoire du cyclone avec une probabilité de 75 %, ces cônes sont ensuite réajustés au fur et à mesure de l'évolution du cyclone. (www.francetvinfo.fr 20/05/2022). Ces erreurs de prédictions présentes alors dans MESO-NH peuvent permettre de justifier les écarts.

De manière à confirmer ou réfuter toutes ces suppositions, nous pouvons grâce au logiciel CYCLADE³ visualiser les positions du cyclone simulées (MESO-NH) et celles du cyclone mesurées (Figure 30).

³ Annexe 3

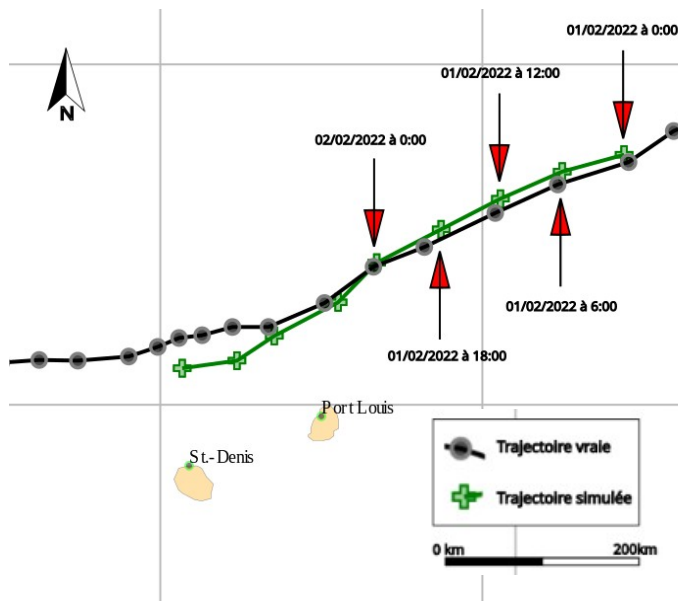


Figure 30: Trajectoires simulée et vraie du cyclone Batsirai

Nous remarquons que sur la journée du 01 février 2022, le modèle MESO-NH a sous-estimé la vitesse de Batsirai créant des écarts importants (environ 15 km) entre la position simulée et celle mesurée (TSAAR). Le fait que, de manière générale le cyclone soit plus proche de la Réunion que prévu pourrait justifier la surestimation de densité de vapeur d'eau visible dans le logiciel TSAAR vis-à-vis de MESO-

NH. Néanmoins, nous remarquons une incohérence. En effet, selon la Figure 28, nous avons un écart relatif faible à 18 h, ce qui pourrait signifier que l'écart entre la position du cyclone simulée et la vraie position est faible. Dans les faits, pour la journée du 01 février, 18 h correspond à l'écart maximum de 32 km. De part ce fait, la distance entre la vraie position et celle estimée ne permet pas de justifier totalement les écarts entre MESO-NH et le logiciel TSAAR. D'autres paramètres cycloniques peuvent entrer en compte comme l'intensité, la taille ou le fait que la vapeur d'eau ne soit pas homogène sur l'ensemble du cyclone.

Pour conclure, la comparaison donne des valeurs sous-estimées par MESO-NH avec des écarts-types plus ou moins élevés selon les horaires. Une journée lambda (non faisable ici au vu de la disponibilité des données) aurait peut-être donné une meilleure comparaison afin d'éviter ces fortes variations IWV. Mais nous pouvons remarquer une certaine cohérence dans les valeurs d'IWV puisque nous obtenons la majorité des différences en dehors du polygone d'interpolation. Ceci nous permet d'approuver l'étude sur la géométrie du réseau. Seuls les voxels compris dans ce polygone connaissent une inversion tomographique concluante et ont des résultats exploitables.

Cette partie nous a permis de comprendre le paramétrage et les limites du logiciel TSAAR et du réseau GNSS concernant le processus d'inversion tomographique. Le réseau GNSS réunionnais étant hétérogène, une homogénéisation de ce dernier permettrait une restitution plus fiable de la densité de vapeur d'eau. Par la suite, nous étudierons un cas pratique, le cyclone Batsirai et une première approche d'homogénéisation : l'OSSE.

III Cas d'étude et première approche de l'OSSE

III.1 Cas d'étude : le cyclone Batsirai

Le cyclone Batsirai s'est formé le 24 janvier 2022 dans l'océan Indien avant de devenir une tempête tropicale modérée le 27 janvier 2022 puis un cyclone tropical intense. Le 02 février 2022, selon l'échelle de Saffir-Simpson, il sera qualifié d'équivalent à un ouragan de catégorie 04. La Réunion, en alerte rouge, sera touchée par le cyclone le 02 février 2022 jusqu'au 04 février 2022 (Figures 31 et 32) avec des vents atteignant 150 km/h. En plus des vents violents, des précipitations exceptionnelles ont eu lieu avec 1 500 mm de pluie en 24 h sur la zone du Piton de la Fournaise, soit deux fois plus que la moyenne annuelle sur Paris (www.leparisien.fr, consulté le 01/06/2022).

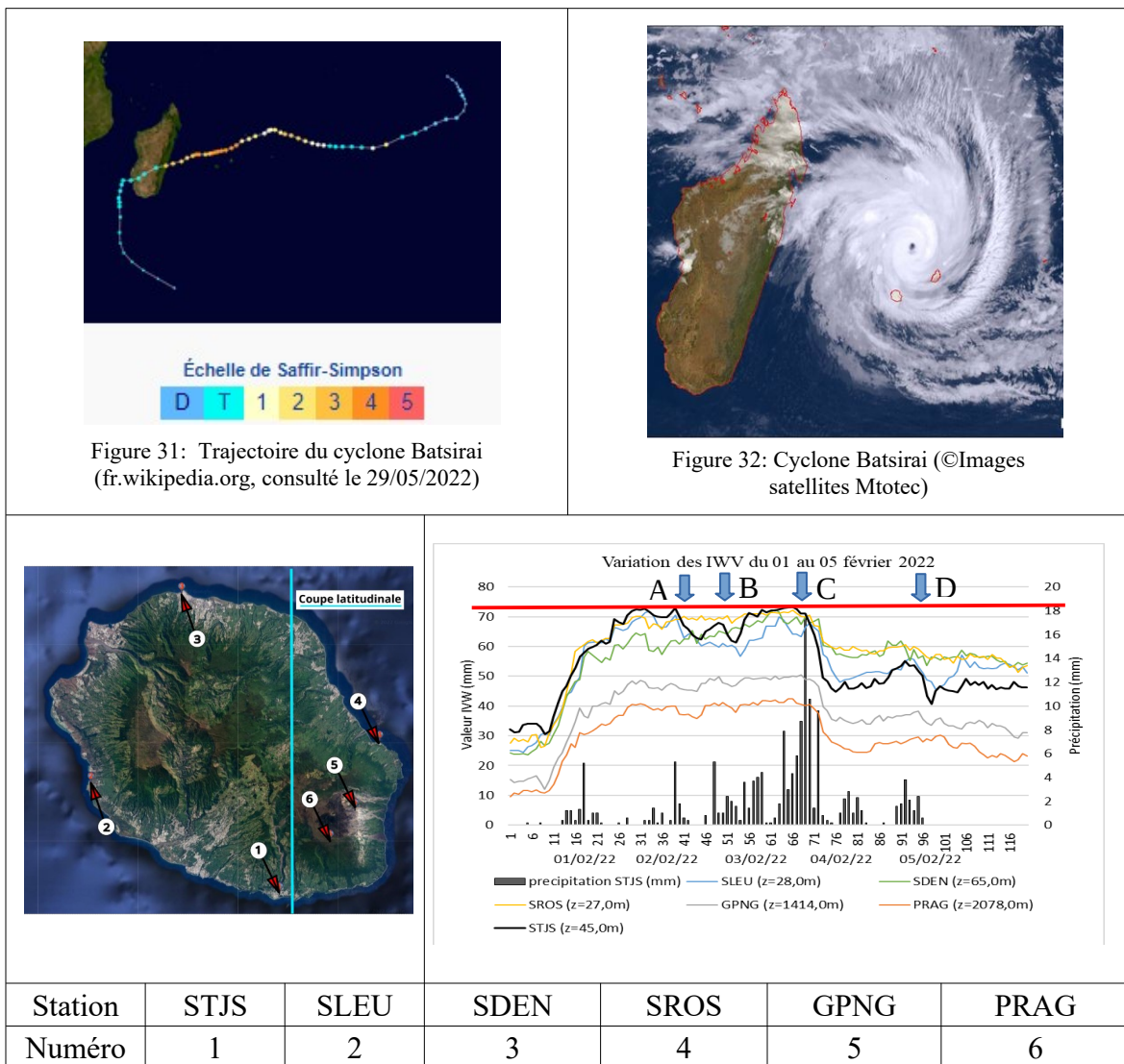


Figure 33: Position des stations GNSS, variations des IWV (ligne rouge : saturation) et précipitations mm

Le graphique de la Figure 33 représente la variation des IWV pour six stations choisies, car elles sont réparties sur l'ensemble de l'île de La Réunion et sont à des altitudes différentes. Dans un premier temps, quelle que soit la station, de fortes variations d'IWV (de 30 mm à 40 mm) sont visibles en 24h. STJS a connu une augmentation d'IWV débutant le 01 février à 10 h passant de 36,26 mm à 72,48 mm le 02 février à 7 h. Ces variations ont débuté la veille de l'arrivée du cyclone Batsirai et sont accompagnées de précipitations (graphique Figure 33). Dans un second temps, si nous comparons les variations d'IWV entre les stations, des différences sont visibles dûes aux différentes conditions météorologiques sur l'île de La Réunion. Dans le cas de la station STJS, une limite (saturation) concernant les valeurs des IWV semble se dessiner (ligne rouge), de plus, nous pouvons définir quatre points remarquables correspondant à des pics suivis d'une chute d'IWV pour STJS, accompagnée de précipitations (Tableau 4).

Points	A		B		C		D	
Heure cumulée	38h	43h	48h	52h	65h	75h	91h	103h
IWV (mm)	72,850	62,402	67.995	61,438	73,302	44,839	55,062	44,493

Tableau 4: Points remarquables IWV pour STJS, heures cumulées à partir du 01/02/2022 à 0h00

Après chaque forte augmentation de l'IWV (Tableau 4), des précipitations ont eu lieu engendrant une chute de l'IWV, précipitation et diminution de l'IWV sont liées. En effet, une augmentation de IWV est un indice concernant la mise en place de précipitations (Labbouz et al, 2013). L'analyse des IWV (Integred Water Vapour) donne accès à diverses finalités telle que la prévention des inondations associées aux événements de fortes pluies (Champollion et all, 2004).

Comme l'a démontré Harter (2020), les densités de vapeur d'eau et les températures de masse d'air sont liées. En effet, la température et la vapeur d'eau diminuent avec l'altitude. Cependant, les forts gradients topographiques présents sur La Réunion ont influencé la répartition de densité de vapeur d'eau. Par la suite, l'analyse d'un profil latitudinal (Figure 34) est effectuée, montrant la variation de la densité de vapeur d'eau (g/m^3) entre le 01 février 2022 à 1 h et le 02 février 2022 à 7 h correspondant à la variation d'IWV maximale (Figure 33). Nous pouvons constater plusieurs choses. Tout d'abord des effets de bords dus à l'extrapolation (II.I.3), ensuite, une augmentation globale non homogène de la densité de vapeur d'eau sur toute la zone. En effet, la densité de vapeur d'eau semble connaître une augmentation plus importante au Sud du massif passant

d'environ 6 g/m^3 à 19 g/m^3 contre 6 g/m^3 à 15 g/m^3 au Nord à $1\ 000 \text{ m}$ d'altitude. Enfin, une accumulation de vapeur d'eau de quelques centaines de mètres est observable à la latitude $-21,2^\circ$ au Sud du massif. À ce moment-là, Batsirai n'était plus qu'à 350 km des côtes réunionnaises, une des pistes permettant d'expliquer cette accumulation est la convergence de la vapeur d'eau due à la direction des vents. En effet la Figure 35a montre à 7 h , une intensité et une direction des vents venant majoritairement du Sud. Ces vents ont engendré sur leur passage un balayage de la vapeur d'eau avant de se retrouver bloqués par le massif, entraînant une accumulation au Sud de ce dernier. Cette accumulation entraîne la condensation de la vapeur d'eau, provoquant des précipitations (Figure 35b) comprises entre 25 et 50 mm . Le relief et les vents ont un impact sur la répartition de la densité de vapeur d'eau.

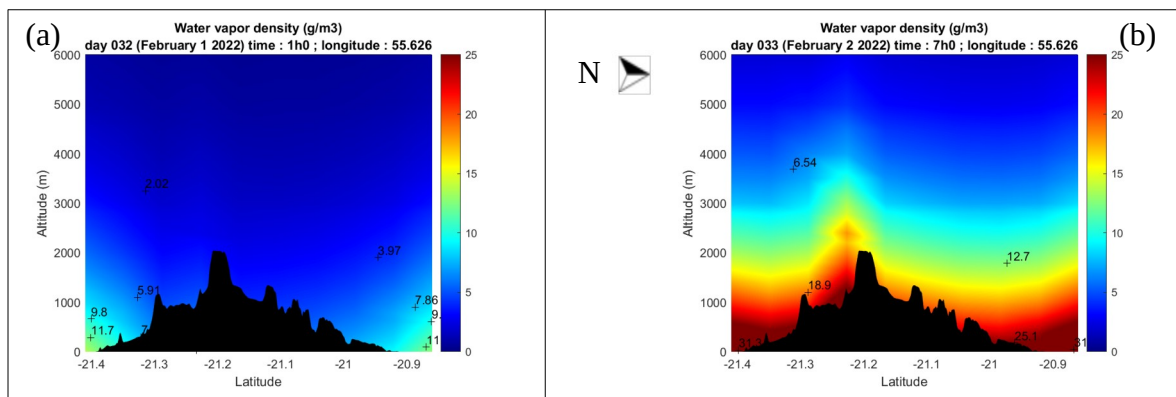


Figure 34: Évolution de la densité de vapeur d'eau, profil latitudinal au niveau de STJS, le 01/02/2022 à 1 h (a) et le 02/02/2022 à 7 h (b)

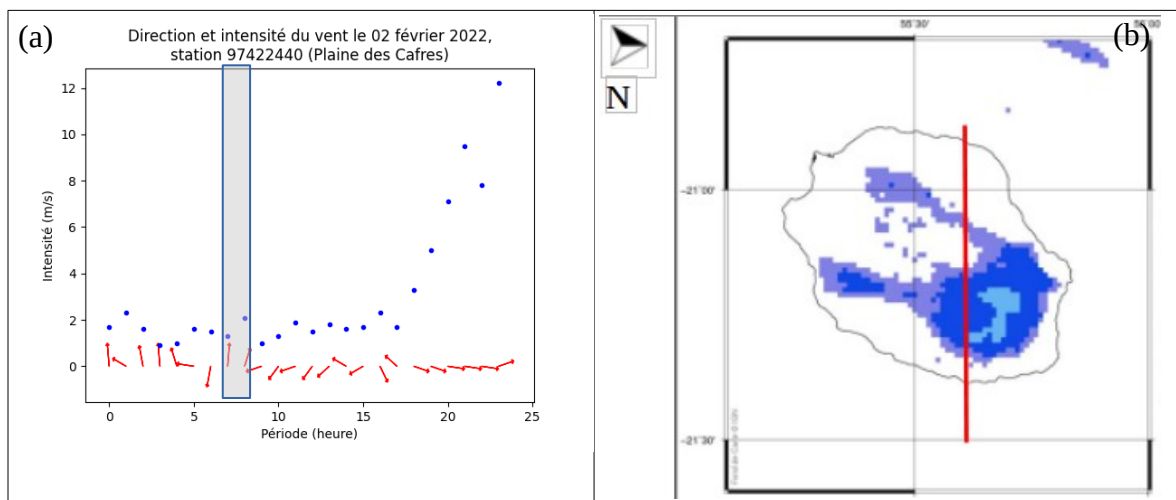


Figure 35: Orientation : flèche rouge (Nord en haut), intensité des vents (point)(a) et carte des précipitations (mm), le trait rouge faisant référence au profil Figure 34 (b) (données Météo-France)

Ainsi, les variations de densité de vapeur d'eau provoquées par le cyclone ont bien été détectées par le logiciel TSAAR. Dans la partie suivante, nous aborderons l'homogénéisation du réseau via l'OSSE (Observing System Simulation Experiments).

III.2 Première approche de l'OSSE

Les Observing System Simulation Experiments (OSSE) sont des processus permettant d'évaluer les impacts de nouvelles observations dans le cas où celles-ci ne sont pas disponibles. Le modèle OSSE permet de tester virtuellement un nouveau réseau en prenant compte les nouvelles observations avant que les instruments de mesure ne soient déployés sur le terrain. Nous allons donc pouvoir comparer le réseau actuel et ce même réseau dans lequel nous rajoutons une/des station(s) GNSS. Ces études permettent de choisir les emplacements optimaux. ([prive.ppt \(nasa.gov\)](#), consulté le 30/03/2022).

III.2.1 Présentation des fichiers d'entrée de TSAAR.

Comme développé dans la partie 1.3.3, le logiciel TSAAR nécessite des fichiers d'entrées. Les DPH, contenant les élévations, azimuts et les époques des satellites, qui sont issus du traitement GAMIT. Il y a un DPH par station et par satellite, ces fichiers sont de la forme : « DPH.[nom de la station].PRN[numéro du satellite] » (Figure 36).

Epoch	L1 cyc	L2 cyc	P1 cyc	P2 cyc	LC cyc	LG cyc	PC cyc	WL cyc	N cyc	LSV	Azimuth	Elev	PF	data_flag	L1_cycles
1	-54.08	-69.40	49.34	65.99	-0.020	-54.06	-5.30	-1.00	10.72	1	268.1208	73.8368	0	11000000000	-174.0256
2	-54.05	-69.37	50.54	67.31	0.003	-54.05	-4.85	-0.69	11.71	1	267.1677	73.8549	0	10000000000	
3	-54.04	-69.36	49.17	66.88	0.007	-54.05	-7.49	-0.91	19.30	1	266.2130	73.8690	0	10000000000	
4	-54.03	-69.35	48.09	66.65	0.021	-54.05	-9.79	-1.08	26.17	1	265.2573	73.8789	0	10000000000	
5	-54.04	-69.36	47.78	67.10	-0.002	-54.04	-11.46	-1.06	32.24	1	264.3009	73.8846	0	10000000000	
6	-54.03	-69.35	49.29	67.25	0.019	-54.05	-7.92	-0.86	21.34	1	263.3444	73.8863	0	10000000000	
7	-54.03	-69.34	47.88	66.95	0.018	-54.04	-10.91	-1.07	30.29	1	262.3883	73.8839	0	10000000000	
8	-54.02	-69.34	48.29	67.03	0.008	-54.03	-10.02	-1.00	27.62	1	261.4330	73.8773	0	10000000000	
9	-54.00	-69.33	49.30	66.37	0.054	-54.06	-6.17	-0.98	14.28	1	260.4790	73.8667	0	10000000000	

Figure 36: Exemple de fichier DPH « DPH.ALBR.PRN01 » le 01 février 2022

Le sous programme « dph2vdph », développé par M. Reverdy et modifié par L. Harter va extraire les azimuts, les élévations et les époques en réalisant une boucle sur chaque station puis sur chaque satellite en prenant en compte l'angle de coupure paramétré dans le fichier « param.EXP ». Les époques extraites seront converties en époques TSAAR et des fichiers nommés « VRAIDPH.[nom de la station].PRN[numéro du satellite] » contenant les époques, les heures, les minutes, les azimuts et les élévations sont obtenus.

En sortie du traitement GAMIT se trouvent également les fichiers met, contenant les ZHD, ZWD, ZTD, les pressions, les gradients et les températures. Il y a un fichier par station, (Figure 37) nommés « met_[nom de la station].[21][doy] », le 21 faisant référence à l'année 2021.

Yr	Doy	Hr	Mn	Sec	Total	Zen	Wet Zen	Sig Zen	PW	Sig PW (mm)	Press (hPa)	Temp (K)	ZHD (mm)	Grad NS	Sig NS	Grad EW	Sig EW (mm)
2021	100	0	0	0.	2643.70	342.80	5.60	56.69	0.93	1008.00	300.40	2300.90	-10.90	12.50	-69.60	17.50	
2021	100	1	0	0.	2648.80	346.80	3.70	57.36	0.61	1008.50	300.40	2302.00	-12.17	11.95	-65.15	16.66	
2021	100	2	0	0.	2654.70	351.50	3.50	58.13	0.58	1009.00	300.40	2303.20	-13.43	11.38	-60.70	15.78	
2021	100	3	0	0.	2640.30	335.90	3.60	55.55	0.60	1009.50	300.40	2304.40	-14.70	10.77	-56.25	14.85	

Figure 37: Exemple de fichier met « met_albr.21100 » le 01 février 2022

Le sous-programme « met_ptu2_zwd » va permettre d'extraire et de mettre en les différentes variable et de créer un fichier par variable et par station.

Le troisième fichier est le fichier sp3 contenant les orbites précises des satellites.

III.2.2 Création des différents fichiers TSAAR

La Figure 38 résume les principales étapes⁴ permettant la réalisation d'observables synthétiques. Les fichiers met ont été créés à partir des observations (température et pression) issues de Météo-France, et de MESO-NH (ZTD, ZHD, ZWD). Les DPH ont pu être calculés en connaissant la position des stations synthétiques et des orbites satellitaires, précises à 0,05 m.

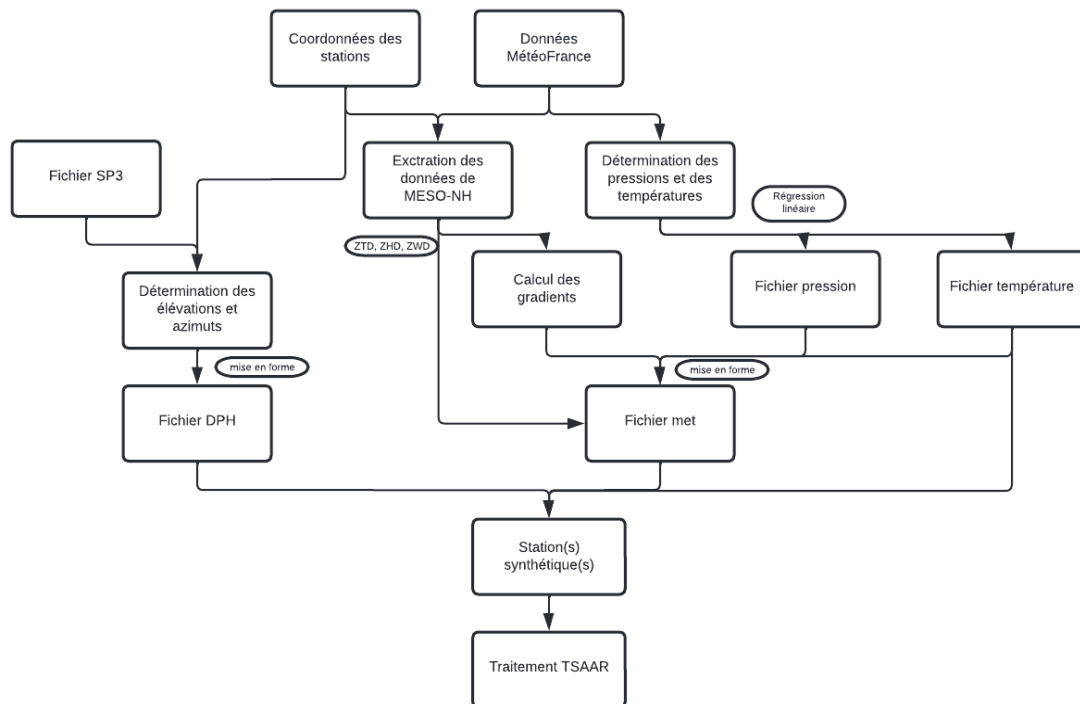


Figure 38: Étapes pour la mise en place d'un réseau synthétique

III.2.2.1 Comparaison entre les fichiers GAMIT et les fichiers calculés

Dans cette partie nous comparerons les fichiers met et DPH simulés à partir des coordonnées des stations, satellites et des données MESO-NH avec ceux fournis par GAMIT. Puis nous analyserons l'impact de chaque paramètre calculé sur les résultats issus du processus d'inversion tomographique. Dans un premier temps nous regarderons les fichiers DPH, puis dans un second temps les fichiers met et enfin les déterminations de gradients. Pour ce faire, nous utilisons un réseau de six stations synthétiques (Figure 43 (ronds bleus)) créées au même endroit que les stations initiales.

⁴Annexe 4

Concernant les DPH, nous remarquons que les écarts-types sont faibles (0.17° pour les élévations et 0.40° pour les azimuts, Tableau 5), ce qui indique une bonne cohérence dans les résultats. Néanmoins, les écarts moyens, fonctions des satellites suivent les mêmes variations (Figure 39) et ce quelle que soit la station. Ils sont sans

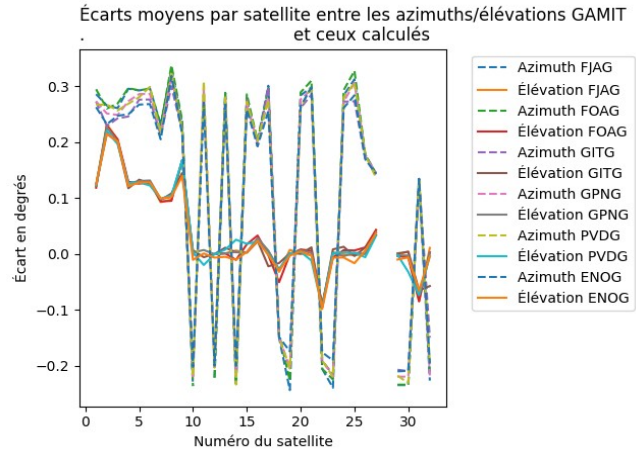


Figure 39: Différences entre les azimuts/élévations de GAMIT et ceux synthétique. Position des stations : Figure 40a.

doute liés aux différentes formules utilisées (GAMIT et celles que nous utilisons) dans la détermination des azimuts et des élévations. Ces écarts ont engendré des différences lors de l'inversion tomographique de la zone étudiée (Tableau 5) car les SIWV ne suivent plus les mêmes trajets donc les rais ne traversent potentiellement plus les mêmes voxels : certaines informations changent.

De la même manière, la Figure 40b indique les écarts entre les fichiers met issus de GAMIT et ceux simulés. Les ZWD issus de GAMIT (utilisés par le logiciel TSAAR) sont surestimés (en moyenne de 28.56 mm (20%)) par rapport à ceux de MESO-NH, ce qui est cohérent avec les résultats développés dans la partie II.2. Les écarts sont plus ou moins importants selon la station considérée et sont hétérogènes au cours du temps au sein d'une même station. Par exemple dans le cas de GITG, nous avons des différences de ZWD allant de 10 mm (à 18 h) à 100 mm (à 14 h) (Figure 40b). Les variations de ZWD vont modifier les résultats de l'inversion tomographique avec un écart moyen de $2,23 \text{ g/m}^3$ et un écart-type de $2,31 \text{ g/m}^3$ (Tableau 5).

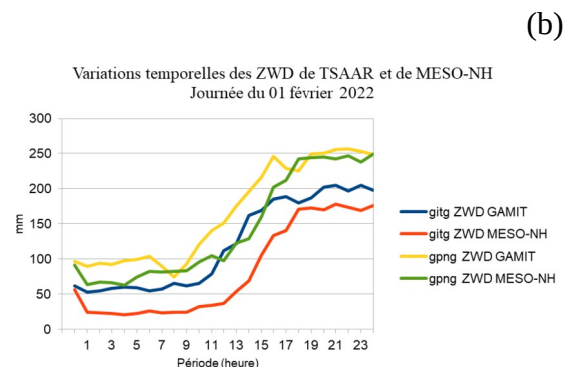
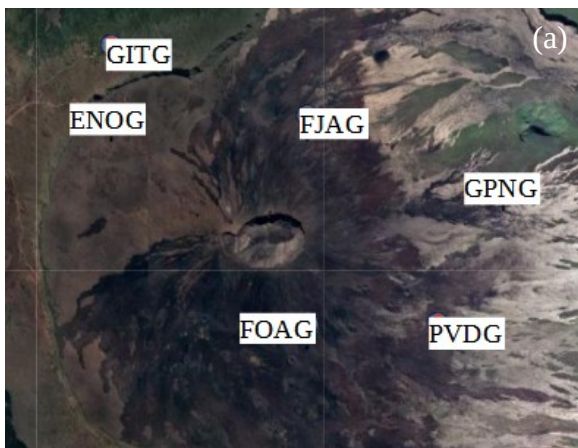


Figure 40: Position des différentes stations sur la zone du Piton de la Fournaise (a) et différence des ZWD de MESO-NH et des ZWD de GAMIT (b)

Concernant la détermination des gradients (Figure 41), toutes les stations avaient des écarts entre les valeurs issues de GAMIT et celles déterminées via MESO-NH. Parmi toutes les stations, un cas extrême est observable sur la station GITG à 18 h où le gradient Est-Ouest déterminé par GAMIT vaut 0,10 mm alors que celui calculé à partir de MESO-

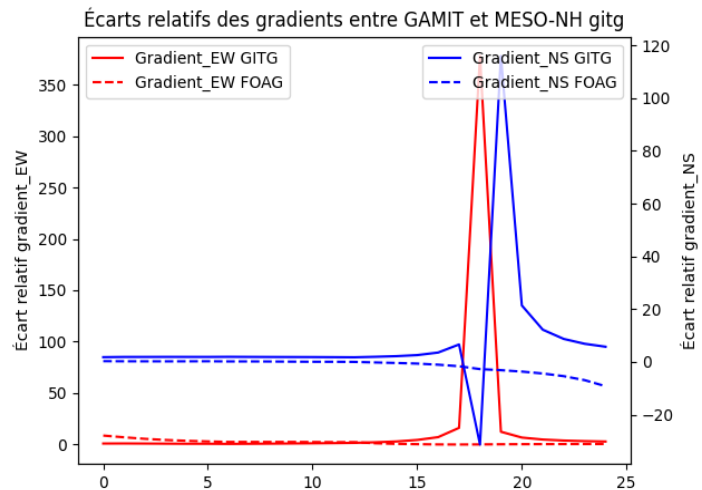


Figure 41: Écarts entre les gradients de GAMIT et ceux calculés depuis MESO-NH

NH vaut 37,67 mm, il est 375,70 fois supérieurs. De plus, les écarts-types moyens sont élevés, nous avons donc une hétérogénéité, certains gradients ont des déterminations cohérentes et d'autres non. Ces écarts sont dus aux méthodes de détermination. Pour GAMIT, les gradients correspondent aux aberrations lors des déterminations des ZTD. De notre côté, nous réalisons un « calcul direct » via MESO-NH dont les valeurs ont été lissées et sont prévisionnelles.

DPH	Écart maximal (degrés)		Écart moyen (degrés)	Écart-type moyen (degrés)
Élévation	1,41		0,04	0,17
Azimut	3,42		0,11	0,40
	Écart maximal (g/m ³)	Écart maximal relatif	Écart moyen (g/m ³)	Écart -type moyen (g/m ³)
Inversion tomographique	2,63	0,22	0,07	0,19
MET	Écart maximal (g/m ³)	Écart maximal relatif	Écart moyen (g/m ³)	Écart -type moyen (g/m ³)
Inversion tomographique	21,458	0,69	2,23	2,31
Gradient	Écart maximal (mm)	Écart maximal relatif	Écart moyen (mm)	Écart -type moyen (mm)
Gradient Nord- Sud	67,13	115,98	38,42	15,70
Gradient Est- Ouest	63,26	375,70	28,70	13,66

Tableau 5: Bilan des écarts. L'inversion tomographique représentant la densité de vapeur d'eau (g/m³)

Pour conclure, des écarts importants ont été obtenus. Ces écarts vont influencer de manière non négligeable sur le processus d'inversion tomographique et donc sur les résultats finaux. Ces écarts sont principalement dus aux méthodes de calculs qui diffèrent ainsi qu'au caractère prévisionnel de MESO-NH.

III.2.3 Validation du processus de mise en place

Les objectifs de cette partie sont multiples. Dans un premier temps, valider le processus de création de l'atmosphère synthétique via MESO-NH permettant la mise en place nos stations simulées. Dans un second temps, déterminer si les écarts ont pour origine le traitement ou si ils sont dus aux fichiers initiaux (input du logiciel TSAAR).

III.2.3.1 Simulation des IWV de MESO-NH

Dans cette partie nous avons essayé de retrouver les IWV de MESO-NH à partir des données MESO-NH traitées dans le logiciel TSAAR. Le réseau utilisé correspond à R3 (III.2.4, Figure 48). La discrétisation 100*100 de TSAAR est ramenée à une discrétisation 4*4 pour être cohérent avec les résultats issus du modèle MESO-NH. Les IWV obtenus par MESO-NH et ceux obtenus à partir du logiciel TSAAR sont comparés.

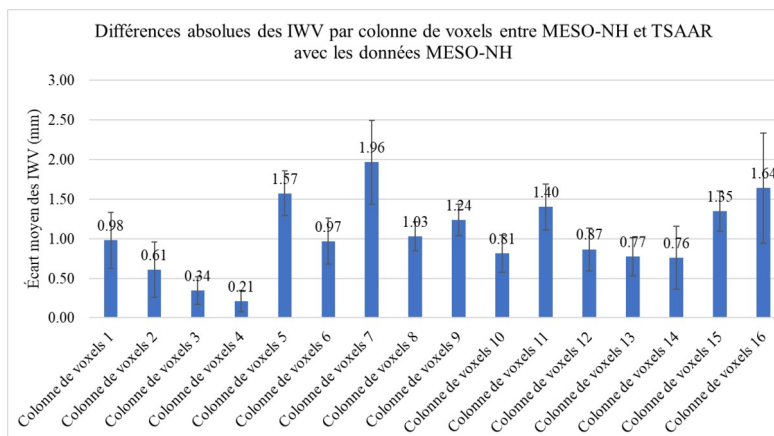


Figure 42: Écarts absolus des IWV MESO-NH et des IWV MESO-NH simulés par TSAAR

Il y a un écart maximal sur la colonne de voxels 7, avec une valeur de 1,96 mm et un écart-type de 0,52 mm. L'écart minimal est sur la colonne de voxels 4, avec une valeur de 0,21 mm et un écart-type de 0,13 mm. Sur l'ensemble des voxels, il y a

un écart total moyen de 1,03 mm (4 %) et un écart-type total 0,37 mm (Figure 42).

Les écarts peuvent avoir plusieurs origines comme les incertitudes liées au modèle MESO-NH, les pressions et températures qui n'ont pas pu être déterminées précisément à cause de la résolution de MESO-NH. Le fait que les résultats d'IWV obtenus entre les deux modèles soient proches et cohérents (1,03 mm) indique que le processus de mise en place de l'atmosphère synthétique fonctionne. Mais ces écarts sont-ils dus au processus d'inversion tomographique ou aux fichiers en input du logiciel TSAAR lors de l'OSSE ?

III.2.3.2 Simulation complète du réseau existant

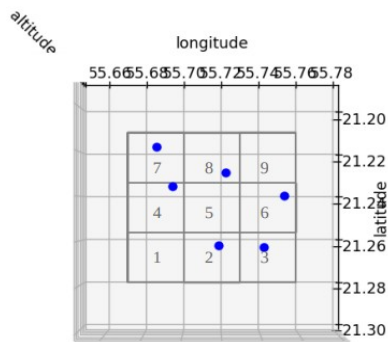


Figure 43: Réseau étudié

La simulation entière du réseau (Figure 43) a été effectuée afin de comparer les résultats issus des stations synthétiques (MESO-NH) (R1) avec les résultats issus de GAMIT (R2). Une discrétisation 3*3 a été utilisée. Les colonnes de voxels 1 et 9 n'ont pas été incluses dans la comparaison car elles correspondaient à des zones en dehors du polygone d'interpolation.

III.2.3.2.1 Validation du processus de création de l'atmosphère synthétique

Pour cette partie, des comparaisons ont été faites entre les IWV avant et après le processus d'inversion tomographique entre R1 et R2. La Figure 44 représente les écarts relatifs entre les IWV entre R1 et R2, issus du pré-traitement, calculés à partir des ZWD, dans les colonnes de voxels contenant une station avant de subir le processus d'inversion tomographique. Le chiffre au niveau de la légende correspond au numéro de la colonne de voxels possédant la station. La Figure 45 représente les écarts relatifs entre R1 et R2 des IWV, issus du post-traitement, après l'inversion tomographique, calculés en intégrant les densités de vapeur d'eau au niveau de chaque colonne de voxels.

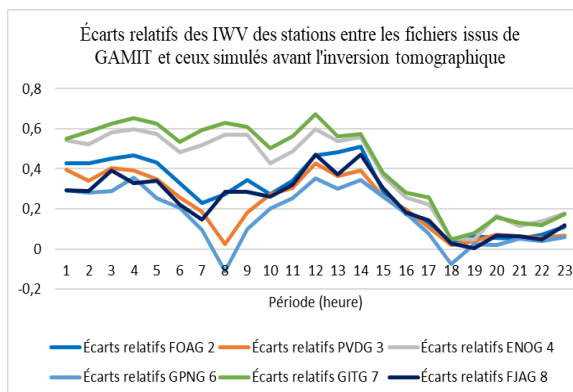


Figure 44: Écarts relatifs des IWV (mm) avant le processus d'inversion tomographique

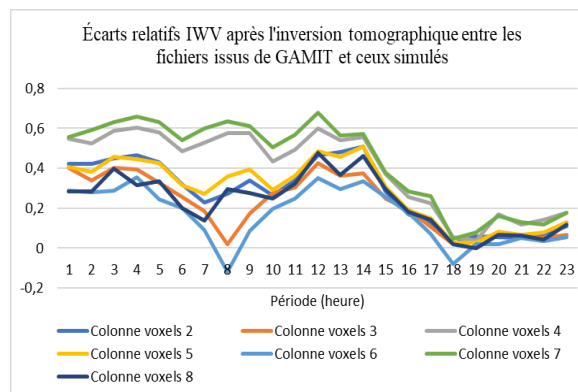


Figure 45: Écarts relatifs des IWV (mm) après le processus d'inversion tomographique

Dans les deux cas, les écarts relatifs présents avant et après le processus d'inversion tomographique sont retranscrits avec de légères différences (0.02 d'écart relatif en moyenne). Ces écarts peuvent être dus à l'incertitude lors des reprojctions (I.3.1.2). Ce n'est donc pas l'inversion tomographique qui engendre les erreurs mais uniquement les valeurs renseignées dans les fichiers d'entrées. La mise en place des observables synthétiques a réussi.

III.2.3.2.2 Analyses des profils verticaux

Visuellement, trois points sont remarquables (Figures 44 et 45). Le premier à 8 h où deux colonnes de voxels (3 et 6) ont des écarts relatifs faibles (0.02 et -0.10). Pour la colonne de voxels 6, les IWV (Integred Water Vapour) synthétiques sont supérieurs à ceux de GAMIT, créant une hétérogénéité au sein de la zone. À 14 h, où l'écart relatif moyen était maximum (0,47). Et enfin à 18 h, où l'écart relatif moyen était minimum (0,02). Les plus grands écarts sont dans les colonnes de voxels 4 et 7 (moyenne des écarts relatifs : 0.40 et 0.43). L'IWV étant corrélé avec la quantité en vapeur d'eau, ces variations engendrent des écarts sur la restitution du champ 3-D de vapeur d'eau.

Globalement, en traçant une droite d'iso-densité de vapeur d'eau (droite verte, Figure 46), dans la colonne de voxels 6 que ce soit à 8 h ou à 18 h, la densité de vapeur d'eau a été surestimée avec l'atmosphère synthétique. Pour la colonne de voxels 4, à 8 h et à 18 h, les stations issues du traitement GAMIT ont engendré une restitution de densité de vapeur d'eau plus élevée (Figures 46 et 47). De ce fait, l'atmosphère synthétique a entraîné un appauvrissement de la densité de vapeur d'eau .

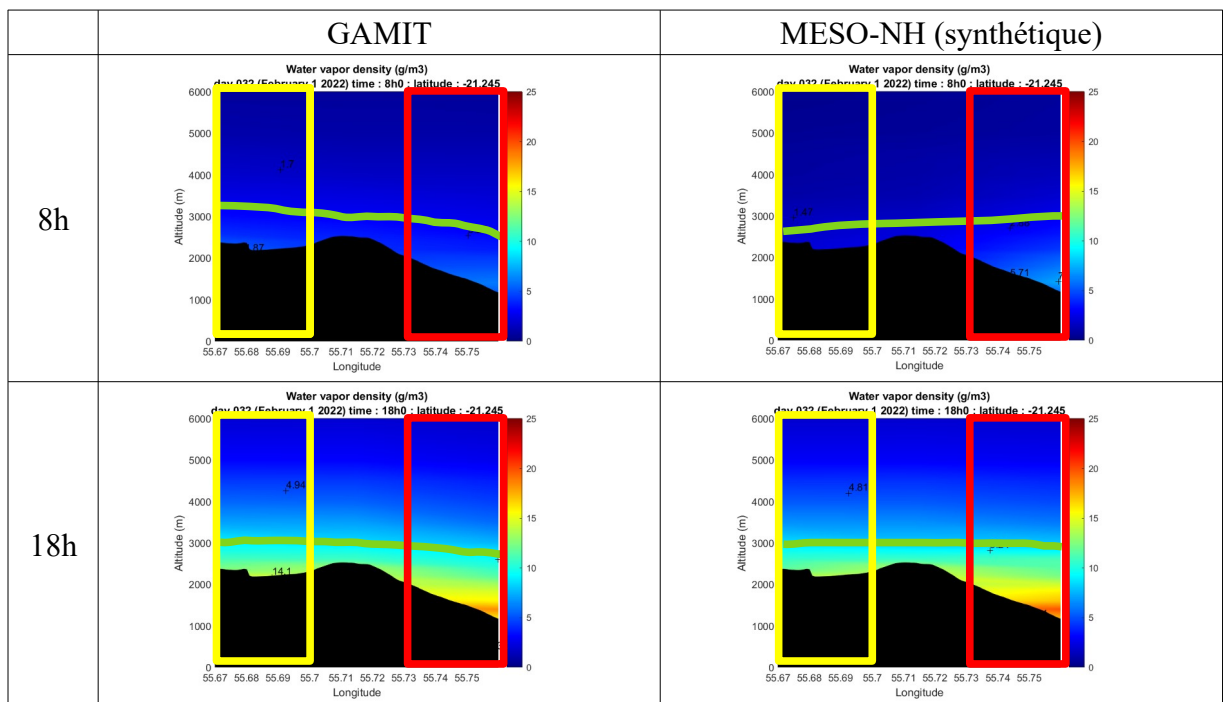


Figure 46: Profils verticaux de la densité de vapeur d'eau à 8 h et 18 h, le 01 février 2022, le rectangle jaune est la colonne de voxels 4 et le rouge, la colonne de voxels 6 et la ligne verte : une courbe d'iso-densité de vapeur d'eau

De plus, en étudiant l'allure générale des profils verticaux dans les colonnes de voxels 4 et 6, (Figure 47), ces dernières suivent globalement les mêmes variations de densité de vapeur d'eau, exceptée pour la colonne de voxels 4 à 8 h où les écarts sont plus

importants ($2,83 \text{ g/m}^3$ en moyenne). Ensuite, concernant la colonne de voxels 6 à 18 h, à l'altitude 3 200 m, une variation ($1,02 \text{ g/m}^3$) a eu lieu (non présente dans les résultats issus de GAMIT).

Ainsi, malgré le biais moyen de 0.30 g/m^3 issu des fichiers en entrée du logiciel TSAAR, la distribution de la densité de vapeur d'eau est globalement la même entre le réseau synthétique et le réseau issu des données GAMIT.

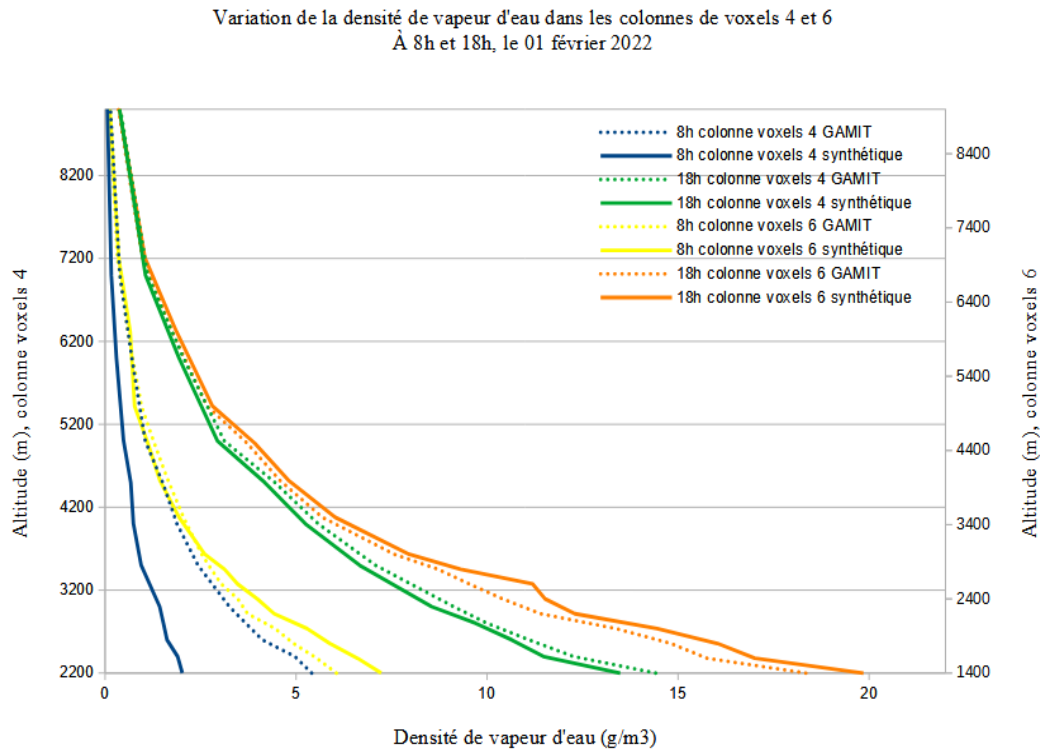


Figure 47: Profils verticaux de la densité de vapeur d'eau à 8h et 18h

La Figure 40b a permis de mettre en avant la sous-estimation des ZWD de MESO-NH. Il existe une relation entre ZWD et IWV (Équation 11), de même entre les IWV et les SIWV et également entre les SIWV et la quantité de vapeur d'eau. Ainsi, les variations des IWV (Figures 44 et 45) engendrent des variations dans les résultats de l'inversion tomographique et de ce fait dans la détermination du champ de densité de vapeur d'eau. Les fortes variations ont principalement eu lieu dans les basses couches d'altitudes (Figure 47) car elles contiennent la majeure partie de la densité de vapeur d'eau. De plus, dans cette partie l'écart relatif moyen minimum est à 18 h (0,02), correspondant à l'écart minimal entre les ZWD de GAMIT et ceux de MESO-NH (environ 10 mm, Figure 40b). De la même manière, l'écart relatif moyen maximal est 14 h (0,47), correspondant à l'écart maximal entre les ZWD (environ 100 mm, Figure 40b). Ce qui est cohérent dans les deux cas.

Pour conclure cette partie, notre processus de mise en place de l'atmosphère synthétique fonctionne car nous arrivons à restituer les IWV du modèle MESO-NH. De plus, les écarts engendrés sont uniquement dus aux valeurs dans les fichiers en input. Enfin cela appuie le fait que nos calculs de gradients, élévation, azimuts sont cohérents car leur utilisation n'ajoute pas d'écart sur l'inversion tomographique.

III.2.4 Étude approfondie de la géométrie du réseau

Dans cette partie, différentes géométries du réseau (Figure 48) sont étudiées afin de voir précisément l'impact des positions des stations au sein des voxels. Une discrétisation 3*3 est utilisée. Tous les réseaux sont simulés.

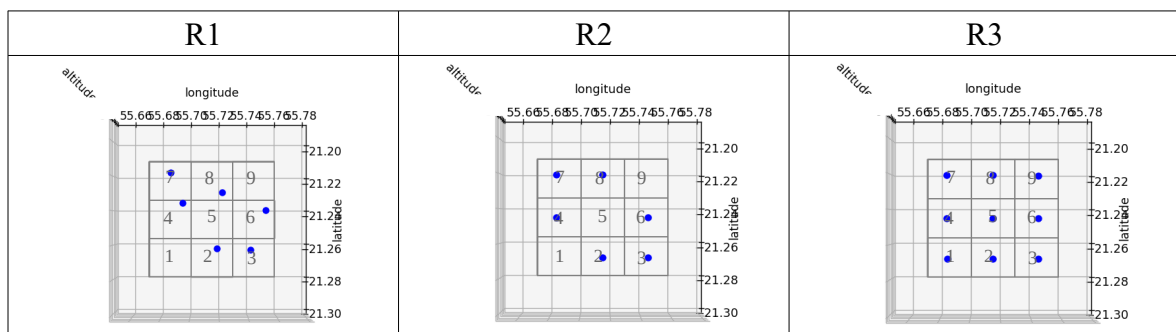


Figure 48: Réseaux synthétiques étudiés, R1 servant de référence

Pour R2, les stations synthétiques sont situées dans les mêmes voxels que le réseau d'origine (R1), mais centrées. Pour R3, une station synthétique au centre de chaque voxel est créée. La Figure 49 représente les écarts entre R1 et R2 puis entre R1 et R3.

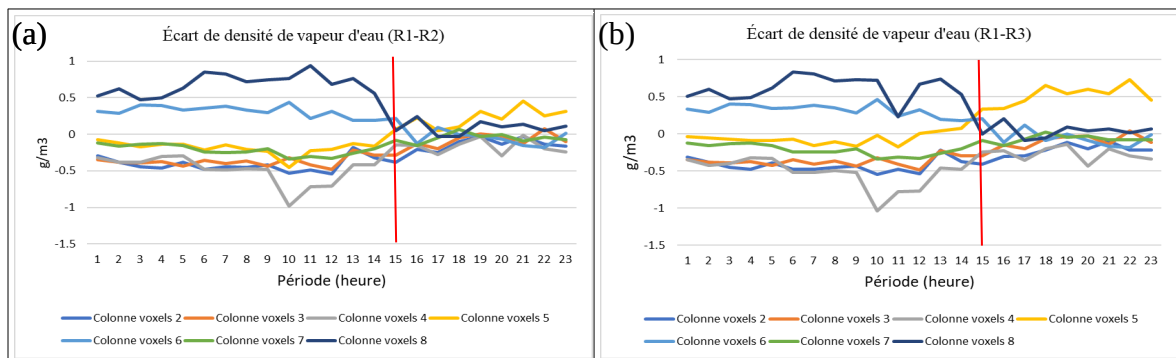


Figure 49: Écart R1-R2 (a) et R1-R3 (b) de densité de vapeur d'eau, le 01 février 2022

Tout d'abord, concernant les deux comparaisons, pour les colonnes de voxels contenant des stations, les écarts obtenus sont faibles, avec un maximum de $0,93 \text{ g/m}^3$ à 11 h pour R1-R2 pour la colonne de voxels 8 (22%, Figure 49) et de $-1,06 \text{ g/m}^3$ à 10h pour R1-R3 dans la colonne de voxels 4 (25 %, Figure 49). De plus, deux parties sont visibles sur les graphiques, avant et après 15 h (Tableau 6). La première ayant des écarts plus

importants que la seconde. Pour R1-R2, il y a une moyenne d'écarts absolus de 0,37 g/m³ contre 0,12 g/m³ pour la seconde partie. Pour R1-R3, il y a une moyenne d'écarts absolus de 0,36 g/m³ contre 0,20 g/m³ pour la seconde partie.

À 15 h, les valeurs de ZWD sont hautes (Figure 40b), donc les IWV aussi. De plus, l'étude des prévisions de MESO-NH sur cette journée a permis de mettre en avant la présence de précipitations dès 15 h⁵ permettant de justifier ces parties. En effet, les précipitations sont issues de la saturation en quantité de vapeur d'eau (IWV élevés) engendrant alors une homogénéisation (car saturation) et diminuant les écarts des données au sein du modèle MESO-NH.

		Partie 1 (01h-14h)	Partie 2 (15h-00h)
Moyenne des écarts absolus (g/m ³)	R1-R2	0,37	0,12
	R1-R3	0,36	0,20
Moyenne des écarts-types (g/m ³)	R1-R2	0,19	0,09
	R1-R3	0,20	0,17

Tableau 6: Moyenne des écarts absolus de la densité de vapeur d'eau (R1-R2 et R1-R3)

De plus, les colonnes de voxels 1, 5 et 9 pour R1-R3 ont les écarts les plus importants (Figure 49). En effet, pour R1 et R2, les colonnes de voxels 1 et 9 étaient extrapolées, donc non fiables. Pour R3 de l'information a été ajoutée (augmentation du nombre de SIWV), ces colonnes (1 et 9) ont donc été intégrées dans le polygone d'interpolation, passant alors de données extrapolées à données interpolées. Pour la colonne de voxels 5, l'ajout d'une station a contraint la colonne de voxels, expliquant les

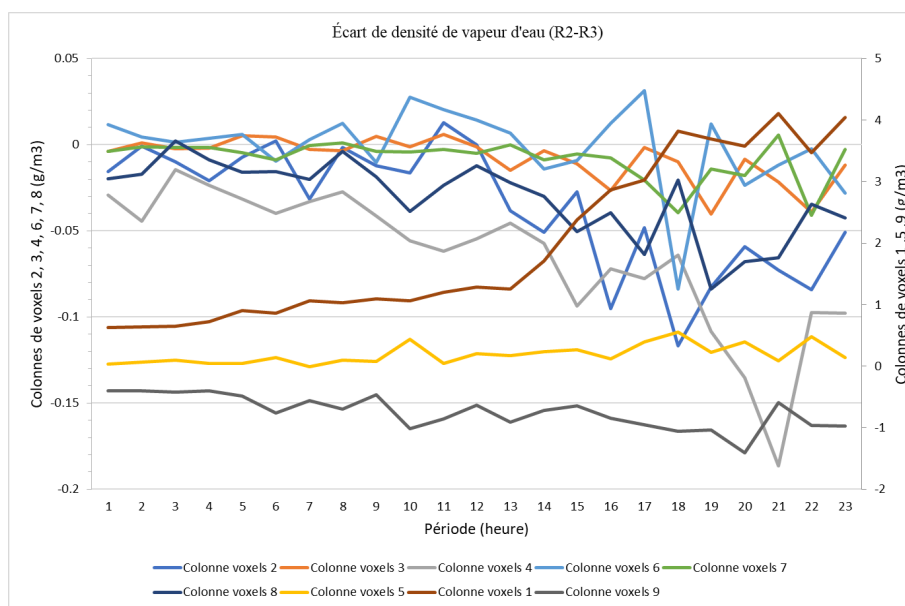


Figure 50: Écart absolu R2-R3

variations visibles.

En comparant R2-R3 (Figure 50), l'ajout de stations dans les colonnes de voxels 1, 5 et 9 a permis d'ajouter indirectement de l'information dans les autres colonnes de voxels, faisant

⁵Annexe 5

varier plus fortement leurs valeurs et contraignant le réseau R3 avec un écart absolu moyen $0,96 \text{ g/m}^3$, contre $0,02 \text{ g/m}^3$ pour les autres colonnes de voxels. De la même manière les écarts-types sont plus élevés pour les colonnes de voxels 1, 5 et 9 ($0,57 \text{ g/m}^3$ en moyenne, indiquant des résultats plus hétérogènes, contre $0,02 \text{ g/m}^3$ pour les autres colonnes).

Enfin, une analyse des profils verticaux est faite⁶. Pour la colonne de voxels 1, il y a une surestimation de la densité de vapeur d'eau pour R1 et R2 car la colonne de voxels 1 se situe dans la zone extrapolée et la répartition de densité de vapeur d'eau va suivre la répartition standard. Pour R3, la colonne de voxels 1 est dans le polygone d'interpolation et est plus représentative de la réalité.

Pour la colonne de voxels 5, R1 et R2 ne possèdent pas de station dans le voxel sol 5 contrairement à R3. Néanmoins, les écarts sur la répartition de densité de d'eau sont faibles pour ces trois réseaux car nous nous situons dans le polygone d'interpolation. Le fait que les résultats de R3 pour la colonne de voxels 5 coïncident avec R1 et R2, appuient que l'inversion tomographique dans le polygone d'interpolation est fiable.

Pour la colonne de voxels 7, les résultats sont proches car cette colonne de voxels possède une station au sol et se trouve dans le polygone d'interpolation pour les trois réseaux.

Pour conclure, la position au sein des voxels n'a pas d'importance dans une zone à faible relief.

III.2.4.1 Réseaux sans polygone d'interpolation

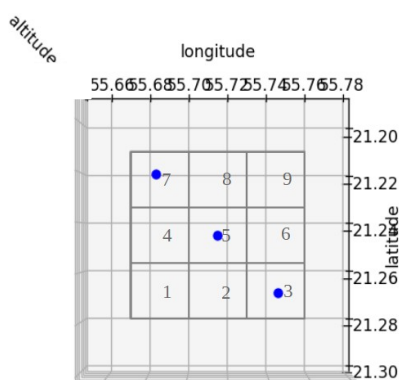


Figure 51: Réseau étudié

Dans cette partie, nous étudions le réseau (R1) Figure 51, avec une discrétisation $3 \times 3 \times 23$, dont les stations GNSS sont placées sur la diagonale ce qui ne crée pas de polygone d'interpolation. Nous comparons les résultats avec R3 (III.2.4). R1 et R3 sont simulés à partir des données Météo-France et MESO-NH.

La Figure 52 montre les écarts absolus au cours du temps. Les écarts sont minimales ($0,04 \text{ g/m}^3$ en moyenne) dans les colonnes de voxels 3, 5 et 7 car ces voxels possèdent des stations GNSS pour les deux réseaux. Pour les colonnes de voxels 2, 4, 6, et 8, les écarts sont moins importants ($0,59 \text{ g/m}^3$ en moyenne) que les colonnes de voxels 1 et 9 car elles sont

⁶Annexe 6

contiguës aux colonnes 3, 5 et 7. Les écarts sont maximums (1,60 g/m³ en moyenne) pour les colonnes 1 et 9, les plus éloignées des colonnes de voxels 3, 5 et 7. De la même manière, les écarts-types sont plus importants pour les colonnes de voxels 1 et 9 et minimales pour les colonnes de voxels 3, 5 et 7, montrant d'un coté une hétérogénéité et d'un autre une homogénéité des résultats.

	Colonnes 3, 5 et 7	Colonnes 2, 4, 6 et 8	Colonnes 1 et 9
Écart moyen (g/m ³)	0,04	0,59	1,60
Écart-type (g/m ³)	0,03	0,37	0,91

Tableau 7: Moyenne des écarts de la densité de vapeur d'eau

Pour conclure, dans le cas où le réseau ne possède pas de polygone d'interpolation, seules

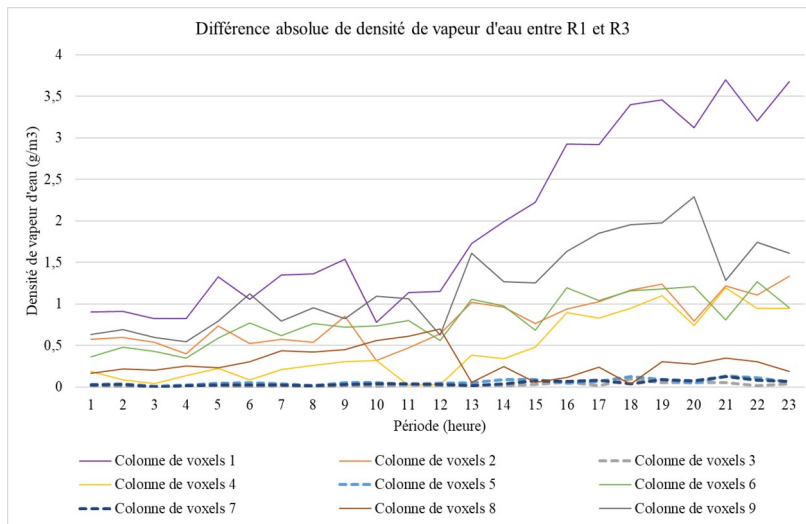


Figure 52: Écarts absolus de la densité de vapeur d'eau entre R1 et R3

les colonnes de voxels ayant une station GNSS au niveau de leur voxel sol ont une inversion tomographique fiable et exploitable. En dehors, les effets de bords ont lieu avec des écarts augmentant avec la distance.

Conclusion

Dans la suite des travaux réalisés par Ludovic Harter, Olivier Le Coz, Raphaël Longechamp et Damien Berges, ce TFE a tout d'abord permis d'étendre l'emprise de l'inversion tomographique sur toute l'île de La Réunion (adaptation du MNT et des données en input du logiciel TSAAR). Ce TFE a également permis de comprendre l'effet du réseau GNSS réunionnais sur la restitution du champ de vapeur d'eau 3-D, de réaliser une comparaison avec un modèle météorologique et de mettre en place une première approche OSSE.

De manière générale, la discrétisation horizontale doit être adaptée au réseau pour limiter les effets de sous et surdétermination. Verticalement, l'anomalie engendrée par l'éruption volcanique est retranscrite. De plus, le paramétrage dépend du résultat et de la résolution souhaitée en adaptant le pas de la grille. Néanmoins, une discrétisation trop faible entraînera un lissage des résultats. Notons que plus le nombre de voxels augmente, plus le temps de traitement TSAAR augmentera, un juste milieu est donc à trouver et à adapter selon la zone d'étude et la finalité attendue.

L'étude de la géométrie du réseau a permis d'explicitier des effets de bord dus au manque de stations. L'ensemble des stations forme un polygone d'interpolation représentant la zone où l'inversion tomographique est « fiable ». La distance moyenne séparant les stations GNSS doit être égale à la taille des voxels (Reverdy, 2008). De plus, la zone doit posséder suffisamment de stations GNSS, dans le cas contraire, des stations périphériques choisissent judicieusement peuvent compléter le réseau étudié. Ensuite, une station par voxel suffit, dans le cas où la zone étudiée possède de forts gradients topographiques, la station choisie au sein du voxel doit représenter la zone la mieux possible.

Le modèle MESO-NH aura tendance à sous-estimer les IWV et donc la densité de vapeur d'eau, ce modèle appuie la présence du polygone d'interpolation. Le caractère prévisionnel crée des écarts, variant entre 1,99 mm et 12,1 mm, entre MESO-NH et le logiciel TSAAR.

L'analyse du cyclone Batsirai nous confirme que le relief, mais aussi que les vents impactent sur la répartition de la densité de vapeur et qu'ils sont à prendre en compte. Avoir un réseau de stations GNSS suffisamment dense est donc essentiel de manière à

refléter la réalité. De plus, une forte augmentation d'IWV indique la mise en place de précipitations.

Enfin, le processus de mise en place de stations synthétiques fonctionne. Les écarts sont dus aux valeurs complétées dans les fichiers en input du logiciel TSAAR. L'étude approfondie de la géométrie a permis de conclure que la position de la station GNSS, au sein du voxel n'a peu d'influence sur une zone avec un faible gradient topographique, néanmoins une étude approfondie pour déterminer une limite précise au sein d'un même voxel est à faire.

En termes de perspectives, il faudrait comparer le logiciel TSAAR avec un modèle météorologique de ré-analyse sur une journée lambda, sans cyclone. De plus, quel que soit le réseau étudié, il faudrait une station GNSS par colonne de voxel, l'ajout de cette station GNSS peut être physique ou synthétique. Dans le cas d'un ajout physique, les stations GNSS pourraient être permanentes ou temporaires, l'idéal serait un « produit low-cost » permettant un déploiement rapide en fonction des études réalisées et de la zone étudiée. Cette approche permettrait la mise en place d'un réseau adapté à chaque zone, rapidement, une étude OSSE pourrait être réalisée au préalable pour définir le réseau optimal. Dans le cas des stations GNSS synthétiques, il faudrait utiliser un modèle de ré-analyse reflétant la réalité ce qui réduirait les biais de la Figure 48 et permettrait d'adapter le réseau à la zone étudiée à moindre coût (sans déploiement de stations GNSS physiques).

Enfin, au cours des différents TFE, le logiciel TSAAR a subi de nombreuses modifications qui ne sont pas toutes indiquées, il faudrait reprendre le logiciel de A à Z. Cette reprise permettrait l'optimisation du logiciel TSAAR et la détermination des précisions des résultats.

Bibliographie

- Berges D. Analyse spatio-temporelle de la vapeur d'eau dans la troposphère par GNSS par tomographie, ESGT, 2019, 70.
- Bevis M., Businger S., Herring T., GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, Revue : Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, N°97
- Brenot H., Wautelet G., Warnant R., Neméghaire J., Van Roozendaal M., GNSS meteorology and impact on NRT position, 2008
- Hugues B., Witold R., Michal K. & all, Cross-validation of GPS tomography models and methodological improvements using CORS network, 2018, 42
- Champollion C., Masson F., Van Baelen J. & all, GPS monitoring of the tropospheric water vapor distribution and the variation during the 9 september 2002 torrential precipitation episode in the Cevennes (southern France), Journal of geophysical research, 2004, 37.
- Champollion C., Quantification de la vapeur d'eau troposphérique par GPS, (modèle 2D et tomographie GPS) – Application aux précipitations intenses, Géophysique, Université Montpellier II, 2005, 228.
- Chen G., Herring A., Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data, 1997.
- Di Muro A., *PITON DE LA FOURNAISE*, Encyclopædia Universalis, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/piton-de-la-fournaise/> (Consulté le 21/06/2022).
- Ding N., Xiangrong Y., Shubi Z. & all, *Node-Based Optimization of GNSS Tomography with a Minimum Bounding Box Algorithm*, [en ligne], Remote Sensing, 2020. Disponible sur : <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/17/2744/htm>. (Consulté le 25/03/2022).
- Comment prévoir la trajectoire et la puissance des ouragans ?, FranceInfo,[en ligne]. Disponible sur : https://www.francetvinfo.fr/meteo/cyclone-ouragan/ouragan-maria/cyclones-comment-prevoir-la-trajectoire-et-la-puissance-des-ouragans_2378459.html. (Consulté le 25/05/2022).
- Freeman H. Shapira R., *Determining the minimum-area encasing rectangle for an arbitrary closed curve*, [en ligne], ACM, 1975.
- Fund F., Morel L., Mocquet A., *Modélisation des retards troposphériques pour les observations GPS et impact sur l'estimation de la hauteur ellipsoïdale*. [en ligne], Revue XYZ, 2010, N°123. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/281474710_Modelisation_des_retards_tropospheriques_pour_les_observations_GPS_et_impacts_sur_l'estimation_de_la_hauteur_ellipsoïdale. (Consulté le 12/03/2022).
- Goinard N., *Cyclone Batsirai à La Réunion*, [en ligne], leparisien, 2022. Disponible sur : <https://www.leparisien.fr/meteo/cyclone-batsirai-a-la-reunion-une-nuit-apocalyptique-avant-la-leevee-de-lalerte-rouge-04-02-2022-XS6LWGDJBEINJNSNUIE7RI2UE.php>

- Harter L. Resitution of a three-dimensional water vapor field by GNSS tomography over the Piton de la Fournaise area, Reunion Island, Msc Geoscience, ENS PSL, 2021.
- Labbouz, L. Interactions entre le champ de vapeur d'eau et les systèmes précipitants, Sciences de la Terre, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2013
- LACy, *Cyclade*. Disponible sur : <https://lacy.univ-reunion.fr/production/outils-numeriques/cyclade/> (Consulté le 29/06/2022)
- Leick A, 2004, GPS Satellite Surveying, John Wiley & Sons, 435
- Le Coz O. Tomographie troposphérique par réseau GNSS dense sur le site du Mans. Mise en œuvre et premières analyses, ESGT, 2015, 96.
- Legrand F. Informatique Appliquée aux Sciences Physiques, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.f-legrand.fr/>. (Consulté le 30/03/2022).
- Longechamp R. Optimisation, validation du logiciel TSAAR et densification du réseau pour l'étude de la troposphère par tomographie, ESGT, 2017, 62.
- Météo-France, Météo contact, [en ligne]. Disponible sur : <https://meteocontact.fr>. (Consulté le 01/06/2022).
- Montibert C. Étude globale des gradients troposphériques déterminés par GNSS et développement d'une chaîne de traitement pour la tomographie 3-D, ESGT, 2014, 53.
- NASA, [en ligne]. Disponible sur : https://gmao.gsfc.nasa.gov/events/adjoint_workshop-9/presentations/Prive.pdf. (Consulté le 30/03/2022).
- NASA EARTHDATA, GES DISC, [en ligne]. Disponible sur : <https://daac.gsfc.nasa.gov/>. (Consulté le 30/03/2022).
- Reverdy M. Estimation des paramètres atmosphériques par GPS : analyse de la variabilité spatio-temporelle de la vapeur d'eau, Physique de l'Atmosphère, Université Blaise Pascal, 2008, 260.
- Tarantola A. Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation, SIAM (Society of Industrial and Applied Mathematics), 2005.
- Verdun J. Cours IG3 Géodésie Physique, 117 pages, 2019.
- Vèrèmes H. Étude de la variabilité de la vapeur d'eau dans la troposphère et la basse stratosphère en région (sub)tropicale et des processus associés, Physique Atmosphérique, Université de La Réunion, 2016, 208.
- Wijaya D. D., Brunner F. K., *Atmospheric range correction for two-frequency SLR measurements*, [en ligne], Springer-Verlag, 2011. Disponible sur : <https://www.deepdyve.com/lp/springer-journals/atmospheric-range-correction-for-two-frequency-slr-measurements-1Kud18HFZG#:~:text=The%20data%20contain%20three%20the%20atmospheric%20correction%20of,to%20the%202F-SLR%20formula%2C%20observed%20twice%20a%20day>. (Consulté le 25/03/2022).
- Wikipédia, *Cyclone Batsirai*, [En ligne], Consultable sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Cyclone_Batsirai (Consulté le 29/05/2022).

- Won J., Park K-D., Ha J., Cho J., *Effects of Tropospheric Mapping Functions on GPS Data Processing* [en ligne], Journal of Astronomy & Space Sciences, 2010. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/253348307_Effects_of_Tropospheric_Mapping_Functions_on_GPS_Data_Processing (Consulté le 01/05/2022)

Webographie :

- <https://www.universalis.fr/encyclopedie/piton-de-la-fournaise/> (Consulté le 21/06/2022)
- <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/17/2744/htm> (Consulté le 25/03/2022)
- https://www.francetvinfo.fr/meteo/cyclone-ouragan/ouragan-maria/cyclones-comment-prevoir-la-trajectoire-et-la-puissance-des-ouragans_2378459.html (Consulté le 25/05/2022)
- https://www.researchgate.net/publication/281474710_Modelisation_des_retards_tropospheriques_pour_les_observations_GPS_et_impacts_sur_l'estimation_de_la_hauteur_ellipsoïdale (Consulté le 12/03/2022)
- <https://www.leparisien.fr/meteo/cyclone-batsirai-a-la-reunion-une-nuit-apocalyptique-avant-la-levee-de-lalerte-rouge-04-02-2022-XS6LWGDLJBEINJNSNUIE7RI2UE.php> (Consulté le 01/06/2022)
- <https://lacy.univ-reunion.fr/production/outils-numeriques/cyclade/> (Consulté le 29/06/2022)
- <https://www.f-legrand.fr/https://meteocontact.fr> (Consulté le 30/03/2022)
- https://gmao.gsfc.nasa.gov/events/adjoint_workshop-9/presentations/Prive.pdf (Consulté le 30/03/2022)
- <https://daac.gsfc.nasa.gov/> (Consulté le 30/03/2022)
- <https://www.deepdyve.com/lp/springer-journals/atmospheric-range-correction-for-two-frequency-slr-measurements-1Kud18HFZG#:~:text=The%20data%20contain%20three%20the%20atmospheric%20correction%20of,to%20the%20F-SLR%20formula%2C%20observed%20twice%20a%20day> (Consulté le 25/03/2022)
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Cyclone_Batsirai (Consulté le 29/05/2022)
- https://www.researchgate.net/publication/253348307_Effects_of_Tropospheric_Mapping_Functions_on_GPS_Data_Processing (Consulté le 01/05/2022)

Table des annexes

Annexe 1 Notion de forçage aux limites.....	63
Annexe 2 Principales commandes Linux pour analyser MESO-NH.....	64
Annexe 3 Logiciel Cyclade.....	65
Annexe 4 Détails du processus de mise en place des stations synthétiques.....	66
Annexe 5 Précipitations prévues (mm) par le modèle MESO-NH, 01 février 2022.....	69
Annexe 6 Profils verticaux des colonnes de voxels 1, 5 et 7 pour R1, R2 et R3.....	70

Annexe 1

Notion de forçage aux limites

MESO-NH étant un modèle météorologique prévisionnel régional, il possède des limites. La détermination de ces limites sont nécessaires notamment pour l'obtention des gradients. Pour ce faire, le modèle prévisionnel global IFS (Integred Forecasting System) de l'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) est utilisé, MESO-NH sera inclus dans ce dernier où la zone limite sera déterminée par interpolation afin d'éviter les ruptures.

On peut être amené à se demander, pourquoi utiliser MESO-NH et pas IFS, en mode HRES (haute résolution). MESO-NH possède une résolution de 2,3 km contre 9 km pour l'IFS, de plus, nous n'avons pas réussi à en extraire les retards troposphériques.

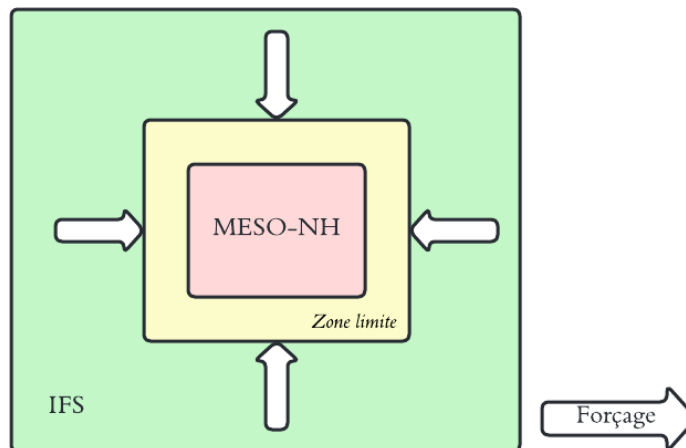


Figure 1a : Forçage du modèle MESO-NH

Annexe 2

Principales commandes Linux pour analyser MESO-NH

Commande	Résultat
shade THVW	affiche les IWV
shade/lev=(0,70,5) THVW[i=29:36,j=11:16]	affiche les IWV sur la zone du Piton de la Fournaise
contour/o/lev=(0,2500,300) ZS[i=29:36,j=11:16]	affiche les courbes de niveaux sur la zone du Piton de la Fournaise
shade/lev=(0,23,1) ACPRT[d=3,L=1,i=29:36,j=11:16] - ACPRT[d=3,L=1,i=29:36,j=11:16], LONGITUDE[i=29:36,j=11:16], LATITUDE[i=29:36,j=11:16]	affiche les précipitations prévues par le modèle

Tableau 2a : Principales commandes utilisées sur Pyferret

Les fichiers extraits de MESO-NH ne sont pas en coordonnées géographiques mais sous la forme de matrice i, j, k, avec i représentant la longitude, j la latitude et k l'altitude. L faisant référence à l'altitude utilisée.

Annexe 3 Logiciel Cyclade

Le logiciel CYCLADE est un logiciel développé par le LACy permettant la visualisation de cyclone mais aussi de comparer/d'analyser les différents modèles opérationnels de prévision météorologique. En constante évolution, ce logiciel est utilisé dans la recherche, dans les modélisations mais aussi dans les prévisions (<https://lacy.univ-reunion.fr/production/outils-numeriques/cyclade/>, Consulté le 29/06/2022)).

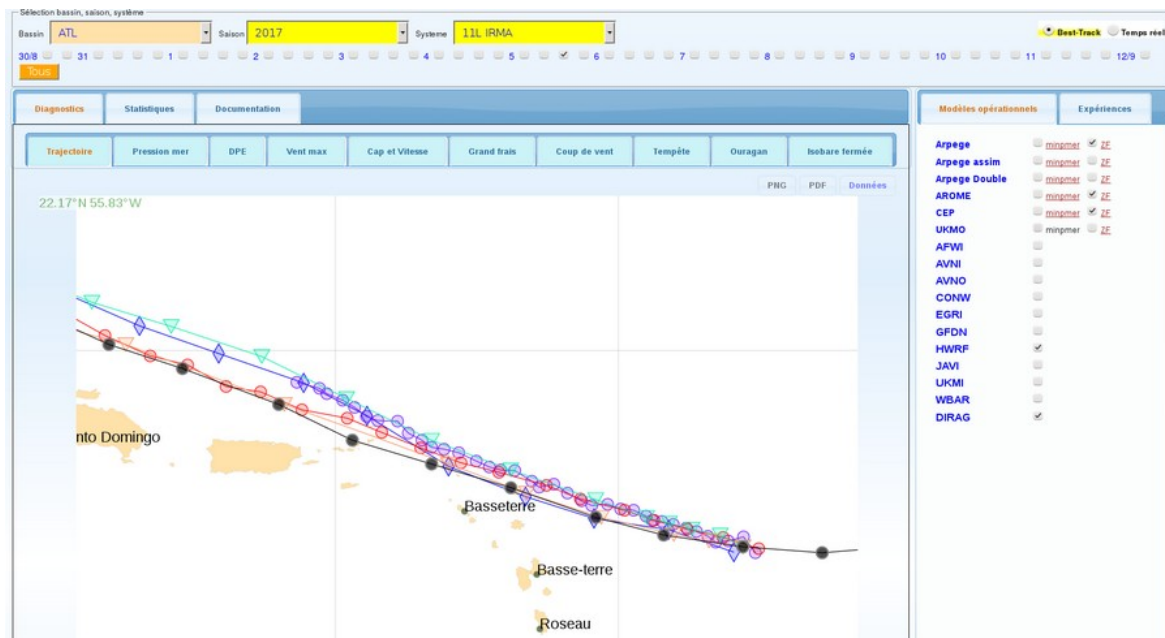


Figure 3a : Logiciel CYCLADE, source : <https://lacy.univ-reunion.fr> (Consulté le 28/06/2022)

Annexe 4

Détails du processus de mise en place des stations synthétiques

Mise en place des fichiers DPH

Le fichier « site.GPS » contient les coordonnées des stations. Le fichier .sp3 contient les orbites des satellites. Grâce à ces deux fichiers, les élévations et les azimuts contenus dans les fichiers DPH ont pu être déterminés. Dans un premier temps, la mise en place en repère local orthonormal direct centré sur notre station dont les axes correspondent aux directions Est, Nord et vers le haut a été fait. (Verdun, IG3). Après « simplification », la formule 17 permettant le passage du repère local au repère géocentrique a été obtenue.

$$\begin{pmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ -\sin(\phi)\cos(\lambda) & -\sin(\phi)\sin(\lambda) & \cos(\phi) \\ \cos(\phi)\cos(\lambda) & \cos(\phi)\sin(\lambda) & \sin(\phi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{sat} - X_{sta} \\ Y_{sat} - Y_{sta} \\ Z_{sat} - Z_{sta} \end{pmatrix} \quad (17)$$

Avec λ , ϕ la latitude et la longitude de la station, $(X, Y, Z)_{sat}$, $(X, Y, Z)_{sta}$ les coordonnées géocentriques cartésiennes du satellite et de la station. Les distances euclidiennes 2-D et 3-D ont été déterminées (18 et 19).

$$Dh = \sqrt{(X_{sat} - X_{sta})^2 + (Y_{sat} - Y_{sta})^2} \quad (18) \quad D = \sqrt{(X_{sat} - X_{sta})^2 + (Y_{sat} - Y_{sta})^2 + (Z_{sat} - Z_{sta})^2} \quad (19)$$

Puis nous déterminons l'élévation (El) et l'azimut (Az) de chaque satellite (20 et 21) :

$$El = \arcsin\left(\frac{(Z_L/D)*90}{(\pi/2)}\right) \quad (20)$$

$$Az = 2 * \arctan\left(\frac{X_L}{(Y_L + Dh)}\right) \quad (21)$$

Si $X_L = 0$:
 Si $Az < 0$:
 $Az = Az + 2 * \pi$
 Sinon:
 $Az = \pi$

Mise en place des fichiers met

Concernant les fichiers met, les ZTD, ZHD, ZWD, les pressions, les températures et les gradients ont été déterminés. Dans le cas des ZTD, ZHD, ZWD et des gradients, le modèle MESO-NH a été utilisé. Pour les pressions et les températures nous utiliserons des régressions linéaires car ces deux variables ont une variation horizontale faible et

dépendent majoritairement de la variation verticale. Il existe donc une corrélation entre altitude/pression et altitude/ température.

Détermination des ZTD, ZHD et ZWD à partir de MESO-NH

Pour extraire ces données du modèle MESO-NH, il faut créer un fichier .nam comprenant les paramètres suivants (Figure 4a).

Fortran name	Fortran type
CNAM_GPS	array(character)
XLAT_GPS	array(real)
XLON_GPS	array(real)
XZS_GPS	array(real)
XDIFFORO	array(real)

Figure 4a : Paramètre d'extraction des données de MESO-NH

CNAM_GPS fait référence au nom de la station, XLAT_GPS renvoie à la latitude de la station et XLON_GPS à sa longitude. XZS_GPS représente l'altitude et enfin XDIFFORO correspond à la différence maximale autorisée entre l'altitude renseignée et l'altitude de MESO-NH (200 m par défaut). Nous obtenons un fichier par heure de la forme

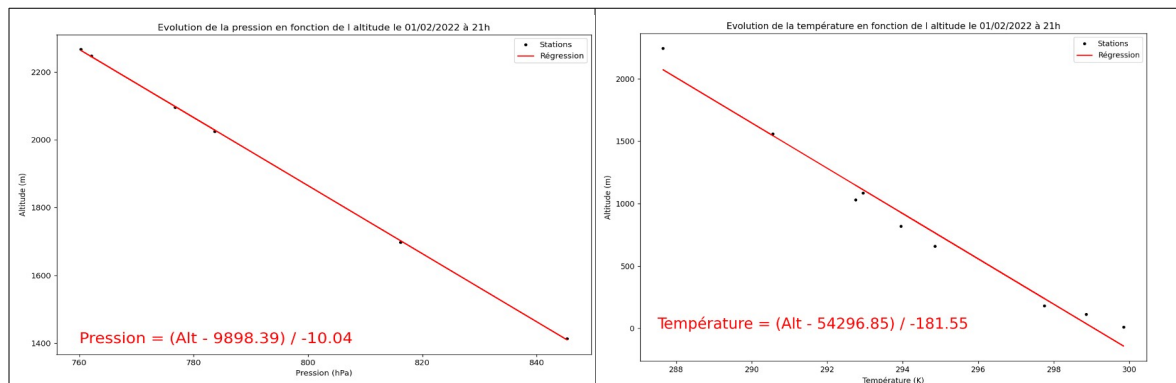
(Figure 4b)

```
Number of STATIONS          35
STATION FJAG ORIGI ZHD:  1.79515 ZWD:  0.07214 ZTD:  1.86730
```

Figure 4b : Exemple de fichier obtenu

Calcul des pressions et des températures

Pour chaque époque, la détermination des températures et des pressions de chaque station a été réalisée par régression linéaire. Pour les températures, cette régression a été basée sur les données de Météo-France, pour la pression, les valeurs des stations aux alentours ont été utilisées. (Figure 4c). Les stations utilisées pour les températures et pour les pressions ne sont pas les mêmes, d'où le nombre qui diffère pour les deux régressions.



Détermination des gradients Nord-Sud et Est-Ouest

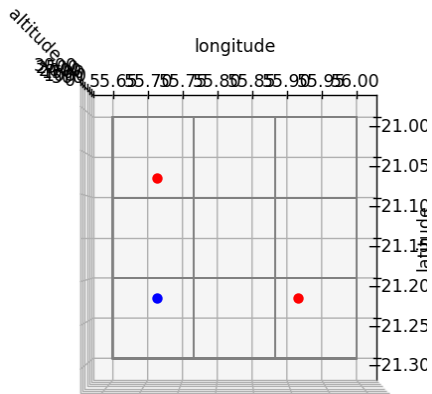


Figure 4d : Exemple de détermination des gradients

Ces valeurs représentant l'anisotropie de l'atmosphère sont à déterminer pour chaque station et à chaque époque. Dans un premier temps, nous avons essayé d'utiliser les formules GAMIT, sans succès. Finalement, nous avons essayé de les déterminer de manière «directe».

Soit le rond bleu (Figure 4d) la station connue dont nous cherchons à déterminer les gradients NS/EW.

Dans un premier temps, deux autres stations à 20 km (ronds rouges) ont été mises en place : une à l'Est (latitude constante), et une au Nord (longitude constante). Connaissant les valeurs des ZTD en chaque point (extrait depuis MESO-NH), nous pouvons calculer les gradients 2-D (22 et 23), avec ZTD_N , ZTD_E faisant référence au ZTD dans les directions Nord et Est et ZTD_O pour le ZTD de la station.

$$\overrightarrow{gradNS} = \frac{ZTD_N - ZTD_O}{Distance} \quad (22)$$

$$\overrightarrow{gradEW} = \frac{ZTD_E - ZTD_O}{Distance} \quad (23)$$

Annexe 5

Précipitations prévues (mm) par le modèle MESO-NH, 01 février 2022

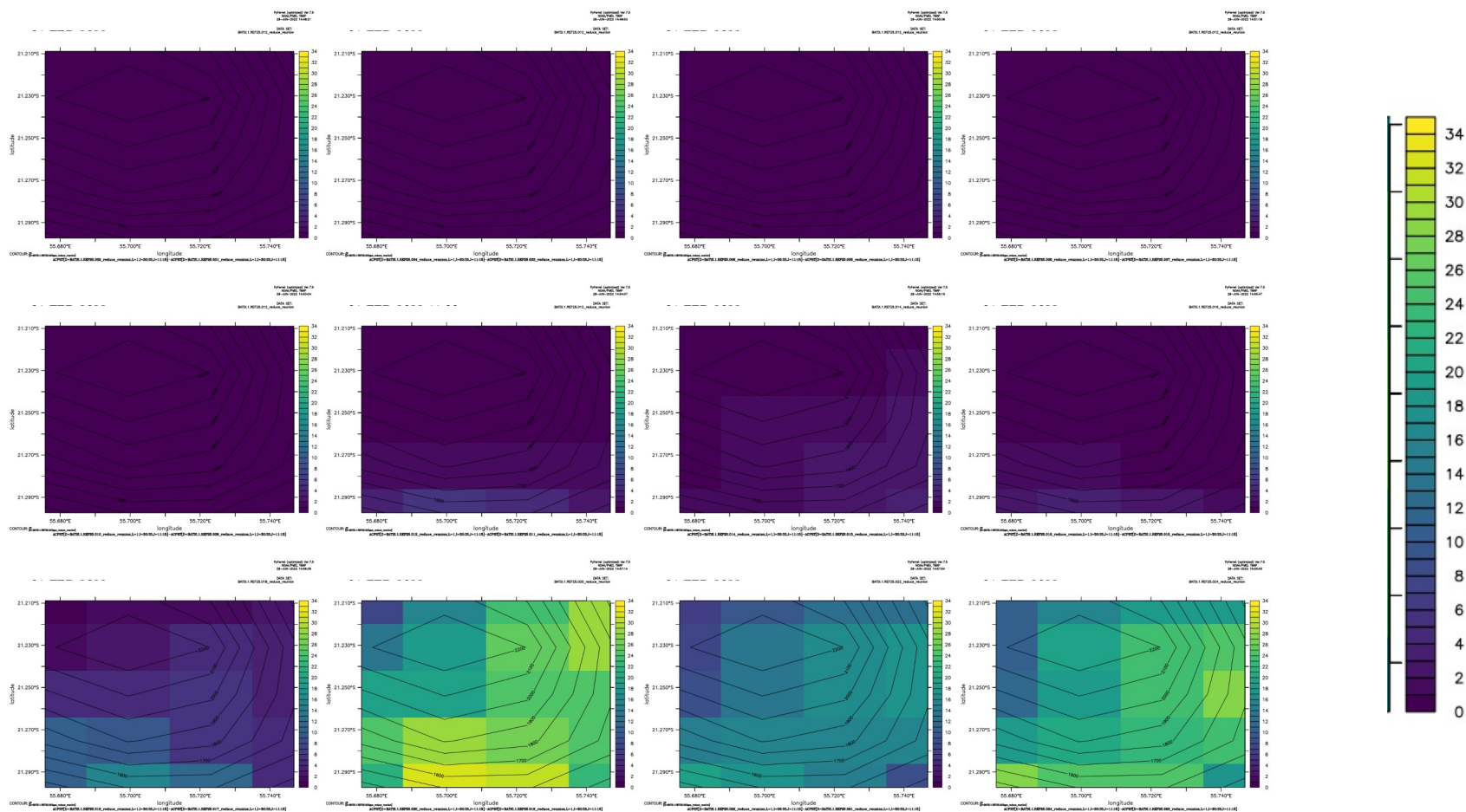


Figure 5a : Précipitations prévues par MESO-NH

Annexe 6

Profils verticaux des colonnes de voxels 1, 5 et 7 pour R1, R2 et R3

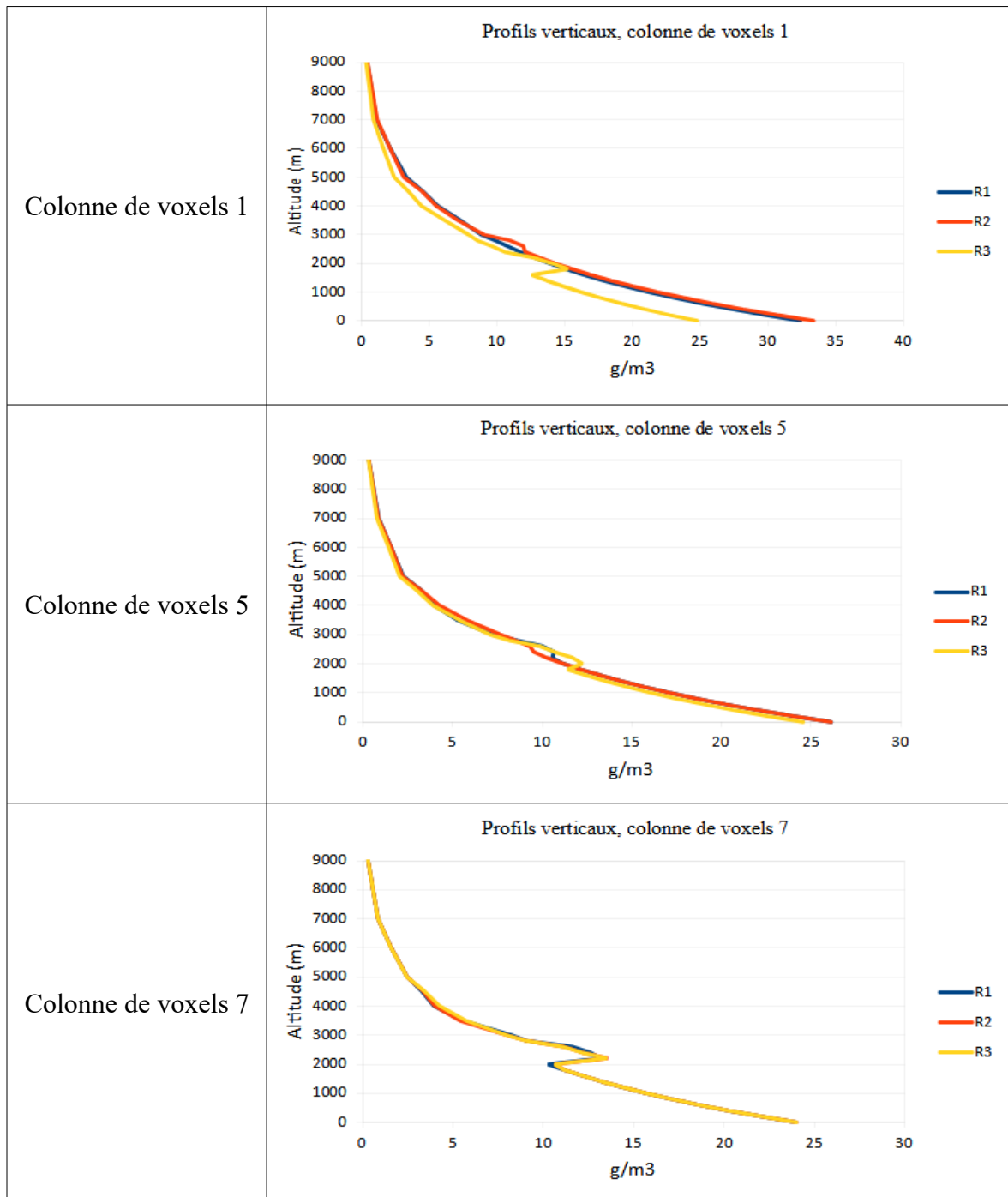


Figure 6a : Profils verticaux

Liste des Figures

Figure 1: Retard du signal à cause de l'atmosphère (Champollion, 2005).....	9
Figure 2: Projection du STD en ZTD (Brenot et al, 2008).....	12
Figure 3: Décomposition classique des effets troposphériques, en bleu : les paramètres estimés, en rouge : les paramètres connus a priori (Fund et al, 2010), [modifié].....	13
Figure 4: Modèle prédictif et modèle inverse.....	15
Figure 5: Discrétisation de l'espace en voxels , les couleur correspondent aux directions des azimuts.....	16
Figure 6: Répartition des rais dans les voxels à faible altitude (a) et à haute altitude (b) (Reverdy, 2008).....	16
Figure 7: Méthode étudiée par Ding N. (2020).....	17
Figure 8: Description des étapes du logiciel TSAAR (Longechamp, 2017).....	20
Figure 9: Répartition de la vapeur d'eau selon l'atmosphère standard, plus le trait/cercle un important, plus la quantité de vapeur d'eau est importante (Le Coz, 2015).....	21
Figure 10: Obtention des valeurs initiales par recalage par l'IWV de l'atmosphère standard.....	22
Figure 11: Carte des stations RGP sur le territoire réunionnais (http://rgp.ign.fr/), 2022.....	22
Figure 12: Carte du réseau VOLOBSIS sur le territoire réunionnais (http://volobsis.ipgp.fr/), 2022.....	22
Figure 13: Exemple de coupe horizontale le 10 avril 2021 à 200 m par rapport au niveau de la mer. Zone du Piton de la Fournaise.....	23
Figure 14: Adaptation du logiciel TSAAR sur toute l'île de La Réunion.....	23
Figure 15: Représentation et pourcentage de voxels vides, les ronds bleus sont les stations et les numéros gris correspondent aux numéros des voxels.....	24
Figure 16: Répartition de la densité en vapeur le 10 avril 2021 à l'altitude 1 000 m.....	25
Figure 17: Variation de la densité de vapeur d'eau moyenne à l'altitude 1 000 m, 2 000 m et 6 000 m le 10 avril 2021.....	26
Figure 18: Moyennes et écarts-types pour les différentes couches.....	27
Figure 19: Variation de la densité moyenne globale de vapeur d'eau le 10 avril 2021.....	27
Figure 20: IWV et vapeur d'eau à 21h, voxels 2 et 7 en rouge (anomalie), 09 avril 2021...29	29
Figure 21: Répartition verticale de la densité de vapeur d'eau, voxels sols 2 et 7, atmo_initiale (recalée par les IWV) : valeurs initiales, et résultat final recalé : résultats issus de l'inversion tomographique.....	30
Figure 22: Profils longitudinales et latitudinales de la densité de vapeur d'eau sur la zone du Piton de la Fournaise.....	31
Figure 23: Réseaux utilisés pour étudier la géométrie du réseau (rouge : zone Nord-Ouest (NO)).....	33
Figure 24: IWV (mm) résultant des cinq réseaux à 0:00.....	34
Figure 25: Évolution de la moyenne de densité de vapeur d'eau, 10 avril 2021.....	35
Figure 26: Variation de densité de vapeur d'eau journalière moyenne, 10 avril 2021.....	35
Figure 27: Réseau étudié, zone du Piton de la Fournaise, le 01 février 2022.....	38
Figure 28: Différences TSAAR/MESO-NH sur la journée du 01 février 2022.....	38
Figure 29: Résultat (TSAAR - MESO-NH) et comparaison (en vert : polygone d'interpolation), zone du Piton de la Fournaise.....	39
Figure 30: Trajectoires simulée et vraie du cyclone Batsirai.....	41
Figure 31: Trajectoire du cyclone Batsirai (fr.wikipedia.org , consulté le 29/05/2022).....	42

Figure 32: Cyclone Batsirai (©Images satellites Mtotec).....	42
Figure 33: Position des stations GNSS, variations des IWV (ligne rouge : saturation) et précipitations mm.....	42
Figure 34: Évolution de la densité de vapeur d'eau, profil latitudinal au niveau de STJS, le 01/02/2022 à 1 h (a) et le 02/02/2022 à 7 h (b).....	44
Figure 35: Orientation : flèche rouge (Nord en haut), intensité des vents (point)(a) et carte des précipitations (mm), le trait rouge faisant référence au profil Figure 34 (b) (données Météo-France).....	44
Figure 36: Exemple de fichier DPH « DPH.ALBR.PRN01 » le 01 février 2022.....	45
Figure 37: Exemple de fichier met « met_albr.21100 » le 01 février 2022.....	45
Figure 38: Étapes pour la mise en place d'un réseau synthétique.....	46
Figure 39: Différences entre les azimuts/élevations de GAMIT et ceux synthétique. Position des stations : Figure 40a.....	47
Figure 40: Position des différentes stations sur la zone du Piton de la Fournaise (a) et différence des ZWD de MESO-NH et des ZWD de GAMIT (b).....	47
Figure 41: Écarts entre les gradients de GAMIT et ceux calculés depuis MESO-NH.....	48
Figure 42: Écarts absolus des IWV MESO-NH et des IWV MESO-NH simulés par TSAAR.....	49
Figure 43: Réseau étudié.....	50
Figure 44: Écarts relatifs des IWV (mm) avant le processus d'inversion tomographique...50	50
Figure 45: Écarts relatifs des IWV (mm) après le processus d'inversion tomographique...50	50
Figure 46: Profils verticaux de la densité de vapeur d'eau à 8 h et 18 h, le 01 février 2022, le rectangle jaune est la colonne de voxels 4 et le rouge, la colonne de voxels 6 et la ligne verte : une courbe d'iso-densité de vapeur d'eau.....	51
Figure 47: Profils verticaux de la densité de vapeur d'eau à 8h et 18h.....	52
Figure 48: Réseaux synthétiques étudiés, R1 servant de référence.....	53
Figure 49: Écart R1-R2 (a) et R1-R3 (b) de densité de vapeur d'eau, le 01 février 2022...53	53
Figure 50: Écart absolu R2-R3.....	54
Figure 51: Réseau étudié.....	55
Figure 52: Écarts absolus de la densité de vapeur d'eau entre R1 et R3.....	56

Liste des Tableaux

Tableau 1: Les différents modèles tomographiques.....	18
Tableau 2: Grille des discrétisations verticales (m).....	28
Tableau 3: Différents modèles météorologiques (www.meteocontact.fr).....	37
Tableau 4: Points remarquables IWV pour STJS, heures cumulées à partir du 01/02/2022 à 0h00.....	43
Tableau 5: Bilan des écarts. L'inversion tomographique représentant la densité de vapeur d'eau (g/m^3).....	48
Tableau 6: Moyenne des écarts absolus de la densité de vapeur d'eau (R1-R2 et R1-R3)..	54
Tableau 7: Moyenne des écarts de la densité de vapeur d'eau.....	56

TOMO-PITON : Restitution du champ de vapeur d'eau 3-D par tomographie GNSS sur la zone du Piton de la Fournaise, île de La Réunion

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2022

RESUME

La vapeur d'eau a un rôle essentiel dans de nombreux domaines (prévisions météorologiques...), réussir à la restituer est donc un enjeu majeur. Aujourd'hui, les systèmes GNSS permettent une restitution du champ 3-D de vapeur d'eau à moindre coût en étudiant les paramètres atmosphériques. Ce mémoire a étudié le cas du réseau GNSS de l'île de La Réunion. Une première étude avait déjà été effectuée sur la ville du Mans, néanmoins, les forts gradients topographiques de l'île de La Réunion vont influencer sur la distribution du champ de vapeur d'eau 3-D.

Une étude du réseau GNSS et du paramétrage du logiciel de tomographie est réalisée. Une comparaison avec un modèle météorologique prévisionnel (MESO-NH) est faite, mettant en avant des écarts. Sachant que nous sommes capables de restituer un champ 3-D de vapeur d'eau, l'analyse de son apport dans les prévisions de phénomènes météorologiques est faite, notamment avec cas du cyclone Batsirai. Enfin, l'hétérogénéité du réseau GNSS réunionnais présente de nombreuses zones sans information, la mise en place d'observables synthétiques est donc abordée de manière à pallier ce manque.

Mots clés : IWV, GNSS, OSSE, île de La Réunion, TSAAR, tomographie, vapeur d'eau, ZWD

SUMMARY

The water vapour has an essential role in many areas (weather forecasts ...) succeeding in restoring it is therefore a major issue. Today, GNSS systems allow a restitution of the 3-D field of water vapour at a lower cost by studying atmospheric parameters. This dissertation will study the case of the GNSS network of Reunion Island. A first study has already been carried out on the city of Le Mans, nevertheless, the strong topographical gradients of Reunion Island will influence the 3-D water vapour field.

A study of the GNSS network and parametrization of the tomography software is carried out. A comparison with a forecast weather model (MESO-NH) is made, highlighting differences. Knowing that we are able to relocate this 3-D field of water vapour, a study of its contribution in the prediction of meteorological phenomena is made, including the Batsirai hurricane. Finally, due to its heterogeneity, the GNSS network in Reunion has many areas without information, the implementation of synthetic observables is therefore approached in order to compensate for this lack.

Key words : IWV, GNSS, OSSE, Reunion Island, TSAAR, tomography, water vapour, ZWD.