HAL open science

Optimisation et augmentation d'une chaîne de traitement InSAR

Fayçal Talbi Alami

To cite this version:

Fayçal Talbi Alami. Optimisation et augmentation d'une chaîne de traitement InSAR. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2020. dumas-03268396

HAL Id: dumas-03268396

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03268396v1

Submitted on 23 Jun 2021

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

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

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Fayçal TALBI ALAMI

Optimisation et augmentation d'une chaîne de traitement InSAR

Soutenu le 09 Septembre 2020

JURY

Monsieur Robert JEREMY	Président du jury
Madame Jérôme VERDUN	Examinateur
Monsieur Jean-Louis CARME	Maître de stage
Monsieur Samuel DOUCET	Maître de stage
Madame Elisabeth SIMONETTO	Enseignant référent

Remerciements

Tout d'abord, je tiens vivement à remercier Fugro, de m'avoir accepté en qualité de stagiaire ce qui m'a permis de réaliser mon TFE dans de bonnes conditions, lors de mon stage j'ai appris énormément sur un monde professionnel très particulier, que j'ai beaucoup apprécié et aimé, ce que j'ai acquis me servira d'enseignements utiles pour mon avenir professionnel.

Chapeau bas et remerciements chaleureux à mes maîtres de stage en particulier Jean-Louis CARME pour m'avoir accompagné tout au long de ce stage et avoir pris le temps de partager sa riche expérience avec moi, de me conseiller, de me corriger et de m'orienter, et également Samuel DOUCET qui de sa part n'a ménagé aucun effort pour me soutenir et participer à la réussite de mon projet. Je leur exprime toute ma reconnaissance et gratitude pour la pertinence de leurs remarques et de leur feed-back.

Mes remerciements vont aussi à Sylvain LACOMBE et Thierry BORDAS qui m'ont fait confiance pour mener à bien ce projet, et auxquels j'exprime mon profond respect.

Mon passage à Fugro était également très agréable, très professionnel, formidable et inoubliable, et ce grâce à tous les membres de l'équipe du bureau de Castries que je remercie, pour leur accueil, leur aide, leurs conseils et leurs encouragements.

Merci à la Direction et au Corps professoral de l'ESGT.

Merci à tous les membres du jury qui ont acceptés d'examiner mon TFE et l'enrichir par leurs observations et remarques et en particulier Elisabeth SIMONETTO, Jérôme VERDUN et Robert JEREMY.

Merci à ma famille, mes parents et mes amis.

Liste des abréviations

RADAR : Radio Detection And Ranging

InSAR : Interferometric Synthetic Aperture RADAR

LOS : Line Of Sight

GNSS : Global Navigation Satellite System

PSI : Persistent Scatterers Interferometry

PS : Persistent Scatterers

SAR : Synthetic Aperture RADAR

SNAP : Sentinel Application Platform

GPT : Graph Processing Tool

StaMPS : Stanford Method for Persistent Scatterers

TRAIN : The Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise

GACOS : Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR

RIM : Radial Interpolation Method

ESA : European Spatial Agency

IW : Interrferometric Wide Spotlight

PWV : Precipitable Water Vapor

MERIS : Medium Resolution Imaging Spectrometer

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

ZTD : Zenith Tropospheric Delay

GAM : Global Atmospheric Mode

Table des matières

Remerciements 2
Liste des abréviations 3
Table des matières 4
Introduction 6
I ETAT DE L'ART : MESURE DE CHAMPS DE DEFORMATIONS COMPLEXES PAR INTERFEROMETRIE SAR
I.1 L'INTERFEROMETRIE RADAR 8
I.1.1 Principe de base 8
I.1.2 La mesure de déformation 9
I.1.3 Les nouvelles approches 10
I.2 LA COMBINAISON DES MESURES 11
I.2.1 La combinaison de deux géométries 12
I.2.2 L'interpolation par Krigeage 13
I.2.3 La pondération des données 14
I.2.4 La combinaison par Krigeage régression 15
I.3 QUELQUES BIAIS RESIDUELS DE LA SOLUTION 15
I.3.1 Les artefacts atmosphériques 15
I.3.2 Un nouveau paramétrage des traitements 16
I.3.2.1 Un traitement en périodes 16
I.3.2.2 Les sous-séries spatiales 17
II OPTIMISATION DE LA CHAINE DE TRAITEMENT INSAR 18
II.1 LE TELECHARGEMENT DES IMAGES SAR 18
II.1.1 La recherche des images 19
II.1.2 Validation et téléchargement des produits 20
II.2 LE TRAITEMENT DES IMAGES SAR 21
II.2.1 Le traitement de plusieurs swaths 22
II.2.2 Le traitement en sous-séries temporelles 23
II.2.3 Le traitement en sous-séries spatiales 23
II.3 UN NOUVEL OUTIL POUR LE TRAITEMENT INSAR 24
II.3.1.1 La configuration des traitements 25
II.3.1.2 Le traitement de l'ensemble des images 25
II.3.1.3 Le traitement en sous-séries 26
II.3.1.4 Le traitement en saisons 26
II.3.1.5 La réitération des calculs StaMPS 27
II.3.1.6 La génération du fichier de résultats 28
III INTEGRATION DES CORRECTION ATMOSPHERIQUES 29
III.1 LES DIFFERENTS DELAIS ATMOSPHERIQUES 29
III.1.1 Les délais troposphériques 29
III.1.2 Les délais ionosphériques 31
III.2 LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES 31
III.2.1 Les techniques basées sur la corrélation entre phase atmosphérique et topographie 31
III.2.1.1 La correction linéaire 32
III.2.1.2 La « Power law » 33
III.2.2 Les techniques basées sur l'apport de donnés externes 35
III.2.2.1 Les spectromètres embarqués : MERIS 35
III.2.2.2 Les spectromètres embarqués : MODIS 36

III.2.2.3 ERA-Interim ... 36
III.2.2.4 MERRA2 ... 37
III.2.2.5 GACOS ... 37
III.2.2.5.1 Principe de base ... 37
III.2.2.5.2 Analyses des résultats de correction de ce modèle ... 39
III.3 ETUDE COMPARATIVE DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE TRAIN ... 40
III.3.1 Les techniques de correction ... 40
III.3.2 Corrections et discussion des résultats ... 41
IV L'AMELIORATION DE LA COMBINAISON ... 43
IV.1 INTEGRATION D'UNE NOUVELLE TECHNIQUE D'INTERPOLATION RADIALE ... 44
IV.1.1 Principe de l'interpolation radiale ... 45
IV.1.2 Les différentes étapes de l'interpolation ... 45
IV.1.3 L'intégration de l'interpolation radiale ... 47
IV.1.4 Simulation et analyses des résultats obtenus ... 48
IV.1.5 Test de l'interpolation radiale et discussion sur des résultats ... 51
V ETUDE DE CAS ... 54
V.1 PRESENTATION DU CAS D'ETUDE ... 54
V.2 TRAITEMENT DES IMAGES ... 55
V.3 LE TRAITEMENT EN SOUS-PERIODES ... 56
V.4 APPLICATION DES CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES ... 57
Conclusion ... 60
Bibliographie ... 61
Annexe 1 Exemple de fichier de résultats ... 64
Annexe 2 Tableau représentant la corrélation GNSS et HRES-ECMWF ... 65
Annexe 3 Tableau montrant les différentes améliorations issues des techniques expliqués 66
Annexe 4 Listing des images SAR en géométrie ascendante ... 67
Annexe 5 Listing des images SAR en géométrie descendante ... 68
Annexe 6 Amélioration du nombre de Permanent scatterers ... 69
Annexe 7 Amélioration du nombre de Permanent scatterers ... 70
Annexe 8 ZTD du modèle GACOS ... 71
Annexe 9 Interférogrammes corrigés (Technique GACOS) ... 72
Annexe 10 Interférogrammes corrigés (Technique linéaire) ... 73
Liste des tableaux ... 75

Introduction

La subsidence est un phénomène naturel, dû à la consolidation de sédiments. Il produit ainsi des déplacements de l'ordre de quelques millimètres tous les ans, et son origine se trouve dans différents phénomènes tels le tassement naturel, l'affaissement ou l'effondrement lents de cavités. D'autres formes de subsidences existent et sont provoquées par des activités anthropiques.

Aujourd'hui, une multiplication de ce phénomène a lieu du fait d'activités anthropiques, (extraction de minerai, pompage d'eau ou d'hydrocarbures) produisant, en conséquence, des mouvements plus importants de l'ordre de quelques centimètres, voire décimètres, par an. Lors d'études d'impact environnemental, il est donc important de pouvoir étudier la tendance, mais aussi la répartition du phénomène sur la zone affectée par l'activité (généralement des étendues de plusieurs kilomètres carrés, en fonction du diamètre du bol de subsidence). Quelques méthodes de mesure historiques (positionnement GNSS et nivellement) ont permis de mesurer la subsidence, mais l'acquisition de ces données nécessite des campagnes de mesures *in situ*, avec une densité, une fréquence et une répartition qui doivent être adaptées pour bien modéliser la déformation.

Pour répondre à ce besoin, l'exploitation de mesures RADAR à synthèse d'ouverture (RSO), a donné lieu à l'apparition de nouvelles techniques de traitements, dont l'interférométrie SAR « Interferometric Synthetic aperture radar » (InSAR), qui fait aujourd'hui l'objet de multiples recherches et études, pour mieux mesurer des déformations et pouvoir quantifier les incertitudes liées à son utilisation.

Contrairement aux méthodes de mesure classiques en géodésie, l'InSAR a l'avantage de proposer des donnés qui couvrent l'ensemble du globe terrestre, tout en offrant une densité et une répartition de mesures plus avantageuses. A cela va s'ajouter la possibilité de remonter dans le temps, car en effet avec les différentes missions RADAR qui ont vu le jour depuis le début les années 90, l'utilisateur a la possibilité d'exploiter des données anciennes.

Bien que cette technique soit susceptible d'offrir, lors de son utilisation, une bonne densité de points (en fonction de la nature du sol étudié), elle reste tout de même affectée par différents biais, à l'instar de l'erreur sur l'orbite des satellites, de la réfraction atmosphérique, des phénomènes de décorrélation géométrique, temporelle et autres. Tandis que les données GNSS ou de nivellement sont généralement moins bien réparties sur la zone d'étude, mais leurs précisions et incertitudes restent plus faciles à mesurer et quantifier.

Depuis des années, Fugro a lancé le développement d'une solution de combinaison de mesures (GNSS, InSAR, nivellement, LiDAR de précision, et inclinométrie) pour deux raisons principales : d'abord, afin de pouvoir fournir une solution d'auscultation dans toutes les configurations de terrain possibles, en exploitant les forces et faiblesses de chaque technique permettant de profiter de leurs complémentarités. Ensuite, dans le but d'améliorer la fiabilité et la précision des mesures (les incertitudes formelles étant souvent discutables).

L'ensemble de ces travaux ont donc été repris par la thèse de S. Doucet soutenue à Montpellier en 2018, et intitulée : « Combinaison de mesures géodésiques pour l'étude de la subsidence : application à la saline de Vauvert (Gard, France) », qui a permis de mettre en place des variantes pour la combinaison, regroupées dans une interface graphique appelée GEOMON en référence au géo-monitoring.

« Ces techniques répondent donc à un objectif commun d'améliorer la mesure d'un phénomène connu (mouvement du sol) en densifiant sa mesure (spatialement ou temporellement), et permettrait de pallier les limites de chaque solution de mesure. » (Doucet 2018).

I Etat de l'art : Mesure de champs de déformations complexes par interférométrie SAR

I.1 L'interférométrie RADAR

I.1.1 Principe de base

Un système RADAR (RAdio Detection and Ranging), est un système actif, qui consiste à envoyer un signal électromagnétique, sur une surface, et d'enregistrer l'amplitude et la phase du signal retour. Le temps entre l'émission et la réception de cette même onde, permet d'en déduire la distance à l'objet. Aujourd'hui, diverses applications, d'origines civiles et militaires découlent ainsi de ce système de mesures, terrestre, aéroporté ou embarqué sur satellite.

A l'origine, les satellites radars RAR « Real Aperture Radar », offrait des résolutions plurikilométriques, et l'obtention d'images plus résolues nécessitaient des antennes de plusieurs kilomètres, ce qui est techniquement impossible. Ce n'est qu'en 1951 que Carl Wiley met en place un nouveau système appelé « Synthetic Aperture Radar » (SAR) en anglosaxon, qui permet de s'affranchir de ces limitations. Ce nouveau mode d'acquisition effectue un traitement des données acquises pour améliorer la résolution azimutale, tout en mesurant les mêmes éléments lors du déplacement rectiligne du satellite. Par conséquent la taille de l'antenne n'est plus un obstacle, et c'est cela qui a permis l'obtention de résolutions décamétriques pour plusieurs missions RADAR. Parmi celles-ci, nous pouvons citer les satellites Sentinel 1a et 1b de l'ESA (Europeen Spatial Agency) qui offrent une résolution de 20 mètres par 5 mètres pour la bande (C) en mode IW (Interferometric Wide Swath) et gratuitement, ou encore la mission spatial TERRASAR-X d'Airbus avec une résolution de 1 mètre par 1 mètre pour la bande payante (X) en mode HS (High Resolution Spotlight).

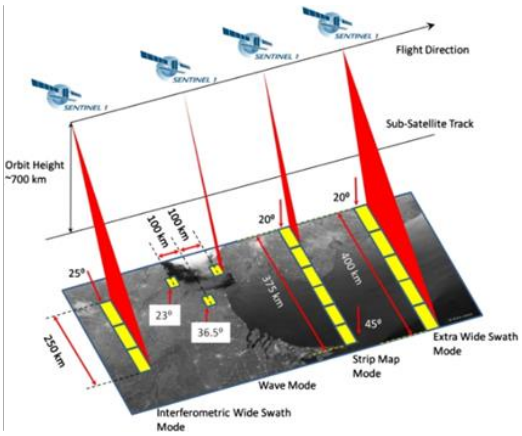


Figure 1 Les différents modes d'acquisition Sentinel, (Site de l'ESA)

I.1.2 La mesure de déformation

L'objectif pour nous est de pouvoir mesurer des mouvements du sol à différentes périodes. Les satellites utilisés ont une orbite très stable, et les acquisitions se font dans des conditions quasi identiques. Dans cette optique, exploiter la mesure de la phase pour générer des interférogrammes (technique appelée InSAR) est un bon moyen pour y parvenir. L'interférométrie SAR a été mise en œuvre à des fins de mesures des déformations topographiques, pour la première fois en 1989 par (Gabriel et al,1989), puis par (Massonnet et al, 1993). Ainsi, en utilisant une image maitresse et une image esclave, on peut comparer les signaux reçus, sur un même pixel à deux périodes différentes. Un déphasage entre 0 et 2π est calculé en chaque pixel, et en connaissant la longueur d'onde du signal émis, on peut donc convertir notre interférogramme en mesure de déformations. Cependant, cette solution reste limitée en raison des différents biais qui affectent les mesures, tels les délais atmosphériques, la décorrélation géométrique et la décorrélation temporelle. (Figure 2)

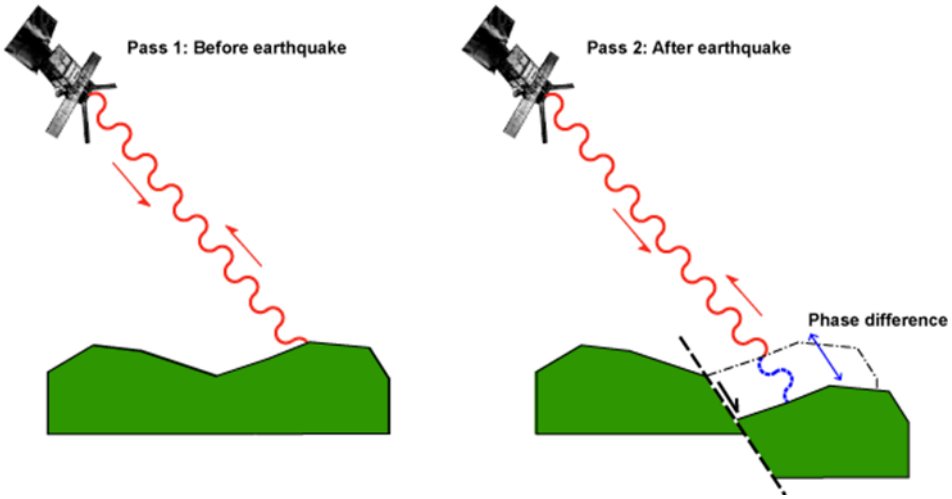


Figure 2 Représentation d'une déformation mesurée par D-INSAR (Löfgren et al, 2008)

Ce déphasage étant traduit par une déformation, il est donc possible de le calculer, à la manière de la phase interférométrique suivante :

$$\varphi ifg = \varphi s - \varphi m \quad (1)$$

Avec φs et φm respectivement la phase mesurée pour un même pixel, sur l'image esclave et l'image maîtresse. Ce déphasage dépend de la différence de trajet Aller/Retour et s'écrit de la façon suivante :

$$\varphi ifg = \varphi topo + \varphi orb + \varphi def + \varphi atm + \varphi bruit[2\pi] \quad (2)$$

φorb: la variation de l'orbite entre les 2 acquisitions,

$\varphi topo$: le déphasage induit par la topographie vue sous deux angles différents entre les deux prises de vue,

φatm : la différence des délais atmosphériques entre les 2 acquisitions,

$\varphi\ def$: La déformation entre les deux moments de prise de vue,

$\varphi\ bruit$: Un bruit lié à la décorrélation temporelle.

I.1.3 Les nouvelles approches

Comme le montre l'équation (2), les mesures InSAR comme tout autre type de mesures géodésiques, sont affectées par une multitude de bruits dont l'origine est connue mais parfois difficile à quantifier. Pour limiter leurs impacts, plusieurs approches ont été mises en place, et parmi celles-ci nous retrouvons (Ferretti et al, 2001) qui met en place, le PSI ou PS-InSAR (persistent scatterers ou permanent scatterers), qui se base sur l'identification de pixels dont les caractéristiques restent stables et cohérentes en matière de réflectance au cours du temps. Il propose ainsi de résoudre un système d'équations linéaires avec autant d'équations que d'interférogrammes, permettant d'approcher statistiquement, (1) le mouvement suivant l'axe de visée du radar, (2) l'erreur de la phase topographique, et (3) le délai atmosphérique à chaque date. Cette méthode nécessite un traitement sur une série temporelle assez longue pour être efficace, et pour obtenir un champ de vitesses suivant la ligne de visée de notre satellite en chaque PS. De plus, l'utilisation de cette méthode de traitement, permet de s'affranchir statistiquement de l'ensemble des bruits de mesures.

Aujourd'hui, il existe différentes missions spatiales SAR, et parmi celles-ci, mon travail s'est focalisé sur les acquisitions issues de la constellation Sentinel pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les images de la bande C sont mises à disposition gratuitement par l'ESA via la plateforme Copernicus Hub, et ont une résolution convenable de 20 x 5 mètres en mode IW. A cela s'ajoute le fait que la période de retour de chaque satellite est de 12 jours, ce qui permet d'avoir une image tous les 6 jours pour n'importe quel endroit sur le globe terrestre (sauf aux pôles nord et sud), en raison du décalage des deux orbites. Toutes ces données brutes sont fournies sous format SLC (single look complex), et peuvent être traitées par un logiciel adapté et gratuit développé par l'ESA appelé « Sentinel application Platform » SNAP, qui est aussi fourni avec un outil de traitement graphique (Graphic Processing Tool ou GPT), qui permet d'automatiser les calculs avec des graphiques XML.

I.2 La combinaison des mesures

La problématique de la combinaison des mesures géodésiques et InSAR, va vite être posée lors d'études de subsidence. En effet, Fugro a été confronté à des cas, où des campagnes de mesures *in situ* sont opérées. Ce qui offre la possibilité de s'appuyer sur des données de nivellement et/ou de GNSS géodésiques (ex : site de Vauvert : extraction de gaz naturel). Chacune des méthodes géodésiques permet de mesurer des déplacements et des champs de vitesses en mm/an. Cependant, chacune d'entre-elles présente des avantages et des inconvénients. Dans ce sens, les mesures de GNSS précis peuvent atteindre des précisions de l'ordre de 0.5 mm pour de longues périodes de mesures avec des traitements sur des logiciels scientifiques comme GAMIT-GLOBK ou Bernese, mais restent généralement peu denses du fait que les mesures ne sont opérées que sur des points caractéristiques. L'InSAR, quant à lui offre une densité de points beaucoup plus conséquente en fonction de la zone étudiées, mais l'incertitude relative aux mesures reste peu connue. Ainsi pour pallier les désavantages de chacune de ces techniques de mesure, la combinaison serait donc un outil puissant pour minimiser les incertitudes relatives à chaque méthode, et profiter des avantages de chacune d'entre elles. Dans sa thèse, S. Doucet met en place 3 variantes de combinaisons géostatistiques, qui seront ensuite intégrées dans l'outil GEOMON de Fugro.

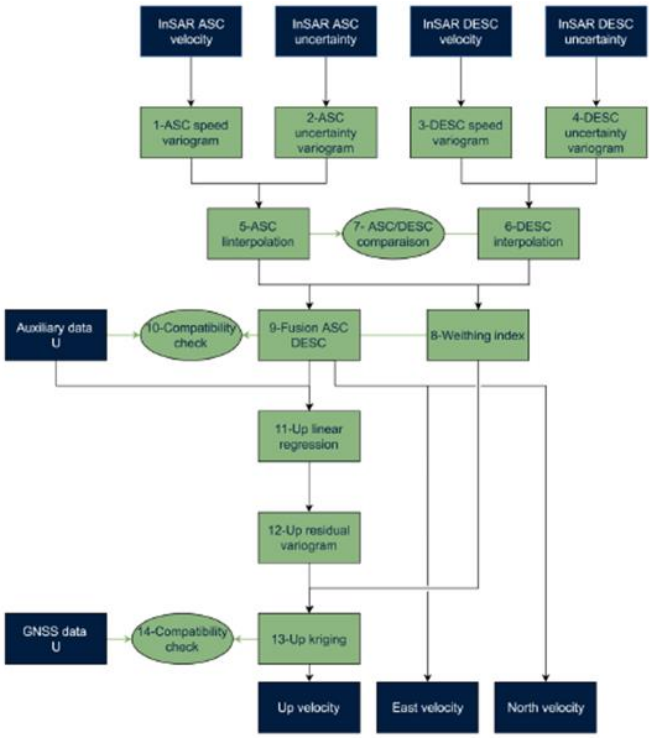


Figure 3 Exemple de variante de combinaison (S. Doucet)

I.2.1 La combinaison de deux géométries

Les mesures de subsidence étant exprimées suivant l'axe de visée du satellite, estimer une déformation dans un référentiel géodésique classique est en effet complexe, car elle peut contenir 3 composantes de déplacement suivant les axes est, nord et vertical. Il existe des approches permettant d'obtenir des déplacements dans un tel référentiel, et nécessitent l'utilisation de deux géométries RADAR, ascendante et descendante. Ce qui donne lieu à deux mesures d'un même objet depuis deux sommets de prises de vues différents comme le montre la figure 4.

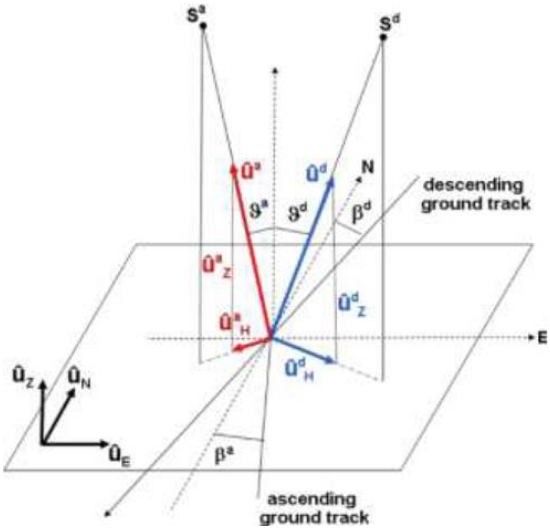


Figure 4 Mesure d'un même élément depuis deux géométries radar (Catalão et al,2011)

Avec cette configuration, on peut calculer les composantes de déplacements en faisant une simple résolution d'un problème géométrique. On exprime alors les vitesses Est, Nord et Vertical en fonction du déplacement sur notre LOS, mais les observations dont nous disposons ne sont pas suffisantes pour pouvoir résoudre le système à trois inconnues (Ve, Vn et Vu). Il faut donc poser des hypothèses pour pouvoir y parvenir.

La première considère que les angles d'incidence sont égaux pour les deux géométries, ce qui implique que : $Uasc\ (E) = -Udesc(E)$, $Uasc\ (N) = Udesc(N)$ $et\ Uasc\ (U) = Udesc(U)$, On obtient alors les vitesses de déplacement suivantes :

$$V(E) = \frac{Vasc\ (LOS) - Vdesc\ (LOS)}{-2\ Udesc\ (E)}\ \ (3)\ \ et\ V(N\ et\ U) = \frac{Vasc\ (LOS) + Vdesc\ (LOS)}{2\ U\ (U)}\ \ (4)$$

La composante Est est donc simple à mesurer, tandis qu'il est plus complexe d'estimer les composantes Nord et Verticale, qui sont toutes les deux exprimés par une même équation. Pour y remédier, il existe plusieurs moyens, dont le plus commun est celui qui

suppose l'existence d'un bol de subsidence, avec un déplacement de tous les points vers son centre. Ceci implique que la composante Nord peut être exprimée de la façon suivante : $V(N) = V(E)\tan(\alpha)$ (5) ; avec α l'angle entre l'axe Est et le point étudié. (Figure 5).

L'existence d'une déformation radiale, vers un centre de subsidence permet donc d'estimer des vitesses de déplacements suivant des axes tri-dimensionnels (Est, Nord et Vertical). Cependant, il est possible que, physiquement, notre hypothèse n'ait pas de sens, en raison de l'angle alpha qui pourrait tendre vers Pi/2 ou -PI/2 ce qui donnerait lieu à une déformation infinie. Il est donc nécessaire de trouver un moyen de répondre à cette limite ; raison pour laquelle une hypothèse nouvelle est établie, et elle prévoit une déformation qui suit des iso-contours (figure 5), pour lesquels les valeurs seront déterminées à partir du profil est-ouest.

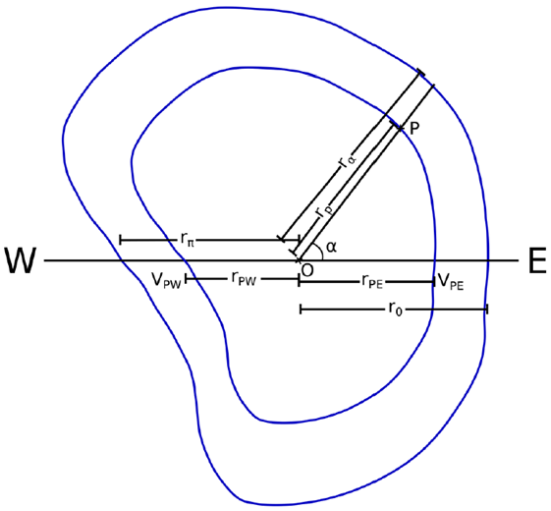


Figure 5 Représentation d'une déformation radiale (S. Doucet)

I.2.2 L'interpolation par Krigeage

Pour opérer la combinaison, S. Doucet propose tout d'abord d'interpoler les résultats de chaque technique de mesure de façon indépendante. Pour cela, il opte pour le krigeage, car, en réalité, il s'agit d'une interpolation géostatistique exacte, qui produit des valeurs d'incertitudes pour chaque point de mesure, et qui dépend de la taille ainsi que de l'organisation spatiale de l'échantillon étudié. Une analyse rigoureuse de variogrammes (expérimentale et ajustée) est alors nécessaire pour déterminer 3 paramètres d'interpolation dont la pépite (C0), la portée (a) et le pallier (C0+C) (Figure 6).

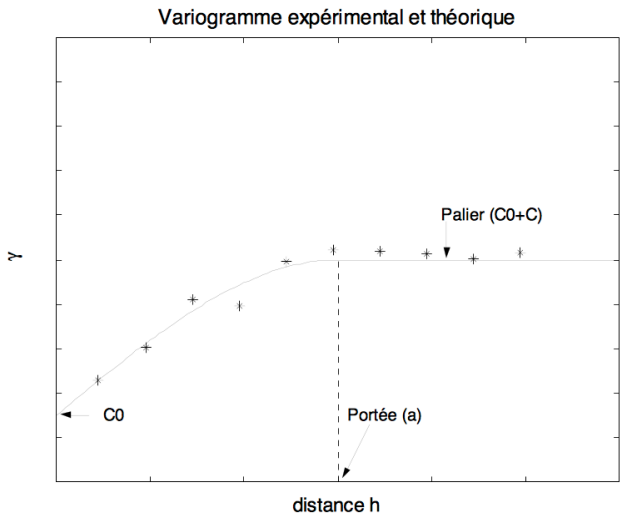


Figure 6 Exemple de modèle de variogramme (S. Doucet)

I.2.3 La pondération des données

Afin de combiner les mesures d'une façon tout à fait rigoureuse, il est évident que les qualités des mesures principales (InSAR), et auxiliaires (nivellement, GNSS, inclinométrie) puissent être quantifiées, et il faut pour cela choisir un poids approprié à chaque donnée en fonction de son incertitude de mesure.

Maitriser la pondération des mesures est donc primordial pour produire un résultat cohérent, et pouvoir obtenir la solution combinée la plus exacte possible. Une étude de l'origine de chaque technique de mesure doit toujours être réalisée pour éviter une sous-estimation ou surestimation, et ainsi garder l'équilibre de l'apport de chaque méthode. En effet, il est important de bien choisir les outils de traitement de chaque donnée. Il existe, à titre d'exemple, plusieurs logiciels de traitement des observations GNSS, d'origine commerciale qui ont la réputation de fournir, une surestimation de la qualité du positionnement. Il est donc évident que pour mesurer une subsidence, on se tournera vers les outils adaptés tels les logiciels scientifiques Gamit-Globk ou Bernese, qui donnent des estimations beaucoup plus réalistes de la qualité obtenue.

Pour le nivellement, des compensations par moindres carrés peuvent être faites, et l'incertitude est calculée de façon proportionnelle à la distance. La précision de cette technique dépend du mode opératoire utilisé et du traitement réalisé, des précisions de 0.3 mm / √km peuvent être atteintes.

Les incertitudes du PS-InSAR, sont, quant à elles, calculées après l'analyse des valeurs obtenues pour un même point sur une série temporelle assez longue. Ce qui permet de calculer une droite de régression linéaire (à condition que la déformation soit linéaire), et de mesurer l'écart de chaque mesure par rapport à cette fonction affine. L'estimation n'est donc pas réaliste puisqu'elle considère que le mouvement est linéaire au cours du temps, et ne prend pas en considération des mouvements périodiques. Elle reste tout de même le seul moyen d'estimer un bruit de mesure. Après la combinaison des deux géométries radars, une grille d'incertitude Pinsar est calculée telle que les pondérations suivantes :

$$Pinsar = \sqrt{Pinsar, asc^2 + Pinsar, desc^2}$$

tel que :

$$Pasc = \sqrt{Sv.asc + Sunc.asc + Unc, asc^2}$$

$$Pdesc = \sqrt{Sv.desc + Sunc.desc + Unc, desc^2}$$

Avec : $Sv.asc$ et $Sv.desc$: les grilles de variances issues de l'interpolation krigeage des deux géométries, en $(mm/an)^2$

$Sunc.asc$ et $Sunc.desc$: les grilles de variances issus de l'interpolation krigeage des incertitudes des deux géométries, en $(mm/an)^2$

$Unc.asc$ et $Unc.desc$: les grilles d'incertitudes, de l'interpolation krigeage des deux géométries, en $(mm/an)^2$

I.2.4 La combinaison par Krigeage régression

Une fois que toutes les données sont prêtes, la combinaison se fait sur plusieurs étapes. La première consiste en la régression linéaire de la donnés InSAR, sur la donnée auxiliaire considérée plus précise, et ceci en fonction des indices de pondération présentés précédemment. Cinq graphiques sont alors proposés par la solution Geomon, et l'utilisateur doit choisir le modèle qui convient le mieux. Ce modèle permettra ainsi de prédire de nouvelles valeurs telles qu'elles auraient été mesurées par la mesure auxiliaire, et donc densifier nos mesures en calculant une nouvelle grille de vitesse sur l'ensemble de la zone d'étude.

Un second krigeage des résidus est calculé, par la même fonction affine issue du krigeage régression, pour déterminer des valeurs d'incertitudes en chaque point de la grille, nécessaires à l'interpolation indépendante des deux jeux de donnés. Pour fusionner les deux techniques de mesures, et obtenir le résultat final, une addition de la grille des résidus et des vitesses de déplacements de la régression linéaire est faite.

I.3 Quelques biais résiduels de la solution

Comme expliqué dans la première partie, l'InSAR est fortement impacté par différents biais aux origines différentes, tels les délais atmosphériques et autres. Cependant il existe d'autres paramètres, dont l'impact pourrait être assez conséquent et qui sont présentés dans la partie suivante.

I.3.1 Les artefacts atmosphériques

L'atmosphère étant l'une des limites principales de l'InSAR, on utilise généralement un maximum d'interférogrammes indépendants (technique appelée Stacking), qui permettent de diminuer statistiquement l'effet de l'atmosphère avec des séries temporelles assez longues pour couvrir toutes les conditions atmosphériques possibles *Multi Temporal InSAR* (MT-INSAR). La limite de cette technique demeure dans l'aspect aléatoire, et

variable de l'atmosphère, qui est à la fois spatialement et temporellement instable. De plus, pour des zones où le nombre d'images SAR est limité (Exemple : le pôle nord), éliminer ces artefacts devient difficile. Jusqu'ici, le seul moyen utilisé pour diminuer les artefacts est le PSI présenté dans la première partie qui permet d'approcher les éléments suivants : (1) le déplacement, (2) l'erreur topographique liée au MNT utilisé pour simuler la composante topographique de la phase interférométrique et (3) le délai atmosphérique de chaque image.

Une multitude de techniques existent pour estimer ces délais, telles que les spectromètres (MERIS et MODIS) embarqués sur les satellites Envisat, qui donnent une estimation des délais atmosphériques simultanément lors de l'acquisition des images radars, les modèles globaux météo (ERA-Interim, MERRA2 ou GACOS), qui donnent une information sur la pression, la température et l'humidité relative, ou encore différentes méthodes d'estimation des délais qui se basent sur la corrélation entre l'atmosphère et la topographie.

La difficulté ici, est de pouvoir différencier un déplacement, d'une variation aléatoire de l'atmosphère. C'est dans ce sens que D. Beakert propose une solution sous forme de bibliothèque Matlab « The Toolbox for reducing Atmospheric InSAR Noise » TRAIN, qui permet d'introduire des corrections de délais atmosphériques (hydrostatique et humide), pour chaque interférogramme. Diverses méthodes sont proposées, et leur intégration à la chaine de traitement nécessitent une étude poussée de chacune d'entre elles.

I.3.2 Un nouveau paramétrage des traitements

I.3.2.1 Un traitement en périodes

Outre les problèmes liés à une mauvaise estimation des bruits de mesures, d'autres phénomènes naturels peuvent avoir un impact sur les résultats. En effet, l'expérience a montré que lors de traitements multi-temporelles, les réflecteurs permanents peuvent subir des changements, ce qui implique une perte de cohérence temporelle, et a pour conséquence l'obtention de faible densité de PS (décorrélation sur longue date). Ainsi en scindant les calculs en périodes, on pourrait s'affranchir de cette limite et obtenir une meilleure densité de points de mesures (en prenant en compte ces phénomènes qui peuvent avoir lieu).

Un traitement en sous-séries temporelles serait donc un atout pour améliorer la densité des points de mesures. De plus, certains phénomènes naturels tels un séisme, ou

certaines activités humaines, pourraient provoquer des déplacements sur un court intervalle de temps. Ce qui induirait la présence de points dont les caractéristiques changeraient au cours du temps, et qui seraient considérés comme des réflecteurs qui ne pourront pas être exploités lors d'un traitement PSI, alors que la restriction du nombre d'images (en diminuant de la période temporelle), avec une paramétrisation du calcul plus fine et adaptée à cette nouvelle période permettraient d'augmenter, de façon importante, la densité des points mesurés et la qualité de ceux-ci.

I.3.2.2 Les sous-séries spatiales

Une fois que les interférogrames sont calculés, il est nécessaire de dérouler la phase à partir d'un point fixé : chose qui permet l'obtention de déplacements en millimètres suivant la ligne de visée de notre satellite.

Cependant du fait de la taille de nombre de zones d'études (et selon la géologie structurale), le comportement du sol peut être très différent à l'intérieur d'une même scène. En outre, les zones cohérentes (avec franges d'interférence) peuvent être séparées par des zones incohérentes (par exemple des forêts), et le déroulement de phase est potentiellement différent pour ces différentes zones. Un traitement en sous-séries spatiales serait donc un atout pour détecter des mouvements de faible longueur d'onde, et éviter un déroulement suivant des zones déconnectées.

La chaine de traitement devrait donc mieux prendre en considération l'ensemble des limitations exposé dans les parties précédentes, et ainsi proposer des traitements en sous-séries-spatiales et temporelles, ce qui permettrait d'optimiser la solution en place.

II Optimisation de la chaine de traitement InSAR

Les différents travaux réalisés par Fugro, ont permis de mettre en place une chaine de traitement des donnés InSAR, basée essentiellement sur une multitude de scripts indépendants (Python, CSH, R et autres), chacun d'entre eux prévu pour lancer des étapes différentes du calcul. Toutefois, celle-ci reste assez complexe à manipuler, et n'est pas accessible pour tout le monde. Revoir la chaine de traitement depuis le téléchargement des données jusqu'aux résultats est donc un point important lors de ce travail. Cela permettrait de faciliter l'utilisation et la compréhension, pour les processeurs InSAR non experts.

II.1 Le téléchargement des images SAR

Tout d'abord, il est important de rappeler, que les images SAR utilisées proviennent des constellations Sentinel 1a et 1b, via la plateforme Copernicus hub de l'ESA. Un protocole Wget est aussi disponible et permet ainsi de récupérer les données souhaitées d'une façon plus simple.

Jusque-là, le seul moyen mis à disposition pour télécharger les images consiste en la consultation de la plateforme de l'ESA, et en l'identification d'un numéro de l'orbite relative qui couvre notre zone d'étude. Des commandes en C-shell permettent ensuite de récupérer la liste des images SAR à télécharger, tout en spécifiant le numéro de l'orbite, les dates, ainsi que les autres paramètres souhaités. Le téléchargement est ensuite lancé à partir d'un script, qui télécharge les images présentes dans la liste, et en utilisant 3 comptes d'utilisateurs différents pour accélérer le processus. A cela vont s'ajouter des étapes manuelles, qui permettent de vérifier que les images couvrent la zone d'étude dans sa globalité.

Il est donc évident que ces étapes font intervenir un grand nombre de scripts et commandes, et l'utilisateur doit avoir une connaissance de l'enchainement de l'ensemble des manipulations. C'est donc pour cette raison que nous nous sommes intéressés à la création d'un plug-in sur QGIS, qui permettrait de télécharger l'ensemble des images SAR, sans forcément connaitre tous les scripts qui interviennent dans le téléchargement. N'importe quelle personne même étrangère au traitement InSAR, devrait pouvoir lancer un téléchargement.

Pour la création de cette interface graphique, nous utilisons Qtdesinger pour QGIS ainsi que « plug-in builder » qui permet la création d'extensions. Notre extension a été

appelée « SAR DATA DOWNLOADER », et se compose de deux onglets, le premier qui procède à la recherche des images, et le second au téléchargement.

II.1.1 La recherche des images

Comme expliqué précédemment, la consultation de la plateforme de l'ESA pour l'obtention du numéro de l'orbite relative est indispensable, et l'automatisation de cette tâche n'est pas possible. L'extension créée (Figure 7), nécessite donc une première consultation sur la plateforme Copernicus hub.

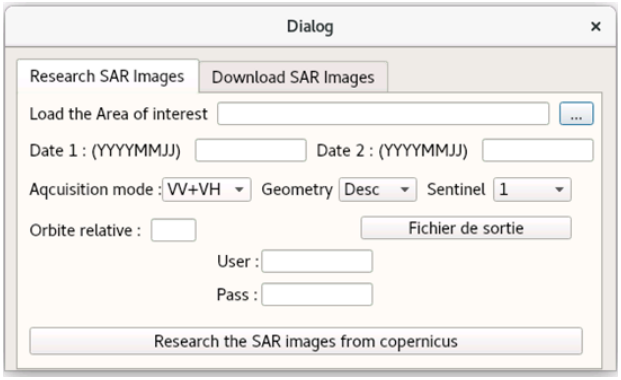


Figure 7 Onglet n°1 du plug-in « SAR DATA Downloader »

Ce premier onglet de l'extension (Figure 7), permet à l'utilisateur de charger une zone d'étude (Area Of Interest), qui est directement ajoutée au projet QGIS. Il suffit, ensuite, de rentrer les différents paramètres demandés, à savoir l'intervalle des dates souhaitées, le mode d'acquisition, la géométrie et l'orbite relative. Des identifiants sont nécessaires et peuvent être créés sur la plateforme mise en place par l'ESA. Une fois que la recherche est lancée, l'ensemble des images SAR retrouvées est chargé dans le projet QGIS (Figure 8), et enregistré dans le fichier de sortie spécifié.

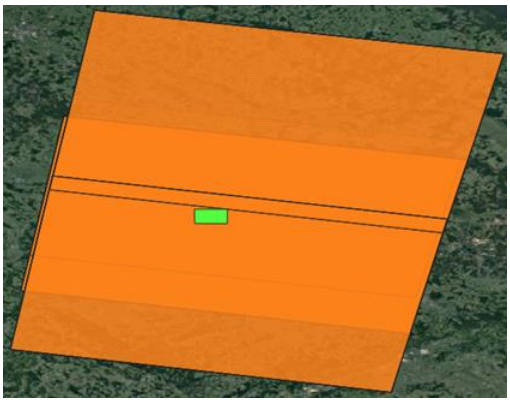


Figure 8 Emprise des images retrouvés par le plugin (en orange)

II.1.2 Validation et téléchargement des produits

Une fois que nos images ont été retrouvées, il est nécessaire de vérifier qu'elles pourraient être traitées pour la formation d'interférogrammes. Pour cela, notre onglet téléchargement, contient quelques commandes utiles qui ont été regroupées pour faciliter la validation des produits. (Figure 9)

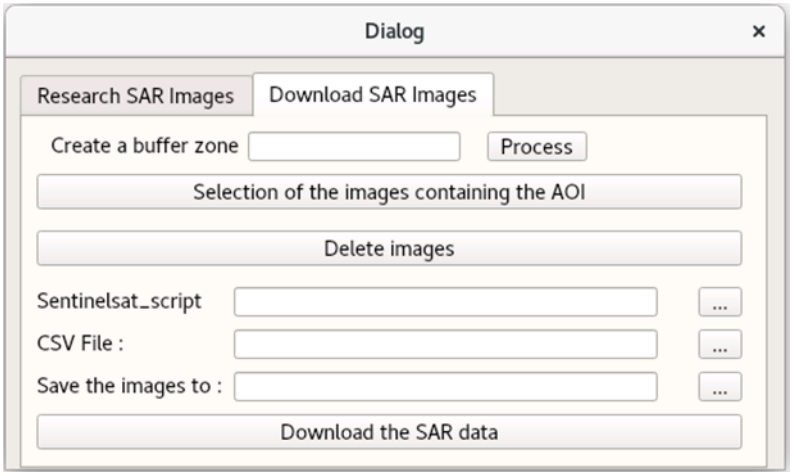


Figure 9 Onglet n°2 du plug-in « SAR DATA Downloader »

Ces images retrouvées, il faut vérifier qu'elles couvrent notre zone d'intérêt dans sa globalité. On commence par créer une zone tampon autour de notre zone d'étude, l'utilisateur est donc libre de choisir la valeur qu'il souhaite (nous recommandons d'utiliser 0.2°), comme le montre la figure 10.

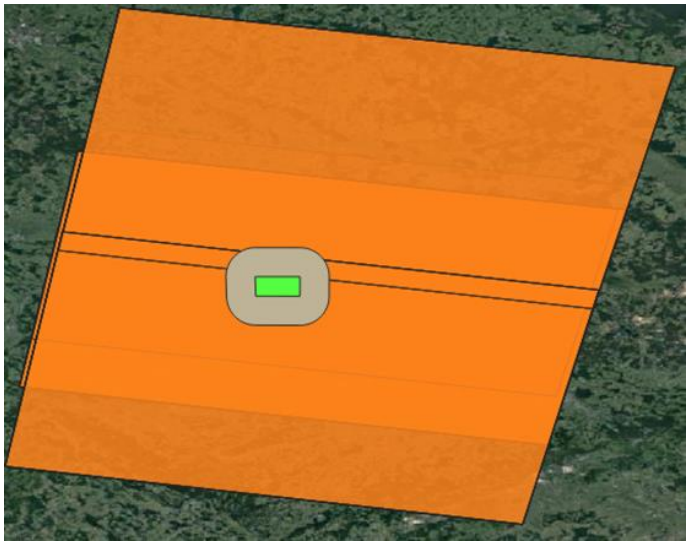


Figure 10 Création d'une zone tampon de 0.2°

Les boutons, « Selection of the images containing the AOI », et « Delete images », permettent respectivement de désélectionner et de supprimer les images qui ne couvrent pas l'ensemble de notre zone d'intérêt.

Les images restantes seront utilisées pour le téléchargement. Pour cela, il faut exporter depuis QGIS un fichier CSV contenant l'ID de chacune de ces images. Le chemin du script « Sentinelsat_script » doit être spécifié. En effet, il s'agit d'un script en CSH qui lance le téléchargement. Il a été décidé de demander à l'utilisateur de spécifier son emplacement, ce qui lui laisse la possibilité de le modifier en cas de besoin.

Pour finir, il suffit de choisir le chemin des images à télécharger, et lancer le téléchargement en utilisant le bouton « Download the SAR data ».

Cette extension a donc permis de regrouper l'ensemble des manipulations qui existaient avant, et dont l'utilisation nécessitait une bonne connaissance des commandes à lancer, et de la succession des étapes. Le téléchargement est désormais possible depuis QGIS, et son avancement est visible depuis la console Python intégré.

II.2 Le traitement des images SAR

Le traitement des images se fait en deux étapes, et utilise en premier le logiciel SNAP, pour l'exploitation des images brutes, auquel s'ajoute la toolbox « Stanford Method for Persistent Scatterers » StaMPS sur Matlab (Hooper et al, 2004) qui permet de réaliser un traitement PSI.

Un ensemble de scripts Pythons qui utilisent le GPT a été mis en place. Chose qui permet d'automatiser toutes les manipulations en créant des graphs XML, et en spécifiant les fichiers, ainsi que les paramètres de traitements nécessaires en entrée, sans passer par l'interface graphique du logiciel. Cet outil permet donc de passer des images brutes, jusqu'aux résultats au format approprié, pour un traitement PSI sur StaMPS.

L'ensemble de ces scripts est lancé à partir d'un programme en CSH, qui permet de réaliser l'ensemble des traitements (SNAP et StaMPS). Cependant, pour des besoins de programmations, et intégrations futures, ce script a été converti au langage Python durant ce travail, et plusieurs améliorations y ont été apportés.

II.2.1 Le traitement de plusieurs swaths

A l'origine, les scripts permettent la génération d'interférogrammes, en se basant sur un ensemble de graphes XML fournis, et ne traite qu'une partie de l'image native (IW1, IW2 ou IW3). Malgré qu'il soit très rare d'utiliser l'ensemble des swaths d'une même image (Figure 11), il est possible d'imaginer que des traitements futurs vont nécessiter l'ensemble de l'image. Raison pour laquelle, il a été décidé d'intégrer cela à la chaine de traitement.

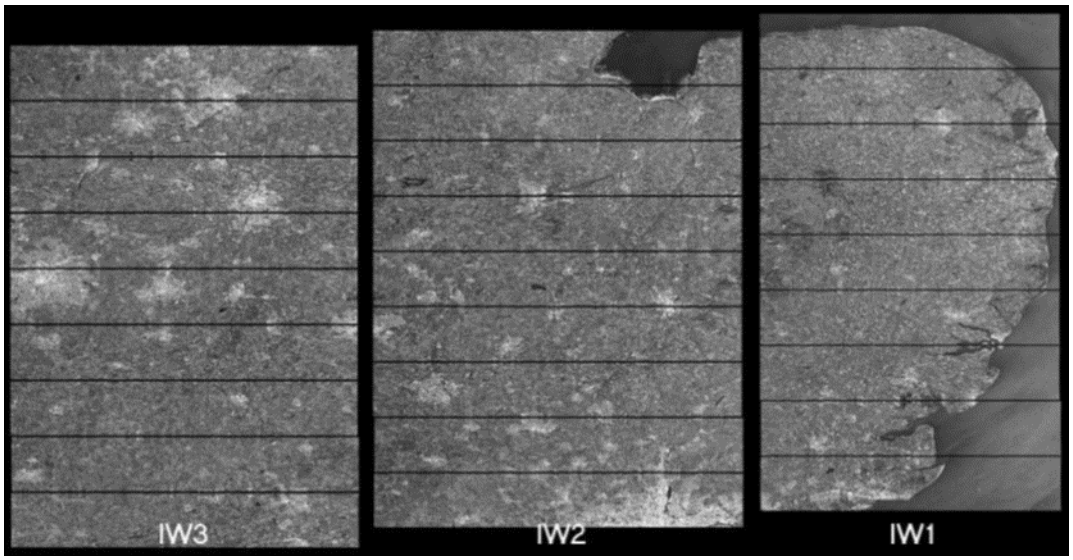


Figure 11 Composition de l'image radar en 3 Swaths

Il est évidemment possible de traiter tous les swaths séparément, en réitérant les calculs, mais cela n'est pas recommandé, car il est fort probable d'obtenir des décalages, dus à la phase de l'application des orbites, et du back-geocoding, qui pourraient engendrer des résultats différents.

Pour y remédier, il a fallu créer de nouveaux graphiques XML (Figure 12), et modifier les scripts Python, pour les exécuter directement en précisant les swaths qui sont à traiter.

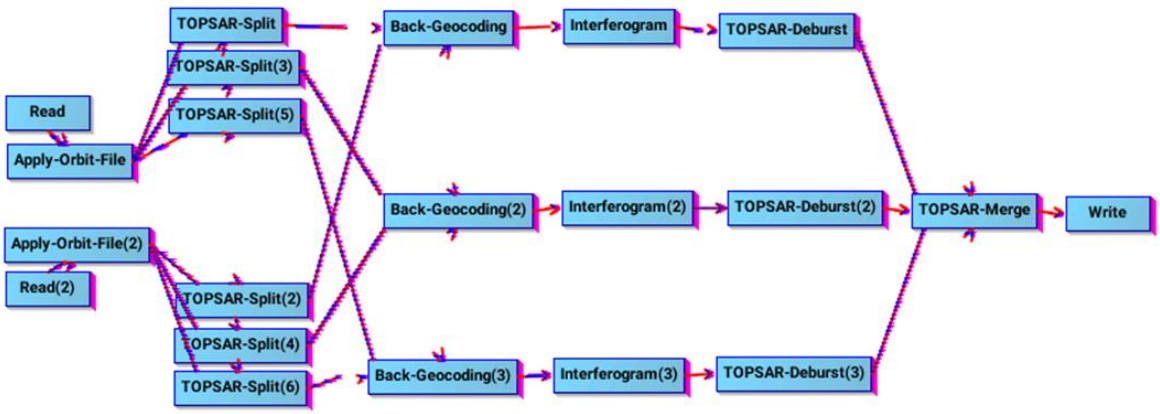


Figure 12 Graphique XML, mis en place pour le traitement multi-swaths

Le traitement de plusieurs swaths est ainsi possible, il suffit d'indiquer au script les swaths à traiter.

II.2.2 Le traitement en sous-séries temporelles

Comme expliqué dans la première partie, l'expérience a montré que l'étude en sous-séries temporelles, permet d'éviter des phénomènes de décorrélation entre les images, en effet lorsque des phénomènes d'origines humaines ou naturelles ont lieu (Séismes / injection de gaz, effondrement de cavités souterraines), il est intéressant de prendre en considération ces évènements pour pouvoir identifier des périodes de traitement qui pourraient mettre en évidence des déplacements pertinents. D'autres phénomènes dus à la météo peuvent contraindre le choix des dates de traitement. Par exemple, il existe des zones où un dépôt de neige a lieu tous les ans, et ce sur des périodes qui peuvent être identifiées et écartées.

Les sous-séries temporelles sont donc choisies en fonction des variations temporelles de la déformation identifiées ou supposées. Ainsi, les identifier de façon plus rigoureuse permet d'affiner le calcul.

Pour le traitement en sous-séries, le script Python qui lance l'ensemble des traitements a été modifié, et prend désormais en entrée une liste des dates à traiter ainsi que les master images correspondantes. Une comparaison des résultats issus d'un calcul sur l'ensemble des images, et en sous-séries temporelles a effectivement mis en évidence une amélioration considérable du nombre de PS.

II.2.3 Le traitement en sous-séries spatiales

Le traitement en sous-séries spatiales n'est pas complexe techniquement. Il consiste simplement en une réitération des traitements sur des mêmes images SAR, tout en faisant varier uniquement les coordonnées de la zone à traiter. Il s'agit donc d'une subdivision de notre zone en plusieurs fenêtres de traitement.

II.3 Un nouvel outil pour le traitement InSAR

L'ensemble des manipulations expliquées dans les parties précédentes est donc réalisable en utilisant le script Python qui a été mis en place. Les seules limites reposent principalement sur le fait que l'utilisateur doit modifier les paramètres de traitement pour chaque lancement de calcul, et ce, en parcourant un nombre important de lignes de commandes. Ainsi, pour rendre la configuration des traitements plus simple et accessible à tous les opérateurs, un nouveau plug-in « InSARProcessing » a été développé et permet de lancer plusieurs étapes successivement, et sans aucune intervention. « InSAR Processing » est donc structuré en 6 parties et permet de simplifier les traitements (chacun des onglets a donc un rôle spécifique).

Le premier onglet (Figure 13) prend en entrée des données qui ne changent pas entre les traitements et renvoie aux différents fichiers nécessaires aux calculs (graphiques XML, scripts Python, et enfin le chemin du GPT). Toutefois, un utilisateur expérimenté pourra s'en servir pour d'éventuels changements dans les scripts, en modifiant simplement le chemin du dossier « bin ». Les paramètres de mémoire cache, et de nombre de cœurs du processeur doivent être renseignés conformément aux caractéristiques de l'ordinateur utilisé.

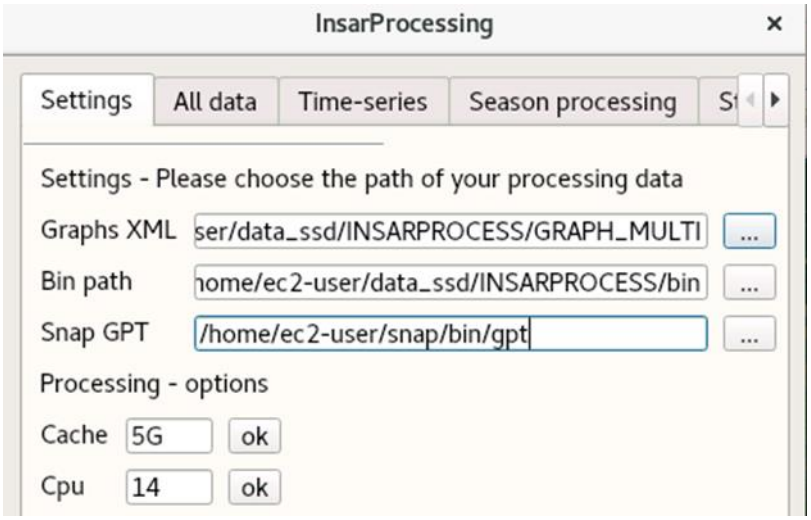


Figure 13 Onglet Settings de l'extension « InSARProcessing »

II.3.1.1 La configuration des traitements

Le plug-in « InSARProcessing » est donc une interface graphique interactive qui permet à son utilisateur de configurer un traitement InSAR, de façon simple. En effet, celle-ci offre à l'opérateur un ensemble de paramètres à définir, en fonction du traitement souhaité. Ce qui lui évite plusieurs manipulations manuelles (déplacement de fichiers, lancement de scripts et autres). Pour lancer un traitement, l'utilisateur choisit d'abord l'onglet correspondant au mode de calcul souhaité, et doit ensuite spécifier les paramètres demandés, qui dépendent de l'onglet choisi, et qui seront présentés dans les parties suivantes.

II.3.1.2 Le traitement de l'ensemble des images

Pour le traitement de l'ensemble des images SAR, il suffit de définir les paramètres de calculs habituels (voir Figure 14), à savoir l'emplacement du projet, des images, la date de l'image maitresse, le swath à traiter, les coordonnées en longitude et latitude (maximum et minimum), les paramètres StaMPS, etc.

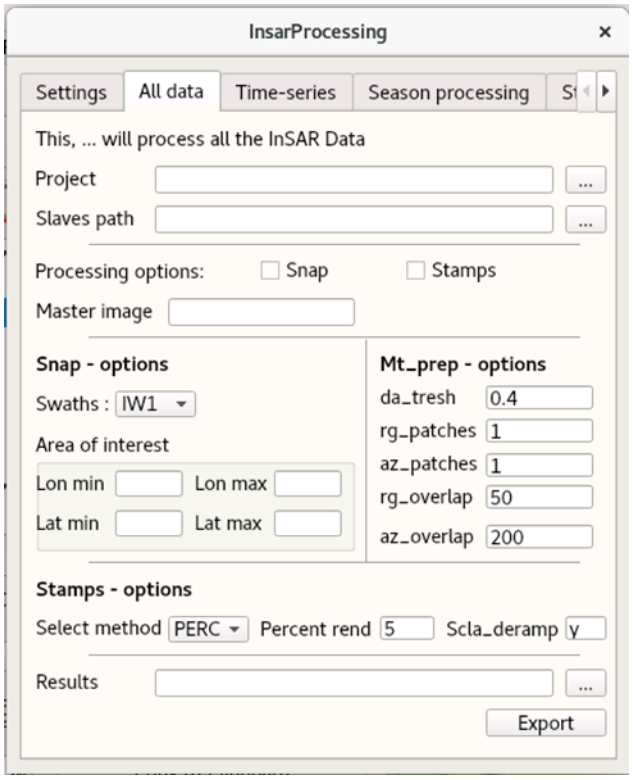


Figure 14 Onglet N°2 de l'extension « InSARProcessing »

II.3.1.3 Le traitement en sous-séries

Comme il a été expliqué dans la partie II.2.2, répartir le calcul en plusieurs sous-séries temporelles permet d'éviter des phénomènes de décorrélation, et selon la nature de la zone étudiée, peut avoir pour conséquence l'augmentation du nombre de PS lors des calculs. La figure 15 montre les différents paramètres nécessaires, auxquels s'ajoutent trois fichiers : le premier contient les sous-séries temporelles à traiter (format séparateur), le second comprend les images maitresses correspondantes, et le troisième comporte les paramètres pris en charge par StaMPS pour chaque série de traitement.

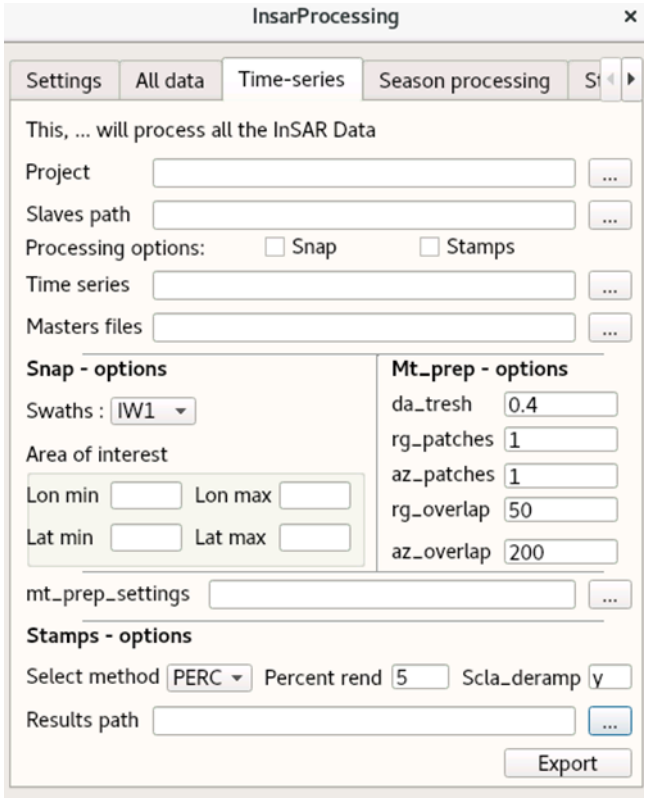


Figure 15 Onglet permettant le traitement en sous-périodes temporelles

II.3.1.4 Le traitement en saisons

Lors de quelques traitement InSAR sur des zones où des accumulations de neige ont lieu l'hiver, il a été utile d'éliminer quelques images en raison de cette couverture qui bruite fortement les résultats. Pour cela, il a été décidé de créer un onglet spécifique pour ce cas de figure, ce qui permet de lancer le calcul tout en prenant en compte uniquement des saisons dont les dates sont définies par l'opérateur.

Enfin, ces différents onglets présentés permettent d'exporter un fichier de configuration nommé « project.conf » contenant l'ensemble des paramètres de traitement. Il suffit d'exécuter le script développé lors de ce travail de fin d'étude « Traitement_INSAR.py », qui reconnait directement le fichier de configuration, et procède à l'ensembles des étapes de la chaine de traitement.

II.3.1.5 La réitération des calculs StaMPS

L'outil créé intègre aussi la possibilité de relancer des calculs (Figure 16). La densité de PS étant quelques fois insuffisante sur quelques zones d'étude, ou sur quelques séries temporelles, il est nécessaire de relancer des traitements STAMPS, tout en changeant les critères de sélection des réflecteurs permanents.

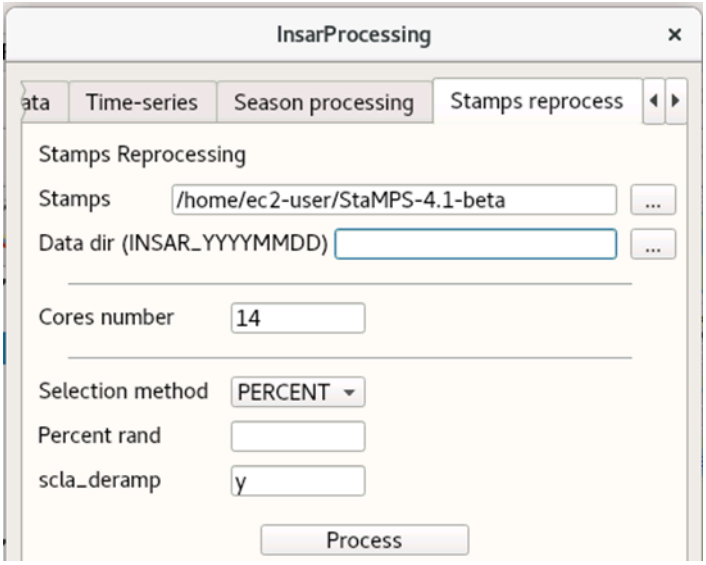


Figure 16 Onglet n°5 pour la reprise des calculs StaMPS

Pour relancer les calculs de StaMPS, il suffit de choisir le dossier qui est créé suite à l'exécution des traitements précédents, et de définir les nouveaux paramètres demandés dans l'onglet « StaMPS reprocess ». Les résultats sont ensuite stockés dans un sous-répertoire du fichier contenant les résultats.

II.3.1.6 La génération du fichier de résultats

Une fois que les différents traitements InSAR sont terminés, une multitude de fichiers de résultats est alors créée, et son utilisation nécessite une bonne connaissance des fichiers obtenus en sortie.

Dans un objectif d'affichage des résultats, une nouvelle structuration des fichiers de sortie a été nécessaire, et l'onglet « Generate result file » a été prévu à cet effet. Il suffit pour cela de choisir le chemin du dossier contenant les résultats, et un fichier composé de multiples colonnes (Coordonnés, écart-type, moyenne des vitesses, et déplacements par dates) est ainsi généré.

Cette nouvelle structure des fichiers de résultats (Annexe 1) permet leur compatibilité avec le plug-in « PS Time Series Viewer », qui rend possible l'affichage de l'évolution de chaque réflecteur permanant en un simple clic (Figure 17). Ce qui facilite l'interprétation de l'utilisateur et lui évite d'utiliser StaMPS pour la visualisation des résultats.

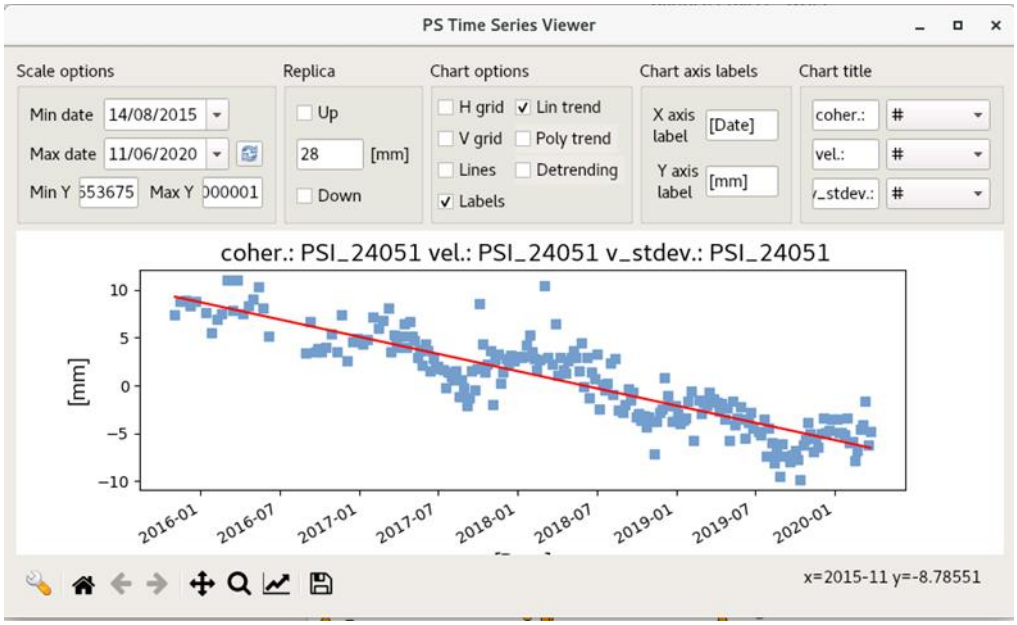


Figure 17 Exemple d'affichage de résultats

III Intégration des correction atmosphériques

La propagation du signal radar, depuis son émission jusqu'à sa réception traverse différentes couches de l'atmosphère terrestre, principalement la troposphère, ce qui a pour conséquence un ralentissement de l'onde électromagnétique, et implique un retard atmosphérique (délais). D'autres phénomènes peuvent aussi avoir lieu tels une accélération du signal dans le milieu ionosphérique (Bekaert et al, 2015a). Notre objectif étant la mesure du phénomène de subsidence, plusieurs moyens d'éliminer ces erreurs existent, et parmi ceux-ci se distingue le traitement PSI qui consiste en l'analyse du comportement d'un même PS, sur une série temporelle assez longue. Chose qui permet à la fois, (1) de détecter les mesures aberrantes, et de (2) minimiser ces artefacts statistiquement. Les effets les plus importants sont alors constatés lors du passage du signal électromagnétique par la troposphère (Zebker et al, 1997), il est donc important de comprendre la contribution de chacun de ces milieux dans la perturbation du signal

III.1 Les différents délais atmosphériques

III.1.1 Les délais troposphériques

La troposphère est le milieu le plus bas de l'atmosphère terrestre, et s'étend de la surface du globe jusqu'à 18 kilomètres d'altitude (Gérard Mégie, 1996) (en fonction de la latitude, et de la saison météorologique en question). Une des caractéristiques principales de ce milieu est le fait qu'il est non dispersif pour certaines catégories d'ondes, dont la fréquence est supérieure à 30 GHZ. Seuil au-dessous duquel se situe la majorité des ondes utilisées en géodésie, à savoir le GPS et les ondes radar. (Kahlouche et al, 2011)

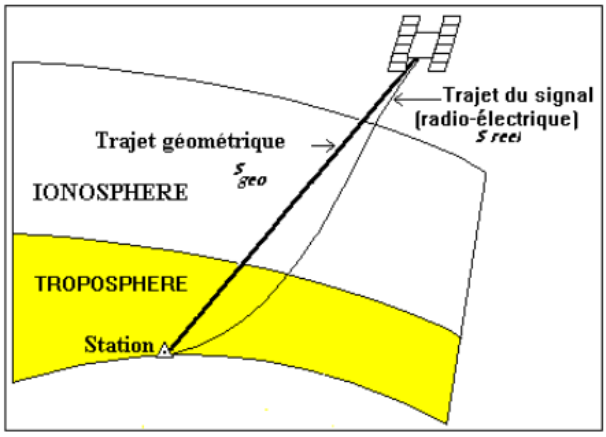


Figure 18 Schéma représentatif de la réfraction de l'onde RADAR (Naamaoui et al, 2011)

Les variations spatio-temporelles de cette partie de l'atmosphère en pression, température et vapeur d'eau, impactent donc les ondes radars lors de leurs trajets (Aller-Retour), et engendrent des délais de phases lors d'acquisitions SAR. Ces retards essentiellement dus à la vapeur d'eau, qui est une composante soumise à de fortes variations, et présente dans la partie basse de la troposphère (jusqu'à 3.5 kilomètres d'altitude) (Bekaert et al, 2015c), provoque en conséquence une hétérogénéité spatiale de l'indice de réfraction du milieu, pour l'ensemble des régions à forte ou faible topographie. Cependant, les effets de pression, et température sont généralement d'une faible magnitude, et leur répartition sur l'ensemble de l'intérferogramme, contribue à mitiger leurs impacts. Cependant, il existe des zones montagneuses, où la forte variation verticale de pression, due à la composition de l'atmosphère en plusieurs strates, provoque en plus de la vapeur d'eau, une addition de délais supplémentaires, ce qui rend l'impact de ses composantes plus important que la variation en humidité relative.

Etant donné que la période de revisite des satellites est de quelques jours, il est donc impossible de s'affranchir des variations de vapeur d'eau qui sont parfois de quelques heures et même moins, et à cela s'ajoute le fait que les délais troposphériques ne sont jamais constants au sein d'une même régions. Ces délais sont observés pour la première fois par (Massonnet et al. 1993), qui constate que le milieu troposphérique impacte fortement la propagation de l'onde, et pourrait produire des erreurs assez conséquentes. Des études se poursuivent aujourd'hui, notamment avec (Zebker et al, 1997) qui affirme qu'un changement de 20% en humidité relative, entre deux acquisitions, mènerait à une erreur de 10 à 14 cm dans la mesure de déformation, ou encore 15 à 20 cm d'après (Bekaert et al, 2015c). La réfraction troposphérique N se subdivise alors en deux composantes : (1) les délais hydrostatiques et (2) les délais humides, ils s'expriment de la façon suivante :

$$N\ hdyrostatique = \left(k1\frac{P}{T}\right)(1)\ et\ N\ humide = \left(K2\frac{e}{T} + K3\frac{e}{T2}\right)\ (1)$$

Avec

$$N = N\ hdyrostatique + N\ humide\ (2)$$

Les coefficients $k1$, $k2$ et $k3$ peuvent être retrouvés dans la littérature comme dans (Smith et al, 1953) et sont définis comme suivant : $k1$ = 77.6 K hPa−1, $k'2$= 23.3 K hPa−1, et $k3$ = 3.75 · 105 K2 hPa−1, et avec P la pression atmosphérique total, T la température, et e la pression partielle de vapeur d'eau.

Pour obtenir, la phase-troposphérique, il suffit donc d'intégrer la réfraction N, entre (1) le sol et (2) l'extrémité de la troposphère en fonction de la hauteur :

$$\emptyset tropo = \frac{-4\pi\ 10^{-6}}{\delta \cos(\theta)} \int_{h1}^{htop} (N\ hydrostatique + N\ humide)\ dh \quad (3)$$

III.1.2 Les délais ionosphériques

La couche ionosphérique commence à partir de 60 km d'altitude et se compose d'électrons libres soumis au rayonnement solaire, et dont le comportement est variable à la fois dans le temps et l'espace (Bekaert et al, 2015c). C'est donc un milieu dispersif en raison de la présence d'ions qui impactent la propagation des ondes électromagnétiques (RADAR ou GNSS). A l'inverse, ce milieu provoque une avance du signal et non un retard. Pour s'affranchir de son impact, il est possible d'opter pour des fréquences insensibles à ce milieu, comme la bande C des satellites Sentinel 1a et 1b, qui n'est pas soumise à l'impact de ce milieu. (Les écarts sont d'autant plus importants lorsque la fréquence utilisée est plus grande en l'occurrence la bande P et L (Bekaert et al, 2015c).

III.2 Les différentes techniques de corrections atmosphériques

Aujourd'hui, il existe une multitude de techniques de corrections atmosphériques. On en distingue deux types : (1) les corrections qui ne nécessitent pas l'apport de données externes, et (2) les corrections qui se basent sur des données externes. L'outil TRAIN, fruit des travaux de D. Bekaert, propose un ensemble de techniques de correction atmosphériques (troposphériques), à libre utilisation. Il est aussi à noter que lors de ce travail nous utilisons la bande C des satellites Sentinel 1a et 1b, ce qui permet de négliger les effets de l'ionosphère, et donc de s'intéresser uniquement aux délais troposphériques.

III.2.1 Les techniques basées sur la corrélation entre phase atmosphérique et topographie

Sans l'apport de données externes, aucune mesure de températures, pression ou vapeur d'eau n'est donc disponible. On est contraint d'exploiter uniquement les images SAR. Quelques approches autres que l'application de correction existent, et c'est le cas du PSI qui offre la possibilité d'éliminer ou de réduire ces délais, en les estimant statistiquement cependant, l'efficacité de cette méthode est largement discutée, car il peut s'avérer très complexe de séparer une déformation réelle d'un simple artéfact atmosphérique.

Plusieurs travaux de recherche ont donc été menés sur ce sujet et proposent d'étudier, soit (1) la corrélation entre les interférogrammes, ou alors (2) la variation de la composante hydrostatique (surtout la pression), qui provoque une corrélation phase-élévation dans les zones montagneuses. Des techniques rigoureuses d'estimation, ont donc été développées, et parmi celles-ci nous pouvons citer (Chaabane et al, 2007) qui, lors d'une étude de la corrélation entre 81 interférogrammes et la topographie, réussit à diminuer l'EMQ en passant d'une incertitude de 26 mm à 12 mm.

Pour pouvoir s'affranchir des donnés externes, l'outil TRAIN propose l'utilisation de deux techniques basées sur la corrélation entre la phase et la topographie et seront présentés dans les parties suivantes. Leur avantage principal réside dans leur simplicité d'application.

III.2.1.1 La correction linéaire

La correction linéaire est une technique de correction des délais hydrostatiques et humides, qui suppose l'existence d'une troposphère uniforme sur l'ensemble de la zone d'étude, et ne prend pas en considération les éventuelles turbulences qui pourraient exister. Elle est donnée par une relation qui lie la topographie et la phase, définie comme étant :

$$\Delta\emptyset tropo = K\Delta\emptyset h + \Delta\emptyset 0 \quad (4)$$

Avec, K une constante qui permet de corriger les intéférogrammes, $\Delta\emptyset 0$ une valeur constante (négligée car elle est ajoutée systématiquement à l'ensemble des interférogrammes).

L'utilisation de cette méthode, nécessite l'estimation rigoureuse du facteur K, et par conséquent, l'une des deux hypothèses suivantes est indispensable, (1) il existe une zone qui ne se déforme pas sur les interférogrammes utilisés et par conséquent la déformation obtenue correspond aux délais atmosphériques, ou alors (2) utiliser une bande insensible aux déformations, technique issue des travaux de (lin et al, 2010).

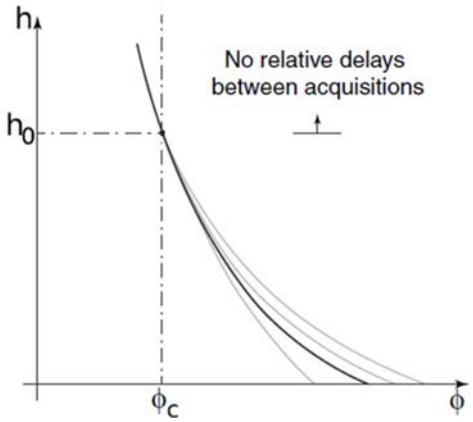


Figure 19 Moyenne des délais troposphériques (ligne noire) issues de ballons-sondes D. Bekaert

Sur cette figure 19, on remarque clairement qu'une fois en dessous d'une certaine hauteur h0, cette technique est beaucoup moins efficace pour l'estimation du délai ce qui engendre une imprécision sur la phase atmosphérique (Bekaert et al, 2015a).

Une des autres limites principales de cette méthode réside dans le fait, qu'elle ne prend pas en considération une variation spatiale des propriétés de la troposphère, D. Bekaert, précise qu'elle ne sera pas efficace lorsque notre zone chevauche différentes zones climatiques. De plus le ∆∅0 n'est plus une valeur constante lorsque notre zone d'étude est plus grande. C'est pour ces raisons que l'auteur propose une nouvelle relation pondérée.

III.2.1.2 La « Power law »

Dans sa publication « A spatially variable powerlaw troposopheric correction technique for InSAR DATA », D. Bekaert introduit une nouvelle relation à TRAIN, qui permettrait de s'affranchir des limites de la technique précédente, et prendre en compte les variations spatiales de la troposphère.

L'un des moyens employés pour l'étude de cette nouvelle méthode de correction « *Power law* », repose sur l'utilisation de ballons-sondes mis à disposition par le département de la science atmosphérique de l'université de Wyoming spécifiquement pour cette étude, et qui fournissent des mesures journalières (tous les jours à midi). Ces ballons fournissent donc des informations sur la pression, températures, humidités relatives et direction du vent : ce qui a permis l'intégration de ces données pour calculer la réfraction, et des délais troposphériques sont obtenus avec l'équation (3), et exprimés en fonction de l'élévation suivant la ligne de visée RADAR. Résultats dans la figure 20 :

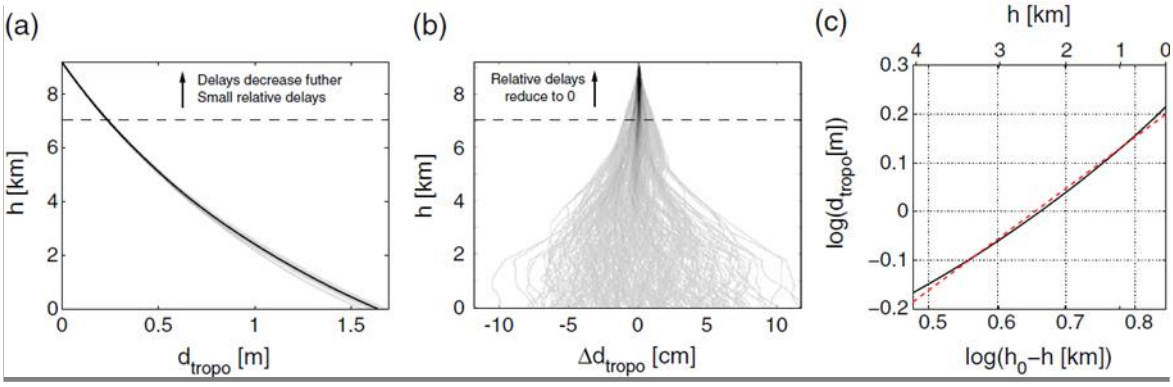


Figure 20 Résultats suite à l'intégration des donnés issus des ballons sondeurs (Bekaert et al, 2015a)

Suite à l'intégration des données issues des ballons-sondes, la figure 20 (b) montre que ce n'est qu'en dessous d'une certaine hauteur h0 que les délais troposphériques deviennent importants, et qu'au-delà de cette hauteur, ils tendent vers 0.5 mm. Elle identifie également l'existence de 278 possibilités pour l'estimation des délais, et ceci malgré que sur la figure (a) on constate une tendance plutôt linéaire. C'est donc en traçant sur une échelle logarithmique les délais en fonction de la hauteur, que l'on aperçoit une tendance exponentielle, et une nouvelle relation est donc établie :

$$\Delta\emptyset tropo \ = K\Delta\emptyset' \ (h - h0)^{\alpha} \ (5)$$

Avec h0 et α, deux coefficients constants déduits de la figure (b) et (c), et pouvant être obtenus par l'intégration des données issues des ballons-sondes.

Contrairement à la technique de correction linéaire, qui ne prend pas en compte une variation spatiale de la troposphère. La « *power law* » permet d'estimer $K\Delta\emptyset'$ localement en utilisant une fréquence spatiale non sensibles aux autres perturbations. En effet, les études de (lin et al, 2010) ont été exploitées et permettent d'estimer le facteur K∆∅ à partir de la bande spatiale la moins sensible aux autres biais (Orbites incorrectes, erreurs de déroulement de phase …). Deux procédés différents de corrections sont donc mis en place :

(1) Le premier se base sur une division de notre zone d'études en plusieurs fenêtres qui se recouvrent de 50%. Une estimation locale du coefficient phase-topographie, est donc faite. Ensuite, une interpolation de ce facteur sur l'ensemble de l'interfrogramme en fonction de la distance et de l'incertitude de l'estimation en chaque fenêtre est faite.

(2) Le deuxième procédé concerne les zones montagneuses, où l'on remarque l'existence de variations assez importantes dues à la présence de barrières

topographiques (Marchowski et al, 2010), et qui impliquent que le flux des particules d'air entre les montagnes est fortement impacté, ce qui crée des blocages à partir d'une certaine de hauteur de stagnation exprimée de la façon suivante :

$$H(stagnation) = \frac{Vm}{fbv}$$

Avec : Vm étant la vitesse horizontale du vent et fbv la fréquence de brunt_Vaisala fixé à 0.01 HZ (Marchowski et al, 2010). L'application de ce procédé est similaire au premier. Cependant, pour éviter d'interpolation du facteur $K\Delta\emptyset'$ suivant des zones déconnectées, un découpage de notre zone par des limites topographiques (lignes de crête de montagnes) est fait.

III.2.2 Les techniques basées sur l'apport de donnés externes

Outre les techniques basées sur la corrélation des interférogrammes, ou entre phase-topographie, d'autres moyens mis en place historiquement permettent d'apporter des corrections d'origines différentes. Nous pouvons citer les spectromètres embarqués sur satellite, ou encore les données issues des modèles météo. En effet plusieurs études se sont intéressées aux GAM's « Global Atmospheric Models », pour réaliser une prédiction des délais troposphériques à la date de l'acquisition, tout en prenant en compte la composition de l'atmosphère en strates verticales (Doin et al, 2009). Ces modèles atmosphériques fournissent des informations sur la température, pression et vapeur d'eau à des intervalles de temps réguliers, et proposent une couverture mondiale. Une présentation de ces techniques est faite dans les parties suivantes.

III.2.2.1 Les spectromètres embarqués : MERIS

En Mars 2002, l'ESA déploie le spectromètre MERIS « Medium Résolution Imaging Spectrometer ». C'est un capteur passif embarqué sur le satellite ASAR « Advanced synthetic aperture radar » ENVISAT, et qui réalise des acquisitions en parallèle lors des mesures radars. Des radiations solaires reflétées depuis la surface terrestre (ou les nuages), sont donc mesurées avec une période de retour de 2-3 jours. Et deux bandes spectrales sont exploitées pour estimer le contenu en vapeur d'eau.

L'une des limites principales de ce capteur est sa capacité à mesurer uniquement pendant le jour et à condition que le ciel soit dégagé car, en effet, le spectromètre est sensible à la présence de nuages. Lors de son étude, (Zhenhong Li et al, 2004), déclare que la précision de cet instrument dans les conditions optimales (ciel dégagé), atteint 1.7 mm lors de mesures sur la surface terrestre, et d'autres études comme ceux de (Li et al, 2003) montrent après une comparaison avec le GPS un écart d'estimation des composantes atmosphérique qui atteint 1.1 millimètre. Un second avantage de ce spectromètre est lié à sa résolution d'environ 300 mètres, et donc permettrait d'estimer les délais atmosphériques de façon précise et résolue à la fois temporellement et spatialement.

III.2.2.2 Les spectromètres embarqués : MODIS

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) est aussi un capteur passif, qui est très sensible aux hautes fréquences, avec 36 bandes spectrales dont la longueur d'onde se situe entre 0.4 µm et 14.4 µm. Il a la particularité d'être composé de 5 bandes proche-infrarouge très pratiques pour détecter la présence de vapeur d'eau, et produit alors des informations sur la « Precipitable Water Vapor » d'où la désignation MODIS-PWV ou MERIS-PWV. La résolution des données obtenues est d'environ 1km par 1km au nadir avec 2030 par 1354 pixels.

III.2.2.3 ERA-Interim

C'est en 2006 que l'initiation du projet de la réalisation de ERA-Intérim est lancé par « The European Centre for medium-Range Weather Forecast » ECMWF. Elle consiste en une nouvelle réanalyse de l'atmosphère (entre le premier Juin 1979 et le 31 Aout 2019) dans le but de remplacer l'ancien modèle ERA-40 (1958-2001). On cherche donc à réaliser trois objectifs différents à partir de ce modèle : (1) Une représentation de cycle hydrologique terrestre, (2) une analyse de la qualité de la circulation stratosphérique et (3) une maitrise des biais et des changements qui affectent le système d'observation. Pour ceci, plusieurs modifications ont été faites pour améliorer la qualité du produit. Ce modèle a été mis en place en se basant sur le cycle 31r2 du « Integrated Forecast System » IFS de l'ECMWF, et sa configuration consiste en une division du modèle en 60 niveaux verticaux, et une grille créée avec un pas d'environ 79 kilomètres.

La réalisation de ce modèle s'est faite en divisant la période de l'étude en plusieurs cycles de 12 heures. Des observations météorologiques pour chaque cycle sont ainsi combinées (température, pression, humidité, direction du vent et ozone), suivies d'une

analyse plus rigoureuse de la température et de la pression proches de la surface terrestre. A noter que les résultats sont extrapolés vers les zones où aucune observation n'existe, et d'autres analyses et modélisations complexes ont été intégrées à ce modèle. Aujourd'hui, ce modèle a été remplacé par le ERA-5 qui inclut une réanalyse depuis 1950 jusqu'aujourd'hui.

III.2.2.4 MERRA2

Le modèle MERRA2 « Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 » est un modèle météo comme ERA-interim mis en place par la GMAO « Global Modeling and Assimilation Office », et qui fournit des données depuis le début les années 80. Ce modèle a été créé suite à l'évolution des techniques de mesures et prend désormais en compte des données hyperspectrales de rayonnement et des observations micro-ondes, issues de stations de mesures GPS-Radio, comme indiqué sur le site de GMAO.

III.2.2.5 GACOS

III.2.2.5.1 Principe de base

Comme expliqué précédemment, plusieurs recherches sont toujours en cours pour pouvoir améliorer les techniques d'estimation des délais atmosphériques : ce qui permettrait à l'utilisateur de l'InSAR de détecter des déplacements, qui étaient jusque-là masqués par ces perturbations. En effet, utiliser l'InSAR sans corrections atmosphériques est donc comparable à l'utilisation du GNSS sans doubles différences, et nécessite obligatoirement l'estimation des ZTD.

L'exploitation des donnés GNSS constitue donc une bonne alternative car, elle a l'avantage de fournir des données continues et sans interruption (en fonction des zones où l'on se situe), et peuvent être utilisées pour fournir une estimation du contenu de la concentration en vapeur d'eau, et par conséquent de détecter de faibles perturbations, sans dépendre des conditions météo. C'est donc dans ce sens qu'ont été menés les travaux réalisés par (Yu et al, 2018) qui ont permis de mettre en place un algorithme appelé « Iterative Tropospheric Decomposition » (ITD), et dont le rôle repose sur l'exploitation des mesures GNSS pour calculer des corrections atmosphériques, ainsi des EMQ subcentimétriques ont été atteintes. Etant donné que les mesures GNSS sont moins denses mais très précises, contrairement au modèle haute résolution ECMWF (HRES-ECMWF) qui est hautement résolu mais peu précis, il a été décidé de combiner ces deux solutions pour s'affranchir des

limites respectives de chacune de ces techniques. Pour cela l'algorithme ITD a donc été modifié pour pouvoir prendre en compte non seulement les mesures GNSS, mais aussi les données issues du modèle météo HRES-ECMW hautement résolue. Les objectifs de GACOS sont donc les suivants, (1) Fournir une couverture globale, (2) mettre en place un modèle compatible avec tout type de météo, (3) fournir des corrections en temps réel, et (4) mettre en place des indicateurs de performance des corrections.

Pour sa production, GACOS se base donc sur le modèle (HRES-ECMWF), avec une grille de 0.125° par 0.125°, 137 niveaux verticaux et 6 heures d'intervalles entre chaque périodes, couplé à des observations GNSS continues (toutes les 5 minutes) lorsque cela est possible. Une estimation du ZTD est donc calculée par l'algorithme ITD sur les résultats GNSS (considérés comme étant plus précis) et du modèle météo. Les délais s'expriment donc de la façon suivante :

$$Ztd(k) = S(hk) + T(xk) + \varepsilon k \quad (6)$$

Avec, k la localisation du ZTD interpolée, T la turbulence, xk les coordonnés de la station GPS, S facteur représentant la corrélation entre les strates et la hauteur (h), et enfin ε qui représente le résidu restant et qui inclut les turbulences, et strates non modélisées.

Pour l'estimation de la composante strates $S(hk)$, la formule exponentielle suivante est utilisée :

$$S_i = L_0 e^{-\beta h} => \begin{cases} S_m^G = L_0 e^{-\beta h_m} \\ S_n^E = L_0 e^{-\beta h_n} \end{cases}, P_i = \begin{bmatrix} P_G & 0 \\ 0 & P_E \end{bmatrix} \quad (7)$$

Avec : β un coefficient, L0 la composante stratifiée à la hauteur du niveau des mers, h la hauteur, G représente le GPS and E le modèle HRES-ECMWF.

La matrice Pi correspondant à la pondération des ZTD estimés à partir de chaque donnée, et se base sur trois principes, (1) le ZTD estimé par GPS est plus précise, (2) le GPS détecte les perturbations du ZTD mieux que le ECMWF en raison de sa fréquence de mesure et (3) les données issues du HRES-ECMWF sont beaucoup plus denses ce qui est considéré comme étant essentiel pour une interpolation de meilleure qualité.

Les turbulences $T(xk)$sont elle aussi calculées suite à une interpolation IDW des deux données, et s'écrivent de la façon suivante :

$$T_u = \sum_{i=1}^{k} W_{ui} T(X_i)\ , W_{ui} = {\rho_i d_{ui}^2}\Big/{\sum_{i=1}^{k} \rho_i d_{ui}^2} \quad (8)$$

Avec : u et i : les indices pour l'utilisateur et la référence, chaque turbulence a un poids associé (Wui) déterminé par sa distance horizontale à l'utilisateur (dui) et le poids (Pi) issu du GNSS et du ECMWF.

III.2.2.5.2 Analyses des résultats de correction de ce modèle

Pour pouvoir tester la performance de ce modèle, l'auteur propose dans un premier temps de faire une étude comparative des résultats issus du modèle HRES-ECMWF et du GNSS. Ce qui a permis de déterminer le poids qui serait approprié pour ces deux types de mesures. Cinq zones couvertes par un réseau GNSS ont été choisies pour étudier cette corrélation entre les deux techniques. L'auteur choisit 20 % des points de mesures HRES-ECMWF sur chaque zone d'étude et propose d'exclure un point de mesure pour lequel une estimation de ZTD est faite par interpolation à partir du reste des points. Cette étape est donc réitérée pour l'ensemble des points du modèle météo et des EMQ sont ainsi calculés. Pour les données GNSS, une même étude a été faite. Cependant, il est à noter que la répartition des stations GNSS n'est pas la même entre les 5 zones étudiés.

Des EMQ maximales de 9.8 millimètres ont été obtenus pour le GNSS, et pouvant diminuer jusqu'à 6.6 millimètres lorsque la répartition des stations est favorable. Une corrélation minimale de 97 % est retrouvée. Des résultats similaires sont obtenus pour le modèle météo (Annexe 2). L'analyse rigoureuse de ces résultats a donc permis de calculer un poids idéal pour chaque technique de mesure.

Enfin, l'auteur propose d'effectuer des corrections atmosphériques sur 8 zones d'études indépendantes (4 couvertes par un réseau permanent GNSS, et 4 sans réseau GNSS permanent). Trois corrections sont alors faites : (1) l'utilisation du GNSS uniquement, (2) l'utilisation du modèle HRES-ECMWF uniquement et (3) la combinaison de ces deux techniques. Une amélioration EMQ est donc observée lorsqu'une combinaison des deux techniques est utilisée (Annexe 3). Les résultats de cette étude ont donc permis de lancer le modèle GACOS qui permet de combiner GNSS et HRES-ECMWF lorsque cela est possible. Autrement, des corrections uniquement issues du modèle météo sont alors faites.

III.3 Etude comparative des différentes techniques de TRAIN

Lors de ce travail de fin d'étude, l'intégration des corrections atmosphériques est un objectif à atteindre, et l'utilisation de TRAIN nous a semblé un moyen très adapté puisque cette boîte à outils, regroupe déjà l'ensemble des techniques présentées dans les paragraphes précédents. De plus, une documentation proposée par D. Bekaert facilite son utilisation et la familiarisation avec MATLAB.

III.3.1 Les techniques de correction

Diverses techniques de correction existent et ont été expliquées dans les parties précédentes. Néanmoins leur intégration nécessite leur compréhension pour pouvoir identifier les forces et faiblesses de chacune d'entre elles. Le but est de corriger les effets des délais troposphériques (hydrostatiques et/ou humides). Un récapitulatif des différentes techniques proposées est dressé dans le tableau 1 ci-après :

Techniques	Délais hydrostatiques	Délais humides
Correction linéaire	OUI (Pas de turbulences)	
Power law	OUI (Pas de turbulences)	
MERIS	NON	OUI
MODIS	NON	OUI
WRF	OUI	OUI
ERA	OUI	OUI
MERRA /MERRA2	OUI	OUI
GACOS	OUI (Avec turbulences)	

Tableau 1 Techniques de correction disponibles sur TRAIN

Dans sa publication « Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques », David Bekaert propose une étude statistique des différentes variantes de corrections disponibles dans sa toolbox. Il suggère alors de les mettre en application sur 3 zones différentes (Mexico, El-Hierro et Italie, Figure 21). Chaque zone présente donc des caractéristiques différentes :

(1) Pour Mexico il existe une topographie avec des dénivellations très importantes (de 0 à 4800 mètres d'altitudes), et les multiples reliefs seraient des obstacles pour la circulation de l'air, Il en résulte des comportements différents de l'atmosphère entre les différentes parties de la zone étudiée.

(2) Le second cas est une région d'Italie où la topographie peut aller jusqu'à 2000 mètres d'altitude, et plusieurs évènements sismiques ont eu lieu pendant la période étudiée (2002 à 2009).

(3) Enfin, El-Hierro qui est une île d'une surface beaucoup moins conséquente (30 x 25 kilomètres), avec un relief pouvant atteindre 1500 mètres d'altitude. Ce qui a pour conséquence une forte variation d'altitude sur une faible étendue, et empêche aussi l'utilisation des spectromètres embarqués en raison de leur résolution spatiale incompatible avec la taille de l'île.

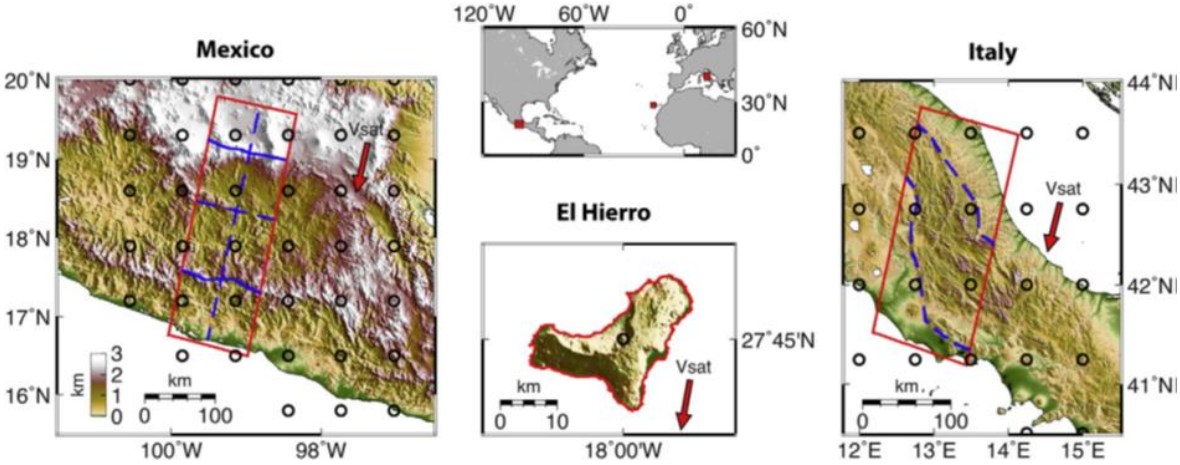


Figure 21 Zones étudiées pour la comparaison des techniques (Bekaert et al, 2015c)

III.3.2 Corrections et discussion des résultats

Avant d'appliquer les corrections, une calibration de MODIS est faite en utilisant MERIS comme référence, et les résultats obtenus par l'auteur sont cohérents avec les études déjà publiées (li et al, 2003). Aussi, les lignes de crêtes des montagnes sont définies, ce qui permet de restreindre l'interpolation par région pour la Power Law et évite de fausser les résultats.

Durant cette étude comparative, il a été démontré que sur l'ensemble des zones d'études, MERIS est le meilleur moyen de diminuer les RMSE, et cela s'explique par la précision de mesure de la PWV qui est de 1.1 millimètres. Il a aussi été montré que MODIS est aussi précis que MERIS, sauf pour Mexico, où l'on remarque que le EMQ sont deux fois plus grands, soit d'environ 2 centimètres. D'autre part, les délais obtenus par les modèles Météo présentent une magnitude similaire à celle issue des spectromètres, mais restent mal localisé ; ce qui nuit fortement à leur bonne estimation.

Enfin, les techniques basées sur la corrélation entre topographie, et phase atmosphérique sont efficaces, dans les zones avec un relief important (cas de Mexico et El-Hierro), et permettent d'estimer les délais de façon plus précise que les modèles météo, et que MODIS pour Mexico (Figure22). L'inconvénient de ces techniques réside dans leur impossibilité à détecter les turbulences ; ce qui explique leur inefficacité sur les régions sans reliefs, où les délais sont liés aux turbulences et à la météo locale (cas de l'Italie).

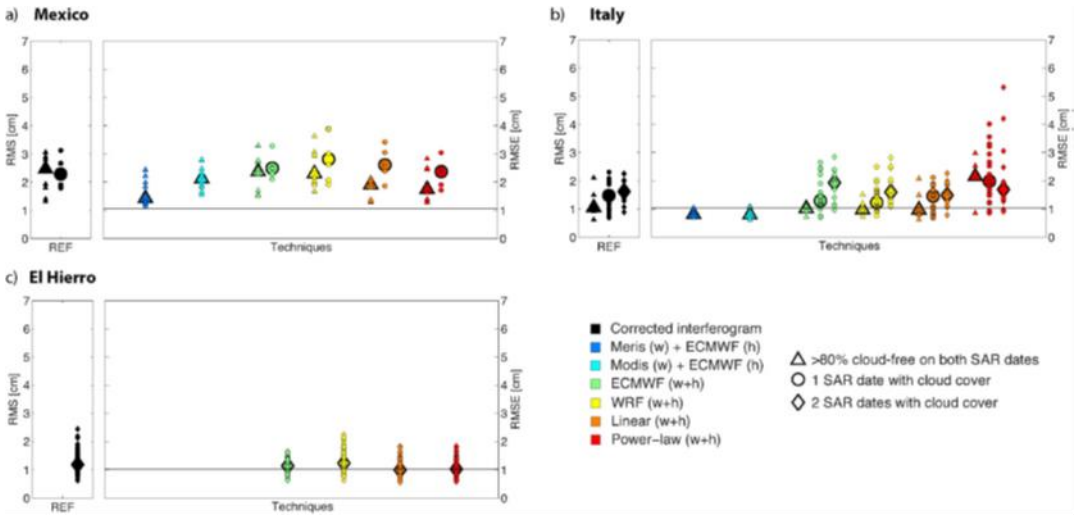


Figure 22 Comparaison des RMSE obtenus suites aux corrections (Bekaert et al, 2015c)

En conclusion, cette étude montre donc que les corrections atmosphériques nécessitent une bonne connaissance de la zone étudiée, mais aussi des différents moyens qui sont mis à disposition dans TRAIN. L'ensemble des tests réalisés a démontré que MERIS reste le moyen le plus efficace pour l'estimation des délais, mais son inconvénient est lié à son utilisation qui nécessite (1) un ciel sans nuages, et (2) des acquisitions en plein jour. En outre, les techniques qui ne se basent pas sur l'apport des données externes, sont meilleures que les modèles météo dans les zones à reliefs.

IV L'amélioration de la combinaison

Historiquement, et dans le cadre d'étude de subsidence ou de surrection, différents moyens de mesures ont été déployés sur le terrain, et nous retrouvons essentiellement le positionnement GNSS et le nivellement, deux techniques dont les avantages et limitations sont bien connus des utilisateurs.

Lors de la modélisation de déformation, le nivellement optique permet de déterminer des dénivelés et d'obtenir des déplacements verticaux avec des précisions millimétriques. Cependant, l'une de ces limites réside dans le choix des points qui sont supposés stables, et dont l'identification reste tout de même assez complexe dans les zones qui subissent de fortes déformations (généralement très peu connues au moment des mesures, ce qui peut provoquer un mauvais choix sur les points supposés stables).

Le positionnement GNSS appliqué à la mesure de déformation présente aussi une bonne alternative à la mesure de subsidence, puisqu'il permet de déterminer des déplacements non seulement verticaux, mais aussi horizontaux. La précision obtenue par cette technique est beaucoup plus complexe à estimer, car elle dépend de plusieurs paramètres et on peut distinguer deux moyens de mesures différents.

(1) Le cGNSS (GNSS continu) qui est très fiables et qui présente des précisions de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre en planimétrie et jusqu'à 1 millimètre en hauteur (avec un protocole de mesures très rigoureux au moyen de logiciels scientifiques).

(2) Le sGNSS (survey GNSS) avec des mesures épisodiques sur le terrain, dont les précisions dépendent de plusieurs paramètres, en raison des faibles sessions de mesures (temps d'observation, traitement, atmosphère et autres).

Il est donc évident que lorsqu'une combinaison de mesures est faite, la pondération de ses différentes techniques (InSAR, GNSS, nivellement et autres) est une chose importante, car le résultat final doit pouvoir prendre en compte la précision de chacune des données en entrée, raison pour laquelle la solution GEOMON de Fugro intègre la pondération des mesures. Une investigation a été faite dans ce sens pour pouvoir améliorer la solution de la combinaison des mesures géodésiques avec l'InSAR, et sera présentée dans les parties suivantes.

IV.1 Intégration d'une nouvelle technique d'interpolation radiale

Une étude récente publiée par (Bevilacqua et al, 2020), nommée « Radial Interpolation Method » propose de tester une nouvelle technique d'interpolation des données GNSS et de nivellement, tout en étudiant en détail une zone située à Campi Flegrei caldera (Figure 23a), assujettie à divers mouvements, et ayant pour origine une forte activité volcanique, qui provoque en conséquence une surrection assez importante (Figure 23b), mesurée depuis les années 80.

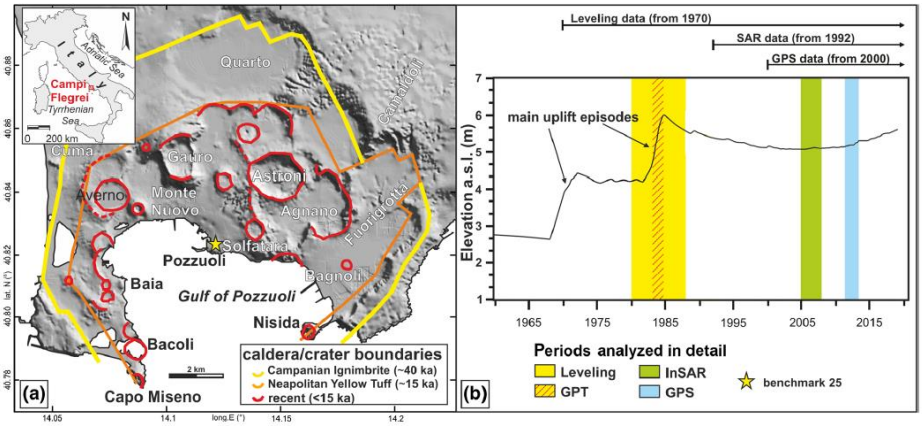


Figure 23 Cycles de mesures GNSS, entre 2011 et 2013 (Bevilacqua et al, 2020)

Depuis l'an 2000, le site de Campi Flegrei a été mesuré de façon continue à l'aide du GNSS : un total de 25 stations couvrant une surface de 130 km2 est employé, des déplacements horizontaux et verticaux sont donc obtenus. Une problématique commune aux différents cas d'études auxquels Fugro a été confrontés est posée. En effet la densité des points GNSS est toujours assez faible, comparée à l'InSAR. Densifier rigoureusement ces données de mesures pourrait donc aider à mieux modéliser et comprendre le mécanisme de déformation qui a lieu en profondeur. La figure 24 montre les différents *uplift* observés par GNSS.

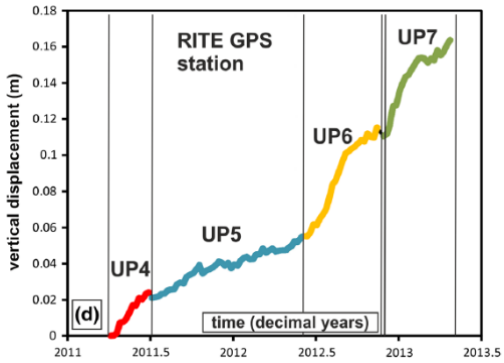


Figure 24 Surrection observée par GNSS (Bevilacqua et al, 2020)

IV.1.1 Principe de l'interpolation radiale

Le raisonnement mené par cette étude permettrait donc d'utiliser un nombre de points de mesures assez réduit, dont la disposition n'est pas forcément avantageuse, et en produire une grille dense et interpolée. La disposition des points n'est pas forcément importante. Néanmoins, il est impératif que nos points présentent tous un déplacement radial vers un même centre du bol de subsidence ou de surrection, chose qui permettrait d'exploiter leurs déplacements supposés radiaux (Figure 25) et ainsi créer des déplacements virtuels.

L'algorithme utilisé se décompose en trois étapes différentes, et repose sur une interpolation multipolaire de la donnée en entrée, pour cela une paire de vecteur est alors choisie, et on opère une interpolation linéaire entre nos deux vecteurs de déplacements (Figure 25).

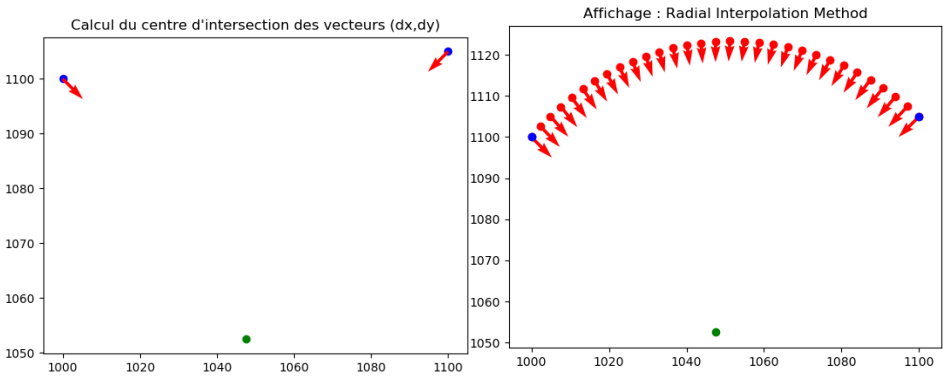


Figure 25 Le graphique à gauche montre deux points de mesures en bleu dont les déplacements sont projetés pour obtenir le centre représenté en vert, qui sera ensuite utilisé pour interpoler linéairement les déplacements entre les deux vecteurs (à droite)

IV.1.2 Les différentes étapes de l'interpolation

L'interpolation se fait donc en utilisant des coordonnées polaires, et en respectant l'intersection projetée des vecteurs de déplacements. Il est à noter, que les points interpolés sont définis par leurs positions planimétriques, à savoir leurs coordonnés cartésiennes (X, Y) ainsi que les déplacements horizontaux et verticaux qu'ils subissent. Le principe consiste donc à interpoler des vecteurs de déplacements exprimés avec des coordonnés X = (x,y), auxquels s'ajoutent des vecteurs de déplacements d = (dx, dy ,dz). On interpole donc des vecteurs 3D définis dans un domaine à deux dimensions : la technique est donc définie dans R2 x R3 (Bevilacqua et al, 2020).

On considère d'entrée des données vecteurs définies par : v (i) = (x(i), d(i)), avec {i = 1, …N}, Voici donc les différentes étapes de notre interpolation radiale :

- Etape 1 : On définit un ensemble de vecteurs dont les emplacements sont acceptables pour appliquer notre interpolation. Un graphique G = (X, E) est donc établi (Figure 26), et inclut tous les couples ayant des caractéristiques acceptables telles qu'une, une faible distance entre les couples, et une orientation de déplacement vers un même centre avec E(ij) = ((x(i), x(j)).

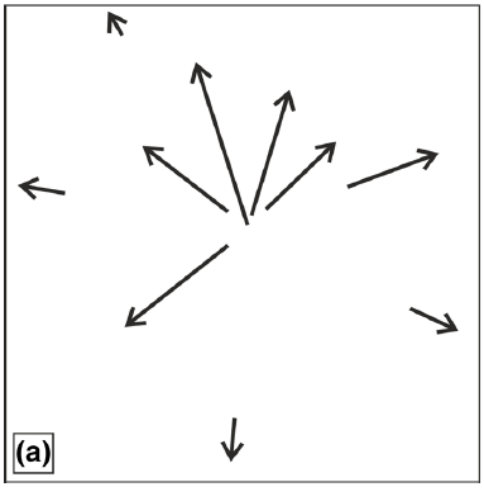


Figure 26 Déplacements observés sur Campi Flagrei (Bevilacqua et al, 2020)

- Etape 2 : Une première interpolation est donc faite, pour cela on définit un pôle P(ij) pour tout E(ij) ϵ E, avec P(ij) issu de l'intersection des vecteurs de déplacements (Point en vert sur la figure 25). Pour cette interpolation, on exprime les coordonnées de nos points x(i) et x(j) avec des coordonnées polaires, On pose :

$$x(i) = \big(r(i), a(i)\big) et\ x(j) = (r(ji, a(j)) \quad (9)$$

Pour simplifier notre relation, on fixe α (i) = 0 et on opère une interpolation linéaire

Avec α ϵ [-π, π] dans R^3 entre v(i) et v(j) pour tout λ ϵ [0,1] on pose alors :

$$v(ij)\lambda = [\ \lambda + (\ 1 - \ \lambda)\ r\ (i),\ \lambda\ \alpha(j),\ \lambda\ d(j) + (1 - \lambda)\ d(i)] \quad (10)$$

Cette formule permet donc d'interpoler conjointement la localisation et le vecteur de déplacement en tout λ, pour cela un pas angulaire est calculé à partir du nombre entier (N) de points qu'on souhaite créer virtuellement. Les vecteurs de déplacements interpolés sont placés suivant l'arc elliptique qui relie entre le point x(i) et x(j) avec v(ij)0 = v(i) et v(ij)1 = v(j). (Voir figure 27)

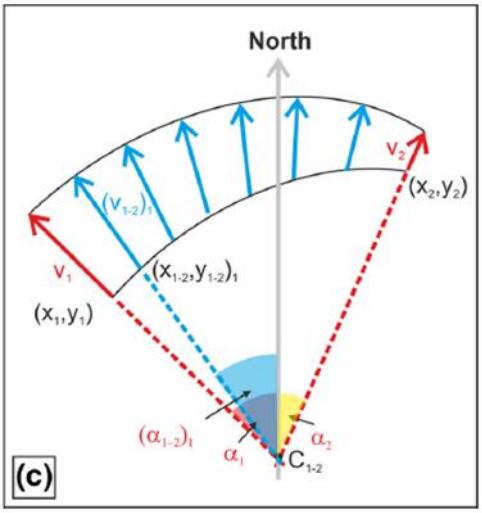


Figure 27 Principe de l'interpolation radiale (Bevilacqua et al, 2020)

- Etape 3 : Une fois que l'on a densifié notre réseau de points de mesures, on applique à nouveau une interpolation linéaire (non radiale) de l'ensemble de nos points sans extrapolation de valeurs. L'auteur précise avoir utilisé la fonction interp de l'interpréteur de langage R, et qu'après avoir testé différentes techniques pour cette interpolation de faibles écarts ont été observés.

IV.1.3 L'intégration de l'interpolation radiale

L'interpolation radiale est donc un outil assez intéressant, compte tenu de la configuration requise pour pouvoir l'utiliser. Elle ne requiert qu'un faible nombre de mesures, ce que l'on peut assimiler à de multiples cas d'études, où des stations de mesures GNSS sont installées en nombre réduit. Il a donc été décidé d'intégrer cette interpolation et d'en faire la pierre angulaire de ce travail. Un script codé en Python a donc été établi et permet de réaliser la première et la deuxième étape de cette nouvelle technique. La troisième étape ne peut pas être codé en Python, il est donc nécessaire d'utiliser des bibliothèques existantes. Dans cette optique, nous avons opté pour la bibliothèque SAGA disponible sous QGIS, qui nous permet de choisir entre plusieurs techniques d'interpolation secondaires (linéaire, IDW, TIN et autres).

Le script Python a été nommé « RIM.py ». Il prend en entrée un fichier texte contenant les coordonnées de chaque station de mesures, ainsi que les déplacements qu'elle

subit, d = (dx, dy et dz) à noter qu'il est aussi possible d'interpoler des champs de vitesse en remplaçant d par v = (Vx, Vy et Vz).

Le choix des couples entre lesquels l'interpolation radiale doit être réalisée reste assez complexe à paramétrer automatiquement, raison pour laquelle le script demande en entrée la liste des couples pour lesquels l'interpolation sera faite.

Un premier test de notre script a été fait à partir d'un premier jeu de données, 8 points de mesures sont alors simulés, avec respectivement des vecteurs de déplacements qui se dirigent vers un même centre de subsidence. Les résultats obtenus (Figure 28) montrent des figures de déplacements identiques à celles qui sont généralement obtenues lors de la mesure de subsidence, notamment avec le cas de Vauvert (longtemps étudié par Fugro).

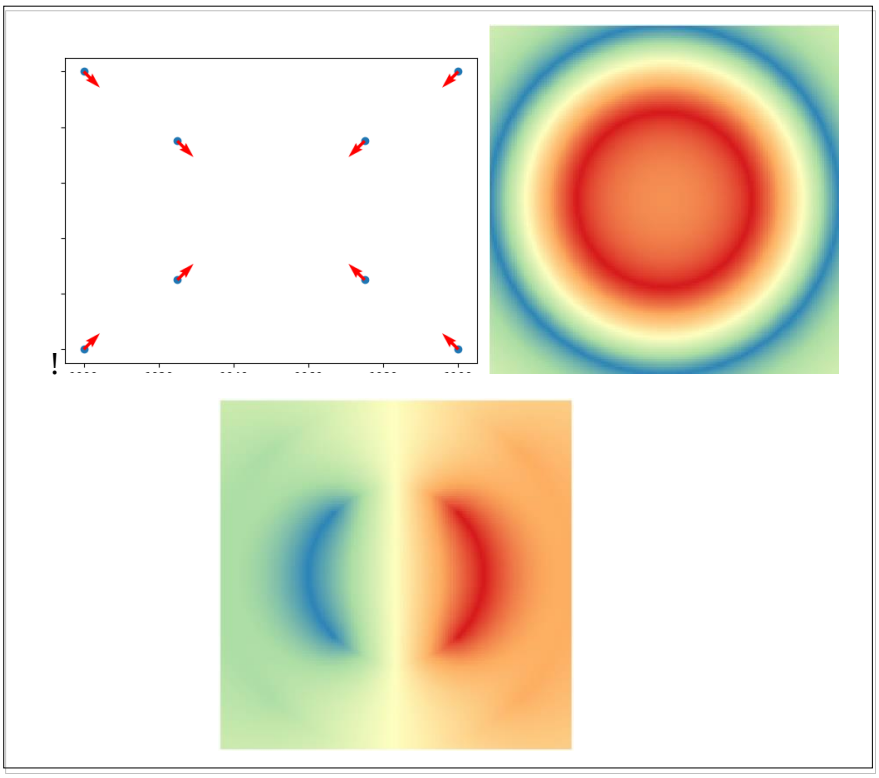


Figure 28 Résultats obtenus en utilisant 8 points simulés affiché dans la figure de gauche, la figure centrale montre les déplacements verticaux, et celle de droite les déplacements Est/Ouest

IV.1.4 Simulation et analyses des résultats obtenus

Les auteurs de « Radial Interpolation Method » proposent d'analyser les résultats obtenus par ce nouveau procédé. Pour ce faire, un modèle de Mogi (modèle de déformation simple) a été créé (Figure 29), et des points de mesures sont alors choisis aléatoirement sur le modèle. Comme le montre la Figure ci-dessous, l'interpolation linéaire des données a permis d'estimer les déplacements verticaux, à partir de 3 cas de figures qui diffèrent en

fonction du nombre de points utilisés pour l'interpolation (20, 15, et 10), et les résultats présentent quelques différences (Figure 29).

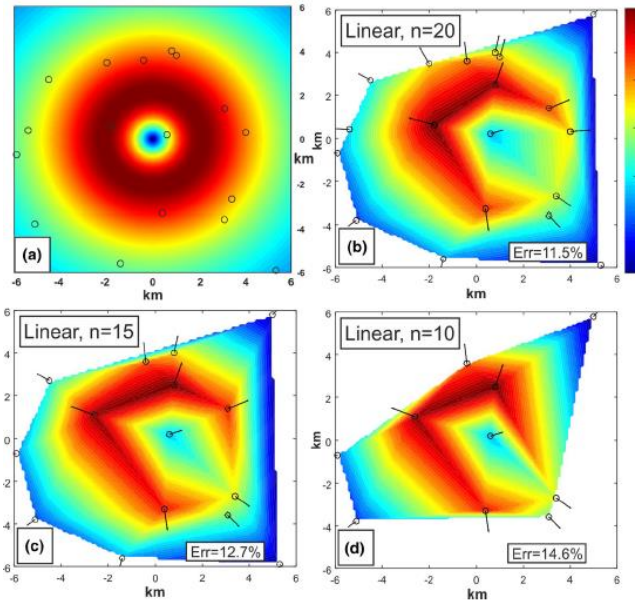


Figure 29 Simulation d'un modèle Mogi, et reconstitution, à partir de points aléatoires (Bevilacqua et al, 2020)

Dans le but de pouvoir nous-même analyser les résultats de cette nouvelle technique, il a été décidé de porter une attention particulière aux résultats. Nous avons pour cela mis en place une procédure de test de cet algorithme, qui consiste en la création d'un modèle de subsidence de synthèse connu (surface mathématique symétrique), pour ensuite choisir aléatoirement des points de mesures répartis sur l'ensemble de notre zone, qui serviront à l'interpolation. Les résultats obtenus seront ensuite analysés et des écarts seront produits pour pouvoir juger de la qualité des résultats issus de ce script.

Un modèle de subsidence peut donc être approché à partir d'une gaussienne. Nous posant alors l'équation suivante :

$$Z = f(x,y) = A\, e^{\left(-\left(\frac{x}{2\sigma x**2}\right)**2-\left(\frac{y}{2\sigma x**2}\right)\right.} \quad (11)$$

Notre courbe gaussienne s'étend sur 1000 mètres par 1000 mètres avec un pas de 5 mètres, et les coefficients de l'équation (11) ont été ajustés pour pouvoir obtenir une subsidence d'environ 10 centimètres au centre de notre gaussienne. Nous choisissons alors A = 0.1 et σx = σy = 10, notre gaussienne obtenue est affichée dans la (figure 30).

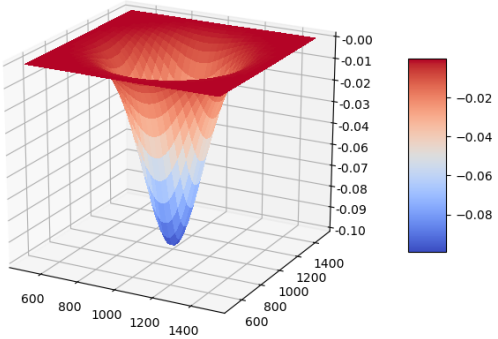


Figure 30 Gaussienne crée pour simuler un cas de subsidence

La composante verticale a donc été simulée. Cependant, il est beaucoup plus complexe de créer des composantes horizontales qui sont essentielles pour réaliser notre interpolation (car elles dépendent du déplacement vers un même centre). Notre modèle étant parfait, il est donc possible d'utiliser l'hypothèse que tous les points se déplacent vers le centre de notre bol de subsidence, et ainsi de décomposer les vecteurs de déplacements suivant les composantes Est/Ouest et Nord/Sud, ce qui a été réalisé en utilisant un script Python, et en définissant les valeurs maximales de déplacements au centre de notre bol et à la fin de la subsidence.

Les figures suivantes (31, 32 et 33) montrent notre bol de subsidence suivant les composant Est/Ouest, Nord/Sud, et verticales

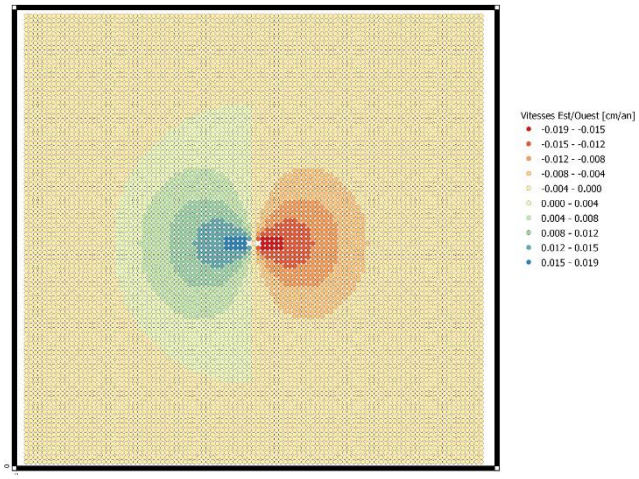


Figure 31 Simulation de la déformation suivant l'axe Est/ouest

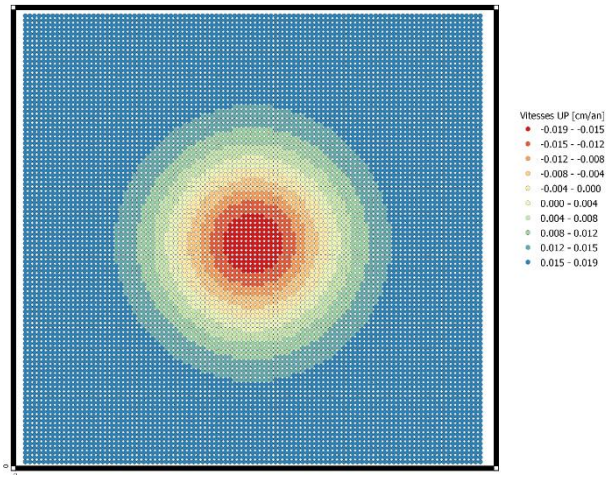


Figure 32 Simulation de la déformation suivant l'axe vertical

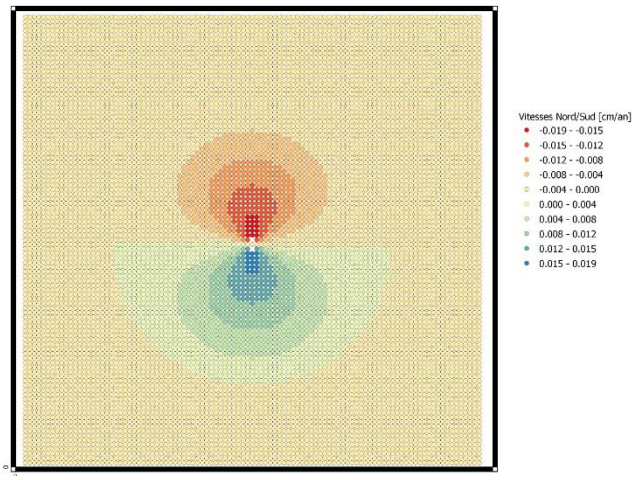


Figure 33 Simulation de la déformation suivant l'axe Nord/Sud

IV.1.5 Test de l'interpolation radiale et discussion sur des résultats

Une fois que notre modèle a été créé, nous avons choisi aléatoirement 11 points de mesures (figure 34), qui seront utilisés pour densifier les mesures sur l'ensemble de la zone.

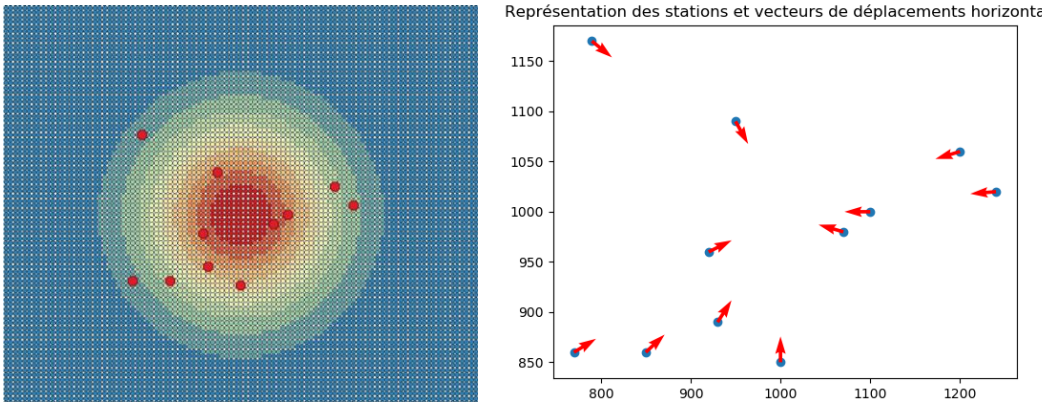


Figure 34 Emplacements des points choisis aléatoirement

Nos points sont alors structurés dans un fichier texte, et les couples de vecteurs utilisés pour l'interpolation sont donnés en entrée de notre script. Le script renvoie en sortie un fichier texte contenant les coordonnées cartésiennes ainsi que les déplacements en chaque point interpolé. Les données en entrée sont présentées sur la figure 34, et les résultats renvoyés par l'algorithme qui traite les deux premières étapes sont affichés dans la figure 35.

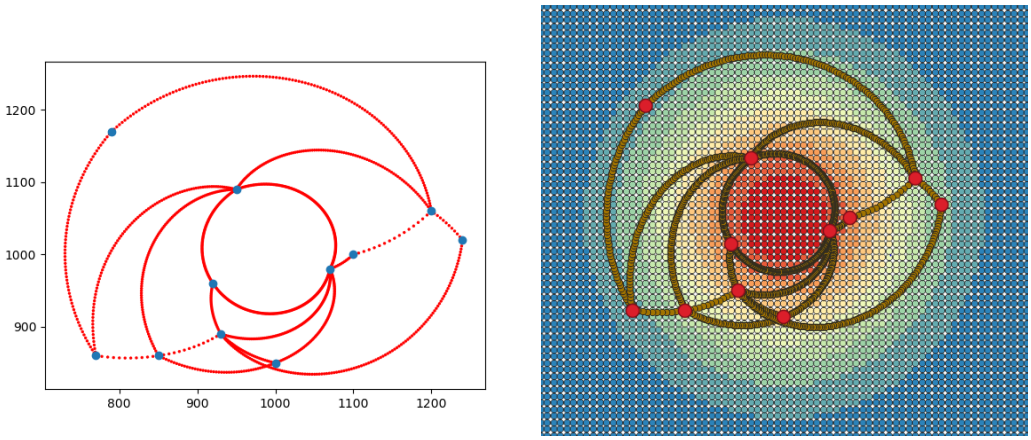


Figure 35 Résultats de l'interpolation multipolaire entre les couples de vecteurs.

Les résultats obtenus sont ensuite interpolés par TIN (Triangle Irregular Networks) sur QGIS, à l'aide de la bibliothèque SAGA et les écarts en valeur absolues sont alors calculés en chaque point, les figures suivantes (37, 38 et 39) montrent les résultats obtenus.

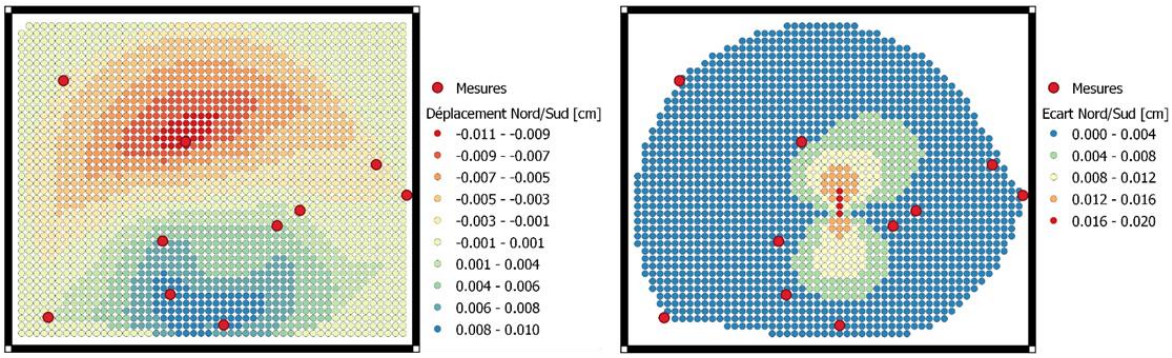


Figure 36 Résultats des déplacements Nord/Sud obtenus suite à l'interpolation sont affichés à gauche, et les écarts au modèle réel sont affichés à droite

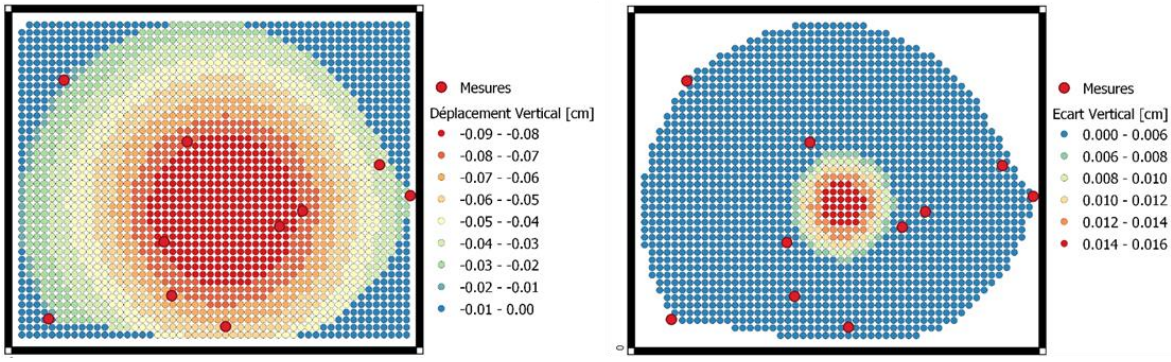


Figure 37 Résultats des déplacements verticaux obtenus suite à l'interpolation sont affichés à gauche, et les écarts au modèle réel sont affichés à droite

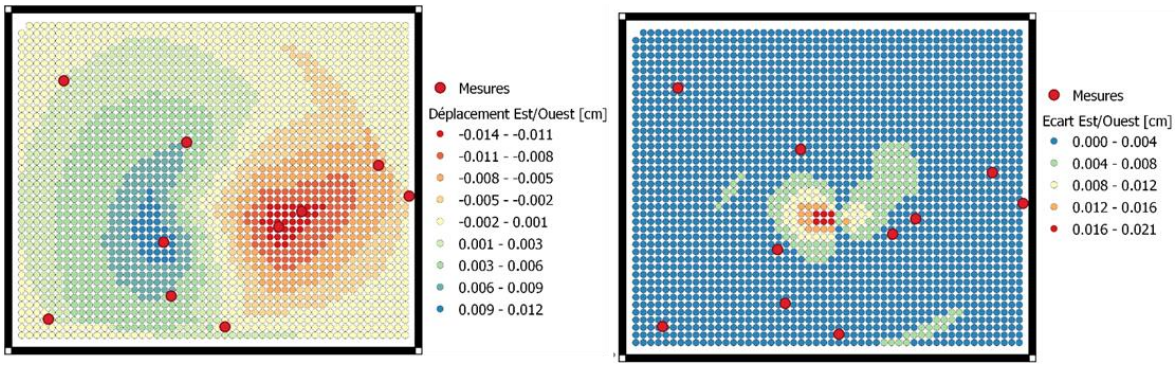


Figure 38 Résultats des déplacements Est/Ouest obtenus suite à l'interpolation sont affichés à gauche, et les écarts au modèle réel sont affichés à droite

Les figures précédentes, sont donc les résultats obtenus par cette nouvelle technique d'interpolation radiale. En effet, les différentes figures montrent le potentiel de ce nouveau procédé. Les écarts représentés dans les figures correspondent à la différence entre le modèle théorique (mathématiquement connu) et les résultats de l'interpolation. Visuellement, nos résultats ont permis d'identifier un centre de subsidence vers lequel l'ensemble de nos points se déplacent. Cependant, quelques erreurs de détermination sont observées au centre et sont d'autant plus importants lorsque l'on s'éloigne de nos points de mesures. Idéalement, placer

un point de mesure au centre de notre bol aurait permis d'éviter ce phénomène et d'affiner l'interpolation. Par-ailleurs, le choix de la gaussienne présente de fortes variations de la composante verticale au centre, ce qui explique les écarts obtenus.

Cette technique parait donc assez fiable pour pouvoir modéliser une déformation radiale. Cependant, le seul problème réside dans la quantification des écarts qui n'est pas possible dans un cas réel. Les résultats obtenus ont mis en évidence des écarts relativement assez faibles et localisés au centre de notre zone (où l'on ne dispose d'aucun point de mesures). L'un des principaux avantages de cette technique réside dans son efficacité à modéliser la déformation, avec un nombre de points très faible.

Nos résultats restent issus d'une simulation dont le seul intérêt est de tester notre algorithme qui, considération faite des résultats, peut être jugé comme étant fiable. Cependant, les valeurs de déplacement mesurées par nos points ne présentent aucun biais de mesure, et donnent la déformation exacte du modèle mesuré qui est mathématiquement connu. Ce cas de figure ne sera jamais rencontré dans la réalité, et la qualité de l'interpolation dépendra de deux paramètres importants :

(1) La précision des données GNSS mesurées

(2) La régularité de la déformation radiale

Notre nouvel outil d'interpolation radiale étant fonctionnel, son intégration à la solution Geomon peut être bénéfique car, comme expliqué dans la partie I.2.4, la combinaison de mesures passe nécessairement par la régression linéaire d'une technique sur une autre (jusqu'ici l'InSAR est la mesure de référence). Ainsi utiliser cette nouvelle technique en amont du krigeage-régression pourrait être une bonne alternative pour atténuer les effets de bords (artefacts) de la régression des différences krigés.

V Etude de cas

V.1 Présentation du cas d'étude

Dans le cadre de ce travail l'application de l'ensemble des améliorations faites sur la chaine de traitement est indispensable, et permettrait de tester et de valider les travaux qui ont été faits. Une étude de subsidence a été menée autour d'une mine de sel située près de Nancy. Cette zone couvre ainsi une superficie d'environ 7.2 km^2, avec une étendue de 2.1 km de large par 3.4 km de long. (Figure 39)

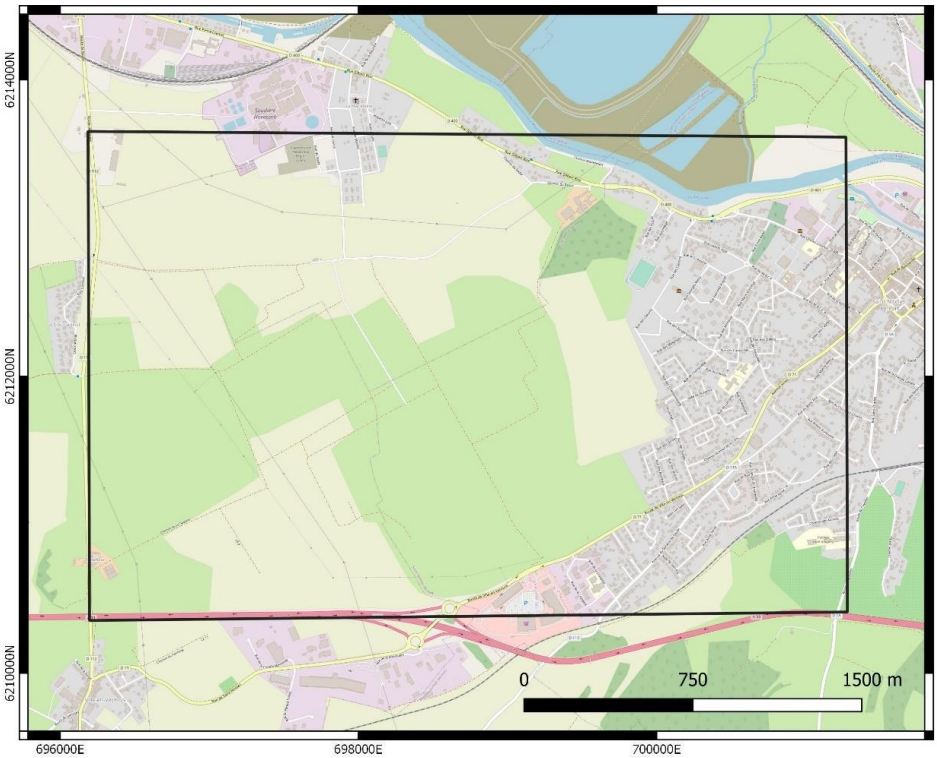


Figure 39 Situation de notre zone d'étude

Cette zone est étudiée depuis de nombreuses années, car elle comprend plusieurs concessions d'extraction salifère, qui provoquent une subsidence du sol en surface. D'autre part, des surrections du sol sont aussi mesurées périodiquement suite à des phases d'injections d'eau en profondeur. Nous avons utilisé des images sur deux géométries ascendantes et descendantes, la liste des produits utilisés est disponible en (Annexe 4 et 5), et en résumé voici les images retrouvées :

- 141 images sur la géométrie ascendante, du 28/03/2015 au 30/05/2020
- 227 images sur la géométrie descendante, du 03/11/2015 au 28/05/2020

V.2 Traitement des images

Dans un premier temps, un traitement de l'ensemble des images SAR en géométrie ascendante est fait. Pour cela, l'onglet « All DATA » du plug-in « InSAR processing », présenté dans la partie II.3.1.1, a été utilisé. La figure 40 montre les vitesses en millimètres par an suivant l'axe de visée de notre satellite RADAR.

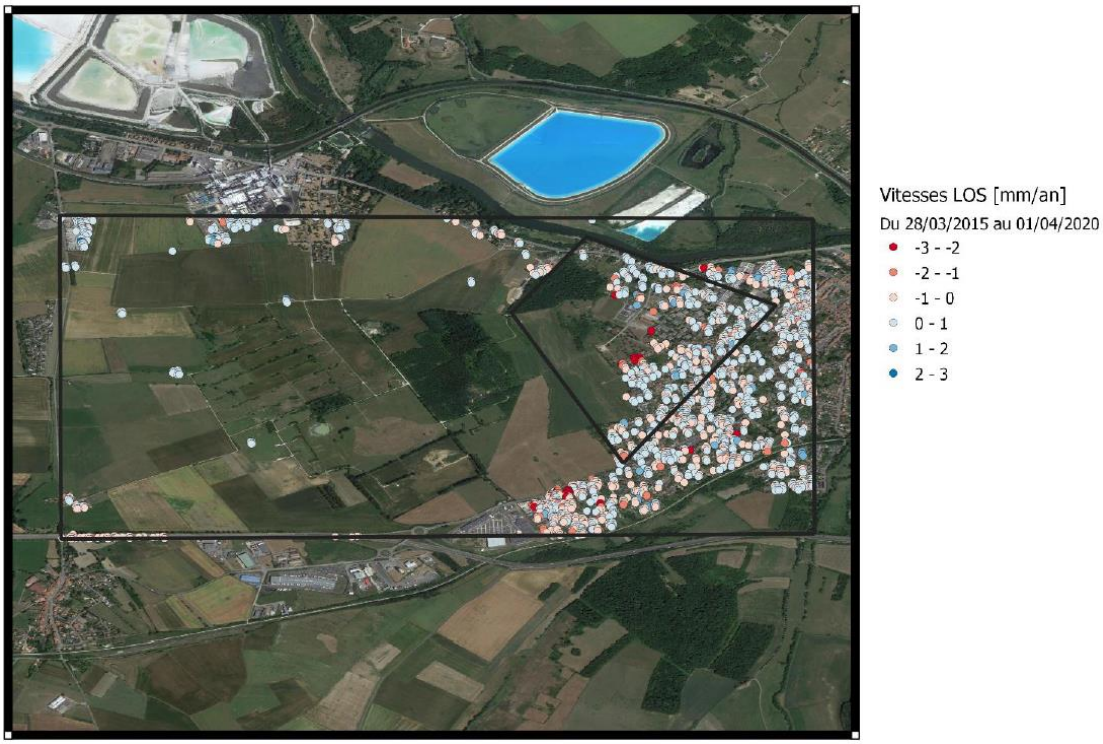


Figure 40 Résultats du traitement de l'ensemble des images en géométrie descendante

Cette figure fait apparaitre deux constatations importantes, tout d'abord :

(1) De prime abord, la densité des points mesurés est très faible. Seules les zones urbanisées sont mesurées. Les modifications naturelles et humaines (Travaux de terrassement ou de rénovation de route) provoquent l'incohérence des pixels correspondant dans le temps. La période employée pour le traitement étant très longue, il est difficile de maintenir une cohérence temporelle des pixels. Ainsi, dans la partie située à l'ouest de la zone d'intérêt, la présence de champs cultivés réduit fortement le nombre de réflecteurs permanant InSAR lors du calcul en bloc (paramétrage par défaut).

(2) Ensuite, les vitesses mesurées ne permettent pas une analyse de la déformation fine. En effet, la déformation du sol n'est pas régulière dans le temps (ni linéaire,

ni dans le même sens, ni cyclique) mais variable : sa moyenne sur cette longue période de temps n'est donc pas un indicateur pertinent des mouvements du sol. Cependant des mouvements de subsidence et surrection observés sur place sont avérés.

Le calcul sur l'ensemble des images ne permet donc pas d'apporter des éléments pertinents pour l'analyse précise des résultats. Seul un paramétrage optimal permettrait d'augmenter significativement la densité des réflecteurs, et sera présenté dans la partie suivante.

V.3 Le traitement en sous-périodes

Pour optimiser les paramètres de traitement, nous avons scindé la période totale en sous-périodes définies en fonction des informations disponibles, et recueillies auprès du commanditaire de cette étude. Il a été décidé d'opter pour la configuration présentée dans le tableau 2. L'ensemble des traitements a été lancé en utilisant l'onglet « Time Series » du plug-in « InSARprocessing », qui s'occupe de traiter l'ensemble des sous-périodes de traitement, de façon complètement automatisée, de la formation des interférogrammes jusqu'aux résultats issus du traitement sous StaMPS.

Sous-périodes temporelle	Géométrie disponible
Du 28/03/2015 au 31/10/2018	Ascendante et descendante
Du 28/03/2015 au 15/10/2015	Ascendante
Du 01/06/2015 au 31/11/2015	Ascendante
Du 01/07/2016 au 31/01/2017	Ascendante et descendante
Du 01/01/2018 au 31/12/2018	Ascendante et descendante
Du 01/01/2018 au 01/06/2020	Ascendante et descendante
Du 01/08/2018 au 01/06/2020	Ascendante et descendante

Tableau 2 Les différentes périodes choisies pour les traitements

La subdivision des traitements en sous-périodes a permis de densifier considérablement les réflecteurs permanents. La figure 41 ainsi que les annexes 6 et 7 mettent en évidence une mesure de subsidence au centre de la zone, pouvant atteindre 70 millimètres par an et de manière très localisée. En outre, Les zones urbanisées sont stables, sauf pour quelques points subsident jusqu'à 30 mm/an et situés à l'ouest des zones urbanisés (sur la fin du tissue urbain). Une analyse rigoureuse des résultats obtenus sur les autres sous-

périodes a donc été faite, montrant en conséquence une dynamique de déformation qui varie fortement entre les périodes étudiées. Des différences de résultats sont observées en comparaison avec le premier traitement sans paramétrage (sous-périodes temporelles), et qui était incapable de mettre en évidence de tels phénomènes.

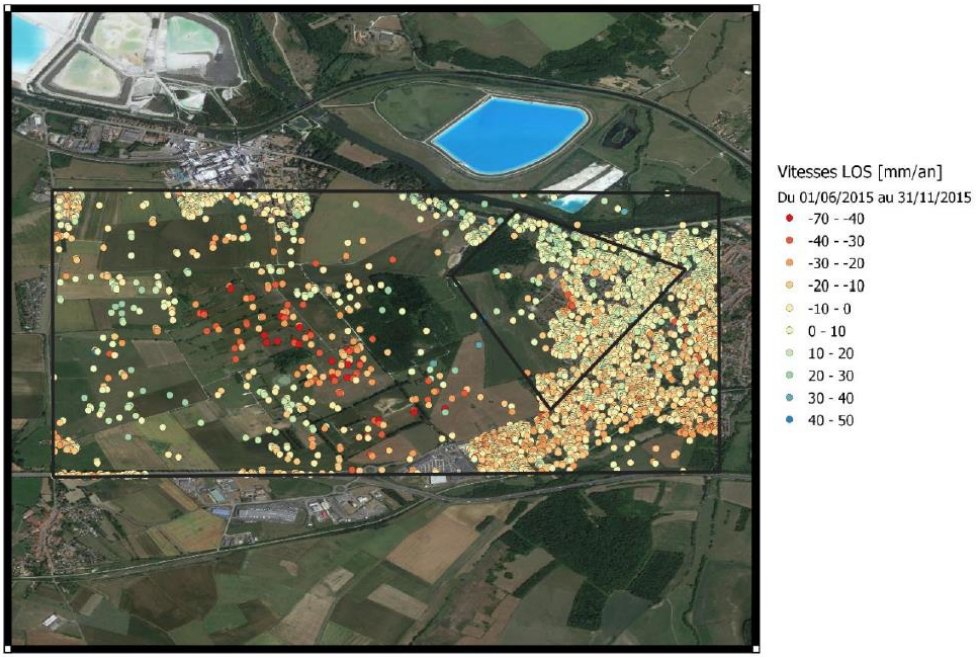


Figure 41 Résultat du traitement en période

L'outil « InSAR processing » permet donc de réaliser des traitements indépendants sur des périodes différentes au sein d'une même étendue spatiale, ce qui a pour conséquence l'augmentation du nombre de PS due aux courtes périodes entre les premières et dernières acquisitions, et nous évite de perdre la cohérence des réflecteurs permanents.

Un autre moyen de densifier nos mesures InSAR existe. En effet, l'onglet « StaMPS reprocess » permet de réitérer des étapes du traitement sur StaMPS tout en changeant les critères de choix des réflecteurs permanents (Cohérence, pourcentage…). Cependant, cette technique nécessite non seulement la bonne connaissance des différents paramètres de traitement sur StaMPS, mais aussi une rigueur quant aux choix des paramètres.

V.4 Application des corrections atmosphériques

Dans la partie III.3 une comparaison des différentes techniques de corrections atmosphériques TRAIN a été établie, et ce en se basant uniquement sur l'étude comparative de D. Bekaert. Il a été décidé d'intégrer l'ensemble des techniques proposées par TRAIN,

mais cela n'a pas été possible pour plusieurs raisons. D'un côté, il existe des techniques assez intéressantes comme MERIS et MODIS, qui ne peuvent pas être mises en œuvre en raison de l'orbite des satellites qui les embarquent et qui ne coïncide pas avec les images SAR que l'on utilise. D'autre part, lors de l'intégration de la toolbox TRAIN, de nombreuses dépendances ont été identifiées et nécessitent l'achat de bibliothèques MATLAB supplémentaires comme « image processing toolbox » et bien d'autres.

Les seules méthodes qui ont pu être appliquées sont alors le modèle GACOS qui est particulièrement intéressant comme décrit dans la partie III.2.2.5, et la deuxième technique qui a pu être testée est la correction linéaire qui repose sur une corrélation entre la topographie et l'atmosphère, mais qui est inefficace pour détecter les turbulences dans les zones à faible reliefs. Pour tester ces deux techniques, 33 interférogrammes issus du traitement de l'année 2018 entière en géométrie ascendante a donc être repris. La compatibilité entre StaMPS et TRAIN permet de retrouver assez facilement les fichiers nécessaires aux corrections.

(1) Pour l'application des corrections GACOS, une liste de données nécessaires est renvoyée par TRAIN. Il suffit de télécharger l'ensemble de ces fichiers sur le site mis en place par « Newcastle University » (http://ceg-research.ncl.ac.uk/v2/gacos/), et des cartes de ZTD au format grilles binaires sont fournies pour toutes les dates souhaitées (Annexe 8). L'estimation des ZTD étant déjà fournie dans les données téléchargées, il suffit de lancer la correction en utilisant la fonction « APS_Weather_model ». Les inteférogrammes corrigés sont alors disponibles en (Annexe 9).

(2) Pour utiliser la correction linéaire, nous avons choisi de définir une zone non déformante : ce qui permet de déterminer le coefficient K défini dans la partie III.2.1.1. Une analyse rigoureuse des vitesses obtenues par traitement PSI a été faite, et nous avons identifié une zone dans laquelle les vitesses de déplacements sont faibles (Figure 42). La fonction « APS_linear » a ensuite permis de procéder aux corrections (Annexe 10).

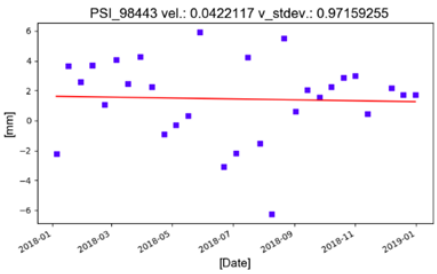


Figure 42 Affichage de la série temporelle d'un PS supposé stable

Pour estimer la qualité de nos corrections, une analyse des EMQ des interférogrammes avant et après correction a été faite sur la Figure 43 : à gauche sont présentés les EMQ de l'interférogrammes sans corrections, et sur la droite les EMQ obtenus après corrections. Il est important de préciser que notre zone ne comprend aucun relief, et donc aucune corrélation phase-topographie n'existe. Ce qui nous laisse imaginer que la correction linéaire ne sera pas efficace, et peut introduire des bruits supplémentaires, car elle ne détecte pas les turbulences qui, dans notre cas, sont les seules origines des délais qui ont lieu.

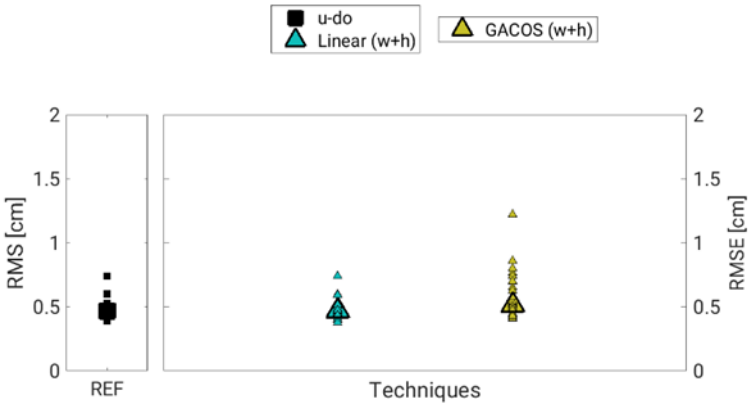


Figure 43 EMQ obtenus après l'application des corrections

Avant la correction, la moyenne des EMQ étant déjà faible (0.47 centimètres). Il est donc très difficile de juger de la qualité des corrections. Contrairement à toute attente, la correction linéaire censée être inefficace sur notre zone n'a pas bruité les EMQ, et sa correction ne provoque aucune amélioration ni dégradation des EMQ d'origine. Enfin, la correction des interférogrammes en utilisant GACOS dégrade les EMQ et les valeurs maximales atteignent 1.3 centimètres pour une moyenne de 0.51 centimètres, contre 0.7 centimètres à l'origine.

Finalement les corrections utilisées dans cette partie ne montrent aucune amélioration significative des EMQ de nos interférogrammes. Ceci peut être expliqué par la situation géographique de notre cas d'étude. Il est donc important de noter que l'application des corrections atmosphériques nécessite une bonne compréhension des principes de chacune d'entre-elles, et les caractéristiques de la zone étudiée doivent être compatibles avec la technique utilisée (par exemple, l'utilisation d'une technique basée sur la corrélation atmosphère topographie n'est pas adaptée).

Conclusion

Ce travail a permis d'améliorer l'ensemble de la chaine de traitement InSAR, depuis le téléchargement des images jusqu'à l'affichage des résultats. Les multiples scripts anciennement développés par Fugro ont été repris, modifiés et améliorés, et de nouveaux procédés de calculs ont aussi été mis en place. Conjointement, deux nouvelles interfaces graphiques utilisables sous QGIS ont été développées, « Download SAR Data » permet de sélectionner et télécharger automatiquement les images SAR, et enfin « InSARProcessing » regroupe les différents traitements qu'un opérateur peut être amené à réaliser. Ces deux plugins ont donc permis de rendre les traitements interactifs et fluides, en évitant de parcourir un nombre important de lignes de commandes.

D'autre part, réaliser des études de déformations fines nécessite de mitiger l'impact des artéfacts atmosphériques. Pour cela, une attention particulière a été accordée à cette tâche, et une étude détaillée des différentes techniques existantes a été établie. TRAIN a été une bonne alternative pour résoudre notre problématique, et les techniques de corrections atmosphériques GACOS et linéaires ont été intégrées à notre chaine de traitement.

De nouvelles perspectives peuvent être imaginées suite à ce travail. En effet, TRAIN ne permet pas de traiter les interférogrammes en amont du traitement StaMPS (retrait de la phase interférométrique atmosphérique et sélection des PS). Par conséquent, pouvoir utiliser un traitement PSI sur des interférogrammes corrigés serait une bonne perspective pour ce travail car elle permettrait probablement d'identifier davantage de PS.

L'interpolation des multiples techniques de mesures (InSAR, GNSS, nivellement, inclinométrie …) est une problématique complexe mais dont l'amélioration est nécessaire. Car pouvoir densifier les mesures aide à mieux comprendre les mécanismes de déformation menant au phénomène de subsidence. C'est à ces fins qu'une nouvelle technique d'interpolation radiale a été introduite. Une procédure permettant ainsi de réaliser l'ensemble des traitements nécessaires pour cette interpolation a été mise en place, et une étude a été faite pour pouvoir valider notre solution. Une intégration de cette technique à la solution de combinaison des mesures GEOMON peut donc être envisagée.

Bibliographie

Doucet Samuel, 2018, Combinaison de mesures géodésique pour l'étude de la subsidence : application à la saline de Vauvert (Gard, France), [en ligne] Disponible sur : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02053493, consulté le 15/02/2020, thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université de Montpellier, 234p

Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas : differential radar interferometry. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B7), 9183-9191.

Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., & Rabaute, T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. Nature, 364(6433), 138.

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 39(1), 8-20.

Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. Geophysical research letters, 31(23).

Zebker, H. A., Rosen, P. A., & Hensley, S. (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102(B4), 7547-7563.

Lin, Y., M. Simons, E. Hetland, P. Muse, and C. DiCaprio (2010), A multiscale approach to estimating topographically correlated propagation delays in radar interferograms, Geochem. Geophys. Geosyst., 11, Q09002, doi:10.1029/2010GC003228.

Markowski, P., & Richardson, Y. (Eds.). (2010). Mesoscale Meteorology in Midlatitudes (Edition 1). Southern Gate, Ghichester, West Succex, UK: Wiley-Blackwell.

Doin, M., Lasserre, C., Peltzer, G., Cavalié, O., & Doubre, C. (2009). Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: validation with global atmospheric models. Journal of Applied Geophysics, 69, 35–50. http://dx.doi.org/10.1016/j. jappgeo.2009.03.010.

Li, Zhenhong & Muller, J.-P & Cross, Paul & Albert, Peter & Hewison, Tim & Watson, Robert & Fischer, J. & Bennartz, Ralf. (2004). Validation of MERIS near IR water vapour retrievals using MWR and GPS measurements.

Li, Z., Muller, J., & Cross, P. (2003). Comparison of precipitable water vapor derived from radiosonde, GPS, and Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer measurements. Journal of Geophysical Research, 108. http://dx.doi.org/10.1029/2003JD003372.

Smith, E., and S. Weintraub (1953), The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies, Proc. Inst. Radio Eng., 41(8), 1035–1037, doi:10.1109/JRPROC.1953.274297.

Chaabane F., Avallone A., Tupin F., Briole P., Maître H. A Multitemporal Method for Correction of Tropospheric Effects in Differential SAR Interferometry: Application to the Gulf of Corinth Earthquake. IEEE T. Geosci. Remote Sens. 2007 ;45 :1605–1615

Lin, Y., M. Simons, E. Hetland, P. Muse, and C. DiCaprio (2010), A multiscale approach to estimating topographically correlated propagation delays in radar interferograms, Geochem. Geophys. Geosyst., 11, Q09002, doi:10.1029/2010GC003228.

Li, Z., Fielding, E., Cross, P., & Preusker, R. (2009b). Advanced InSAR atmospheric correction : MERIS/MODIS combination and stacked water vapour models. International Journal ofRemote Sensing, 30, 3343–3363. http://dx.doi.org/10.1080/01431160802562172.

Björndahl, Fredrik & Löfgren, Johan. (2008). Tropospheric Correction for InSAR Using Interpolated ECMWF Data and GPS Zenith Total Delay Measurements From the Southern California Integrated GPS Network

Gérard Mégie 1996 ozone propriétés oxydantes de la troposphère [en ligne] disponible sur : <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/51171>, consulté le 11/05/2020

H. Naamaoui., S., Kahlouche, H., Dekkiche 1996 ozone propriétés oxydantes de la troposphère [en ligne] disponible sur : <https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2011/papers/ts08i/ts08i_namaoui_salem_4836.pdf>, consulté le 25/06/2020

Bekaert, D.P.S., Walters, R.J., Wright, T.J., Hooper, A.J., and Parker, D.J. (2015c), Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques, Remote Sensing of Environment, doi: 10.1016/j.rse.2015.08.035

Bekaert, D.P.S., Hooper, A.J., and Wright, T.J. (2015a), A spatially-variable power-law tropospheric correction technique for InSAR data, JGR, doi:10.1029/2014JB011558

Catalão, J., Nico, G., Hanssen, R., & Catita, C. (2010, March). Integration Of InSAR And GPS For vertical deformation monitoring : acase study in Faia And Pico Islands.In Proceedings Fringe 2009 Workshop.

Yu, C., Li, Z., Penna, N. T., & Crippa, P. (2018). Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123. /10.1029/2017JB015305

Bevilacqua, A., Neri1,A., De Martino, P., et al 2020 Radial interpolation of GPS and leveling data of grounddeformationin a resurgent caldera: application to Campi Flegrei (Italy)Journal of Geodesy10.1007/s00190-020-01355-x

Table des annexes

Annexe 1 Exemple de fichier de résultats 64
Annexe 2 Tableau représentant la corrélation GNSS et HRES-ECMWF 65
Annexe 3 Tableau montrant les différentes améliorations issues des techniques expliqués 66
Annexe 4 Listing des images SAR en géométrie ascendante 67
Annexe 5 Listing des images SAR en géométrie descendante 68
Annexe 6 Amélioration du nombre de Permanent scatterers 69
Annexe 7 Amélioration du nombre de Permanent scatterers 70
Annexe 8 ZTD du modèle GACOS 71
Annexe 9 Interférogrammes corrigés (Technique GACOS) 72
Annexe 10 Interférogrammes corrigés (Technique linéaire) 73

Annexe 1
Exemple de fichier de résultats

```
# Long Lat Mean Mean_std D20150430 D20150512 D20150524 D20150605 D20
PSI_0 11.468328 51.996326 -2.0127339 6.483139 1.3189499 3.8991644 -9.
PSI_1 11.470079 51.996525 -3.1524782 4.1824174 0.62387425 4.3342619 -
PSI_2 11.470028 51.996517 -1.6107837 5.5331421 1.9260836 3.1918576 -
PSI_3 11.470132 51.996529 -2.8619745 3.4805212 -0.6205405 3.4337249 -
PSI_4 11.470339 51.996552 -9.0931206 5.642684 -0.21516941 0.49632886
PSI_5 11.475207 51.997101 0.54207122 3.7382474 -1.4846087 2.3894942 -
PSI_6 11.478058 51.997421 6.7977285 7.6607137 3.0525374 -4.9098024 -
PSI_7 11.478463 51.997467 -2.3603849 5.281579 0.56349325 4.737565 -1
PSI_8 11.478408 51.997459 5.0903869 8.014266 1.3311779 1.6584686 -12.
PSI_9 11.479416 51.997574 2.0212786 3.9210689 -0.8381871 4.1183863 -
PSI_10 11.479184 51.997547 7.3614097 4.4363184 -2.0705063 3.3017292 -
PSI_11 11.479523 51.997585 1.5329592 4.3727279 -0.39486453 4.8552628
PSI_12 11.479795 51.997616 -6.0478377 3.4118891 0.46101025 4.4325838
PSI_13 11.479965 51.997635 -2.2819333 3.1604381 -0.36377215 3.8531058
PSI_14 11.479362 51.997566 2.5979943 4.155242 -0.56636614 4.3957372 -
PSI_15 11.479631 51.997597 -7.6168451 5.5052528 2.4221072 6.167685 -
PSI_16 11.478631 51.997482 12.720375 6.5803742 -3.8869171 -4.659729 -
PSI_17 11.480072 51.997646 -2.1907361 3.8942254 1.1396924 3.773248 -
PSI_18 11.479303 51.997559 5.8234177 5.0357475 -1.1085579 4.38445 -1
PSI_19 11.47974 51.997608 -8.0189037 3.4544332 -0.98283941 3.1978066
PSI_20 11.479577 51.997589 -8.6089945 4.976449 1.527921 6.6613007 -9.
PSI_21 11.479243 51.997551 6.9126916 5.1166539 -1.1901773 3.4771528 -
PSI_22 11.47985 51.99762 -6.0275207 3.5800114 1.4435403 5.2226281 -1
PSI_23 11.480021 51.997639 -3.0215819 3.1956849 0.032950804 3.8887568
PSI_24 11.493323 51.999134 4.6580753 6.2970958 2.696521 5.1413388 -1
PSI_25 11.493061 51.999104 -4.8848171 5.9207783 1.9240019 10.043999 -
PSI_26 11.493703 51.999176 10.804564 3.8365152 -4.6341801 -2.7679827
PSI_27 11.49391 51.999199 4.376111 3.4695556 -9.8090754 2.093359 -11.
PSI_28 11.493651 51.999168 -0.817792 3.864387 0.23201525 4.139286 -1
PSI_29 11.494294 51.999241 13.490259 4.5292535 -4.4673028 -3.3015277
PSI_30 11.521579 52.0023 7.3952155 5.350513 -3.1340134 -6.6405087 -1
PSI_31 11.52266 52.002422 3.5578938 4.6897144 2.1051829 -0.94948339 -
PSI_32 11.52277 52.002434 -2.6483235 4.2658162 1.6535827 -0.88611269
PSI_33 11.522337 52.002384 14.2644 5.5765033 -1.7032678 -5.568018 -1
PSI_34 11.521802 52.002323 4.9610353 5.0327215 -0.15837476 -2.505884
PSI_35 11.522881 52.002445 2.4986281 4.6506033 1.2654027 -2.7950327 -
```

Annexe 2
Tableau représentant la corrélation GNSS et HRES-ECMWF

Table 1
Cross Validation for Four GPS Networks and One ECMWF Area Using Daily Values at 14:00 Local Time for All of the Year 2016

Network	Location	Average spacing (km)[a]	Slope	Intercept (m)	Bias (mm)	RMS (mm)	Correlation	Mean RMS (mm)[b]
BIGF[c]	UK	43	0.973	0.065	0.2	9.8	0.97	9.3
RING[d]	Italy	30	0.993	0.015	0.1	8.5	0.99	8.8
GeoNet[e]	New Zealand	17	0.995	0.012	0.2	7.8	0.99	7.7
PBO[f]	California, United States	12	1.000	0.001	0.1	6.6	1.00	6.6
ECMWF[g]	California, United States	12	0.997	0.006	0.0	6.3	1.00	5.9

[a]The spacing is computed as the mean distance between each station and its closest station. [b]The mean daily root-mean-square (RMS) differences for the year 2016. [c]British Isles continuous Global Navigation Satellite System Facility (www.bigf.ac.uk/) at 50–59°N, 11°W–2°E. [d]Rete Integrata Nazionale GPS (ring.gm.ingv.it/) at 37–47°N, 8–18°E. [e]Modern geological hazard monitoring system in New Zealand (www.geonet.org.nz/) at 37°–42°S, 173°–179°E. [f]Plate Boundary Observatory (pbo.unavco.org/) at 34°–39°N, 124°–118°W. [g]For European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), values were taken at 10:00 or 11:00 local time.

Annexe 3
Tableau montrant les différentes améliorations issues des techniques expliqués

Table 2
InSAR Atmospheric Correction Performance Statistics Expressed in Terms of Phase Standard Deviation (StdDev) and Displacement RMS for Different Correction Methods Applied on Eight Interferograms

	Phase StdDev				Displacement RMS			
IFG	Raw IFG	GPS correction	ECMWF correction	Integrated correction	Raw IFG	GPS correction	ECMWF correction	Integrated correction
IFG1-UK	2.75	0.71 (74%)	1.02 (63%)	0.69 (75%)	2.23	0.95 (57%)	0.86 (61%)	0.65 (71%)
IFG2-CA	2.44	1.13 (54%)	1.45 (41%)	0.96 (61%)	2.43	0.75 (69%)	1.62 (33%)	0.72 (70%)
IFG3-Italy	1.49	0.95 (36%)	0.88 (41%)	0.85 (43%)	1.37	0.70 (49%)	0.61 (55%)	0.47 (66%)
IFG4-NZ	1.97	1.35 (31%)	1.13 (43%)	1.10 (44%)	1.99	1.23 (38%)	1.30 (35%)	1.12 (44%)
IFG5-Tibet	1.15	—	0.45 (61%)	—	—	—	—	—
IFG6-Nepal	1.83	—	1.11 (39%)	—	—	—	—	—
IFG7-Algeria	2.40	—	0.88 (63%)	—	—	—	—	—
IFG8-Iceland	1.76	—	1.05 (40%)	—	—	—	—	—
Mean	1.97	1.04 (47%)	1.00 (49%)	0.90 (54%)	2.01	0.91 (55%)	1.10 (45%)	0.74 (63%)

Note. Unit: cm. Percentage improvements over the raw measurements are given in parentheses. ECMWF = European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; RMS = root-mean-square.

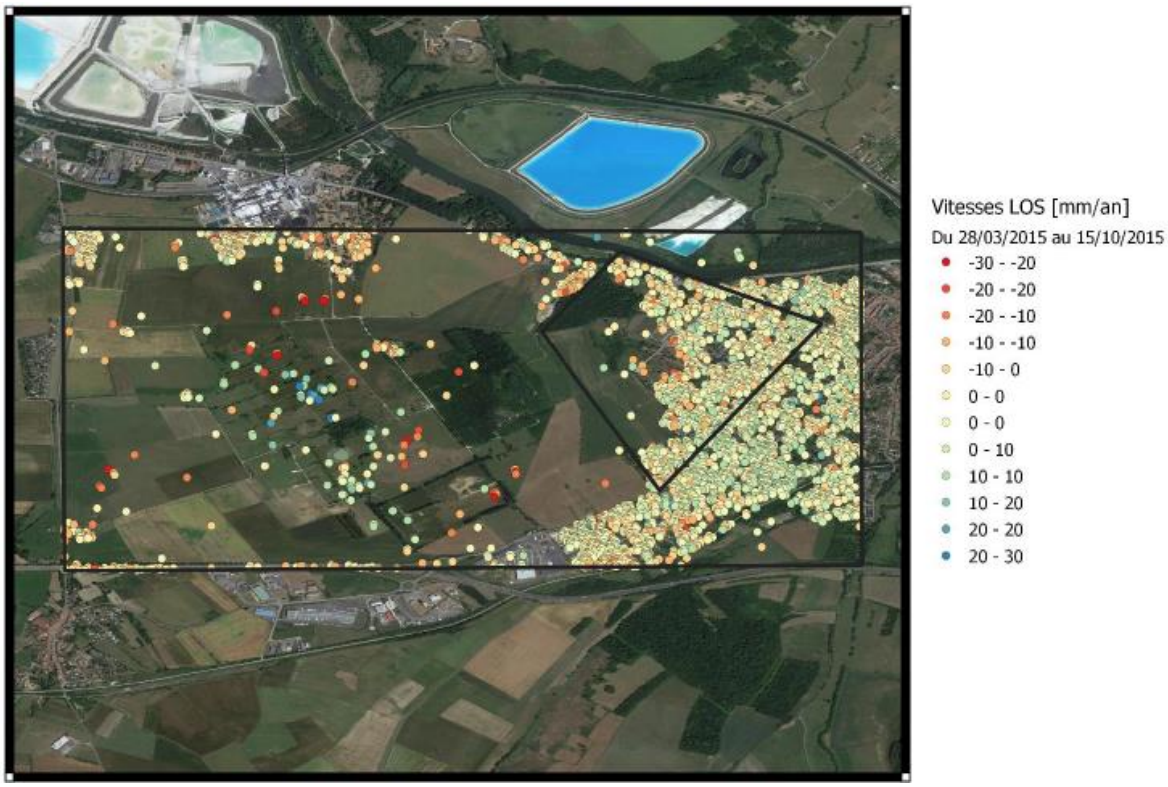
Annexe 4
Listing des images SAR en géométrie ascendante

Sentinel-1a/b Archived used, Ascending Geometry					
Image number	Acquisition date	Image number	Acquisition date	Image number	Acquisition date
1	28/03/2015	53	03/06/2017	105	25/03/2019
2	09/04/2015	54	15/06/2017	106	06/04/2019
3	21/04/2015	55	27/06/2017	107	18/04/2019
4	15/05/2015	56	09/07/2017	108	30/04/2019
5	27/05/2015	57	21/07/2017	109	12/05/2019
6	02/07/2015	58	14/08/2017	110	24/05/2019
7	14/07/2015	59	26/08/2017	111	05/06/2019
8	26/07/2015	60	07/09/2017	112	17/06/2019
9	07/08/2015	61	19/09/2017	113	29/06/2019
10	19/08/2015	62	01/10/2017	114	11/07/2019
11	31/08/2015	63	13/10/2017	115	23/07/2019
12	12/09/2015	64	25/10/2017	116	04/08/2019
13	24/09/2015	65	06/11/2017	117	16/08/2019
14	06/10/2015	66	18/11/2017	118	28/08/2019
15	18/10/2015	67	30/11/2017	119	09/09/2019
16	30/10/2015	68	12/12/2017	120	21/09/2019
17	11/11/2015	69	24/12/2017	121	03/10/2019
18	23/11/2015	70	05/01/2018	122	15/10/2019
19	05/12/2015	71	17/01/2018	123	27/10/2019
20	17/12/2015	72	29/01/2018	124	08/11/2019
21	29/12/2015	73	10/02/2018	125	20/11/2019
22	10/01/2016	74	22/02/2018	126	02/12/2019
23	22/01/2016	75	06/03/2018	127	14/12/2019
24	03/02/2016	76	18/03/2018	128	26/12/2019
25	15/02/2016	77	30/03/2018	129	07/01/2020
26	27/02/2016	78	11/04/2018	130	19/01/2020
27	10/03/2016	79	23/04/2018	131	31/01/2020
28	22/03/2016	80	05/05/2018	132	12/02/2020
29	03/04/2016	81	17/05/2018	133	24/02/2020
30	27/04/2016	82	29/05/2018	134	07/03/2020
31	21/05/2016	83	22/06/2018	135	19/03/2020
32	25/08/2016	84	04/07/2018	136	31/03/2020
33	06/10/2016	85	16/07/2018	137	12/04/2020
34	18/10/2016	86	28/07/2018	138	24/04/2020
35	30/10/2016	87	09/08/2018	139	05/05/2020
36	11/11/2016	88	21/08/2018	140	18/05/2020
37	23/11/2016	89	02/09/2018	141	30/05/2020
38	05/12/2016	90	14/09/2018		
39	17/12/2016	91	26/09/2018		
40	29/12/2016	92	08/10/2018		
41	10/01/2017	93	20/10/2018		
42	22/01/2017	94	01/11/2018		
43	03/02/2017	95	13/11/2018		
44	15/02/2017	96	07/12/2018		
45	27/02/2017	97	19/12/2018		
46	11/03/2017	98	31/12/2018		
47	23/03/2017	99	12/01/2019		
48	04/04/2017	100	24/01/2019		
49	16/04/2017	101	05/02/2019		
50	28/04/2017	102	17/02/2019		
51	10/05/2017	103	01/03/2019		
52	22/05/2017	104	13/03/2019		

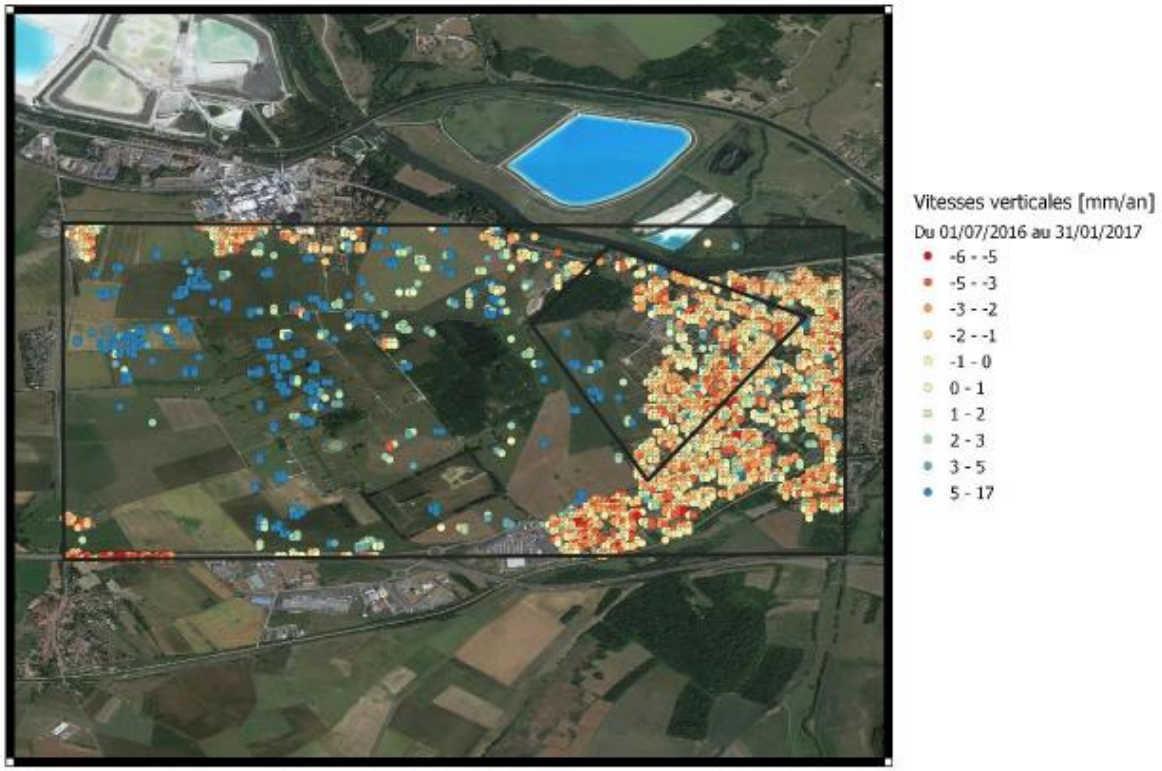
Annexe 5
Listing des images SAR en géométrie descendante

Sentinel-1a/b Archived used, Descending Geometry									
Image number	Acquisition date	Image number	Acquisition date	Image number	Acquisition date	Image number	Acquisition date	Image number	Acquisition date
1	03/11/2015	53	19/06/2017	105	21/05/2018	157	04/04/2019	209	10/02/2020
2	15/11/2015	54	25/06/2017	106	27/05/2018	158	10/04/2019	210	16/02/2020
3	27/11/2015	55	01/07/2017	107	02/06/2018	159	16/04/2019	211	22/02/2020
4	09/12/2015	56	13/07/2017	108	08/06/2018	160	22/04/2019	212	28/02/2020
5	21/12/2015	57	19/07/2017	109	14/06/2018	161	28/04/2019	213	05/03/2020
6	14/01/2016	58	25/07/2017	110	20/06/2018	162	04/05/2019	214	11/03/2020
7	26/01/2016	59	31/07/2017	111	26/06/2018	163	10/05/2019	215	17/03/2020
8	07/02/2016	60	06/08/2017	112	02/07/2018	164	16/05/2019	216	23/03/2020
9	19/02/2016	61	12/08/2017	113	08/07/2018	165	22/05/2019	217	29/03/2020
10	02/03/2016	62	18/08/2017	114	14/07/2018	166	28/05/2019	218	04/04/2020
11	14/03/2016	63	24/08/2017	115	20/07/2018	167	03/06/2019	219	10/04/2020
12	26/03/2016	64	30/08/2017	116	26/07/2018	168	09/06/2019	220	16/04/2020
13	07/04/2016	65	05/09/2017	117	01/08/2018	169	15/06/2019	221	22/04/2020
14	19/04/2016	66	11/09/2017	118	07/08/2018	170	21/06/2019	222	28/04/2020
15	01/05/2016	67	17/09/2017	119	13/08/2018	171	27/06/2019	223	04/05/2020
16	13/05/2016	68	23/09/2017	120	19/08/2018	172	03/07/2019	224	10/05/2020
17	25/05/2016	69	29/09/2017	121	25/08/2018	173	09/07/2019	225	16/05/2020
18	06/06/2016	70	05/10/2017	122	31/08/2018	174	15/07/2019	226	22/05/2020
19	29/08/2016	71	11/10/2017	123	06/09/2018	175	21/07/2019	227	28/05/2020
20	10/09/2016	72	17/10/2017	124	12/09/2018	176	27/07/2019		
21	22/09/2016	73	23/10/2017	125	18/09/2018	177	02/08/2019		
22	28/09/2016	74	29/10/2017	126	24/09/2018	178	08/08/2019		
23	04/10/2016	75	04/11/2017	127	30/09/2018	179	14/08/2019		
24	16/10/2016	76	10/11/2017	128	06/10/2018	180	20/08/2019		
25	28/10/2016	77	16/11/2017	129	12/10/2018	181	26/08/2019		
26	09/11/2016	78	22/11/2017	130	18/10/2018	182	01/09/2019		
27	21/11/2016	79	28/11/2017	131	24/10/2018	183	07/09/2019		
28	03/12/2016	80	04/12/2017	132	30/10/2018	184	13/09/2019		
29	15/12/2016	81	10/12/2017	133	05/11/2018	185	19/09/2019		
30	27/12/2016	82	16/12/2017	134	11/11/2018	186	25/09/2019		
31	08/01/2017	83	22/12/2017	135	17/11/2018	187	01/10/2019		
32	20/01/2017	84	28/12/2017	136	23/11/2018	188	07/10/2019		
33	01/02/2017	85	15/01/2018	137	29/11/2018	189	13/10/2019		
34	13/02/2017	86	21/01/2018	138	05/12/2018	190	19/10/2019		
35	25/02/2017	87	27/01/2018	139	11/12/2018	191	25/10/2019		
36	09/03/2017	88	02/02/2018	140	17/12/2018	192	31/10/2019		
37	15/03/2017	89	08/02/2018	141	23/12/2018	193	06/11/2019		
38	21/03/2017	90	14/02/2018	142	29/12/2018	194	12/11/2019		
39	27/03/2017	91	20/02/2018	143	04/01/2019	195	18/11/2019		
40	02/04/2017	92	26/02/2018	144	10/01/2019	196	24/11/2019		
41	08/04/2017	93	04/03/2018	145	16/01/2019	197	30/11/2019		
42	14/04/2017	94	10/03/2018	146	22/01/2019	198	06/12/2019		
43	20/04/2017	95	22/03/2018	147	28/01/2019	199	12/12/2019		
44	26/04/2017	96	28/03/2018	148	03/02/2019	200	18/12/2019		
45	02/05/2017	97	03/04/2018	149	09/02/2019	201	24/12/2019		
46	08/05/2017	98	09/04/2018	150	21/02/2019	202	30/12/2019		
47	14/05/2017	99	15/04/2018	151	27/02/2019	203	05/01/2020		
48	20/05/2017	100	21/04/2018	152	05/03/2019	204	11/01/2020		
49	26/05/2017	101	27/04/2018	153	11/03/2019	205	17/01/2020		
50	01/06/2017	102	03/05/2018	154	17/03/2019	206	23/01/2020		
51	07/06/2017	103	09/05/2018	155	23/03/2019	207	29/01/2020		
52	13/06/2017	104	15/05/2018	156	29/03/2019	208	04/02/2020		

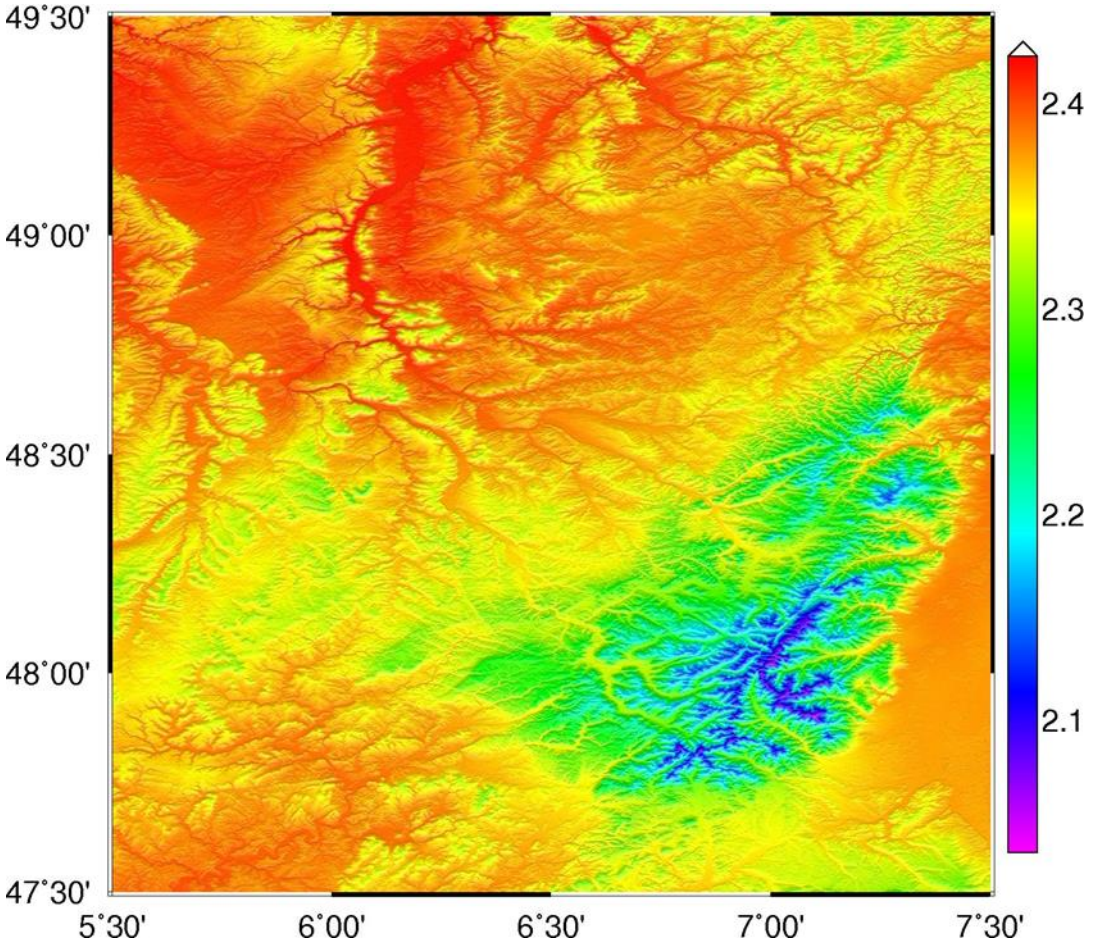
Annexe 6
Amélioration du nombre de Permanent scatterers



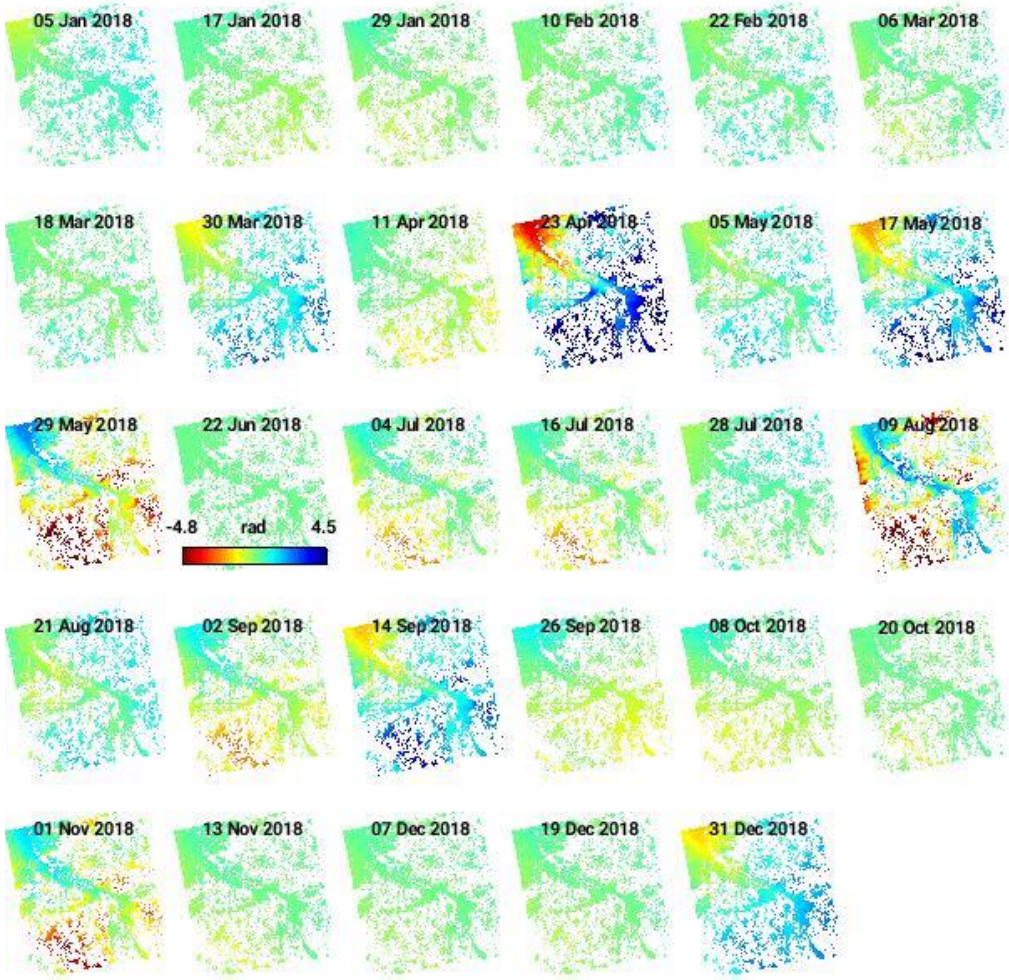
Annexe 7
Amélioration du nombre de Permanent scatterers



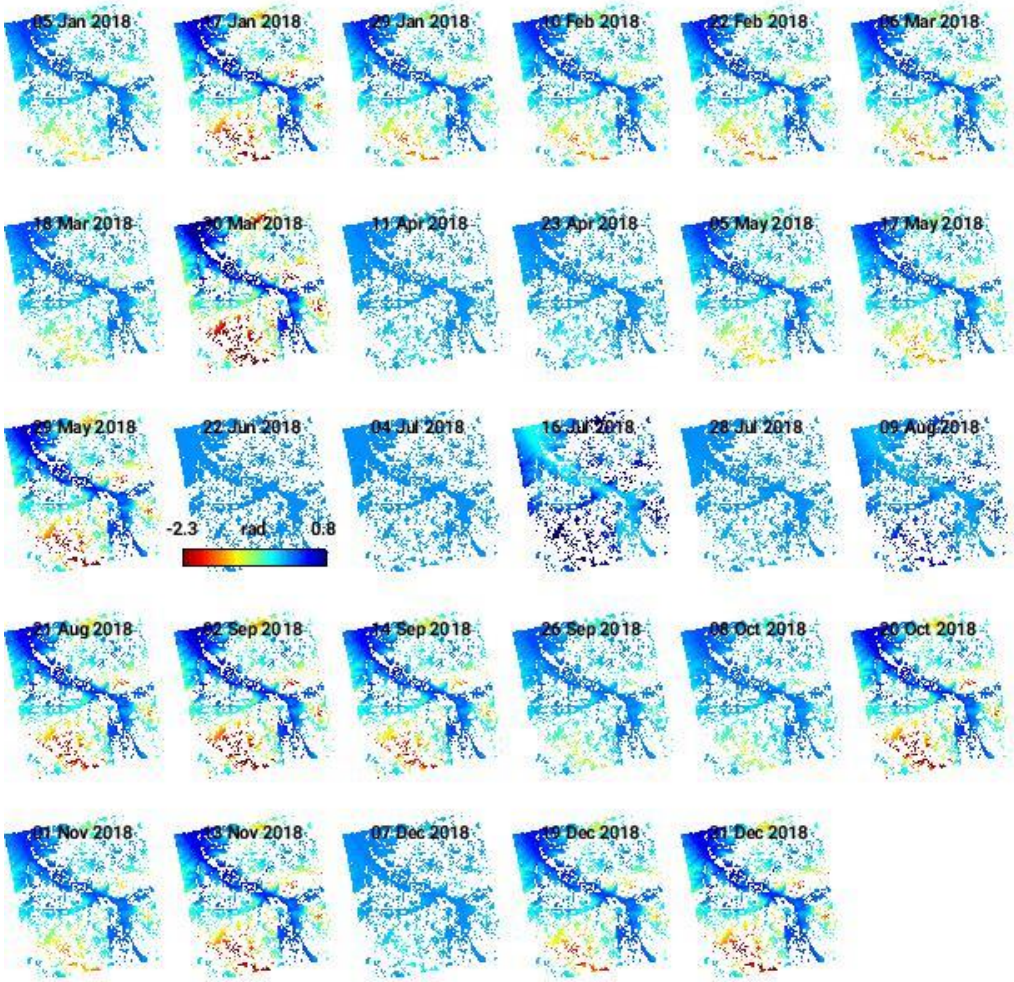
Annexe 8
ZTD du modèle GACOS



Annexe 9
Interférogrammes corrigés (Technique GACOS)



Annexe 10
Interférogrammes corrigés (Technique linéaire)



Liste des figures

Figure 1 Les différents modes d'acquisition Sentinel, (Site de l'ESA) 8
Figure 2 Représentation d'une déformation mesurée par D-INSAR (Löfgren et al, 2008)..... 9
Figure 3 Exemple de variante de combinaison (S. Doucet) 11
Figure 4 Mesure d'un même élément depuis deux géométries radar (Catalão et al,2011)..... 12
Figure 5 Représentation d'une déformation radiale (S. Doucet) 13
Figure 6 Exemple de modèle de variogramme (S. Doucet) 13
Figure 7 Onglet n°1 du plug-in « SAR DATA Downloader »..... 19
Figure 8 Emprise des images retrouvés par le plugin (en orange) 19
Figure 9 Onglet n°2 du plug-in « SAR DATA Downloader »..... 20
Figure 10 Création d'une zone tampon de 0.2° 20
Figure 11 Composition de l'image radar en 3 Swaths..... 22
Figure 12 Graphique XML, mis en place pour le traitement multi-swaths..... 22
Figure 13 Onglet Settings de l'extension « InSARProcessing » 24
Figure 14 Onglet N°2 de l'extension « InSARProcessing »..... 25
Figure 15 Onglet permettant le traitement en sous-périodes temporelles 26
Figure 16 Onglet n°5 pour la reprise des calculs StaMPS 27
Figure 17 Exemple d'affichage de résultats..... 28
Figure 18 Schéma représentatif de la réfraction de l'onde RADAR (Naamaoui et al, 2011)..... 29
Figure 19 Moyenne des délais troposphériques (ligne noire) issues de ballons-sondes D. Bekaert 33
Figure 20 Résultats suite à l'intégration des donnés issus des ballons sondeurs (Bekaert et al, 2015a)..... 34
Figure 21 Zones étudiées pour la comparaison des techniques (Bekaert et al, 2015c) 41
Figure 22 Comparaison des RMSE obtenus suites aux corrections (Bekaert et al, 2015c) 42
Figure 23 Cycles de mesures GNSS, entre 2011 et 2013 (Bevilacqua et al, 2020) 44
Figure 24 Surrection observée par GNSS (Bevilacqua et al, 2020)..... 44
Figure 25 Le graphique à gauche montre deux points de mesures en bleu dont les déplacements sont projetés pour obtenir le centre représenté en vert, qui sera ensuite utilisé pour interpoler linéairement les déplacements entre les deux vecteurs (à droite)..... 45
Figure 26 Déplacements observés sur Campi Flagrei (Bevilacqua et al, 2020)..... 46
Figure 27 Principe de l'interpolation radiale (Bevilacqua et al, 2020) 47
Figure 28 Résultats obtenus en utilisant 8 points simulés affiché dans la figure de gauche, la figure centrale montre les déplacements verticaux, et celle de droite les déplacements Est/Ouest ... 48
Figure 29 Simulation d'un modèle Mogi, et reconstitution, à partir de points aléatoires (Bevilacqua et al, 2020)..... 49
Figure 30 Gaussienne crée pour simuler un cas de subsidence..... 49
Figure 31 Simulation de la déformation suivant l'axe Est/ouest 50
Figure 32 Simulation de la déformation suivant l'axe vertical..... 50
Figure 33 Simulation de la déformation suivant l'axe Nord/Sud 50
Figure 34 Emplacements des points choisis aléatoirement..... 51
Figure 35 Résultats de l'interpolation multipolaire entre les couples de vecteurs. 51
Figure 36 Résultats des déplacements Nord/Sud obtenus suite à l'interpolation sont affichés à gauche, et les écarts au modèle réel sont affichés à droite 52
Figure 37 Résultats des déplacements verticaux obtenus suite à l'interpolation sont affichés à gauche, et les écarts au modèle réel sont affichés à droite 52
Figure 38 Résultats des déplacements Est/Ouest obtenus suite à l'interpolation sont affichés à gauche, et les écarts au modèle réel sont affichés à droite 52
Figure 39 Situation de notre zone d'étude..... 54
Figure 40 Résultats du traitement de l'ensemble des images en géométrie descendante..... 55
Figure 41 Résultat du traitement en période 57
Figure 42 Affichage de la série temporelle d'un PS supposé stable 58
Figure 43 EMQ obtenus après l'application des corrections 59

Liste des tableaux

Tableau 1 Techniques de correction disponibles sur TRAIN 40
Tableau 2 Les différentes périodes choisies pour les traitements 56

Optimisation et augmentation d'une chaine de traitement InSAR

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., le Mans 2020

RESUME

Dans le cadre de projet de monitoring, Fugro est en charge d'auscultation de terrain sur des zones affectées de subsidence d'origine anthropiques et naturelles. Pour cela et depuis des années Fugro s'est lancée dans le développement de GEOMON, une solution qui permettrait de combiner des mesures géodésiques (InSAR, GNSS, nivellement, LiDAR de précision et inclinométrie).

Une optimisation de l'ensemble de la chaine de traitement InSAR, depuis le téléchargement des images SAR jusqu'à l'obtention des résultats, a été réalisée, et deux nouvelles extensions utilisables sous QGIS ont été développées. Nous avons aussi tenté de mitiger les impacts des délais troposphériques sur la formation d'interférogrammes, pour cela la Toolbox TRAIN a permis d'appliquer des corrections atmosphériques.

En outre, nous avons simulé un modèle de déformation (subsidence) par une forme mathématiquement connue, que nous avons ensuite essayé de recréer à partir d'une nouvelle technique d'interpolation radiale, qui a été validée, considération faite des résultats obtenus et qui présentent un bon complement aukrigeage régression utilisée par la solution GEOMON.

Mots clés: InSAR, interpolation, radiale, TRAIN, subsidence, délais, troposphere, GAGOS.

SUMMARY

Within the framework of monitoring projects, Fugro is in charge of field surveying in areas affected by subsidence of anthropogenic and natural origins. Since many years and for this purpose Fugro has been developing GEOMON, a solution which would allow the combination of geodetic measurements (InSAR, GNSS, levelling, precision LiDAR and Tilt meters).

An optimization of the entire InSAR streamline from the downloading of SAR images to the achievement of the results has been carried out, and two new plug-ins that can be used under QGIS have been developed. We have also tried to mitigate the impact of tropospheric delays on the interferograms, for this aim, the Toolbox TRAIN has been used to apply atmospheric corrections.

Addingly, we simulated a deformation model (subsidence) by a mathematically known form, which we then tried to recreate from a new radial interpolation technique, that was validated in the light of the results obtained and which offers a good alternative to the regression kriging used by the GEOMON solution.

Key words: InSAR, interpolation, radial, TRAIN, subsidence, delays, troposphere, GAGOS.