



**HAL**  
open science

# Tomographie troposphérique par réseau GNSS dense sur le site du Mans : mise en œuvre et premières analyses

Olivier Le Coz

► **To cite this version:**

Olivier Le Coz. Tomographie troposphérique par réseau GNSS dense sur le site du Mans : mise en œuvre et premières analyses. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2015. dumas-01338743

**HAL Id: dumas-01338743**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01338743v1>**

Submitted on 29 Jun 2016

**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**  
**ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES**

---

**MÉMOIRE**

**présenté en vue d'obtenir**

**le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM**

**Spécialité : Géomètre et Topographe**

**par**

**Olivier Le Coz**

---

**Tomographie troposphérique par réseau GNSS dense sur le site du Mans.  
Mise en œuvre et premières analyses.**

**Soutenu le 17 septembre 2015**

---

**JURY**

**PRESIDENT :** M. Jérôme VERDUN

**MEMBRES :** M. Laurent Morel  
Mme Joëlle DUROY  
Mme Camille LELONG  
M. Jean-Baptiste CAVERNE  
M. Bertrand DEGRIECK  
M. Joël VAN BAELEN

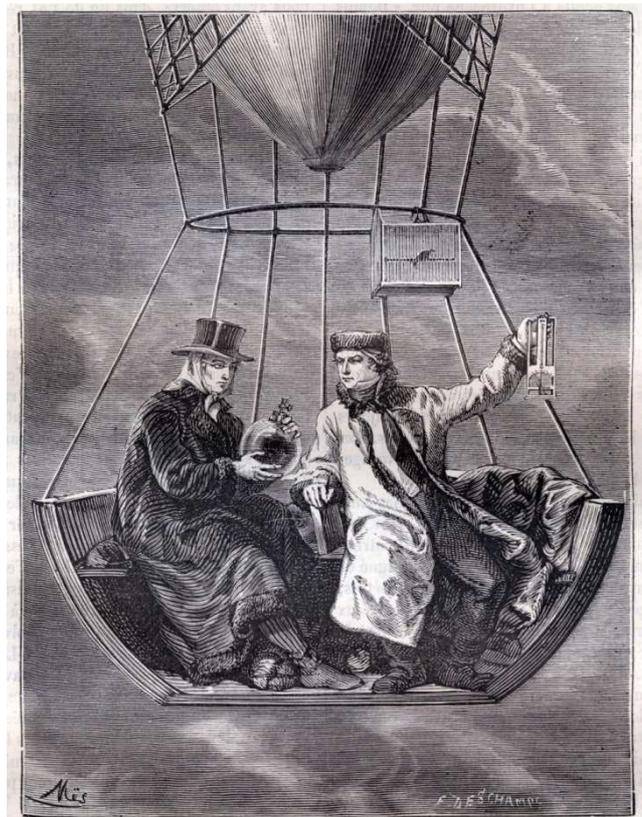
**Maître de stage  
Professeur référent**



**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS  
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES**

Tomographie troposphérique par réseau GNSS dense sur le site du Mans.  
Mise en œuvre et premières analyses.

**Olivier Le Coz**  
*Élève ingénieur à l'ESGT (Le Mans)*



Biot et Gay-Lussac exécutant des expériences à l'altitude de 4,000 mètres. — 20 septembre 1804.

Jean-Baptiste Biot (1774-1862) et Louis Gay Lussac (1778-1850), physiciens français, effectuant des mesures de pression et température à l'altitude de 4 000 mètres le 20 septembre 1804. Premières explorations verticales de l'atmosphère à l'aide de montgolfières organisées par l'Académie des Sciences. Extrait de « La Nature 1874 »

« La science doit s'accommoder à la nature. La nature ne peut s'accommoder à la science. »

Ferdinand Brunot (1860-1938)

## Remerciements

Pour ces 3 années de formation passées au sein de l'ESGT et pour toute l'aide que j'ai reçue pour la rédaction de ce mémoire, je tiens à remercier tout particulièrement :

Mon maître de stage Laurent Morel pour sa confiance, son écoute et ses encouragements continus tout au long de ce travail de fin d'études. Son soutien permanent fut réellement fondamental et m'a permis d'achever correctement ce travail de fin d'étude : je l'en remercie très chaleureusement,

Mes co-encadrants de stage Stéphane Durand et Frédéric Durand pour leur disponibilité à toute épreuve, même en plein cours ! Leur écoute et leurs analyses à mes interrogations ont été à chaque fois source de solutions rapides et efficaces et furent très précieuses pour l'avancement de ce rapport. Je les remercie pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail, cela m'a beaucoup aidé à aller de l'avant. Ce travail de recherche à leurs contacts et celui de Laurent fut réellement pour moi une très belle expérience tant sur le plan humain que professionnel,

Ma professeur référent Joëlle Duroy pour la relecture de ce mémoire et pour ses mots de soutien en juillet lorsque je n'ai pas pu présenter ma soutenance,

Michel Haxaire et Thierry Denis, responsables technique et sécurité au sein de l'ESGT, pour leur aide précieuse à l'installation des antennes GNSS qui a nécessité largement leur expertise. Cette phase de terrain fut très stimulante et rendue particulièrement agréable en leur compagnie.

Je tiens également à remercier le service national d'observation INSU RENAG pour sa contribution matérielle et financière qui a permis la concrétisation de ce projet d'études, et dans d'excellentes conditions avec notamment l'acquisition par le laboratoire de l'école de stations météorologiques de précision.

J'ai aussi une grande pensée pour l'ensemble de mes camarades d'études avec qui j'ai partagé la salle T0 pendant 5 mois, à savoir Adélie Corbeau, Maïlys Bucher, Maryem Fadili, Lucie Poirier et Jérémy Nicolay. Une super ambiance ! avec Adélie et Lucie en tête de file pour la récréation, Maïlys écroulée de rire, Maryem qui tente de calmer le jeu et Jérémy et moi qui ne comprenons pas grand-chose !!

Je voudrais enfin finir par remercier plus largement tous les membres du personnel de l'ESGT qui construisent tous les jours au sein de l'école les bases d'une ambiance particulièrement chaleureuse et bienveillante.

A vous tous, j'adresse un grand merci !

## Sigles et acronymes

CIVE	Contenu Intégré en Vapeur d'Eau
CNAM	Conservatoire National des Arts et Métiers
ECMWF	European Centre for the Medium-range Weather Forecast
E-GVAP	EUMETNET GPS Water Vapour Programme
ERS	European Remote-sensing Satellite
ESCOMPTE	Expérience sur Site pour COntraindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Emission
ESGT	École Supérieure des Géomètres et Topographes
ESMAG	Expérience sur Site du MANS pour la tomographie GNSS
EUMETNET	The Network of European Meteorological Services
GAMIT	Global positioning system Analysis at Massachusetts Institute of Technology
GLONASS	GLObal NAVigation Satellite System
GMF	Global Mapping Function
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPT	Global Pressure and Temperature
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
ISS	International Space Station
IWV	Integrated Water Vapor
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MSC	Meteorological Service of Canada
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
NMEA	National Marine Electronics Association
NMF	Niell Mapping Function
OHM-CV	Observatory Hydro-meteorological Mediterranean – Cévennes Vivarais
RENAG	Réseau National GPS
RGP	Réseau GNSS Permanent
RINEX	Receiver Independant Exchange Format
SHD	Slant Hydrostatic Delay
SIWV	Slant Integrated Water Vapor
SPT	Standard Pressure and Temperature
STD	Slant Total Delay

SWD	Slant Wet Delay
TSAAR	Tomography Software for wATER vApour Retrieval
VMF1	Vienna Mapping Function 1
VZHD	Vienna Zenith Hydrostatic Delay
ZHD	Zenith Hydrostatic Delay
ZTD	Zenith Total Delay
ZWD	Zenith Wet Delay

# Table des matières

<b>Remerciements.....</b>	<b>1</b>
<b>Sigles et acronymes.....</b>	<b>2</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>6</b>
<b>1. GNSS et retards atmosphériques .....</b>	<b>7</b>
1.1. L'atmosphère.....	7
1.2. Modélisation de l'atmosphère dans le positionnement GNSS.....	9
1.2.1. Equation d'observation.....	9
1.2.2. Les contributions de l'atmosphère neutre au retard troposphérique .....	10
1.2.3. Modélisation du retard troposphérique .....	11
1.2.4. ZHD a priori, modèles météorologiques et fonctions de projection a priori .....	13
1.3. Tomographie troposphérique GNSS .....	18
1.3.1. Principe théorique .....	18
1.3.2. Des ZWD au Contenu Intégré en Vapeur d'Eau (CIVE).....	18
1.3.3. Reconstitution des contenus intégrés en vapeur d'eau obliques (SIWV) .....	20
1.3.4. Inversion tomographique par la méthode des moindres carrés pondérés amortis .....	21
1.3.5. Valeurs initiales de densités en vapeur d'eau .....	23
1.4. Enjeux pour la météorologie... ..	25
<b>2. Cas d'étude, Le Mans : Mise en œuvre d'un réseau GNSS dense et préparation d'une chaîne de calcul.....</b>	<b>26</b>
2.1. Installation du réseau.....	26
2.1.1. Choix des sites.....	26
2.1.2. Caractéristiques des stations de campagne.....	26
2.1.3. Caractéristiques du site d'étude .....	30
2.2. Mise en référence du réseau.....	31
2.2.1. Choix des stations de référence .....	31
2.2.2. Stabilité des stations de campagne.....	32
2.3. Chaîne de traitement pour le calcul tomographique.....	33
2.3.1. Présentation.....	33
2.3.2. Différentes stratégies de calcul .....	34

<b>3. Campagne « ESMAG » : Résultats et premières analyses.....</b>	<b>36</b>
3.1. Résultats pré-tomographiques.....	36
3.1.1. Comparaison du modèle GPT, des VZHD et des mesures « in situ » pour le calcul des ZWD.....	38
3.1.2. Apport des mesures « in situ » de pression sur le calcul des ZHD.....	40
3.1.3. Résultats pré-tomographiques retenus.....	41
3.2. Résultats tomographiques.....	42
3.2.1. Coefficient alpha : poids des mesures par rapport aux valeurs initiales.....	42
3.2.2. Différentes discrétisation de l'espace (choix du nombre de voxels).....	46
3.2.3. Apport des mesures « in situ » de température sur le calcul des IWV.....	49
3.2.4. Discussion sur les résultats bruts en sortie de TSAAR.....	50
3.2.5. Produits tomographiques finaux.....	53
<b>Conclusion et perspectives .....</b>	<b>56</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>59</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>61</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>66</b>
<b>Table des annexes.....</b>	<b>67</b>

## Introduction

L'analyse de la vapeur d'eau dans l'atmosphère a longtemps été freinée par le manque d'outils de mesure adéquats pour répondre à la haute variabilité spatio-temporelle de la vapeur d'eau. Dans leurs recherches pour améliorer la précision des systèmes GNSS<sup>1</sup> pour des applications de positionnement, les chercheurs ont permis de créer cet outil. En effet, depuis plusieurs dizaines d'années, avec l'augmentation de leur précision grâce notamment à l'intégration de délais atmosphériques dans les chaînes de calcul, les systèmes GNSS sont devenus des outils incontournables dans les sciences comme la physique de l'atmosphère ou la météorologie.

Le sujet de ce mémoire repose sur une application météorologique des systèmes GNSS, à savoir la tomographie troposphérique qui consiste à restituer le champ 3D de la vapeur d'eau dans la troposphère. L'étude proposée a pour but la démonstration des concepts de la tomographie troposphérique avec un réseau dense de stations GNSS sur la zone de la communauté urbaine du Mans. Ce travail a également vocation à rationaliser les méthodes de mise en œuvre depuis l'installation du réseau GNSS jusqu'à l'utilisation des logiciels de calculs existants. L'absence de phénomènes météorologiques connus a priori sur la zone du Mans enlève à ce travail de fin d'étude un but météorologique concret. Néanmoins, l'expérimentation d'un processus complet de calcul a permis d'apporter une contribution critique sur les méthodes et outils actuels et d'envisager des améliorations.

Dans une première partie, nous nous efforcerons d'explicitier les bases de la tomographie troposphérique GNSS en rappelant notamment les concepts de délais atmosphériques ainsi qu'en exposant plusieurs enjeux de cette application pour la météorologie.

Dans un second temps, nous reviendrons sur l'élaboration du réseau GNSS sur le site du Mans en présentant les stations du réseau et leurs caractéristiques. Les chaînes de calcul pour la partie pré-tomographique et la partie tomographie seront également présentées. On introduira également la troisième partie de ce rapport en énonçant différentes stratégies de calcul testées.

Enfin, dans une dernière partie, nous exposerons différents résultats de la campagne d'observation. Plusieurs tests seront effectués pour la partie pré-tomographique et pour la partie tomographique, avec notamment l'apport de mesures météorologiques « in situ » dans le processus tomographique. Plusieurs méthodes de travail seront proposées et les résultats globaux de la campagne seront présentés.

---

<sup>1</sup> Global Navigation Satellite System

# 1. GNSS et retards atmosphériques

Ce travail de fin d'étude repose en premier lieu sur les systèmes de positionnement par satellites (GNSS). Pour cette étude nous avons utilisé de manière combinée celui des Américains (GPS<sup>2</sup>) et celui des Russes (GLONASS<sup>3</sup>). Cette première partie s'efforcera de rappeler quelques concepts et quelques définitions sur le fonctionnement d'un système GNSS et sur le milieu qui affecte la propagation de ses signaux, l'atmosphère terrestre. Elle permettra également d'explicitier plus précisément le lien entre les systèmes GNSS et la météorologie.

## 1.1. L'atmosphère

L'une des principales limitations à la précision et à la fiabilité des GNSS reste encore aujourd'hui l'influence de l'atmosphère subie par les ondes radio émises par les satellites (cf. Figure 1). De la même manière que le son se propage plus lentement dans l'air que dans l'eau, les signaux des satellites sont perturbés lors de leur passage dans l'atmosphère (passage du vide à l'air) : c'est le phénomène de réfraction. De plus, l'atmosphère elle-même peut se décomposer en plusieurs couches, aux propriétés physiques différentes. Un signal satellitaire est donc altéré de manière hétérogène dans l'espace.



Figure 1 : La lune au-dessus de l'atmosphère terrestre photographiée depuis l'ISS<sup>1</sup> le 8 janvier 2012 par la NASA (National Aeronautics and Space Administration, agence américaine). Source : Univers Science Innovation.

Néanmoins, la complexité de l'étude de l'atmosphère ne réside pas dans sa structure verticale, aujourd'hui bien connue (cf. Figure 2) mais dans son hétérogénéité temporelle. L'activité solaire ou encore les conditions locales météorologiques sont des exemples de causes rendant celle-ci hétérogène dans le temps.

La propagation des signaux des satellites est altérée, d'une part, par l'atmosphère neutre (troposphère et stratosphère) et d'autre part, par l'atmosphère ionisée (ionosphère). On parle respectivement d'effets troposphériques et d'effets ionosphériques (Leick, 2004). Dans le cadre de cette étude, seuls les effets troposphériques sont étudiés.

---

<sup>2</sup> Global Positioning System

<sup>3</sup> GLObal NAVigation Satellite System

<sup>4</sup> *International Space Station* ou Station spatiale internationale

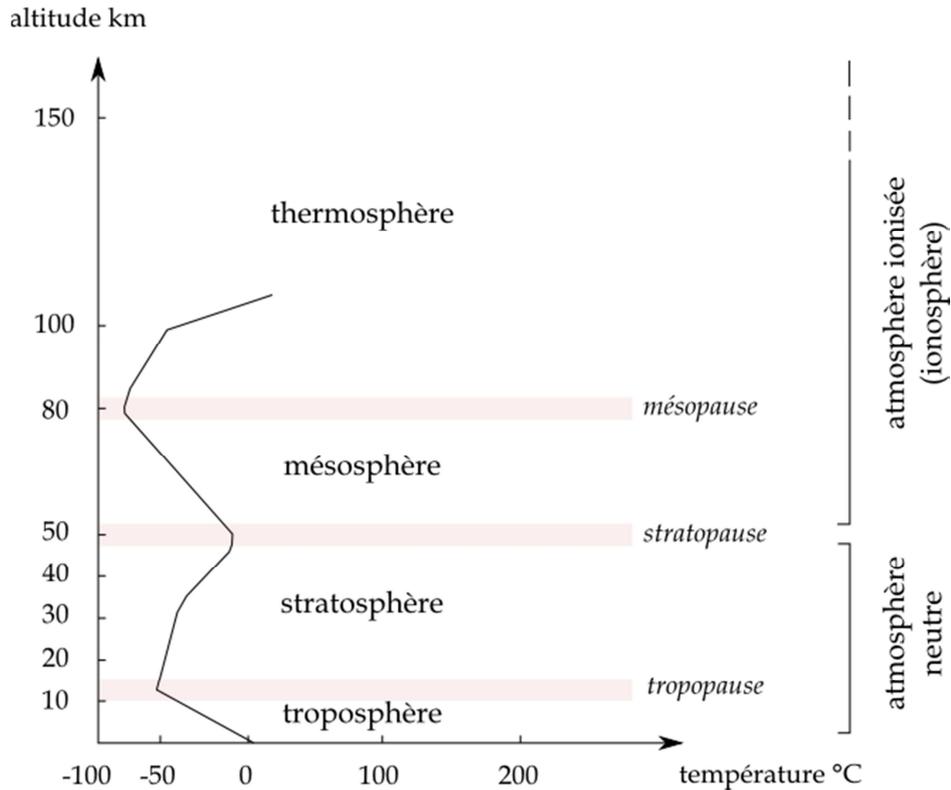


Figure 2 : Schéma des différentes couches de l'atmosphère terrestre. Source : education.meteofrance.fr [Modifié].

La troposphère est la partie de l'atmosphère terrestre située au plus proche de la surface du globe jusqu'à une altitude d'environ 8 à 15 km, selon la latitude et la saison. C'est la couche de l'atmosphère qui contient l'essentiel de la vapeur d'eau. Plus de 50 % de la vapeur d'eau atmosphérique se trouve en dessous de 2 km d'altitude et seulement 1,5 % apparaît au-dessus de la tropopause (GES DISC<sup>5</sup>).

Les ondes se propageant dans cette couche sont impactées par la variation de l'indice de réfraction qui se traduit par deux phénomènes : le ralentissement de l'onde et la courbure de sa trajectoire (cf. Figure 3). Ces phénomènes induisent un retard de propagation de l'onde qu'on appelle retard troposphérique. La mesure de ce retard permet d'avoir une image de la réfractivité de la troposphère au moment de la mesure.

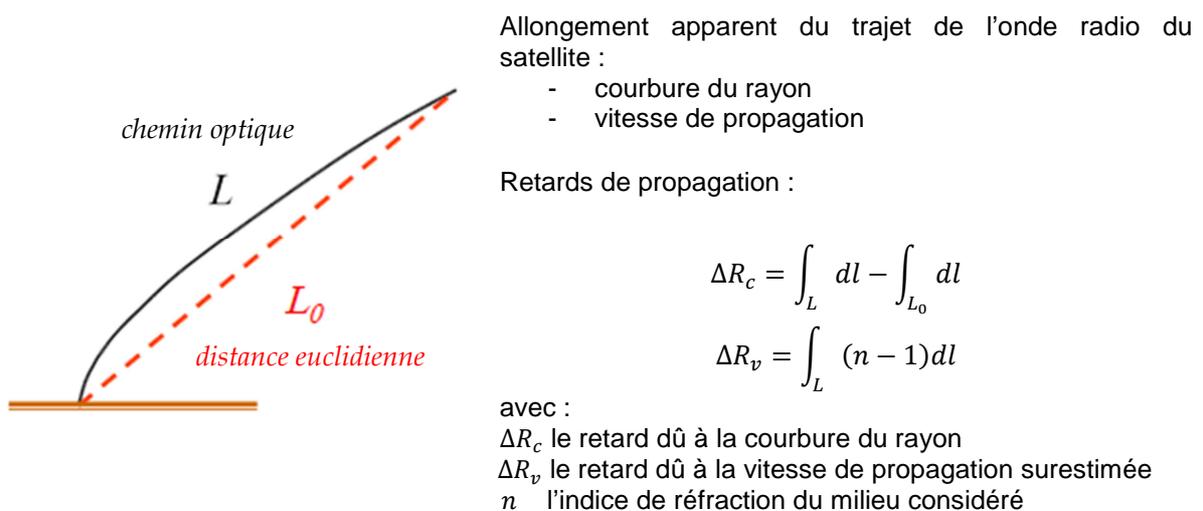


Figure 3 : Schéma des effets de la troposphère sur les ondes radio émises par les satellites. Source : Flury (Télécom Bretagne), 2014 ; Fund, 2009.

<sup>5</sup> Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (<http://daac.gsfc.nasa.gov/>)

## 1.2. Modélisation de l'atmosphère dans le positionnement GNSS

### 1.2.1. Equation d'observation

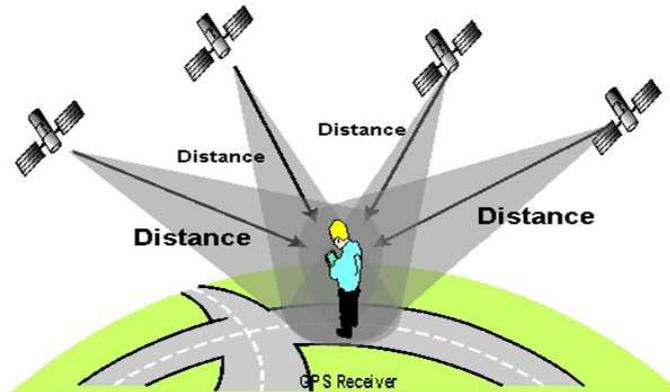


Figure 4 : Principe de triangulation d'un système de positionnement GNSS à partir de distances observées.  
Source : ALTHOS, Simplifying Knowledge.

Les systèmes de positionnement par satellites reposent sur un principe géométrique simple de triangulation à partir de mesures de distance entre le récepteur et les satellites. La bonne précision de ces systèmes de positionnement réside bien sûr dans la mesure de distance elle-même (mesures de phase ou de code), mais aussi et surtout dans la bonne modélisation de celle-ci. Cette distance mesurée ne peut en effet pas être assimilable à une simple distance euclidienne entre le récepteur et le satellite par exemple (cf. paragraphe précédent). On appelle équation d'observation la modélisation de cette distance dans la résolution d'une position par signaux GNSS. Voici une modélisation possible intégrant les décalages d'horloge du récepteur et du satellite ainsi que les effets troposphériques et ionosphériques pour une observation de phase (Leick, 2004) :

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

avec :

$\lambda$  : la longueur d'onde du signal émis par le satellite

$\varphi_i^j$  : l'observable de phase (mesure réalisée par le récepteur)

$\rho_i^j$  : la distance euclidienne entre le récepteur  $i$  et le satellite  $j$

$dt^j$  : le décalage de l'horloge du satellite  $j$  par rapport au temps GPS

$dt^i$  : le décalage de l'horloge du récepteur  $i$  par rapport au temps GPS

$N_i^j$  : le terme d'ambiguïté entière

$\rho_i^{j,iono}$  : la modélisation du retard ionosphérique

$\rho_i^{j,tropo}$  : la modélisation du retard troposphérique

Les décalages d'horloge du récepteur et du satellite sont dus à la non synchronisation des deux horloges et aux effets relativistes qui amplifient cette désynchronisation au cours du temps. Les effets relativistes sont induits par la différence de vitesse entre le récepteur placé sur la Terre en rotation et le satellite, ainsi que par la différence de potentiel gravitationnel entre le récepteur et le satellite (relativité restreinte et relativité générale). Ces phénomènes ne sont pas traités ici et

sont corrigés par la résolution des équations d'observation par double différence. En effet, la technique de calcul GNSS utilisée dans cette étude est le calcul différentiel. Ce mode de calcul implique un positionnement relatif par rapport à des stations du réseau dites de référence (connues a priori en position). Les doubles différences des observations permettent d'annuler plusieurs erreurs comme les décalages d'horloge énoncés plus haut, mais également les erreurs sur les positions des satellites (erreurs d'orbites des satellites). Dans ce cas, ce ne sont plus des positions qui sont résolues mais des vecteurs 3D

(couramment appelés « lignes de base ») entre les stations connues a priori et les stations à calculer (cf. figure 5).

Lors d'un calcul de positionnement, l'inconnue recherchée est la position du récepteur, contenue dans la distance géométrique  $\rho_i^j$ . Mais la détermination a priori de la position du récepteur permet un tout autre usage d'un système GNSS : l'étude spatiale et temporelle du comportement de l'atmosphère au-dessus du récepteur avec la détermination des termes  $\rho_i^{j,iono}$  et  $\rho_i^{j,tropo}$ . Le terme de la ionosphère sera corrigé ici avec l'utilisation de la combinaison de deux fréquences L1 et L2 pour les mesures de phase.

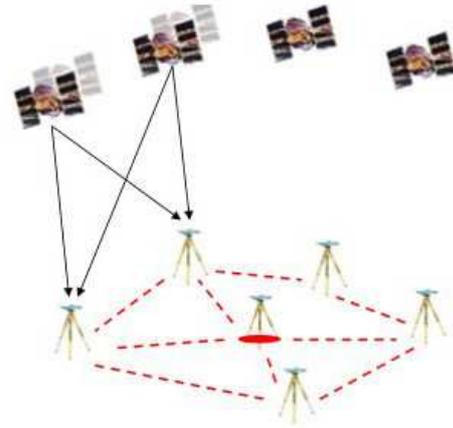


Figure 5 : Schéma de principe du calcul de position par double-différence (positionnement relatif). Les lignes de base calculées sont représentées ici en pointillé rouge et la station de référence (connue en position) par le cercle rouge au centre du réseau. Source : Jérôme Tarniewicz, 2005.

### 1.2.2. Les contributions de l'atmosphère neutre au retard troposphérique

Le terme  $\rho_i^{j,tropo}$  représente le retard troposphérique total induit par l'atmosphère neutre le long de la trajectoire du signal. Typiquement, le retard troposphérique total atteint des valeurs de l'ordre de 2.7 m (Champollion, 2005) (cf. section suivante). Il est aujourd'hui communément décomposé en trois contributions :

#### *Contribution hydrostatique*

Le retard troposphérique total est induit principalement par l'épaisseur et la densité de l'atmosphère neutre qui dépendent de l'altitude du lieu considéré et des profils verticaux de pression et de température : on appelle cette contribution le retard hydrostatique. Il compose à environ 90% le retard troposphérique total (Saastamoinen, 1972).

#### *Contribution humide*

La nature dipolaire<sup>6</sup> de la molécule de vapeur d'eau induit un retard spécifique dans la propagation des ondes radios. Celui-ci est appelé retard humide et compose entre 2 et 20% le retard troposphérique total. C'est la contribution la plus variable suivant le lieu et la période de la mesure (Saastamoinen, 1972).

#### *Contribution des hydrométéores*

Une troisième contribution existe, celle des hydrométéores présents dans l'atmosphère neutre (Brenot et al., 2008). Les hydrométéores sont les particules d'eau ou de glace résultant de la condensation ou liquéfaction de la vapeur d'eau (ex : nuages, brouillard, pluie, neige ...). C'est la plus petite contribution du retard troposphérique total (entre 0 et 3%). Cette contribution n'est

<sup>6</sup> Propriété physique de la molécule d'eau qui possède une grande différence de charge électrique entre les atomes la constituant (atome d'oxygène et d'hydrogène) : on dit que la molécule d'eau est une molécule polaire.

pas dissociée de la contribution humide par le logiciel géodésique utilisé dans cette étude et ne sera donc pas prise en compte.

En résumé, pour un récepteur « i » et un satellite « j », le retard troposphérique total dû à la troposphère peut s'énoncer mathématiquement de la manière suivante :

$$T_{i\ total}^j = T_{i\ hydrostatique}^j + T_{i\ humide}^j + T_{i\ hydrométéores}^j \quad (2)$$

### 1.2.3. Modélisation du retard troposphérique

Les logiciels de calculs géodésiques actuels modélisent le retard troposphérique total par une distance parcourue par l'onde dans la direction du satellite (azimut, élévation) : c'est le retard total suivant la pente (Slant Total Delay ou STD) exprimé en mètres. D'après l'équation (2), celui-ci est décomposable en 2 composantes (en négligeant les hydrométéores) : le retard hydrostatique suivant la pente (Slant Hydrostatic Delay ou SHD) et le retard humide suivant la pente (Slant Wet Delay ou SWD).

#### Fonctions de projection (Mapping Functions)

La mesure de phase nécessitant la résolution d'ambiguïtés entières, la détermination des STD directement par double différence n'est pas possible (trop d'inconnues par rapport aux nombres d'équations, Brenot et al., 2008). Les retards selon la pente sont donc convertis en des retards zénithaux (considérés constants sur une certaine durée) à l'aide de fonctions de projection couramment appelées Mapping Functions. La Figure 6, ci-après, illustre le principe de détermination des délais zénithaux totaux<sup>7</sup> (Zenith Total Delay ou ZTD) en projetant les STD au zénith.

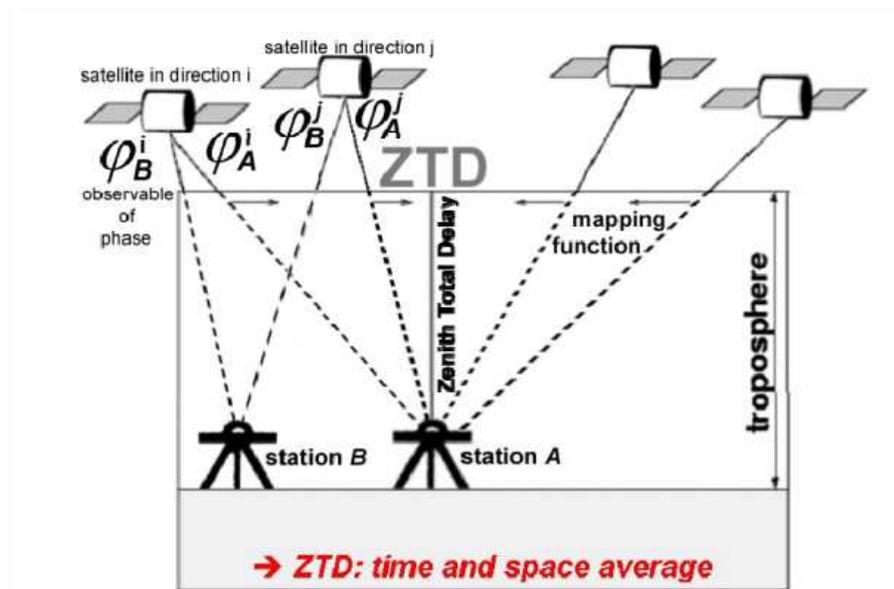


Figure 6 : Illustration des ZTD obtenus par projections des STD à l'aide de fonctions de projection (Mapping Functions). Les ZTD sont supposés constants sur une certaine durée (fenêtre temporelle paramétrée dans le logiciel de calcul) et sont estimés à l'aide de l'ensemble des observables de phases sur cette période. La valeur estimée d'un ZTD est donc une moyenne dans le temps et l'espace et non une valeur « juste ». Source : Brenot et al., 2008.

<sup>7</sup> A noter que pour le logiciel GAMIT, ce sont les ZWD qui sont directement estimés par moindres carrés en calculant a priori les valeurs des ZHD. D'autres logiciels estiment les ZTD et retranchent à ceux-ci, dans un second temps, les valeurs des ZHD pour obtenir les ZWD.

Les fonctions de projection prises pour cette étude sont toutes de la forme de l'équation 3. A noter, qu'elles ne prennent pas en compte l'azimut des satellites<sup>8</sup>. Pour cette raison, on dit que le ZTD représente la contribution isotrope du retard troposphérique.

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

avec,  $a, b, c$ , coefficients empiriques  
 $el$ , élévation du satellite

#### Gradient de délai horizontal

Du fait du grand nombre d'observables enregistrées pour le calcul des retards troposphériques, un second terme, complémentaire au ZTD, peut être estimé : le gradient de délai horizontal. Ce terme peut être vu comme une correction des Mapping Functions qui ne tiennent pas compte de l'hétérogénéité azimutale de l'atmosphère. Le gradient de délai horizontal dépend donc de l'azimut du satellite mais également de son élévation et possède sa propre fonction de projection. On peut schématiser cette correction des Mapping Functions par une atmosphère d'épaisseur et de densité linéairement variable. La Figure 7, ci-dessous, représente cette schématisation du gradient de délai horizontal à l'aide d'une atmosphère plane inclinée : on dit que celui-ci représente la contribution anisotrope du retard troposphérique.

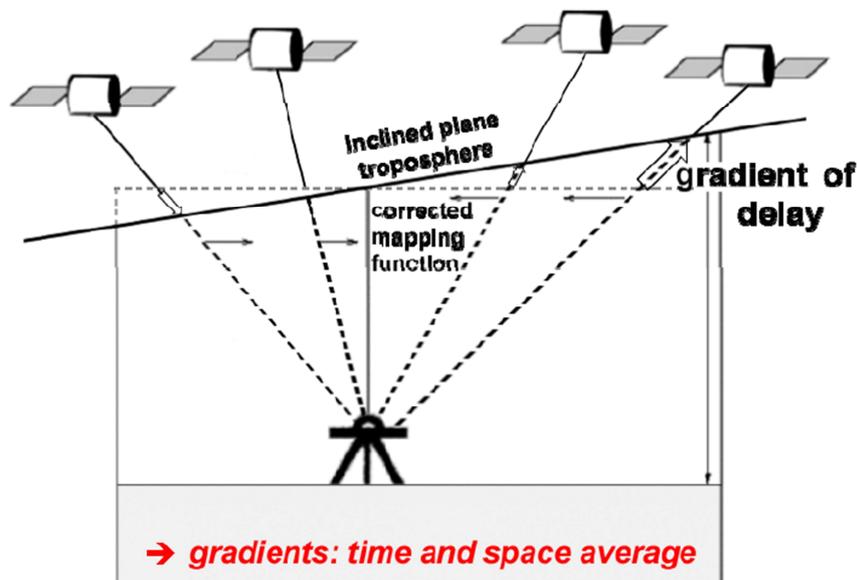


Figure 7 : Schéma des gradients de délai horizontal modélisant le caractère anisotrope de l'atmosphère. De la même manière que les ZTD, la valeur estimée d'un gradient de délai horizontal est une moyenne dans le temps et l'espace. Source : Brenot et al., 2008.

Le gradient de délai horizontal est estimé suivant deux composantes Nord-Sud (gradNS) et Est-Ouest (gradEW). Il est décomposable également en une contribution humide et hydrostatique.

<sup>8</sup> Des fonctions de projection prenant en compte l'azimut des satellites ont été développées notamment à l'Université Technologique de Vienne. La fonction de projection « VMF2 » en est un exemple (Böhm et al., 2005). L'estimation de gradients de délai horizontal devient alors obsolète (voir paragraphe « Gradient de délai horizontal »). Cependant, ces types de fonctions de projection ne sont pas présentés dans les logiciels actuels car encore trop lourds à mettre en œuvre.

En résumé, la modélisation mathématique du STD peut s'écrire de la manière suivante :

$$STD = ZTD \times mf(el) + [gradNS \times \sin(az) + gradEW \times \cos(az)] \times mf_g(el) \quad (4)$$

Ou encore, suivant ses composantes humide et hydrostatique (cf. Figure 8) :

$$\begin{aligned} SHD &= ZHD \times mf_h(el) + [gradNS_h \times \sin(az) + gradEW_h \times \cos(az)] \times mf_{gh}(el) \\ SWD &= ZWD \times mf_w(el) + [gradNS_w \times \sin(az) + gradEW_w \times \cos(az)] \times mf_{gw}(el) \\ STD &= SHD + SWD \end{aligned} \quad (5)$$

avec :

$ZHD$  : le retard hydrostatique au zénith

$ZWD$  : le retard humide au zénith

$mf_h(el)$ ,  $mf_w(el)$  : les fonctions de projections respectivement des  $ZHD$  et  $ZWD$

$gradNS_h$ ,  $gradEW_h$  : les gradients hydrostatiques Nord-Sud et Est-Ouest

$gradNS_w$ ,  $gradEW_w$  : les gradients humides Nord-Sud et Est-Ouest

$mf_{gh}(el)$  : la fonction de projection des gradients hydrostatiques

$mf_{gw}(el)$  : la fonction de projection des gradients humides

$az$ ,  $el$  : l'azimut et l'élévation du satellite

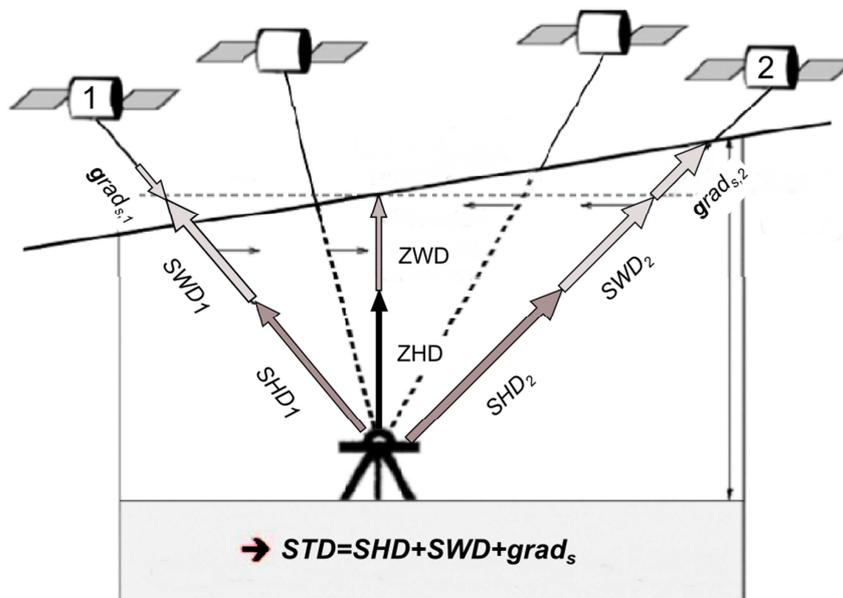


Figure 8 : Schéma de la modélisation des STD et de leur projection au zénith, le ZTD. Source : Brenot et al., 2008 [Modifié].

#### 1.2.4. ZHD a priori, modèles météorologiques et fonctions de projection a priori

Les composantes humide et hydrostatique du retard troposphérique ne sont pas dé-corrélabes par traitement GNSS. De fait, une des composantes doit être connue a priori, de même que les fonctions de projection. La composante humide étant très aléatoire et difficilement prédictible, c'est la composante hydrostatique, relativement stable, qui est calculée a priori. Ci-après, l'expression du ZHD, intégration de la composante hydrostatique de la troposphère dans la direction du zénith :

$$ZHD = 10^{-6} \times k_1 \times \int_L \frac{P}{T} dH \quad (6)$$

avec :

$k_1$  : coefficient empirique

$L$  : épaisseur de la troposphère au zénith

$P$  : la pression à l'altitude  $H$

$T$  : la température à l'altitude  $H$

$dH$  : intégration suivant plusieurs couches d'épaisseur  $dH$

#### *ZHD a priori*

En l'absence de mesures « in situ », le ZHD peut être calculé à l'aide de modèle météorologique 2D de pression et température au sol (cf. section suivante). On entend par modèle météorologique 2D, la modélisation des paramètres météorologiques au sol (pas de modélisation pour la composante verticale) (cf. Figure 9). A partir de ces données de pression et température, plusieurs modèles permettent de reconstituer le ZHD. On trouve notamment le modèle de Saastamoinen (1972), celui de Baby et al. (1988) ou encore celui d'Hopfield (1969) (cf. Figure 10). Le modèle retenu dans cette étude est celui de Saastamoinen (cf. équation 7 ci-dessous), notamment lors de l'utilisation du logiciel GAMIT<sup>9</sup>.

$$ZHD^{a\ priori} = \frac{0.002277 \times P_s}{f(\varphi, H)} \quad (7)$$

La fonction  $f(\varphi, H) = 1 - 0.0026 \times \cos(2\varphi) - 0.000279 \times H$ , est une fonction de  $H$ , la hauteur de la station au-dessus du géoïde, et de  $\varphi$ , sa latitude ;  $P_s$  est la pression au sol. Le modèle de Saastamoinen ne dépend pas de la température au sol à la différence des modèles de Baby et al. et d'Hopfield (Brenot, 2006 ; Fund, 2009).

Une deuxième manière de calculer les ZHD a priori est l'intégration de données météorologiques 3D (ex : profils verticaux des paramètres de pression et de température) à l'aide de l'équation (6). Les données météorologiques 3D se sont beaucoup développées ces dernières années avec le nombre croissant de satellites météo (ex: Meteosat, ERS<sup>10</sup>). Le centre européen<sup>11</sup> qui collecte ces données est l'European Centre for the Medium-range Weather Forecast (ECMWF). Depuis 2006, l'Université de Technologie de Vienne offre un produit appelé Vienna ZHD (plus couramment appelé VZHD, cf. Figures 10 et 11) d'après l'intégration des données de l'ECMWF. Ces VZHD sont également utilisés dans cette étude.



Figure 9 : Exemple de modèle météorologique 2D de pression (à gauche) et de température (à droite) : modèle « Global Pressure and Temperature » (cf. section suivante). Source : Fund, 2009.

<sup>9</sup> Global positioning system Analysis at Massachusetts Institute of Technology: logiciel de calcul géodésique développé par le MIT et l'université d'Harvard.

<sup>10</sup> European Remote-sensing Satellite

<sup>11</sup> D'autres centres collectent et diffusent des données satellitaires météorologiques. On retrouve notamment le centre américain, le NCEP (National Center for Environmental Prediction) ou encore le centre canadien, le MSC (Meteorological Service of Canada)

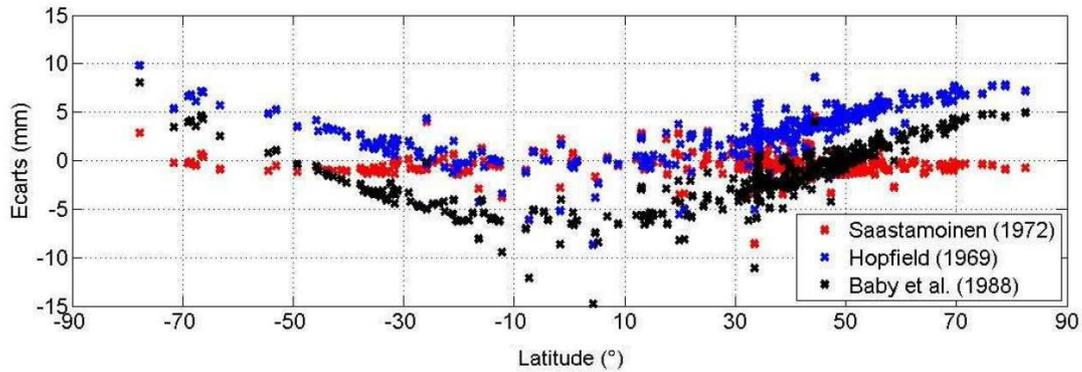


Figure 10 : Comparaison des ZHD issus des modèles de Saastamoinen (1972), de Baby et al. (1988) et d'Hopfield (1969) par rapport à la mesure étalon que représente aujourd'hui les VZHD. Source : Fund, 2009.

### Modèles météorologiques

Comme mentionné plus haut, les modèles météorologiques sont une solution alternative aux mesures « in situ » qui sont coûteuses en de nombreux aspects (calibration des instruments, installation sur site, entretien ...).

Le modèle le plus simpliste, utilisé avant l'avènement des modèles de prédiction météorologique, est le modèle « Standard Pressure and Temperature » (SPT). Il consiste à extrapoler à hauteur des sites voulus des valeurs standards de pression, température et humidité relative<sup>12</sup>. Ce modèle, peu précis car ne tenant pas compte des variabilités spatio-temporelles des paramètres météorologiques n'est pas utilisé dans cette étude.

En 2007, Boehm et al. proposent une modélisation annuelle de la pression et de la température à partir de 3 ans de données de l'ECMWF : c'est le modèle « Global Pressure and Temperature » (GPT) (cf. Figure 11). Un des tests effectués dans cette étude est la comparaison de ce modèle avec des mesures « in situ » pour le calcul des ZHD (cf. paragraphe 3.1.2).

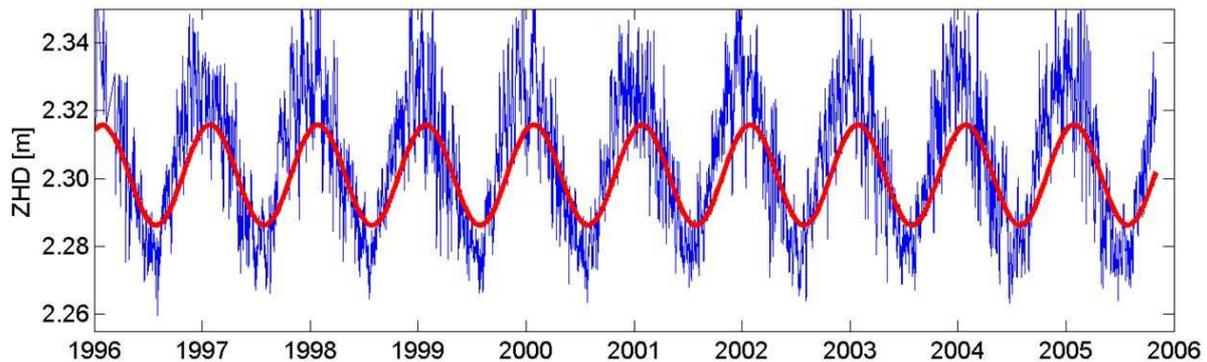


Figure 11 : Comparaison de différents calculs de ZHD, avec en bleu les VZHD et en rouge les ZHD calculés à partir du modèle météorologique GPT (modèle de reconstitution utilisé : Saastamoinen). Illustration des variations d'amplitude annuelle de pression prises en compte par le modèle GPT. Résultat d'une étude sur Wuhan (capitale de la province du Hubei, en Chine). Source : Steigenberger, Boehm, Tesmer (2008)

<sup>12</sup> Les données météorologiques de références standards sont 1013,25 hPa pour la pression, 20°C pour la température et 50% pour l'humidité relative. La formule d'extrapolation de la pression du modèle SPT est aussi connue sous le nom du modèle de Berg de 1948 (Fund, 2009).

### Fonctions de projection a priori

Plusieurs fonctions de projection existent suivant le type de paramètre à projeter (paramètre hydrostatique, paramètre humide, gradient, retard). Pour notre étude, nous devons faire appel à ces fonctions par deux fois dans la chaîne de traitement. Une première fois, avec le logiciel GAMIT, pour la résolution des retards atmosphériques au zénith des stations (calculs pré-tomographiques), et une seconde fois, avec le logiciel TSAAR<sup>13</sup>, pour la reconstitution des retards obliques (tomographie).

Trois principaux produits sont aujourd’hui disponibles. La « Niell Mapping Function » (NMF), basée sur des radiosondages en Amérique du Nord, faisait office de modèle standard et permettait de traduire des variations moyennes d’amplitude annuelle des fonctions de projection, en fonction de la latitude.

La « Vienna Mapping Function 1 » (VMF1) est le produit le plus précis avec une résolution d’environ 200 km (latitude, longitude) et est basé, comme les VZHD, sur les données opérationnelles de l’ECMWF.

Enfin, la « Global Mapping Function » (GMF), est un modèle des données de la VMF1 permettant de traduire les variations d’amplitude annuelle de celles-ci (modélisation par harmoniques sphériques). A noter que la GMF et la NMF, modèles empiriques, permettent de faire des traitements en temps réel alors que la VMF1 est issue de mesures réalisées toutes les 6 heures.

Pour les gradients, la fonction de projection utilisée est celle développée par Chen et Herring (1997) (cf. équation 8).

$$mf_g = \frac{1}{(\sin(el) \times \tan(el) + c)} \quad (8)$$

avec :

$el$  , élévation du satellite

$c$  , constante hydrostatique ou constante humide

Le Tableau ci-dessous, résume les fonctions de projection utilisées pour cette étude.

Type de paramètre	Fonctions utilisées avec GAMIT	Fonctions utilisées avec TSAAR
Retard hydrostatique	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ VMF1 (Boehm et al., 2006)</li><li>▪ GMF (Boehm et al., 2006)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ NMF (Niell, 1996)</li></ul>
Retard humide	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ VMF1 (Boehm et al., 2006)</li><li>▪ GMF (Boehm et al., 2006)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ NMF (Niell, 1996)</li></ul>
Grad. total	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Chen et Herring (1997) (c=0,0031)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Chen et Herring (1997) (c=0,0031)</li></ul>
Grad. hydrostatique	×	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Chen et Herring (1997) (c=0,0031)</li></ul>
Grad. humide	×	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Chen et Herring (1997) (c=0,0007)</li></ul>

Tableau 1 : Fonctions de projection utilisées avec les logiciels GAMIT et TSAAR pour cette étude.

<sup>13</sup> Tomography Software for wAter vApour Retrieval (Reverdy, 2008)

La Figure 12 ci-dessus résume les différents produits présentés précédemment à fournir à un logiciel de calcul géodésique pour obtenir les ZWD et les gradients totaux nécessaires à la tomographie. On retrouve les 2 méthodes de calcul pour les ZHD à savoir, la méthode par intégration de données météorologiques 3D (VZHD), ou la méthode par reconstitution à partir de la pression et de la température au sol (modèles météorologiques 2D ou mesures « in situ »). Pour le logiciel GAMIT utilisé dans cette étude, le modèle de Saastamoinen et les fonctions de projections de Chen et Herring pour les gradients sont prédéfinis. Pour le reste (fonctions de projection pour les retards ou encore la méthode de calcul des ZHD), le choix appartient à l'utilisateur.

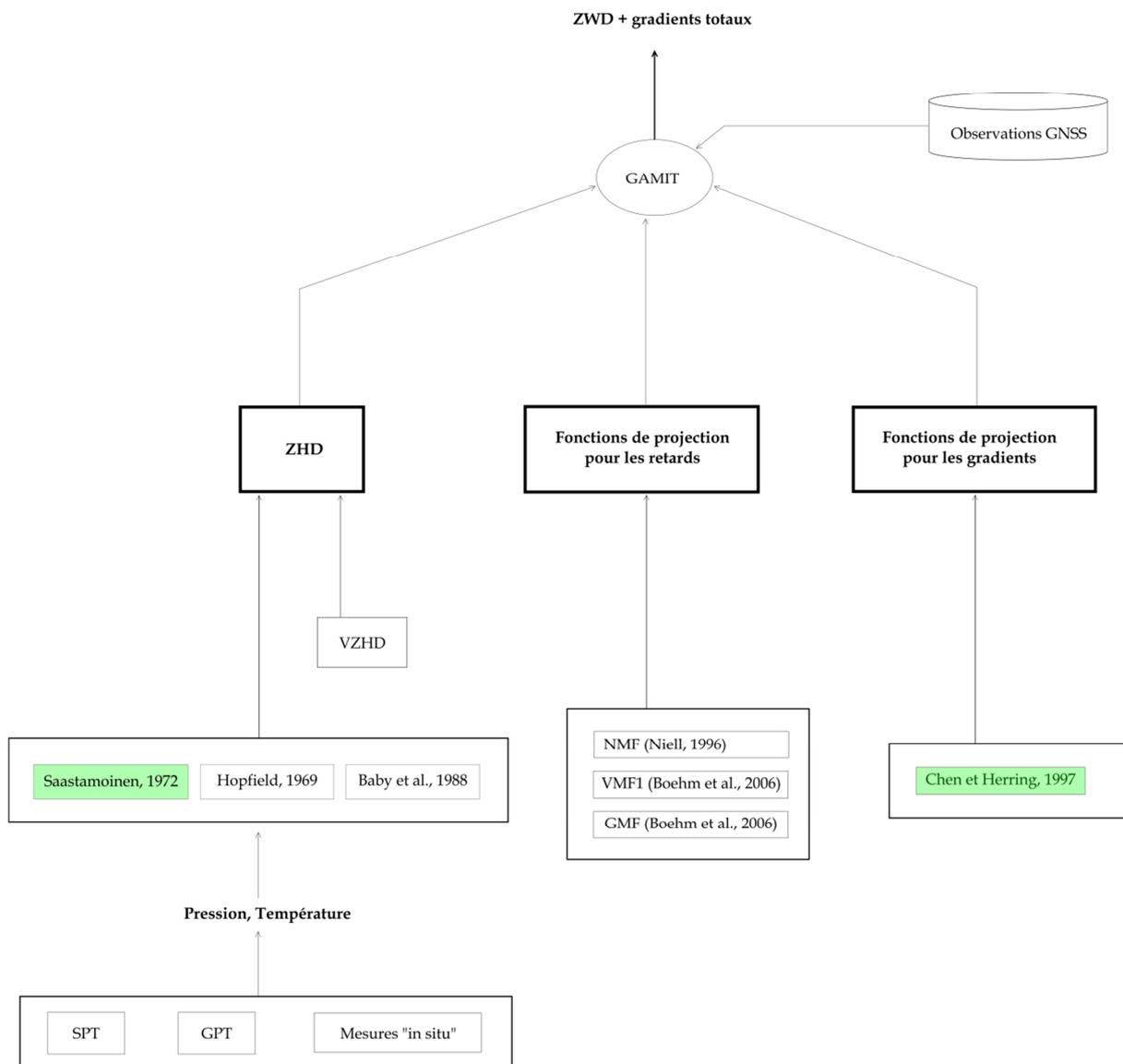


Figure 12 : Schéma de principe illustrant les paramètres connus a priori à fournir au logiciel GAMIT pour obtenir les ZWD et les gradients totaux ; on retrouve le ZHD et les fonctions de projection. En vert, les produits prédéfinis pour le logiciel GAMIT.

### 1.3. Tomographie troposphérique GNSS

#### 1.3.1. Principe théorique

Étymologiquement, la tomographie vient du grec ancien « tomos » signifiant coupe, tranche et de « graphein » signifiant écrire. La tomographie consiste donc à reconstruire le volume d'un objet par coupes à partir de mesures externes.

La tomographie est une technique d'imagerie, très utilisée dans l'imagerie médicale, ainsi qu'en géophysique et en astrophysique. D'un point de vue mathématique, cette technique se décompose en deux étapes. Tout d'abord elle nécessite l'élaboration d'un modèle direct, décrivant suffisamment fidèlement les phénomènes physiques tels qu'ils sont mesurés. Ensuite, on détermine le modèle inverse ou reconstruction servant à retrouver la distribution tridimensionnelle en se fondant sur le modèle direct. Un exemple simple serait un dérivé du carré magique, où l'on dispose dans un carré trois lignes de trois chiffres, avec la seule condition que les chiffres de 1 à 9 n'apparaissent qu'une fois. Le modèle direct consisterait à calculer la somme de chaque ligne et de chaque colonne d'un carré déjà rempli. Le modèle inverse consiste, connaissant les sommes, à remplir le carré (cf. Figure 13 ci-dessous).

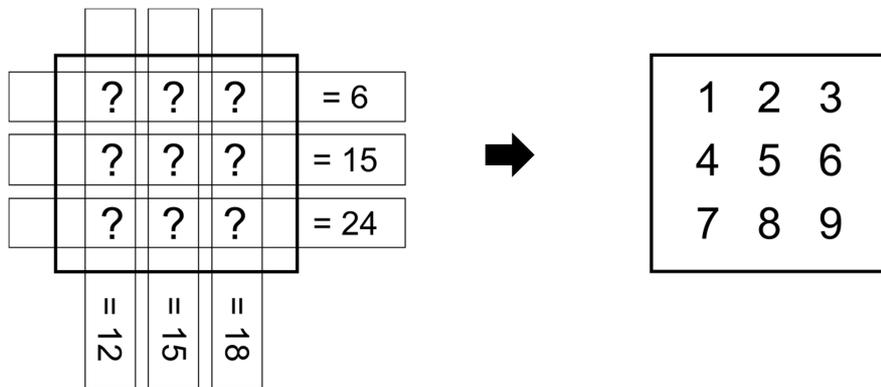


Figure 13 : Principe tomographique schématisé par l'exemple dérivé d'un carré magique (mathématique)

La technique de la tomographie est applicable aux systèmes GNSS pour reconstituer la distribution 3D en vapeur d'eau de la troposphère. En effet, comme vu précédemment, grâce aux observations GNSS, nous pouvons connaître le contenu total de vapeur d'eau présent au zénith d'une station grâce aux ZWD : c'est la mesure externe explicitée ci-dessus et le point de départ du calcul tomographique.

#### 1.3.2. Des ZWD au Contenu Intégré en Vapeur d'Eau (CIVE)<sup>14</sup>

Les mesures GNSS de ZWD ne sont pas directement exploitables lorsqu'on s'intéresse à la teneur en vapeur d'eau de la troposphère. En effet celles-ci ne représentent qu'un retard exprimé en mètres. Hogg et al. en 1981 définissent un lien de proportionnalité entre un retard humide et la quantité intégrée de vapeur d'eau liée à ce retard (cf. équation 9). Le facteur de proportionnalité, nommé  $\kappa$ , vaut environ  $\frac{10^3}{6}$  en unité SI (Système International). Environ 6 mm de ZWD équivaut à 1 kg/m<sup>2</sup> de contenu intégré en vapeur d'eau.

$$I WV = \kappa \times ZWD \quad (9)$$

<sup>14</sup> Le contenu intégré en vapeur d'eau est également couramment dénommé « IWV » pour sa traduction anglaise « Integrated Water Vapor ».

Plusieurs études ont été menées pour estimer ce lien de proportionnalité. Bevis et al., en 1992, à partir de radiosondages réalisés aux Etats-Unis, définissent une formule simplifiée de  $\kappa$  à partir de la température au sol (cf. équation 10). Le logiciel de tomographie TSAAR utilisé dans cette étude reprend les équations plus précises d'Emardson et Derks (1999) qui définissent le coefficient  $\kappa$  de manière empirique pour 4 régions européennes (Baltique, centre Europe, Atlantique et Méditerranée, cf. figure 14) à partir également de la température au sol (cf. équation 11). Les coefficients d'Emardson et Derks pour notre étude correspondent à ceux de la zone centre Europe, soit  $a_0 = 6.448$ ,  $a_1 = -0.0159$ ,  $a_2 = -0.000012$  et  $T_m = 283.71$  Kelvin.

$$\kappa_{Bevis} \approx \frac{10^8}{R_w(\frac{k_3}{T_m} + k'_2)} , \text{ avec } T_m \approx 70.2 + 0.72 \times T_s \quad (10)$$

$$\kappa_{E\&D} \approx \frac{10^3}{a_0 + a_1(T_s - T_m) + a_2(T_s - T_m)^2} \quad (11)$$

avec,  $R_w$  la constante spécifique molaire de la vapeur d'eau,  $k_3$  et  $k'_2$  des coefficients de réfractivité de l'atmosphère,  $T_m$  la température moyenne de la colonne d'air le long du trajet d'onde et  $T_s$  la température au sol.

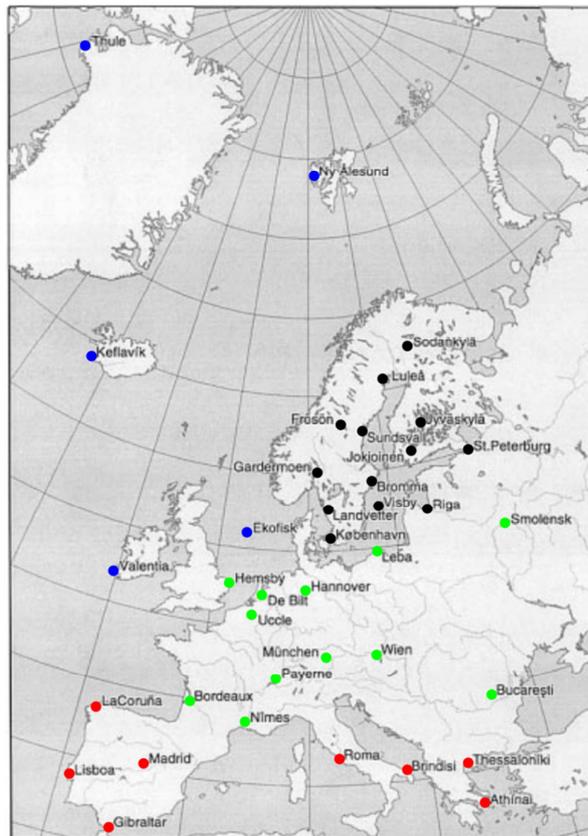


Figure 14 : Ci-dessus les 38 sites de radiosondages utilisés par Emardson et Derks pour leur calcul de la relation entre le retard humide et le contenu intégré en vapeur d'eau. En vert, les sites pour la région centre Europe, en rouge, la région Méditerranée, en bleu, la région Atlantique et en noir la région Baltique. Source : Emardson et Derks, 2000 [Modifié].

Les données de radiosondages d’Emardson et Derks datent des années quatre-vingt-dix (1989-1997) ; de récents travaux (programme de recherche lancé en 2011 par le fond de recherche scientifique hongrois notamment) bénéficiant de nouvelles données de radiosondages ont permis d’améliorer légèrement le modèle d’Emardson et Derks pour la région centre Europe (cf. Figure 15). Les nouveaux coefficients calculés ont été implémentés dans la version de TSAAR pour cette étude.

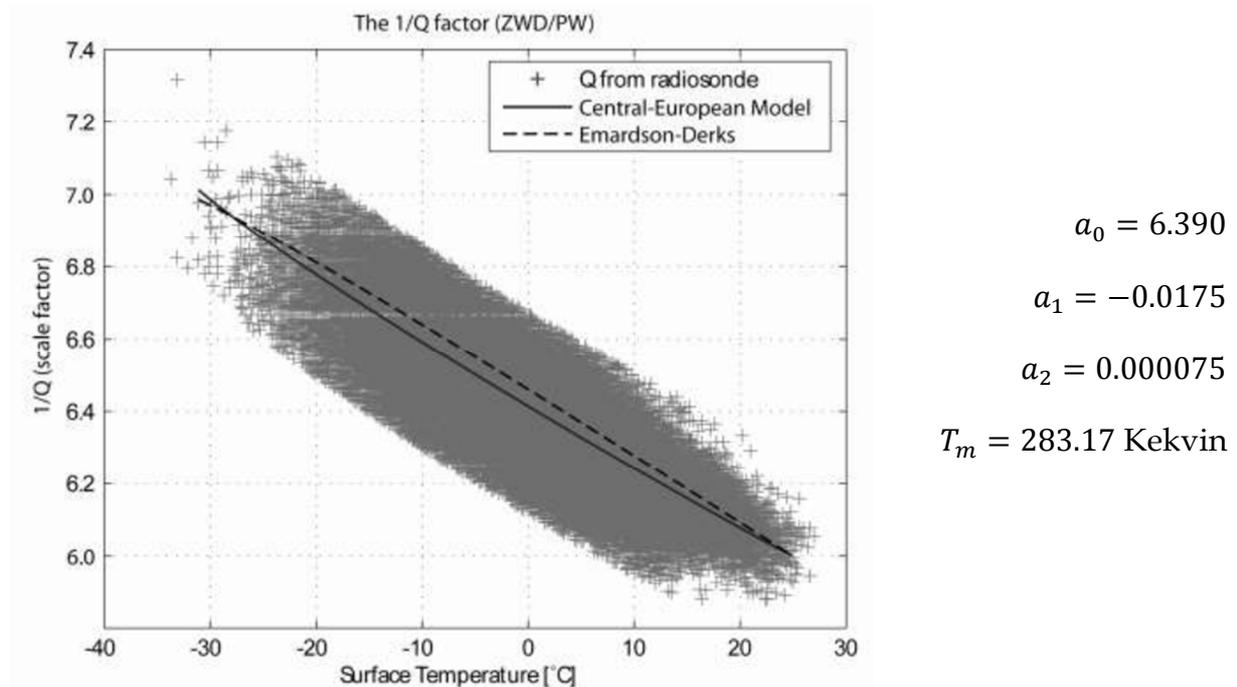


Figure 15 : Amélioration du modèle d’Emardson et Derks grâce à des nouvelles données de radiosondages. A droite, les récents coefficients calculés par le département de géodésie de l’université de Budapest pour la région centre Europe. Source : Ròzsa, 2012.

Le calcul des IWV est véritablement le premier résultat exploitable. Cette valeur nous donne la quantité de vapeur d’eau au zénith d’une station (sans information sur sa répartition verticale). Ce premier calcul permet une première analyse sur la répartition horizontale de la vapeur d’eau à l’échelle du réseau considéré.

### 1.3.3. Reconstitution des contenus intégrés en vapeur d’eau obliques (SIWV)

La seconde étape du calcul tomographique est de reconstituer les contenus intégrés en vapeur d’eau oblique (SIWV<sup>15</sup>), c’est-à-dire dans la direction du signal reçu (direction du SWD) en faisant l’approximation d’une propagation du signal en ligne droite. D’après les équations 5 et 9, on peut définir les SIWV de la façon suivante :

$$SIWV = \kappa \times [ZWD \times mf_w(el) + [gradNS_w \times \sin(az) + gradEW_w \times \cos(az)] \times mf_{gw}(el)] \quad (12)$$

On a recours, une deuxième fois, aux fonctions de projection des retards humides et aux gradients humides, correction azimutale des projections. Dans la littérature, on trouve une troisième composante permettant de rendre plus fidèle encore la reconstitution des SIWV. En se rappelant que les ZWD sont calculés à partir de moyennes dans le temps et l’espace, des résidus peuvent être calculés dans la direction de chaque satellite ayant permis le calcul du ZWD.

<sup>15</sup> Slant Integrated Water Vapor

Néanmoins, ces résidus font toujours aujourd’hui l’objet d’étude afin de savoir si toute l’information qu’ils contiennent est bien liée au retard humide. En effet, on peut retrouver dans ces résidus l’influence de multi-trajets par exemple. Dans cette étude, nous nous limiterons à l’équation 12 avec une deuxième approximation : les gradients humides seront considérés égaux aux gradients totaux. En toute rigueur, il faudrait retrancher les gradients hydrostatiques aux gradients totaux pour obtenir les gradients humides qui nous intéressent. C’est une des perspectives d’amélioration du logiciel TSAAR. Pour cette étude, nous avons fait l’approximation que les gradients hydrostatiques sont nuls alors qu’ils existent mais ont une valeur faible (inférieure à 25% des gradients totaux, Brenot, 2014).

Les contenus intégrés de vapeur d’eau obliques donnent une information sur la quantité totale de vapeur d’eau rencontrée par le signal lors de son trajet depuis le satellite vers le récepteur. La tomographie va permettre de restituer sa répartition dans l’espace, notamment sa répartition verticale.

### 1.3.4. Inversion tomographique par la méthode des moindres carrés pondérés amortis

Une fois les SIWV reconstitués entre chaque station et chaque satellite, on procède à la discrétisation de l’espace au-dessus du réseau en « boîtes » appelées « voxels ». La figure 16 ci-dessous illustre cette discrétisation avec  $p$  et  $q$  les nombres de voxels pour la bi-dimension horizontale et  $r$  le nombre de voxels pour la dimension verticale. On peut définir un voxel en position :  $V_{j,k,l}$  avec  $j \in [1,p]$ ,  $k \in [1,q]$  et  $l \in [1,r]$ .

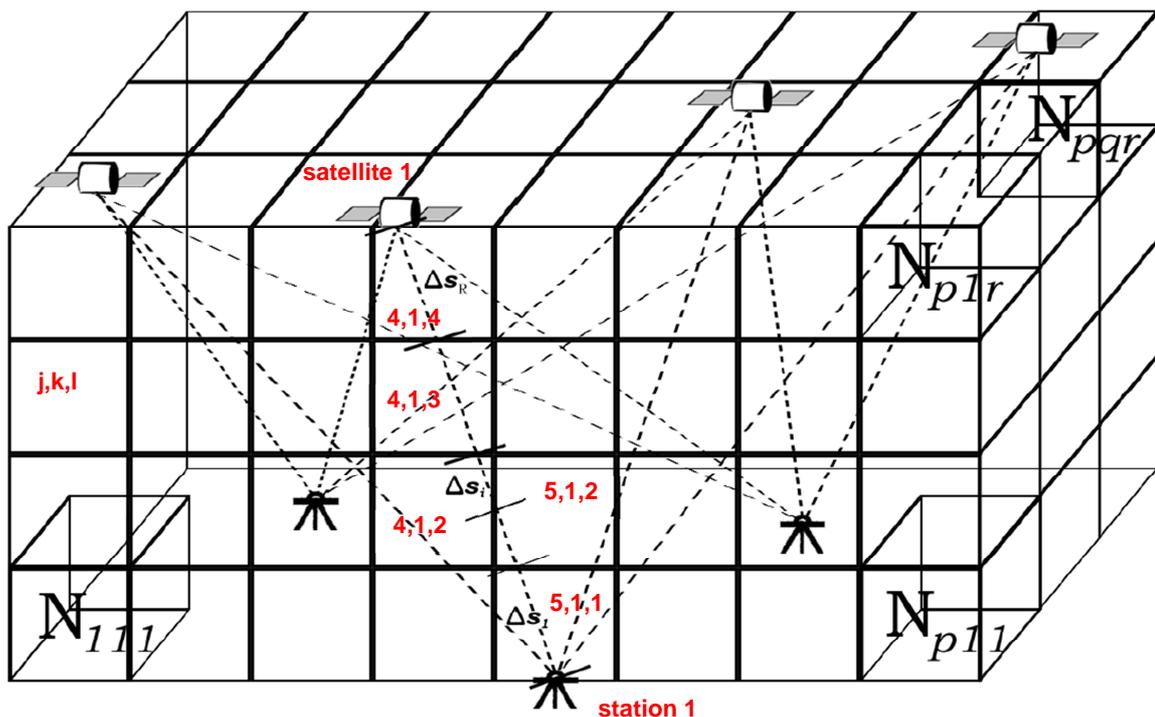


Figure 16 : Discrétisation de l’espace en une grille tomographique. En pointillé, les SIWV entre chaque satellite et chaque station du réseau. Dans le plan de la feuille, pour la station 1 et le satellite 1, sont représentés les segments de propagation  $\Delta s_i$  de l’onde à travers la grille de voxels. Source : Brenot, 2006 [Modifié].

Le contenu intégré en vapeur d’eau oblique entre un satellite et une station se définit par :

$$SIWV = \int_L \rho \, dl \quad (13)$$

avec  $\rho$ , la densité de vapeur d’eau,  $dl$  un élément de longueur et  $L$  la longueur du trajet de l’onde dans la troposphère (on appelle couramment ce trajet de l’onde, un « rai »).

Une fois la troposphère discrétisée en voxels, il vient :

$$SIWV = \sum_{i=1}^R \rho_{j,k,l} \Delta S_i \quad (14)$$

avec  $\rho_{j,k,l}$  la densité de vapeur d'eau dans un voxel et  $\Delta S_i$ , le segment de propagation de l'onde dans ce voxel.

Pour l'exemple illustré dans la figure 16 entre le satellite 1 et la station 1, cela donne :

$$SIWV = \rho_{5,1,1} \Delta S_1 + \rho_{5,1,2} \Delta S_2 + \rho_{4,1,2} \Delta S_3 + \rho_{4,1,3} \Delta S_4 + \rho_{4,1,4} \Delta S_5 \quad (15)$$

L'équation 15 est l'équation d'observations pour la résolution par moindres carrés du problème inverse de la tomographie troposphérique. Les SIWV sont les observations du problème et les densités de vapeur d'eau dans chaque voxel ( $\rho_{j,k,l}$ ) sont les inconnues (cf. équation 16 ci-dessous).

$$\begin{bmatrix} SIWV_1 \\ SIWV_2 \\ \vdots \\ SIWV_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta_{S_{1,1}} & \Delta_{S_{2,1}} & \Delta_{S_{3,1}} & \Delta_{S_{4,1}} & \dots & \Delta_{S_{m,1}} \\ \Delta_{S_{1,2}} & \Delta_{S_{2,2}} & \Delta_{S_{3,2}} & \Delta_{S_{4,2}} & \dots & \Delta_{S_{m,2}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_{S_{1,n}} & \Delta_{S_{2,n}} & \Delta_{S_{3,n}} & \Delta_{S_{4,n}} & \dots & \Delta_{S_{m,n}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$L = A \times X + V$$

avec  $n$ , le nombre d'observations (le nombre de rai à un instant donné)

$m$ , le nombre de voxels ( $=j*k*l$ )

$L$ , vecteur des observations

$X$ , vecteur des inconnues

$V$ , vecteur des résidus

Une des spécificités du problème de l'inversion tomographique est que c'est un problème à la fois surdéterminé et indéterminé : on dit que c'est un problème mixte (Réverdy, 2008). En effet, pour un calcul à un instant  $t$  donné, tous les voxels ne sont pas traversés par un rai du fait du nombre limité de satellites GNSS en orbite autour de la Terre. De ce fait, la méthode des moindres carrés pondérés ne permet pas la résolution des densités à l'intérieur de chaque voxel. C'est la méthode des moindres carrés pondérés amortis qui est utilisée. Cette méthode combine deux critères d'ajustement : l'ajustement par la minimisation de la somme des carrés des résidus (moindres carrés classiques pour la partie surdéterminée du problème) et l'ajustement par la minimisation de la norme du vecteur inconnu (pour la partie indéterminée du problème). A noter que la combinaison de ces 2 critères d'optimisation impose d'avoir des valeurs initiales au problème. L'équation 16 devient alors :

$$B = A \times (X - X_0) + V \quad \text{avec} \quad B = L - A \times X_0 \quad (17)$$

L'inconvénient majeur de cette méthode est que l'ajustement par la minimisation de la norme du vecteur inconnu influence la résolution par moindres carrés classiques des voxels surdéterminés. C'est un inconvénient majeur puisque l'optimisation par la minimisation de la norme du vecteur inconnu n'a pas de sens physique et permet juste de rendre possible la résolution mathématique

du problème en donnant une valeur à priori aux voxels indéterminés. Cette influence est ajustable par l'intermédiaire d'un coefficient, appelé  $\alpha$  (cf. équation 18 ci-dessous).

$$M = E + \alpha^2 \times R \quad \text{avec} \quad E = \sum_i v_i^2 \quad \text{et} \quad R = \sum_i (x_i - x_{0_i})^2 \quad (18)$$

Le critère d'ajustement des moindres carrés pondérés amortis est la minimisation de la quantité  $M$ . Plus  $\alpha$  est grand et plus on va privilégier la minimisation de  $R$  (norme du vecteur  $X - X_0$ ), plus  $\alpha$  est petit et plus on va privilégier la minimisation de  $E$  (somme des carrés des résidus). Autrement dit, si  $\alpha$  est trop grand on privilégie les valeurs initiales sur les observations et l'effet de l'inversion tomographique est nul. A l'inverse, une valeur trop petite de  $\alpha$  privilégie les observations mais entraîne malheureusement un mauvais conditionnement des matrices lors du calcul matriciel et enlève aux résultats leur intégrité (cf. Champollion, 2005). Comme on peut le voir, la détermination d'une bonne valeur de  $\alpha$  est primordiale lors de l'inversion tomographique ; nous reviendrons plus en détails sur ce coefficient plus loin dans l'étude.

Les valeurs initiales ont également de fait une importance particulière puisqu'elles influent directement sur la norme du vecteur  $X - X_0$  et donc sur la valeur à assigner au coefficient  $\alpha$ . Si les valeurs initiales sont trop éloignées des observations, la norme de  $X - X_0$  sera élevée et il faudra assigner une valeur trop faible à  $\alpha$  pour privilégier les observations ce qui entraîne le mauvais conditionnement des matrices pour le calcul comme mentionné ci-dessus. C'est une autre spécificité du calcul tomographique par moindres carrés amortis : les valeurs initiales des inconnues (valeurs a priori) doivent être attentivement considérées.

### 1.3.5. Valeurs initiales de densités en vapeur d'eau

Les valeurs initiales sont calculées, pour le logiciel TSAAR, à partir de 2 données : une répartition verticale standard de la densité en vapeur d'eau (fichier « atmo\_stan.pro » dans le logiciel) et la valeur du contenu intégré en vapeur d'eau au zénith de la station, obtenue par l'estimation GNSS.

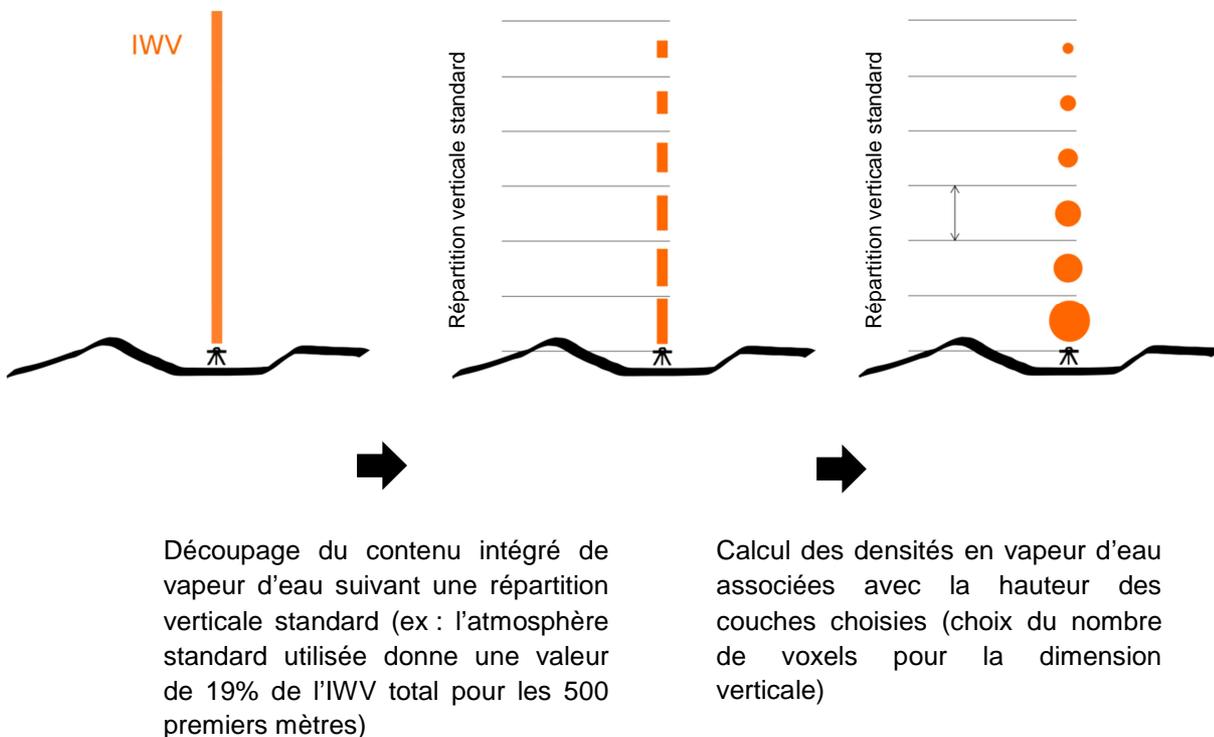


Figure 17 : Méthode employée par le logiciel TSAAR pour calculer les valeurs initiales de densité en vapeur d'eau pour chaque voxel.

La Figure 17 ci-avant présente le schéma de principe du calcul des valeurs initiales effectué par le logiciel TSAAR. Les valeurs initiales sont calculées à partir des contenus intégrés de vapeur d'eau issu du traitement GNSS. Pour chaque colonne de voxels, on répartit ce contenu intégré de vapeur d'eau verticalement à partir d'une répartition verticale standard. La hauteur de chaque voxel (discretisation verticale choisie par l'utilisateur) permet ensuite de convertir le contenu intégré de vapeur dans le voxel en densité de vapeur de d'eau dans ce même voxel (cf. équation 13). On dit couramment qu'on recale l'atmosphère standard par les valeurs de contenus intégrés de vapeur d'eau (cf. Figure 18).

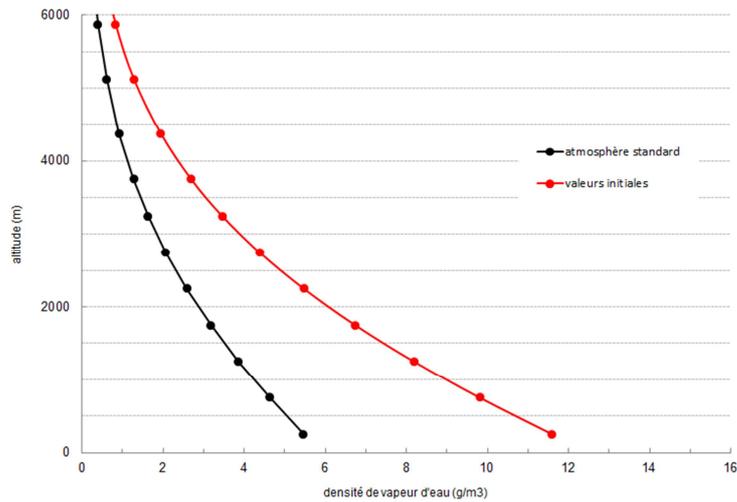


Figure 18 : Exemple d'une atmosphère standard « recalée par IWV » servant de valeurs initiales au calcul tomographique (méthode employée pour cette étude). L'atmosphère standard recalée a la même répartition verticale que l'atmosphère standard.

Le recalage de l'atmosphère standard pour les valeurs initiales permet de répondre à la problématique d'avoir des valeurs initiales les plus proches possibles de la réalité (cf. section précédente).

On voit bien ici, à travers la répartition verticale standard utilisée pour les valeurs initiales, le rôle de la tomographie : détecter une répartition verticale différente lors de phénomènes météorologiques spécifiques. La Figure 19 présente des exemples de répartition verticale atypique de la vapeur d'eau :

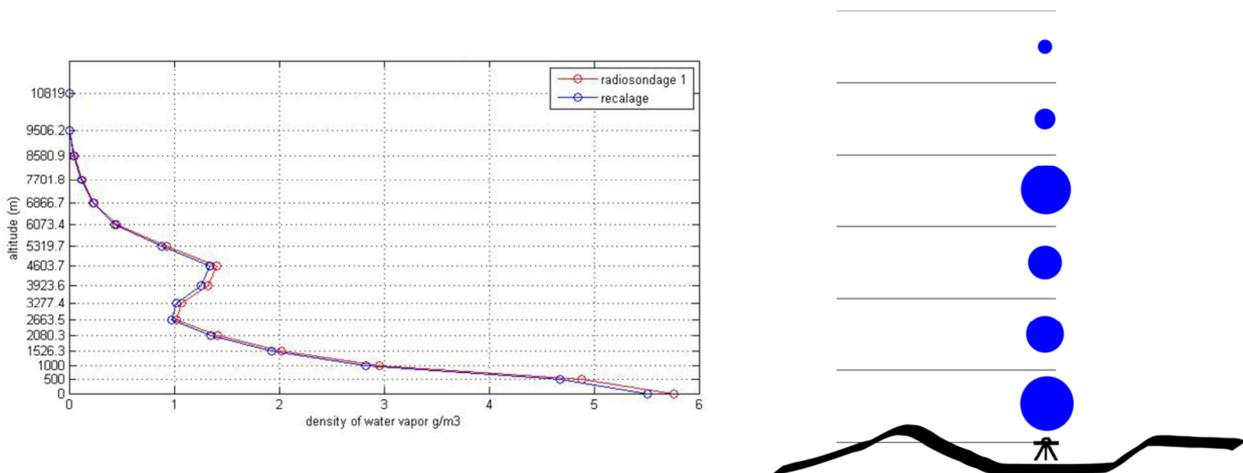


Figure 19 : A gauche : Détection d'une couche humide à 4500m par tomographie GNSS. Source : Réverdy, 2008. A droite : Schéma d'une répartition verticale de la vapeur d'eau non standard (présence d'une bande humide en altitude).

## 1.4. Enjeux pour la météorologie...

La vapeur d'eau joue un rôle prépondérant dans la plupart des processus météorologiques. Elle est à l'origine notamment du déclenchement des précipitations et forme et entretient la convection humide de l'atmosphère conduisant à la formation des nuages. Son étude est très complexe du fait de sa grande variabilité spatio-temporelle. La haute résolution spatiale et la continuité temporelle des mesures GNSS apportent une réponse particulièrement adaptée à cette problématique. Cette haute définition spatiale et temporelle des mesures permet de définir une stratégie d'observation optimale pour un coût supportable afin de comprendre l'interaction de la variabilité de la vapeur avec la dynamique de l'atmosphère.

Les systèmes GNSS apportent aujourd'hui leur contribution dans plusieurs types d'applications dans le domaine général de la météorologie : la climatologie<sup>16</sup> et les effets anthropiques<sup>17</sup> sur le climat, la prévision météorologique ou encore l'étude de processus atmosphériques dynamiques au travers d'étude de cas (Champollion, 2005). A titre d'exemple, la campagne OHM-CV (Observatory Hydro-meteorological Mediterranean - Cévennes Vivarais) a permis une première étude sur la relation entre les IWV et les systèmes précipitants. Dans le domaine de la prévision, on peut citer l'exemple de Météo-France qui a développé depuis 2008 un nouveau modèle de prédiction des orages et pluies intenses notamment. Ce modèle, baptisé « Arome », intègre des données GNSS de ZTD (Bock, 2012). A partir des IWV, le calcul de la répartition verticale de la vapeur d'eau par tomographie a permis de montrer l'impact dans le transport de matières de différentes circulations de vents sur la zone de Marseille (campagne ESCOMPTE<sup>18</sup>, cf. Figure 20).

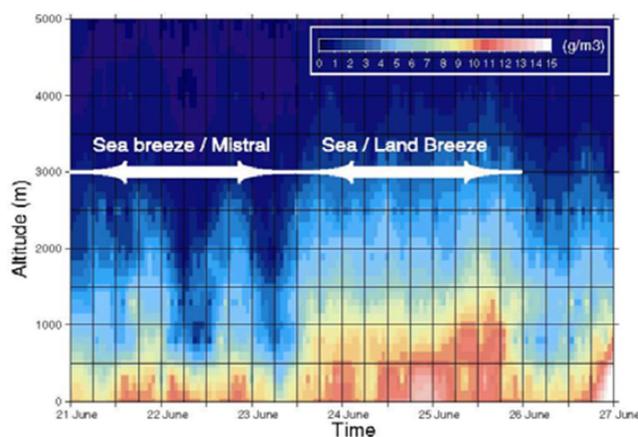


Figure 20 : Tomographie GNSS lors de la campagne ESCOMPTE. Visualisation de forte variation de la répartition verticale de la vapeur d'eau lors des périodes de mistral dans les environs de Marseille. Source : Bastin et al., 2005.

Le programme E-GVAP (EUMETNET<sup>19</sup> GPS Water Vapour Programme) illustre également le caractère opérationnel des mesures météorologiques GNSS. Ce programme fournit des données de retards troposphériques en temps réel à partir d'un réseau GNSS de plus de 400 stations sur l'ensemble de l'Europe. Ces données sont utilisées dans des modèles numériques de prévisions météorologiques opérationnels (egvap.dmi.dk).

<sup>16</sup> La climatologie, branche de la géographie physique, est l'étude du climat, c'est-à-dire la succession des conditions météorologiques sur de longues périodes dans le temps. L'étude du temps à court terme est le domaine de la météorologie.

<sup>17</sup> Relatif à l'activité humaine

<sup>18</sup>Expérience sur Site pour COntreindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Emission

<sup>19</sup> The Network of European Meteorological Services

## 2. Cas d'étude, Le Mans : Mise en œuvre d'un réseau GNSS dense et préparation d'une chaîne de calcul

Conjointement à la prise en main des logiciels de calculs et à la recherche bibliographique, le début de cette étude a été réservé à l'installation d'un réseau GNSS dense sur le site du Mans. Cette campagne d'observation, ayant pour objectif la démonstration des concepts de tomographie troposphérique, a été baptisée pour mon rapport « ESMAG » (Expérience sur Site du MAnS pour la tomographie GNSS).

Les antennes utilisées pour le réseau sont des antennes Ashtech CHOKERING 701945 couplées à des récepteurs Topcon GB1000 (cf. Figures 23, 24 et 25). Elles proviennent du parc mobile GNSS de l'INSU<sup>20</sup> (Institut National des Sciences de l'Univers).

### 2.1. Installation du réseau

#### 2.1.1. Choix des sites

Le choix des sites s'est orienté géométriquement suivant la position des 2 stations permanentes du RGP (Réseau GNSS Permanent) qui sont présentes dans notre zone d'étude. En effet, nous disposons sur le site du Mans des stations permanentes MAN2 et ARNA (cf. Figures 21 et 22). La contrainte principale pour les choix des sites est la bonne répartition des antennes sur le site d'étude. Pour cela, nous avons opté pour un réseau carré d'une dizaine de kilomètres de côté. Trois stations locales complètent les deux stations permanentes du RGP (cf. Figure 21). Potentiellement, la taille du réseau et sa densité permettent une étude de phénomènes météorologiques de méso-échelle<sup>21</sup> d'une dizaine de kilomètres.

A l'image des stations permanentes, les stations locales ont été installées sur des sites dégagés (sans masques) afin d'avoir un maximum de satellites en vue des antennes et donc un maximum de rais pour chaque époque de mesure. En ce qui concerne le support des antennes, contrairement aux études de déformation de la croûte terrestre, il n'y a pas, pour notre réseau, de contraintes fortes de stabilité : un bâtiment pérenne est suffisant pour une étude météorologique. Une première antenne a été installée sur la commune d'Yvré-l'Évêque au nord-est de la zone d'étude, une seconde sur la commune de Ruaudin au sud-est, et une troisième sur le bâtiment des archives départementales au centre du réseau (cf. Figure 21).

#### 2.1.2. Caractéristiques des stations de campagne

Les stations locales ont été baptisées YVRE, RUAU et ARCH. Dans le cadre de cette étude, un des objectifs est de quantifier l'apport de mesures météorologiques « in situ » dans un calcul tomographique. YVRE et RUAU ont donc été équipées de stations météorologiques de type PTU300<sup>22</sup> (cf. Figures 23 et 24). La station permanente MAN2, située sur le toit de l'ESGT, fonctionne également avec une station météorologique (type PTU200). Pour ARNA, les données météorologiques utilisées sont celles provenant de la station Météo-France (type PTB220) située à proximité du site<sup>23</sup>. Enfin, pour le site des archives départementales, ne disposant pas de station météorologique, nous avons effectué une interpolation des données des 4 autres stations (interpolation linéaire de la température et de l'humidité relative suivant la latitude et la longitude. La pression a été, quant à elle, interpolée uniquement suivant l'altitude (cf. Annexe 4)).

---

<sup>20</sup> Le parc mobile GNSS de l'INSU est un ensemble de récepteurs, d'antennes et d'accessoires utiles lors de campagnes de mesure, mis à la disposition de la communauté scientifique.

<sup>21</sup> La méso-échelle se définit en météorologie par les dimensions horizontales de phénomènes variant entre quelques kilomètres et plusieurs centaines de kilomètres.

<sup>22</sup> Financées par le service national d'observation INSU RENAG (REseau National GPS).

<sup>23</sup> Données météorologiques partagées publiquement par l'association « infoclimat » qui fournit en temps réel des données météorologiques sur toute la France ([www.infoclimat.fr](http://www.infoclimat.fr)).

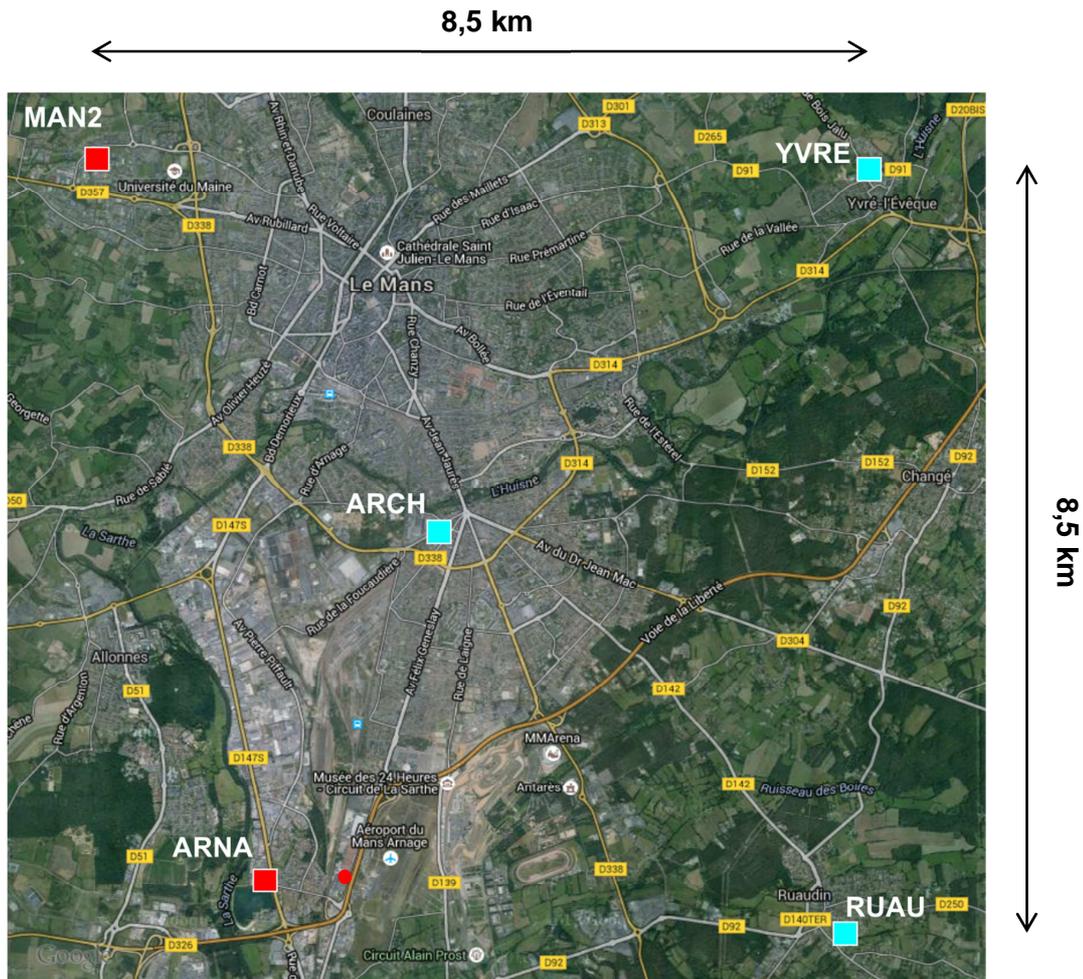


Figure 21 : Réseau GNSS de la campagne « ESMAG » : 2 stations permanentes du RGP (MAN2 et ARNA, en rouge) et 3 stations locales (ARCH, YVRE et RUAU, en cyan). Le rond rouge représente la station météorologique Météo-France utilisée pour les données météorologiques d'ARNA.

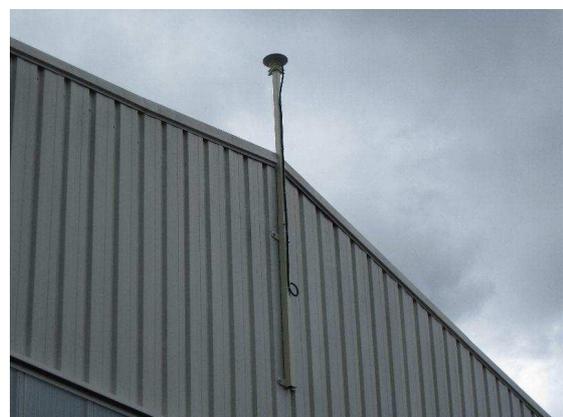


Figure 22 : Stations permanentes du RGP utilisées pour la campagne. A gauche : MAN2 et sa station météorologique (PTU200). A droite : ARNA sur la commune d'Arnage.



Figure 23 : Installation de la station de campagne YVRE sur le toit du collège Pasteur à Yvré l'Évêque. A gauche : antenne Ashtech CR701945 montée sur un mât haubané. A droite : station météorologique PTU300.



Figure 24 : Installation de la station de campagne RUAU contre le bardage d'un bâtiment municipal de la commune de Ruaudin à l'aide d'un camion nacelle. La station météorologique (PTU300) est montée sur le mât de support de l'antenne.

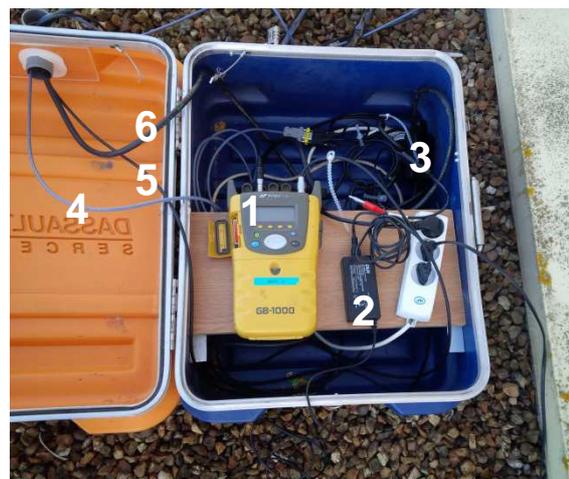


Figure 25 : A gauche : Installation de la station de campagne ARCH sur le toit du bâtiment des archives départementales de la Sarthe. A droite : Pour les stations locales, installation des récepteurs GB1000 et des alimentations électriques dans une valise étanche (1 : récepteur GB1000 ; 2 : alimentation électrique GB1000 ; 3 : alimentation électrique PTU300 (YVRE et RUAU) ; 4 : câble de réception des données de la station météorologique (YVRE et RUAU) ; 5 : câble de réception des données de l'antenne GNSS ; 6 : câble d'alimentation électrique externe).

L'utilisation des récepteurs GB1000 avec les stations météorologiques a été compliquée du fait que la station météorologique PTU300 n'est pas reconnue par le GB1000. Une astuce consistant à « forcer » l'écriture des données météorologiques sur la mémoire interne du récepteur a permis de palier à cette problématique (Charade et al. 2008, cf. Annexe 5).

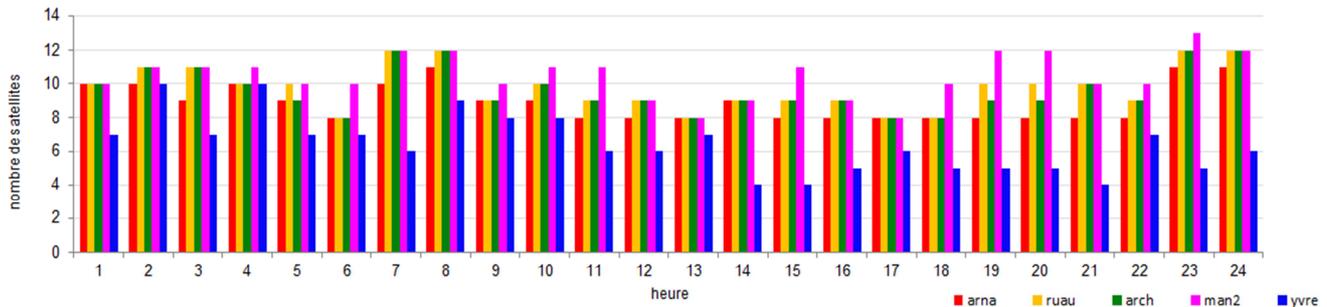


Figure 26 : Nombre de satellites pris en compte par GAMIT pour chaque station du réseau pour le jour 122 (02 mai 2015).

Suite aux premières séries de mesures, il est apparu que l'antenne du site d'YVRE (numéro de série : CR15920, cf. Annexe 7) ne fonctionnait pas correctement. A la sortie des calculs pré-tomographiques (GAMIT), un listing des satellites ayant servi au calcul a été dressé (cf. Figure 26). On peut remarquer que pour l'antenne d'YVRE un nombre inférieur de satellites est retenu pour les calculs. Après analyse des RINEX d'observations, on a remarqué que les observations sur la phase L2 étaient souvent absentes. GAMIT rejette les satellites n'ayant pas les informations à la fois sur la phase L1 et sur la phase L2 pour la correction des effets ionosphériques. Les résultats sur le site d'YVRE ont donc été considérés avec précaution, voir non utilisés pour les séries de test effectués.

On peut effectuer plusieurs critiques sur le réseau après analyse des données météorologiques issues des mesures « in situ » (cf. Figure 27a). On peut remarquer que la température sur le site de Ruaudin est plus bruitée et légèrement surestimée en milieu de journée. Ces effets sont liés à l'emplacement de la station météorologique (contre bardage métallique, cf. Figure 24). La station météorologique aurait, a minima, dû se trouver au-dessus du faitage pour une bonne ventilation sur 360° et, de plus, le bardage métallique trop proche est source de poches d'air chaud pouvant contaminer la mesure (rayonnement double subie par le capteur du fait de la réflexion des rayons solaires sur le bardage). Une deuxième critique peut être formulée au vu des valeurs de pression sur le site d'Arnage. La station météorologique PTB220 est hors calibration par rapport aux stations météorologiques PTU200/300 utilisées sur les autres sites (cf. Figure 27b). On peut le voir grâce aux altitudes respectives des stations ou encore avec la comparaison avec le modèle GPT (surévaluation de la pression de 5-6hPa par rapport aux autres stations). Toutes ces critiques viennent confirmer la difficulté d'utiliser des mesures « in situ », qui malgré leur haute fréquence d'enregistrement, voient leur fiabilité réduite du fait des différentes qualités de calibration entre chaque site (Fund et al., 2010).

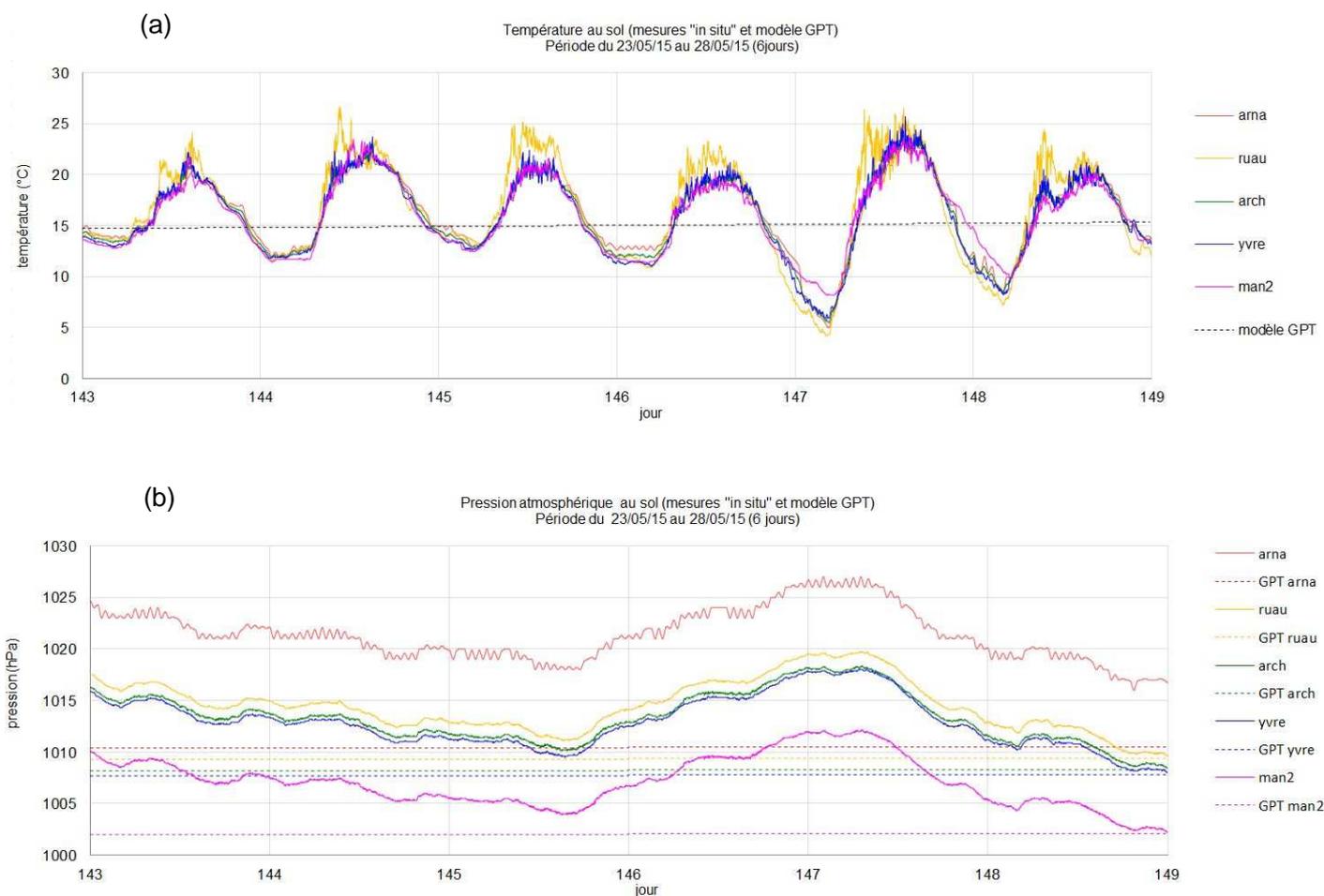


Figure 27 : Résultats d'observations météorologiques et modèle GPT. En haut, les résultats de température, en bas, les résultats de pression. A noter que le modèle GPT pour la température n'est pas significativement différent entre chaque station (différence inférieure à 0.5°C). Altitudes : MAN2=121m ; YVRE=73m ; ARCH=68m ; RUAU=59m ; ARNA=50m.

### 2.1.3. Caractéristiques du site d'étude

Les faibles différences topographiques sur le site du Mans enlèvent à cette étude l'intérêt de visualiser par tomographie GNSS des phénomènes météorologiques significatifs. De plus, comme on le verra plus loin, une forte corrélation spatio-temporelle des mesures de vapeur d'eau était à prévoir au vu de l'envergure du réseau. A titre de comparaison, la campagne ESCOMPTE couvrait un domaine de 20km x 20km (16 stations) avec également une forte corrélation spatio-temporelle des observations (Bock, 2012).

Le site d'étude couvre une partie de la communauté urbaine du Mans, au niveau du point de confluence de la Sarthe et de l'Huisne (cf. Figure 28). On observe une différence maximum d'altitude de 70 mètres entre MAN2, sur le haut du versant nord de la vallée de la Sarthe, et ARNA.

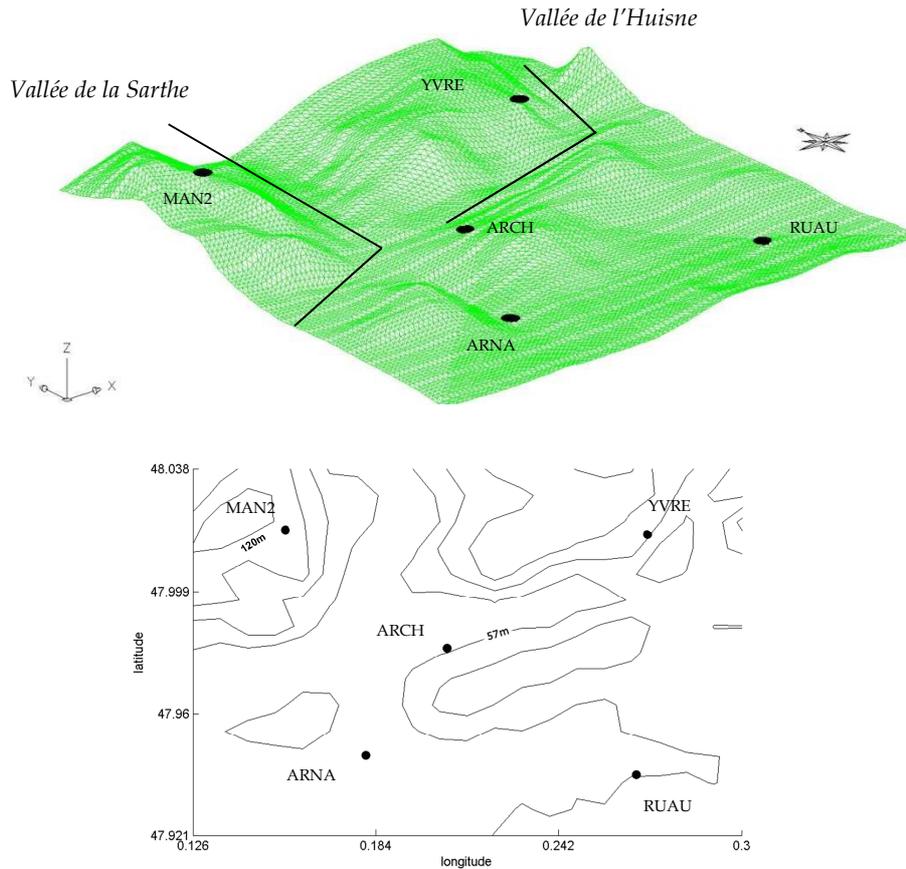


Figure 28 : Caractéristiques topographiques du site d'étude. En haut, le modèle numérique de terrain est multiplié par un facteur 20 pour accentuer la visualisation du relief. Source : données SRTM<sup>21</sup>.

## 2.2. Mise en référence du réseau

Les paramètres troposphériques de nos stations de campagne sont calculés à l'aide de stations dites de référence. Le réseau de campagne ne peut se suffire à lui-même, d'une part car il n'est pas connu en coordonnées et d'autre part car les paramètres troposphériques à l'intérieur du réseau sont difficilement dé-corrélabiles du fait du traitement par double différence présenté en première partie (valeur des paramètres troposphériques trop semblables entre stations pour un réseau d'observation météorologique). Les stations de référence répondent à cette problématique en étant connues en position et en étant choisies éloignées du site d'étude de plusieurs milliers de kilomètres.

### 2.2.1. Choix des stations de référence

Le choix des stations de référence se fait donc suivant 2 critères : la bonne précision de leurs coordonnées ainsi que la longueur des lignes de base de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres pour une bonne dé-corrélation des paramètres troposphériques (Tregonning, 1998). La précision des stations de référence est étudiée à l'aide de séries temporelles des résidus issues du

<sup>24</sup> Shuttle Radar Topography Mission. Campagne d'observation altimétrique par interférométrie radar menée par la NASA et la NGA (National Geospatial-Intelligence Agency, agence américaine) en 2000. Cette campagne a permis d'établir des modèles numériques de terrain pour environ 80% des terres émergées s'étendant de 56° de latitude sud à 60° de latitude nord (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>).

calcul de leur position (cf. Figure 30). On établit comme critère de précision 2-3 mm pour les composantes horizontales et 7-8 mm pour la composante altimétrique. Ces valeurs correspondent aux valeurs des contraintes couramment paramétrées dans GAMIT pour les stations de références dans le cadre d'une application météorologique.



Figure 29 : Stations de référence choisies pour l'étude. Source : igs.org/network [Modifié]. Les points rouges représentent les stations de référence. Le point bleu représente le site d'étude avec les stations de campagne.

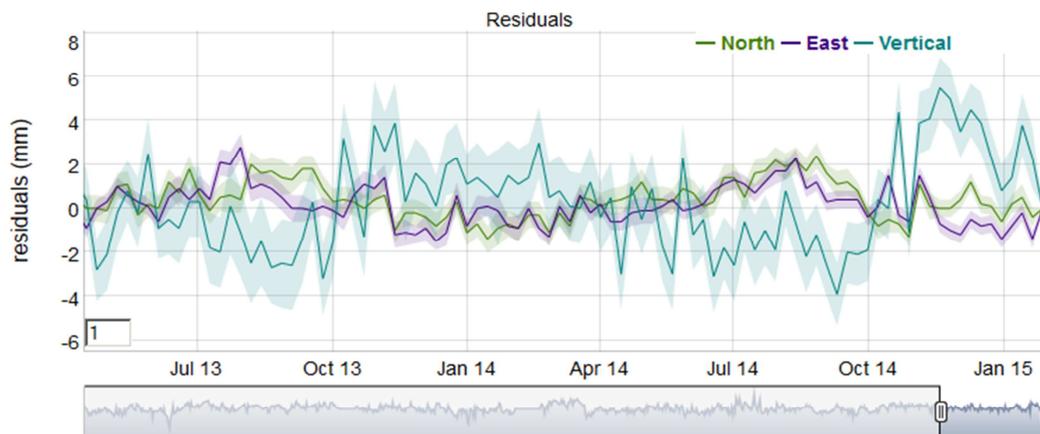


Figure 30 : Série temporelle de la station de référence BRST (Brest). Source : igs.org/network.

Les stations de référence retenues pour l'étude sont : QAQ1 (Qaortoq au Groënland), TRO1 (Tromsø en Norvège), NOT1 (Noto en Sicile), PDEL (archipel des Açores), BRST (Brest en France), MORP (Morpeith en Angleterre), ZIMM (Zimmerwald en Suisse) et VILL (Villafranca en Espagne) (cf. Figure 29).

### 2.2.2. Stabilité des stations de campagne

La position des stations de campagne est calculée à l'aide des stations de référence lors d'un premier calcul. La bonne géométrie des stations de référence participe à la bonne précision de celui-ci. Des séries temporelles pour nos stations de campagne ont également été calculées sur une période de 10 jours. Cette étape a pour but de contrôler la stabilité de nos stations de campagne, surtout les stations locales installées. La comparaison avec les séries temporelles des

stations du RGP permet de valider la bonne mise en place de nos stations locales et leur bonne stabilité (cf. Figure 31 ci-après).

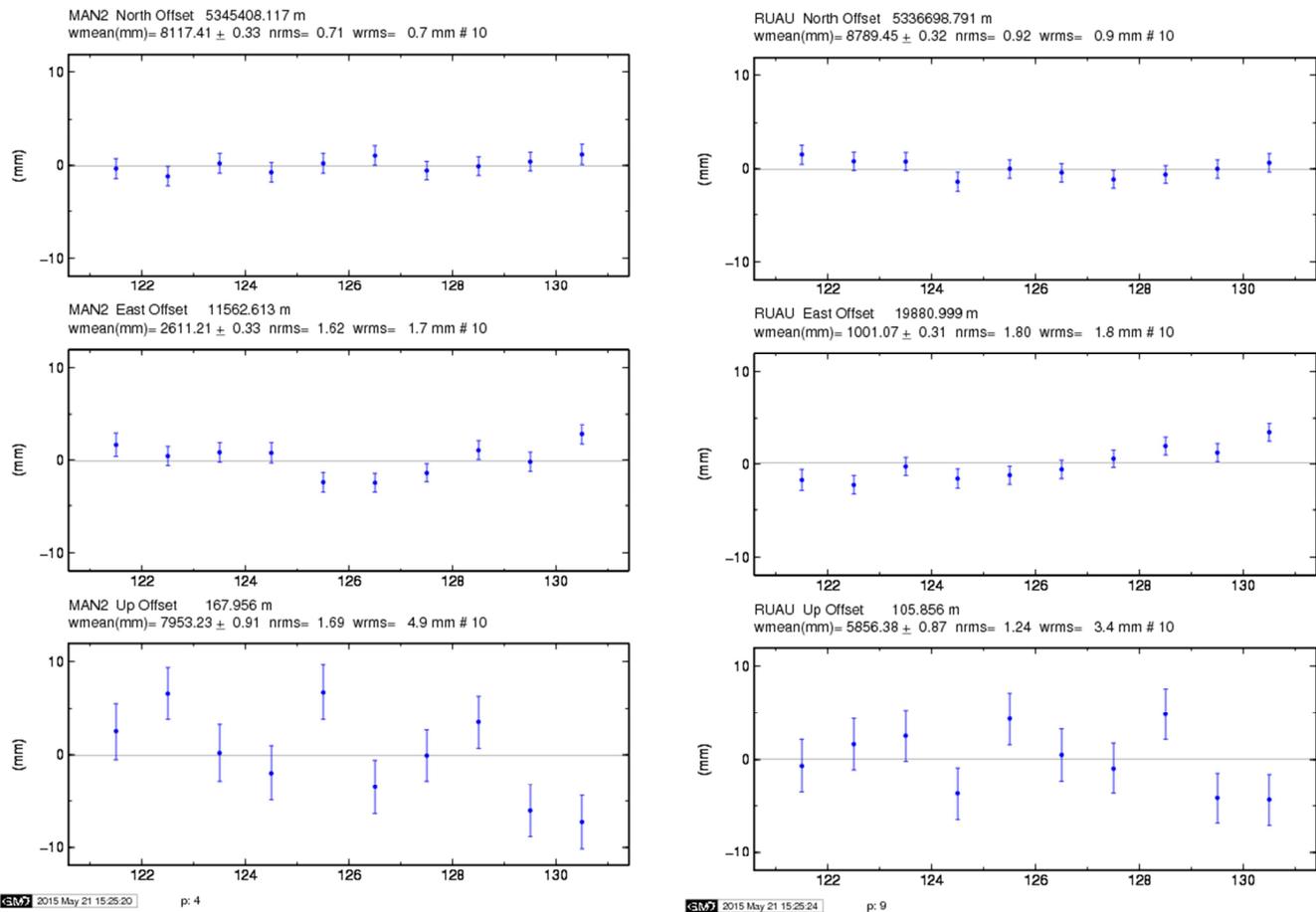


Figure 31 : Séries temporelles sur 10 jours de la station campagne MAN2 (à gauche) et de la station de campagne RUAU (à droite). De haut en bas, les composantes Nord, Est et verticale.

L'étude des séries temporelles des 5 stations de campagne a validé la stabilité de l'ensemble du réseau avec des wrms inférieurs à 2 mm pour les composantes planimétriques et inférieure à 6 mm pour la composante altimétrique (cf. Annexe 6). Les meilleurs résultats sont ceux de la station ARCH avec 0.6 mm pour la composante nord, 1.9 mm pour la composante est et 2.9 mm pour la composante verticale. La station la plus instable selon nos résultats est la station du RGP ARNA avec 1.5 mm pour la composante nord, 1.5 mm pour la composante est et 5.9 mm pour la composante verticale.

## 2.3. Chaîne de traitement pour le calcul tomographique

### 2.3.1. Présentation

La chaîne de traitement se présente suivant 2 étapes principales comme présenté lors du TFE de Clément Montibert : une partie pré-tomographique pour extraire les paramètres troposphériques que sont les ZWD et les gradients (GAMIT), et la partie tomographique en tant que telle avec l'utilisation du logiciel TSAAR pour reconstituer le champ 3D de densité de vapeur d'eau grâce aux SIWV (cf. Figure 32). Pour le logiciel TSAAR, on retrouve les étapes expliquées dans la section 1.3., avec en 1, le calcul des IWV à partir des ZWD (cf. équation 8) et de la température

pour la fixation des valeurs initiales (atmosphère standard recalé par IWV) ; en 2 et 3, le calcul des SIWV à partir des ZWD, des gradients et de la température à l'aide des fonctions de projection (NMF et Chen et Herring pour le logiciel TSAAR, cf. équation 11) ; et enfin en 4, l'inversion tomographique à partir des SIWV et des valeurs initiales (cf. paragraphe 1.3.5.).

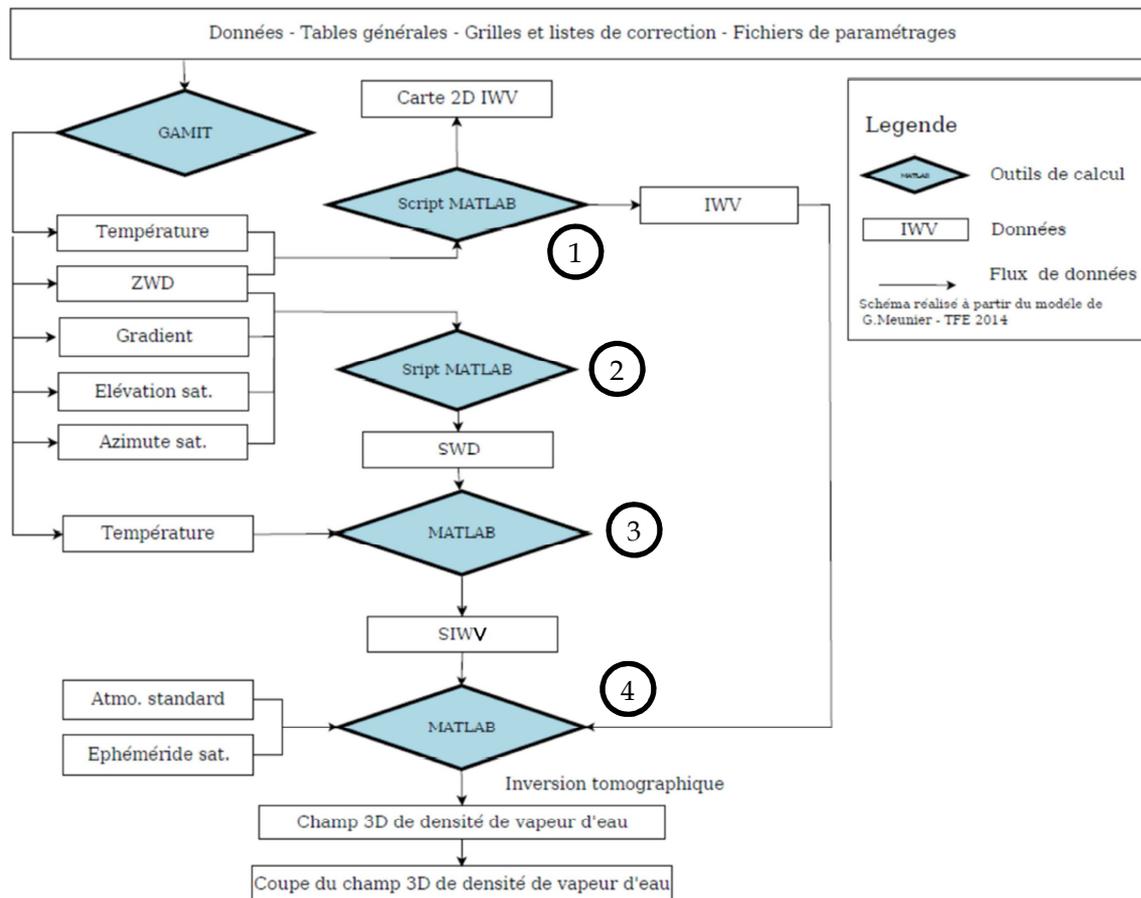


Figure 32 : Chaîne de traitement du calcul tomographique avec l'utilisation des logiciels GAMIT et TSAAR. L'ensemble des scripts Matlab constitue le logiciel TSAAR. Source : Montibert (2014) [Modifié].

### 2.3.2. Différentes stratégies de calcul

Comme nous l'avons vu, différentes stratégies de calcul peuvent être utilisées pour le calcul des paramètres troposphériques en fonction des données météorologiques utilisées. Pour la tomographie également puisque la température intervient pour le calcul des IWV et des SIWV (cf. Figure 32). Le schéma ci-après représente les différentes options possibles. On définira les différentes stratégies à travers deux choix : les paramètres météorologiques choisis en entrée de GAMIT et les paramètres météorologiques choisis en entrée de TSAAR.

D'après la chaîne de calcul, 3 types de paramètres pourront être analysés. Les retards troposphériques (ZWD, ZHD et ZTD) calculé par GAMIT, les IWV calculés par TSAAR et enfin les résultats finaux tomographiques de densité en vapeur d'eau.

D'autres tests seront effectués concernant l'inversion tomographique notamment sur la valeur du coefficient alpha (poids des mesures par rapport aux valeurs initiales) ou encore sur les différentes discrétisations possibles de l'espace au-dessus du site d'étude.

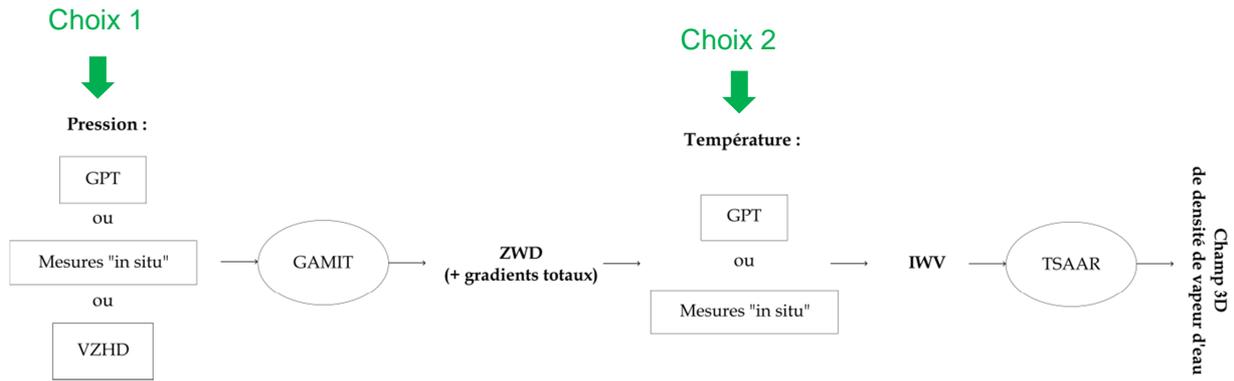


Figure 33 : Schéma de principe illustrant les différentes stratégies de calcul possibles pour cette étude en fonction des paramètres météorologiques fournis aux logiciels.

Le choix 1 illustré ci-dessus représente les différentes valeurs de pression possibles pour le calcul des ZHD. Cependant, d'autres paramètres météorologiques sont nécessaires au logiciel GAMIT pour le calcul des ZWD. En effet, comme beaucoup de problèmes résolus par moindres carrés, celui-ci n'est pas linéaire. Des valeurs a priori des inconnus sont nécessaires pour permettre la résolution de celles-ci. Ici, ce sont donc des valeurs a priori des ZWD qui doivent être calculées. Le logiciel GAMIT utilise le modèle de Saastamoinen qui dépend de la température et de la pression partielle de vapeur d'eau<sup>25</sup> (Fund, 2009). A noter, que ce sont des valeurs d'humidité relative qui sont fournies en entrée du logiciel. La conversion en pression partielle de vapeur d'eau se fait à l'aide de l'équation 19 ci-dessous :

$$\text{Humidité relative (\%)} = \frac{P_{vap}}{P_{sat}(T)} \quad (19)$$

avec :

$P_{vap}$  , pression partielle de vapeur d'eau

$P_{sat}(T)$  , pression saturante de vapeur d'eau (fonction de la température T)

La pression saturante de vapeur d'eau est fonction de la température et représente la quantité maximale de vapeur d'eau que peut contenir l'air à la température donnée. Le modèle utilisé par GAMIT pour le calcul de la pression saturante est celui dénommé « Magnus Tetens » (Fund, 2009). Sa formulation est donnée par l'équation 20 ci-après (Murray, 1967).

$$P_{sat}(T) = 6.1078 \times \exp\left[\frac{a(T - 273.16)}{(T - b)}\right] \quad (20)$$

avec :

$a = 17.2693882$

$b = 35.86$

$T$  , la température en Kelvin

<sup>25</sup> La formule détaillée du modèle de Saastamoinen pour le calcul des ZWD est disponible dans la thèse de F. Fund (2009) page 50.

### 3. Campagne « ESMAG » : Résultats et premières analyses

Les résultats sont basés sur 6 jours d'étude du 23 mai au 28 mai 2015 (cf. Annexe 1).

#### 3.1. Résultats pré-tomographiques

Pour cette partie pré-tomographique, les paramètres étudiés sont les retards troposphériques et plus précisément les ZWD. Les différentes stratégies de calcul sont les différentes données météorologiques fournies au logiciel GAMIT (cf. partie précédente). Le logiciel GAMIT utilise le modèle de Saastamoinen pour le calcul des ZHD (cf. paragraphe 1.2.4) et pour le calcul des valeurs a priori des ZWD. Les méthodes de calcul utilisées sont les suivantes (cf. Tableau 2 et Figure 35) :

- méthode baptisée « vzhd » : cette méthode utilise les VZHD pour la détermination des ZHD. Pour la température, c'est le modèle météorologique GPT qui est utilisé. L'humidité relative est fixée à 50%.
- méthode baptisée « gpt » : cette méthode utilise le modèle météorologique GPT au lieu de mesures « in situ », pour la pression comme pour la température. Une valeur fixe de 50% pour l'humidité relative est utilisée.
- méthode baptisée « rnx » : cette méthode utilise des RINEX<sup>26</sup> météo (issus de mesures « in situ ») comme données météorologiques (pression, température et humidité relative).

Méthodes de calcul	ZHD	ZWD (valeurs a priori)
« vzhd »	Intégration de profils verticaux de pression	$T_0 = \text{GPT} + \text{HR}_0 = 50\%$ (Saastamoinen)
« gpt »	$P_0 = \text{GPT}$ (Saastamoinen)	$T_0 = \text{GPT} + \text{HR}_0 = 50\%$ (Saastamoinen)
« rnx »	$P_0 = \text{in situ}$ (Saastamoinen)	$T_0 = \text{in situ} + \text{HR}_0 = \text{in situ}$ (Saastamoinen)
« rnx_modifié »	$P_0 = \text{in situ}$ (Saastamoinen)	$T_0 = \text{GPT} + \text{HR}_0 = 50\%$ (Saastamoinen)

Tableau 2 : Méthodes de calcul testées pour le calcul des ZHD et des ZWD.  $P_0$  : pression au sol.  $T_0$  : température au sol.  $\text{HR}_0$  : humidité relative au sol.

Un quatrième test a été effectué au vu des résultats obtenus (cf. paragraphe suivant). Pour cette quatrième méthode, « rnx\_modifié », nous avons isolé l'apport des mesures « in situ » de pression en remplaçant les valeurs « in situ » de température et d'humidité relative respectivement par le modèle GPT et par une valeur fixe de 50%.

<sup>26</sup> Receiver Independent Exchange Format

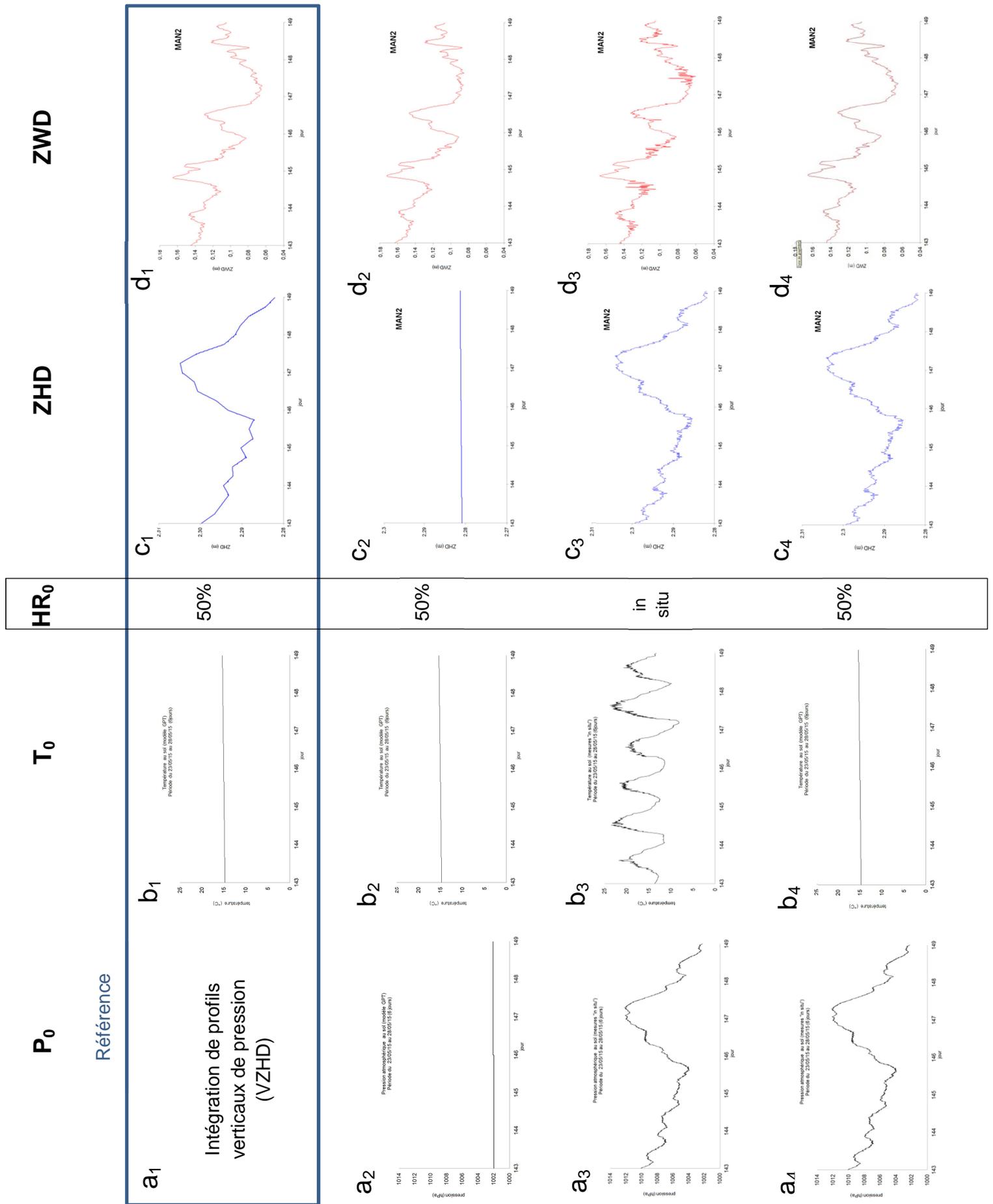


Figure 34 : Récapitulatif des méthodes de calcul employées. (a) données de pression. Unités en hPa ; (b) données de température. Unités en °C ; (c) Résultats ZHD. Unités en m ; (d) Résultats ZWD. Unités en m. En (1), la méthode « vzhd ». En (2), la méthode « gpt ». En (3), la méthode « rxn ». En (4), la méthode « rxn\_modifié », en remplaçant les mesures « in situ » de température par le modèle GPT et en assignant une valeur fixe de 50% pour l'humidité relative.. Exemple pour la station MAN2 pour 6 jours d'observations.

### 3.1.1. Comparaison du modèle GPT, des VZHD et des mesures « in situ » pour le calcul des ZWD

L'objet de ce test est de comparer les 3 stratégies de calcul des ZWD énoncées en début de partie, à savoir « rnx », « gpt » et « vzhd ».

#### *gpt-vzhd*

En premier lieu, on peut voir que les écarts les plus importants sont ceux avec la méthode « gpt ». En effet, le modèle GPT ne prend pas en compte les variations journalières de pression. A l'échelle d'une semaine, le modèle GPT de pression est quasiment constant (cf. Figure 34). On observe un biais de 10-11 mm avec un écart type de 6-7mm entre les ZWD calculés avec les VZHD ou avec le modèle GPT (cf. Tableau 3). Le biais observé est non négligeable au vu des précisions d'estimation des ZWD (écarts types de 4 à 5 mm en sortie de GAMIT), néanmoins on remarque que l'évolution temporelle des ZWD n'est pas altérée (cf. Figure 35).

#### *rnx-vzhd*

Pour le test entre les stratégies « vzhd » et « rnx », on observe un biais inférieur au millimètre (cf. Tableau 3). On observe également un bruit anormal vers midi des ZWD calculés avec les mesures « in situ » (cf. Figures 34 et 35). Ce bruit survient aux mêmes périodes que le bruit sur les mesures de température et d'humidité relative (cf. Figure 27 et Annexe 8). Le bruit sur les mesures météorologiques se propage naturellement sur les valeurs a priori des ZWD, néanmoins sa propagation sur les ZWD finaux estimés reste toujours inexplicquée à l'heure d'achèvement de ce rapport.

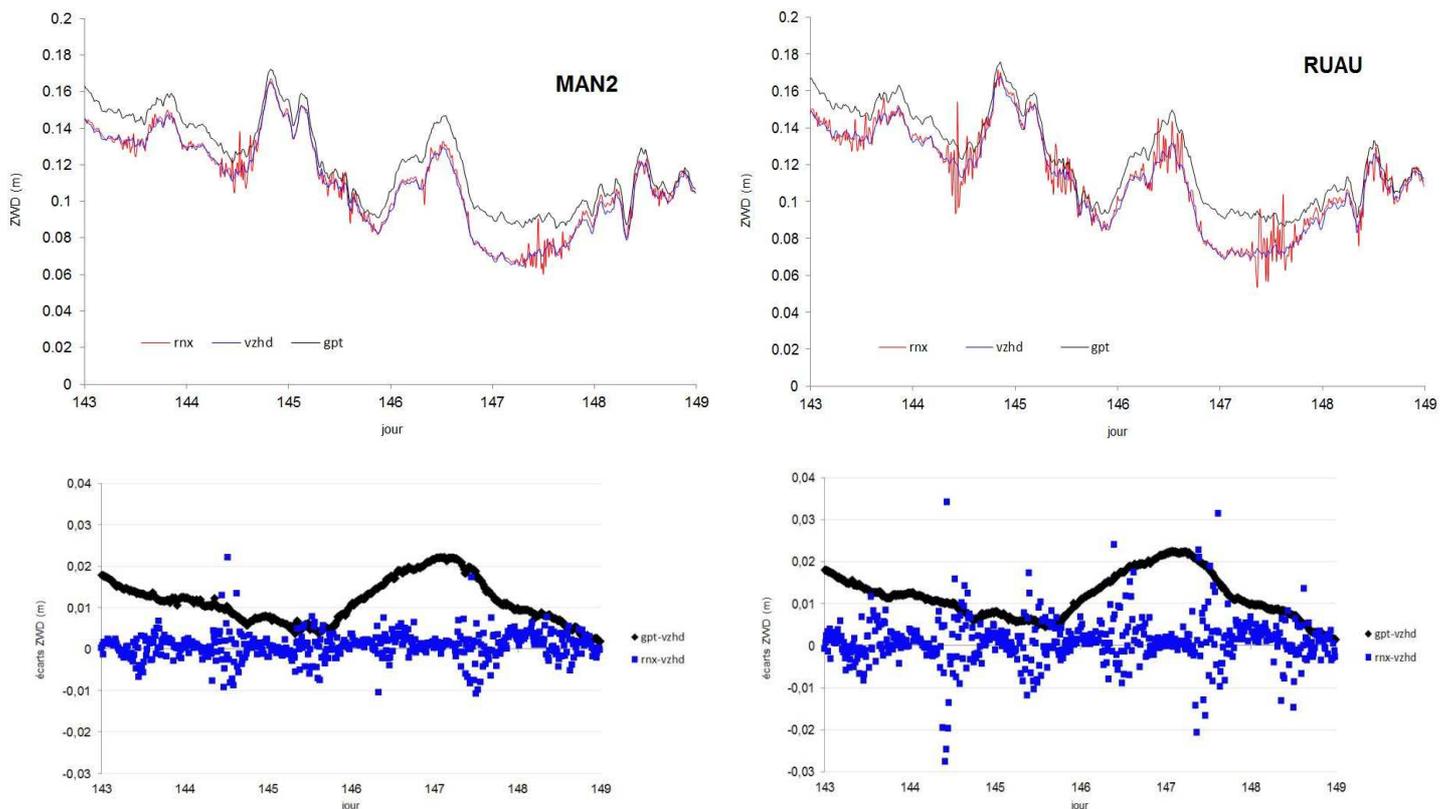


Figure 35 : Comparaison des ZWD calculés avec les 3 stratégies de calcul « rnx », « vzhd » et « gpt » pour les stations MAN2 et RUAU. En haut, la valeur des ZWD en mètres. En bas, les écarts entre les ZWD en mètres, avec en bleu les écarts rnx-vzhd et en noir les écarts gpt-vzhd. Calcul sur 6 jours d'observations.

GNSS SITES	$\Delta ZWD$ (gpt-vzhd) [mm]	$\Delta ZWD$ (rnx-vzhd) [mm]
MAN2	11.6 ± 5.3	0.8 ± 3.1
RUAU	11.6 ± 5.4	1.0 ± 5.5
YVRE	12.0 ± 5.5	1.2 ± 9.3

Tableau 3 : Biais et écarts types entre les ZWD calculés avec les stratégies « rnx » et « gpt » (colonne 1) et biais et écarts types entre les ZWD calculés avec les stratégies « rnx » et « vzhd » (colonne 2). Calcul sur 6 jours d'observations pour les stations MAN2, RUAU et YVRE.

#### *rnx\_modifié-vzhd*

Pour confirmer l'influence des valeurs a priori des ZWD sur les valeurs finales (bruit observé vers midi de chaque journée), nous avons effectué un 4<sup>ème</sup> test, en modifiant les fichiers rinx météo en entrée de GAMIT (cf. Figure 34). Nous avons remplacé les valeurs de température « in situ » par les valeurs de température du modèle GPT et fixé à 50% l'humidité relative.

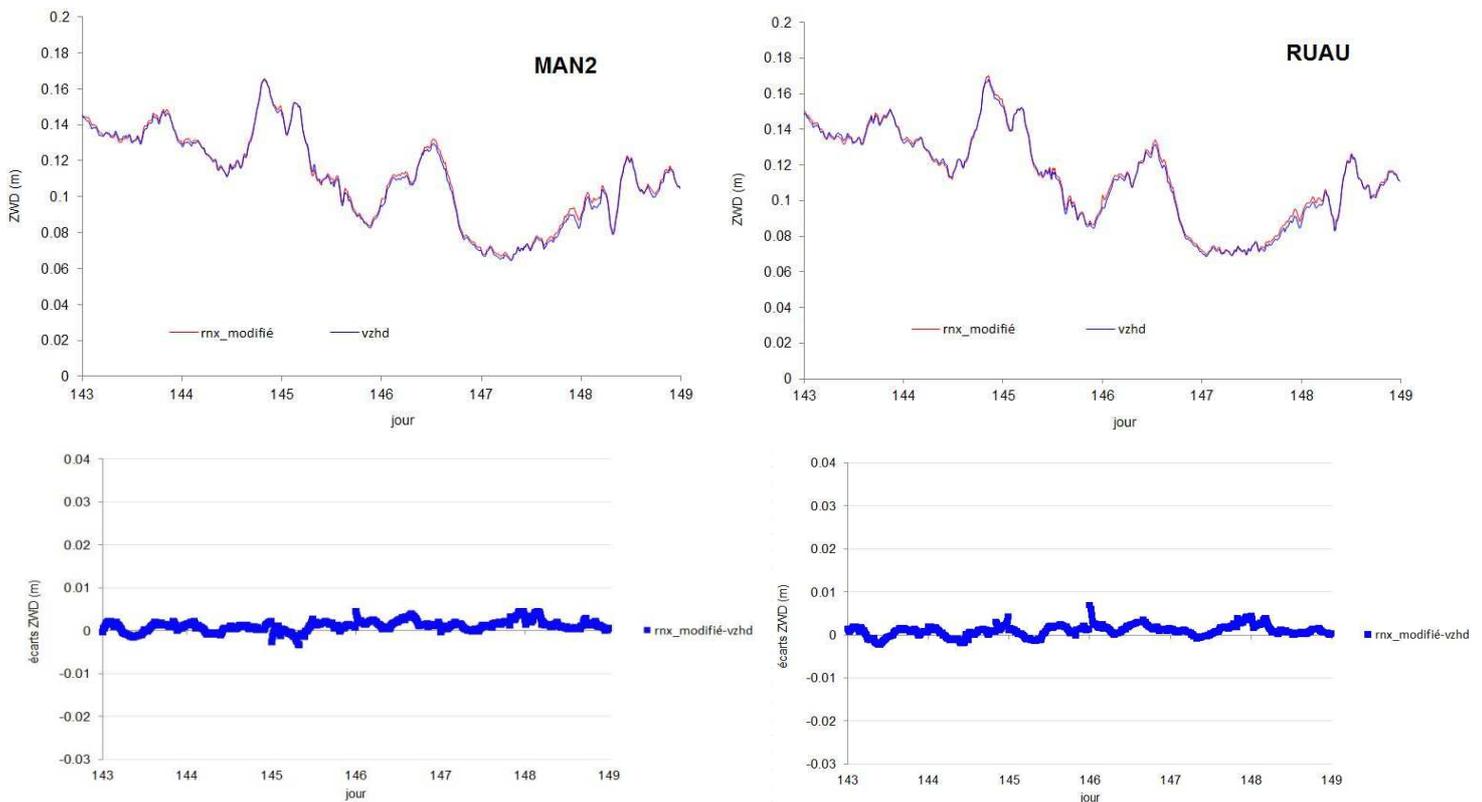


Figure 36 : Comparaison des ZWD calculés avec les méthodes « vzhd » et « rnx\_modifié » pour les stations MAN2 et RUAU. En haut, la valeur des ZWD en mètres. En bas, les écarts entre les ZWD en mètres. Calcul sur 6 jours d'observations.

Comme on peut le voir sur la Figure 36, le bruit observé avec la méthode « rnx » n'est plus visible. L'amplitude du bruit illustré par l'écart type du biais entre les 2 méthodes est désormais de 1.2-1.3 mm (cf. Tableau 4). Ce sont donc bien les valeurs a priori des ZWD, calculées à l'aide de mesures « in situ » de température et d'humidité relative, qui altèrent le calcul. Comme énoncé plus haut, aucune réponse n'a été trouvée pour expliquer cette influence importante des valeurs a priori lors de la résolution par moindres carrés effectuée par le logiciel GAMIT. En

perspective de cette étude, il serait intéressant de procéder à un calcul similaire des ZWD avec des mesures « in situ » à l'aide d'un autre logiciel géodésique (ex : le logiciel GINS, Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées).

GNSS SITES	$\Delta$ ZWD (rnx_modifié-vzhd) [mm]
MAN2	1.1 ± 1.2
RUAU	1.0 ± 1.3
YVRE	1.2 ± 1.2

Tableau 4 : Biais et écarts types entre les ZWD calculés avec les stratégies « rnx\_modifié » et « vzhd ». Calcul sur 6 jours d'observations pour les stations MAN2, RUAU et YVRE.

En conclusion, les résultats pour la stratégie « rnx » sont mitigés. Pour une étude sur plusieurs jours, les résultats sont bons et rendent bien compte de l'évolution du ZWD. En revanche pour une étude de phénomènes ponctuels sur quelques heures, le bruit sur les résultats peut atteindre plusieurs centimètres ce qui n'est pas négligeable au regard de la précision d'estimation des ZWD qui est de 4-5 mm. Ce problème est d'autant plus regrettable que les mesures « in situ » de pression permettent un très bon calcul des ZHD (cf. paragraphe suivant). A noter cependant que le problème du bruit sur les résultats semble provenir plus vraisemblablement de l'architecture du logiciel GAMIT plutôt que de la méthode.

En ce qui concerne la stratégie « gpt », on peut conclure que les ZWD calculés sont cohérents mais soumis à une surestimation ou sous-estimation suivant des variations de pression non prises en compte par le modèle GPT. Dans notre cas, on observe une surestimation pouvant atteindre plusieurs cm (cf. Figure 35).

La stratégie « vzhd » reste la meilleure stratégie de calcul pour les ZWD au vu des inconvénients des 2 autres méthodes. Le seul inconvénient de la stratégie « vzhd » est qu'elle n'est pour le moment pas compatible avec du traitement en temps réel.

### 3.1.2. Apport des mesures « in situ » de pression sur le calcul des ZHD

Le calcul des ZHD est primordial dans l'estimation des ZWD nécessaires à la tomographie. Il permet de séparer la composante humide de la composante hydrostatique à partir du retard total. Une erreur sur le ZHD se répercute donc directement sur la bonne estimation des ZWD. Aujourd'hui, les VZHD ont valeur de référence dans le calcul des ZHD. L'objet de ce test est de voir si des mesures « in situ » de pression avec un modèle de reconstitution (ici, Saastamoinen) sont similaires (cf. Figure 37).

On observe un biais inférieur au millimètre avec un écart-type de 1.2 mm (cf. Tableau 5). La méthode de calcul à partir des mesures « in situ » de pression est donc aussi précise que les VZHD.

Cette première remarque permet de valider la méthode de calcul avec les mesures « in situ » de pression. On peut dès lors la considérer même plus intéressante que les VZHD au vu de la grande différence de résolution temporelle entre les 2 (6 heures pour les VZHD ; 1 minute pour les mesures « in situ »). Les écarts de ZHD dus à cette différence de résolution peuvent atteindre 4-5 mm (cf. Figure 37) ce qui est non négligeable au vu de la précision d'estimation des ZWD qui est du même ordre.

Finalement, la méthode de calcul des ZHD avec des mesures « in situ » de pression est bien validée. Elle offre même l'avantage d'être compatible avec un traitement tomographique en temps réel. Son inconvénient majeur en revanche est la mise en place de stations météorologiques sur sites, leur entretien, leur calibration ...

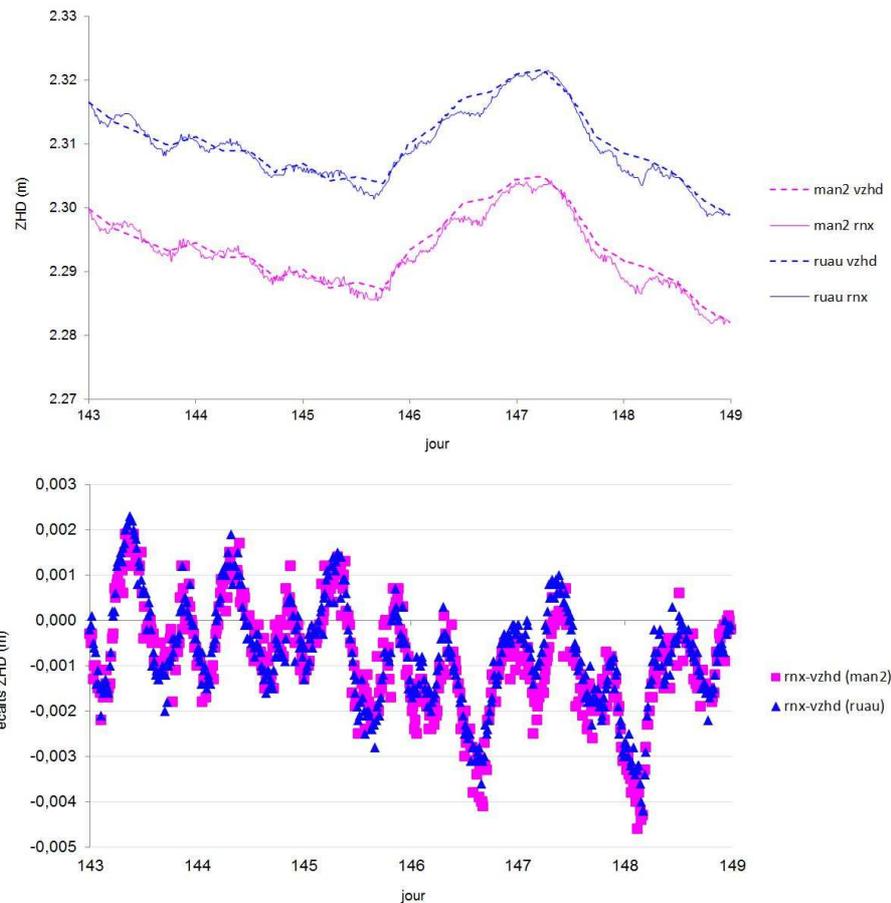


Figure 37 : Comparaison des ZHD calculés à partir des mesures « in situ » de pression avec les VZHD. Résultats pour les stations MAN2 et RUAU. En haut, les valeurs des ZHD en mètres. En bas, les écarts en mètres. Calcul sur 6 jours d’observations.

GNSS SITES	$\Delta$ ZHD (rnx-vzhd) [mm]
MAN2	$-0.9 \pm 1.2$
RUAU	$-0.7 \pm 1.2$
YVRE	$-0.7 \pm 1.1$

Tableau 5 : Biais et écarts types entre les ZHD calculés à partir des mesures « in situ » de pression et les VZHD pour les stations MAN2, RUAU et YVRE. Calcul sur 6 jours d’observations.

### 3.1.3. Résultats pré-tomographiques retenus

Pour les analyses tomographiques, la méthode retenue est la méthode « vzhd ». Les résultats sont donnés pour les stations MAN2, RUAU et ARCH représentant la diagonale nord-ouest sud-est de notre réseau (cf. Figure 38 ci-après). Ces résultats pré-tomographiques illustrent le fait qu’à l’échelle de notre réseau la variabilité du retard total entre les stations est principalement due à la composante hydrostatique. Les courbes des ZWD et des ZHD illustrent également bien la plus grande variabilité temporelle de la composante humide par rapport à la composante hydrostatique.

On observe aussi une forte corrélation spatio-temporelle des ZWD à l'échelle du réseau comme attendue (cf. paragraphe 2.1.3).

A partir de ce premier calcul global, les ZWD nous permettent d'avoir une idée du comportement de l'atmosphère pendant la semaine d'étude. Deux périodes ont été choisies pour l'étude tomographique, à savoir une période humide (pic des ZWD dans la nuit du jour 144 au jour 145) et une période sèche dans la journée du jour 147 (valeurs des ZWD les plus faibles sur la semaine d'étude).

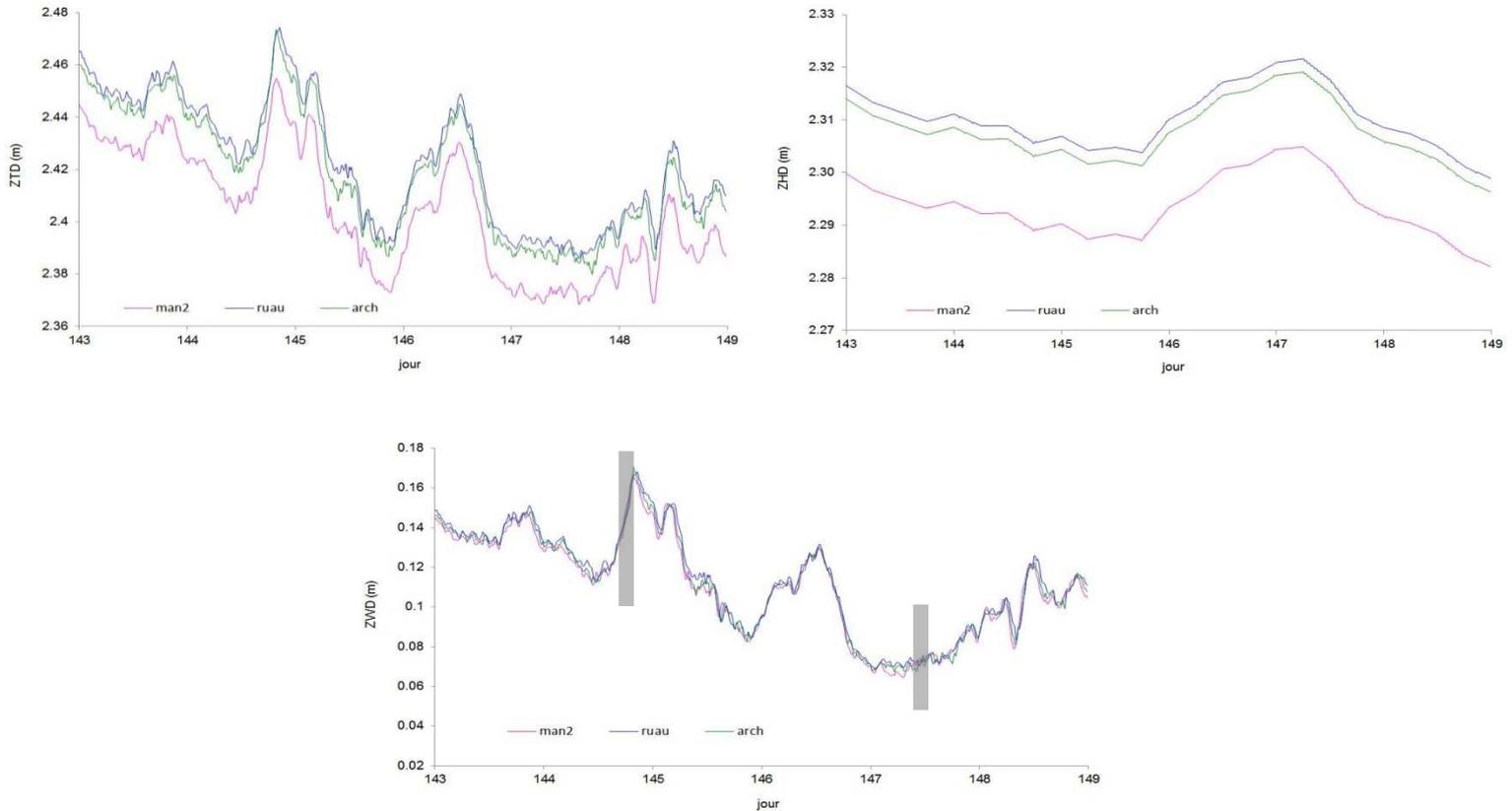


Figure 38 : Résultats des calculs pré-tomographiques pour la semaine d'étude pour les stations MAN2, RUAU et ARCH. En haut, à gauche, les résultats des ZTD (m). En haut, à droite, les résultats des ZHD (m). En bas, les résultats des ZWD (m). Stratégie de calcul : « vzhd ». En grisé, les périodes choisies pour l'étude tomographique.

## 3.2. Résultats tomographiques

Dans cette partie, ce sont les résultats tomographiques issus du logiciel TSAAR qui vont être analysés, à savoir la quantité totale de vapeur d'eau en présence (IWV en  $\text{kg}/\text{m}^2$ ) et sa répartition tridimensionnelle (densités de vapeur d'eau en  $\text{g}/\text{m}^3$ ).

### 3.2.1. Coefficient alpha : poids des mesures par rapport aux valeurs initiales

Le coefficient alpha est le premier paramétrage à effectuer pour le calcul tomographique. En effet, il va déterminer le poids que l'on affecte à nos mesures par rapport aux valeurs initiales lors de l'inversion tomographique (cf. paragraphe 1.3.4).

La problématique est la suivante : si l'on affecte une valeur élevée au coefficient alpha, on privilégie les valeurs initiales, à savoir une répartition verticale standard de la vapeur d'eau (cf. paragraphe 1.3.5). Il faut bien comprendre que si on est dans ce cas-là, l'inversion tomographique est inutile. Pour avoir les mêmes résultats, il suffit de découper verticalement les IWV suivant une répartition verticale standard (calcul simple et beaucoup moins coûteux en temps). En sachant cela, il devient alors évident de donner un maximum de poids à nos mesures afin qu'elles

soient à même de déceler une répartition verticale différente de celle utilisée pour l'initialisation (répartition verticale standard en l'occurrence). Pour ce faire, il faut donc assigner une valeur la plus faible possible au coefficient alpha. On est cependant limité par une valeur minimale. En effet, une valeur trop faible du coefficient alpha entraîne le mauvais conditionnement d'une des matrices de calcul lors de l'inversion tomographique.

La solution du problème tomographique par moindres carrés pondérés amortis prend la forme suivante :

$$X = X_0 + Q_{init} \times A^t \times (A \times Q_{init} \times A^t + \alpha^2 \times Q_{obs})^{-1} \times (L - A \times X_0) \quad (21)$$

avec,

$X$  , vecteur des inconnues

$X_0$  , vecteur des valeurs initiales

$L$  , vecteur des observations (SIWV)

$Q_{init}$  , matrice de variance covariance des valeurs initiales

$Q_{obs}$  , matrices de variance covariance des observations

$A$  , la matrice liant les observations aux inconnues (cf. paragraphe 1.3.4)

La matrice dont le conditionnement pose problème est la matrice que l'on doit inverser, à savoir  $(A \times Q_{init} \times A^t + \alpha^2 \times Q_{obs})$ . Nous avons donc décidé d'étudier la valeur du conditionnement de celle-ci suivant différentes valeurs de alpha (conditionnement calculé avec la norme par défaut utilisée sous Matlab, à savoir la norme euclidienne,  $\text{cond}(A) = \|A\|_* \|A^{-1}\|$ ). A noter que la valeur du conditionnement de cette matrice dépend également des matrices de variances covariances choisies pour les valeurs initiales et les observations. Pour cette étude, nous avons gardé les matrices de variances covariances implémentées dans le logiciel TSAAR, à savoir des matrices diagonales. Pour les valeurs initiales, les valeurs des écarts-types sont égales à 1% des densités de vapeur d'eau initiales et pour les observations, les valeurs des écarts-types sont égales à 10% des SIWV.

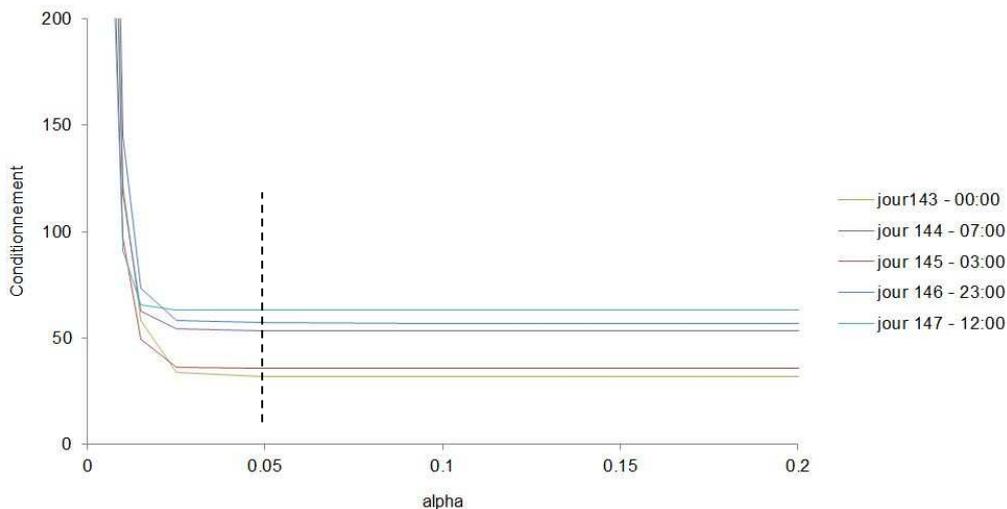


Figure 39 : Valeur de conditionnement de la matrice  $(A \times Q_{init} \times A^t + \alpha^2 \times Q_{obs})$  suivant différentes valeurs de alpha. En pointillé noir, le point d'inflexion commun des différentes courbes.

La Figure 39 illustre les valeurs de conditionnement de la matrice à inverser lors du calcul tomographique suivant différentes valeurs de alpha. Le calcul du conditionnement a été effectué sur plusieurs jours différents à des époques différentes pour couvrir le plus grand nombre de configuration de la matrice A (géométrie des satellites au-dessus du réseau). On peut remarquer qu'avec les matrices de variances covariances choisies, le conditionnement de la matrice à

inverser se dégrade de manière significative à partir de la valeur minimale de 0.025 pour le coefficient alpha. Nous avons cependant choisi comme valeur minimale une valeur légèrement supérieure, à savoir 0.05, correspondant au point d'inflexion des différentes courbes. C'est donc, dans notre cas, la plus faible valeur que l'on peut assigner au coefficient alpha tout en conservant l'intégrité des résultats finaux de densité en vapeur d'eau.

Pour illustrer l'influence du coefficient alpha, nous avons paramétré le logiciel TSAAR avec différentes valeurs ( $\alpha=0.005$ ,  $\alpha=0.01$ ,  $\alpha=0.05$ ,  $\alpha=0.1$ ,  $\alpha=0.5$ ). La Figure 40 ci-dessous illustre les résultats obtenus sur la répartition verticale de la vapeur d'eau au-dessus des stations MAN2 et RUAU.

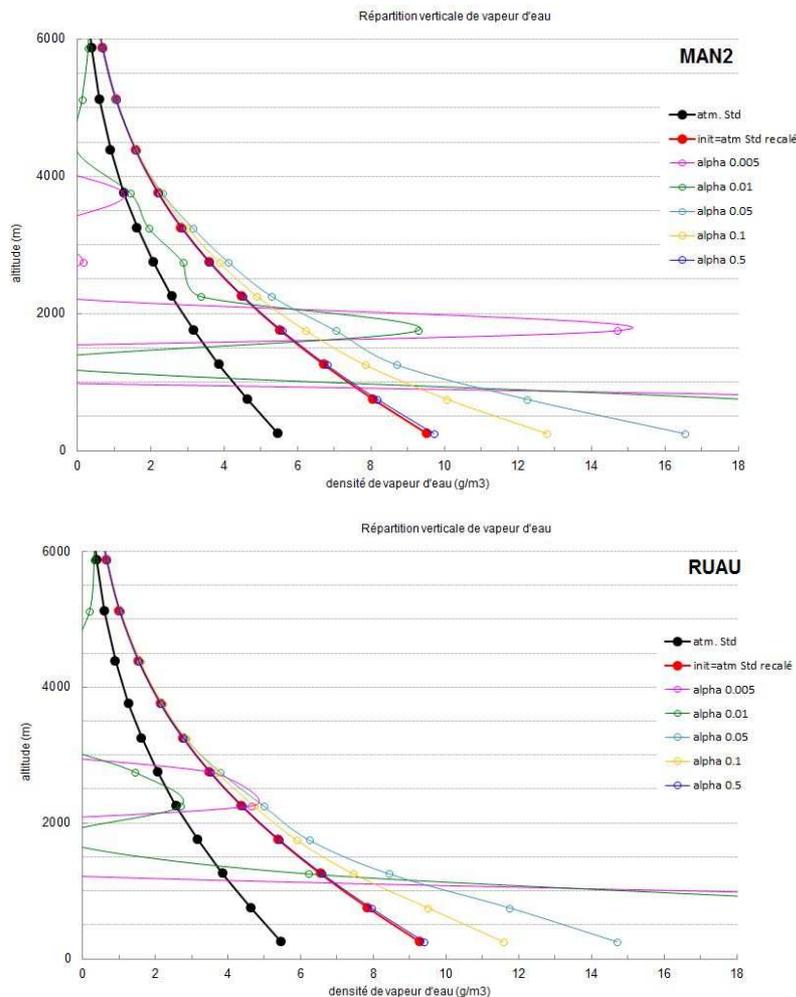


Figure 40 : Répartition verticale de la vapeur d'eau au-dessus des stations MAN2 et RUAU. Les points représentent les valeurs de densités de vapeur d'eau ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) pour chaque étage de voxels au-dessus de chaque station (cf. Annexe 2). Résultats pour différentes valeurs de alpha (jour 145 - 03:00). En noir, les valeurs de l'atmosphère standard. En rouge, les valeurs initiales (atmosphère standard recalée par IWV, cf. paragraphe 1.3.5).

Pour les résultats avec des valeurs de alpha inférieur à 0.05 (courbe rose alpha=0.005, courbe verte alpha=0.01), on voit clairement que les résultats ne sont pas exploitables du fait du mauvais conditionnement de la matrice ( $A \times Q_{init} \times A^t + \alpha^2 \times Q_{obs}$ ). La courbe bleu ciel (alpha=0.05) est la première courbe exploitable et représente les résultats où les observations ont un maximum de poids par rapport aux valeurs initiales. Ensuite, on peut voir que plus on augmente le coefficient alpha plus les courbes se rapprochent des valeurs initiales. La courbe jaune (alpha=0.1) représente un paramétrage intermédiaire avec un poids également réparti entre les observations et les valeurs initiales et la courbe bleu foncée (alpha=0.5), confondue avec la courbe rouge, représente un poids maximal donné aux valeurs initiales. Cette dernière courbe

( $\alpha=0.5$ ) montre bien qu'une valeur trop élevée de  $\alpha$  annule toute influence de l'inversion tomographique puisque les résultats sont égaux aux valeurs initiales. Ceci est en accord avec les travaux de Gaëtan Meunier qui n'a pas observé de différences significatives entre les résultats tomographiques pour la campagne GNSS-AGRI entre un coefficient  $\alpha$  égal à 1 ou à 0.2. Ces 2 valeurs de  $\alpha$  contraignent en effet trop les résultats à leurs valeurs initiales.

Finalement, on peut voir le coefficient  $\alpha$  comme le réglage d'une contrainte faite sur la sensibilité de l'inversion tomographique. Plus  $\alpha$  est grand et plus le résultat tomographique est contraint par ses valeurs initiales, donc peu sensible à l'apport d'information des mesures GNSS. A l'inverse, plus  $\alpha$  est petit, plus les résultats seront sensibles aux observations, ce qui est notre intérêt pour avoir un processus tomographique le plus sensible possible, donc le plus à même à se rapprocher de la réalité.

Un deuxième test a été effectué pour essayer de voir si le coefficient  $\alpha$  a une influence sur tous les voxels, à savoir les voxels vides et les voxels contenant des « rais ». En effet, le test précédent a été effectué avec une grille de voxels au sol de 2\*2 voxels. Avec cette configuration, tous les voxels au-dessus de notre réseau contiennent au moins un « rai ». Nous reviendrons dans les perspectives de cette étude sur cette configuration particulière. Le test ci-après a été effectué avec une grille de voxels au sol de 3\*3 voxels. Avec cette configuration, plusieurs voxels au sol se retrouvent vides d'informations du fait qu'ils ne contiennent pas de stations (cf. Figure 41). Le but de ce test est de voir s'il y a transfert d'informations entre les voxels contenant des « rais » et les voxels vides suivant le paramétrage du coefficient  $\alpha$ .

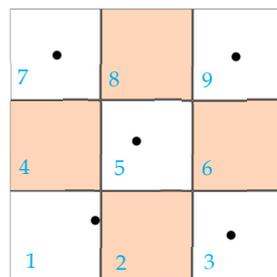


Figure 41 : Configuration 3\*3 voxels au sol. Les voxels colorés sont les voxels au sol vides ou avec très peu d'informations. Les points noirs représentent les stations au sol. Chaque voxel est défini par un numéro en bleu.

La Figure 42 ci-après représente les résultats tomographiques (densités de vapeur d'eau) pour le premier étage de voxels, à savoir les 9 voxels au sol illustrés plus haut, pour différentes valeurs de  $\alpha$ . On peut remarquer que ce sont seulement les voxels contenant des « rais » qui sont impactés par le paramétrage du coefficient  $\alpha$ , à savoir les voxels 1, 3, 5, 7 et 9 (cf. Figure 41). Pour les voxels vides 2, 6, 4 et 8 les valeurs des densités de vapeur d'eau restent semblables, à savoir environ 10 g/m<sup>3</sup> (couleur bleu turquoise).

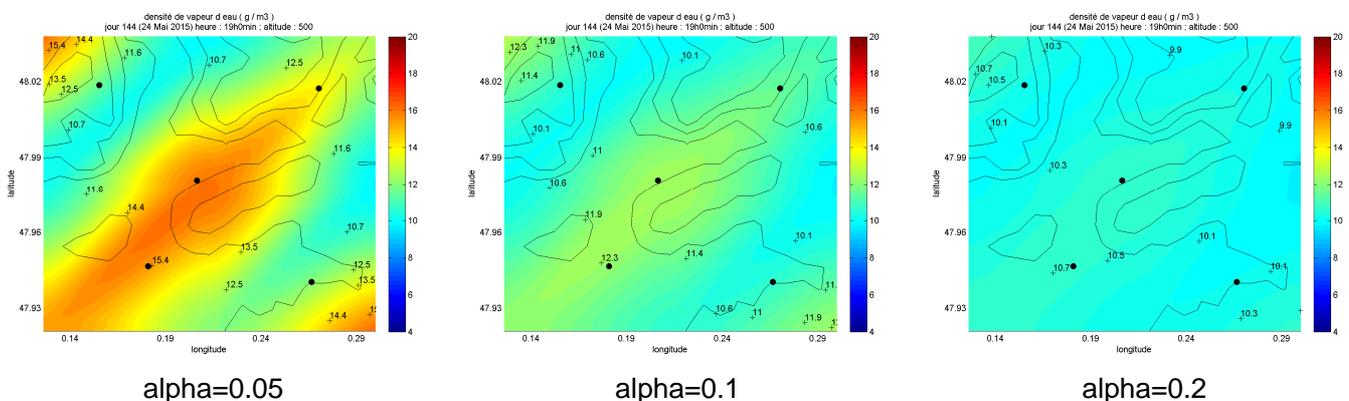


Figure 42 : Résultats tomographiques (profils horizontaux) de densités de vapeur d'eau pour le premier étage de voxels (altitude : 500 m) suivant différentes valeurs de  $\alpha$ . Unités : g/m<sup>3</sup>. Les points noirs illustrent les stations de campagne. Les lignes noires représentent les courbes de niveaux du relief. Les annotations en noirs sont des valeurs de densités de vapeur d'eau. Résultats pour le jour 144 (24 mai 2015) à 19h00.

Pour mieux visualiser cet effet, nous avons calculé les valeurs de densités de vapeur d'eau pour les voxels 5 (ARCH) et 8 (voxel vide) sur une journée. La Figure 43 illustre les résultats obtenus suivant différentes valeurs de alpha (0.05, 0.1 et 0.2 comme précédemment).

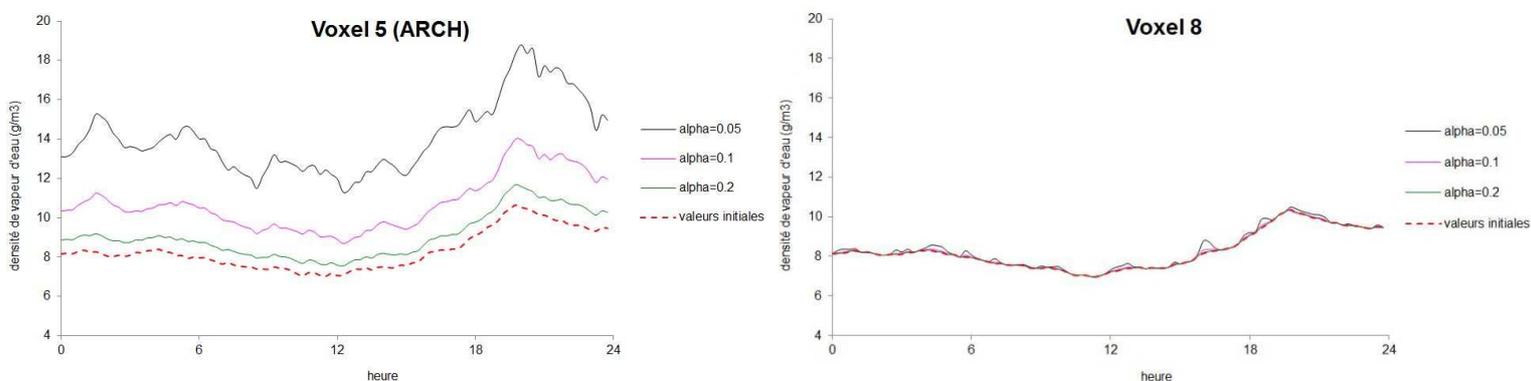


Figure 43 : Résultats tomographiques de densités de vapeur d'eau sur une journée pour les voxels 5 (ARCH) et 8 (voxel vide) suivant différentes valeurs de alpha. Unité :  $\text{g}/\text{m}^3$ . Résultats pour le jour 144 (24 mai 2015). En pointillés rouges, les valeurs initiales du calcul tomographique.

On voit très nettement que le paramétrage du coefficient alpha n'impacte pas du tout le calcul des densités de vapeur d'eau pour les voxels ne contenant pas d'information (cf. voxel 8 Figure 43). De plus, on peut remarquer que les valeurs calculées sont très sensiblement égales aux valeurs initiales. Les valeurs de densités de vapeur d'eau pour les voxels vides sont donc complètement indépendantes de l'inversion tomographique. A l'inverse, on retrouve la conclusion du premier test en ce qui concerne les voxels contenant des « rais », à savoir qu'une trop grande valeur de alpha contraint les valeurs de densités de vapeur d'eau jusqu'aux valeurs initiales du calcul tomographique (cf. voxel 5 Figure 43).

Ces deux différents tests nous permettent de tirer deux conclusions sur l'influence du coefficient alpha. Premièrement, son paramétrage ne permet pas de combler l'absence d'information dans les voxels vides. En d'autres termes, les valeurs de densités de vapeur d'eau des voxels vides (égales aux valeurs initiales) ne sont pas homogènes avec les valeurs de densités de vapeur d'eau calculées dans les voxels contenant de l'information. Il est donc très important d'avoir une configuration de voxels induisant un minimum de voxels vides (cf. paragraphe suivant). La deuxième conclusion que l'on peut tirer est que le coefficient alpha est une contrainte pour les voxels contenant de l'information. Cette contrainte est nécessaire pour la résolution mathématique du problème tomographique mais il convient néanmoins de la limiter au maximum pour donner du poids aux mesures GNSS afin qu'elles soient à même de fournir l'information que l'on recherche, c'est-à-dire une répartition verticale non standard de la vapeur d'eau.

### 3.2.2. Différentes discrétisation de l'espace (choix du nombre de voxels)

Dans la continuité du test précédent, nous avons donc retenu une valeur minimum de alpha de 0.05 pour donner un maximum de poids à nos observations GNSS. L'objet de ce test est de confirmer l'influence néfaste sur les résultats tomographiques de la présence de voxels vides d'informations.

La présence de voxels vides dans notre réseau est assujettie à la discrétisation de l'espace choisie. Cette discrétisation de l'espace se fait suivant 2 paramètres : une discrétisation horizontale (choix du nombre de voxels au sol) et une discrétisation verticale (nombre de couches verticales). Nous avons donc visualisé l'influence de ces paramètres sur le nombre de voxels vides induits. La

Figure 44 illustre les résultats obtenus avec la proportion de voxels contenant de l'information en fonction de la discrétisation verticale choisie pour plusieurs discrétisations horizontales. On remarque que c'est le choix de la discrétisation horizontale qui impacte de manière la plus significative la proportion de voxels vides par rapport aux voxels contenant de l'information. Une configuration au sol de 2\*2 voxels fait que 100% des voxels contiennent de l'information tandis qu'une configuration avec 5\*5 voxels au sol fait chuter ce nombre à 70%. A l'inverse, pour une discrétisation au sol choisie, on voit que l'augmentation du nombre de couches verticales n'influe que très peu sur la proportion de voxels vides.

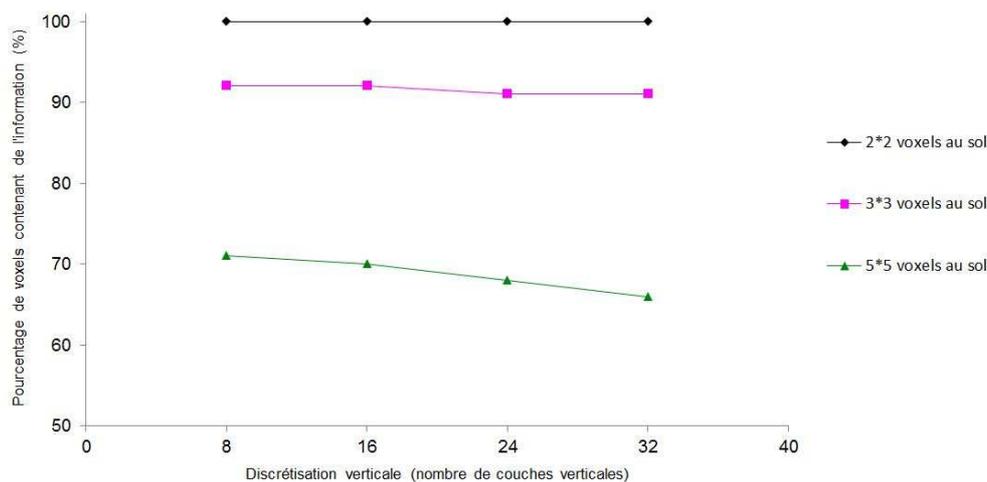


Figure 44 : Pourcentage de voxels contenant de l'information en fonction de la discrétisation verticale. Résultats pour plusieurs discrétisation horizontales, à savoir 2\*2, 3\*3 et 5\*5 voxels au sol. Calcul réalisé pour le jour 144 (24 mai 2015) à 00h00.

Nous avons donc réalisé plusieurs calculs avec différentes discrétisations horizontales pour visualiser l'effet du nombre de voxels vides à l'intérieur de notre réseau, l'influence de la discrétisation verticale se traduisant surtout sur la résolution verticale des résultats tomographiques et non sur leurs valeurs (Reverdy, 2008 ; Meunier, 2014). Le nombre de couches verticales choisies pour cette étude est de 16 avec un pas de 500 m (option « fix500 » dans le logiciel TSAAR).

Le résultat de ce test est que les valeurs de densité de vapeur d'eau dans les voxels vides ne sont pas homogènes avec les valeurs de densité de vapeur d'eau dans les voxels contenant de l'information. Les profils horizontaux de vapeur d'eau illustrés à la Figure 45 montrent effectivement qu'il y a une très grande différence de valeur entre les voxels vides et les voxels contenant des « rais » (15-16 g/m<sup>3</sup> pour les voxels contenant de l'information contre 10-11 g/m<sup>3</sup> pour les voxels vides). Ce phénomène est d'autant plus accentué du fait que l'on a fixé un coefficient alpha très faible, et que donc l'information de nos mesures GNSS a beaucoup de poids. Comme nous l'avons vu précédemment, il n'y a pas de transfert d'information entre les voxels vides et les voxels contenant des « rais ». Les résultats tomographiques avec la présence de voxels vides sont donc très hétérogènes et semblent peu cohérents avec la réalité car trop reliés à la configuration des voxels au sol (cf. similitudes entre l'emplacement des voxels vides et les zones de faibles densités de vapeur d'eau pour les configurations 3\*3 et 5\*5 voxels, profils horizontaux Figure 45). Cette hétérogénéité se retrouve également sur la répartition verticale de la vapeur d'eau (cf. profils verticaux Figure 45). On observe notamment avec les configurations 3\*3 et 5\*5 voxels, des couches de densités de vapeur d'eau non-horizontales en basse altitude, ce qui est vraisemblablement non cohérent avec le relief de notre zone d'étude. En effet, les faibles variations topographiques de notre site doivent induire des couches de vapeur d'eau sensiblement horizontales (Reverdy, 2008). Finalement, le résultat le plus cohérent et homogène

est celui avec la configuration 2\*2 voxels au sol qui n'induit pas de voxels vides dans notre réseau.

En conclusion de ce test, il apparaît que la discrétisation horizontale de l'espace d'étude est primordiale pour une bonne homogénéité et cohérence des résultats. L'emplacement et le nombre de nos stations avec une configuration de 2\*2 voxels au sol nous permettent d'avoir de l'information dans la totalité des voxels. Un voxel au sol pour au moins une station semble être une bonne stratégie pour obtenir cette configuration optimale.

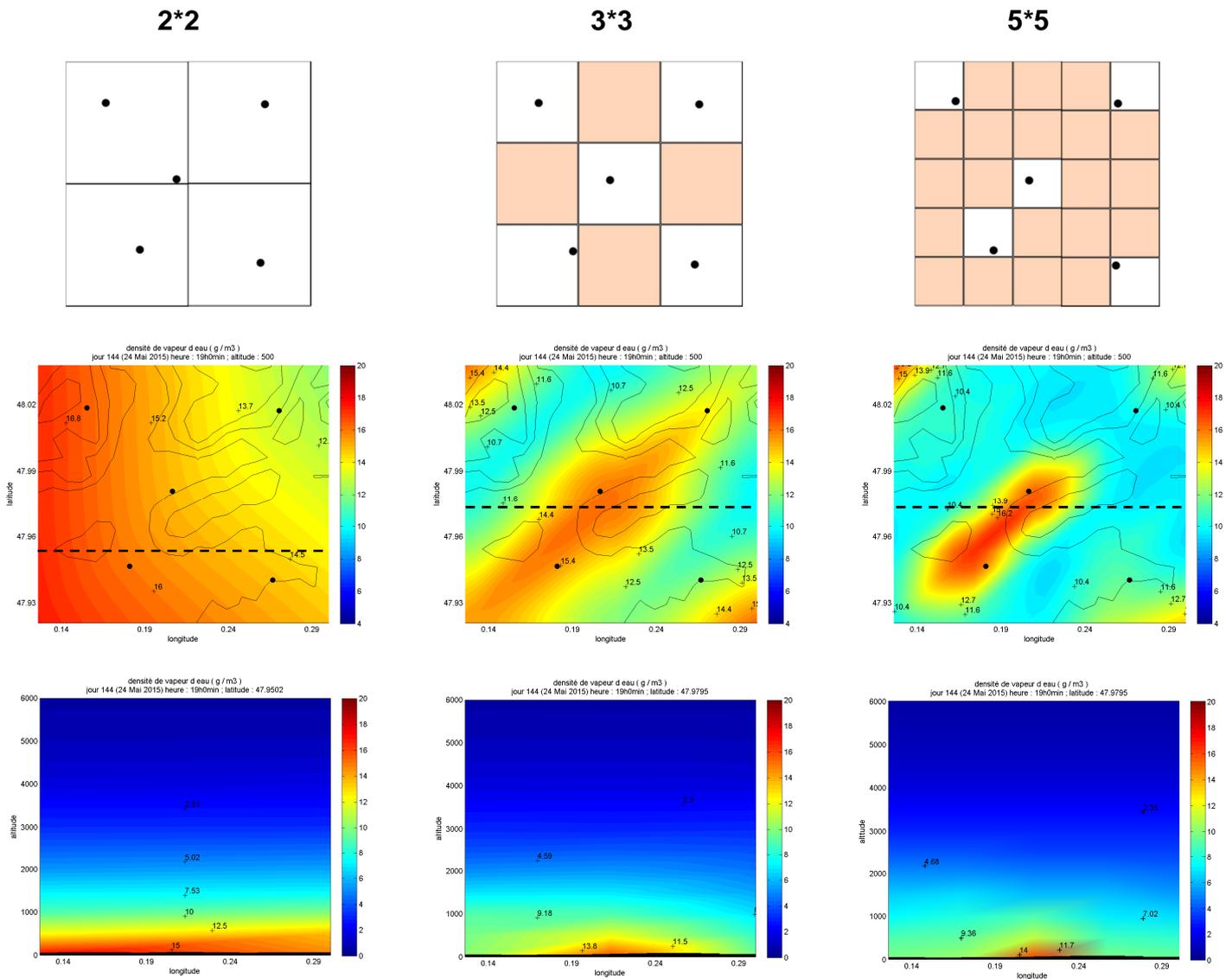


Figure 45: Résultats tomographiques pour différentes discrétisation horizontales. En haut, les différentes configurations de voxels au sol choisies avec, coloriés, les voxels au sol vides d'information. Au milieu, les profils horizontaux de densité de vapeur d'eau en  $g/m^3$  (altitude : 500m). En bas, les profils verticaux de densités de vapeur d'eau en  $g/m^3$ . Les lignes pointillées en noires sur les profils horizontaux représentent l'emplacement des profils verticaux illustrés en dessous. Les points noirs représentent l'emplacement des stations de campagne. Les lignes noires sur les profils horizontaux représentent les courbes de niveaux du relief de la zone d'étude. Les annotations en noirs sont des valeurs de densités de vapeur d'eau. Calcul réalisé pour le 144 (24 mai 2015) à 19h00.

### 3.2.3. Apport des mesures « in situ » de température sur le calcul des IWV

Pour cette partie, nous nous sommes intéressés à l'apport des mesures « in situ » de température sur le calcul des contenus intégrés de vapeur d'eau (cf. paragraphe 1.3.2, équation 9). Comme nous l'avons vu, le contenu intégré de vapeur d'eau est le point de départ de la tomographie et le premier résultat exploitable en matière météorologique. L'objet de ce test est de comparer les valeurs d'IWV calculées à partir de mesures « in situ » de température et calculées à partir du modèle GPT (cf. paragraphe 2.3.2, Figure 33, choix n°2).

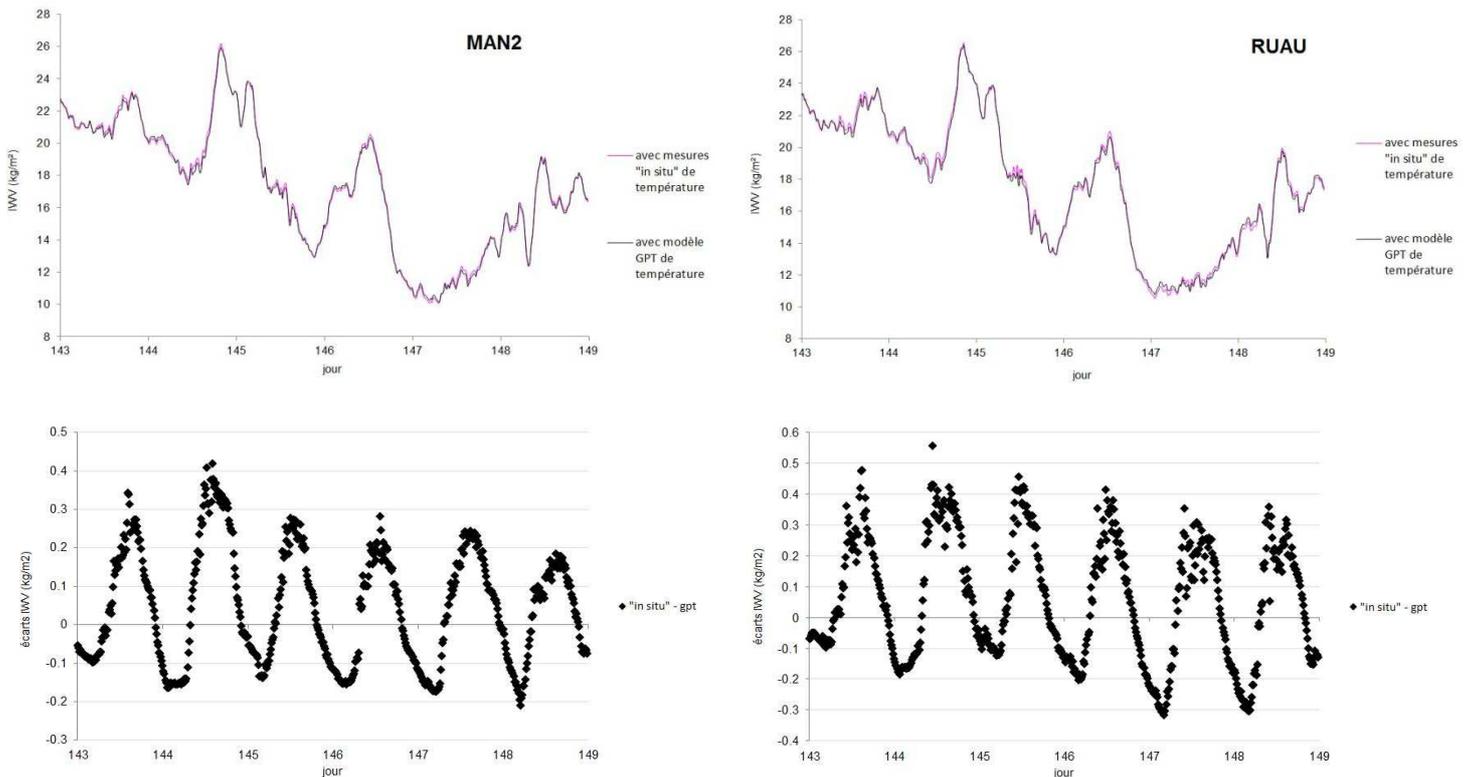


Figure 46 : Comparaison des 2 stratégies de calcul des IWV à partir de mesures « in situ » de température et à partir du modèle GPT de température. En haut, les valeurs d'IWV en kg/m<sup>2</sup>. En bas, les écarts entre les 2 méthodes en kg/m<sup>2</sup>. Résultats pour les stations MAN2 et RUAU sur 6 jours d'observations.

La Figure 46 ci-dessus illustre les résultats obtenus. On peut remarquer que les méthodes de calcul donnent des résultats très similaires. Quantitativement, le biais entre les 2 méthodes est quasiment nul (quelques centièmes de kg/m<sup>2</sup>, cf. Tableau 6).

On retrouve sur les graphiques des écarts les variations journalières de température non prises en compte par le modèle GPT (cf. Figure 27a). Ces variations journalières de la température entraînent des écarts maximums de 0.4-0.5 kg/m<sup>2</sup> avec les IWV calculés à l'aide du modèle GPT. Ces écarts sont peu significatifs. En effet, on a vu que 6 mm de ZWD correspondent environ à 1kg/m<sup>2</sup> de quantité de vapeur d'eau (cf. paragraphe 1.3.2). La précision d'estimation des ZWD étant d'environ 4-5 mm, on obtient une incertitude minimum sur les IWV d'environ 1kg/m<sup>2</sup>. A ce titre, les écarts maximums observés pour ce test de 0.4-0.5 kg/m<sup>2</sup> sont donc peu significatifs.

En conclusion, les mesures « in situ » de température n'apportent pas une information significative sur le calcul des IWV. La qualité du modèle GPT de température est suffisante pour cette application tomographique tant qu'il n'y a pas d'évolution sur la précision d'estimation des ZWD.

GNSS SITES	$\Delta IWV$ (in situ-gpt) [kg/m <sup>2</sup> ]
MAN2	0.04 ± 0.15
RUAU	0.06 ± 0.20
YVRE	0.02 ± 0.16

Tableau 6 : Biais et écarts types entre les IWV calculés à partir de mesures « in situ » de température et à partir du modèle GPT de température. Calcul sur 6 jours d’observations. Résultats pour les stations MAN2, RUAU et YVRE.

### 3.2.4. Discussion sur les résultats bruts en sortie de TSAAR

Pour cette partie, nous allons discuter des résultats de densités de vapeur d’eau en sortie du logiciel TSAAR et notamment du phénomène de surestimation de la vapeur d’eau de l’inversion tomographique (Reverdy, 2008).

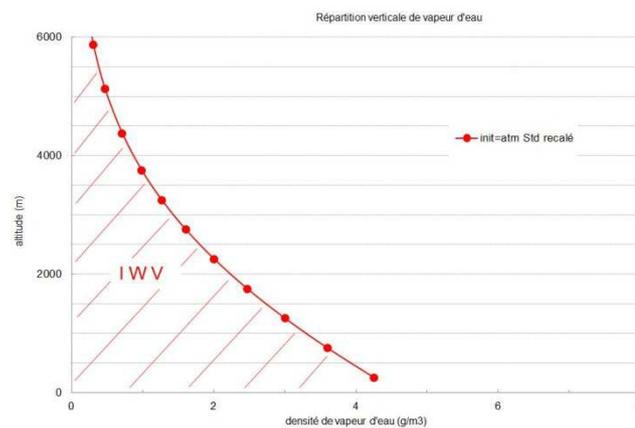


Figure 47 : Illustration du contenu intégré de vapeur d’eau estimé par GNSS, intégrale des valeurs initiales de densités de vapeur d’eau à la verticale d’une station. Résultats d’un calcul pour la station MAN2 le 24 mai 2015 à 19h30.

La Figure 47 illustre des valeurs de densités de vapeur à la verticale d’une station. En l’occurrence, ce sont des valeurs initiales, à savoir des valeurs correspondant au contenu intégré de vapeur d’eau (IWV) estimé par GNSS et à une répartition verticale standard. On peut illustrer le contenu intégré de vapeur d’eau sur cette Figure par l’aire comprise entre la courbe de densité (courbe rouge) et l’axe des ordonnées (altitudes). En effet, l’équation 13 (cf. paragraphe 1.3.4) appliquée à la verticale d’une station peut s’écrire :

$$IWV = \int_Z \rho \, dz \quad (22)$$

avec  $\rho$ , la densité de vapeur d’eau,  $dz$  un élément de longueur verticale et  $Z$  l’épaisseur de la troposphère considérée (communément 12000 m).

A partir des IWV, comme nous l'avons vu, l'inversion tomographique permet de restituer la répartition 3D de la vapeur d'eau. Si le processus de calcul était parfait, on obtiendrait le même contenu de vapeur d'eau dans une nouvelle configuration spatiale. Ce n'est pas le cas. On observe une surestimation de la quantité totale de vapeur d'eau par rapport aux valeurs d'IWV.

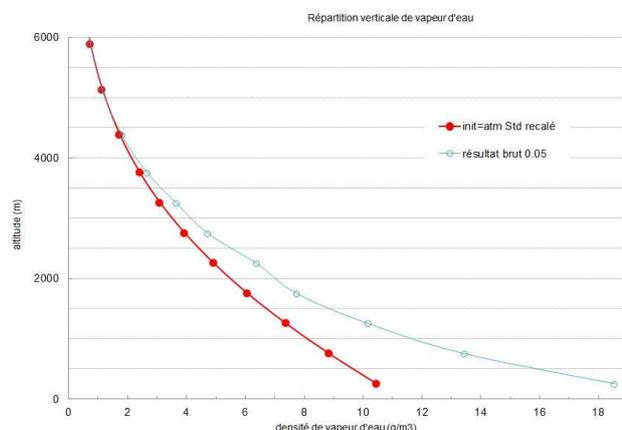


Figure 48 : Comparaison des valeurs initiales et des résultats bruts en sortie du logiciel TSAAR. En rouge, les valeurs initiales. En bleu ciel, les valeurs brutes calculées par TSAAR (coefficient alpha=0.05). Résultats pour la station MAN2 le 24 mai 2015 à 19h30.

La Figure 48 illustre cette surestimation induite par l'inversion tomographique lorsqu'elle recalcule un contenu de vapeur d'eau en estimant des densités dans chaque voxel. On observe en effet sur la Figure 48 que le contenu total de vapeur d'eau à la verticale de la station MAN2 est supérieur à la valeur d'IWV initiale (aire sous la courbe bleu ciel supérieure à l'aire sous la courbe rouge). Les 2 différentes répartitions verticales illustrées sont donc difficilement comparables puisqu'elles ont des contenus de vapeur d'eau différents.

Les valeurs d'IWV étant calculées en amont avec des logiciels plus éprouvés (GAMIT en l'occurrence), ce sont elles que nous avons considérées comme plus justes. La fiabilité des valeurs d'IWV calculées par les logiciels géodésiques est d'ailleurs moins à démontrer, preuve en est de leur utilisation actuelle dans des modèles de prédiction météorologique (cf. paragraphe 1.4).

Pour pallier à la surestimation observée, la méthode préconisée ici consiste à recalculer les résultats bruts de TSAAR sur les valeurs d'IWV initiales estimées par GNSS. Ce recalage se fait exactement de la même manière que le recalage de l'atmosphère standard pour les valeurs initiales (cf. paragraphe 1.3.5). D'un point de vue mathématique, cela consiste à calculer le rapport entre la valeur d'IWV initiale et la valeur d'IWV issue du traitement tomographique. La valeur d'IWV issue du calcul tomographique se calcule simplement en faisant la somme des produits des densités de vapeur d'eau avec leur hauteur de voxels respective (cf. équation 22). On multiplie alors le rapport calculé à nos valeurs brutes de densités de vapeur d'eau pour trouver les nouvelles valeurs de densité de vapeur d'eau. Le résultat est illustré à la Figure 49. Par ce procédé, on conserve l'information donnée par nos mesures sur la répartition de la vapeur d'eau tout en annulant le phénomène de surestimation du contenu de vapeur d'eau en présence.

En conclusion, cette méthode permet de rendre les résultats de TSAAR plus cohérents avec nos valeurs d'IWV. On observe alors des valeurs de densités d'eau moins surestimées tout en conservant l'information sur sa répartition verticale. Ceci nous permet de conserver un coefficient alpha le plus faible possible pour une inversion tomographique la plus sensible possible. En effet, on notera sur les résultats de la Figure 49, une petite irrégularité dans la répartition verticale de la vapeur d'eau à l'altitude de 2000 m. Difficile de juger de la fiabilité de cette information sans mesures de comparaison comme un radiosondage. Néanmoins, ce type d'irrégularités est lissé suivant la répartition verticale (courbe rouge) si l'on choisit un coefficient alpha plus grand pour

pallier à la surestimation de l'inversion tomographique (cf. Figure 50). Nous avons donc conservé notre valeur de alpha de 0.05 pour les résultats finaux de cette étude.

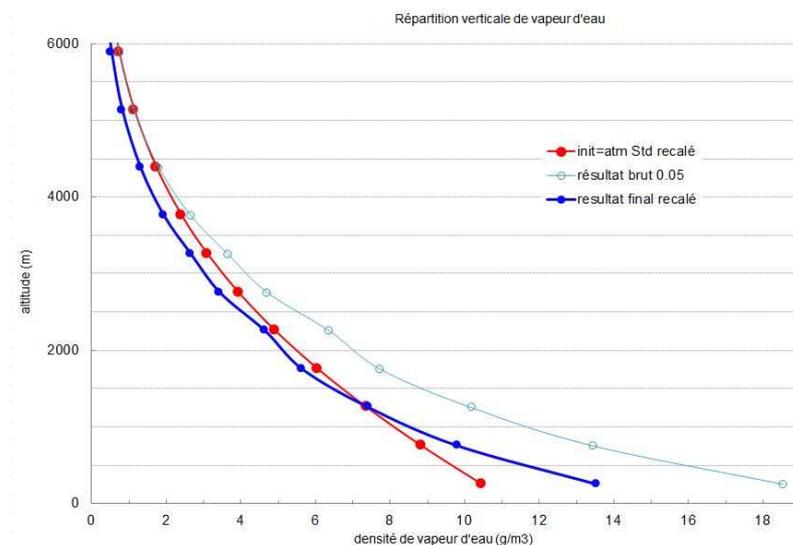


Figure 49 : Recalage des résultats bruts de TSAAR sur la valeur d'IWV initiale estimée par GNSS. En rouge, les valeurs initiales. En bleu ciel, les résultats bruts avec un coefficient alpha égal à 0.05. En bleu foncé, les résultats finaux recalés. Résultats pour la station MAN2 le 24 mai 2014 à 19h30.

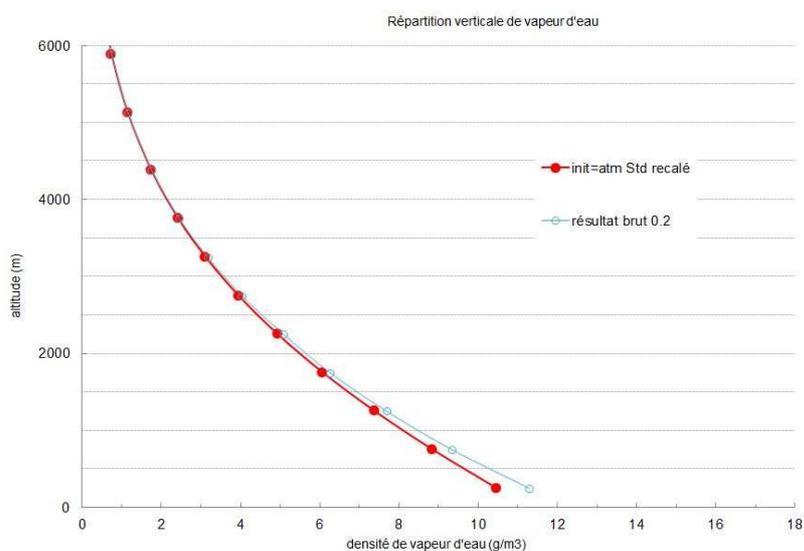


Figure 50 : Valeurs initiales (en rouge) et résultats bruts de la répartition verticale de densité de vapeur d'eau avec un coefficient alpha égal 0.2 (en bleu ciel). Résultats pour la station MAN2 le 24 mai 2014 à 19h30.

### 3.2.5. Produits tomographiques finaux

Cette dernière partie a pour but de présenter les différents produits que peut fournir le logiciel TSAAR pour une analyse tridimensionnelle du contenu de la vapeur d'eau dans la troposphère. Faute de temps, le recalage des résultats bruts de TSAAR n'a pas été implémenté dans le logiciel. Les résultats seront donc présentés avec leur surestimation (cf. paragraphe précédent), sauf pour la Figure 53 où les résultats ont été recalés manuellement sous Excel.

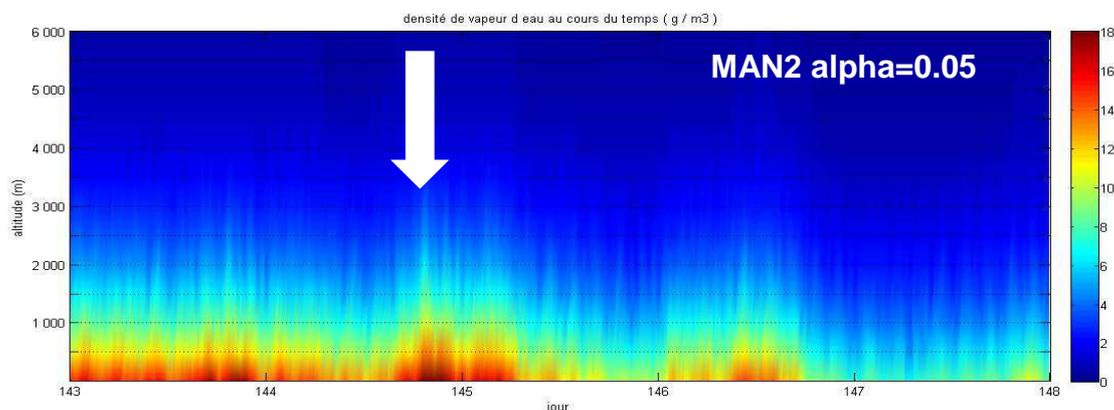


Figure 51 : Série temporelle de la répartition verticale de densité de vapeur d'eau au-dessus de MAN2. La flèche blanche représente la fenêtre météorologique présentée à la Figure 52 et 53.

L'écriture de plusieurs scripts « Matlab » (cf. Annexe 2 et 3) pour l'organisation des résultats numériques de densités de vapeur d'eau a permis d'obtenir le type de graphe illustré Figure 51, qui permet de suivre l'évolution temporelle de la distribution verticale de densité de vapeur d'eau au-dessus d'une station. Pour une étude plus quantitative, ces mêmes scripts permettent d'obtenir les graphiques illustrés Figure 53, à savoir la répartition verticale de vapeur d'eau à une date donnée pour une station donnée.

L'épisode météorologique présenté à la Figure 52 et 53 représente le pic d'humidité observé sur les courbes des ZWD (cf. paragraphe 3.1.3, Figure 38). De 18h00 à 19h30 pour la Figure 52 et jusqu'à 20h30 pour la Figure 53, par pas de 30 minutes, les résultats tomographiques de densités de vapeur d'eau ont été obtenus avec le paramétrage suivant : 2\*2 voxels au sol, 16 couches verticales, coefficient alpha égal à 0.05.

Pour la Figure 52, on observe une bonne ressemblance de comportement de la vapeur d'eau entre les cartes 2D d'IWV et les profils horizontaux de vapeur d'eau pour le premier étage de voxels (altitude 500 m), à savoir une arrivée de l'humidité par l'ouest et son déplacement vers l'est. Cette ressemblance est cohérente car notre site d'étude est très peu marqué par le relief, donc la majorité de la vapeur d'eau se trouve dans les premiers étages de voxels sur toute la zone d'étude. On remarque par ailleurs une singularité au coin nord-est de la zone au-dessus de la station YVRE (valeurs de densité de vapeur d'eau plus faibles). Ceci est dû au problème de l'antenne d'YVRE, mentionné au paragraphe 2.1.2, qui a entraîné une sous-estimation des IWV de la station. Les profils verticaux sont eux aussi légèrement impactés par cette sous-estimation dans les premières couches, mais restent globalement cohérents avec des couches de vapeur d'eau horizontales conformes au faible relief de la zone d'étude.

Sur la Figure 53, on peut observer que la vapeur d'eau sur notre zone d'étude semble se comporter légèrement différemment au niveau de sa répartition verticale par rapport à l'atmosphère standard avec notamment une plus grande concentration de la vapeur d'eau en-dessous de 1000 m. On observe également quelques singularités sur la répartition verticale au niveau de 2000 m d'altitude au moment du pic d'humidité sur les graphes de 19h30 et de 20h00.

En conclusion, on peut retirer une bonne cohérence de nos résultats, néanmoins il faut y attacher une certaine réserve tant qu'il n'y a pas de comparaison avec une mesure externe comme un radiosondage ou les résultats de mesure d'un radiomètre à vapeur d'eau par exemple.

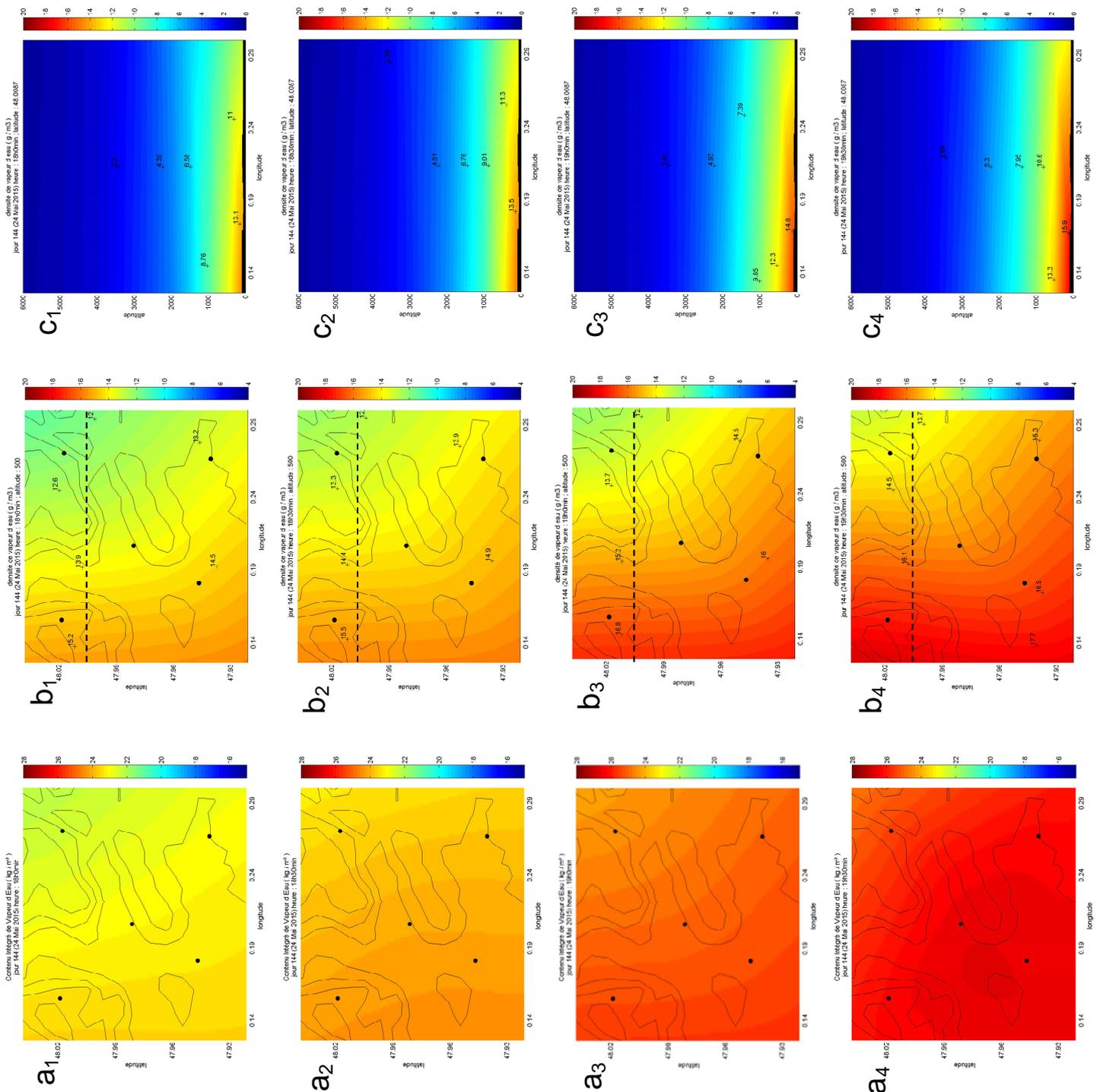


Figure 52 : (a) Carte 2D d'IWV de 18h00 à 19h30, par pas de 30 min (jour 144, 24 mai 2015, période humide). Unités en kg/m<sup>2</sup> ; (b) Profil horizontal de densité en vapeur d'eau (altitude 500 m). Unités en g/m<sup>3</sup> ; (c) Profil vertical de densité en vapeur d'eau suivant la latitude. Unités en g/m<sup>3</sup>. Les points noirs en (a) et (b) représentent les positions des stations du réseau. La ligne pointillée en (b) représente la coupe verticale montrée en (c). Les lignes noires en (a) et (b) représentent les courbes de niveaux du relief. Les annotations en noirs sont des valeurs de densités de vapeur d'eau. Méthode de calcul « vzhd ». Coefficient alpha=0.05. IWV calculés avec le modèle GPT de température. Résultats finaux non recalés (cf. paragraphe 3.2.4).

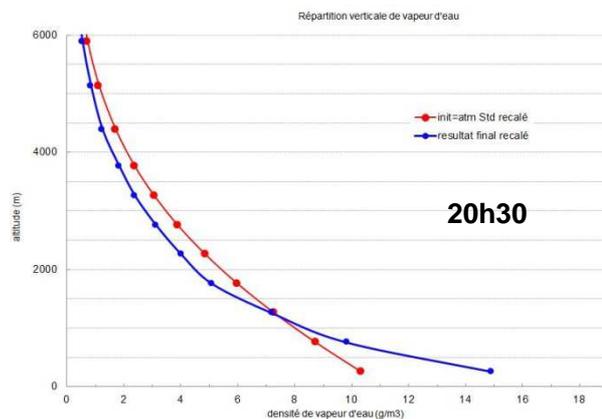
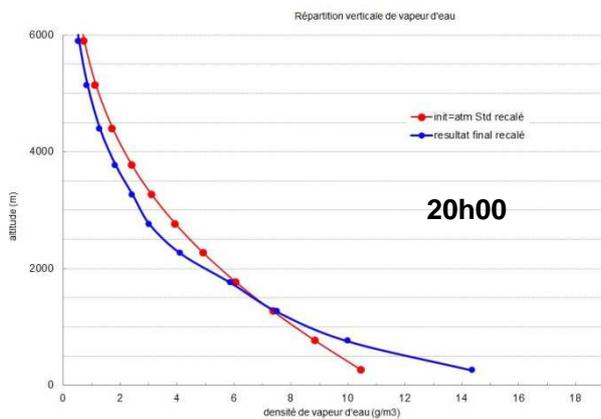
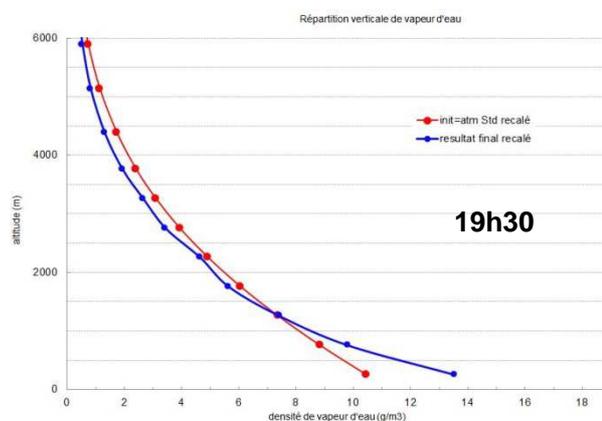
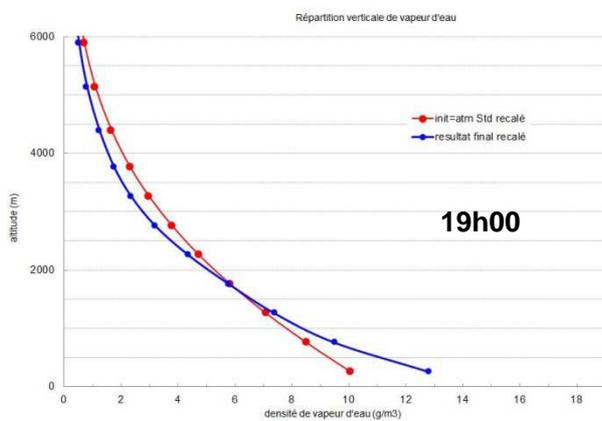
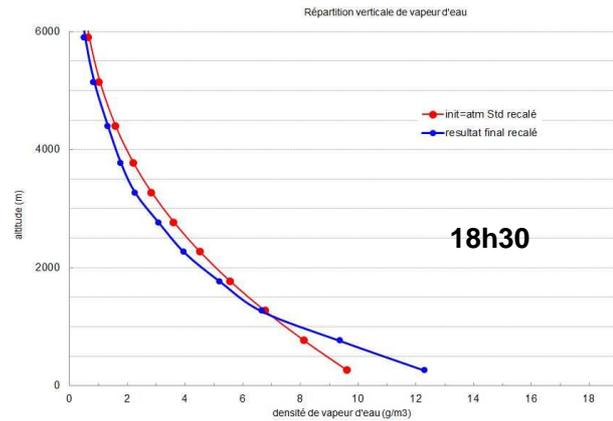
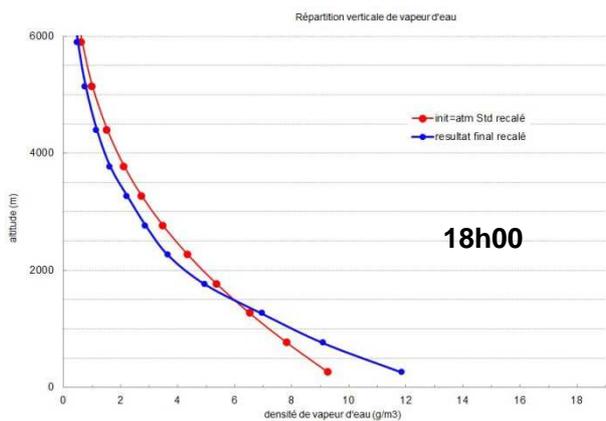


Figure 53 : Répartition verticale de vapeur d'eau au-dessus de la station MAN2. En rouge, les valeurs initiales correspondant à une répartition verticale standard. Résultats pour le jour 144 (24 mai 2015) à 18h00, 18h30, 19h00, 19h30, 20h00 et 20h30. Résultats bruts recalés (cf. paragraphe 3.2.4).

## Conclusion et perspectives

L'élaboration du réseau effectuée pendant cette étude a permis de construire un très bon outil pour des expériences GNSS. Son utilisation pour la tomographie troposphérique a démontré tous les avantages qu'offrent les systèmes GNSS pour cette application météorologique, notamment l'enregistrement continu de données ainsi que la simplicité d'acquisition de celles-ci. Pour une application météorologique, le choix des sites d'installation est également simplifié du fait qu'un bâtiment pérenne suffise (pas de nécessité d'être sur de la roche comme pour des études de déformations de croûte terrestre). Cette phase de terrain fut très enrichissante d'un point de vue technique et m'a permis d'apprendre énormément sur le fonctionnement opérationnel d'un réseau GNSS local.

Dans la continuité des travaux de Gaëtan Meunier et Clément Montibert réalisés en 2014, cette étude a continué d'apporter des méthodes de travail et des critiques sur les outils actuels concernant la tomographie troposphérique GNSS.

Concernant la partie pré-tomographique (GAMIT), le travail mené a permis d'analyser l'apport des mesures météorologiques « in situ » sur le calcul des ZWD. Ces mesures « in situ » effectuées à l'aide de stations météorologiques de précision (PTU300) montrent leur grand potentiel notamment du fait qu'elles soient plus précises que les modèles météorologiques actuels mais également du fait qu'elles soient compatibles avec un traitement tomographique en temps réel. La mesure « in situ » de pression est la mesure météorologique à prendre en considération pour la partie pré-tomographique, notamment pour le calcul des ZHD. Associée au modèle de reconstitution de Saastamoinen, elle offre les mêmes résultats de calcul des ZHD que les VZHD qui ont constitué notre mesure de référence. La plus haute fréquence d'acquisition des mesures « in situ » a également pu montrer des variations de ZHD non prises en compte par les VZHD qui ont une résolution temporelle de seulement 6 heures.

Pour la partie tomographique, cette étude a permis d'explicitier plusieurs fonctionnements du logiciel TSAAR et d'en déduire plusieurs méthodes de travail. Plusieurs améliorations, notamment sur son automatisation et sur l'organisation des fichiers résultats, ont également été effectuées contribuant au perfectionnement du logiciel.

Dans un premier temps, on peut retenir l'influence du coefficient alpha sur les résultats tomographiques. Cette influence peut se résumer comme une contrainte faite uniquement sur les résultats dans les voxels contenant de l'information (traversés par des « rais »). Il faut donc affaiblir au maximum cette contrainte pour donner un maximum de poids à nos mesures afin que l'inversion tomographique soit la plus sensible possible aux organisations spatiales non standards de la vapeur d'eau. On affaiblira donc cette contrainte en assignant une valeur faible à alpha tout en faisant attention de conserver le bon conditionnement du problème tomographique (valeur du conditionnement de la matrice à inverser lors du calcul à surveiller). Ce réglage de alpha a également montré que la discrétisation de l'espace au-dessus de la zone d'étude devait alors contenir le moins possible de voxels vides d'information. Une bonne stratégie pour arriver à cette configuration est de choisir une discrétisation horizontale induisant au moins une station pour chaque voxel au sol.

L'apport des mesures « in situ » de température pour la partie tomographique a également été étudié. Il en ressort que celles-ci n'apportent pas une contribution significative au calcul des IWV au regard de la précision actuelle d'estimation des ZWD. Le modèle GPT de température est donc suffisant pour la partie tomographique actuellement.

Enfin, une perspective d'amélioration de la chaîne de calcul du logiciel TSAAR a été formulée en ce qui concerne la surestimation du contenu total de vapeur d'eau suite à l'inversion tomographique. La proposition consiste à recalibrer les résultats bruts du logiciel sur les IWV estimés par GNSS lors du calcul pré-tomographique. Ainsi, on obtient une concordance entre le

contenu de vapeur d'eau avant et après inversion tomographique tout en conservant l'information donnée par nos mesures sur la répartition spatiale de la vapeur d'eau. Ce recalage se fait de la même manière que celui de l'atmosphère standard pour le calcul des valeurs initiales.

Un des inconvénients majeurs de l'inversion tomographique est que c'est un problème largement sous-déterminé. Le nombre de satellites GNSS présents en orbite autour de la Terre est la cause principale de cet inconvénient. Dans notre cas, même avec une configuration de 2\*2 voxels au sol n'induisant aucun voxel vide d'information, nous n'avons qu'une quarantaine de « rais » pour un total de 64 voxels au-dessus du réseau (2\*2 voxels au sol fois 16 couches verticales), soit une quarantaine d'équations pour 64 inconnues pour chaque époque de calcul. En perspective de cette étude, plusieurs propositions sont faites pour essayer d'améliorer la détermination du problème en augmentant le nombre de « rais » à l'intérieur de notre espace d'étude.

La première perspective d'amélioration est l'ajout de stations locales à l'intérieur de notre réseau comme ce projet le prévoyait au départ, mais faute de temps, qui n'a pas pu avoir lieu. Avec le matériel mis à disposition par l'INSU, on peut prévoir 4 stations supplémentaires formant ainsi un carré de 9 stations (cf. Figure 54). Ce projet de densification du réseau peut aussi permettre de tester une configuration au sol de 3\*3 voxels pour voir si la résolution horizontale des résultats est améliorée. Pour améliorer la détermination du problème, il faudra toutefois rester sur une configuration de 2\*2 voxels au sol afin de ne pas augmenter dans le même temps que le nombre de stations, le nombre de voxels.

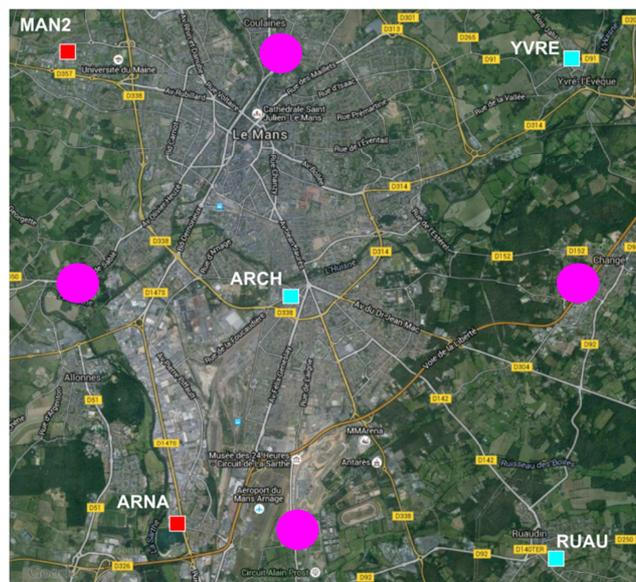


Figure 54: Perspective de densification du réseau GNSS pour une meilleure détermination du problème tomographique. En ronds roses, le projet d'installation de 4 autres stations de campagne.

Une deuxième solution pour améliorer la détermination du problème est de prendre en compte pour chaque époque  $t$  de calcul les instants  $t+dt$  et  $t-dt$ , avec une valeur de  $dt$  suffisamment faible pour que l'on puisse considérer que les valeurs des IWV et donc des SIWV n'ont pas changé (cf. Figure 55). On peut le faire pour une valeur minimale de 5 min : c'est la résolution maximale des positions des satellites données par l'igs.

Grâce aux ajouts des stations, on peut compter une trentaine de « rais » supplémentaires, soit un total de 70 « rais ». La proposition de considérer trois instants rapprochés permet de multiplier le nombre de « rais » par trois, ce qui donne un total désormais de 210 « rais ». Dans le souci d'augmenter la détermination du problème, on voit que l'on peut arriver à un problème sur

déterminé (dans notre cas en conservant une configuration au sol de 2\*2 voxels). Une perspective intéressante serait de tester un calcul tomographique avec la méthode des moindres carrés classique ou plus vraisemblablement avec la méthode des moindres carrés avec contraintes. On pourrait alors quantifier la contrainte causée par le coefficient alpha, même lorsque celui-ci est faible, en comparant les 2 méthodes de calcul.

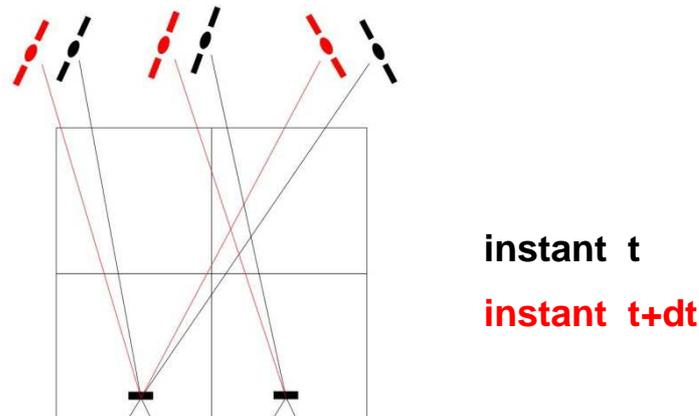


Figure 55 : Considération de l'instant  $t+dt$  pour le calcul à la date  $t$ . Multiplication du nombre de « rais » par 2 et par 3 si l'on considère également l'instant  $t-dt$ .

D'un point de vue plus personnel, cette étude m'a permis de découvrir le monde de la recherche et sa rigueur dans de nombreux domaines. J'ai pu également approfondir mes connaissances dans les systèmes GNSS, sujet que j'affectionne particulièrement. Cette application atypique météorologique a rendu ce perfectionnement d'autant plus intéressant. J'ai également pu apprendre à manipuler des logiciels géodésiques comme GAMIT, dont la manipulation demande beaucoup de rigueur, une expérience indéniable pour la suite de mon cursus professionnel. Je remercie une nouvelle fois le laboratoire L2G de l'ESGT de m'avoir donné l'opportunité de participer à cette expérience très enrichissante.

## Bibliographie

- Bock O. (2012), GNSS: géodésie, météorologie et climat.
- Boehm J., Ess M., Schuh H. (2005), Asymmetric Mapping Functions for CONT02 from ECMWF, in: Proceedings of the 17th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, edited by M. Vennebusch and A. Nothnagel, April 22-23 2005, 64-68, 2005.
- Brenot H. (2006), Potentiel de la mesure GPS sol pour l'étude des pluies intenses méditerranéennes.
- Brenot H., Walpersdorf A., Reverdy M., van Baelen J., Ducrocq V., Champollion C., Masson F., Doerflinger E., Collard P., and Giroux P. (2014), GPS network for tropospheric tomography in the framework of the Mediterranean hydrometeorological observatory Cévennes-Vivarais (southeastern France).
- Brenot H., Wautelet G., Warnant R., Neméghaire J., Van Roozendaal M. (2008), GNSS meteorology and impact on NRT position.
- Champollion C. (2005), Quantification de la vapeur d'eau troposphérique par GPS (modèle 2D et tomographie GPS) - Application aux précipitations intenses.
- Charade O., Cotte N. (2008), GB1000 et PTU200.
- Emardson R., Derks H. (2000), On the relation between the wet delay and the integrated precipitable water vapour in the European atmosphere.
- Flury R. (2014), Propagation VHF/UHF/SHF
- Fund F. (2009), Observations GPS et retards troposphériques: modélisation et application aux effets de surcharge océanique dans l'Ouest de la France.
- Fund F., Morel L., Mocquet A. (2010), Modélisation des retards troposphériques pour les observations GPS et impacts sur l'estimation de la hauteur ellipsoïdale.
- Leick A. (2004), GPS Satellite Surveying.
- Meunier G. (2014), Etude de la variabilité de l'humidité atmosphérique en basse couche par tomographie GNSS en vue de l'amélioration des pratiques agricoles.
- Montibert C. (2014), Etude globale des gradients troposphériques déterminés par GNSS et développement d'une chaîne de traitement pour la tomographie 3D.
- Murray F. W. (1967), On the computation of saturation vapor pressure.
- Reverdy M. (2008), Estimation des paramètres atmosphériques par GPS: analyse de la variabilité spatio-temporelle de la vapeur d'eau.
- Rozsa S., Weidinger T., Gyöngyösi A.Z., Kenyeres A. (2012), The role of GNSS infrastructure in the monitoring of atmospheric water vapor. Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service, Vol. 116, No. 1, January-March 2012, pp. 1-20.

- Saastamoinen J. (1972), Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites.
- Steigenverger P., Boehm J., Tesmer V. (2008), Comparison of GMF/GPT with VMF1/ECMWF and Implications for Atmospheric Loading.
- Tarniewicz J. (2005), Etude d'une méthode de sondage de la vapeur d'eau dans la troposphère appliquée à la correction de mesures GPS pour l'altimétrie de haute précision.
- Tregoning P., Boers R., O'Brien D., Hendy M. (1998), Accuracy of Absolute Precipitable Water Vapor Estimates from GPS Observations.
- Warnant R. (2006), L'effet de l'atmosphère terrestre sur les GNSS : une perturbation ou un signal géophysique ?, Bulletin de la Société géographique de Liège.

## Liste des figures

- Figure 1 : La lune au-dessus de l'atmosphère terrestre photographiée depuis l'ISS <sup>1</sup> le 8 janvier 2012 par la NASA (National Aeronautics and Space Administration, agence américaine).  
Source : Univers Science Innovation.....7
- Figure 2 : Schéma des différentes couches de l'atmosphère terrestre. Source :  
education.meteofrance.fr [Modifié].....8
- Figure 3 : Schéma des effets de la troposphère sur les ondes radio émises par les satellites.  
Source : Flury (Télécom Bretagne), 2014 ; Fund, 2009.....8
- Figure 4 : Principe de triangulation d'un système de positionnement GNSS à partir de distances  
observées. Source : ALTHOS, Simplifying Knowledge.....9
- Figure 5 : Schéma de principe du calcul de position par double-différence (position-nement  
relatif). Les lignes de base calculées sont représentées ici en pointillé rouge et la station de  
référence (connue en position) par le cercle rouge au centre du réseau. Source : Jérôme  
Tarniewicz, 2005.....10
- Figure 6 : Illustration des ZTD obtenus par projections des STD à l'aide de fonctions de projection  
(Mapping Functions). Les ZTD sont supposés constants sur une certaine durée (fenêtre  
temporelle paramétrée dans le logiciel de calcul) et sont estimés à l'aide de l'ensemble des  
observables de phases sur cette période. La valeur estimée d'un ZTD est donc une moyenne  
dans le temps et l'espace et non une valeur « juste ». Source : Brenot et al., 2008.....11
- Figure 7 : Schéma des gradients de délai horizontal modélisant le caractère anisotrope de  
l'atmosphère. De la même manière que les ZTD, la valeur estimée d'un gradient de délai  
horizontal est une moyenne dans le temps et l'espace. Source : Brenot et al., 2008.....12
- Figure 8 : Schéma de la modélisation des STD et de leur projection au zénith, le ZTD. Source :  
Brenot et al., 2008 [Modifié].....13
- Figure 9 : Exemple de modèle météorologique 2D de pression (à gauche) et de température (à  
droite) : modèle « Global Pressure and Temperature » (cf. section suivante). Source : Fund,  
2009.....14
- Figure 10 : Comparaison des ZHD issus des modèles de Saastamoinen (1972), de Baby et al.  
(1988) et d'Hopfield (1969) par rapport à la mesure étalon que représente aujourd'hui les  
VZHD. Source : Fund, 2009.....15
- Figure 11 : Comparaison de différents calculs de ZHD, avec en bleu les VZHD et en rouge les  
ZHD calculés à partir du modèle météorologique GPT (modèle de reconstitution utilisé :  
Saastamoinen). Illustration des variations d'amplitude annuelle de pression prises en compte  
par le modèle GPT. Résultat d'une étude sur Wuhan (capitale de la province du Hubei, en  
Chine). Source : Steigenberger, Boehm, Tesmer (2008).....15
- Figure 12 : Schéma de principe illustrant les paramètres connus a priori à fournir au logiciel  
GAMIT pour obtenir les ZWD et les gradients totaux ; on retrouve le ZHD et les fonctions de  
projection. En vert, les produits prédéfinis pour le logiciel GAMIT.....17
- Figure 13 : Principe tomographique schématisé par l'exemple dérivé d'un carré magique  
(mathématique).....18
- Figure 14 : Ci-dessus les 38 sites de radiosondages utilisés par Emardson et Derks pour leur  
calcul de la relation entre le retard humide et le contenu intégré en vapeur d'eau. En vert, les  
sites pour la région centre Europe, en rouge, la région Méditerranée, en bleu, la région  
Atlantique et en noir la région Baltique. Source : Emardson et Derks, 2000 [Modifié].....19

Figure 15 : Amélioration du modèle d’Emardson et Derks grâce à des nouvelles données de radiosondages. A droite, les récents coefficients calculés par le département de géodésie de l’université de Budapest pour la région centre Europe. Source : Ròzsa, 2012. ....	20
Figure 16 : Discrétisation de l’espace en une grille tomographique. En pointillé, les SIWV entre chaque satellite et chaque station du réseau. Dans le plan de la feuille, pour la station 1 et le satellite 1, sont représentés les segments de propagation $\Delta si$ de l’onde à travers la grille de voxels. Source : Brenot, 2006 [Modifié]. ....	21
Figure 17 : Méthode employée par le logiciel TSAAR pour calculer les valeurs initiales de densité en vapeur d’eau pour chaque voxel.....	23
Figure 18 : Exemple d’une atmosphère standard « recalée par IWV » servant de valeurs initiales au calcul tomographique (méthode employée pour cette étude). L’atmosphère standard recalée a la même répartition verticale que l’atmosphère standard.....	24
Figure 19 : A gauche : Détection d’une couche humide à 4500m par tomographie GNSS. Source : Réverdy, 2008. A droite : Schéma d’une répartition verticale de la vapeur d’eau non standard (présence d’une bande humide en altitude). ....	24
Figure 20 : Tomographie GNSS lors de la campagne ESCOMPTE. Visualisation de forte variation de la répartition verticale de la vapeur d’eau lors des périodes de mistral dans les environs de Marseille. Source : Bastin et al., 2005. ....	25
Figure 21 : Réseau GNSS de la campagne « ESMAG » : 2 stations permanentes du RGP (MAN2 et ARNA, en rouge) et 3 stations locales (ARCH, YVRE et RUAU, en cyan). Le rond rouge représente la station météorologique Météo-France utilisée pour les données météorologiques d’ARNA.....	27
Figure 22 : Stations permanentes du RGP utilisées pour la campagne. A gauche : MAN2 et sa station météorologique (PTU200). A droite : ARNA sur la commune d’Arnage.....	27
Figure 23 : Installation de la station de campagne YVRE sur le toit du collège Pasteur à Yvré l’Évêque. A gauche : antenne Ashtech CR701945 montée sur un mât haubané. A droite : station météorologique PTU300. ....	28
Figure 24 : Installation de la station de campagne RUAU contre le bardage d’un bâtiment municipal de la commune de Ruaudin à l’aide d’un camion nacelle. La station météorologique (PTU300) est montée sur le mât de support de l’antenne. ....	28
Figure 25 : A gauche : Installation de la station de campagne ARCH sur le toit du bâtiment des archives départementales de la Sarthe. A droite : Pour les stations locales, installation des récepteurs GB1000 et des alimentations électriques dans une valise étanche (1 : récepteur GB1000 ; 2 : alimentation électrique GB1000 ; 3 : alimentation électrique PTU300 (YVRE et RUAU) ; 4 : câble de réception des données de la station météorologique (YVRE et RUAU) ; 5 : câble de réception des données de l’antenne GNSS ; 6 : câble d’alimentation électrique externe). ....	28
Figure 26 : Nombre de satellites pris en compte par GAMIT pour chaque station du réseau pour le jour 122 (02 mai 2015). ....	29
Figure 27 : Résultats d’observations météorologiques et modèle GPT. En haut, les résultats de température, en bas, les résultats de pression. A noter que le modèle GPT pour la température n’est pas significativement différent entre chaque station (différence inférieure à 0.5°C). Altitudes : MAN2=121m ; YVRE=73m ; ARCH=68m ; RUAU=59m ; ARNA=50m. ...	30
Figure 28 : Caractéristiques topographiques du site d’étude. En haut, le modèle numérique de terrain est multiplié par un facteur 20 pour accentuer la visualisation du relief. Source : données SRTM <sup>21</sup> . ....	31

Figure 29 : Stations de référence choisies pour l'étude. Source : igs.org/network [Modifié]. Les points rouges représentent les stations de référence. Le point bleu représente le site d'étude avec les stations de campagne.....	32
Figure 30 : Série temporelle de la station de référence BRST (Brest). Source : igs.org/network.....	32
Figure 31 : Séries temporelles sur 10 jours de la station campagne MAN2 (à gauche) et de la station de campagne RUAU (à droite). De haut en bas, les composantes Nord, Est et verticale.....	33
Figure 32 : Chaîne de traitement du calcul tomographique avec l'utilisation des logiciels GAMIT et TSAAR. L'ensemble des scripts Matlab constitue le logiciel TSAAR. Source : Montibert (2014) [Modifié].....	34
Figure 33 : Schéma de principe illustrant les différentes stratégies de calcul possibles pour cette étude en fonction des paramètres météorologiques fournis aux logiciels. ....	35
Figure 34 : Récapitulatif des méthodes de calcul employées. (a) données de pression. Unités en hPa ; (b) données de température. Unités en °C ; (c) Résultats ZHD. Unités en m ; (d) Résultats ZWD. Unités en m. En (1), la méthode « vzhd ». En (2), la méthode « gpt ». En (3), la méthode « rnx ». En (4), la méthode « rnx_modifié », en remplaçant les mesures « in situ » de température par le modèle GPT et en assignant une valeur fixe de 50% pour l'humidité relative.. Exemple pour la station MAN2 pour 6 jours d'observations. ....	37
Figure 35 : Comparaison des ZWD calculés avec les 3 stratégies de calcul « rnx », « vzhd » et « gpt » pour les stations MAN2 et RUAU. En haut, la valeur des ZWD en mètres. En bas, les écarts entre les ZWD en mètres, avec en bleu les écarts rnx-vzhd et en noir les écarts gpt-vzhd. Calcul sur 6 jours d'observations. ....	38
Figure 36 : Comparaison des ZWD calculés avec les méthodes « vzhd » et « rnx_modifié » pour les stations MAN2 et RUAU. En haut, la valeur des ZWD en mètres. En bas, les écarts entre les ZWD en mètres. Calcul sur 6 jours d'observations.....	39
Figure 37 : Comparaison des ZHD calculés à partir des mesures « in situ » de pression avec les VZHD. Résultats pour les stations MAN2 et RUAU. En haut, les valeurs des ZHD en mètres. En bas, les écarts en mètres. Calcul sur 6 jours d'observations.....	41
Figure 38 : Résultats des calculs pré-tomographiques pour la semaine d'étude pour les stations MAN2, RUAU et ARCH. En haut, à gauche, les résultats des ZTD (m). En haut, à droite, les résultats des ZHD (m). En bas, les résultats des ZWD (m). Stratégie de calcul : « vzhd ». En grisé, les périodes choisies pour l'étude tomographique. ....	42
Figure 39 : Valeur de conditionnement de la matrice $(A \times Q_{init} \times A^t + \alpha^2 \times Q_{obs})$ suivant différentes valeurs de alpha. En pointillé noir, le point d'inflexion commun des différentes courbes.....	43
Figure 40 : Répartition verticale de la vapeur d'eau au-dessus des stations MAN2 et RUAU. Les points représentent les valeurs de densités de vapeur d'eau ( $g/m^3$ ) pour chaque étage de voxels au-dessus de chaque station (cf. Annexe 2). Résultats pour différentes valeurs de alpha (jour 145 - 03:00). En noir, les valeurs de l'atmosphère standard. En rouge, les valeurs initiales (atmosphère standard recalée par IWV, cf. paragraphe 1.3.5). ....	44
Figure 41 : Configuration 3*3 voxels au sol. Les voxels coloriés sont les voxels au sol vides ou avec très peu d'informations. Les points noirs représentent les stations au sol. Chaque voxel est défini par un numéro en bleu. ....	45
Figure 42 : Résultats tomographiques (profils horizontaux) de densités de vapeur d'eau pour le premier étage de voxels (altitude : 500 m) suivant différentes valeurs de alpha. Unités : $g/m^3$ . Les points noirs illustrent les stations de campagne. Les lignes noires représentent les	

courbes de niveaux du relief. Les annotations en noirs sont des valeurs de densités de vapeur d'eau. Résultats pour le jour 144 (24 mai 2015) à 19h00.....	45
Figure 43 : Résultats tomographiques de densités de vapeur d'eau sur une journée pour les voxels 5 (ARCH) et 8 (voxel vide) suivant différentes valeurs de alpha. Unité : g/m <sup>3</sup> . Résultats pour le jour 144 (24 mai 2015). En pointillés rouges, les valeurs initiales du calcul tomographique. ....	46
Figure 44 : Pourcentage de voxels contenant de l'information en fonction de la discrétisation verticale. Résultats pour plusieurs discrétisation horizontales, à savoir 2*2, 3*3 et 5*5 voxels au sol. Calcul réalisé pour le jour 144 (24 mai 2015) à 00h00. ....	47
Figure 45 : Résultats tomographiques pour différentes discrétisation horizontales. En haut, les différentes configurations de voxels au sol choisies avec, coloriés, les voxels au sol vides d'information. Au milieu, les profils horizontaux de densité de vapeur d'eau en g/m <sup>3</sup> (altitude : 500m). En bas, les profils verticaux de densités de vapeur d'eau en g/m <sup>3</sup> . Les lignes pointillées en noires sur les profils horizontaux représentent l'emplacement des profils verticaux illustrés en dessous. Les points noirs représentent l'emplacement des stations de campagne. Les lignes noires sur les profils horizontaux représentent les courbes de niveaux du relief de la zone d'étude. Les annotations en noirs sont des valeurs de densités de vapeur d'eau. Calcul réalisé pour le 144 (24 mai 2015) à 19h00. ....	48
Figure 46 : Comparaison des 2 stratégies de calcul des IWV à partir de mesures « in situ » de température et à partir du modèle GPT de température. En haut, les valeurs d'IWV en kg/m <sup>2</sup> . En bas, les écarts entre les 2 méthodes en kg/m <sup>2</sup> . Résultats pour les stations MAN2 et RUAU sur 6 jours d'observations. ....	49
Figure 47 : Illustration du contenu intégré de vapeur d'eau estimé par GNSS, intégrale des valeurs initiales de densités de vapeur d'eau à la verticale d'une station. Résultats d'un calcul pour la station MAN2 le 24 mai 2015 à 19h30. ....	50
Figure 48 : Comparaison des valeurs initiales et des résultats bruts en sortie du logiciel TSAAR. En rouge, les valeurs initiales. En bleu ciel, les valeurs brutes calculées par TSAAR (coefficient alpha=0.05). Résultats pour la station MAN2 le 24 mai 2015 à 19h30. ....	51
Figure 49 : Recalage des résultats bruts de TSAAR sur la valeur d'IWV initiale estimée par GNSS. En rouge, les valeurs initiales. En bleu ciel, les résultats bruts avec un coefficient alpha égal à 0.05. En bleu foncé, les résultats finaux recalés. Résultats pour la station MAN2 le 24 mai 2014 à 19h30.....	52
Figure 50 : Valeurs initiales (en rouge) et résultats bruts de la répartition verticale de densité de vapeur d'eau avec un coefficient alpha égal 0.2 (en bleu ciel). Résultats pour la station MAN2 le 24 mai 2014 à 19h30.....	52
Figure 51 : Série temporelle de la répartition verticale de densité de vapeur d'eau au-dessus de MAN2. La flèche blanche représente la fenêtre météorologique présentée à la Figure 52. ....	53
Figure 52 : (a) Carte 2D d'IWV de 18h00 à 19h30, par pas de 30 min (jour 144, 24 mai 2015, période humide). Unités en kg/m <sup>2</sup> ; (b) Profil horizontal de densité en vapeur d'eau (altitude 500m). Unités en g/m <sup>3</sup> ; (c) Profil vertical de densité en vapeur d'eau suivant la latitude. Unités en g/m <sup>3</sup> . Les points noirs en (a) et (b) représentent les positions des stations du réseau. La ligne pointillée en (b) représente la coupe verticale montrée en (c). Les lignes noires en (a) et (b) représentent les courbes de niveaux du relief. Les annotations en noirs sont des valeurs de densités de vapeur d'eau. Méthode de calcul « vzhd ». Coefficient alpha=0.05. IWV calculés avec le modèle GPT de température. Résultats finaux non recalés (cf. paragraphe 3.2.4).....	54

Figure 53 : Répartition verticale de vapeur d'eau au-dessus de la station MAN2. En rouge, les valeurs initiales correspondant à une répartition verticale standard. Résultats pour le jour 144 (24 mai 2015) à 18h00, 18h30, 19h00, 19h30, 20h00 et 20h30. Résultats bruts recalés (cf. paragraphe 3.2.4). .....	55
Figure 54 : Perspective de densification du réseau GNSS pour une meilleure détermination du problème tomographique. En ronds roses, le projet d'installation de 4 autres stations de campagne.....	57
Figure 55 : Considération de l'instant $t+dt$ pour le calcul à la date $t$ . Multiplication du nombre de « rais » par 2 et par 3 si l'on considère également l'instant $t-dt$ . .....	58

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Fonctions de projection utilisées avec les logiciels GAMIT et TSAAR pour cette étude. .....	16
Tableau 2 : Méthodes de calcul testées pour le calcul des ZHD et des ZWD. $P_0$ : pression au sol. $T_0$ : température au sol. $HR_0$ : humidité relative au sol.....	36
Tableau 3 : Biais et écarts types entre les ZWD calculés avec les stratégies « rnx » et « gpt » (colonne 1) et biais et écarts types entre les ZWD calculés avec les stratégies « rnx » et « vzhd » (colonne 2). Calcul sur 6 jours d'observations pour les stations MAN2, RUAU et YVRE. ....	39
Tableau 4 : Biais et écarts types entre les ZWD calculés avec les stratégies « rnx_modifié » et « vzhd ». Calcul sur 6 jours d'observations pour les stations MAN2, RUAU et YVRE.....	40
Tableau 5 : Biais et écarts types entre les ZHD calculés à partir des mesures « in situ » de pression et les VZHD pour les stations MAN2, RUAU et YVRE. Calcul sur 6 jours d'observations.....	41
Tableau 6 : Biais et écarts types entre les IWV calculés à partir de mesures « in situ » de température et à partir du modèle GPT de température. Calcul sur 6 jours d'observations. Résultats pour les stations MAN2, RUAU et YVRE. ....	50

## Table des annexes

Annexe 1 : Tableau des observations recueillies pendant la campagne.

Annexe 2 : Programme implémenté dans « TSAAR » : construction de fichiers résultats sur la répartition verticale en vapeur d'eau (MATLAB).

Annexe 3 : Programme implémenté dans « TSAAR » : construction de séries temporelles de densité en vapeur d'eau par voxels (MATLAB).

Annexe 4 : Programme d'interpolation de rinex météo (MATLAB).

Annexe 5 : Procédure pour coupler un récepteur GNSS « Topcon GB1000 » et une station météorologique « PTU300 » (source : Charade et al., 2008 [Modifié]).

Annexe 6 : Séries temporelles sur 10 jours des stations de campagne. Résultats de calculs GAMIT GLOBK.

Annexe 7 : Références matériels et coordonnées des stations du réseau.

Annexe 8 : Résultats d'observations météorologiques sur la semaine d'étude pour les stations MAN2, RUAU et YVRE.

Annexe 9 : Poster scientifique

## Annexe 1 : Tableau des observations recueillies pendant la campagne.

15/04/2015	rinex obs.		rinex météo ptu200/300
15/05/2015	rinex obs. indis		rinex météo indis
			rinex météo ptb220 (www.infoclimat.fr)
			rinex météo interpolé

		RUAU	YVRE	ARCH	MAN2	ARNA
mercredi	105	15/04/2015	15/04/2015	15/04/2015	15/04/2015	15/04/2015
jeudi	106	16/04/2015	16/04/2015	16/04/2015	16/04/2015	16/04/2015
vendredi	107	17/04/2015	17/04/2015	17/04/2015	17/04/2015	17/04/2015
samedi	108	18/04/2015	18/04/2015	18/04/2015	18/04/2015	18/04/2015
dimanche	109	19/04/2015	19/04/2015	19/04/2015	19/04/2015	19/04/2015
lundi	110	20/04/2015	20/04/2015	20/04/2015	20/04/2015	20/04/2015
mardi	111	21/04/2015	21/04/2015	21/04/2015	21/04/2015	21/04/2015
mercredi	112	22/04/2015	22/04/2015	22/04/2015	22/04/2015	22/04/2015
jeudi	113	23/04/2015	23/04/2015	23/04/2015	23/04/2015	23/04/2015
vendredi	114	24/04/2015	24/04/2015	24/04/2015	24/04/2015	24/04/2015
samedi	115	25/04/2015	25/04/2015	25/04/2015	25/04/2015	25/04/2015
dimanche	116	26/04/2015	26/04/2015	26/04/2015	26/04/2015	26/04/2015
lundi	117	27/04/2015	27/04/2015	27/04/2015	27/04/2015	27/04/2015
mardi	118	28/04/2015	28/04/2015	28/04/2015	28/04/2015	28/04/2015
mercredi	119	29/04/2015	29/04/2015	29/04/2015	29/04/2015	29/04/2015
jeudi	120	30/04/2015	30/04/2015	30/04/2015	30/04/2015	30/04/2015
vendredi	121	01/05/2015	01/05/2015	01/05/2015	01/05/2015	01/05/2015
samedi	122	02/05/2015	02/05/2015	02/05/2015	02/05/2015	02/05/2015
dimanche	123	03/05/2015	03/05/2015	03/05/2015	03/05/2015	03/05/2015
lundi	124	04/05/2015	04/05/2015	04/05/2015	04/05/2015	04/05/2015
mardi	125	05/05/2015	05/05/2015	05/05/2015	05/05/2015	05/05/2015
mercredi	126	06/05/2015	06/05/2015	06/05/2015	06/05/2015	06/05/2015
jeudi	127	07/05/2015	07/05/2015	07/05/2015	07/05/2015	07/05/2015
vendredi	128	08/05/2015	08/05/2015	08/05/2015	08/05/2015	08/05/2015
samedi	129	09/05/2015	09/05/2015	09/05/2015	09/05/2015	09/05/2015
dimanche	130	10/05/2015	10/05/2015	10/05/2015	10/05/2015	10/05/2015
lundi	131	11/05/2015	11/05/2015	11/05/2015	11/05/2015	11/05/2015
mardi	132	12/05/2015	12/05/2015	12/05/2015	12/05/2015	12/05/2015
mercredi	133	13/05/2015	13/05/2015	13/05/2015	13/05/2015	13/05/2015
jeudi	134	14/05/2015	14/05/2015	14/05/2015	14/05/2015	14/05/2015
vendredi	135	15/05/2015	15/05/2015	15/05/2015	15/05/2015	15/05/2015
samedi	136	16/05/2015	16/05/2015	16/05/2015	16/05/2015	16/05/2015
dimanche	137	17/05/2015	17/05/2015	17/05/2015	17/05/2015	17/05/2015
lundi	138	18/05/2015	18/05/2015	18/05/2015	18/05/2015	18/05/2015
mardi	139	19/05/2015	19/05/2015	19/05/2015	19/05/2015	19/05/2015

mercredi	140	20/05/2015	20/05/2015	20/05/2015	20/05/2015	20/05/2015
jeudi	141	21/05/2015	21/05/2015	21/05/2015	21/05/2015	21/05/2015
vendredi	142	22/05/2015	22/05/2015	22/05/2015	22/05/2015	22/05/2015
samedi	143	23/05/2015	23/05/2015	23/05/2015	23/05/2015	23/05/2015
dimanche	144	24/05/2015	24/05/2015	24/05/2015	24/05/2015	24/05/2015
lundi	145	25/05/2015	25/05/2015	25/05/2015	25/05/2015	25/05/2015
mardi	146	26/05/2015	26/05/2015	26/05/2015	26/05/2015	26/05/2015
mercredi	147	27/05/2015	27/05/2015	27/05/2015	27/05/2015	27/05/2015
jeudi	148	28/05/2015	28/05/2015	28/05/2015	28/05/2015	28/05/2015

Encadré en noir, la période d'étude choisie avec les données météorologiques disponible pour les 5 stations du réseau.

## Annexe 2: Programme implémenté dans « TSAAR »: construction de fichiers résultats sur la répartition verticale en vapeur d'eau (MATLAB).

```
'param.exp'  
  
nom_calcul computation146  
doy 146  
date 20150526  
latmin 47.921  
latmax 48.038  
nlat 2  
lonmin 0.126  
lonmax 0.300  
nlon 2  
altmin 0  
altmax 12000  
nalt 16  
grille fix500  
nom_fichier_grille mans.net  
epok_deb 0  
epok_fin 2850  
epok_inc 30  
coefalpha 0.05  
  
% Programme pour construire des fichiers de densite de vapeur d'eau pour  
% chaque colonne de voxel à chaque epok à partir des resultats tomo  
% (valeurs initiales et valeurs calculées)  
%  
% Olivier Le Coz  
% version 2015  
  
% fichiers d'entrees:  
% 'param.exp'  
% 'res.tomo'  
  
% fichier de sortie:  
% 'numvoxel.densite_'  
% 'numvoxel.densite.init_  
  
fprintf('\n')  
fprintf('-----')  
fprintf('-----')  
fprintf('\n')  
fprintf('### density_voxel_colonn.m ?\n')  
fprintf('\n')  
  
cd('..');  
cd(computation);  
cd('param');  
param_id=fopen('param.exp','r');
```

```

cd('..');
cd('..');
param=textscan(param_id,'%s %s','headerLines',0);
fclose(param_id);

doy=(cell2mat(param{2}(2)));
epok_deb=str2double(cell2mat(param{2}(15)));
epok_fin=str2double(cell2mat(param{2}(16)));
epok_inc=str2double(cell2mat(param{2}(17)));
nom_grille=(cell2mat(param{2}(14)));
nlat=str2double(cell2mat(param{2}(6)));
nlon=str2double(cell2mat(param{2}(9)));
nalt=str2double(cell2mat(param{2}(12)));
nb_vox=nlat*nlon*nalt;
seq=nlat*nlon;

cd(computation);
cd('resultat_tomo');
cd(doy);

for i=epok_deb:epok_inc:epok_fin

    fprintf('epok : %d\n',i)

    cd(num2str(i));

    restomo_id=fopen('res.tomo','r');
    restomo=textscan(restomo_id,'%s','headerLines',0);
    fclose(restomo_id);

    inittomo_id=fopen('init.tomo','r');
    inittomo=textscan(inittomo_id,'%s','headerLines',0);
    fclose(inittomo_id);

    for j=1:seq

        for k=j:seq:nb_vox

            res1=str2double(cell2mat(restomo{1}(k)));

            d_nom=horzcat(num2str(j),'.densite_');
            d_id=fopen(d_nom,'a+');
            dlmwrite(d_nom,res1,'delimiter','\t','newline','pc','-append');
            fclose(d_id);

        end

    end

    for j=1:seq

        for k=j:seq:nb_vox

            res2=str2double(cell2mat(inittomo{1}(k)));

```

```

        i_nom=horzcat(num2str(j),'.densite.init_');
        i_id=fopen(i_nom,'a+');
        dlmwrite(i_nom,res2,'delimiter','\t','newline','pc','-append');
        fclose(i_id);

    end

end

cd('..');

end

cd('..');
cd('..');
cd('..');

fprintf('\n')
fprintf('### density_voxel_colonn.m  ok\n')
fprintf('\n')
fprintf('-----')
fprintf('-----')

```

### Annexe 3 : Programme implémenté dans « TSAAR » : construction de séries temporelles de densité en vapeur d'eau par voxels (MATLAB).

```
'param.exp'  
  
nom_calcul computation146  
doy 146  
date 20150526  
latmin 47.921  
latmax 48.038  
nlat 2  
lonmin 0.126  
lonmax 0.300  
nlon 2  
altmin 0  
altmax 12000  
nalt 16  
grille fix500  
nom_fichier_grille mans.net  
epok_deb 0  
epok_fin 2850  
epok_inc 30  
coefalpha 0.05  
  
% Programme pour construire des series temporelles de densite de vapeur  
% d'eau par voxel  
%  
% Olivier Le Coz  
% version 2015  
  
% fichiers d'entrees:  
% 'param.exp'  
% 'numvoxel.densite_'  
  
% fichier de sortie:  
% 'numalt_numvoxel.densite.st_'  
  
fprintf('\n')  
fprintf('-----')  
fprintf('-----')  
fprintf('\n')  
fprintf('### density_voxel_time_serie.m ?\n')  
fprintf('\n')  
  
cd('..');  
cd(computation);  
cd('param');  
param_id=fopen('param.exp','r');  
  
cd('..');  
cd('..');  
param=textscan(param_id,'%s %s','headerLines',0);  
fclose(param_id);
```

```

doy=(cell2mat(param{2}(2)));
epok_deb=str2double(cell2mat(param{2}(15)));
epok_fin=str2double(cell2mat(param{2}(16)));
epok_inc=str2double(cell2mat(param{2}(17)));
nom_grille=(cell2mat(param{2}(14)));
nlat=str2double(cell2mat(param{2}(6)));
nlon=str2double(cell2mat(param{2}(9)));
nalt=str2double(cell2mat(param{2}(12)));
nb_vox=nlat*nlon*nalt;
seq=nlat*nlon;

cd(computation);
cd('resultat_tomo');
cd(doy);

for i=1:nalt

    fprintf('num alt : %d\n',i)

    for k=1:seq

        for j=epok_deb:epok_inc:epok_fin

            cd(num2str(j));

            voxtomo_nom=horzcat(num2str(k),'.densite_');

            voxtomo_id=fopen(voxtomo_nom,'r');
            voxtomo=textscan(voxtomo_id,'%s','headerLines',0);
            fclose(voxtomo_id);

            res1=str2double(cell2mat(voxtomo{1}(i)));

            cd('..');

            stvox_nom=horzcat(num2str(i),'_',num2str(k),'.densite.st_');
            stvox_id=fopen(stvox_nom,'a+');
            dlmwrite(stvox_nom,res1,'delimiter','\t','newline','pc','-
append');
            fclose(stvox_id);

        end

    end

end

fprintf('\n')
fprintf('-----')
fprintf('-----')
fprintf('\n')
fprintf('### density_voxel_time_serie.m   ok\n')
fprintf('\n')

```

## Annexe 4 : Programme d'interpolation de rinex météo (MATLAB).

```
`param.rnx`

jour 148
annee 2015
nb_mesure 1440
latmin 47.921
latmax 48.038
lonmin 0.126
lonmax 0.300
nom_station_a_interpoler arch
lat_station_a_interpoler 47.98092764
lon_station_a_interpoler 0.20636767

`sites.rnx`

arna 47.94652276      0.18090135      49.707
ruau 47.94038090      0.26659044      58.855
yvre 48.01736593      0.27019542      72.607
man2 48.01861812      0.15528770      120.882

% Programme d'interpolation de rinex meteo
%
% Olivier Le Coz
% version 2015

% fichiers d'entrees:
% rinex meteo 'sitejour0.15m' sans en-tete avec 9 colonnes
% (annee,mois,jour,heure,min,sec,P,T,H) dans le dossier \rinex
% 'site.rnx'
% 'param.rnx'

% fichier de sortie:
% rinex meteo interpole 'nom_interpjour0.15m'

fprintf('\n')
fprintf('-----')
fprintf('-----')
fprintf('\n')
fprintf('### rinex_interp.m  ?\n')
fprintf('\n')

param_id=fopen('param.rnx','r');
sites_id=fopen('sites.rnx','r');
sites=textscan(sites_id,'%s %s %s %s %s %s %s','headerLines',0);
param=textscan(param_id,'%s %s','headerLines',0);

lat_moy=((str2double(cell2mat(param{2}(4)))+str2double(cell2mat(param{2}(5)
)))/2)+str2double(cell2mat(param{2}(4))); %latitude moyenne du site etudie;
```

```

annee=str2double(cell2mat(param{2}(2)));
jour=str2double(cell2mat(param{2}(1)));
nb_mes=str2double(cell2mat(param{2}(3)));
latmin=str2double(cell2mat(param{2}(4)));
latmax=str2double(cell2mat(param{2}(5)));
lonmin=str2double(cell2mat(param{2}(6)));
lonmax=str2double(cell2mat(param{2}(7)));
lat_interp=str2double(cell2mat(param{2}(9)));
lon_interp=str2double(cell2mat(param{2}(10)));
nom_interp=(cell2mat(param{2}(8)));

degrad=pi/180.0;
%%conversion distance metre=>degre latitude;
mdeglat=pi*6371000/180;
%%conversion distance metre=>degre longitude;
mdeglon=pi*6371000*cos(lat_moy*degrad)/180;
%%anisotropie entre longitude et latitude;
facteur=mdeglat/mdeglon;

resultat=horzcat('resultat_',num2str(jour))
mkdir(resultat)

nsites=length(sites{1});
for i=1:nsites
    sites_nom(i)=(sites{1}(i));
    sites_lon(i)=str2double(cell2mat(sites{3}(i)));
    sites_lat(i)=str2double(cell2mat(sites{2}(i)));
end
fclose('all');

cd(resultat)
mkdir(num2str(jour))
cd('..')

for e=1:nb_mes

    fprintf('epok : %s\n',num2str(e))

    for k=1:nsites
        nom=horzcat((cell2mat(sites_nom(k))),num2str(jour),'0.15m');
        cd('rinex');
        rinex_id=fopen(nom,'r');
        rinex=textscan(rinex_id,'%s %s %s %s %s %s %s %s %s %s',
's','headerLines',0);

        res(k,:)=[sites_lon(k) sites_lat(k)
str2double(cell2mat(rinex{7}(e))) str2double(cell2mat(rinex{8}(e)))
str2double(cell2mat(rinex{9}(e))) str2double(cell2mat(rinex{4}(e)))
str2double(cell2mat(rinex{5}(e)))];

        fclose('all');
        cd('..');
    end

    lon=res(:,1);
    lat=res(:,2);
    pres=res(:,3);
    temp=res(:,4);
    hum=res(:,5);

```

```

heure=res(1,6);
min=res(1,7);

xi=linspace(lonmin,lonmax,10);
yi=linspace(latmin,latmax,10);
xi=xi/facteur;
lon=lon/facteur;

[Xi,Yi]=meshgrid(xi,yi);

pinterp=pres(4)+6.2; %interpolation lineaire suivant l'altitude par
rapport a man2 (6.2 calcule manuellement)
tinterp=griddata(lon,lat,temp,Xi,Yi,'linear');
hinterp=griddata(lon,lat,hum,Xi,Yi,'linear');

xi=xi*facteur;
lon=lon*facteur;

cd(resultat);
cd(num2str(jour));

intp=zeros(length(yi)+1,length(xi)+1);
intp(1,2:end)=xi;
intp(2:end,1)=yi;
intp(2:end,2:end)=pinterp;

intt=zeros(length(yi)+1,length(xi)+1);
intt(1,2:end)=xi;
intt(2:end,1)=yi;
intt(2:end,2:end)=tinterp;

inth=zeros(length(yi)+1,length(xi)+1);
inth(1,2:end)=xi;
inth(2:end,1)=yi;
inth(2:end,2:end)=hinterp;

for i=1:length(yi)-1
    for j=1:length(xi)-1
        if lat_interp<=intp(i+1,1) && lat_interp>intp(i,1) &&
lon_interp<=intp(1,j+1) && lon_interp>intp(1,j)

            PPP=(intp(i,j)+intp(i,j+1)+intp(i+1,j)+intp(i+1,j+1))/4;
            TTT=(intt(i,j)+intt(i,j+1)+intt(i+1,j)+intt(i+1,j+1))/4;
            HHH=(inth(i,j)+inth(i,j+1)+inth(i+1,j)+inth(i+1,j+1))/4;
            res1=[jour heure min TTT PPP HHH];
        end
    end
end

tab_nom=horzcat(nom_interp,'.met_');
tab_id=fopen(tab_nom,'a+');
dlmwrite(tab_nom,res1,'delimiter','\t','newline','pc','-append');

cd('..')
cd('..')

end

```

```

cd(resultat);
cd(num2str(jour));
copyfile(tab_nom,horzcat('.../...'));
cd('.../...');
met2rinex(annee,tab_nom); %creation fichier rinex
delete (tab_nom);
rinex_nom=horzcat(nom_interp,num2str(jour),'0.15m');
copyfile(rinex_nom,horzcat(resultat,'/',num2str(jour)));
delete (rinex_nom);

close all

fprintf('\n')
fprintf('### rinex_interp.m ok\n')
fprintf('\n')
fprintf('-----')
fprintf('-----')

function met2rinex(annee, ficin) %source : Stéphane Durand
% annee : numéro de l'année
% ficin : nom du fichier à convertir

param_id=fopen('param.rnx','r');
param=textscan(param_id,'%s %s','headerLines',0);
nom_interp=(cell2mat(param{2}(8)));

% Lecture des données météo
meteo=load(ficin);

% Nom du fichier rinex meteo en sortie
doy=sprintf('%3i',meteo(1,1));
ind=findstr(doy,' ');
doy(ind)='0';
if annee > 2000
    an=annee-2000;
elseif annee > 1900
    an = annee-1900;
else
    an =annee;
end

txtan = sprintf('%2i',an);
ficout=[nom_interp doy '0.' txtan 'm'];

% ouverture du fichier rinex meteo en sortie
id=fopen(ficout,'w');

% instant de fabrication du fichier RINEX
txtt=[datestr(now,'yyyymmdd HH:MM:SS') 'UTC'];

```

```

% Mise en place de l'en tete météo nom_interp

fprintf(id,'      2.11          METEOROLOGICAL DATA          RINEX VERSION / TYPE\r\n');
fprintf(id,'matlab          SD          %20sPGM / RUN BY / DATE\r\n',txtt);
fprintf(id,'%4s          MARKER NAME\r\n',nom_interp);
fprintf(id,'      3      PR      TD      HR          # / TYPES OF OBSERV\r\n');
fprintf(id,'          0.0      PR SENSOR MOD/TYPE/ACC\r\n');
fprintf(id,'          0.0      TD SENSOR MOD/TYPE/ACC\r\n');
fprintf(id,'          0.0      HR SENSOR MOD/TYPE/ACC\r\n');
fprintf(id,'          0.0000      0.0000      0.0000      0.0000 PR SENSOR POS XYZ/H\r\n');
fprintf(id,'          END OF HEADER\r\n');

% Mise en place des mesures
for i=1:size(meteo,1)
    % format rinex : YY MM DD hh mm ss PR TD HR
    [yy mm dd HH MM] = datevec(datenum(annee,1,meteo(i,1)));

    fprintf(id,' %2i %2i %2i %2i %2i %2i %6.1f %6.1f %6.1f \r\n',an, mm ,
dd, meteo(i,2:3), 0,meteo(i,[5 4 6]));
end

fclose(id);

```

## Annexe 5 : Procédure pour coupler un récepteur GNSS « Topcon GB1000 » et une station météorologique « PTU300 » (source : Charade et al., 2008 [Modifié]).

Cette notice présente la démarche à suivre afin de coupler un récepteur GNSS « GB1000 » avec une station météorologique de type « PTU300 ». Ce couplage permet d'emmagasiner à la fois les données de l'antenne GNSS et celles de la station météo dans un même fichier (fichier .tps du récepteur GB1000). Le problème ici est que le récepteur de chez *Topcon* ne reconnaît pas officiellement la station météo « PTU300 ». Il faut donc « forcer » l'écriture des données météo dans le fichier du récepteur sans que celui-ci ne se soucie d'où elles proviennent.



Figure : Récepteur GNSS « Topcon GB1000 » (à gauche), capteur météo « Vaisala PTU300 » (à droite).

### 1. Paramétrage des données de la station météo aux format NMEA<sup>27</sup>

La première étape consiste à communiquer avec la station météo via PC grâce au port série de la station et celui du PC.

#### 1.1. Câble série RS-232

Il faut faire attention au branchement des broches TX (fil blanc) et RX (fil noir) dans le câble série. Le branchement entre les 2 broches est à inverser suivant la connexion station météo/PC ou station météo/GB1000.

#### 1.2. Communication avec la station météo à l'aide du logiciel « putty »

Pour pouvoir communiquer avec la station, il faut connaître ses paramètres de communications. Ses paramètres par défaut sont 9600 (vitesse de transmission bits/s), E (parité), 7 (bits de données), 1 (bit d'arrêt), off (pas de contrôle de flux).

#### 1.3. Paramétrage de la station météo

(En l'absence de prompt « > », taper sur la touche « echap »)

Il faut tout d'abord modifier les paramètres de communications de la station météo pour les faire correspondre à ceux du GB1000. Pour cela, taper ( \_ : espace ) :

```
> seri_9600_N_8_1_F
```

---

<sup>27</sup> National Marine Electronics Association. La norme NMEA est une spécification pour la communication entre équipements marins, dont les équipements GPS.

Ensuite, il faut paramétrer le format de sortie des données de la station au format NMEA, changer l'unité de pression de la station, changer le mode d'envoi des données de la station, et choisir différents paramètres.

Pour cela, taper ( \_ : espace ) :

*définition du format de sortie :*

```
> form_ "$PASHS,XDR,P,"_1.5_P_",B,"_SN_",C,"_3.2_T_",C,"_SN_",H,"_3.2_RH_",P,"_SN_#r#n
```

*vérifier qu'en tapant la commande > send , la ligne du dessus est bien reproduite. ( SN correspond au numéro de série de la station météo)*

*on met le mode d'envoi des données en mode automatique :*

```
> smode_run
```

*on met l'unité de pression de la station en bar :*

```
> unit_p_bar
```

*on choisit la durée sur laquelle sont moyennées les valeurs (60 secondes par exemple) :*

```
> avrg
```

```
P1 average : 10 s ? (valeur existante)
```

```
> 60_s (nouvelle valeur)
```

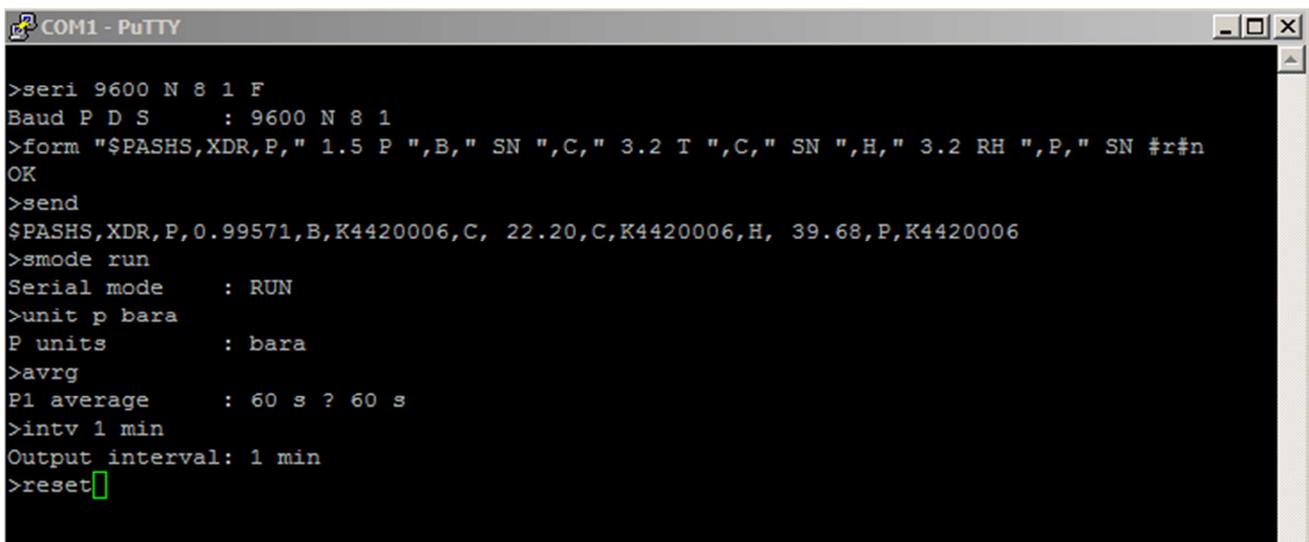
*on choisit l'intervalle pour l'échantillonnage des données (1 minute par exemple) :*

```
> intv_1_min
```

*on valide les nouveaux paramètres :*

```
> reset
```

*vérifier que toutes les minutes (intervalle d'échantillonnage choisi), une donnée apparaît à l'écran.*



```
COM1 - PuTTY
>seri 9600 N 8 1 F
Baud P D S : 9600 N 8 1
>form "$PASHS,XDR,P," 1.5 P ",B," SN ",C," 3.2 T ",C," SN ",H," 3.2 RH ",P," SN #r#n
OK
>send
$PASHS,XDR,P,0.99571,B,K4420006,C, 22.20,C,K4420006,H, 39.68,P,K4420006
>smode run
Serial mode : RUN
>unit p bara
P units : bara
>avrg
P1 average : 60 s ? 60 s
>intv 1 min
Output interval: 1 min
>reset
```

Figure : Résultat du paramétrage dans la fenêtre de commande du logiciel « putty »

Note : une fois que vous déconnectez la station météo du PC, si vous voulez à nouveau changer les paramètres de la station, il faudra changer les paramètres de « putty » avec les nouvelles valeurs de communication de la station, soit 9600 N 8 1 F.

## 2. Paramétrage du récepteur GB1000 pour l'enregistrement « forcé » des données météo

De la même façon que pour la station météo, il faut communiquer avec le récepteur GB1000 via un PC pour le paramétrer. Ici, on utilisera le logiciel PCCDU<sup>28</sup>.

Brancher le câble série sur n'importe quel port du récepteur (a, b ou c) et au PC. Exécuter PCCDU.exe.

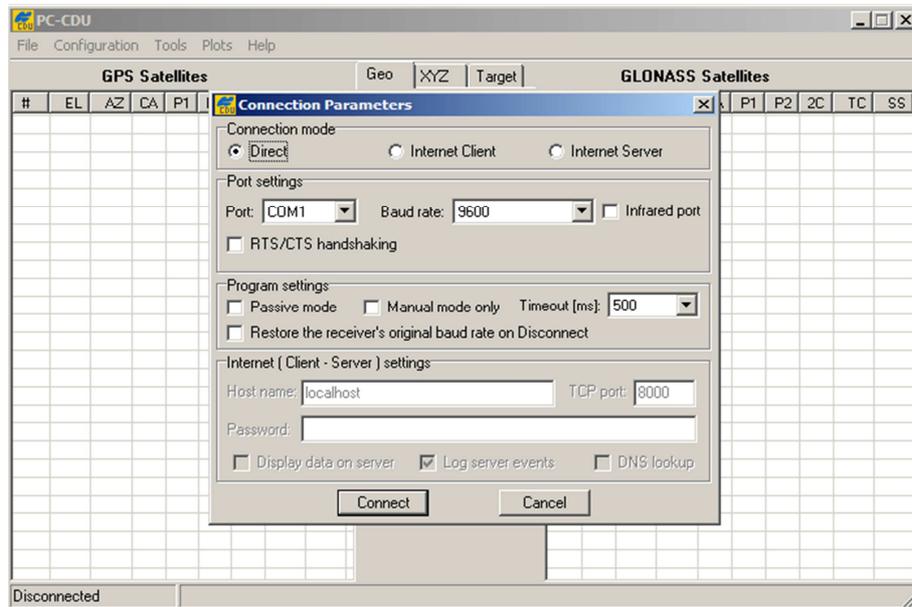


Figure : Interface du logiciel PCCDU. Connexion avec le récepteur GB1000.

Une fois connecté (Baud rate =9600 bits/s pour le GB1000), faire File>Manual Mode. Entrer alors manuellement les commandes suivantes :

```
%%set,dev/ser/b/imode,echo  
RE002%% est retourné à l'écran
```

Tout ce qui arrive sur le port b du récepteur est relayé comme un écho sans interprétation

```
%%set,dev/ser/b/echo,/cur/log  
RE002%% est retourné à l'écran
```

Tout ce qui arrive sur le port b du récepteur est relayé vers la mémoire interne du récepteur

```
%%set,dev/ser/b/ewrap,on  
RE002%% est retourné à l'écran
```

Fonction permettant de coder les informations arrivant sur le port b afin de les différencier avec celles de l'antenne lorsqu'elles arrivent sur la mémoire interne.

<sup>28</sup> Le logiciel PCCDU est disponible gratuitement, après avoir créé un compte, sur le site : <http://www.topconpositioning.com/products/software/updaters-and-utilities/utilities>

%%set,/par/log/rot/mode,on  
RE002%% est retourné à l'écran

%%set,/par/opts/cind,on  
RE002%% est retourné à l'écran

%%set,/par/log/rot/sc/period,86400  
RE002%% est retourné à l'écran

Durée en seconde d'un fichier. Ici, 86400 soit 1 journée (découpage des fichiers .tps en fichier journalier)

%%set,/par/log/rot/sc/count,20  
RE002%% est retourné à l'écran

Nombre de fichiers que le récepteur crée avant de ré écraser le premier fichier (ici, 20).

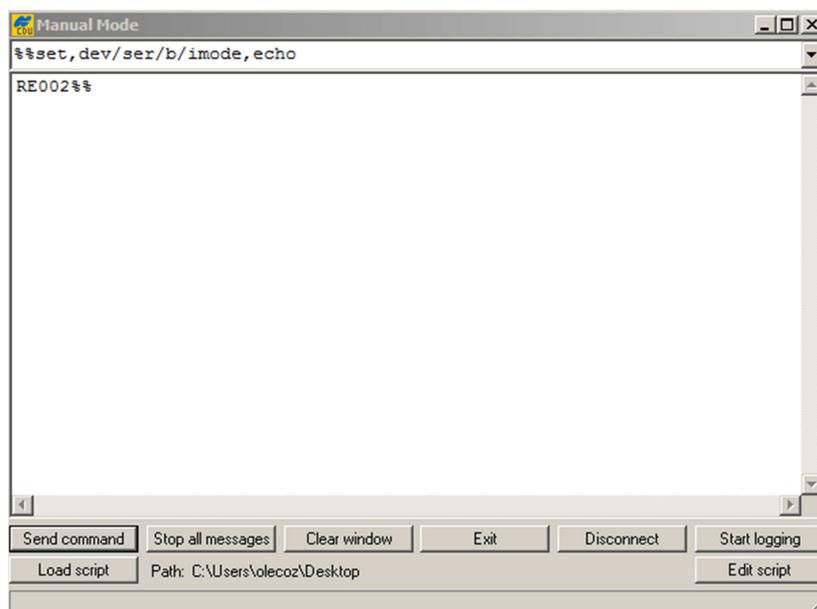


Figure : Interface du menu « Manual Mode ». Exemple de ligne de commande.

### 3. Extraction des données météo sous le format RINEX à partir du fichier .tps avec « teqc<sup>29</sup> »

Une fois le fichier .tps du récepteur GB1000 récupéré, on peut en extraire 2 fichiers distincts, l'un concernant les observations gnss, l'autre les observations météo. Pour cela, ouvrir une invite de commande windows pour utiliser teqc (Menu Démarrer > Exécuter > taper « cmd », puis Ok). Se mettre dans le répertoire où se situe teqc.exe et y placer le fichier .tps. Exécuter la commande suivante :

<sup>29</sup> Le logiciel teqc est disponible gratuitement sur le site : <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>

> teqc -topcon tps +met essai.15m 103110.TPS > essai.15o

avec, essai.15m => nom du fichier météo à créer  
essai.15o => nom du fichier d'observation à créer  
103110.TPS => fichier .tps du récepteur GB1000

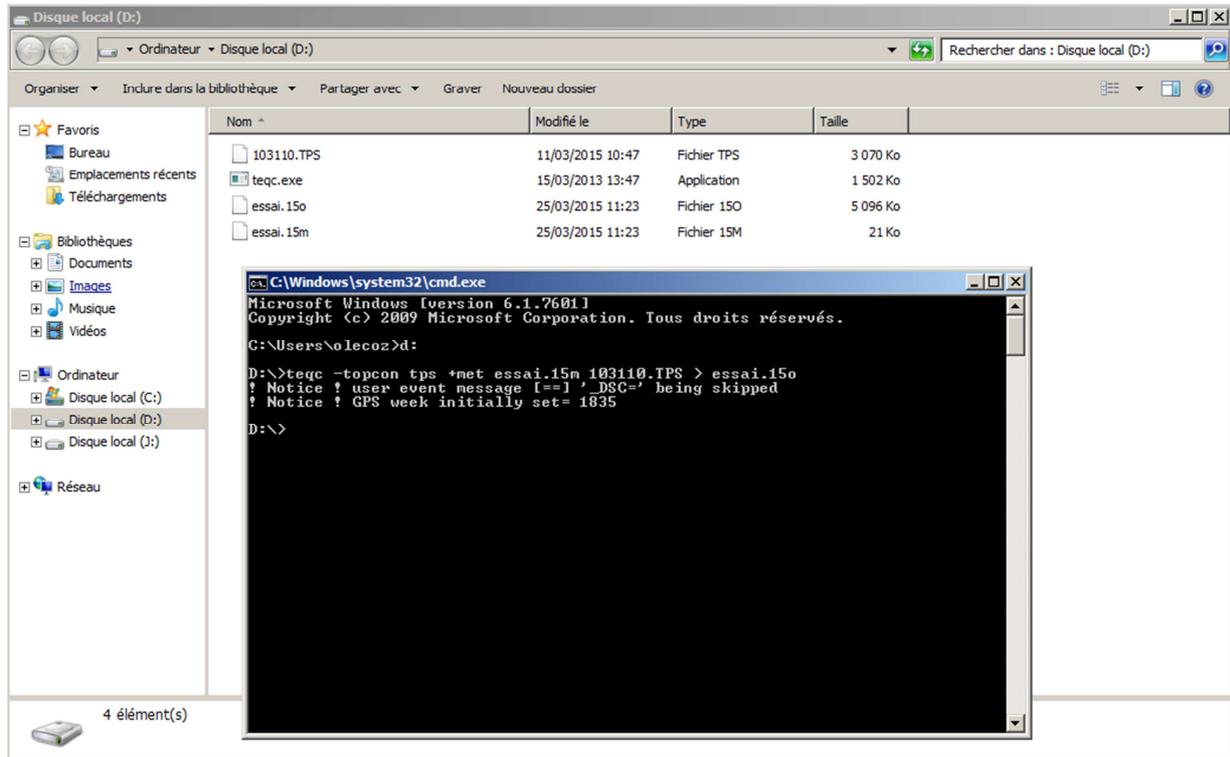
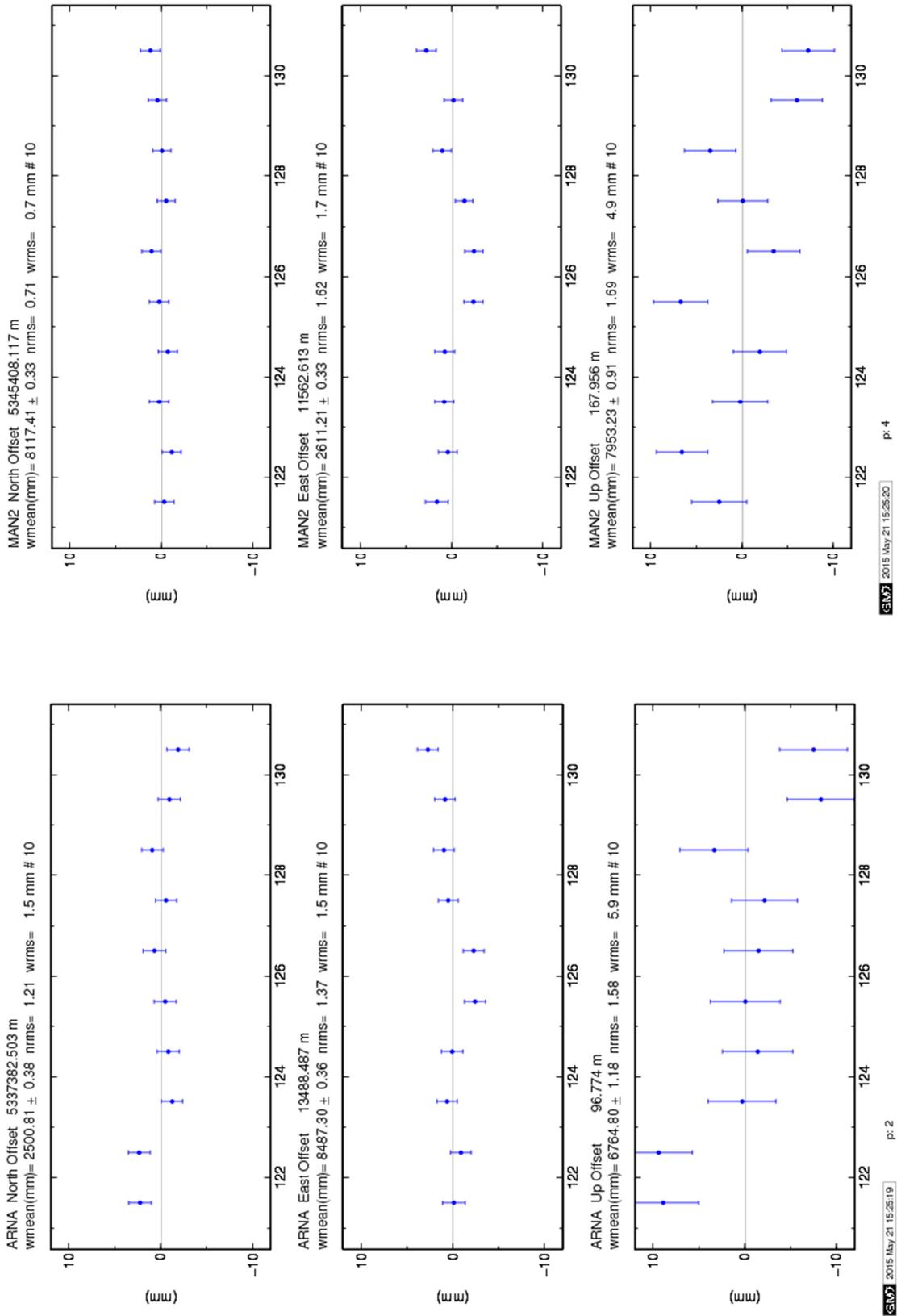
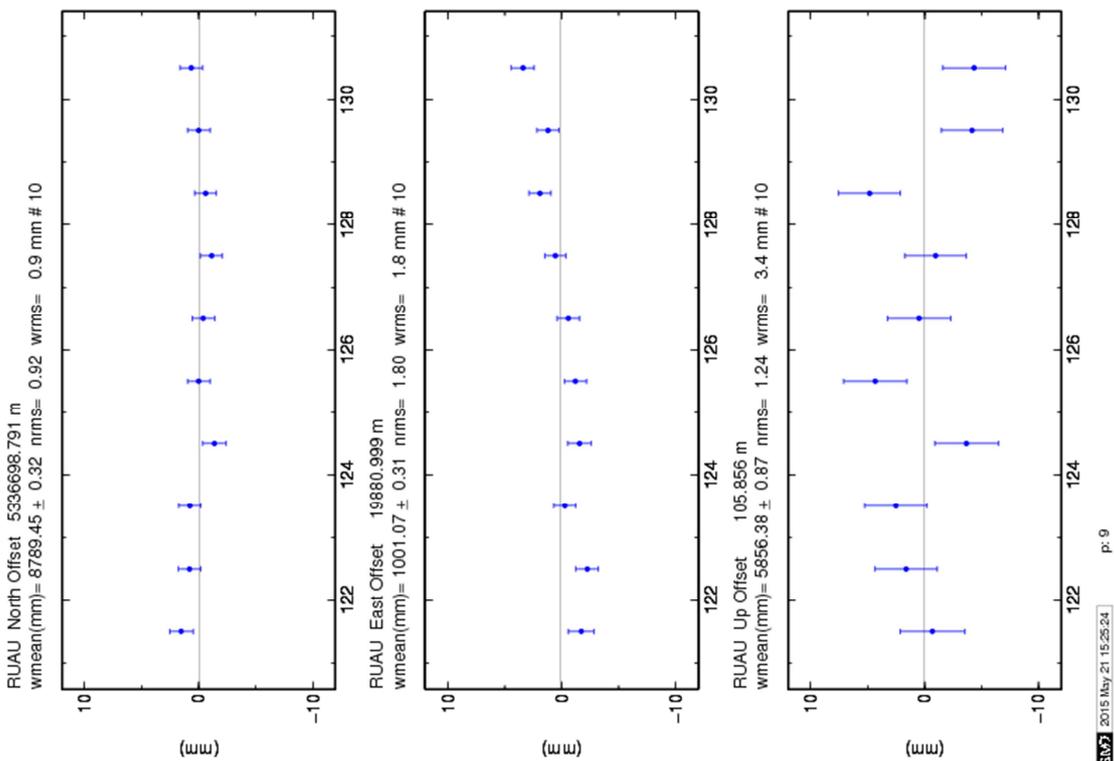
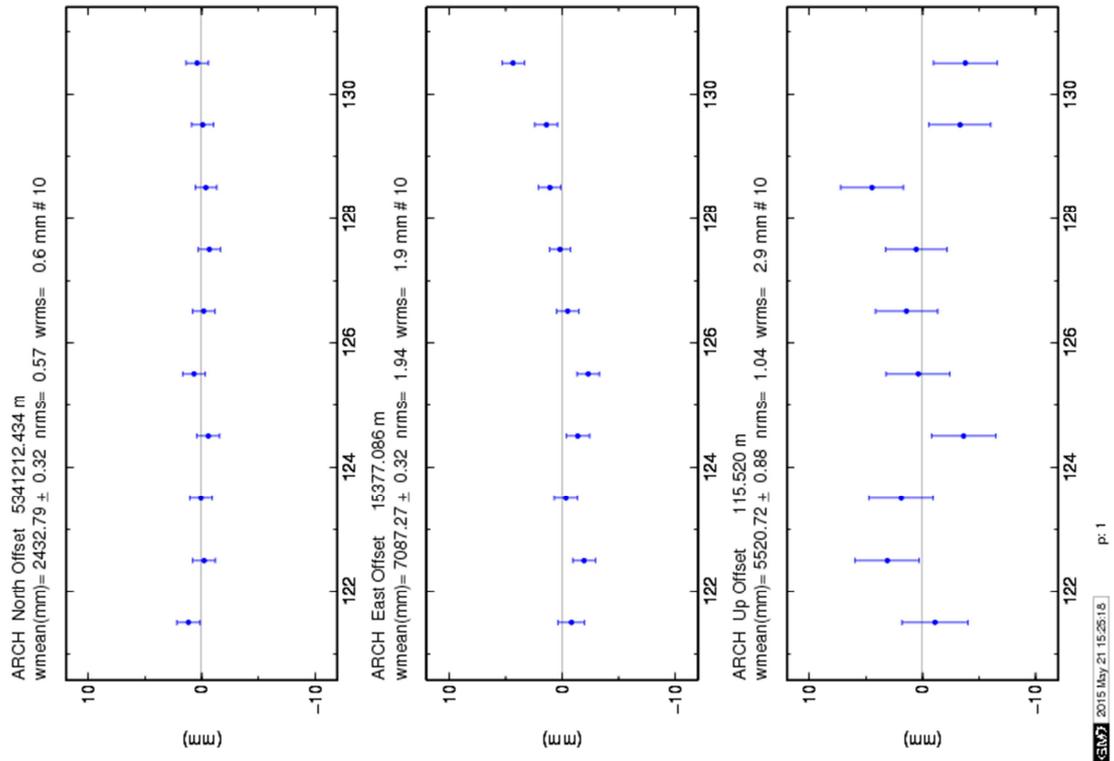
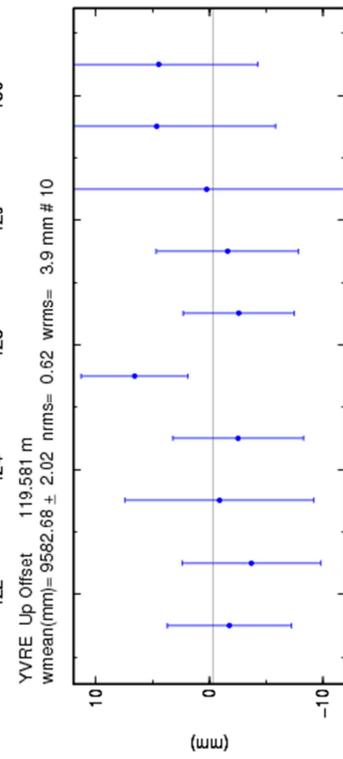
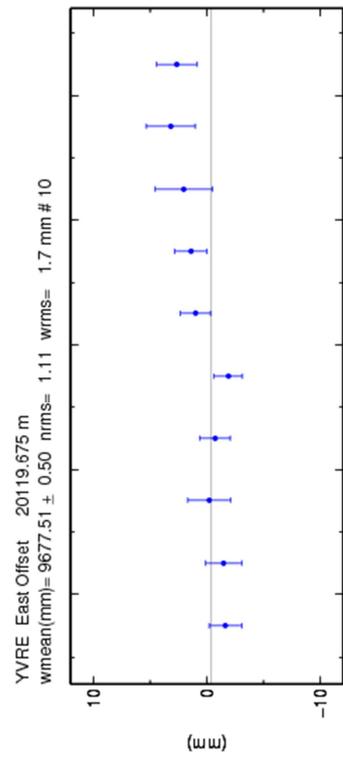
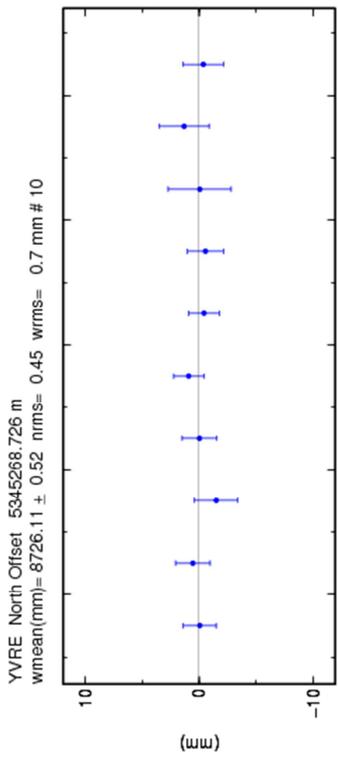


Figure : Interface de l'invite de commande windows avec exécution de la commande « teqc » pour extraire les données de navigation et les données météo.

## Annexe 6 : Séries temporelles sur 10 jours des stations de campagne. Résultats de calculs GAMIT GLOBK.







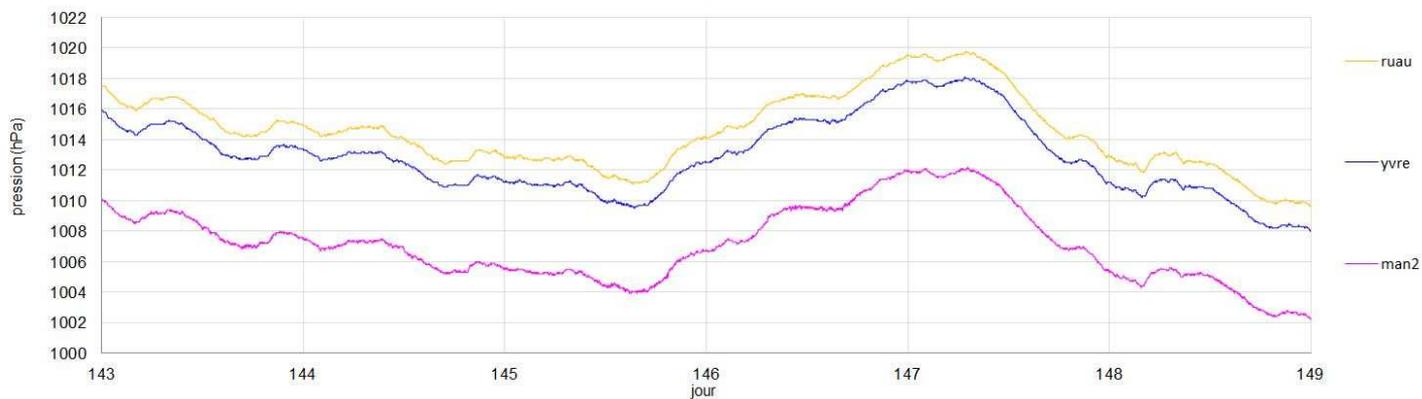
## Annexe 7 : Références matériels et coordonnées des stations du réseau.

MAN2						
date	X	Y	Z	Récepteur	Antenne	Station météo.
03 mai 2015 (2015.336)	4274275.795	11584.520	4718386.136	LEICA GRX1200GGPRO 355146	LEIA1504GG 104089	PTU200
ARNA						
date	X	Y	Z	Récepteur	Antenne	
03 mai 2015 (2015.336)	4280178.259	13513.955	4712967.385	LEICA GX1220 5302K58460	LEIAS10 10021018	
VURE						
date	X	Y	Z	Récepteur	Antenne	Station météo.
03 mai 2015 (2015.336)	4274315.111	20156.963	4718257.045	TPS GB-1000 T228878	ASH701945C_M CR15920	PTU300 K4420005
ARCH						
date	X	Y	Z	Récepteur	Antenne	
03 mai 2015 (2015.336)	4277343.107	15406.181	4715542.895	TPS GB-1000 T228887	ASH701945C_M CR15865	
RUAU						
date	X	Y	Z	Récepteur	Antenne	Station météo.
03 mai 2015 (2015.336)	4280666.404	19917.575	4712516.674	TPS GB-1000 T228888	ASH701945E_M CR620045351	PTU300 K4420006

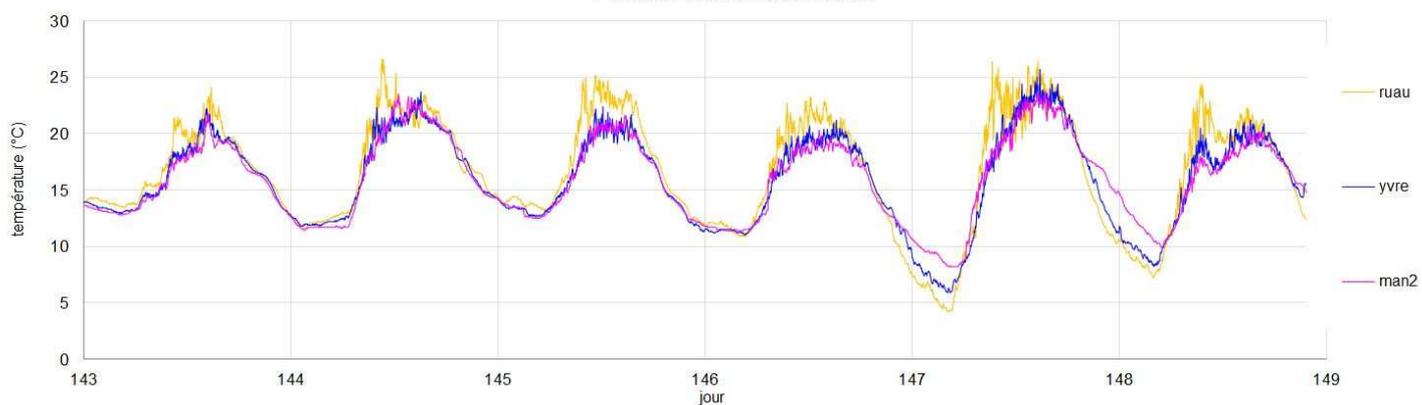
Note: Les coordonnées cartésiennes X, Y et Z sont fournies dans le système ITRF2008 (résultats issus de GAMIT).

## Annexe 8 : Résultats d'observations météorologiques sur la semaine d'étude pour les stations MAN2, RUAU et YVRE.

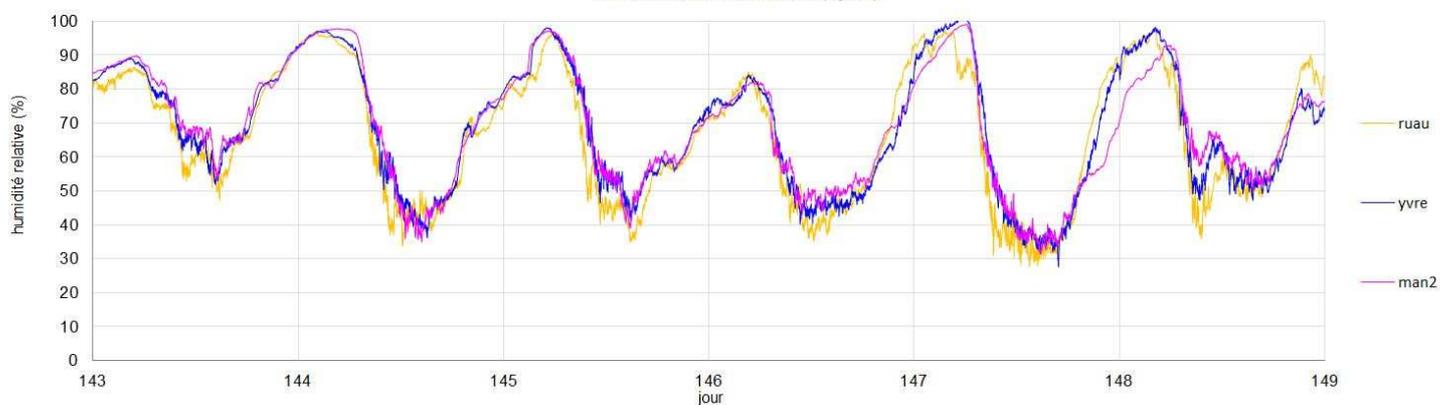
Pression atmosphérique au sol (mesures "in situ")  
Période du 23/05/15 au 28/05/15 (6 jours)



Température au sol (mesures "in situ")  
Période du 23/05/15 au 28/05/15 (6 jours)



Evolution de l'humidité relative au sol (mesures "in situ")  
Période du 23/05/15 au 28/05/15 (6 jours)



# Tomographie troposphérique par réseau GNSS

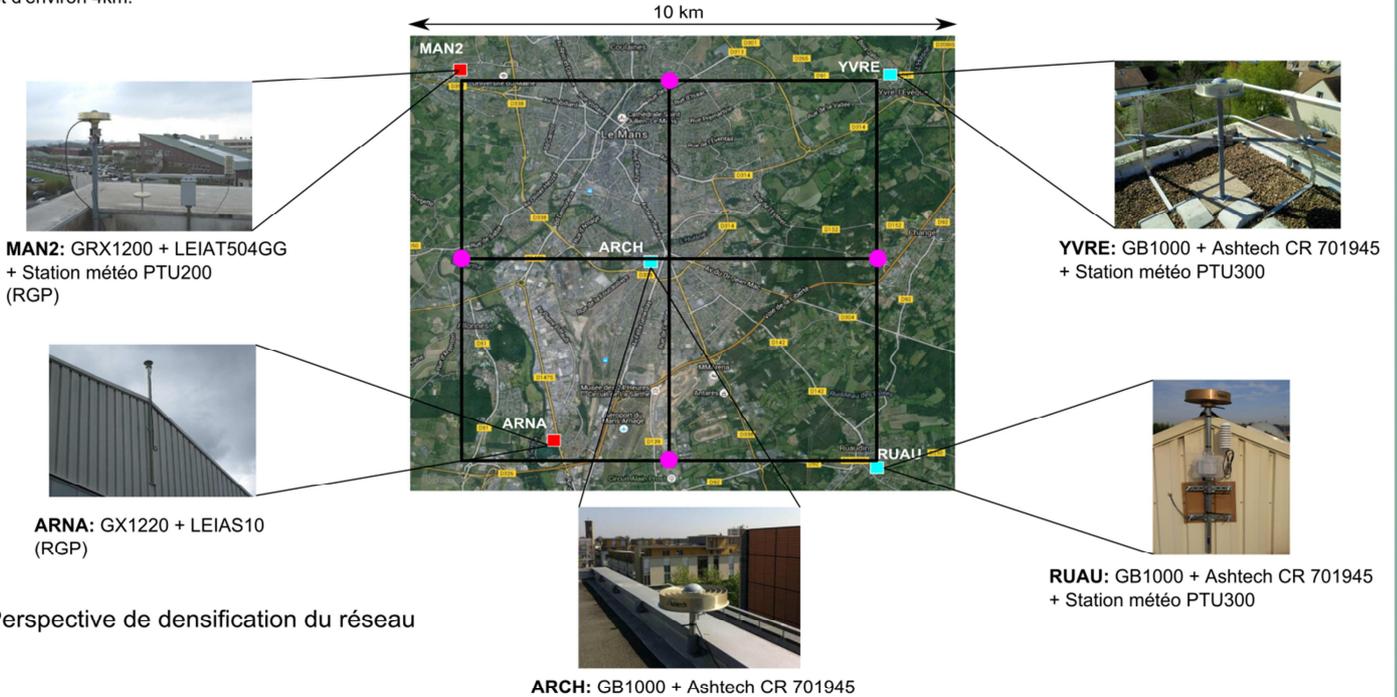
O. Le Coz<sup>1</sup>, L. Morel<sup>1</sup>, S. Durand<sup>1</sup>, F. Durand<sup>1</sup>

<sup>1</sup> L2G, ESGT, Le Mans, France

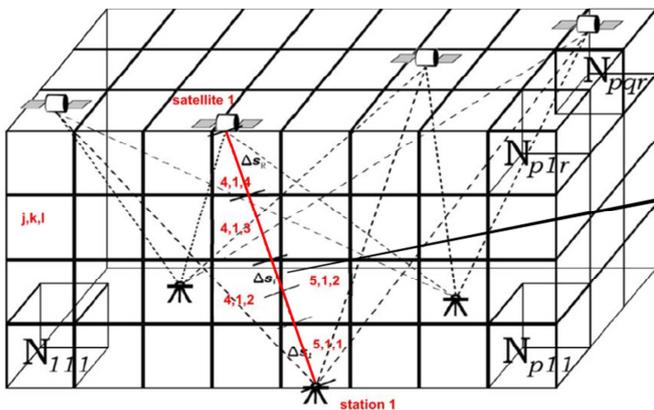
## Réseau GNSS expérimental

Un réseau GNSS expérimental de 5 stations a été installé sur le site de la communauté urbaine de Le Mans dans le cadre de recherches sur une application météorologique: la tomographie troposphérique. Dans ce poster, le réseau GNSS et les traitements effectués sont présentés.

Pour obtenir une estimation la plus fine possible de la vapeur d'eau, l'emplacement des stations a été pensé la plus orthogonale et la plus régulière possible. Le maillage du réseau est d'environ 4km.



## Principe théorique



### 1 Estimation des ZWD par traitement GNSS (GAMIT)

2 étapes de calcul avec le logiciel GAMIT

- étape 1: détermination des coordonnées des stations de campagne à l'aide de 10 stations permanentes de référence (lignes de base supérieure à 1000 km)
- étape 2: estimation des paramètres troposphériques > 1 gradient (GNS et GEW) / 30 min + 1 ZWD / 15 min (VZHD - VMF(3°) - fenêtres glissantes (12h/4h)).

### 2 Calcul des SIWV

$$SIWV = \kappa \times [ZWD \times m_{f_w}(el)] + [gradNS_w \times \sin(az) + gradEW_w \times \cos(az)] \times m_{f_{gw}}(el)]$$

### 3 Equation d'observation (découpage des "rais" à l'intérieur des voxels)

$$SIWV = \rho_{5,1,1} \Delta s_1 + \rho_{5,1,2} \Delta s_2 + \rho_{4,1,2} \Delta s_3 + \rho_{4,1,3} \Delta s_4 + \rho_{4,1,4} \Delta s_5$$

### 4 Inversion tomographique par moindres carrés amortis

$$\begin{bmatrix} SIWV_1 \\ SIWV_2 \\ \vdots \\ SIWV_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta s_{1,1} & \Delta s_{1,2} & \Delta s_{1,3} & \Delta s_{1,4} & \dots & \Delta s_{1,m} \\ \Delta s_{2,1} & \Delta s_{2,2} & \Delta s_{2,3} & \Delta s_{2,4} & \dots & \Delta s_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta s_{n,1} & \Delta s_{n,2} & \Delta s_{n,3} & \Delta s_{n,4} & \dots & \Delta s_{n,m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_m \end{bmatrix}$$

$$L = A \times X + V$$

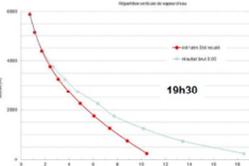
$$X = X_0 + Q_{init} \times A^t \times (A \times Q_{init} \times A^t + \alpha^2 \times Q_{obs})^{-1} \times (L - A \times X_0)$$

## Résultats

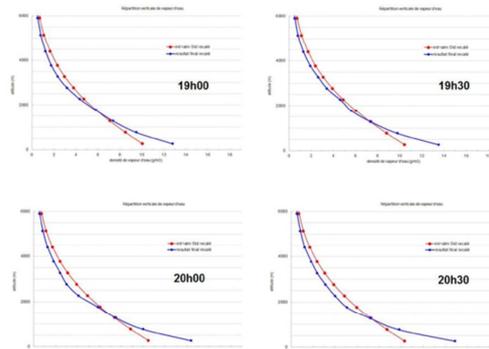
### Paramétrage de TSAAR:

- 2\*2 voxels au sol
  - 16 couches verticales
  - coefficient alpha égal à 0.05
- 64 voxels

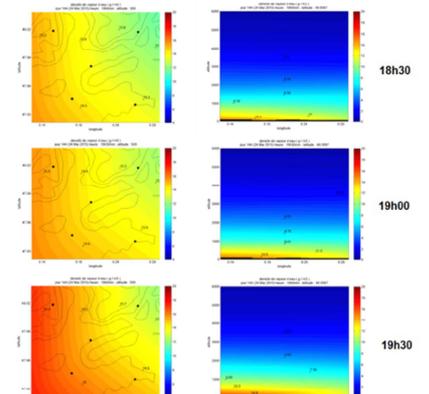
Recalage des résultats bruts de densité de vapeur d'eau par les IWV initiaux estimés par GNSS:



Résultats non recalés



Résultats recalés



Profils horizontaux (à gauche) et verticaux (à droite) de densité de vapeur d'eau (g/m³)



# **Tomographie troposphérique par réseau GNSS dense sur la zone du Mans. Mise en œuvre et premières analyses**

**Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2015**

---

## **RÉSUMÉ**

L'analyse de la vapeur d'eau dans l'atmosphère a longtemps été freinée par le manque d'outils de mesure adéquats pour répondre à la haute variabilité spatio-temporelle de la vapeur d'eau. Dans leurs recherches pour améliorer la précision des systèmes GNSS pour des applications de positionnement, les chercheurs ont permis de créer cet outil. En effet, depuis plusieurs dizaines d'années, avec l'augmentation de leur précision grâce notamment à l'intégration de délais atmosphériques dans les chaînes de calcul, les systèmes GNSS sont devenus des outils incontournables dans les sciences comme la physique de l'atmosphère ou la météorologie.

Le sujet de ce mémoire repose sur une application météorologique des systèmes GNSS, à savoir la tomographie troposphérique qui consiste à restituer le champ 3D de la vapeur d'eau dans la troposphère. L'étude proposée a pour but la démonstration des concepts de la tomographie troposphérique avec un réseau dense de stations GNSS sur la zone de la communauté urbaine du Mans. Ce travail a également vocation à rationaliser les méthodes de mise en œuvre depuis l'installation du réseau GNSS jusqu'à l'utilisation des logiciels de calculs existants. L'expérimentation d'un processus complet de calcul a permis d'apporter une contribution critique sur les méthodes et outils actuels et d'envisager des améliorations.

**Mots clés : GAMIT, tomographie troposphérique, GNSS, délais troposphériques, moindres carrés pondérés amortis, TSAAR, vapeur d'eau, atmosphère.**

---

## **SUMMARY**

Analysis of the water vapor in the atmosphere has long been hampered by lack of suitable measurement tools to meet the high spatial and temporal variability of the water vapor. In their research to improve the accuracy of GNSS for positioning applications, researchers have created this tool. Indeed, for several decades, with increased precision thanks to the integration of atmospheric delays in the calculation chains, GNSS systems have become essential tools in sciences like physics of the atmosphere or meteorology.

The subject of this thesis is based on a meteorological application of GNSS systems, ie tropospheric tomography which is to return the 3D field of water vapor in the troposphere. The proposed study aims to demonstrate the concepts of tropospheric tomography with a dense GNSS network over the area of the urban community of Le Mans. This work is also intended to streamline the methods of implementation for the installation of the GNSS network to the use of existing software calculations. The experiment of a complete calculation process allowed to provide a critical contribution to current methods and tools and to consider improvements.

**Key words : GAMIT, tropospheric tomography, GNSS, tropospheric delays, amortized weighted least squares, TSAAR, water vapor, atmosphere.**