



Combinaison de mesures géodésiques pour l'étude de la subsidence : application à la saline de Vauvert, Gard, France

Samuel Doucet

► To cite this version:

Samuel Doucet. Combinaison de mesures géodésiques pour l'étude de la subsidence : application à la saline de Vauvert, Gard, France. Sciences de la Terre. Université Montpellier, 2018. Français. NNT : 2018MONTG074 . tel-02053493

HAL Id: tel-02053493

<https://theses.hal.science/tel-02053493>

Submitted on 1 Mar 2019

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

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

THESE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER

En Sciences de la Terre

École doctorale GAIA

Unité de recherche Géosciences Montpellier

Combinaison de mesures géodésiques pour l'étude de la subsidence : application à la saline de Vauvert (Gard, France)

Présentée par Samuel DOUCET

Le 21 Novembre 2018

**Sous la direction de Philippe VERNANT
et Cédric CHAMPOLLION**

Devant le jury composé de

Frédéric MASSON, Professeur, EOST-Université de Strasbourg
Alexis RIGO, Chargé de Recherches CNRS, École Normale Supérieure
Pierre BRIOLE, Directeur de Recherches CNRS, École Normale Supérieure
Jean CHÉRY, Directeur de Recherches CNRS, Université de Montpellier
Jean-Louis CARME, Ingénieur Directeur Technique, Fugro GEOID
Marc VALETTE, Géologue, KEM ONE
Philippe VERNANT, Maître de Conférences, Université de Montpellier
Cédric CHAMPOLLION, Maître de Conférences, Université de Montpellier

Rapporteur
Rapporteur
Examinateur
Examinateur, Président du Jury
Invité
Invité
Directeur
Co-Directeur



**UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER**

Remerciements

L'heure est tardive (ou matinale, selon l'interprétation), mais grave. J'aimerais pouvoir sortir mon plus beau stylo pour écrire ce paragraphe... Mais la révolution numérique est passée par là. Je me contenterai donc d'écrire ces quelques lignes en tapant sur ces touches limées par l'écriture et la réécriture des différents chapitres de ce manuscrit, et un petit peu ternies par ce café renversé un matin d'hiver 2016, aussi. Un Roma, parce que le Voluto c'est pas mal mais on s'en lasse.

Non, vous n'êtes pas dupes, ces quelques lignes maladroites sont bien écrites dans le but inavouable de repousser l'échéance ultime, le Graal, de l'écriture des remerciements... Tant de prénoms, de surnoms, de quolibets même, me viennent à l'esprit, qu'une peur m'envahit, celle d'oublier quelqu'un... Si tel est le cas, puisse(nt)-t'il(s) me pardonner !

Je tiens tout d'abord à remercier Philippe Vernant et Cédric Champollion, pour la confiance accordée et maintenue durant ces années en tant qu'encadrants, ainsi que pour leurs conseils et leur relecture attentive de ce manuscrit. Merci à Michel Peyret pour m'avoir notamment fait découvrir l'InSAR et ses problématiques. Merci à Erik Doerflinger d'avoir gardé ce lien avec Fugro GEOID qui a permis, entre autres, ce travail.

Je remercie les membres de mon jury, Frédéric Masson, Alexis Rigo, Pierre Briole, Jean Chéry et Marc Valette, qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Cette thèse a été financée par la société Fugro GEOID aidée par une subvention CIFRE. Je remercie Sylvain Lacombe, directeur de Fugro GEOID, pour sa confiance tout au long de ce travail. Merci à Jean-Louis CARME, pour son encadrement rigoureux, toutes ces (longues ;)) discussions, toujours très instructives, sa passion communicative, et sa relecture un peu précipitée de ce manuscrit, soirs et week-end compris. Merci à Claude Michel qui a initié le projet qui a mené à ce travail, et qui m'a fait confiance à mon arrivée à GEOID.

Mais je ne peux pas parler de Fugro GEOID sans mentionner cette belle brochette de collègues tous un peu plus fous les uns que les autres : Bertrand et Xavier mes deux co-bureaux qui n'ont qu'une hâte, me revoir tous les jours ☺, Aurélie (même mon toit t'est redevable ;)), Sophie, Hamza, Pascale, Claire, Julie, Olivia, Benjamin, Yves, Marie, Jasper, Antoine, Will (je t'ai mis après les stagiaires... juste comme ça !), Julo, Nico, Conni, Thierry et Thierry, Olivier, Baptiste, Thomas... Pauline, bon vent dans cette nouvelle aventure ! Anthony... Allez, sois sérieux, reviens !

Un immense merci à cette bien belle et dynamique équipe de plus ou moins doctorants... Je commence bien sûr par les locataires d'abord passés et ensuite présents du bureau 464, Audrey, malgré ta fuite du bureau (si si !), merci pour ton écoute et ton soutien, Sven, j'espère que tu nous pardonneras pour la mort de ta plante ;) Sev, pour ton soutien, ta relecture franche, qui m'a remis sur les rails exactement quand il le fallait, Sylvain, change

d'ordi mais arrête de changer de vélo... ;) Et le petit dernier, Pierre, s'il te plaît arrête le litre de café à 6h du matin... ! Et puis Robin, Romain, Alizia, Christine, Agathe, Anita, Oswald, les Max, Ben, Lise, Tim, Carlotta, Cyp... Mon Dieu j'en oublie...

Matthieu, bon sang merci pour ta relecture attentive (et passionnée, je le sais !!!), et pour tous ces échanges FB-Messenger-iens où nous réfléchissons activement au monde de demain... Une pensée pour Caro qui te ~~supporte~~ soutient, alors que tu l'as laissée à Brest, sous la pluie, uniquement pour me rejoindre...

Merci à mes parents qui, quelques soient mes choix, m'ont soutenu avec bienveillance, malgré la distance. Romain bon courage pour ta fin de thèse, je sais ce que cela représente ;) et merci à toi et à Agnès pour tous ces petits séjours à Paris toujours géniaux. Tim, sois raisonnable et ne fais pas une thèse comme tes frères ;) . Il va vraiment falloir qu'on se voie tous plus souvent.

Et puis, il y a toi... Amandine, Amande, Xou (;) , merci pour tout. Ces dernières semaines ont été particulièrement éprouvantes, c'est peu de le dire et aucun mot ne pourra le décrire. Quelques soient les prochaines épreuves, et il y en aura, nous serons toujours deux. Un immense merci à tes parents pour leur soutien et leur aide infaillibles, qui m'ont – entres autres – permis de terminer ce travail.

Résumé

Depuis son origine, la surface de la Terre est façonnée par de nombreux processus. Qu'ils soient géologiques ou, plus récemment, anthropiques, couplés ou non à des phénomènes hydrologiques ou météorologiques, ces processus affectent la topographie à différentes échelles spatiales et temporelles. Devant l'augmentation des risques (combinaison des enjeux humains et économiques et des aléas de type subsidence ou glissements de terrains), la nécessité de développer des méthodes de mesures fiables et précises de ces processus apparaît évidente. C'est l'objectif des mesures dites géodésiques. Les caractéristiques de ces mesures géodésiques sont brièvement décrites afin de mettre en lumière leurs avantages et limitations : densité de mesures, précision, biais, incertitudes, difficultés de mise en œuvre.

À partir de ces caractéristiques, les objectifs de la thèse sont définis : créer une méthodologie de combinaison des déplacements de surface mesurés par différentes techniques de mesures géodésiques (GNSS, InSAR, Nivellement) afin d'améliorer la connaissance de la déformation de surface dans de nombreux cas d'études.

La première étape de la combinaison est l'harmonisation des références spatiales de la déformation. Ensuite, les champs de vitesses issus des différentes techniques sont pondérés suivant leurs incertitudes pondérées. Enfin la combinaison de ces champs de vitesses est effectuée par la méthode du krigeage par régression pondérée. Le résultat obtenu est une grille de déformation qui, selon les méthodes et données utilisées, présente une résolution spatiale en une à trois dimensions. Associée à celle-ci, une grille d'indices de fiabilité est créée, prenant en considération les incertitudes pondérées de chaque méthode d'une part, et les incertitudes liées à la méthode d'interpolation d'autre part. L'étude conjointe de ces deux grilles permet une analyse de la déformation.

Notre méthodologie a été confrontée à un cas d'étude : la subsidence associée à la saline de Vauvert (Gard, France). Ce site apparaît idéal car (1) sa situation géographique proche de Montpellier facilite son instrumentation et les mesures, (2) une subsidence avérée y est déjà mesurée, dont l'origine est l'extraction de sel entre 2000 et 3000 m de profondeur, et (3) des jeux de données sont disponibles en InSAR, GPS et Nivellement. Deux périodes de mesures sont retenues (2002-2009 et 2015-2017) car permettant l'utilisation conjointe de plusieurs techniques de mesures. Les résultats de la combinaison des champs de vitesses montrent la présence d'un bol de subsidence de magnitude maximale de 2.2 cm/an sur la première période et 2.4 cm/an sur la deuxième période. Son extension atteint les quartiers sud-est de la ville voisine de Vauvert. Globalement cette subsidence (dimension du bol et magnitude) varie peu au cours du temps, néanmoins une zone localisée proche des sites historiques de la Galine, à l'est de la zone d'étude, présente une augmentation de la subsidence d'environ 8 mm/an entre les deux périodes. Cette augmentation semble montrer un effet en surface de la purge des puits à proximité, purges initiées en 2015.

Enfin l'utilisation d'un algorithme d'inversion sur les données issues de la méthodologie de combinaison (vitesses et incertitudes) permet d'apporter de nouveaux éléments d'analyse sur l'anisotropie locale de la déformation. Une accommodation des structures géologiques en profondeur (plis, failles, décollements) est montrée.

Abstract

Since its origin, the surface of the Earth has been shaped by many processes. Whether they are geological or, more recently, anthropogenic, coupled or not with hydrological or meteorological phenomena, these processes affect the topography at different spatial and temporal scales. Given the increase in risks (a combination of human and economic issues with subsidence or landslide hazards), the necessity to develop reliable and accurate methods of measuring these processes is clear. This is the goal of the so-called geodesic measurements. The aim of this thesis is to create a new methodology for the combination of surface displacements measured by different geodetic techniques (GNSS, InSAR, Levelling) to improve the knowledge of the deformation on many case studies.

The first step of the combination is the harmonization of the spatial references of the deformation. Then, the velocity fields resulting from the different techniques are weighted according to their weighted uncertainties. Finally, a combination of these velocity fields is performed by the weighted regression kriging method. The result is a deformation grid, which, according to the data used, presents a spatial resolution in one to three dimensions. Associated to the grid, a second one of reliability index is created, taking into account the weighted uncertainties of each method on one hand, and the uncertainties related to the interpolation method on the other hand. The joint use of these two grids improve the analysis of the deformation. Our methodology was confronted with a case study: the subsidence of the Vauvert saline (Gard, France). This site appears ideal because of (1) its geographical situation close to Montpellier facilitating its instrumentation and measurements, (2) a proven subsidence is measured, whose origin is the salt extraction between 2000 and 3000 m in depth, and (3) datasets are available in InSAR, GPS and Levelling. Two measurement periods are selected (2002-2009 and 2015-2017) because they allow the joint use of several measurement techniques. The results of the combination of velocity fields show the presence of a subsidence bowl with a maximum magnitude of 2.2 cm / year in the first period and 2.4 cm / year in the second period. Its extension reaches the southeastern area of the neighboring town of Vauvert. Overall, this subsidence (size of the bowl and magnitude) does not vary very much, nevertheless a zone closed to the historical sites of the Galine (east of the zone of study) presents an increase of the subsidence of approximately 8 mm / year between the two periods. This acceleration seems to reflect the surface effect of the closest wells purging, initiated in 2015.

Finally, the use of an inversion algorithm on the data resulting from the combination methodology (velocities and uncertainties) makes possible to bring new elements of analysis on the local anisotropy of the deformation. An accommodation of geological structures in depth (folds, faults, detachments) is shown.

« I keep on running, but I can't get to the mountain

[...]

Gonna try my best to get there

But I can't afford the bus fare.

[...]

It's alright

If you dance with me tonight

We'll fight the dying of the light and we'll catch the sun. »

Noel Gallagher

TABLE DES MATIERES

1	Introduction	15
1.1	Avant-propos	16
1.2	Structure du manuscrit	17
2	Contextes de l'étude.....	21
2.1	Que veut-on mesurer ?.....	22
2.1.1	Subsidence.....	22
2.1.2	Glissements de terrain	23
2.1.3	Mouvements tectoniques.....	24
2.2	Méthodes de mesure de la déformation de surface.....	24
2.2.1	Nivellement géométrique	25
2.2.1.1	Principe	25
2.2.1.2	Précision et limitations.....	26
2.2.2	Positionnement par satellite : Global Navigation Satellite System.....	27
2.2.2.1	Principe	27
2.2.2.2	Précision et limitations.....	29
2.2.3	Interférométrie radar	29
2.2.4	Synthèse	34
2.3	Combinaison : état de l'art.....	35
2.3.1	Amélioration d'une mesure par apport de données auxiliaires	36
2.3.1.1	Amélioration de la connaissance des orbites satellites.....	36
2.3.1.2	Amélioration du déroulement de phase InSAR	37
2.3.1.3	Amélioration de la connaissance sur les corrections atmosphériques	37
2.3.2	Amélioration par la combinaison	39
2.3.2.1	Densification de champs de vitesses par intégration de données.....	39
2.3.2.2	Algorithmes de combinaison de données	41
3	Combinaison de mesures géodésiques : proposition méthodologique	47
3.1	Introduction	48
3.2	Objectifs.....	48
3.3	Nouvelle proposition méthodologique	51
3.3.1	Mise en référence	51
3.3.1.1	Planimétrie	51
3.3.1.2	Altimétrie	53
3.3.2	Utilisation d'une double géométrie de mesures InSAR pour estimation de vitesses 3-D d'un bol de subsidence	55
3.3.2.1	Problématique.....	55
3.3.2.2	Densité de points de mesures.....	58
3.3.2.2.1	Description du problème	58
3.3.2.2.2	Choix d'une technique d'interpolation.....	62
3.3.2.2.3	Interpolation par krigeage	66
3.3.2.3	Propositions méthodologiques d'estimation des trois composantes spatiales de la déformation d'un bol de subsidence.....	73
3.3.2.4	Algorithme	76

3.3.3	Pondération des données	77
3.3.3.1	Nivellement	77
3.3.3.2	InSAR.....	77
3.3.3.3	GNSS.....	78
3.3.4	Champ de vitesses combiné par krigeage-regression pondéré	79
3.3.4.1	Méthode : description générale	79
3.3.4.2	Algorithme de la méthode de combinaison	80
3.3.4.3	Variantes de l'algorithme de la méthode de combinaison	83
3.3.4.4	Indice de fiabilité du champ de vitesse combiné	85
3.3.5	Environnement logiciel.....	85
3.4	Conclusion.....	86
4	Application de la méthodologie de combinaison à la subsidence de Vauvert	89
4.1	Présentation et contextes du site d'étude : exploitation salifère de Vauvert	91
(Gard)	91	
4.1.1	Présentation générale du site	91
4.1.2	Cadre structural	93
4.1.3	Exploitation du site.....	97
4.1.4	Indices géodésiques de la déformation : précédentes études	100
4.1.4.1	Nivellement	100
4.1.4.2	Interférométrie satellitaire : sommation d'interférogrammes.....	106
4.1.4.3	Interférométrie satellitaire : traitements multi-temporels	108
4.1.4.4	GNSS.....	111
4.1.5	Contextes : synthèse.....	114
4.2	Traitement de nouvelles données géodésiques.....	115
4.2.1	Mesures GNSS par 4 stations permanentes	115
4.2.1.1	Mise en place.....	115
4.2.1.2	Calculs	116
4.2.1.3	Résultats	118
4.2.2	InSAR : multi-temporel sur données Envisat.....	122
4.2.2.1	Données.....	122
4.2.2.2	Calcul.....	123
4.2.2.3	Résultats	125
4.2.3	InSAR : multi-temporel sur données Sentinel-1a/b.....	134
4.2.3.1	Données.....	134
4.2.3.2	Calcul	135
4.2.3.3	Résultats	137
4.3	Application de la méthodologie de combinaison à Vauvert : période 2002-2009	142
4.3.1	Données	143
4.3.2	Mise en référence	143
4.3.2.1	Mise en référence planimétrique des champs de vitesses.....	143
4.3.2.2	Harmonisation des références altimétriques des champs de vitesses.....	144
4.3.3	Interpolation du champ de vitesses InSAR	148
4.3.4	Pondération des données	152
4.3.4.1	Nivellement	152
4.3.4.2	InSAR.....	152
4.3.5	Champ de vitesses combinées par krigeage-regression pondéré.....	154
4.3.5.1	Calcul	154

4.3.5.2	Modèle de vitesses combinées	158
4.3.5.3	Indice de fiabilité du champ de vitesses combinées	159
4.4	Application de la méthodologie de combinaison à Vauvert : période 2015-2017	161
4.4.1	Données	161
4.4.2	Mise en référence	161
4.4.2.1	Mise en référence planimétrique des champs de vitesses	161
4.4.2.2	Harmonisation des références altimétriques des champs de vitesses	163
4.4.3	Combinaison des champs de vitesses InSAR en double géométrie	166
4.4.3.1	Interpolation des champs de vitesses InSAR	166
4.4.3.2	Détermination géométrique des composantes spatiales de la déformation	174
4.4.3.3	Comparaison des méthodes	181
4.4.4	Pondération des données	186
4.4.4.1	Nivellement	186
4.4.4.2	InSAR	186
4.4.5	Champ de vitesses combinées par krigeage-regression pondéré	188
4.4.5.1	Calcul	188
4.4.5.2	Modèle de vitesses combinées	193
4.4.5.3	Indice de fiabilité du champ de vitesses combinées	194
4.5	Conclusion	196
5	Interprétation, conclusion et perspectives	199
5.1	Synthèse de la méthodologie	200
5.1.1	Rappel des contextes et objectifs	200
5.1.2	Bilan du développement méthodologique	202
5.2	Apport du produit de la méthodologie et confrontation à une inversion de données	203
5.2.1	Evolution de la déformation à Vauvert	203
5.2.2	Inversion de données sur les résultats de la combinaison	213
5.2.2.1	Définitions et algorithme utilisé	213
5.2.2.2	Application	215
5.3	Perspectives	221

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1	Avant-propos	16
1.2	Structure du manuscrit	17

1.1 Avant-propos

Depuis son origine, la surface de la Terre est façonnée par de nombreux processus géologiques. L'Être humain, au sens *Homo sapiens*, n'est que très récent dans cette histoire : son origine est estimée à environ 195 000 ans (McDougall et al., 2005). Durant cette période Il n'a cessé de chercher des raisons à ces processus transformant son environnement. Dans cette recherche, les explications divines n'ont laissé que récemment (au regard de l'histoire de l'Humanité) place à l'idée de mouvements globaux affectant les couches supérieures de la Terre, Wegener (1924) étant l'un des premiers à mentionner l'idée d'une dérive des continents. La notion de déplacement de masses à l'échelle globale était imaginée, décrite et acceptée. Profitant du développement de techniques de mesure des dimensions de la Terre, méthodes nommées géodésiques, la connaissance de ces mouvements s'est améliorée. En parallèle du développement de mesures géophysiques, permettant l'étude du sous-sol par son imagerie, l'analyse rigoureuse de l'origine de ces processus a ainsi pu éclore.

En parallèle de ces processus naturels s'en sont ajoutés de nouveaux, d'origine anthropiques. En effet, avec l'avènement de l'ère industrielle, l'Homme ne cesse de modifier la surface du sol et les couches superficielles de la Terre. Que ce soit directement, par excavation de volumes en surface, ou indirectement, par l'effet d'une extraction de volumes dans les premières couches du sous-sol, l'action humaine croît, et ses effets sur la topographie avec. Les conséquences, humaines, économiques, poussent les scientifiques à créer de nouvelles méthodes de mesures et à améliorer les techniques existantes, afin de comprendre les tenants et aboutissants de ces processus et des aléas liés.

De plus, les risques augmentent, puisque tant les aléas liés aux mouvements de terrain que les enjeux sont en augmentation. C'est ce qui amène de nombreux acteurs à réagir. Le législateur, dans sa mission de protection des citoyens, aux sens immatériel et matériel ; le scientifique, dans sa mission de recherche, de compréhension, et de vulgarisation ; et l'entreprise, responsable de l'aléa ou spécialiste de sa mesure. Deux de ces deux derniers acteurs sont à l'origine du projet porteur de cette thèse : l'entreprise Fugro GEOID, spécialiste de la mesure topographique et géophysique depuis sa création en 1986 n'a cessé de s'inscrire dans une démarche de recherche et développement afin d'améliorer les solutions techniques proposées. C'est donc logiquement qu'une collaboration de long terme s'est instaurée avec l'Université des Sciences de Montpellier, notamment reconnue pour ses travaux dans les domaines de la Géologie, la Géophysique, et la Géodésie.

Cette thèse s'inscrit donc dans cette idée générale de volonté d'amélioration continue de la compréhension des processus façonnant la surface terrestre, et plus particulièrement dans la continuité d'un projet de recherche et développement initié au début des années 90 par la société Fugro GEOID (participation au réseau POTSIS, calcul scientifique au moyen du logiciel GAMIT-GLOBK) et réactualisé en 2008 (InSAR) à la suite de problématiques soulevées par plusieurs clients industriels. Ce projet a pour but l'amélioration de la mesure des

mouvements de terrain et plus précisément de la subsidence, par l'utilisation de techniques innovantes.

L'étude, d'une part, de tous les processus de déformation de la surface terrestre et, d'autre part, de toutes les techniques de mesures de ceux-ci, n'est pas imaginable dans un manuscrit de thèse. Le propos sera donc restreint aux techniques de mesures géodésiques permettant la mesure de mouvements tels que les subsidences d'origine naturelle (par exemple tectonique, tassements) ou humaine liées par exemple à l'extraction de matière.

1.2 Structure du manuscrit

Le manuscrit est structuré en 5 chapitres distincts.

Le premier est une brève introduction décrivant le contexte général ayant mené à la réflexion autour d'un sujet de thèse rassemblant des thématiques académiques et industrielles : la mesure des mouvements de la surface terrestre.

Le second chapitre est tout d'abord consacré à une brève description de l'objet même de l'étude, c'est-à-dire les mouvements affectant la surface du globe, couramment étudiés par mesures géodésiques. Ensuite un état de l'art des techniques les plus couramment utilisées (nivellement, GNSS et InSAR) est effectué, permettant de mettre en lumière les avantages et les limitations inhérents à chacune des méthodes. Enfin, un descriptif des méthodes de combinaison de ces techniques de mesures est effectué, ceci afin de déterminer les différentes possibilités techniques en vue de la description d'une nouvelle méthode.

Le troisième chapitre est dédié à la description de cette nouvelle méthode de combinaison de mesures géodésiques. Après en avoir décrit et défini les objectifs généraux, les différentes étapes du développement sont présentées. La possibilité de mesurer la déformation selon plusieurs directions via deux géométries InSAR sera décrite. Ensuite les étapes d'harmonisation des références, de pondération des données, et de combinaison des champs de vitesses, sont discutées.

Le quatrième chapitre permet de confronter la méthodologie de combinaison à un cas d'étude réel : la subsidence liée à l'extraction de sel à Vauvert, dans le département du Gard (France). Après une description des contextes de cette étude (géographique, géologique, historique) expliquant le choix de cette zone, la description des mesures et des traitements de données géodésiques (nivellement, GNSS, InSAR) est effectuée. Enfin l'application de la méthodologie de combinaison est décrite sur deux périodes distinctes, 2002-2009 d'une part et 2015-2017 d'autre part. Ces périodes ont été choisies car elles permettent l'utilisation conjointe de plusieurs techniques de mesures.

Le cinquième et dernier chapitre est consacré à la discussion autour des résultats issus des applications du quatrième chapitre. Une confrontation aux éléments géologiques d'une part et aux données de production d'autre part est effectuée. Les éléments suivants de la déformation de surface au cours du temps sont décrits : étendue spatiale, magnitude,

modifications locales de la déformation. Enfin, afin de lier la déformation de la surface et le cadre structural du sous-sol, les résultats issus des combinaisons seront traduits en différence de volume et position d'un modèle de point source dans le sous-sol au moyen d'un algorithme d'inversion de données géodésiques. Ceci afin de permettre une interprétation des phénomènes géologiques ayant pu (ou pouvant) être à l'origine des déformations de surface mesurées par la combinaison de techniques géodésiques.

Chapitre 2

Contextes de l'étude

Sommaire

2.1	Que veut-on mesurer ?.....	22
2.1.1	Subsidence.....	22
2.1.2	Glissements de terrain	23
2.1.3	Mouvements tectoniques.....	24
2.2	Méthodes de mesure de la déformation de surface.....	24
2.2.1	Nivellement géométrique	25
2.2.1.1	Principe	25
2.2.1.2	Précision et limitations.....	26
2.2.2	Positionnement par satellite : Global Navigation Satellite System.....	27
2.2.2.1	Principe	27
2.2.2.2	Précision et limitations.....	29
2.2.3	Interférométrie radar	29
2.2.4	Synthèse	34
2.3	Combinaison : état de l'art.....	35
2.3.1	Amélioration d'une mesure par apport de données auxiliaires	36
2.3.1.1	Amélioration de la connaissance des orbites satellites.....	36
2.3.1.2	Amélioration du déroulement de phase InSAR	37
2.3.1.3	Amélioration de la connaissance sur les corrections atmosphériques	37
2.3.2	Amélioration par la combinaison	39
2.3.2.1	Densification de champs de vitesses par intégration de données.....	39
2.3.2.2	Algorithmes de combinaison de données	41

Ce chapitre est consacré à une brève description des mouvements affectant la surface du globe, objet d'étude des mesures géodésiques. Après un état de l'art sur les techniques les plus couramment utilisées (nivellement, GNSS et InSAR), permettant de décrire les avantages et limitations de chacune des méthodes, un descriptif des méthodes de combinaison de ces techniques de mesures est effectué, afin de déterminer les différentes possibilités en vue de la description d'une nouvelle méthode.

2.1 Que veut-on mesurer ?

La description d'une méthodologie de mesure de la déformation de la surface de la Terre ne peut se faire sans une description au minimum succincte de ces déformations.

Sont distingués les mouvements lents des mouvements rapides. Les premiers correspondent à une déformation progressive de la surface, bien souvent au point d'être imperceptible à l'œil humain (par exemple certains affaissements ou glissements). Les seconds sont soudains, quasi-instantanés. Ils peuvent suivre des mouvements lents, et regroupent notamment les chutes de masses (blocs de pierre), les coulées de boues ou de laves, les avalanches, ou encore les effondrements de masses au-dessus de cavités. Les mesures géodésiques sont particulièrement utiles dans la mesure des premiers cités (les mouvements lents).

Sont brièvement décrits ici les risques dits géologiques de mouvements de masses solides à la surface terrestre : subsidence, glissements de terrain et mouvements tectoniques. Les déplacements rapides de masses (par exemple chute de blocs, avalanches) ne sont pas décrits dans cette étude, faisant l'objet de mesures spécifiques ayant pour objectif une alerte plus qu'une quantification.

2.1.1 Subsidence

La première définition – simple – d'une subsidence est un mouvement de la surface du sol en réponse à un déficit de support du sous-sol. Ce déficit peut être dû à un pompage (hydrocarbure, gaz, eau souterraine) ou à une extraction (minerais, pierre de construction, charbon). Le mouvement induit est le plus souvent vertical (vers le bas), mais une composante horizontale peut-être associée, parfois même aussi importante que la composante verticale (Allen et Mayuga, 1970).

Il est possible de distinguer deux types de subsidence :

- Les subsidences rapides. Celles-ci peuvent être de magnitude millimétrique à décimétrique voir dans de plus rares cas métrique, par an. L'origine de telles subsidences est principalement anthropique, plus précisément liées à tous types d'extractions de matières du sous-sol. Certaines origines naturelles sont possibles,

c'est le cas lors de l'effondrement de dolines, lié à l'érosion. Cet aléa fort présente donc un risque important pour les infrastructures impactées.

- Les subsidences lentes. Celles-ci sont majoritairement dues aux processus d'origine naturelle telle que la compaction lente des sédiments. De ce faible aléa (à l'échelle humaine) résulte un faible risque, quelques soient les enjeux.

Ainsi ce sont plutôt les subsidences rapides qui nécessitent une surveillance accrue. Ces affaissements peuvent en effet avoir des conséquences importantes, notamment sur les infrastructures (bâtiments détruits, pipelines coupés, ou encore routes dégradées). Les premières études de subsidences et des conséquences liées remontent aux années 20, aux Etats-Unis (Pratt et al., 1926). Diverses estimations du coût des dommages liés à la subsidence sont régulièrement menées. Citons l'estimation de 100 millions de dollars par an de dommages sur le sol américain par le National Research Council (National Research Council, 1991). Devant de tels enjeux l'intérêt de l'étude de ces mouvements par des mesures géodésiques et géophysiques apparaît nécessaire.

2.1.2 Glissements de terrain

Les glissements de terrain sont définis par le déplacement de masses instables (roche, débris, terre), le long d'une pente (Cruden, 1991). Ce risque naturel majeur est à l'origine de dégâts humains et matériels conséquents chaque année dans le monde. Pour exemple, aux Etats-Unis, on dénombre, par an, entre 25 et 50 décès et des pertes économiques liées à ces phénomènes estimées entre 1 et 2 milliards de dollars (Dai et al., 2002). Autre exemple, en Chine, ce sont en moyenne 125 morts par an et des pertes économiques d'environ 500 millions de dollars qui sont estimées (Li et Wang, 1992).

L'origine de tels glissements peut-être multiple, citons notamment les période(s) de précipitations supérieures aux normales, l'érosion, ou encore les tremblements de terre. À ces origines naturelles s'ajoutent des origines anthropiques : l'urbanisation croissante mène à la déforestation ainsi qu'à des excavations de grands volumes de terres, mettant à nu des terrains autrefois naturellement stables, diminuant de fait la capacité de percolation de l'eau dans le sol.

En dehors des glissements de terrains soudains, qui ne peuvent être, de fait, prédits, les glissements lents peuvent être étudiés afin de mesurer leur vitesse, direction, et ainsi diminuer le risque qu'ils représentent sur les populations et les biens qu'ils menacent. Les méthodes de la géophysique (par exemple résistivité électrique, Grandjean et al., (2006)) permettent d'estimer les caractéristiques physiques de ces glissements (par exemple volume concerné déplacé, profondeur de la semelle de glissement, caractéristiques physiques des roches). Les méthodes géodésiques permettent quant à elles de déterminer tout mouvement de surface lié au glissement.

2.1.3 Mouvements tectoniques

Le terme *tectonique* provient du grec *Tektôn* qui signifie « constructeur ». Ce domaine des Sciences de la Terre se consacre à la compréhension de la déformation des couches superficielles du Globe déterminant notamment la topographie et son évolution. Comme écrit précédemment, la déformation de ces couches superficielles mène à des déplacements de masses.

Ces déplacements de masses ont des effets différents sur la surface topographique, et sont décrits par leur taux de déformation. Le Tableau 1 catégorise ces taux de déformation de « extrêmement faible » à « extrêmement élevé ».

Classe	Description	Taux de déformation [mm/an]
AAA	Extrêmement élevé	> 100
AA	Très élevé	$10 < s < 100$
A	Élevé	$1 < s < 10$
B	Modéré	$0.1 < s < 1$
C	Faible	$0.01 < s < 0.1$
D	Extrêmement faible	$s < 0.01$

Tableau 1 : Classification des taux de déformation tectoniques selon Bonilla, 1982.

Les taux de déformation sont donc présents dans l'intervalle [< 0.01 ; > 100] mm/an. Ce spectre est tellement large qu'il ne peut être étudié par une seule et même technique. Les classes B à D peuvent être mesurées par l'étude des unités géologiques et de l'âge des strates qui la compose. Les taux de déformation des classes AAA à B peuvent être mesurés en surface par les méthodes géodésiques. Ce sont donc ces catégories qui sont susceptibles d'être l'objet d'une confrontation d'une méthodologie de combinaison de mesures géodésiques, objet de la thèse.

2.2 Méthodes de mesure de la déformation de surface

De nombreux processus (géologiques ou humains) façonnent et modifient la surface de la Terre. Les mesures géodésiques permettent de décrire quantitativement, dans le temps et l'espace, son évolution. Ces mesures, spatiales ou terrestres, sont donc utilisées afin d'étudier les processus liés. Les mesures de la déformation de surface peuvent être assurées par plusieurs techniques, citons par exemple : le positionnement par satellite GNSS (Global Navigation Satellite System), l'interférométrie radar à synthèse d'ouverture (InSAR), la tachéométrie, le nivellement, la micro-gravimétrie, l'inclinométrie, la fibre optique, la

photogrammétrie ou les mesures optiques. Sont brièvement décrites dans cette section les trois techniques de mesures les plus utilisées dans le cadre du suivi de déformations de surface et utilisées dans notre étude : le nivellement, le GNSS et l'InSAR.

2.2.1 Nivellement géométrique

2.2.1.1 Principe

Les mesures de nivellement incluent différentes techniques : barométrique, hydraulique, optique géométrique (direct) ou optique trigonométrique (indirect).

Les techniques de nivellement hydraulique et barométrique sont parmi les plus anciennes mesures connues de dénivelées, dont les origines remontent à l'Antiquité. Les mesures optiques sont plus récentes. Or ces mesures sont parmi les plus précises dans le cadre de mesures de dénivelées sur des distance moyennes (plurikilométriques), et étaient les seules capables de fournir une précision millimétrique du mouvement vertical (Jouanne et al., 1995, 1998; Nocquet et al., 2016) avant l'apparition des mesures satellitaires (et notamment le GPS). Le nivellement différentiel est d'abord utilisé pour la création de réseaux de repères permanents, bases de tout projet de création d'infrastructure.

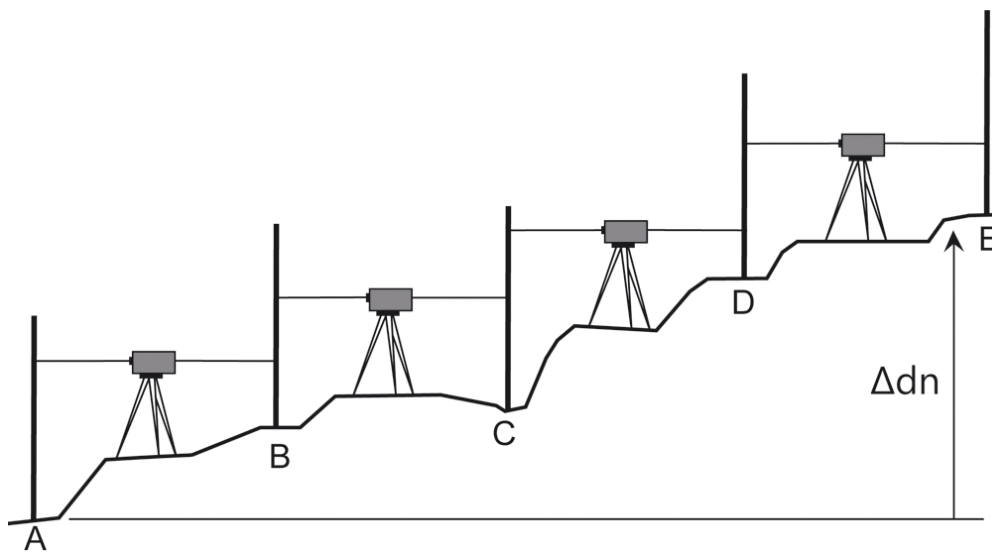


Figure 2-1 : Coupe schématique de la mesure de nivellement direct. Exemple d'un cheminement permettant la mesure de la dénivelée Δdn entre le point A et le point E. (Source : IGN)

Dans le cadre de suivi de mouvement du sol, des campagnes de mesures successives permettent de mesurer des changements d'altitude Δdn en fonction du temps. Pour ce faire, un opérateur mesure des altitudes sur une mire verticale, avec un niveau numérique ou optique (Figure 2-1). Sur un profil (cheminement), à partir d'un point dont l'altitude est connue (A), plusieurs points stables (B, C et D) sont choisis pour atteindre le point final (E),

par une succession de visées avant/arrière dont le nombre et l'emplacement dépendent de la distance à parcourir. Les mesures issues d'une campagne de nivellement sont alors relatives à – au minimum – un point initial, qui permet d'ajuster différents profils contenant ce(s) même(s) point(s) (Jouanne et al., 1995, 1998; Nocquet et al., 2016). Cependant, comme un seul point ne permet pas de vérifier le déplacement éventuel de l'ensemble du cheminement (dans le cas où le point d'appui serait lui-même affecté par la déformation), sont utilisés autant que possible au minimum deux points connus, suffisamment éloignés l'un de l'autre, afin qu'ils ne puissent pas être affectés de la même déformation locale. L'utilisation de trois points (triplet) et plus permet d'augmenter les chances de mettre en évidence les points instables dans le référentiel utilisé.

2.2.1.2 Précision et limitations

Suivant la configuration du levé, la précision de la méthode varie de 0.5 à $2\text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$ (Bossler, 1984). Les outils récents (niveaux et mire Invar à code barre) permettent aujourd'hui d'atteindre une précision de $0.3\text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$. Cette précision est liée à de nombreux facteurs :

- Précision nominale des équipements (par exemple niveau, mire)
- Défaillance humaine lors du suivi de la procédure de mesure
- Type de levé (par exemple nivellement double, polygones compensés)
- Corrections appliquées, par exemple correction de niveau apparent (prise en considération de la correction de la sphéricité de la terre et de la correction de la réfraction atmosphérique), variation de l'élongation de la mire en fonction de la température, erreurs de collimation, correction astronomique, correction orthométrique

Ainsi lorsque ces facteurs sont maîtrisés, l'utilisation du nivellement permet d'obtenir des mesures précises de la déformation. Néanmoins son utilisation est aujourd'hui souvent remise en cause : le temps et les moyens humains nécessaires aux mesures rendent celles-ci coûteuses. En conséquence les mesures sont rarement effectuées plus d'une fois par an, ce qui peut nuire à l'étude de l'évolution de la déformation. De plus, quelles que soient les dimensions de la zone d'étude et les conditions (par exemple topographie, végétation, présence de cours d'eau), la mesure est effectuée par profils. Une densité spatiale satisfaisante de mesures peut donc s'avérer difficile à atteindre. C'est notamment le cas en terrain accidenté (montagne) où les dénivelés rendent extrêmement laborieuses les opérations de nivellement géométrique. C'est également le cas lorsque le terrain est couvert de végétation : les contraintes de visibilité tout au long du cheminement peuvent entraîner de longs détours. Enfin, les mesures ont pour support des repères physiques, le plus souvent matérialisés sous forme de bornes (par exemple béton, métalliques, vis dans la roche). Ces repères peuvent présenter des mouvements uniquement liés à l'instabilité de la borne elle-

même, voire même être détruits (sciemment ou non). Dans le cadre de suivi long-terme (plusieurs années à plusieurs dizaines d'années) ces problèmes marquent des sauts dans les séries temporelles, et donc une perte de la continuité temporelle.

2.2.2 Positionnement par satellite : Global Navigation Satellite System

2.2.2.1 Principe

Le terme GNSS, signifiant Global Navigation Satellite System peut être traduit par Système Mondial de Navigation par Satellite.

Un tel système est constitué d'une constellation de 18 à 32 satellites placés en orbite terrestre moyenne (entre 19 000 et 23 000 km au-dessus du niveau de la mer, Hager et al., 1991) et permet de fournir un positionnement dans le référentiel inertiel de la Terre.

Il existe actuellement quatre systèmes GNSS opérationnels : le système de positionnement mondial (GPS) des États-Unis, le système russe GLONASS et le système GALILEO de l'Union européenne, qui devrait être pleinement opérationnel d'ici 2020, tout comme le système chinois COMPASS. Le premier cité, le GPS, est le plus connu et utilisé actuellement. C'est en effet le premier système global pleinement opérationnel. Les premiers satellites ont été lancés en 1970.

Les systèmes satellitaires GNSS quels qu'ils soient se composent de trois composantes principales, appelées segments :

- Le segment spatial : Ce segment est constitué d'une constellation de satellites, en orbite à environ 20 000 km au-dessus de la terre. Chaque système GNSS possède sa propre constellation de satellites. Chaque satellite diffuse un signal comprenant (1) son identification, (2) le temps, (3) son orbite et (4) son statut (état).
- Le segment de contrôle : comprend un réseau au sol de stations comprenant des stations principales, des stations de transfert des données des satellites et des stations de surveillance. Concernant le système GPS, deux stations de contrôle principales (dont une de secours), quatre stations de transfert de données et dix stations de surveillance sont placées tout autour du globe. Afin de maintenir la précision du système, les stations de commande ajustent les paramètres d'orbite des satellites et de leurs horloges embarquées lorsque cela est nécessaire.
- Le segment utilisateur : il comprend l'équipement qui traite les signaux reçus du segment spatial (les satellites) et les utilise pour déterminer la localisation de l'utilisateur.

La base de la méthode du positionnement (Duquenne et al., 2005) est simple : la mesure du temps entre l'utilisateur et les satellites permet le positionnement de celui-ci par trilatération. Trois satellites sont donc nécessaires au positionnement, plus un afin de résoudre l'ambiguïté liée au temps. Ainsi, les récepteurs GNSS reçoivent les signaux

provenant des satellites. Ces signaux sont caractérisés par leur fréquence. Prenons l'exemple du système GPS (les autres systèmes GNSS sont conçus de manière similaire). Celui-ci fonctionne dans une portion du spectre appelée bande L (comprise entre 1 et 2 GHz). La bande L a été choisie notamment car elle est moins sensible que les basses fréquences au délai ionosphérique. Dans cette bande, trois fréquences sont utilisées : L5 (1176.45 MHz), L2 (1227.60 MHz) et L1 (1575.42 MHz). Ces signaux sont modulés par une séquence numérique (code pseudo-aléatoire). Chaque satellite utilise un code pseudo-aléatoire différent. Pseudo-aléatoire signifie qu'il se répète après un certain temps. Les récepteurs connaissent le code pseudo-aléatoire correspondant à chaque satellite : cela permet aux récepteurs de se synchroniser avec le signal pour un satellite particulier.

La fréquence L1 porte notamment la transmission du message de navigation, comprenant :

- Date et heure GPS
- L'état du satellite
- Données d'éphémérides par satellite, qui permettent au récepteur de calculer la position du satellite

Le fonctionnement sur plusieurs fréquences permet de plus une estimation du délai ionosphérique, car ces délais dépendent de la fréquence (milieu dispersif). Le passage dans la Troposphère est plus problématique : toutes les fréquences sont impactées de la même manière. L'application d'un modèle d'estimation de ces délais est donc nécessaire.

Le système utilise donc des récepteurs pour mesurer le temps de transmission des signaux provenant des satellites GNSS. Les signaux d'au minimum quatre satellites sont nécessairement observés pour pouvoir calculer une position.

Le post-traitement des données permet de calculer les coordonnées spatiales du récepteur et son évolution temporelle. Afin de réduire les erreurs liées aux décalages d'horloges des satellites, ainsi que les erreurs de connaissance des orbites et les erreurs atmosphériques, le traitement par double différence est effectué. Les différences de la phase (nombre de longueurs d'onde entières et déphasage résiduel) émise par un même satellite, observée sur deux récepteurs, sont soustraites : c'est le traitement par simple différence. Puis, pour deux récepteurs qui mesurent ce même signal, émis cette fois-ci par deux satellites, il est possible de calculer la différence de ces précédentes simples différences. Néanmoins le bruit lié aux instruments, les multi-trajets (réflexions des ondes sur des objets environnants), ou certains effets atmosphériques (ionosphériques et troposphériques), restent non atténués par cette méthode. L'utilisation de combinaisons de fréquences pour les biais ionosphériques, et de modèles pour les biais troposphériques est nécessaire pour atténuer leurs effets.

Ainsi la position du point mesuré (dont la référence est le centre de phase de l'antenne réceptrice) est calculée de manière journalière, selon trois composantes spatiales.

Le positionnement GPS étant réalisé par satellite, le géoréférencement des mesures est d'abord réalisé dans le référentiel de ces satellites (actuellement IGS14). Par la suite, par calcul, le géoréférencement précis est effectué dans le référentiel des stations de référence (le plus souvent une réalisation de l'ITRS (*International Terrestrial Reference System*) à une époque de référence, par exemple l'ITRF2014 (*International Terrestrial Reference Frame*) époque 2018.0.

Ainsi les réseaux GNSS fournissent des vecteurs déplacements et vitesses en trois dimensions selon une certaine gamme de fréquences d'échantillonnage, relativement à l'ITRF. Dans le cadre de mesures en continu (stations mesurant en permanence) des séries temporelles journalières, basées sur des mesures initiales toutes les 1 à 30 s, sont calculées, et des vitesses en sont déduites. Des observations épisodiques ou de campagnes temporaires peuvent également être menées, notamment pour améliorer la densité spatiale et temporelle des mesures.

2.2.2.2 Précision et limitations

La précision des mesures GNSS est complexe à estimer, tant elle dépend des conditions de mesures, du temps d'observation, du matériel utilisé, du type de post-traitement effectué, des modèles utilisés (par exemple délais atmosphériques), de la qualité, du nombre et de la répartition des stations de référence utilisées, ainsi que de la précision du référentiel. Néanmoins cette précision est estimée à 1 mm en position sur les composantes horizontales et 3 mm sur la composante verticale (Fuhrmann, 2018). En termes de vitesses, il a été démontré que des précisions meilleures que 1 mm/an sont possibles (par exemple Kieruf et al., 2013 ; Nguyen et al., 2016). Ces précisions nécessitent néanmoins des durées d'observation conséquentes, i.e. minimum 3 à 4 ans de mesures continues.

Les principales limitations de cette méthode sont liées à sa mise en place. Ces mesures impliquent en effet la création de points physiques stables, souvent des bornes en béton implantées profondément dans le sol, ou des mâts métallique permettant un centrage forcé et stable de l'antenne réceptrice. Cela à un coût, qui limite de fait la possibilité de densifier les zones étudiées. La densité de mesures continues dépasse rarement une borne au kilomètre carré. Il est possible d'augmenter cette densité par des mesures périodiques, mais la précision est moindre, les erreurs de manipulation plus fréquentes, et l'étude de mouvements transitoires est plus difficile.

2.2.3 Interférométrie radar

L'interférométrie satellitaire a pour principe de base l'émission et la réception d'un signal électromagnétique par antenne radar, positionnée sur satellite. Un satellite naviguant en orbite quasi polaire à une altitude d'environ 800 km, envoie un signal sur une zone définie, avec une période de retour de quelques jours (6 jours avec le tandem Sentinel-1a/b) à

quelques semaines (par exemple 35 jours pour les satellites Envisat et ERS). Selon une ligne de visée oblique (*LOS*, signifiant *Line Of Sight*, ou *ligne de visée du satellite*), un signal électromagnétique se propage à la vitesse de la lumière, sans être atténuée par l'atmosphère. Ce signal est complexe : il présente une amplitude, qui correspond à son énergie, et une phase qui, dans le plan orthogonal à la direction de l'onde, correspond à l'angle de rotation du champ électromagnétique. La géométrie de mesure (Figure 2-2) est propre à chaque satellite : on nomme *range* l'axe parallèle à l'axe de visée du satellite et *azimuth* l'axe tangent à l'orbite satellitaire. L'angle d'incidence θ correspond à l'angle entre la verticale et la direction de mesure *LOS*, et est par exemple d'environ 23° pour les satellites Envisat. Les images radar natives ont une résolution très faible de plusieurs kilomètres tant en *range* qu'en *azimuth*. Cette résolution rend les images natives inexploitable en tant que telles pour mesurer une déformation de surface.

Ces images natives sont donc traitées par la méthode *Synthetic Aperture Radar* (« Radar à synthèse d'ouverture »), permettant de passer d'une résolution plurikilométrique à une résolution décamétrique à métrique. Par exemple, un tel traitement sur images natives Radar Envisat permet de passer d'une résolution plurikilométrique à une résolution de 4 m par 20 m, en *azimuth* par *range*. De plus, la géométrie spécifique de mesure selon une ligne de visée oblique à la verticale mène à l'absence de mesure sur certaines zones masquées par des hauts topographiques. D'autre part la pente d'un terrain orienté face au satellite, si elle est supérieure à l'angle d'incidence, mènera à un effet de repliement de la phase. C'est justement la mesure de cette phase qui est intéressante, puisqu'elle inclut d'une part une information sur la distance entre l'antenne satellite et l'objet réflecteur présent au sol (mesure du temps de trajet) et d'autre part une information sur la nature physique de ces réflecteurs. Ces deux éléments sont mesurés par pixels, ainsi plusieurs objets sur un même pixel verront leurs caractéristiques moyennées. Enfin la notion de temps de trajet comprend un délai lié à la traversée de l'onde électromagnétique dans l'atmosphère. Néanmoins cette information seule n'est pas exploitable : le nombre total de rotation de phases étant inconnu, la distance correspondante n'est pas calculable. Il est donc nécessaire d'effectuer des soustractions de phases entre deux images pour obtenir des valeurs de déphasage permettant d'en déduire, entre autres, une différence de distance, puisque ce déphasage est propre à une onde électromagnétique de fréquence fixe et de vitesse connue. On parle ainsi d'interférométrie radar.

La technique de l'interférométrie a été mise en œuvre au début des années 90. On attribue le premier interférogramme à Gabriel et al. (1989), pour détecter des mouvements de la surface du sol sur des terrains agricoles. Plus tard, Massonnet et al., (1993) ont utilisé la technique afin de mesurer des déplacements cosismiques. De nouvelles applications ont suivi, notamment pour la mesure de la topographie et des déformations de celle-ci (Bürgmann et al., 2000 ; Hanssen, 2001). En faisant l'hypothèse que les propriétés physiques des cibles (réflecteurs) n'ont pas changé de manière significative entre deux prises de vue, il

est possible de calculer la différence (déphasage) entre les mesures de phase des deux images (une image *esclave* et une image *maîtresse*), telle la phase interférométrique φ_{ifg} :

$$\varphi_{ifg} = \varphi_s - \varphi_m$$

Avec φ_s et φ_m respectivement la phase mesurée pour un même pixel pour respectivement l'image *esclave* et l'image *maîtresse*. Ce déphasage dépend de la différence de trajet aller/retour. Cette différence peut avoir plusieurs origines telles que :

$$\varphi_{ifg} = \varphi_{topo} + \varphi_{orb} + \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{bruit} [2\pi]$$

Avec :

- φ_{orb} la variation d'orbite entre les 2 acquisitions (différence de positionnement du satellite entre les deux prises de vue)
- φ_{topo} le déphasage induit par la topographie vue sous deux angles différents entre les deux prises de vue,
- φ_{atm} la différence des retards atmosphériques entre les 2 acquisitions,
- φ_{def} un éventuel déplacement de la cible au sol entre les deux acquisitions, déplacement comportant une composante visible selon la direction LOS,
- Un bruit additionnel φ_{bruit} lié au changement de la nature de la cible entre les 2 acquisitions (par exemple Zebker et Villasenor, 1992).

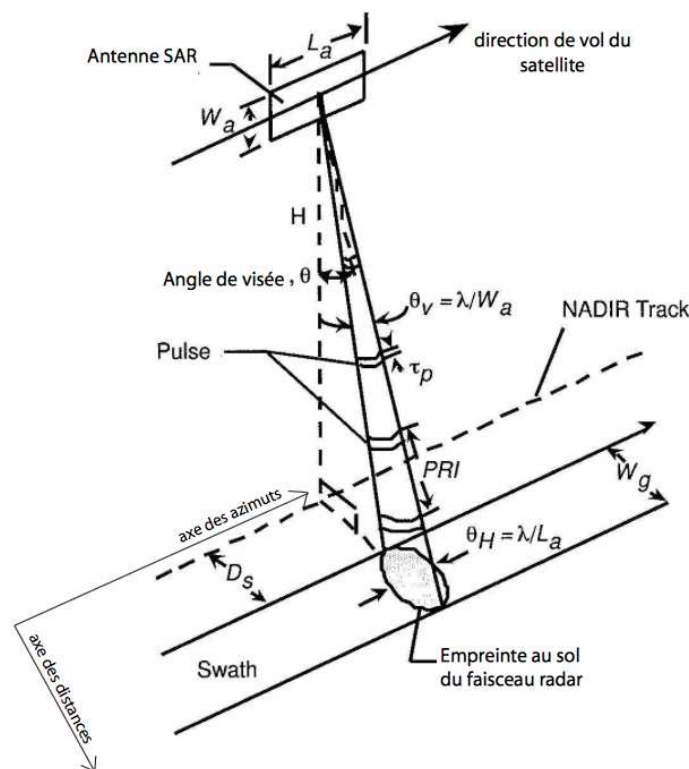


Figure 2-2 : Géométrie de la prise de vue d'une image radar pour l'interférométrie InSAR, (Cavalié, 2007)

Dans le cadre d'études d'une déformation de la surface, c'est la portion du signal liée à φ_{def} qui doit être étudiée. Si l'on considère φ_{orb} connu (connaissance des orbites précises des satellites, ainsi que φ_{topo} (par l'apport de la connaissance de la topographie par un modèle numérique de terrain), et φ_{bruit} négligeable, des limitations persistent, liées aux points suivants :

- Décorrélation géométrique : selon la longueur de la ligne de base perpendiculaire, directement liée à la distance entre les prises de vue, l'objet cible au sol présente une géométrie différente, et donc le signal retour qui le caractérise varie,
- Décorrélation temporelle : a lieu lorsque les caractéristiques physiques de la cible diffèrent entre deux prises de vue (par exemple différence de végétation entre deux prises de vues, alternance de couverture neigeuse),
- Délai atmosphérique : de l'ordre d'une frange, soit une demi-longueur d'onde (Goldstein, 1995 ; Zebker et al., 1997 ; Massonnet et Feigl, 1998), ce délai varie d'une prise de vue à une autre.

À la fin des années 1990, différentes équipes ont cherché à s'affranchir de ces limitations. L'un des développements, ayant pour but de réduire le biais atmosphérique consiste à additionner et moyenniser un ensemble du maximum d'interférogrammes indépendants possibles (technique appelée *stacking*). Cette approche utilise l'aspect temporellement aléatoire de ces délais atmosphériques. Dès lors, cette composante atmosphérique s'annule statistiquement, tandis que la composante de déformation (supposée ici constante) s'additionne (par exemple Sandwell et Price, 1998 ; Wright et al., 2001 ; King et al., 2003 ; Lyons et Sandwell, 2003 ; Fialko, 2006). Cependant, cette méthode ne peut s'appliquer ni dans le cas d'une déformation non permanente, ni sur des zones où la décorrélation temporelle est importante.

Afin de s'affranchir de ces limitations, une nouvelle approche InSAR multi-temporelle a été proposée (Ferretti et al., 2001), consistant à déterminer dans un ensemble d'interférogrammes les pixels ayant un comportement stable de rétrodiffusion du signal radar, c'est-à-dire non soumis aux décorrélations géométriques et temporelles. Ces pixels sont appelés PS pour *Permanent Scatterers* ou *Persistent scatterers* (réflecteurs permanents). La méthode nécessite de résoudre, pour chaque PS, un système linéaire d'équations (autant d'équations que d'interférogrammes) où les inconnues sont (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. Sur ces principes, des développements méthodologiques sensiblement différents ont été menés (par exemple Schmidt et Bürgmann, 2003 ; Werner et al., 2003 ; Hooper et al., 2004, 2007 ; Kampes, 2006a, 2006b).

Parmi les cibles susceptibles de générer des PS, on trouve, essentiellement :

- Les cibles de type infrastructures d'origine anthropique (par exemple bâtiments, routes, ponts, dalles, voies de chemin de fer, ou autres constructions civiles),
- Les cibles d'origine naturelle (par exemple affleurements rocheux),

S'ajoutent à ces cibles potentielles des PS artificiels passifs (de type coins réflecteurs) ou actifs (de type transpondeurs). La création de ces cibles peut permettre de pallier au manque de PS naturels ou anthropiques dans certaines zones d'intérêt (par exemple zones très végétalisées montrant une forte décorrélation temporelle).

L'analyse du comportement des cibles sur la trame spatiale des pixels peut être effectuée de deux manières différentes : pourra être considéré un réflecteur ponctuel dominant (approche PS-InSAR décrite précédemment, Figure 2-3 (b)) ou un réflecteur distribué (DS pour *Distributed Scatterer*, (Figure 2-3 (a)) dont la moyenne spatiale offre une bonne cohérence. Ce dernier cas correspond à l'approche SBAS pour *Small-BASeline* (par exemple Berardino et al., 2002 ; Lanari et al., 2004 ; Doin et al., 2011)

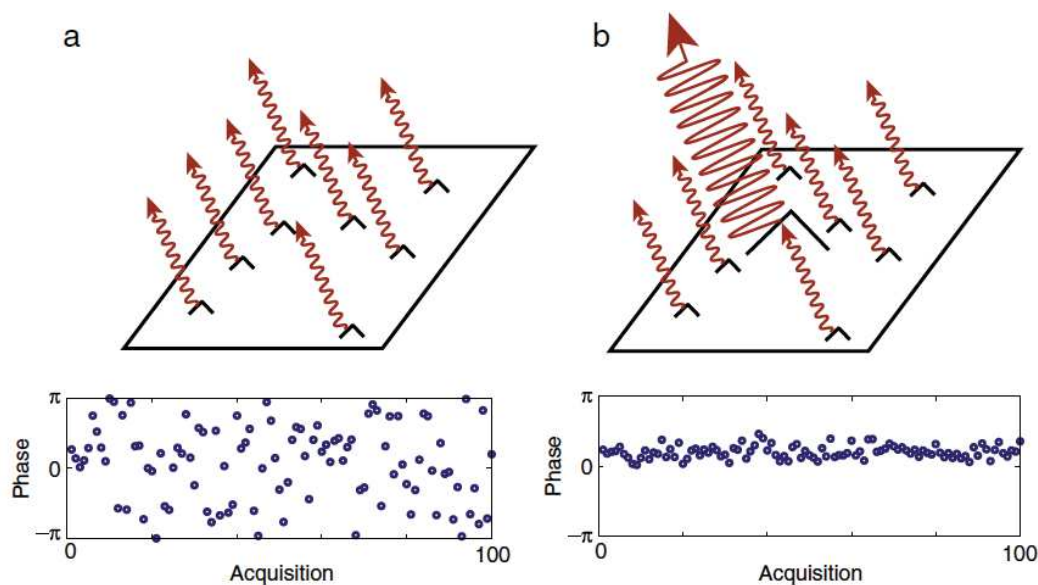


Figure 2-3 : Contribution de la réponse sur la phase des réflecteurs (resp. (a) DS et (b) PS) pour un pixel donné sur une image radar et signatures sur la phase mesurée associées Modifié d'après Hooper et al., (2012).

La plupart des chaînes de traitement utilisent l'une ou l'autre approche. Citons pour exemples MinTS (Hetland et al., 2012) et NSBAS (Doin et al., 2011), utilisant la technique SBAS. Certains algorithmes traitent les données radar selon les deux approches, c'est le cas de StaMPS (Hooper, 2008) ou SqueeSAR (Ferretti et al., 2011).

Dans le cadre de ce manuscrit, tous les résultats multi-temporels InSAR ont été traités avec StaMPS. Cet algorithme diffère des autres citées par sa manière de sélectionner les

réflecteurs permanents. La plupart des approches utilisent un index de dispersion de l'amplitude D_A tel que (Hooper et al., 2008) :

$$D_A = \sigma_A / \mu_A$$

Avec σ_A l'écart-type et μ_A la moyenne des amplitudes. Or cette approche fonctionne bien pour un fort rapport signal/bruit, principalement en zones urbaines. StaMPS ajoute la corrélation spatiale de la phase interférométrique (Hooper et al., 2004), permettant de sélectionner des PS avec une amplitude faible. Cette approche permet donc une densification des champs de vitesses en zones naturelles.

Les caractéristiques de la méthode InSAR la rendent aujourd'hui très intéressante dans le cadre d'études de mouvements du sol. Que ce soit dans le cadre de l'étude de déplacements cosismiques, post-sismiques, de suivi de volcans, de glissements de terrains ou de subsidence liée à des phénomènes naturels ou à des activités anthropiques.

2.2.4 Synthèse

Les trois méthodes de mesures géodésiques utilisées dans cette thèse ont été brièvement décrites. Ces trois méthodes ont été choisies car elles sont les plus représentées dans le cadre d'études de déformation de surface. Chacune de ces techniques montre de réels avantages ainsi que des limitations, récapitulés dans le Tableau 2 ci-après.

	Résolution temporelle	Résolution spatiale	Référence spatiale	Précision	Géométrie de mesure
GNSS	Haute : journalière (stations permanentes), ou Moyenne (campagnes de mesures)	Basse : mesures ponctuelles espacées de quelques kilomètres	Réseau de stations de références régionales (calcul différentiel)	Élevée : < 1 mm (planimétrie), 3 mm (vertical)	Nord, Est, Verticale
InSAR	Moyenne : quelques jours (mini. 6 pour Sentinel-1a/b) à quelques mois	Élevée : taille du pixel de l'image, résolution métrique à décamétrique	Point ou zone de référence	Moyenne : 1-6 mm (utilisation d'images en Bande C)	Ligne de visée du satellite, combinaison des composantes Nord, Est et Verticale

	Résolution temporelle	Résolution spatiale	Référence spatiale	Précision	Géométrie de mesure
Nivellement géométrique	Basse : mesures le plus souvent trimestrielles à annuelles,	Basse à moyenne : mesures par profils, souvent espacés de plusieurs kilomètres	Au minimum un point de référence appartenant à un réseau géodésique	Élevée: de 0.3 à 2 $mm/\sqrt{km}$	Verticale

Tableau 2 : Caractéristiques globales (résolutions spatiale et temporelle, référence spatiale, précision et géométrie mesurée) comparées pour les techniques de mesures utilisées : GNSS, InSAR et nivellement. Données modifiées d'après Bossler (1984) et Fuhrmann (2018).

On observe une grande diversité dans ces paramètres, biais ou limitations affectant chacune des techniques de mesures. Il en ressort qu'aucune technique n'est en mesure de répondre parfaitement à tous les critères de résolutions spatiale et temporelle, de précision ou de géométrie(s) mesurable(s). Au contraire, une certaine complémentarité apparaît. Les techniques de plus haute précision (GNSS, nivellement) présentent les moins bonnes résolutions spatiales. Au contraire de l'InSAR, qui présente une précision inférieure, mais une résolution sans égale. De cette complémentarité naît l'idée d'une combinaison des champs de vitesses, issus de ces différentes techniques de mesures.

2.3 Combinaison : état de l'art

De nombreuses tentatives de combinaison de mesures géodésiques ont été décrites et publiées ces dernières années (par exemple Burdack, 2013 ; Lu et al., 2015 ; Fuhrmann et al., 2015).

Aucune méthode de combinaison de données géodésiques ne peut se targuer d'être à la fois automatique et fiable (Fuhrmann et al., 2018), autrement dit assurer sans contrôle de la véracité physique de la déformation annoncée en chaque point d'une grille, à une incertitude près estimée. Néanmoins les techniques et paramètres choisis dans le cadre de cette thèse répondent à une demande réelle et récurrente, tant dans un cadre industriel que dans la recherche académique. En effet, les réseaux géodésiques terrestres (GNSS, tachéométrie, nivellement) ainsi que satellitaire (InSAR) ne cessent de se densifier, couvrant des zones cibles pour la gestion du risque et de l'aléa. Ces techniques et instruments ne présentent pas la même précision ni la même résolution, mais sont complémentaires (section 2.2.4), menant à l'idée de combinaison, permettant de caractériser au plus précis la déformation du sol associée à des processus variés (par exemple mouvements tectoniques,

éruptions volcaniques, extraction de minerais et d'hydrocarbures). D'où la nécessité de créer un outil logiciel à même de combiner des données géodésiques (champs de vitesses) variées prenant en considération leurs incertitudes réelles. Cette section doit donc permettre la description du contexte bibliographique de la thématique de la combinaison de mesures géodésiques.

Le terme de *combinaison*, provenant du latin *combinatio* et signifiant *assemblage*, a pour définition (pour l'usage qui en est fait ici, et selon le dictionnaire Larousse (2017)) une « action de combiner, d'arranger, de réunir des éléments divers pour former un tout, un ensemble ». Combiner étant l'action de « réunir des choses en les arrangeant », « les intégrant », « les mettant dans un certain ordre, une certaine disposition, en vue d'un certain résultat ». Une combinaison de données géodésiques s'apparente donc à une intégration de ces données tout en les arrangeant (1) séparément (étude interne à chaque technique pour déterminer poids relatifs et artefacts) et (2) entre-elles (pour déterminer le poids relatif entre les techniques). Le terme de fusion parfois utilisé se réfère à un cas particulier de combinaison où le poids relatif entre les données est constant et unitaire.

Des méthodologies de combinaisons de données géodésiques en vue de l'obtention de champs de vitesses ou de modèles de déformation de la surface terrestre ont déjà été développées. Les paragraphes qui suivent consistent en une description détaillée d'une sélection représentative des différentes méthodes qui ont été proposées en ce sens au cours des dernières années, afin de mieux contextualiser le travail effectué dans cette thèse. Les objectifs de ces combinaisons peuvent largement différer, le choix est fait de traiter séparément les méthodes de combinaison permettant d'une part l'amélioration (précision et/ou exactitude) d'une technique de mesure et d'autre part la création de modèles de déformation et de vitesses.

2.3.1 Amélioration d'une mesure par apport de données auxiliaires

L'objectif premier des solutions de combinaison est de pallier aux lacunes d'une technique de mesure par l'apport d'une autre. Cet apport peut consister en une quantification d'un phénomène, paramètre, caractéristique, peu, pas ou mal contraint par la première technique de mesure.

2.3.1.1 Amélioration de la connaissance des orbites satellites

Certaines études utilisent des données GNSS directement dans le traitement InSAR pour améliorer la précision de la détermination de l'orbite (Gourmelen et al., 2010), notamment dans le cadre de la mesure via InSAR de déformations de très grandes longueurs d'onde (centaine(s) de kilomètres). Néanmoins il a été montré que les algorithmes de traitements multi-temporels InSAR récents, associés à l'utilisation des orbites précises des satellites, permettent de négliger cette erreur dans le cadre de déformations mesurées sur quelques kilomètres à dizaines de kilomètres (Shirzaei et al., 2011). L'application de la méthodologie à

la mesure de déformations de très grandes longueurs d'onde (>100km) est un objectif mineur de cette thèse car peu commun. Néanmoins les sections suivantes de présentation de la méthodologie et son application tendent à montrer que la mise en référence altimétrique de l'InSAR sur le GPS (telle que montré par exemple par Hammond et al., (2010) dont l'étude est décrite au paragraphe 2.3.2.1) est aussi utilisée afin de minimiser les erreurs d'orbites satellites de très grandes longueurs d'onde.

2.3.1.2 Amélioration du déroulement de phase InSAR

Certaines méthodes ont été mises en place afin d'améliorer le déroulement de la phase interférométrique lors du traitement InSAR. Rappelons qu'une erreur de déroulement de phase peut avoir différentes origines : bruit sur les interférogrammes causé par des décorrélations spatiales et/ou temporelles, artefacts atmosphériques ou mauvaise estimation de la phase topographique (liée à un MNT trop peu résolu par exemple) amenant à des effets de crénelage à l'origine de sauts dans le déroulement de la phase interférométrique ou de mesure de frange non liées à la déformation. En dehors des techniques classiques d'amélioration du déroulement de phase par apport de MNT externe (Chaubey et al., 2016), certains auteurs ont mis en place une méthodologie permettant la mise en contrainte de la phase interférométrique par des valeurs issues du GNSS (Costantini et al., 2010 ; Shanker et al., 2010). Malgré les résultats de ces deux études, unanimes quant à l'apport en termes de précision et fiabilité de données externes tel que le GPS, le problème de la densité spatiale minimale de stations GPS n'y est pas mentionné. Ce problème est pourtant limitant dans l'application de telles solutions lorsque les zones cohérentes (franges d'interférences continues) ne sont pas reliées les unes aux autres (présence de zones végétalisées), mais pas dans les contextes favorables (faible végétation, environnement urbains), dans lesquels les zones cohérentes sont reliées les unes aux autres. Ces restrictions peuvent donc être limitantes dans l'optique d'une méthodologie applicable à de nombreux cas d'étude y compris des cas avec des densités faibles et répartitions spatiales non optimales de stations de mesures.

2.3.1.3 Amélioration de la connaissance sur les corrections atmosphériques

De nombreux auteurs se sont penchés sur l'aspect atmosphérique, aspect limitant la précision des techniques de mesures géodésiques spatiales. Ces études s'intéressent à la description succincte de différentes méthodes de combinaison de données géodésiques ou géophysiques visant à comprendre, mesurer et maîtriser l'origine de ces délais.

En effet, l'une des difficultés et limites majeures de l'InSAR est liée à la difficulté d'estimation des variations spatiales et temporelles du délai de passage de l'onde électromagnétique dans l'atmosphère. De nombreuses études ont donc tenté d'améliorer cette estimation en se focalisant principalement sur la troposphère.

L'une des premières solutions envisagées consiste en une atténuation des artefacts atmosphériques basée sur de longues séries temporelles InSAR qui, statistiquement verront s'annuler les effets aléatoires dans le temps et l'espace de ces artefacts (Zebker et al., 1997 ; Ferretti et al., 2001 ; Berardino et al., 2002). Mais l'hypothèse d'artefacts aléatoires dans le temps et l'espace peut être limitée. Dans certains cas par exemple, les effets de la topographie sur l'atmosphère et la saisonnalité d'événements climatiques peuvent affecter la mesure temporelle de manière non aléatoire. Les séries temporelles obtenues restent ainsi affectées de ces biais atmosphériques non aléatoires. La distinction entre déphasage lié à l'atmosphère et déphasage lié à une déformation est donc difficile. Une calibration de l'évolution de la phase atmosphérique affectant la mesure de déformation est donc nécessaire.

Ainsi des méthodes consistant à déterminer les variations spatio-temporelles du délai atmosphérique par intégration de sa mesure par un réseau GPS ont été développées et décrites. Citons l'étude de Williams et al. (1998), qui intègre à une sommation d'interférogrammes des délais troposphériques issus du calcul sur des stations GPS réparties sur la zone d'étude (Californie du Sud). Les auteurs gèrent la limite liée à la problématique de densité spatiale de stations GPS. Du fait de leur faible densité, les données GPS sont interpolées par krigeage pour augmenter leur densité et être comparées aux interférogrammes. Malgré cela l'interpolation résultera toujours en une précision faible du résultat final là où la densité originelle de stations GPS est faible. Emardson et al., (2003), avec une approche similaire et sur la même région d'étude (Californie du Sud), apporte une quantification précise de l'apport de cette méthode de combinaison de données atmosphériques GPS sur l'InSAR et GPS. Cette précision est exprimée sur la mesure de la déformation : pour mesurer une déformation lente de 1 mm/an sur une distance de 10 km, avec une mesure SAR tous les 7 jours, il est nécessaire d'utiliser 2.2 ans de données.

Ces méthodes sont applicables à des zones d'études contenant une densité de stations GPS « suffisante ». Cette densité requise peut dépendre du contexte topographique et météorologique, ces contextes pouvant montrer un degré très élevé de complexité (e.g Bastin et al., 2007). À titre d'exemple les études citées précédemment se basent sur un nombre de stations GPS compris entre 50 (Williams et al., 1998) et 126 stations (Emardson et al., 2003), sur une aire d'environ 400 km par 400 km. De telles densités sont très rares dans le cadre de projets d'envergure classique, notamment industriels, rendant difficile l'application d'une telle méthode à tous les projets. Seules les méthodes se basant sur des grilles de délais atmosphériques issus de modèles météo utilisant des données GPS (délais) interpolées (par exemple ERA-Interim ou WRF) sont applicables quelle que soit la zone d'étude (Jolivet et al., 2001).

2.3.2 Amélioration par la combinaison

Les méthodes d'amélioration des techniques de mesure par l'apport de mesures externes permettent de mieux contraindre les champs de vitesses et les incertitudes associées (section 2.3.1). Toutefois les notions de densification des champs de vitesses (amélioration de la résolution spatiale), d'amélioration de la résolution temporelle de la mesure du phénomène ou encore de flexibilité d'utiliser différentes méthodes de mesure ne sont pas abordables par ces approches. Seule la création d'un modèle combiné peut répondre à tous ces objectifs.

2.3.2.1 Densification de champs de vitesses par intégration de données

On observe tout d'abord dans ces méthodologies de combinaisons une volonté d'obtenir un champ de vitesses verticales dense. Pour cela, la composante verticale enregistrée par le GPS est utilisée pour discriminer les vitesses selon les trois dimensions spatiales, et les interférogrammes InSAR permettent d'obtenir un réseau dense.

L'étude de Catalão et al., (2010) est un exemple type, ayant pour but de mesurer un champ de vitesses verticales de haute résolution spatiale par l'intégration de données GPS (32 stations au total) et InSAR en géométries ascendante et descendante (57 images ENVISAT sur la période 2006-2009) sur les îles volcaniques Pico, aux Açores. Une fois les données InSAR traitées (algorithme PS-InSAR), les composantes Est et Nord de la déformation sont estimées par interpolation (technique non mentionnée) du champ de vitesse issu des données GPS. Ces composantes sont géométriquement retirées aux vitesses InSAR et un champ de vitesses verticales v_{PS}^v est obtenu, tel que :

$$v_{PS}^v = \frac{1}{u_v} (V_{PS} - \hat{v}_{GPS}^e u_e - \hat{v}_{GPS}^n u_n)$$

Avec u_e , u_n , u_v les composants du vecteur unitaire pointant du sol vers le satellite, V_{PS} la composante le long de la ligne de visée radar de la déformation du terrain et $\hat{v}_{GPS}^e$, $\hat{v}_{GPS}^n$ les composantes de vitesses (resp. selon la composante Est et Nord) d'un site GPS sur un système de référence géodésique régional ou mondial.

Les auteurs répondent de plus à la problématique du géoréférencement : l'écart moyen entre les (1) vitesses verticales GPS et les (2) vitesses verticales issues de la combinaison des résultats PS-InSAR en double géométrie est calculé et retiré aux vitesses verticales issues de la combinaison PS-InSAR/GPS. Pour cela, le décalage D entre les vitesses verticales InSAR et GPS est calculé en minimisant la différence suivante :

$$E = \sum_{i=1}^{N_{GPS}} \{\mu(v_{PS}^v)(i) + D - v_{GPS}^v(i)\}^2$$

Où N_{GPS} est le nombre de stations GPS, $\mu(v_{PS}^v)$ est la valeur de vitesse médiane de réflecteurs permanents compris dans un rayon de 200 m autour de la station i GPS, et D une fonction de transformation à 4 paramètres.

Les auteurs obtiennent ainsi un champ de vitesses combiné géoréférencé dans la version 2005 de la réalisation du référentiel international terrestre ITRF. L'époque de référence n'y est pas mentionnée.

Les limites de cette méthode sont multiples. Tout d'abord malgré le fait que les stations GPS forment un réseau dense si l'on compare à bon nombre de sites d'études, cette densité ne permet pas de mesurer des hétérogénéités locales de déformation. Ainsi le champ de vitesse verticale final issu du retrait des composantes Est et Nord à l'InSAR pourra être largement affecté de vitesses de composantes Est et Nord non corrigées par le GPS, car non mesurées. L'application de cette méthode nécessite une couverture spatiale de stations GPS importante et bien répartie. Ceci étant relativement rare dans de nombreux cas de figures (champs miniers et pétroliers, pompages de nappes phréatiques) il apparaît difficile d'imaginer reproduire cette méthodologie sur des thématiques autres que la mesure de grandes longueurs d'ondes de déformation (mouvements inter-sismiques, rebond isostatique, subsidences étendues avec faibles gradients de déformation etc.).

De nombreux autres exemples illustrant la nécessité d'améliorer la connaissance du champ de vitesses par la densification du réseau de points mesurés existent. Citons Hammond et al., (2010) qui discutent de l'apport du GPS sur l'InSAR dans la précision de l'estimation du champ de vitesse. Bernardino et al., (2002) intègrent des valeurs de vitesses le long de la ligne de visée des satellites à un champ de vitesse GPS projetées sur ces mêmes lignes de visées. Les vitesses InSAR sont issues d'une très longue série temporelle InSAR de 17 ans (archives ERS puis ENVISAT traitées par une approche SBAS, Bernardino et al., 2002). L'intégration consistant ici en un calcul d'une rampe linéaire bidimensionnelle basée sur la différence entre les vitesses GPS et les vitesses InSAR. Le résultat permet de placer le champ de vitesses InSAR dans la référence du GPS et réduit l'écart moyen quadratique entre les vitesses GPS et InSAR de 0.69 mm/an à 0.35 mm/an.

Les limites de cette méthode sont proches des limites citées précédemment : forte densité et bonne répartition spatiale des stations GPS requise et impossibilité de mesurer les petites déformations avec le GPS. De plus cette méthode ne permet pas de calculer un champ de vitesses verticales. Enfin, le gain mesuré en termes de précision est à mettre au crédit d'une série temporelle InSAR exceptionnellement longue (17 ans) permettant une connaissance fine d'un déplacement long-terme et constant, mais ne permettant pas la discussion de phénomènes transitoires.

2.3.2.2 Algorithmes de combinaison de données

Le travail décrit par Burdack, (2013) et Simonetto et al., (2014) consiste en l'utilisation de la méthode globale inverse afin de combiner mesures GNSS et InSAR pour estimer les mouvements de surface. La combinaison de données est possible grâce à l'utilisation des moindres carrés dans les traitements InSAR (algorithme STUN, Kampes et al., 2006b) et GNSS (double-différence).

À cette fin, des données GNSS et InSAR sont simulées. Les données InSAR simulées sont traitées via l'algorithme STUN (Spatial and Temporal Unwrapping Network), qui permet un traitement des images radar par moindres carrés et une atténuation des délais atmosphériques par méthode différentielle. Les données GNSS simulées sont elles aussi traitées par méthode différentielle. Les auteurs font l'hypothèse que les ambiguïtés entières sont connues, c'est-à-dire que la phase interférométrique radar est déroulée en chaque point des interférogrammes et que les ambiguïtés entières du traitement GNSS double différences sont parfaitement connues.

Les limites de cette méthode sont principalement liées à l'hypothèse de départ (connaissance des ambiguïtés GNSS et déroulement de la phase interférométrique « parfait »), hypothèse forte, permettant l'utilisation de données simulées mais peu probable avec des données réelles. Cette hypothèse est néanmoins nécessaire à l'établissement d'une première solution, dans le cadre d'une étude de faisabilité méthodologique. L'application d'une telle méthodologie sur des données réelles – et donc la conclusion quant à la faisabilité de cette méthodologie – ne serait possible qu'en lui intégrant des algorithmes de (1) déroulement de phase interférométrique et de (2) estimation des ambiguïtés entières du traitement double-différence GNSS. Enfin, certaines problématiques restent en suspens concernant notamment l'influence du nombre d'images radar, de la densité de réflecteurs permanents ou encore de la distribution spatiale des stations GNSS.

Enfin des études ont permis de développer des méthodologies de combinaisons de données géodésiques visant à répondre aux objectifs suivants : tout d'abord (1) densifier un réseau de points mesurés historiquement (le plus souvent par nivellement géométrique, technique historique de la géodésie) qui permet de mesurer un panel plus large de longueurs d'onde spatiales de déformations et (2) atténuer l'effet des erreurs inhérentes aux techniques de mesures utilisées (par exemple délais atmosphériques ou erreurs d'orbites pour GNSS et InSAR, saut de déroulement de phase pour l'InSAR, référence instable pour le nivellement...).

Pour illustrer ces objectifs, prenons comme exemple deux études. La première décrit une méthodologie de combinaison de mesures par krigeage (Fuhrmann et al., 2015) et l'autre utilise la méthode du co-krigeage (Lu et al., 2015).

La première étude citée (Fuhrmann et al., 2015) se donne pour objectifs de palier les inconvénients de chacune des techniques de mesures : l'InSAR ne mesure qu'une direction

de la déformation (par géométrie orbitale), il n'est donc pas possible de retrouver les trois composantes spatiales de la déformation même en associant les deux géométries, la précision de l'InSAR est moindre que la précision du GNSS (pour une même longueur de série temporelle), qui a lui pour inconvénient sa densité spatiale de mesure souvent trop faible. Ainsi, l'objectif consiste en la combinaison des techniques de mesures géodésiques afin d'optimiser les forces et faiblesses de chacune : InSAR (images ERS et ENVISAT en géométries ascendante et descendante sur la période 1993-2011, traitement PS-InSAR), GNSS (76 stations permanentes), nivellement (plus de 40000 mesures sur plus de cent ans), et mesurer la déformation intra-plaque long-terme du Graben du Rhin.

La méthode est la suivante : premièrement la phase de déformation mesurée en InSAR est interpolée, interférogramme par interférogramme, et les vitesses ERS-ENVISAT sont estimées par méthode des moindres carrés. Ensuite les champs de vitesse InSAR, GNSS et nivellement sont interpolés, indépendamment, par krigeage ordinaire. Enfin ces champs interpolés sont fusionnés par un ajustement moindre carrés permettant d'estimer les composante Nord, Est et Verticale de la déformation.

La deuxième étude de Lu et collaborateurs (2015) concerne la région centre-Ouest de Taiwan. La technique du co-krigeage y est développée sur une zone d'intérêt de taille importante (environ 2000 km²) afin d'obtenir un champ de vitesses InSAR (traitement PS-InSAR sur 34 images ENVISAT entre 2005 et 2008) et nivellement (environ 300 points nivelés répartis sur la zone d'étude) combinés. Ce champ de vitesse combiné étant *in fine* comparé à des mesures GNSS.

La combinaison s'effectue en deux étapes majeures, tout d'abord une analyse des variogrammes et variogrammes croisés (notion de variogramme définie en section 3.3.2.2.3), calculés sur les données InSAR et Nivellement, puis un co-krigeage de ces mêmes données.

Les résultats permettent de discuter la déformation de surface liée au pompage d'eau dans les nappes phréatiques, ayant pour conséquence une subsidence mesurée en surface (Figure 2-4).

On distingue trois éléments sur ces figures. Tout d'abord, sur la majorité de la zone d'étude, une bonne correspondance entre les mesures de nivellement et d'InSAR, menant aux modèles d'estimation permettant l'analyse de la déformation à l'échelle de la région. Néanmoins, certaines déformations mesurées en InSAR (au Nord-Est et au Sud-Ouest notamment) ne sont pas mesurées en nivellement. De plus, certaines déformations sont mesurées en InSAR mais sont en dehors des mailles de nivellement : c'est le cas de la partie la plus au Sud. La solution de combinaison présente donc cette zone avec une vitesse de déformation nulle.

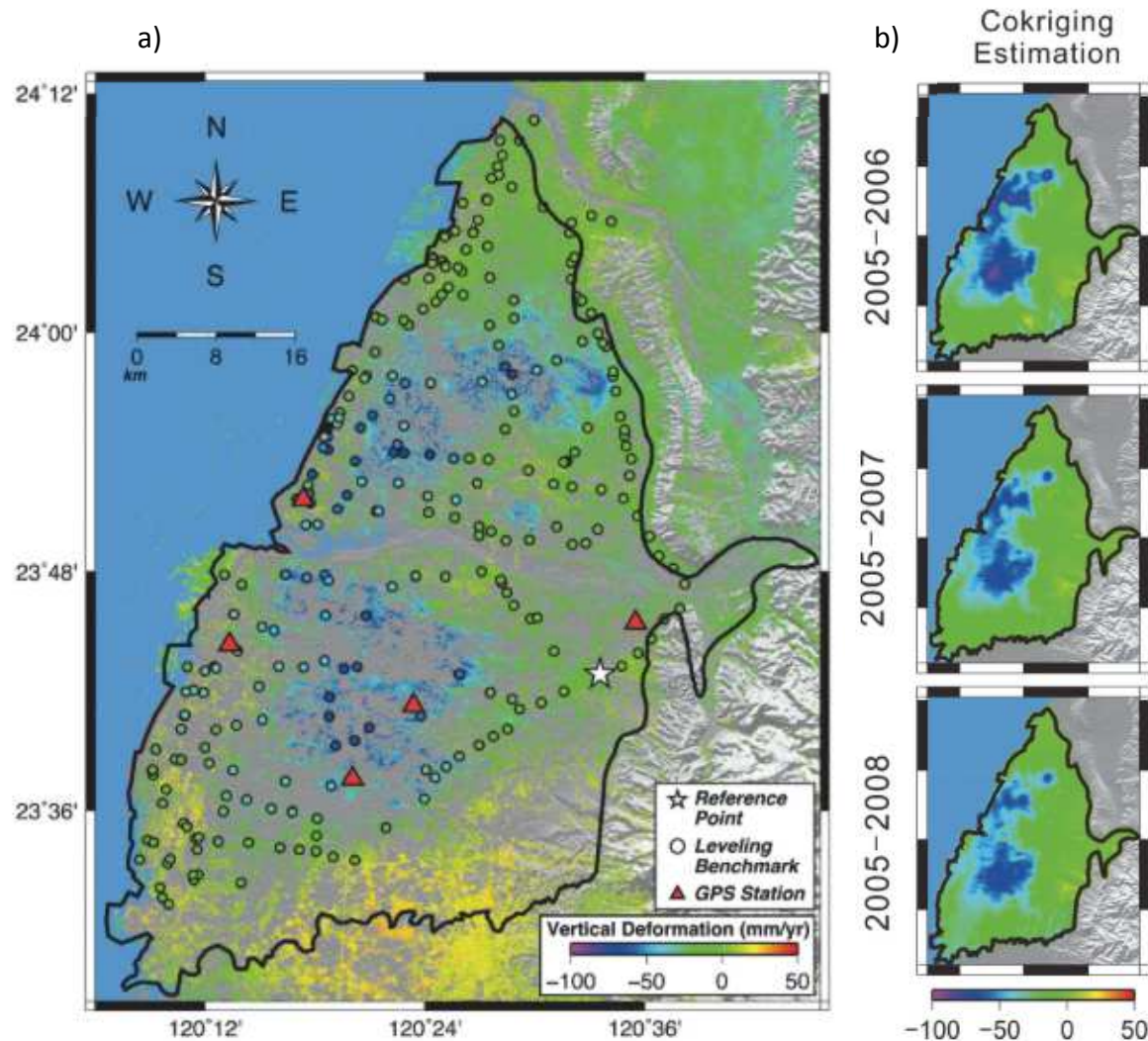


Figure 2-4 : (a) Déformation verticale mesurée par nivellement précis et PS-InSAR entre 2005 et 2008 à Taiwan, plaine fluviale de la rivière Choushui. (b) Estimation du champ de vitesses par cokrigage dans les trois intervalles (2005-2006, 2005-2007 et 2005-2008). (Modifié d'après Lu et al., 2015).

On observe des limites à ces applications de méthodes de combinaison par krigeage et co-krigeage. Du fait de la forte densité des données et de la répartition spatiale du nivellement, ces jeux de données sont des cas exceptionnels. De manière plus courante, les jeux de données seront nettement moins denses spatialement et temporellement dans les domaines d'application ciblés dans cette thèse (champs d'extraction pétroliers, gaziers ou miniers, les villes lors de creusement de tunnels de métros ou les zones de pompage de nappes phréatiques).

Malgré une densité conséquente de points nivelés sur la zone d'étude de Lu et al., (2015), on observe la difficulté des auteurs à paramétrer la solution de combinaison. On observe en effet des zones de déformation en InSAR qui ne sont plus visibles sur le produit de combinaison final, car les mailles de nivellement ne passent pas en ces zones (Figure 2-4). Enfin malgré l'utilisation d'une seule géométrie de mesure en InSAR la projection depuis la

ligne de visée du satellite vers la verticale n'est pas discutée, l'hypothèse de déformations sur le plan horizontal devant être non retenue. De ce fait, ils n'ont pas accès à toutes les longueurs d'onde de la déformation, et plus précisément ils ne conservent pas la finesse de mesure de la déformation originellement mesurée avec l'InSAR.

Les limites sont principalement liées à une même problématique : le nombre et la répartition spatiale des mesures, problématique affectant directement le produit de la combinaison (on ne peut estimer une déformation de longueur d'onde spatiale plus petite que la densité de mesure ne le permet) et indirectement via le lissage produit par la solution d'interpolation retenue. Ainsi les méthodes d'interpolation (krigeage et co-krigeage) supposent implicitement que l'échantillon est statistiquement représentatif (spatialement et temporellement) du champ de déformation. Le krigeage de l'InSAR fonctionne dans une majorité de cas où la densité de points permet la caractérisation de cette déformation. Mais le co-krigeage, qui utilise deux techniques de mesures, suppose que cette autre technique (GPS, nivellement, tachéométrie ou encore inclinométrie) est elle-même suffisante sur la zone considérée, c'est-à-dire tout aussi statistiquement représentative (spatialement et temporellement).

Il apparaît donc nécessaire de déterminer avec précision les objectifs auxquels la méthodologie de combinaison devra répondre, afin de déterminer les techniques et outils optimaux en vue d'une application sur différents cas d'étude, présentant des caractéristiques spatiales, notamment, différentes.

Chapitre 3

Combinaison de mesures géodésiques : proposition méthodologique

Sommaire

3.1	Introduction	48
3.2	Objectifs.....	48
3.3	Nouvelle proposition méthodologique	51
3.3.1	Mise en référence	51
3.3.1.1	Planimétrie	51
3.3.1.2	Altimétrie	53
3.3.2	Utilisation d'une double géométrie de mesures InSAR pour estimation de vitesses 3-D d'un bol de subsidence	55
3.3.2.1	Problématique.....	55
3.3.2.2	Densité de points de mesures.....	58
3.3.2.2.1	Description du problème	58
3.3.2.2.2	Choix d'une technique d'interpolation.....	62
3.3.2.2.3	Interpolation par krigeage	66
3.3.2.3	Propositions méthodologiques d'estimation des trois composantes spatiales de la déformation d'un bol de subsidence.....	73
3.3.2.4	Algorithme	76
3.3.3	Pondération des données	77
3.3.3.1	Nivellement	77
3.3.3.2	InSAR.....	77
3.3.3.3	GNSS.....	78
3.3.4	Champ de vitesses combiné par krigeage-regression pondéré	79
3.3.4.1	Méthode : description générale	79
3.3.4.2	Algorithme de la méthode de combinaison.....	80
3.3.4.3	Variantes de l'algorithme de la méthode de combinaison	83
3.3.4.4	Indice de fiabilité du champ de vitesse combiné	85
3.3.5	Environnement logiciel.....	85
3.4	Conclusion.....	86

3.1 Introduction

De nombreuses tentatives de combinaison de mesures géodésiques ont été décrites et publiées ces dernières années (par exemple Catalão et al., 2010 ; Burdack, 2013 ; Fuhrmann et al., 2015 ; Lu et al., 2015).

Ces techniques répondent à un objectif commun d'améliorer la mesure d'un phénomène connu (mouvement du sol) en densifiant sa mesure (spatialement ou temporellement).

Cet objectif est autant suivi dans un cadre industriel que dans la recherche académique. Les réseaux de mesures géodésiques terrestres (par exemple GNSS, nivellement, inclinométrie) ainsi que satellitaire (InSAR) se densifient, mais ne présentent pas la même précision ni la même résolution. Ces mesures présentent au contraire une certaine complémentarité. Ainsi, une fois combinées, elles permettraient de mieux caractériser la déformation du sol associée à des processus variés (par exemple mouvements tectoniques, éruptions volcaniques, extraction de minerais et d'hydrocarbures).

La combinaison doit donc venir pallier les limitations et insuffisances des différentes techniques prises séparément. Ajoutons à cela que les incertitudes natives issues des calculs inhérents à chaque méthode demandent un réajustement, puisque trop optimistes. D'où la nécessité de créer un outil logiciel à même de combiner des données géodésiques (champs de vitesses) variées prenant en considération leurs incertitudes réelles.

Notons par ailleurs que les termes décrivant les déplacements mesurés tels que *champs de vitesse* et *champs de déformation* d'une part, et *modèle de vitesses* et *modèle de déformation* d'autre part, sont bien différenciés. Les champs étant issus des résultats des calculs sur données SAR, GPS et nivellement, présentés en chapitre précédent, les modèles étant quant à eux issus des grilles intermédiaires à finales provenant des étapes de la méthode de combinaison.

Ce chapitre va donc permettre d'une part la description du contexte bibliographique de la thématique de la combinaison de mesures géodésiques et d'autre part d'explicitier les différentes étapes et choix techniques effectués pour la création d'une nouvelle méthodologie.

3.2 Objectifs

Le chapitre précédent a permis de mettre en lumière les avantages et limitations de chacune des techniques permettant la mesure de la déformation de la surface. L'objectif majeur de la mise en place d'une solution de combinaison de mesures géodésiques réside dans la possibilité d'utiliser les avantages de chaque technique afin de pallier les inconvénients des autres, tout en s'adaptant à un contexte précis (caractéristiques du champ de déformation, situation géographique rendant par exemple difficile la mesure

InSAR à cause d'une végétation trop dense). Ces avantages et limitations, liés aux caractéristiques des mesures – densité potentielle de points, délai minimum entre mesures, emprise maximale de mesures, incertitudes absolues et relatives, historique d'archives utilisables, mais aussi moyens logistiques à mettre en œuvre et coût – encadrent la détermination des objectifs.

Ainsi le développement de la méthodologie proposée dans ce chapitre s'appuie sur les objectifs décrits dans les points suivants.

- (1) **Utilisation d'un nombre variable de techniques de mesures géodésiques de déformation de surface.** Cette flexibilité est nécessaire pour l'application à de nombreux cas de figures rencontrés aussi bien dans le cadre de projets de recherche que dans l'industrie. En effet, de par la nature de la zone d'intérêt (par exemple étendue spatiale, accessibilité, présence et densité de végétation, degré d'urbanisation, complexité topographique, type et variabilité climatique), et de par les moyens humains, techniques ou financiers différents selon les cas, aucune étude ne peut être l'exact homologue d'une autre. De plus de nombreuses zones d'études comportent des archives de données historiques. C'est notamment le cas pour les suivis de subsidences liées à l'extraction (de minerai, de pétrole/gaz ou d'eau) et à l'excavation (création de tunnels), mais aussi dans le cadre de glissements de terrain ou de toute zone proche d'infrastructure importante (ouvrages d'art de type barrage, viaduc etc.). Dans ces zones d'étude, des mesures ont souvent été faites dans le but de détecter et mesurer d'éventuelles déformations locales de la topographie liées à l'activité humaine ou à des phénomènes naturels. Historiquement c'est le nivellement qui est utilisé, mais depuis les années 1990, les systèmes GNSS et plus particulièrement le GPS sont utilisés. Il n'est aujourd'hui pas rare de trouver des archives de mesures GPS permanentes, semi-permanentes ou de campagnes de plus de 10 voire parfois 20 ans, avec l'avantage majeur vis-à-vis du nivellement de la mesure des trois composantes spatiales de la déformation. Plus récemment les données d'interférométrie satellitaires sont venues compléter le panel d'archives de mesures géodésiques disponibles avec de nouveaux arguments importants : la possibilité d'accéder à des archives historiques antérieures à la décision de mesure et la capacité à obtenir une densité spatiale de mesures importante. L'étude – sous réserve de présence d'images sur la zone étudiée – de la stabilité passée de la topographie en cette zone devient possible. Ces points illustrent bien la nécessité, pour la solution de combinaison, d'un haut degré de flexibilité quant au nombre et aux types de données d'entrée utilisables.
- (2) **Mesure de différentes échelles temporelles de la déformation, depuis les signaux transitoires aux signaux long-terme.** Afin de discuter de l'évolution temporelle d'une déformation, il est nécessaire de s'appuyer sur les caractéristiques des méthodes géodésiques employées. La redondance temporelle des mesures – la fréquence – est

un facteur limitant dans l'étude de phénomènes affectant la topographie. Tel que montré dans le chapitre précédant, les fréquences varient entre la seconde (GNSS), quelques jours (InSAR), voire parfois mois à années (nivellement, suivant le cas). La combinaison de ces mesures ne pourra pas directement prendre en considération cet aspect fréquentiel. C'est-à-dire qu'il n'est pas question ici d'obtenir une solution combinée de résolution temporelle supérieure à la moins bonne résolution temporelle des mesures utilisées. Par exemple, la combinaison de données GNSS à 0.1 Hz de fréquence native et de nivellement mesuré annuellement ne sera pas une solution toutes les dix secondes. La solution sera donc calculée sur des valeurs de vitesses issues des différentes techniques de mesures, sur des périodes variables. Le nombre et la durée de ces périodes permettra de discuter la déformation court-terme (courtes périodes de quelques jours à quelques mois) à long-terme (une à plusieurs années, voire décennies), ou de la présence de signaux transitoires, pour des périodes courtes (quelques jours/semaines possibles en associant mesures GNSS et InSAR par exemple).

- (3) **Mesure de différentes échelles spatiales de la déformation.** La problématique de l'observation des différentes échelles de la déformation et sa conservation lors de la combinaison est une problématique majeure à prendre en considération lors des choix techniques de la méthode de combinaison. Être à même de mesurer sur une zone d'étude donnée différentes dimensions de déformations, de quelques dizaines de mètres à quelques dizaines de kilomètres est donc un objectif majeur. La combinaison doit donc minimiser autant que possible le lissage des courtes longueurs d'onde spatiales de la déformation (par exemple observé sur Lu et al., 2015), d'une part, et garder l'information sur les grandes longueurs d'onde de la déformation d'autre part.
- (4) **Mise en référence des techniques de mesure.** La mise en référence de données géodésique est un point important d'une méthodologie de combinaison de ces données. Ce point peut donner lieu à des approximations qui, si elles ne sont pas rigoureuses d'un point de vue géométrique, sont la plupart du temps suffisantes, l'erreur liée à cette mise en référence étant négligeable face aux incertitudes des mesures elles-mêmes. Citons Fuhrmann et al. (2015) qui combinent champs de vitesses issus de points nivelés, de traitements InSAR et de GPS malgré des systèmes de références différents. En dehors du système de référence, il est nécessaire d'harmoniser les références absolues des vitesses de chacune des techniques de mesures. Ainsi, la volonté de la méthodologie présentée dans cette thèse étant une application potentielle à des cas de figures très hétéroclites (en termes de dimensions spatiales de la déformation, de magnitude maximale de déplacement ou d'utilisation de méthodes diverses avec des géométries de mesures très différentes),

il apparaît nécessaire d'y inclure un module d'harmonisation des références des techniques de mesures.

- (5) **Combinaison de valeurs de champs de vitesses pondérés via leurs incertitudes.**
Pour obtenir des valeurs d'incertitudes réalistes, il n'est pas possible de se contenter des incertitudes issues des spécifications des constructeurs d'instruments de mesures. En effet ces spécifications sont théoriques, pour des conditions de mesures idéales (conditions de mesures en laboratoire) loin de toute considération de l'aspect environnemental de la mesure. Erreurs humaines de manipulation (par exemple mesure de la hauteur d'antenne GNSS, mauvaise manipulation d'une mire de nivellement), multi-trajet affectant le signal GNSS, artefacts atmosphériques affectant les signaux GNSS et InSAR, évolution de la végétation affectant le signal radar. Ces aspects peuvent être partiellement estimés via des modèles ou des outils statistiques, qui devront permettre une pondération des champs de vitesses en vue de minimiser l'incertitude finale de la solution de combinaison.
- (6) Enfin, la méthode doit être suffisamment **fonctionnelle** et **ergonomique**, pour que l'intégration de nouveaux cas de figures soit aisée, au sens où celle-ci ne devra pas nécessiter la modification profonde de la méthode (changement de technique d'interpolation par exemple).

3.3 Nouvelle proposition méthodologique

3.3.1 Mise en référence

Aucune combinaison de mesure n'est possible sans une harmonisation des systèmes de références qui les définissent. Sont distinguées les références spatiales horizontales (planimétrie) et verticales.

3.3.1.1 Planimétrie

Afin de combiner les champs de vitesses issus de différentes techniques de mesures géodésiques, il apparaît nécessaire de s'assurer que ceux-ci se réfèrent bien aux mêmes positions spatiales. Pour certaines techniques ce référencement absolu dans l'espace horizontal – la planimétrie – est précis : les positions des stations GNSS et stations nivelées peuvent être connues avec des précisions sub-millimétriques dans des référentiels globaux (Duquenne et al., 2005). Cela n'est pas le cas des champs de vitesses InSAR, dont le positionnement planimétrique n'est précis qu'à quelques mètres voire dizaines de mètres en absolu. Rappelons que le géoréférencement planimétrique des interférogrammes est effectué par corrélation d'amplitude entre une image simulée à partir d'un modèle

numérique de terrain et l'image maitresse. Le modèle numérique de terrain utilisé lors des calculs PS-InSAR étant le SRTM3 v3 (Farr et al., 2007) avec une résolution de 3 secondes d'arc, soit environ 90 m au niveau de l'Équateur, on attend une précision du référencement au moins égale à cette résolution. Cette notion de géoréférencement planimétrique de l'InSAR est principalement discutée dans la littérature liée à la détermination de modèles numériques de terrain par interférométrie satellitaire (*par exemple* Muller et al., 2001). La méthode la plus fiable est la mesure au sol de points de contrôle GPS, appelés communément GCP (*Ground Control Points*), permettant de contrôler et corriger les éventuelles distorsions, rampes, ou artefacts sur le modèle numérique de terrain calculé. Cette technique n'est pas utilisée dans le cadre d'études InSAR multi-temporelles de types PS-InSAR ou SBAS-InSAR, et son implantation dans l'algorithme de traitement des données InSAR de l'étude présentée ici n'a pas été effectuée pour des raisons de coûts trop élevés notamment, au regard de l'apport estimé en termes de précision de référencement.

Néanmoins un contrôle du positionnement spatial des réflecteurs permanents, peut être effectué. Plus la présence et le nombre de structures identifiables au sol (routes, voies de chemin de fer, accotements de canaux, bâtiments isolés, régulièrement reconnus comme réflecteurs permanents) est grand, plus le référencement est précis.

Ensuite, des données d'imagerie satellitaire ou aériennes optiques (orthophotos, images SPOT...), ou des données provenant de bases de données géographiques géo-référencées (de type OpenStreetMap (OSM)) peuvent être utilisées. Quelle que soit l'image ou la donnée utilisée, la précision absolue dans le référentiel planimétrique de l'image doit être meilleure que métrique.

La technique de calage est simple : aucune détection automatique n'est utilisée, seules des mesures manuelles – sous environnement SIG (QGIS) – sont effectuées sur un maximum de décalages horizontaux détectés, selon les axes Nord-Sud et Est-Ouest. Les valeurs sont moyennées et un écart-type sur ces mesures est calculé. Enfin cette moyenne des décalages mesurés est retirée aux positions des mesures InSAR.

Aucune mise en évidence d'une distorsion spatiale sur le positionnement des réflecteurs permanents InSAR n'est attendue, d'où le calcul d'une moyenne seulement. Dans le cas contraire, un calcul de transformation à 3 paramètres minimum serait nécessaire (deux translations et un facteur d'échelle) voire 5 (ajoutant l'estimation de deux déflexions verticales).

À la fin de cette étape on considérera le positionnement horizontal des données géodésiques comme cohérent, au sens où la combinaison de ces données ne sera pas affectée par de possibles décalages dans le positionnement des points de mesures.

3.3.1.2 Altimétrie

La notion de référence altimétrique est à bien des égards, plus difficile à manier que la notion de référence planimétrique. En effet, de nouvelles notions entrent en jeu : notions de verticalité physique, de système de référence, ou encore de stabilité du système de référence. L'objectif est ici de rendre la méthodologie de combinaison rigoureuse géométriquement parlant, c'est-à-dire que les valeurs de déplacements et/ou de vitesses de l'une ou l'autre des techniques de mesures géodésiques soient toutes comprises dans la même dimension et se réfèrent à un même système de référence ou au minimum à deux systèmes équivalents. Dans notre cas il est important de distinguer les références selon les méthodes de mesures.

Les données GPS (coordonnées et vitesses), quel que soit le traitement (par exemple double-différence, Precise Point Positioning), ont une composante verticale mesurée relativement à un ellipsoïde de référence. Le plus souvent référencées dans un ITRF (International Terrestrial Reference Frame), réalisation du système international ITRS (International Terrestrial Reference System) publié par l'IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) et dont l'ellipsoïde de référence associée est le GRS80 (Altamimi et al., 2012). Les données radar satellitaires, traitées par algorithme de création d'interférogrammes simples – par exemple DfSAR (Gabriel et al., 1989, Massonet et al., 1993, Zebker et al., 1994) – ou par algorithmes multi-temporels – par exemple PS-InSAR (Ferretti et al., 2001), SBAS-InSAR (Berardino et al., 2002) – sont toutes référencées de manière relative dans le temps (une ou plusieurs images en référence) et l'espace (un point de l'espace en référence). Néanmoins les satellites imageurs eux-mêmes sont référencés par GPS : les orbites précises sont calculées dans une réalisation IGS. Les résultats InSAR sont donc géométriquement cohérents avec les résultats GPS, les mouvements relatifs sont donc mesurés selon des angles rapportés sur une verticale géométriquement cohérente avec les hauteurs ellipsoïdales mentionnées dans le point précédent. Enfin le nivellement est quant à lui inclus dans un référentiel altimétrique caractérisé par, selon le cas, des altitudes orthométriques, dynamiques ou normales et un point de référence. Par exemple, le référentiel altimétrique IGN 69, système de nivellement légal en France est caractérisé par des altitudes de type normal, avec le marégraphe de Marseille en référence (Nocquet et al., 1997).

Lorsque l'on manipule des données de type coordonnées, et que l'on veut convertir une hauteur ellipsoïdale (par exemple GPS) en altitude normale, afin de les comparer et combiner, il est nécessaire de connaître le modèle de géoïde. Or les données utilisées en vue de leur combinaison ne sont pas des coordonnées, mais des valeurs de déplacement, i.e. de soustraction de coordonnées dans les systèmes respectifs d'origine des données. Cette notion, relative dans le temps, implique la non nécessité de conversion des données, tant que le postulat de la stabilité temporelle du modèle de géoïde est considéré vrai. Dans ce cas les valeurs de déplacements de l'une ou l'autre technique, dans des référentiels altimétriques différents, sont directement comparables, sans biais. Néanmoins, même s'il

n'est pas nécessaire d'harmoniser les systèmes (type d'altitude) utilisés par les différentes techniques, il est tout de même nécessaire d'analyser et de rendre cohérents les références spatiales de ces différentes mesures relatives en vue de la combinaison. En ce sens, plusieurs méthodes ont été décrites dans la littérature.

Plusieurs études (par exemple Lundgren et al., 2009 ; Hammond et al., 2010) décrivent la problématique de l'application d'une correction sur les données InSAR (relative dans le temps et l'espace) provenant de données GPS. Cette correction se fait par l'application d'une transformation (rampe linéaire) sur l'InSAR dans sa dimension LOS pour les deux géométries, afin de les rendre cohérentes avec les champs de vitesses GPS. Cette méthode a deux avantages : (1) elle permet un calage des vitesses InSAR relatives dans un référentiel plus large considérant ainsi les grandes longueurs d'onde de la déformation (tectonique, déformation de la croûte) et (2) ce calage permet d'atténuer les erreurs résiduelles sur les champs de vitesses InSAR (par exemple biais ionosphériques, erreurs d'orbite, et toute erreur de longueur d'onde spatiale plus importante que la zone mesurée). Ainsi la procédure permet de calculer une rampe linéaire bidimensionnelle (aucune possibilité de flexure de ce plan n'étant prise en compte) basée sur le calcul de différences entre les vitesses de stations GPS et les vitesses de la mesure InSAR à proximité de ces stations GPS. Hammond et al., (2010) font le lien entre cette technique et les techniques courantes de transformation (translation, rotation) de coordonnées d'un référentiel géodésique à un autre.

De la même manière, Fuhrman et al., (2015) appliquent une correction moyenne pour référencer l'InSAR sur des données de nivellement. Cette correction moyenne est calculée selon la différence entre les vitesses de stations nivelées et les vitesses de la mesure InSAR à proximité de ces stations. Cette méthode a pour inconvénient de ne pas considérer de pente de déformation sur la zone étudiée. Son intérêt reste important dans le cadre d'études où trop peu de stations mesurées par nivellement et/ou GNSS sont présentes (ou plus mais spatialement mal réparties).

Certains auteurs ont développé des solutions plus complexes et utilisent des stations combinant mesure GNSS, coin réflecteur artificiel et transpondeur actif afin de créer des points communs de référence entre l'InSAR, le GNSS et possiblement le nivellement. Cette solution apparaît être la plus précise et fiable (Ferretti et al., 2007 ; Marinkovic et al., 2007 ; Mahapatra et al., 2017). Néanmoins, au-delà du coût qu'elle peut représenter (mise en place et maintenance du matériel), celle-ci a le désavantage majeur de ne pas pouvoir utiliser l'une des forces de l'InSAR : la possibilité de traiter des archives passées. Son utilisation répond donc à des cas précis où l'étude est pré-planifiée sur plusieurs années.

Dans le cadre de la méthodologie de combinaison proposée, nous avons retenu la solution de calcul d'une rampe linéaire bidimensionnelle basée sur le calcul de différences entre vitesses de stations GNSS et vitesses InSAR. L'utilisation de vitesses de stations mesurées en nivellement est possible, mais il est plus rare de trouver des réseaux assez développés pour cela. Si tel était le cas, la technique décrite serait identique. Pour des projets où le nombre et/ou la répartition spatiale de stations GNSS et nivelées ne seraient

pas suffisants, la possibilité d'appliquer un décalage moyen est aussi retenue, comme alternative. La valeur de correction Cor appliquée en tout point p du champ de vitesses InSAR est telle que :

$$Cor_p = a + b \times (\lambda_p - \lambda_{ref}) + c \times (\phi_p - \phi_{ref})$$

Avec a , b et c les paramètres (fonctions affines sur les axes longitude λ et latitude ϕ , par régression linéaire des écarts observés entre le GNSS et l'InSAR avec minimisation de ces écarts par moindres carrés) de la rampe, λ_p et ϕ_p les coordonnées du point p , λ_{ref} et ϕ_{ref} les coordonnées d'un point de référence. L'option citée ci-avant d'application d'un décalage moyen seul pour des cas d'étude montrant une trop faible densité de stations GNSS (et/ou une mauvaise répartition de celles-ci) est obtenue en donnant des valeurs nulles à b et c . Cette méthode nécessite d'avoir accès à un nombre de points GNSS (1) suffisamment redondant, ou alors, lorsque le nombre de points est faible, que ceux-ci soient mesurés sur un nombre d'années suffisant pour mesurer des vitesses fiables, (2) bien géographiquement et géométriquement répartis, et (3) distribués de façon à ce qu'ils recouvrent la même zone affectée de la même déformation.

Ainsi la méthode décrite dans cette section permet d'approcher les solutions InSAR aux champs de vitesses GNSS, afin d'harmoniser ces champs de vitesses en vue d'une combinaison géométriquement cohérente.

3.3.2 Utilisation d'une double géométrie de mesures InSAR pour estimation de vitesses 3-D d'un bol de subsidence

3.3.2.1 Problématique

La problématique de la détermination des trois composantes spatiales (V_E, V_N, V_U) de la déformation (vitesses) par méthode InSAR n'est pas un sujet trivial. La mesure, selon une ligne de visée particulière, contient dans une certaine proportion les 3 dimensions de la déformation totale dépendant de (1) la géométrie de l'acquisition (direction du satellite) et (2) l'angle entre la verticale et le point mesuré. Dans l'exemple d'un bol de subsidence, Il apparaît donc impossible de faire la distinction entre l'effondrement centripète des bords du bol et le déplacement vertical, seule une combinaison de ces mouvements est mesurée (Figure 3-1).

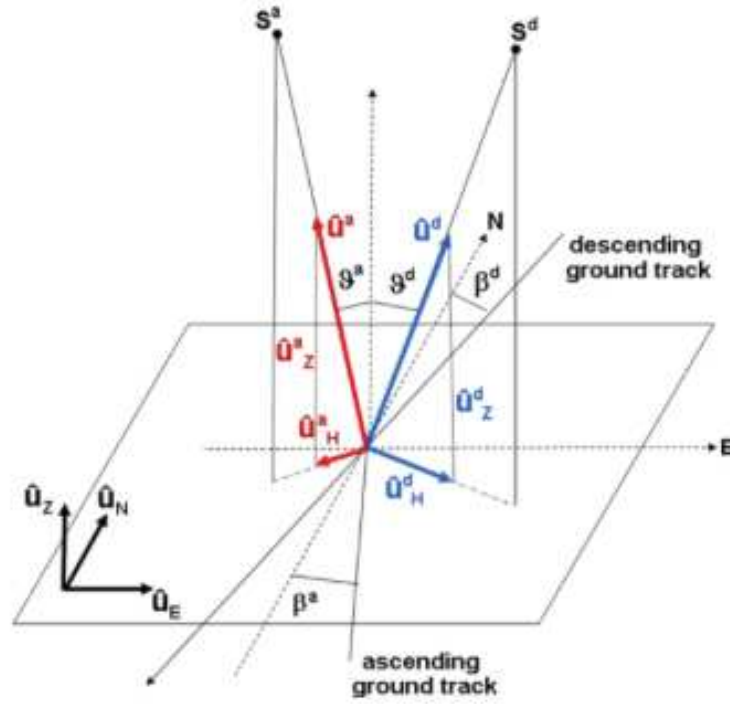


Figure 3-1 : Schéma de la géométrie des mesures InSAR en orbites ascendante et descendante et termes associés (d'après Catalão et al., 2011).

Lorsque les géométries ascendantes et descendantes sont disponibles sur une zone définie, il est possible de mesurer les vitesses associées respectives telles que :

$$V_{los}^{asc} = U_E^{asc} V_E + U_N^{asc} V_N + U_U^{asc} V_U$$

$$V_{los}^{desc} = U_E^{desc} V_E + U_N^{desc} V_N + U_U^{desc} V_U$$

Avec V_E, V_N, V_U les composantes vitesses Est, Nord et Verticale de la déformation totale et $U_{E,N,U}^{asc,desc}$ les proportions de, respectivement, V_E, V_N, V_U , vues par l'une ou l'autre géométrie, telles que selon les angles d'incidence respectifs $\theta_p^{asc,desc}$ de chaque point mesuré au sol p , et les directions du satellite par rapport au Nord $\beta^{asc,desc}$ (modifié d'après Catalão et al., 2011) :

$$U_E^{asc} = \sin \theta_p^{asc} \sin(-\beta^{asc} - \frac{\pi}{2}) \quad U_E^{desc} = \sin \theta_p^{desc} \sin(\beta^{desc} + \frac{\pi}{2})$$

$$U_N^{asc} = \sin \theta_p^{asc} \cos(-\beta^{asc} - \frac{\pi}{2}) \quad U_N^{desc} = \sin \theta_p^{desc} \cos(\beta^{desc} + \frac{\pi}{2})$$

$$U_U^{asc} = \cos \theta_p^{asc} \quad U_U^{desc} = \cos \theta_p^{desc}$$

Les deux équations V_{los}^{asc} et V_{los}^{desc} contiennent donc trois inconnues, V_E, V_N, V_U . Il n'est pas possible de résoudre ces équations sans autre(s) mesure(s) géométriquement

indépendante(s) ou hypothèses sur la géométrie de déformation. Ainsi des études ont montré la possibilité de fusionner des champs de vitesses InSAR et GNSS dans le but de mesurer ces trois dimensions spatiales de la déformation (*par exemple* Catalão et al., 2011), et d'autres utilisent la corrélation d'images optiques comme apport de mesure géométriquement indépendante (*par exemple* Denis et al., 2008). Le problème qui se pose lors de l'utilisation de ce type de méthode concerne la nécessité d'accès à une densité minimale de mesures autres que l'InSAR. Cette densité étant le point faible régulier dans de nombreux cas d'études il n'est pas possible d'imaginer une solution prenant en compte systématiquement ces mesures. Néanmoins, en se basant sur certaines hypothèses, il est possible d'estimer V_E, V_N, V_U avec les deux géométries InSAR seules.

La première hypothèse est donc la disponibilité d'images radar en géométries ascendantes et descendantes sur la zone étudiée permettant une mesure de la déformation en deux dimensions (ligne de visée selon orbite ascendante et ligne de visée selon orbite descendante). On considère la densité de points de mesures fiables (*par exemple* réflecteurs permanents si traitement PS-InSAR) suffisante pour que la zone d'intérêt soit couverte par les deux géométries, ce qui n'est pas évident dans des zones végétalisées et sera discuté en section 3.3.2.2.

La deuxième hypothèse concerne les égalités au premier ordre, sur la zone d'étude, entre (1) les angles d'incidence θ des mesures ascendantes et descendantes pour chaque point mesuré au sol p et (2) les directions de vol des satellites β , telles que :

$$\begin{aligned}\theta_p^{asc} &\cong \theta_p^{desc} \\ \beta^{asc} &\cong \beta^{desc}\end{aligned}$$

On obtient ainsi les égalités suivantes :

$$\begin{aligned}U_E^{desc} &= -U_E^{asc} \\ U_N^{desc} &= U_N^{asc} \\ U_Z^{desc} &= U_Z^{asc}\end{aligned}$$

Il devient possible d'estimer géométriquement la composante de vitesses Est telle que :

$$V_E = \frac{V_{los}^{asc} - V_{los}^{desc}}{2} \cdot \frac{1}{-U_E^{desc}}$$

Les deux méthodes proposées se basent sur cette deuxième hypothèse.

La troisième hypothèse concerne la physique de la déformation de surface et considère un bol de subsidence, de forme quelconque et de magnitude maximum de subsidence non nécessairement centrée, mais marqué par une déformation planimétrique centripète, i.e. en

chaque point du bol un vecteur déformation orienté vers le centre de subsidence est mesurable.

Enfin la **quatrième hypothèse** est la suivante : soit un profil est-ouest passant par le maximum de subsidence du bol, alors la forme de la déformation sur ce profil est transposable à tous les profils de direction quelconque mais passant par le centre du bol par transformation géométrique (distorsion du profil).

3.3.2.2 Densité de points de mesures

3.3.2.2.1 Description du problème

Dans le cadre du développement de la méthodologie, s'il s'avère que la première hypothèse de disponibilité des images radar en géométries ascendante et descendante est une condition *sine qua non* pour appliquer la méthodologie de détermination des trois composantes spatiales de la déformation, la condition de densité de réflecteurs permanents est quant à elle bien moins évidente. En effet, en zone végétalisée, c'est-à-dire la majorité des cas de subsidence anthropique liés à l'extraction de matière première par exemple, cette densité fait souvent défaut et amène à une difficulté d'obtenir une densité suffisante de points communs entre les traitements sur les deux géométries. Lorsque les densités de réflecteurs permanents sont élevées comme c'est le cas en zones urbaines, il est possible de combiner les géométries ascendantes et descendantes en recherchant les réflecteurs permanents les plus proches dans respectivement l'une et l'autre géométrie. Avec les faibles densités de réflecteurs permanents en zone à forte présence de végétation, ajoutées au fait que les réflecteurs permanents d'une géométrie ne sont pas nécessairement localisés à proximité immédiate des réflecteurs permanents de l'autre géométrie, il n'est pas possible d'obtenir un champ de vitesses Est-Ouest combiné issu des deux champs de vitesses InSAR sans devoir étendre le rayon de recherche entre les points des deux géométries de manière trop importante (plusieurs centaines de mètres). Les figures ci-après illustrent cette problématique.

Prenons un exemple réel : Vauvert. Le site sera longuement décrit au chapitre suivant, intéressons-nous ici uniquement à la problématique de densité de mesures InSAR. Sur cette zone d'étude, la densité observée de réflecteurs permanents (traitement PS-InSAR sur archives Sentinel-1a/b) est comprise entre 800 et 900 PS/km² en zone urbaine (par exemple Vauvert) et entre 10 PS/km² dans les zones végétalisées (principalement vignes et bosquets arborés) incluses dans le bol de subsidence et 350 PS/km² dans le centre du bol de subsidence contenant les infrastructures de l'exploitant, infrastructures propices à la réflexion des ondes radar.

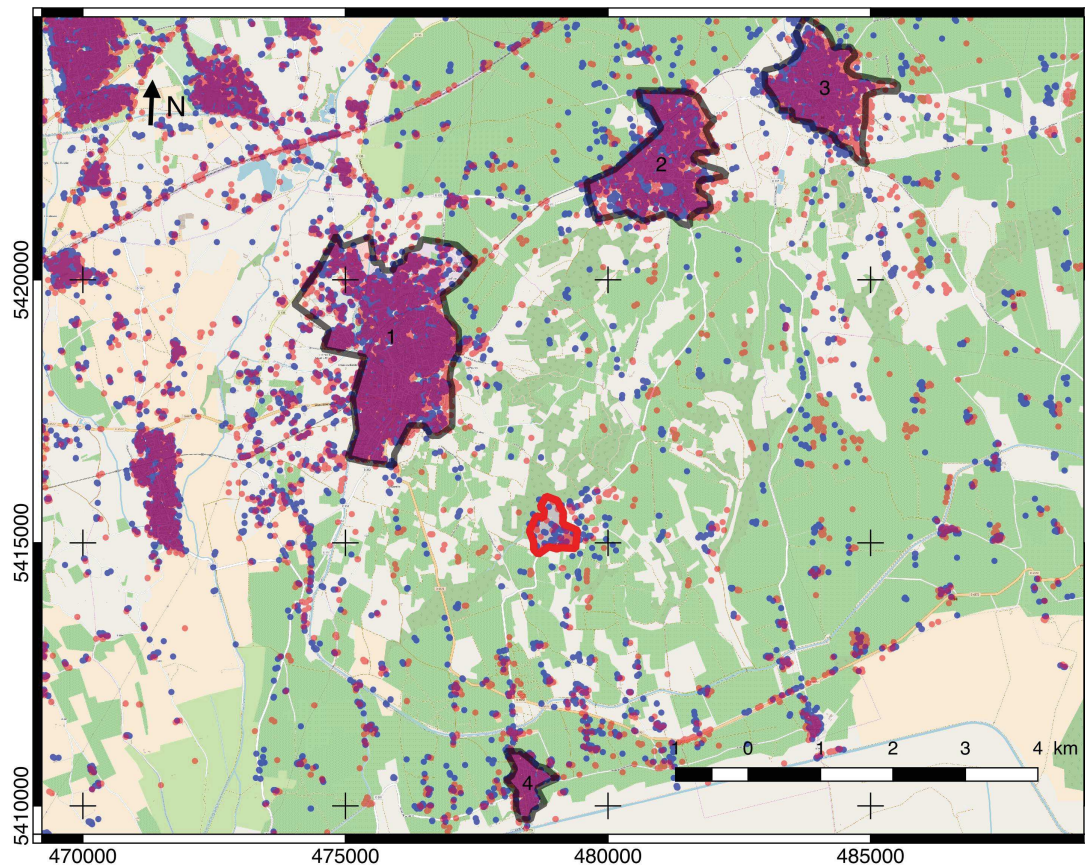


Figure 3-2 : Carte des emplacements des réflecteurs permanents des deux géométries (respectivement ascendante en bleu, descendante en rouge) sur la zone d'étude. Trait noir : zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician). Trait rouge : emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert. Fond de carte OpenStreetMap.

Ce sont ces zones urbaines ou anthropisées qui présentent des densités de réflecteurs permanents allant de 350 à 900 PS/km² qui répondent parfaitement à la première hypothèse décrite en section précédente. Les zones végétalisées sont plus problématiques. L'effet combiné d'une densité moindre et d'objets réflecteurs permanents différents (différence corrélée au changement d'angle de vue rendant les objets au sol plus ou moins réflecteurs) rend la première hypothèse difficile à valider. Pour illustrer cela, la Figure 3-3 est créée. Une grille d'un pas de 50 m est mise en place, et en chacun de ses points les réflecteurs permanents des deux géométries sont recherchés dans un rayon de 100 m. Seuls les points de la grille ayant pour voisin, dans ce rayon, au minimum un réflecteur permanent de chaque géométrie sont montrés.

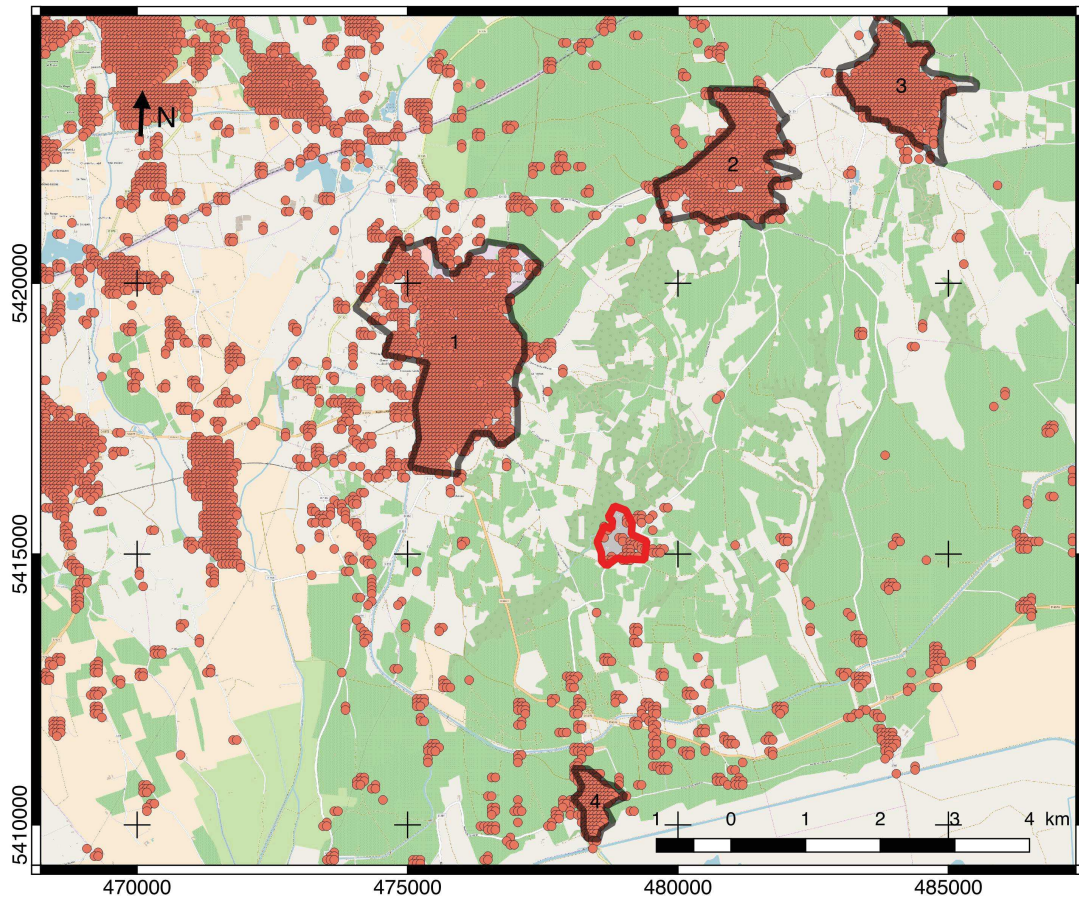


Figure 3-3 : Carte de position des réflecteurs permanents (points rouges) communs (selon une recherche du plus proche voisin dans un cercle de diamètre de 100 m sur une grille de résolution 50x50 m) aux traitements PS-InSAR sur archives Sentinel-1a/b en géométries resp. ascendante et descendante. Trait noir : zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician). Trait rouge : emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert. Fond de carte OpenStreetMap.

Comme attendu, les réflecteurs permanents en commun se situent là où les densités de réflecteurs permanents sont les plus élevées, et ce pour les deux géométries : les zones urbanisées et anthropisées.

Un zoom est effectué sur une zone sensible où peu de réflecteurs permanents communs sont détectés (Figure 3-4). Cette absence de réflecteurs communs est critique car elle mène à une impossibilité à combiner localement les deux champs de vitesses. La zone est choisie selon les critères suivants : elle présente une très faible densité de réflecteurs permanent dans les deux géométries de mesures InSAR et son emplacement est stratégique car situé dans le bol de subsidence.

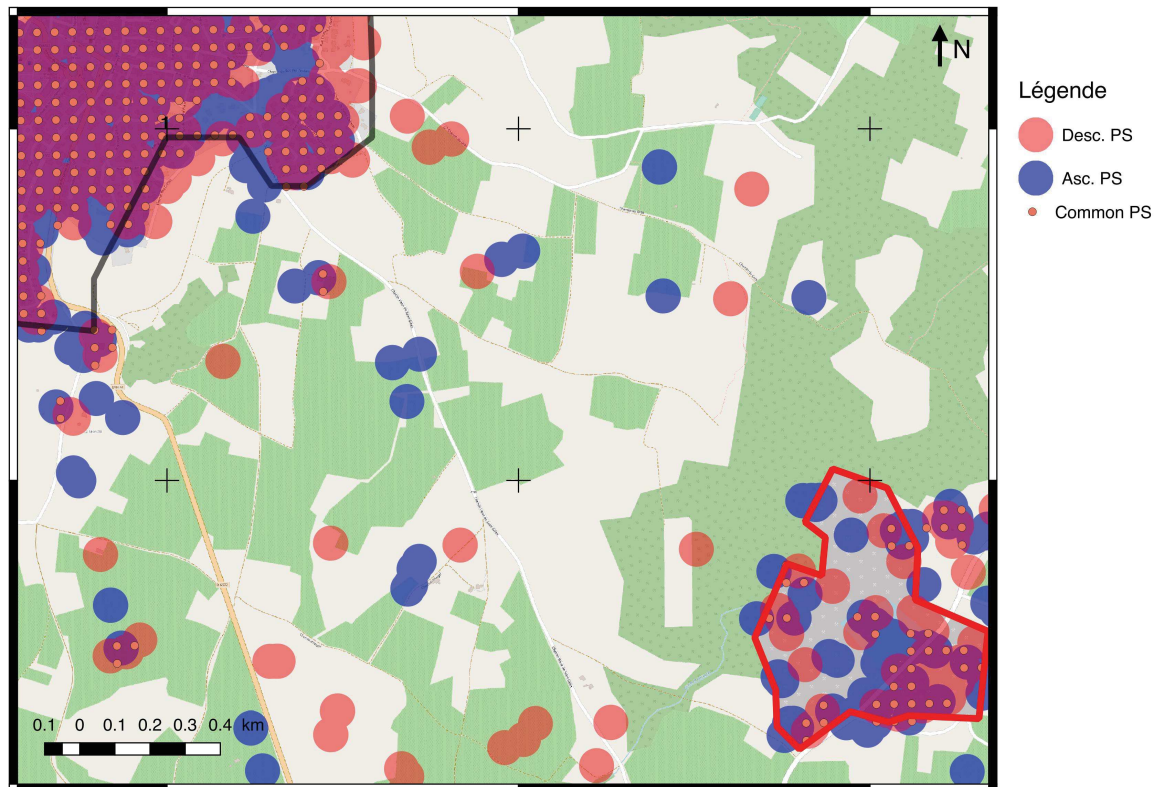


Figure 3-4 : Zoom sur une zone de faible densité de réflecteurs permanents située entre les infrastructures de la saline (polygone rouge) et la ville de Vauvert (polygone noir). Les pastilles rouge et bleu sont les représentations d'aires de 50 m de rayon autour des réflecteurs permanents des champs de vitesses InSAR (respectivement descendant et ascendant), les points rouges sont les points de la grille 50 x 50 m inclus dans ces aires communes.

Ainsi, comme le montre cet exemple, le seul moyen de combiner les résultats des traitements PS-InSAR des deux géométries sur ce type de zone passe par une augmentation très importante du rayon de recherche des réflecteurs permanents des deux géométries autour des points de la grille. Or une augmentation de ce rayon de recherche implique la possibilité pour les points de la grille de combiner des valeurs trop éloignées, mesurant des magnitudes et direction de la déformation de ce fait très différentes, amenant une incertitude liée importante sur les résultats. De plus cela aura toujours pour effet d'omettre des réflecteurs permanents d'une géométrie de mesure trop isolés par rapport à l'autre géométrie, dans des régions où justement les mesures sont rares. Or l'intérêt de l'InSAR dans une méthodologie de combinaison à des mesures géodésiques ponctuelles (GNSS et nivellement) réside principalement dans sa densité de mesures et la répartition spatiale de ces mesures.

Afin de contourner ce problème, la solution de l'interpolation indépendante en amont de la combinaison des deux champs de vitesses est envisagée, expliquée et discutée ci-après.

Cette solution permet de garder l'information des points mesurés par une géométrie, trop éloignés des points mesurés par l'autre géométrie, tel qu'illustré en Figure 3-4.

3.3.2.2.2 Choix d'une technique d'interpolation

Dans de nombreuses disciplines, scientifiques ou non, la connaissance d'une valeur inconnue en un point défini, sans mesure directe, est une problématique récurrente. En effet, que ce soit pour des raisons économiques (coût d'une mesure trop élevée), logistiques (accessibilité du point rendant la mesure directe dangereuse, voire impossible) ou temporelle (mesures trop longues pour être itérées autant que nécessaire), l'échantillonnage quel qu'il soit est toujours limité. Il devient ainsi nécessaire de prédire la valeur inconnue, à partir des observations proches : on interpole.

De très nombreuses techniques d'interpolation existent, pour des applications dans des domaines très variés, depuis le domaine de l'exploration minière (domaine historique du développement de la méthode de krigeage) à n'importe quel autre domaine tant que les données à traiter possèdent une répartition spatiale. Quelles que soient ces techniques d'interpolation (triangulation, inverse de la distance au carré, splines...), celles-ci permettent toujours d'estimer une valeur u (*a priori* inconnue) à un emplacement y (connu) par prise en considération des valeurs alentours, pondérées de la distance à y , poids décroissant avec la distance (décroissance contrainte par une loi, linéaire ou fonction, déterminée par le type d'interpolation). Baillargeon (2005) dresse un inventaire des méthodes d'interpolation spatiale, inventaire résumé ci-après.

Ainsi on peut distinguer deux grandes classes de méthodes d'interpolations : les méthodes dites déterministes d'un côté et les méthodes dites stochastiques de l'autre, qui incluent la notion d'aléatoire, de hasard.

Méthodes déterministes

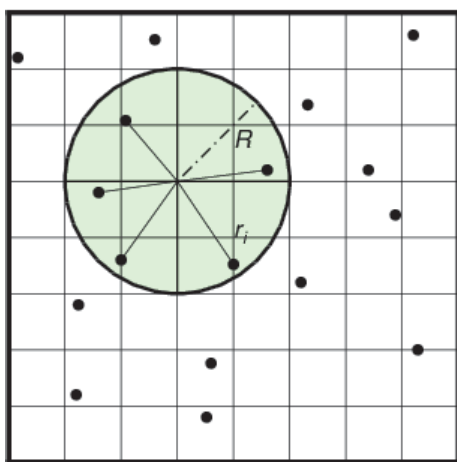


Figure 3-5 : Géométrie de recherche selon la technique du plus proche voisin
(source : tutoriel Generic mapping Tools)

▪ Méthode barycentrique

C'est l'ensemble de méthodes le plus classique et facile à appréhender : la valeur u en un point non mesuré, de coordonnées connues, est estimée par la moyenne des valeurs proches (méthode dite des plus proches voisins, Figure 3-5), valeurs pondérées par la distance au point u . La pondération peut suivre une loi linéaire ou tout autre fonction, la variante la plus utilisée étant sans doute la pondération par l'inverse de la distance – entre le point estimé et les points connus – au carré.

■ Méthodes d'interpolation par partitionnement de l'espace

Ces méthodes sont proches de la méthode barycentrique à la différence que l'espace est partitionné de telle sorte que les poids et points voisins sont définis selon des secteurs. Ces partitions sont soit des polygones (par exemple Polygones de Thiessen, partition de Voronoï ou encore polygones de Dirichlet en sont des exemples) soit des triangles (par exemple Triangulation de Delauney), dont les sommets sont les points de mesures (Figure 3-6).

Une fois les partitions créées, la méthode d'interpolation en elle-même peut varier, depuis la méthode dite du « plus proche voisin » à la méthode d'interpolation linéaire citée en paragraphe précédent. Ainsi ces méthodes par partitionnement de l'espace ont un désavantage majeur par rapport aux méthodes barycentriques : elles prennent en compte un nombre moins important de données puisque se limitent à des surfaces définies au-delà desquelles les données ne sont plus prises en compte. De plus le résultat de l'interpolation peut présenter de forts artefacts si l'échantillonnage n'est pas homogène.

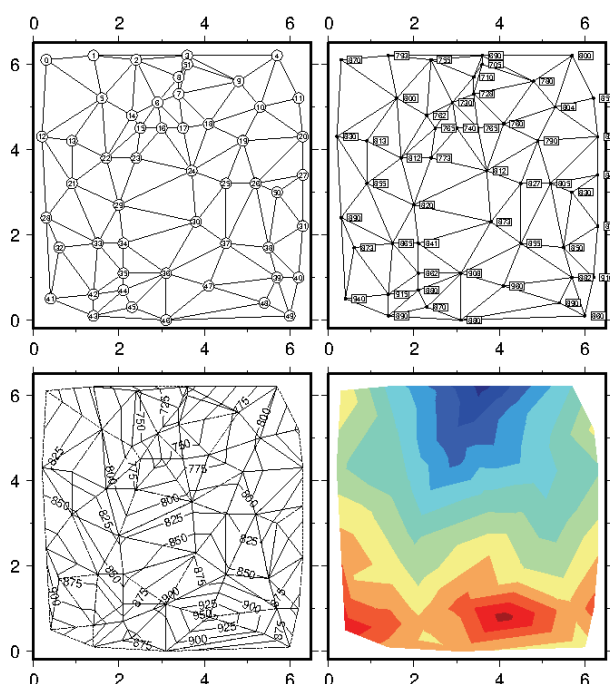
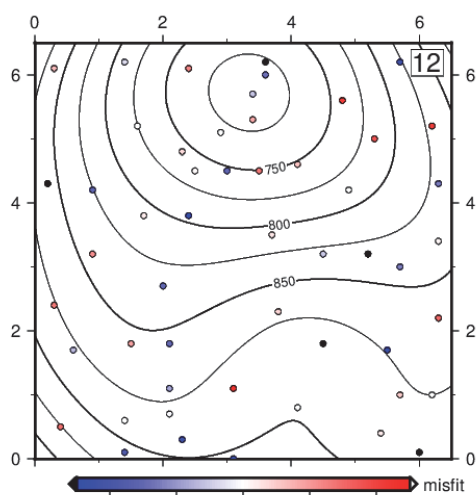


Figure 3-6 : Résultat d'un exemple d'interpolation par triangulation optimale de Delaunay, pour un jeu de données uniformément distribué (source : tutoriel Generic Mapping Tools)

■ Splines



Contrairement aux deux premières méthodes, qui interpolent les valeurs d'un point à un autre, la méthode d'interpolation par splines permet l'ajustement d'une surface sur un ensemble de points donné. Cette surface peut (1) être forcée de passer par tous les points ou (2) être plus libre sans contrainte de passage à tous les points.

Figure 3-7 : Résultat d'un exemple d'interpolation par méthode des splines (iso-contours). (Source : Generic Mapping Tools)

Les méthodes déterministes ont ainsi pour principal défaut de ne prendre en considération que les données mesurées, sans prendre en compte (1) de critères statistiques permettant de juger de la qualité du produit interpolé ni (2) leur structure spatiale. Il apparaît donc nécessaire de s'intéresser aux méthodes dites stochastiques.

Méthodes stochastiques

- Régression

La méthode d'interpolation par régression classique est proche de la méthode d'interpolation par splines dans le sens où elle consiste en un ajustement d'une surface sur les points connus. Néanmoins cette technique est plutôt classée comme méthode stochastique (contrairement à l'interpolation par splines, considérée déterministe), car elle *suppose que la variable régionalisée [...] est une fonction aléatoire* (Baillargeon, 2005) en plus d'une fonction de régression (par exemple linéaire).

- Krigeage

Le krigeage (Matheron, 1962, 1963) est une méthode stochastique d'interpolation qui, au contraire des méthodes déterministes, n'applique pas un poids arbitraire (uniquement corrélé à la distance) aux valeurs connues proches, mais applique une fonction de pondération basée sur une corrélation entre les données et la distance qui les sépare. De plus, elle fournit une estimation quantitative de l'erreur sur les points interpolés. C'est pour ces raisons que le krigeage est considéré comme la « meilleure » technique d'estimation linéaire non biaisée, couramment nommée BLUP pour *Best Linear Unbiased Prediction*, terme introduit par Henderson (1973).

Les méthodes de krigeage sont depuis longtemps comparées aux autres méthodes d'interpolation, afin de déterminer laquelle répond mieux (en termes de précision sur l'estimation de valeurs inconnues) aux problématiques de divers domaines d'étude nécessitant l'utilisation de ce type de technique.

Pour exemple, Zimmerman et al. (1999) comparent krigeages – ordinaire et universel – et deux méthodes d'interpolation par pondération inverse à la distance (méthode déterministe – barycentrique). Pour cela les auteurs partent tout d'abord des conclusions de nombreuses études de comparaisons de méthodes géostatistiques d'interpolation, conclusions souvent opposées quant au choix de la méthode la plus fiable. Alors l'étude permet de conclure quant à la supériorité du krigeage face aux techniques de pondération inverse à la distance au carré (Les méthodes de krigeage ont donné de meilleurs résultats (20-30%) que les deux méthodes de pondération inverse), cela quelques soient le type de surface, la couverture, la répartition spatiale et la densité des mesures, le bruit ou encore la corrélation entre les mesures.

Les avantages du Krigeage sont donc nombreux et sont notamment donnés par Matheron, (1963), Zimmerman et al., (1999) ou encore Marcotte (2006). Citons les avantages de l'utilisation du krigeage qui nous intéressent particulièrement pour la combinaison de mesures géodésiques :

- L'interpolation par krigeage est une méthode d'interpolation exacte (la valeur interpolée d'un point mesuré est égale à sa valeur initiale) linéaire non biaisée,
- La taille de l'échantillon (points de mesures) ainsi que la position des mesures de l'échantillon sont prises en considération,
- Elle permet le calcul de l'incertitude d'estimation (variance de krigeage) en plus du calcul de la variable estimée en tout point de la grille d'estimation, ce qui apparaît nécessaire dans le cadre d'une chaîne de traitement complète d'une combinaison de mesures géodésiques où l'effet de chaque étape sur la précision du champ de vitesses final doit être contraint et connu. De plus cette variance est, par la définition même du krigeage, minimale.
- Cette méthode aide à compenser les effets liés à l'agglomération (phénomène de clusters) de données, en affectant aux points individuels inclus dans ces clusters moins de poids que des points de données isolés. A la vue des Figure 3-2 et Figure 3-3 cet avantage paraît très intéressant, voire essentiel.

Malgré ses indéniables avantages, le krigeage, comme toute technique d'interpolation de données, peut présenter certaines limites. Il fournira néanmoins au minimum des résultats similaires à n'importe quelle autre technique d'interpolation. Ainsi, comme toute technique d'interpolation de données, le krigeage ne peut permettre une estimation des déformations de longueurs d'onde inférieures à la distance séparant les données originelles. Par ailleurs, si la donnée est dense et uniformément répartie dans toute la zone d'étude, il est possible d'obtenir de bonnes estimations de la valeur recherchée indépendamment de l'algorithme d'interpolation. *A contrario*, si les emplacements de données sont spatialement mal répartis (alternance spatiale de clusters et zones vides par exemple) avec des écarts importants entre les valeurs proches, alors les estimations ne seront pas ou peu fiables quel que soit l'algorithme d'interpolation utilisé. De plus la majorité des algorithmes d'interpolation sous-estiment les maximums (points hauts) et surestiment les minimums (points bas); ce n'est pas le cas du krigeage qui est un estimateur exact, c'est-à-dire que si le point de la grille estimé coïncide avec un point mesuré, alors ces deux points ont la même valeur. Il apparaît donc que la technique d'interpolation la plus à même de répondre à la problématique de combinaison de mesures géodésiques pour la caractérisation de mouvements fins est le krigeage. Cette méthode ainsi que les éléments permettant son utilisation et analyse sont décrits et définis dans les sections ci-après.

3.3.2.2.3 Interpolation par krigeage

Le krigeage est donc une méthode d'interpolation géostatistique, provenant des théories (1) des *variables régionalisées* et (2) des *fonctions aléatoires* (Matheron, 1962). À l'origine créée afin d'estimer les continuités de gisements de minerais pour l'industrie minière, cette méthode permet l'estimation d'une variable régionalisée en prenant en considération la structure spatiale de cette variable. Une variable régionalisée étant toute variable définie par une distribution spatiale qui, mathématiquement, pourra être définie par une fonction reliant ses caractéristiques à sa distribution spatiale. L'idée principale sous-jacente est donc que la donnée régionalisée à interpoler n'est pas imprévisible dans son comportement spatial, mais au contraire prévisible selon des critères et lois mathématiques à définir liées aux distances entre points de mesures. L'une des caractéristiques d'une variable régionalisée est sa variance. On formalise cette variance S définissant la variabilité d'une variable régionalisée Z pour un échantillon de mesures donné telle que (Iris 1986) :

$$S = E(Z - \bar{Z})^2$$

Avec $\bar{Z}$ la valeur moyenne de Z dans l'échantillon et E l'espérance de l'échantillon.

Cette notion n'intègre pas la notion de régionalisation de la donnée mais décrit uniquement la variance d'un échantillon total. Or, la variabilité de la donnée, en géostatistique, est directement liée à son organisation spatiale. Il est donc nécessaire de lier organisation spatiale de la variable régionalisée et variance. Ainsi, suivant quelques hypothèses, on définit la notion de variogramme. Les conditions sont (modifiées d'après Iris, 1986) :

- Le signal doit être stationnaire. L'espérance de la propriété doit être constante dans le domaine étudié, et ne doit donc pas dépendre de la localisation des mesures,
- La variance ne doit pas dépendre de coordonnées de points de mesures mais de la distance h qui les sépare,

On définit ensuite le variogramme expérimental γ tel que, pour deux points (u et $u+h$) distants de h , u est une variable aléatoire définie par respectivement les variables $Z(u)$ et $Z(u+h)$. Alors le variogramme expérimental est égal à la moitié de la variance de la différence entre $Z(u)$ et $Z(u+h)$ tel que (d'après Matheron, 1962) :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}((Z(u) - Z(u+h))) = \frac{1}{2} E((Z(u) - Z(u+h))^2)$$

Avec u un vecteur position à une, deux ou trois dimensions.

Cette définition du variogramme rend donc compte de la variance de l'échantillon, illustrant la dégradation de la mesure corrélée à son éloignement (logiquement, la variance est maximale pour h maximale, *i.e.* plus la distance entre les points u est grande, moins les valeurs de ces points sont susceptibles de se ressembler). Notons qu'à ce stade, aucune notion de direction de la variance n'est prise en compte. L'analyse géostatistique d'un

échantillon de mesures est donc liée à l'étude de son variogramme que l'on nomme expérimental quand il ne décrit que les données. Ce type de variogramme est un ensemble (nuage) de points et est illustré ci-après en Figure 3-8a. Afin d'analyser un variogramme expérimental il est nécessaire de moyenner les valeurs du nuage de point selon un pas défini. La Figure 3-8b en est une illustration.

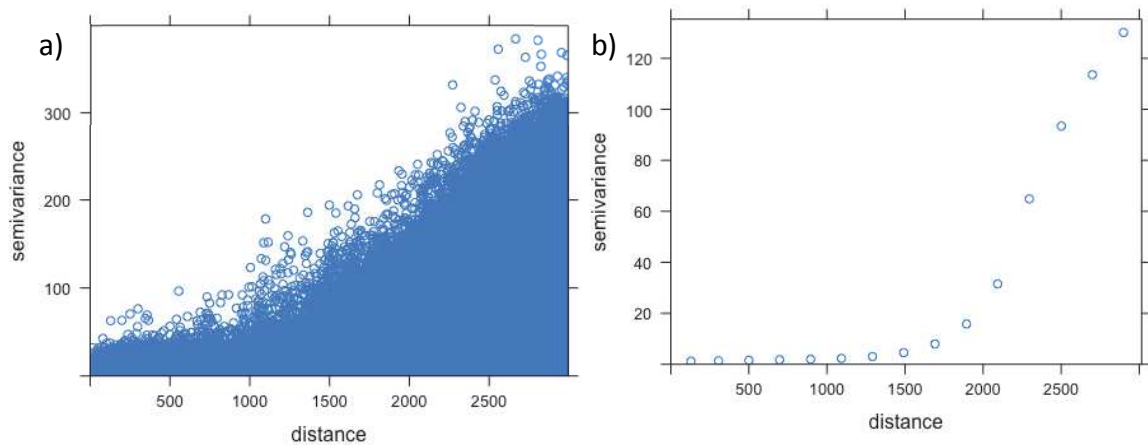


Figure 3-8 : (a) Exemple d'un variogramme expérimental sur un champ de vitesses PS-InSAR en géométrie descendante et (b) variogramme expérimental associé, données moyennées selon un pas de 180 m. Variance en $(\text{mm/an})^2$ et distance en (m).

L'analyse d'un variogramme expérimental passe par la définition d'une fonction mathématique (par exemple exponentielle, gaussienne, linéaire, logarithmique) le décrivant le mieux. La Figure 3-9 ci-après illustre les principales fonctions pouvant décrire les variations de comportements de variogrammes possibles.

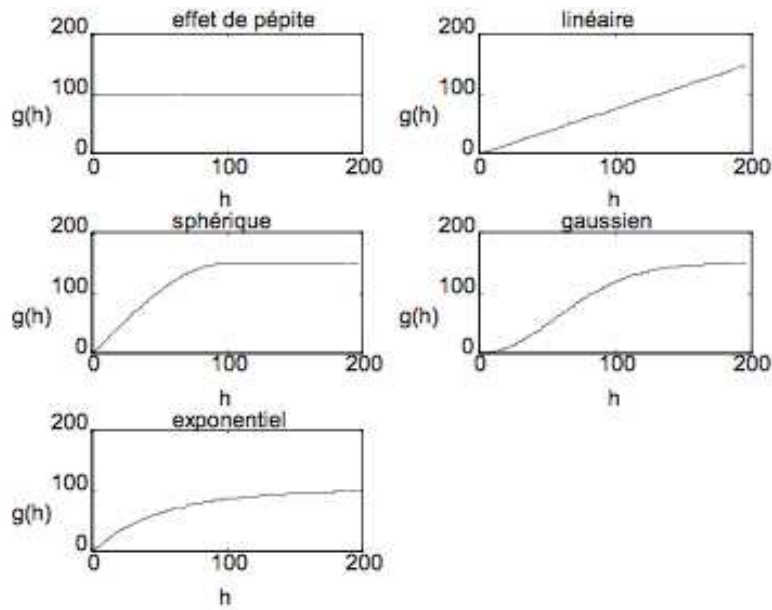


Figure 3-9 : Exemples de modèles de variogrammes (Marcotte, 2006)

Une fois le modèle de variogramme déterminé, l'analyse des caractéristiques de celui-ci est réalisable : ordonnée à l'origine appelée *pépité* ou *nugget*, variance maximale appelée *palier* ou *sill*, portée nommée *range*, correspondant à la distance nécessaire pour atteindre le palier. Ces termes sont illustrés en Figure 3-10 ci-après.

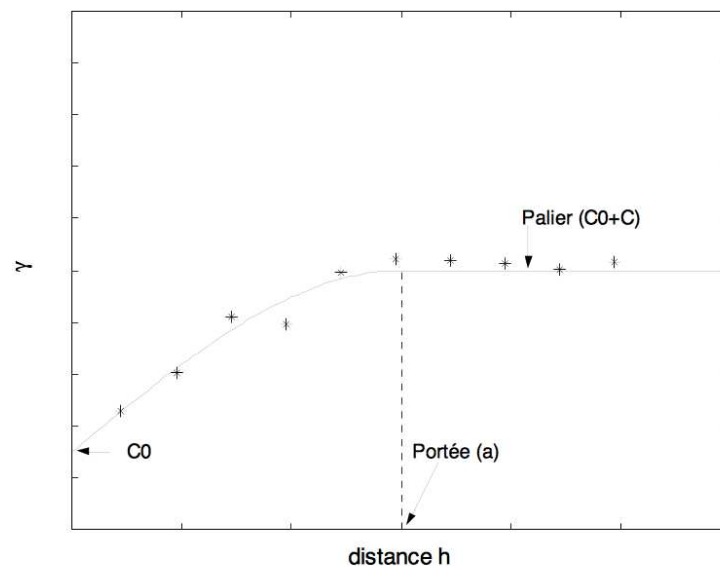


Figure 3-10 : Variogramme expérimental et modèle de variogramme, paramètres associés, d'après (Marcotte, 2006)

Plusieurs manières d'ajuster un modèle de variogramme sur un variogramme expérimental existent. La méthode manuelle où l'on cherche la fonction qui caractérise le

mieux le variogramme expérimental et l'on détermine ses caractéristiques (par exemple palier, pépité) ; ou la méthode automatique : des algorithmes utilisent un ajustement par moindres carrées afin de minimiser l'écart entre le modèle de variogramme et le variogramme expérimental tel que la somme des écarts entre les deux est minimisée. Un ajustement de modèle de variogramme est effectué sur les données de la Figure 3-8, et est illustré en Figure 3-11.

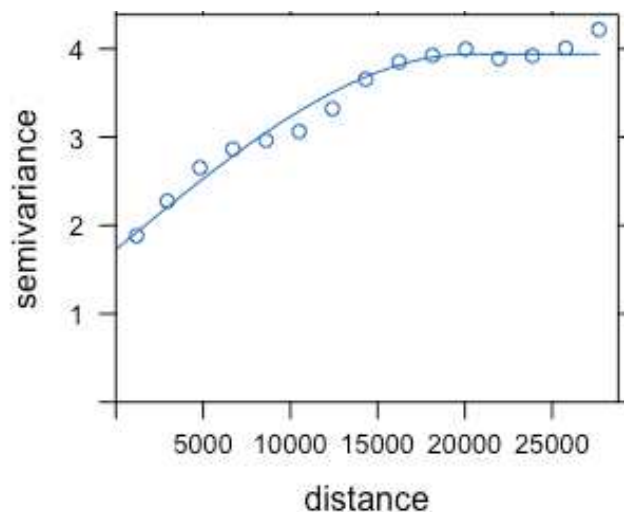


Figure 3-11 : Exemple d'ajustement d'un modèle de variogramme (sphérique). Variance en $(\text{mm/an})^2$ et distance en (m)

Le comportement d'un modèle de variogramme ajusté aux données est principalement déterminé par ses caractéristiques à l'origine et à l'infini. A l'origine, un comportement de type linéaire ou de type parabolique est lié à une dégradation (augmentation de la variance) régulière de la mesure à faible distance de celle-ci. Une ordonnée à l'origine (C_0 sur la Figure 3-10) qui ne tend pas vers zéro est lié à l'effet dit de pépité (discontinuité à l'approche de l'origine), et illustre la moyenne des incertitudes sur les mesures, incertitude aléatoire et non régionalisée, ou d'une variabilité spatiale très élevée pour de faibles distances liée à des (micro) structures réelles. Cet effet de pépité peut aussi provenir d'une trop faible densité de points de mesures. Le comportement vers l'infini peut être :

- Stable (la fonction atteint un palier, (C_0+C) sur la Figure 3-10), cette stabilité signifie la perte de corrélation spatiale entre les mesures, si la stabilité est observée depuis l'origine et s'étend à l'infini ($C=0$), on parle d'effet de pépité pur, c'est-à-dire qu'aucune corrélation spatiale de la donnée n'est mesurée, la variable est aléatoire dans l'espace,
- Quasiment stable (asymptote tendant vers le palier), dans ce cas la portée est considérée atteinte à 95% du palier,

- Non stable (décrivant une croissance ou une décroissance) signifiant une évolution sur l'ensemble de la zone étudiée (plus on s'éloigne du point de mesure plus le comportement est erratique),
- Cyclique, ce qui peut être lié à la mesure d'un élément (géologique par exemple) présentant une périodicité spatiale.

Le modèle de variogramme et son comportement sont propres à chaque donnée, à chaque phénomène mesuré. Marcotte (2006) cite quatre phénomènes géologiques et décrit le variogramme qui s'en approche, décrivant la spatialisation de l'élément mesuré :

- Les gisements d'or présentent un variogramme dit erratique présentant un effet de pépite important et une portée faible,
- Les gisements de cuivre présentent au contraire un variogramme linéaire à proximité de l'origine et un effet de pépite faible ainsi qu'une portée importante,
- Les gisements de fer sédimentaire présentent généralement une anisotropie géométrique, c'est-à-dire que les variogrammes parallèles à la stratification sédimentaire présentent une portée plus importante que les variogrammes perpendiculaires à celle-ci. La notion d'anisotropie est discutée ci-après, car au-delà de cet exemple lié aux gisements de fer en milieu sédimentaire, l'anisotropie d'un phénomène liée à une structuration préférentielle du milieu (affectant la région de la variable régionalisée) est à étudier dans le cadre de mouvements de terrain en milieu présentant des failles,
- Enfin la topographie présente en général un variogramme continu, sans effet de pépite, et un comportement de type parabolique à proximité de son origine.

Les modèles de variogrammes décrivant le mieux les déformations de surface sont les modèles sphériques (Marcotte, 2006).

Notion d'(an)isotropie

Un variogramme tel que présenté précédemment ne contient que la notion de distance entre les points de mesures, sans prendre en considération la notion d'orientation. L'hypothèse sous-jacente est donc que la déformation est isotrope et n'est en aucun cas affectée d'une orientation préférentielle. Cette hypothèse est forte et mérite d'être testée, car elle affecte le krigeage qui, s'il ne prend pas l'éventuelle anisotropie en compte, lissera son éventuel effet sur le produit final, la grille d'estimation. L'interprétation par exemple géologique (une faille d'une certaine orientation affecte-t-elle la déformation et si oui comment ?) en serait biaisée et le produit final incorrect. La prise en compte de l'anisotropie peut donc améliorer le modèle de vitesse en prenant en compte une caractéristique géométrique de la spatialisation de celui-ci.

Pour qu'une anisotropie soit détectée, il est nécessaire d'observer, sur les variogrammes directionnels, des paliers et effets de pépite identiques, mais des portées différentes. Ces différences de portée doivent présenter une orthogonalité entre la portée la plus grande et la portée la plus petite. Ceci résultant en une ellipse décrivant l'anisotropie de l'échantillon (Figure 3-12).

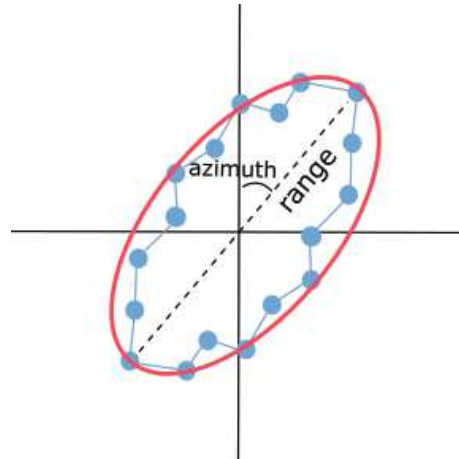


Figure 3-12 : Ellipse d'anisotropie géométrique : exemple. Points bleu : valeurs de portées de chaque variogramme directionnel, en fonction de son azimuth. Rouge : ellipse caractérisant l'anisotropie de l'échantillon.

Afin d'étudier l'éventuelle anisotropie de la déformation, des variogrammes directionnels peuvent être créés selon un pas d'angle défini et une tolérance associée (par exemple tous les 10° avec une tolérance de $\pm 5^\circ$) définissant la section de recherche des points afin de ne pas réutiliser les mêmes points entre deux variogrammes. Plus le nombre de variogrammes directionnels est important (et donc plus l'angle et sa tolérance sont petits), plus l'estimation de l'anisotropie sera proche de la réalité. Néanmoins le nombre de points pour construire les variogrammes diminue en conséquence.

La présence d'une anisotropie géométrique est typique, dans le domaine minier, des gisements dits lenticulaires. Cette caractéristique nous intéresse tout particulièrement dans notre étude puisque de nombreuses subsidences peuvent montrer une forme similaire. Ce type d'anisotropie sera détecté en comparant les valeurs de paliers de la fonction décrivant les modèles de variogrammes directionnels. Seules les anisotropies géométriques sont modélisables aisément en géostatistique (Marcotte, 2006).

La krigeage a été sélectionné comme méthode d'interpolation pour ses avantages face aux nombreuses autres méthodes d'interpolation, notamment car celui-ci est une méthode d'interpolation dite exacte. On distingue plusieurs types de krigeages : ordinaire, simple, ou universel. Tous ces types de krigeage sont des variantes de l'équation suivante, nommée

estimateur de régression linéaire ou *estimateur du krigeage* telle que (les équations suivantes et leur définition sont issues et modifiées d'après Goovaerts, 1997) :

$$Z^*(u) - m(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha} [Z(u + h) - m(u + h)]$$

Avec :

$Z^*(u)$: L'estimateur du krigeage en tout point u ,

u : Point dont la valeur est estimée,

h : distance entre deux points u ,

$n(u)$: Nombre de points de données dans le voisinage de u ,

$m(u)$: Valeur moyenne attendue de u et u_{α}

$\lambda_{\alpha}(u)$: Poids du krigeage attribué à $Z(u)$.

Le krigeage *simple* (KS) considère que la composante $m(u)$ est une constante telle que $m(u) = m$. L'équation précédente devient :

$$Z_{KS}^*(u) = m + \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{KS}(u) [Z(u + h) - m]$$

Le krigeage *ordinaire* (KO) ne considère pas que la moyenne $m(u)$ est constante sur tout l'échantillon, mais que celle-ci est constante localement, dans le voisinage de chaque point d'estimation, c'est-à-dire que :

$$m(u) = m(u + h)$$

Pour les valeurs proches de $m(u)$. L'équation de l'estimateur du krigeage devient donc :

$$Z_{KO}^*(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{KO}(u) [Z(u + h)]$$

Le krigeage *universel* (KU), souvent nommé krigeage *avec tendance*, considère, tout comme le krigeage ordinaire, une valeur locale de la moyenne $m(u)$, mais cette valeur n'est pas une constante mais une fonction dépendante de la localisation de u telle que, (exemple d'une fonction linéaire) :

$$m(u) = m(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y$$

Goovaerts (1997) indique que le choix de cette dernière méthode de krigeage est risqué et conseille d'utiliser le krigeage ordinaire.

De plus des études ont comparé les différentes méthodes de krigeage et les conclusions sont contrastées. Citons Daya et al., (2015) qui montrent la supériorité (en termes de

précision) du krigeage ordinaire sur des données minières (gisement de cuivre) ou Wood (2016) qui conclut que les différences sont mineures (interpolation de données de pluviométrie) malgré des tests sur la spatialisation de la donnée.

De par ces conclusions, la méthode du krigeage ordinaire est retenue afin d'interpoler les champs de vitesses dans la méthodologie de combinaison présentée dans ce manuscrit.

Ainsi, cette section a permis de décrire les différents choix et étapes correspondantes en vue de préparer les champs de vitesses InSAR à la combinaison décrite ci-après, avec (1) la détermination d'un variogramme expérimental afin de calculer un modèle de variogramme correspondant au mieux, en considérant l'hypothèse d'anisotropie de la déformation sur l'échantillon, puis (2) un krigeage ordinaire du champ de vitesses. Il est maintenant nécessaire d'intégrer ces étapes décrites ci-avant dans la méthode de combinaison.

3.3.2.3 Propositions méthodologiques d'estimation des trois composantes spatiales de la déformation d'un bol de subsidence

L'interpolation des champs de vitesses InSAR permet de calculer les composantes V_{los}^{asc} et V_{los}^{desc} . Associées au calcul de la composante U_E telle que décrite en section 3.3.2.1, celles-ci permettent d'estimer les composantes Est-Ouest V_E et une composante « quasi-verticale » $V_{near-Up}$ affectée de la mesure combinée de la composante verticale et de la composante Nord-Sud de la déformation telles que l'on obtient le système suivant :

$$V_E = \frac{V_{los}^{asc} - V_{los}^{desc}}{2} \cdot \frac{1}{-U_E^{desc}}$$

$$V_{near-Up} = \frac{V_{los}^{asc} + V_{los}^{desc}}{2} \cdot \frac{1}{U_U}$$

Une fois ces composantes estimées, il n'est pas possible, directement, de discriminer la composante verticale de la composante Nord-Sud. Pour cela il est nécessaire d'émettre de nouvelles hypothèses sur ces composantes inconnues de la déformation.

Il est ainsi possible de distinguer trois cas différents, correspondant à trois degrés d'hypothèses. Le premier cas (**méthode 1**) est le plus simple. En faisant l'hypothèse que la composante Nord de la déformation sur la zone d'étude est nulle, il devient possible de déterminer les deux composantes horizontales V_E et V_N et la composante verticale V_U telles que l'on obtient le système suivant :

$$V_E = \frac{V_{los}^{asc} - V_{los}^{desc}}{2} \cdot \frac{1}{-U_E^{desc}}$$

$$V_N = 0$$

$$V_U = \frac{V_{los}^{asc} + V_{los}^{desc}}{2} \cdot \frac{1}{U_U}$$

La limite de cette méthode est évidente : on considère la composante Nord de la déformation nulle, alors même qu'une composante Est-Ouest est estimée. Seuls de très rares cas de glissements de terrain de direction Est-Ouest peuvent correspondre. Néanmoins les termes V_{los} étant peu sensibles à la composante V_N , cette hypothèse seule doit être testée.

Le deuxième cas (**méthode 2**) prend en considération une hypothèse de déformation radiale. Tout point du bol de subsidence se déplace sur le plan horizontal, déplacement dirigé vers un centre de subsidence. On obtient ainsi le système d'équations suivant déterminant V_E , V_N et V_U (α défini en Figure 3-13) :

$$V_E = \frac{V_{los}^{asc} - V_{los}^{desc}}{2} \cdot \frac{1}{-U_E^{desc}}$$

$$V_N = V_E \cdot \tan \alpha$$

$$V_U = \left(\frac{V_{los}^{asc} + V_{los}^{desc}}{2} - V_N \cdot U_N \right) \cdot \frac{1}{U_U}$$

Cette méthode permet l'estimation de la composante Nord-Sud dans le bol de subsidence. Néanmoins, géométriquement en s'approchant de l'axe Nord-Sud passant par le centre du bol de subsidence, des valeurs tendant vers l'infini sont attendues. En effet, la valeur α tend, à l'approche de cet axe, vers respectivement 90° au Nord et 270° au Sud tel qu'illustré en Figure 3-13 ci-après. Or la tangente de ces valeurs est égale à l'infini. Une portion pour les α proches de ces valeurs est donc attendue comme inutilisable dans le calcul de la composante V_U , cette méthode ne permettra donc pas d'estimer les valeurs de l'intégralité des points du bol de subsidence, et tout particulièrement les points pour lesquels la mesure de la composante Nord est importante car celle-ci maximale (proche de l'axe Nord-Sud).

Un troisième cas de figure (**méthode 3**) est alors développé. Faisant une nouvelle hypothèse : tout en considérant un bol de forme plus ou moins complexe (les bols de subsidence qu'ils soient d'origine anthropique ou naturelle, peuvent en effet montrer des formes plus ou moins circulaires, ou en ellipse), l'hypothèse est faite que la déformation planimétrique suit des iso-contours de déformation, iso-contours dont la valeur est déterminée par le profil Est-Ouest passant par le centre du bol de subsidence, centre correspondant au maximum de subsidence estimé (voir schéma explicatif Figure 3-13).

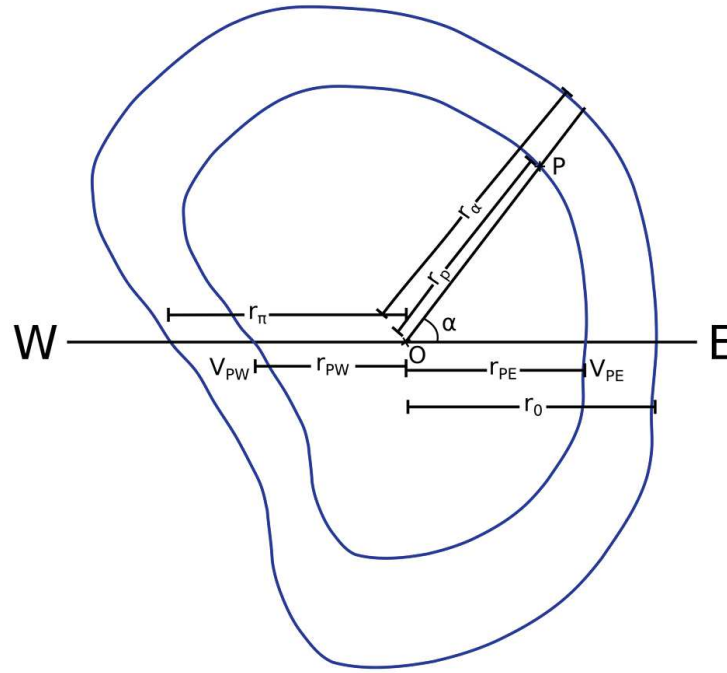


Figure 3-13 : Schéma de description de la méthode de calcul de la composante Nord selon le cas 3, pour un bol de subsidence de forme complexe.

Suivant ce schéma les équations caractérisant V_E , V_N et V_U sont :

$$V_E = \frac{V_{los}^{asc} - V_{los}^{desc}}{2} \cdot \frac{1}{-U_E^{desc}}$$

$$V_N = \sqrt{(V_h^2 - V_E^2)}$$

$$V_U = \left(\frac{V_{los}^{asc} + V_{los}^{desc}}{2} - V_N \cdot U_N \right) \cdot \frac{1}{U_U}$$

Avec V_h la vitesse dans le plan horizontal d'un point p telle que :

$$V_h = \frac{\pi - \alpha}{\pi} \cdot |V_{pe}| + \frac{\alpha}{\pi} \cdot V_{pw}$$

V_{pe} et V_{pw} étant, comme illustrés sur la Figure 3-13, les vitesses dans le plan horizontal d'un point p projetées sur les sections, respectivement, Est et Ouest (par rapport au centre de subsidence) du profil EW passant par le centre de subsidence. La valeur absolue de V_{pe} est prise en compte puisque les valeurs de la moitié Est sont négatives (dirigées vers l'Ouest). Cette méthode permettra donc d'estimer la composante Nord de la déformation en tout point du bol de subsidence.

Cette section a permis de décrire et illustrer trois méthodes d'estimation des trois composantes spatiales de la déformation. La section ci-après va permettre de comparer ces méthodes afin de déterminer, si possible, vers quelle solution s'orienter dans le cadre de la méthodologie de combinaison de données géodésique.

3.3.2.4 Algorithme

Le schéma présenté en Figure 3-14 illustre les étapes de la méthodologie du calcul de la composante verticale, depuis deux champs de vitesses issus de deux calculs InSAR, pour la même zone d'étude, sur deux géométries radar différentes, et considérant les hypothèses citées en section 3.3.2.1 et les méthodes développées en section 3.3.2.3. L'étape du krigeage ordinaire (O.K.) a été décrite en section précédente 3.3.2.2.3 et les champs de vitesses InSAR en entrée sont considérés géoréférencés selon les méthodes décrites en section 3.3.1.

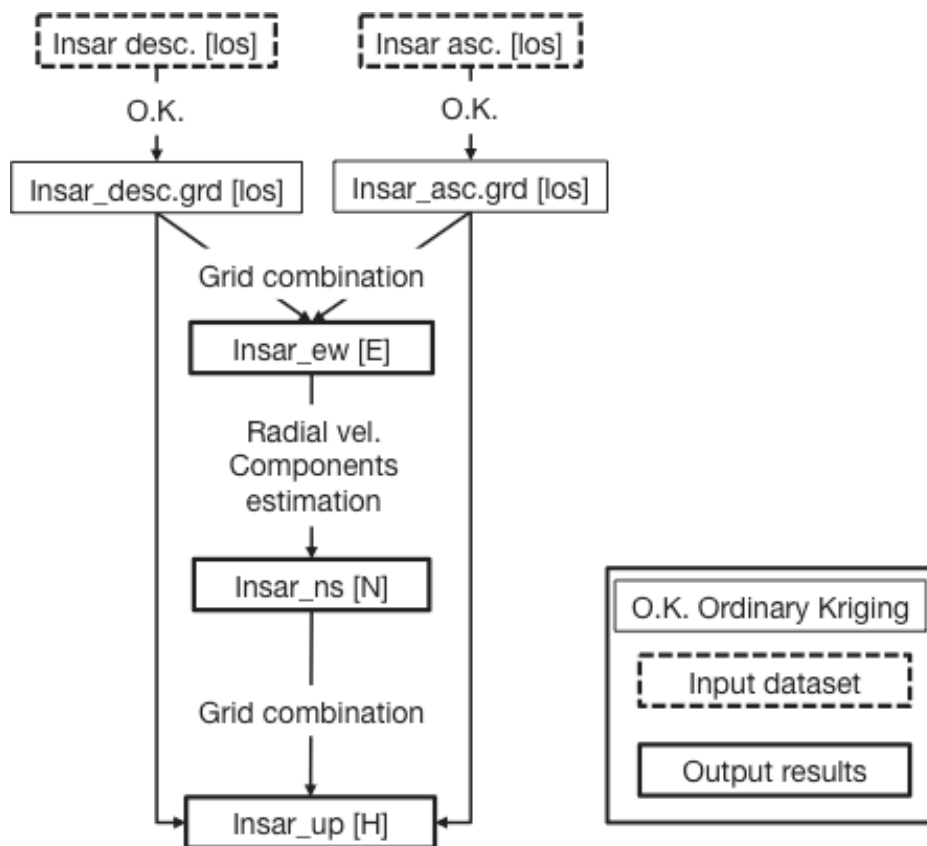


Figure 3-14 : Schéma de principe des étapes de la méthodologie de détermination des trois composantes spatiales de la déformation

Ces étapes permettent l'obtention d'un champ de vitesses dans les deux composantes horizontales Nord et Est ainsi que dans la composante verticale.

3.3.3 Pondération des données

3.3.3.1 Nivellement

Le nivellement est effectué selon des polygones fermés constitués de successions de cheminements permettant une compensation par moindres carrés des erreurs, des systématismes et des biais accumulés le long du profil.

Les incertitudes, en nivellement, sont proportionnelles à la distance de cheminement. Lorsque ceux-ci sont effectués en allers-retours (cheminement double), l'erreur est donnée en millimètres sur la racine de la distance (kilomètres). De cette manière on obtient une incertitude proportionnelle à la racine de la distance le long du cheminement. Ces incertitudes sont relatives (tout comme les dénivelées mesurés). Pour obtenir des altitudes et des incertitudes absolues il est nécessaire d'inclure dans les profils des mesures des bornes de référence géodésiques avec une valeur d'altitude absolue (par exemple rattachement aux mailles de nivellement NGF permettant d'obtenir des altitudes IGN 69 en France). De plus, ces incertitudes peuvent être pondérées selon des critères environnementaux (liés à la nature de la borne et de son support). Ce type de pondération est notamment effectué à Vauvert par l'IGN.

Deux cas sont retenus. Le premier concerne l'obtention de données mesurées par des tierces personnes, pour lesquelles aucune incertitude n'est disponible. Dans ce cas, seule la pondération par des critères environnementaux est possible. Le deuxième concerne des données mesurées et calculées en interne. La maîtrise du processus total permet l'obtention d'incertitudes calculées, auxquelles peuvent s'ajouter une pondération par des critères environnementaux.

3.3.3.2 InSAR

Les traitements InSAR décrits au chapitre 2 permettent d'une part l'obtention de champs de vitesses et d'autre part des champs d'incertitudes associées. Ces incertitudes sont issues de l'analyse de la régression linéaire qui, en chaque réflecteur permanent, donne la valeur de vitesse ainsi qu'une déviation standard de cette régression linéaire. Cela permet de décrire l'erreur si l'on considère le mouvement mesuré comme linéaire au cours du temps, en évaluant le bruit résiduel autour de la régression linéaire. Afin de prendre ces valeurs d'incertitude en considération dans la méthodologie de combinaison des modèles de vitesses InSAR ascendant et descendant, il est nécessaire (1) d'interpoler les valeurs d'écart-type sur la grille identique à celle utilisée pour l'interpolation des vitesses et (2) de prendre en considération les variances du krigeage des vitesses et du krigeage des incertitudes. Le produit qui en résulte n'est pas une incertitude, les valeurs obtenues sur une grille n'étant pas directement liées à des mesures en ces mêmes points. Le produit est donc une grille d'indices de pondération, nommée P_{insar} telle que :

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

Avec :

$$P_{asc} = \sqrt{S_{v.asc} + S_{unc.asc} + Unc_{asc}^2}$$

$$P_{desc} = \sqrt{S_{v.desc} + S_{unc.desc} + Unc_{desc}^2}$$

La définition des termes étant :

P_{insar} : Grille d'indice de pondération finale issue de l'association des grilles de pondération sur géométries ascendante et descendante P_{asc} et P_{desc} , en (mm/an).

$S_{v.asc}$ et $S_{v.desc}$: Les grilles de variance issues du krigeage ordinaire sur champs de vitesses respectivement ascendant et descendant, en (mm/an)²,

$S_{unc.asc}$ et $S_{unc.desc}$: Les grilles de variance issues du krigeage ordinaire sur incertitudes des champs de vitesses respectivement ascendant et descendant, en (mm/an)²,

Unc_{asc} et Unc_{desc} : Les grilles d'incertitudes interpolées par krigeage ordinaire des incertitudes des champs de vitesses respectivement ascendant et descendant, en mm/an.

Les valeurs de pondérations P_{insar} obtenues en chaque nœud peuvent être variables selon des caractéristiques physiques du milieu : fortes pentes topographiques, végétation ou selon un indice sur la densité de point native. En effet certaines zones fortement végétalisées peuvent être très peu couvertes de réflecteurs permanents avec une densité de points allant de 0 PS/km² à quelques dizaines de PS par km² contre plusieurs centaines voire milliers de PS par km² en zones urbaines. La variance en sortie du krigeage est un indice statistique de cette problématique.

3.3.3.3 GNSS

Les données GNSS, qu'elles soient traitées avec un logiciel utilisant la méthode de double différence ou avec la méthode du *Precise Point Positioning*, sont fournies avec des incertitudes associées aux résultats (coordonnées et vitesses), tel que décrit en chapitre 2. Les logiciels dits scientifiques, comme Gamit-GlobK (utilisé dans ce travail) ou Bernese, fournissent des valeurs d'incertitudes nommées « réalistes ». Les incertitudes (matrices de variance/covariance) issues de Gamit-GlobK sont plus réalistes que celles de Bernese et des logiciels commerciaux (par exemple TBC) (Kashani et al, 2004). Pour Gamit-GlobK, ces incertitudes sont calculées par le « realistic sigma algorithm (FOGMEx) » (Herring, 2003) qui

est capable de pondérer les incertitudes en fonction de bruits blanc d'une part, et coloré de grande longueur d'onde, introduit sous forme d'un processus de Gauss-Markov de premier ordre, d'autre part. Néanmoins l'expérience montre que ces incertitudes restent bien souvent très optimistes.

Afin d'éviter de déséquilibrer la solution finale en surévaluant la précision du GNSS comparativement aux autres techniques de mesures, une analyse fréquentielle de séries temporelles peut être effectuée. Les valeurs obtenues sont utilisables comme valeurs de pondération dans la méthodologie de combinaison.

3.3.4 Champ de vitesses combiné par krigeage-regression pondéré

3.3.4.1 Méthode : description générale

Après une description des méthodes de combinaison précédemment développées en section 2.3, et une description de la préparation des données en vue d'une combinaison en sections 3.3.2 et 3.3.3, la problématique qui se pose à ce stade concerne le choix de la méthode de combinaison de différentes mesures géodésiques correspondant aux objectifs fixés en section 3.2. Cette problématique est différente de celle posée lors de la création d'un champ de vitesse InSAR combiné décrit en section 3.3.2. En effet, celle-ci partait de la constatation que l'InSAR, quoique plus dense que toute autre mesure géodésique, montrait des variations spatiales importantes de densité entre ses champs de vitesses issus de géométrie ascendante et descendante, et nécessitait donc une interpolation avant combinaison. De plus, l'état de l'art des méthodes de combinaison de mesures géodésiques à montré (section 2.3) il apparaît difficile de faire le choix d'une solution de combinaison de champs de vitesses de mesures géodésiques par somme pondérée de champs de vitesses interpolés en amont. La raison est que ce qui est avéré dans la majorité des cas en InSAR (densité de mesure suffisante pour obtenir un champ de vitesses dense et réaliste) ne l'est pas en GNSS (densité trop faible) ou en nivellement (montrant souvent une meilleure densité mais disposition totalement linéaire des mesures). C'est ce qui rend le choix de la technique du co-krigeage difficile : GNSS et dans une moindre mesure nivellement sont le plus souvent impossibles à interpoler en grille sans concessions trop importantes sur la qualité du résultat. Il est en conséquence difficile d'implémenter la méthode du co-krigeage dans une méthodologie de combinaison s'appliquant à des contextes de densités de mesures très différents. De plus, comme indiqué dans de nombreuses références bibliographiques (Neter et al. 1996 ; Goovaerts, 1999 ; Webster et al., 2001), un minimum de 50 points est recommandé pour une estimation de modèle de variogramme. Or, dans un cadre industriel, le nombre de stations GNSS ou points nivelés peut varier de manière très importante. Afin d'obtenir une solution de combinaison applicable dans tous les cas de figures rencontrés ce nombre minimal de points est limitant.

L'utilisation du krigeage-régression pondéré (Odeh et al., 1995 ; Hengl et al., 2004; Hengl et al., 2007) permet de contourner ces problèmes pour deux raisons principales. La première raison est que l'interpolation est effectuée sur les résidus, présentant statistiquement une variance plus faible. Cela facilite ainsi l'analyse des variogrammes. La deuxième raison est que les données les moins denses peuvent être assemblées en un même fichier d'entrée, les valeurs de pondération les gardant différenciées. Le nombre de point cumulé (par exemple mesures GNSS et nivellement) étant de fait plus élevé que les nombres isolés de points mesurés par chacune des techniques, le minimum de points est donc plus facilement atteint. En conséquence la répartition spatiale des points cumulés sera aussi meilleure.

Le krigeage-régression est une technique d'interpolation spatiale qui combine la régression d'une variable cible sur des prédictors (i.e. des co-variables environnementales) avec un krigeage des résidus de la prédiction. La méthode de la régression permet de faire des prédictions en modélisant les relations entre la cible et une ou plusieurs variables environnementales auxiliaires (le(s) prédicteur(s)) à des emplacements d'échantillonnages communs, et en l'appliquant à des endroits où cette variable est inconnue. Autrement dit, le krigeage-régression est une méthode hybride qui combine un modèle de régression linéaire avec un krigeage ordinaire des résidus de prédiction. Cette méthode est indépendamment applicable aux trois dimensions spatiales de la déformation. Elle permet en outre la création d'un modèle de vitesse issu de minimum deux champs de vitesses (une variable cible et une variable auxiliaire) jusqu'à en théorie une infinité de techniques de mesures différentes (une variable cible et une infinité de variables auxiliaires pondérées).

Dans la méthodologie de combinaison développée, nous avons ainsi choisi cette méthode de krigeage-regression pondérée. La variable cible pourra aussi être nommée *donnée principale*.

3.3.4.2 Algorithme de la méthode de combinaison

Dans ce manuscrit, l'objectif de créer une méthode qui peut s'appliquer à des cas les plus variés possibles a été mentionné. Nous proposons donc un algorithme et des variantes.

Les étapes de l'algorithme de combinaison sont illustrées sur le schéma ci-après (Figure 3-15), depuis l'importation des données d'entrée à la grille finale de vitesses combinées, en passant par les étapes du krigeage-régression pondéré. Ce schéma inclut la totalité de la méthodologie de combinaison. La section actuelle décrit la méthodologie de combinaison des champs de vitesses, encadrée en bleu sur le schéma, la partie concernant l'estimation des 3 composantes de la déformation ayant été décrite précédemment. La raison de cette intégration de l'estimation de ces trois composantes est simple : elle permet la discussion des différents cas de figures de disponibilité des données, demandant la création de variantes du schéma de principe (schémas ci-après), variantes illustrant le degré de flexibilité de la solution de combinaison.

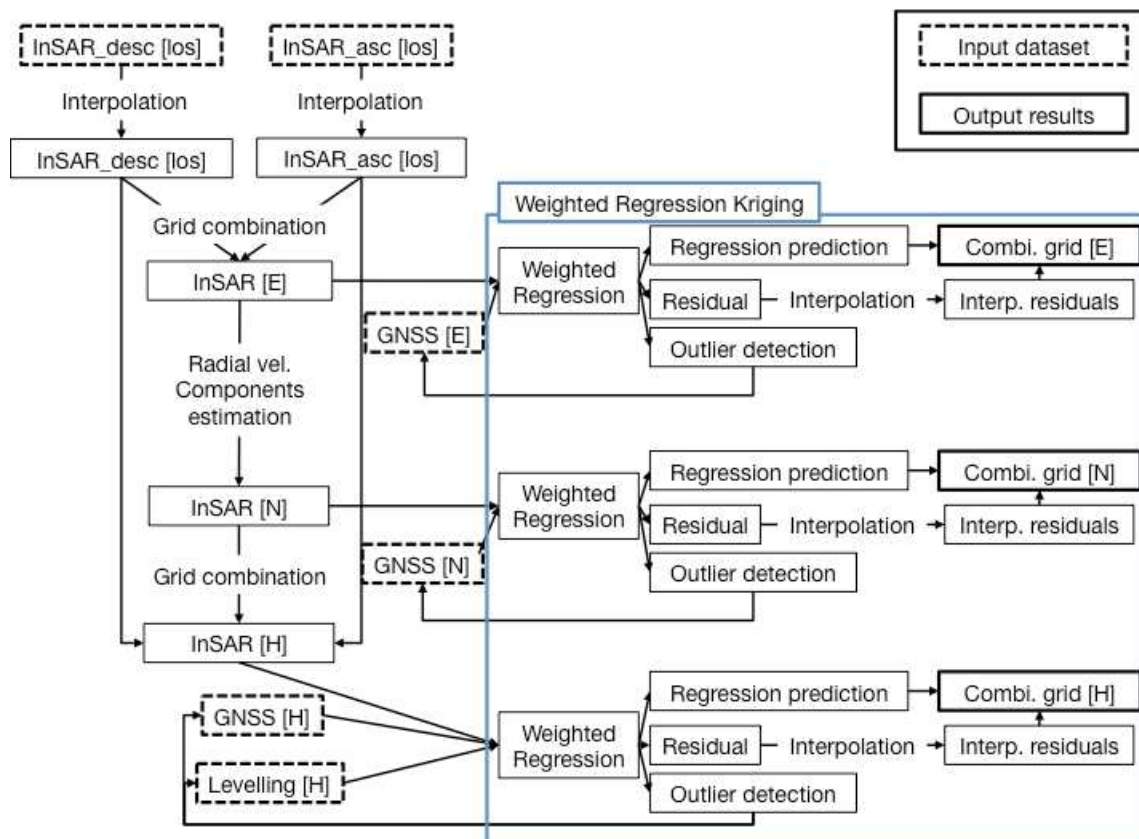


Figure 3-15 : Algorithme de la méthodologie de combinaison de mesures géodésiques (InSAR, GNSS, Nivellement) pour la détermination d'un champ de vitesses 3D (encadré bleu) et étapes de la détermination des trois composantes spatiales de la déformation sur données InSAR.

L'algorithme permet l'obtention de trois modèles de vitesses issus des combinaisons de champs de vitesses selon les composantes horizontales et verticale. Ce schéma méthodologique est donc cohérent dans le cadre de projets où la densité de stations GNSS est suffisante et la répartition spatiale homogène, menant à une solution combinée dans les trois dimensions de l'espace.

La première étape consiste en un échantillonnage de la donnée principale la plus dense et la mieux spatialement répartie, le plus souvent l'InSAR, sur la/les donnée(s) auxiliaire(s), le nivellement et/ou le GNSS. Ensuite une régression linéaire est appliquée, entre la donnée principale d'une part et la/les donnée(s) auxiliaire(s) d'autre part, tel que (Hengl et al., 2004, modifié) :

$$\hat{m}(s_0) = \sum_{k=0}^p a_k \cdot \hat{\beta}_k \cdot q_k(s_0)$$

Avec $\hat{m}(s_0)$ la prédiction de la régression, $\hat{\beta}_k$ le coefficient de la régression, a_k la pondération, et $q_k(s_0)$ la donnée auxiliaire.

Souvent nommée ajustement ordinaire par moindres carrés (OLS pour *Ordinary Least Squares*) ou régression linéaire au sens des moindres carrés, la régression a pour objectif l'obtention du modèle de prédiction pour lequel la somme des carrés des différences entre les données (la principale et l'auxiliaire) est minimale. À ce stade, un modèle de vitesse issu de la régression – modèle de vitesses nommé prédiction – ainsi que des résidus – différence entre les valeurs des données auxiliaires et la prédiction – sont calculés.

La deuxième étape consiste en une interpolation des résidus de la prédiction. La régression de l'étape 1 permet d'obtenir un modèle de prédiction et des résidus associés. Le modèle de prédiction est créé afin de minimiser, au sens des moindres carrés, les écarts entre valeurs des données principales et valeurs des données auxiliaires. Néanmoins des résidus subsistent toujours, dans le cas contraire, la régression seule suffirait. Ces résidus sont indispensables à la solution finale, puisqu'ils décrivent l'hétérogénéité spatiale de la déformation mesurée par les données auxiliaires, mais pas – ou mal – par la donnée principale. C'est là bien l'objectif principal de la combinaison : la donnée principale, plus dense et moins précise mesure moins précisément la déformation que les mesures auxiliaires, moins denses. L'interpolation des résidus suit la méthode décrite en section 3.3.2.2.3 : le krigeage ordinaire est utilisé. Les mêmes raisons que celles décrites en section 3.3.2.2.2 amènent à ce choix. De plus, l'élément principal de paramétrisation du krigeage est le variogramme et son étude. Dans le cas d'une étude variographique sur des résidus, deux types de modèles de variogrammes sont attendus, selon les données :

- Si le résidu est issu d'une régression ayant parfaitement décrit la relation entre les données principales et auxiliaires, alors celui-ci est attendu faible avec une moyenne proche de zéro et des valeurs aléatoirement réparties. Le modèle de variogramme suivra dans ce cas une fonction pépité.
- Si un biais résiduel, non – ou mal – modélisé par la régression, est présent dans le résidu, alors la moyenne sera différente de zéro, et le modèle de variogramme sera affecté par ce biais. Le modèle sera donc caractérisé par une portée et un palier (par exemple sphérique).

Le krigeage est ensuite effectué sur les résidus issus de la régression selon la méthode décrite en section 3.3.2.2.3.

Tout comme le krigeage des champs de vitesses InSAR, le krigeage des résidus de la régression permet aussi le calcul de sa variance. Celle-ci sera utilisée dans le calcul de l'indice de fiabilité du champ de vitesse combiné.

Enfin, **la dernière étape** consiste en une fusion par l'addition de (1) la grille de prédiction obtenue lors de l'étape de la régression et (2) la grille issue de l'interpolation des résidus, telle que (Hengl et al., 2004) :

$$\hat{z}(s_0) = \hat{m}(s_0) + \hat{e}(s_0)$$

Avec :

$$\hat{e}(s_0) = \sum_{i=1}^p \lambda_i \cdot e(s_i)$$

$\hat{e}(s_0)$ étant le résultat de l'interpolation des résidus, λ_i les poids du krigeage déterminés par les caractéristiques du modèle de variogramme et $e(s_i)$ le résidu au point s_i .

3.3.4.3 Variantes de l'algorithme de la méthode de combinaison

L'algorithme de la méthode de combinaison présenté en section précédente peut s'adapter selon des variantes qui considèrent des cas spécifiques de jeux de données d'entrée. Deux de ces variantes sont développées ici. La première s'intéresse aux mesures GNSS. Ces mesures sont les seules à même de mesurer les trois dimensions spatiales de la déformation mais peuvent être insuffisamment denses et/ou mal réparties pour être utilisées dans le cadre d'une interpolation. Dans ce cas, les composantes horizontales du GNSS sont utilisées comme valeurs de contrôle par comparaison des champs de vitesses correspondant estimés sur les données InSAR. Ce cas est illustré ci-après en Figure 3-16.

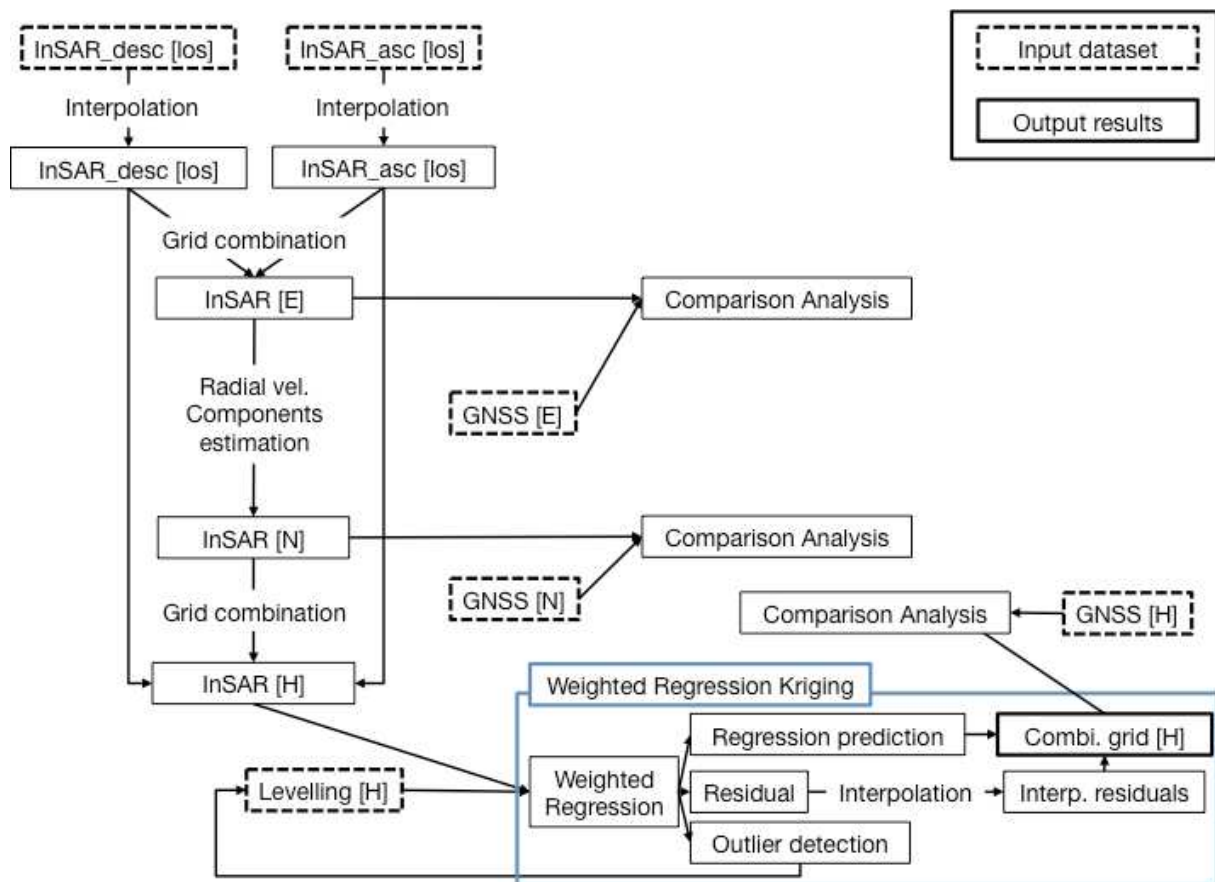


Figure 3-16 : Variante 1 de l'algorithme des étapes de la méthodologie de combinaison de mesures géodésiques.

La seconde variante concerne la possibilité d'accès à une seule géométrie InSAR, ce qui est potentiellement courant dans le cadre d'applications industrielles de la méthode. L'adaptation de la méthodologie correspondante est ainsi illustrée en Figure 3-17. On considère dans cette variante la disponibilité d'une seule géométrie d'images SAR en plus de données GNSS et nivellement. Le tout est projeté selon la ligne de visée du satellite (LOS) et le résultat est donc un modèle de vitesses en géométrie LOS, puisque la présence d'une unique géométrie InSAR ne permet pas de calcul de vitesses dans les trois dimensions de l'espace. Ainsi, selon les données d'entrée disponibles, la méthodologie est capable de répondre à l'objectif de création d'un modèle de vitesse dans les trois dimensions spatiales ou dans la direction de la ligne de visée du satellite dans le cas où l'InSAR ne serait traité que sur une géométrie.

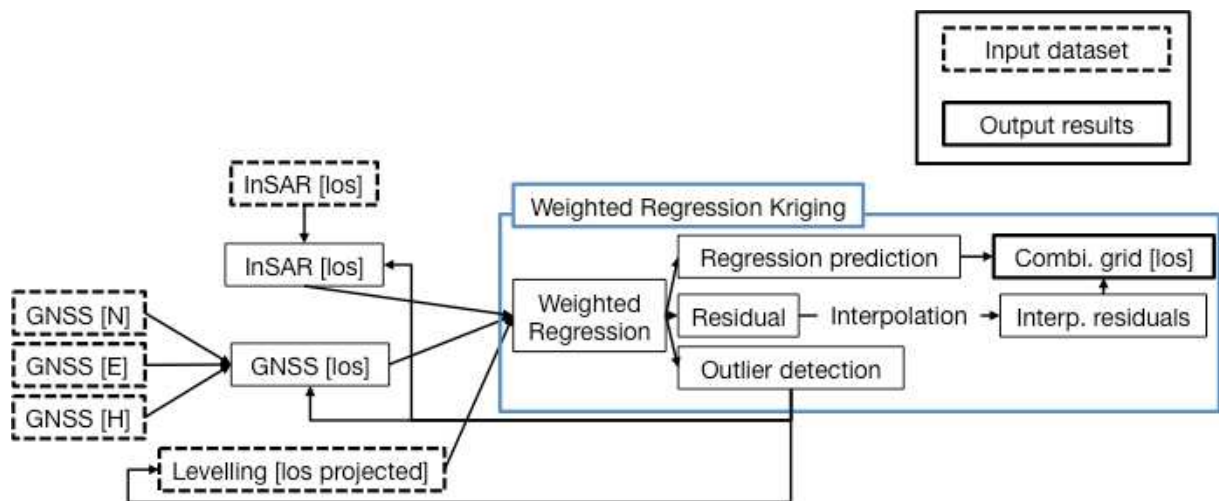


Figure 3-17 : Variante 2 du schéma de principe des étapes de la méthodologie de combinaison de mesures géodésiques.

De plus, notons que ces schémas prennent en considération l'utilisation de trois techniques de mesures : l'InSAR, le GPS et le nivellement géométrique. La méthodologie est adaptable aux cas où aucune mesure GNSS ou de nivellement n'est disponible, ou qu'aucune mesure ou traitement InSAR n'a été effectuée. Dans ce dernier cas, la mesure la plus dense et la mieux répartie dans l'espace devient la mesure principale, l'autre devenant mesure auxiliaire.

Enfin, ne considérer que ces trois types de mesures citées peut paraître réducteur. D'autres mesures existent, comme cité en section 2.2. Ces mesures (par exemple d'inclinométrie ou nivellement trigonométrique), sont aussi intégrables à la solution de combinaison, tant que les critères suivants sont respectés : (1) la mesure peut se traduire en termes de déplacement ou vitesse dans une ou plusieurs dimensions spatiales et (2) le nombre, la densité et la disposition spatiale des mesures doivent être adaptés aux caractéristiques du champ de déformation.

3.3.4.4 Indice de fiabilité du champ de vitesse combiné

Afin de répondre à l'objectif de prise en compte des incertitudes des méthodes de mesures géodésiques combinées, une pondération de ces techniques est utilisée. Cette pondération est décrite en section 3.3.4.2. Néanmoins l'utilisation de cette seule pondération n'est pas totalement satisfaisante. En effet, elle permet l'obtention d'un modèle de vitesses final combiné mais pas d'une incertitude associée issue de la combinaison.

Or, aucune incertitude au sens strict n'est calculable en chaque point d'une grille ne reflétant pas directement des mesures en ses points, mais étant le résultat d'une interpolation. Le terme d'incertitude doit donc bien rester lié à des valeurs (et leur emplacement spatial – coordonnées) de mesures.

L'association de ces incertitudes de mesures ainsi que des indices de qualité disponibles lors des différentes étapes de la méthodologie de combinaison est donc nommée « indice de fiabilité du champ de vitesses combiné ».

Cet indice est donc calculé en chaque point de la grille, prenant en considération les incertitudes de chaque technique de mesure ainsi que l'incertitude associée aux interpolations. L'esprit est identique à la création de la grille d'indice de pondération de l'InSAR décrite en section 3.3.3.2. Soit l'indice de fiabilité du champ de vitesses combiné P_{combi} :

$$P_{combi} = \sqrt{P_{insar}^2 + S_{WRK}}$$

Avec : P_{insar} l'indice de pondération de l'InSAR (présenté en section 3.3.3.2) et S_{WRK} la variance du krigeage-régression pondéré liée à toutes les données utilisées (InSAR, GNSS, nivellement).

3.3.5 Environnement logiciel

Cette section décrit l'environnement logiciel dans lequel l'algorithme de combinaison est créé. Cet environnement logiciel tient un rôle majeur dans le développement de la méthodologie, actuel et futur. En effet, il peut faciliter sa création et ses modifications futures grâce à sa facilité de prise en main, à sa richesse en codes existants, en aides, en questions résolues et sujets sur les forums Internet dédiés ainsi qu'à la possibilité de créer une interface utilisateur.

Basé sur ces critères, l'environnement de développement choisi est le langage de programmation R. Principalement développé pour les aspects statistiques et de

manipulation de données vectorielles, il est multiplateformes puisque disponible sous UNIX (Linux, MacOS, FreeBSD, NetBSD, OpenBSD) et Windows, libre (licence GNU GPL) et gratuit.

Les raisons suivantes ont déterminé ce choix :

- Tout d'abord une certaine facilité d'approche pour toute personne n'ayant pas ou peu de connaissances en termes de programmation informatique,
- Des bibliothèques et des scripts préexistants très importants du fait de l'utilisation importante de R dans les milieux académiques et industriels, facilitant les codages de nombreuses étapes,
- Une communauté dynamique notamment sur Internet, permettant un débogage rapide,
- Enfin la possibilité d'appeler les scripts et fonctions depuis un logiciel SIG (QGIS) est l'un des critères primordiaux, la solution créée ayant pour objectif d'être utilisée via des menus intégrés à QGIS. Cette possibilité d'intégration à QGIS contrebalance une interface graphique native orienté programmeur et difficilement accessible pour un néophyte.
- Cette possibilité est d'autant plus importante en vue du traitement de champs de déformation complexes (sous-séries spatiales, sous-séries temporelles), et permet la superposition d'informations externes (notamment les données géologiques, les infrastructures types puits d'extraction, d'injection, routes, la topographie, ou encore les données hydrographiques tels que présence d'oueds ou de thalwegs).

Les modules présentés dans ce chapitre sont ainsi tous développés sous R via l'interface RStudio. Ils forment un ensemble logiciel nommé GEOMON, en référence à son domaine d'application majeur nommé Geomonitoring, et les sorties graphiques, notamment les cartes, sont issues de QGIS.

3.4 Conclusion

Après le chapitre présentant l'état de l'art des techniques de mesure et des combinaisons, ce chapitre a permis de décrire une méthodologie de combinaison de mesures géodésiques répondant notamment aux objectifs suivants précédemment établis :

- Utilisation d'un nombre variable de techniques de mesures géodésiques de déformation de surface : flexibilité nécessaire pour l'application à de nombreux cas de figures rencontrés dans le cadre de projets de recherche ou dans l'industrie.
- Mise en référence commune de ces techniques de mesure.
- Combinaison de valeurs de déplacements (ou de vitesses) pondérées via leurs incertitudes.

Une fois ces objectifs définis, toutes les étapes de la méthode de combinaison de mesures géodésiques ont été décrites, depuis les données indépendantes jusqu'au modèle de vitesse final, et ce pour différents cas de figures suivant la disponibilité des données. Tout d'abord une méthodologie de combinaison des géométries ascendante et descendante issues des traitements PS-InSAR a été proposée, avec la description de plusieurs variantes permettant d'estimer les trois composantes spatiales de la déformation. Ces différentes méthodes correspondent à différents degrés d'hypothèses, nécessitant une confrontation à un cas d'étude réel afin d'être discutées. L'harmonisation des références géodésiques a aussi été décrit, et tout particulièrement la mise en référence des champs de vitesses InSAR.

De plus, l'une des hypothèses concerne la densité de mesures InSAR. Une trop faible densité de mesure ne permet pas de combiner les champs de vitesses InSAR de différentes géométries sans perte d'information dans les zones où seul la géométrie ascendante ou descendante est présente. Il est alors apparu nécessaire de décrire des méthodes d'interpolation afin de choisir celle permettant de minimiser les pertes d'information. Le krigeage a été retenu et décrit.

Ensuite, afin de répondre à l'objectif de pondération des champs de vitesses dans la méthodologie de combinaison, la création d'un indice de qualité des mesures a été décrite. Cet indice de qualité prend non seulement en considération les valeurs d'incertitudes des mesures mais permet une harmonisation de ces valeurs entre techniques. De plus l'incertitude issue des interpolations des champs de vitesses InSAR (ou autre) est prise en considération.

Deux derniers objectifs ont été cités précédemment :

- Mesure de signaux transitoires ou cycliques (quelques jours à quelques mois) à long-terme de la déformation (quelques années à dizaines d'années).
- Mesure de toutes les échelles spatiales de la déformation (quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres).

Tout comme l'estimation des trois composantes spatiales de la déformation par combinaison des champs de vitesses InSAR, ces objectifs nécessitent une confrontation à un cas d'étude réel afin d'être discutés. Ce cas d'étude est la subsidence de Vauvert, sujet du chapitre suivant.

Chapitre 4

Application de la méthodologie de combinaison à la subsidence de Vauvert

Sommaire

4.1 Présentation et contextes du site d'étude : exploitation salifère de Vauvert (Gard)	91
4.1.1 Présentation générale du site	91
4.1.2 Cadre structural	93
4.1.3 Exploitation du site.....	97
4.1.4 Indices géodésiques de la déformation : précédentes études	100
4.1.4.1 Nivellement	100
4.1.4.2 Interférométrie satellitaire : sommation d'interférogrammes.....	106
4.1.4.3 Interférométrie satellitaire : traitements multi-temporels	108
4.1.4.4 GNSS.....	111
4.1.5 Contextes : synthèse.....	114
4.2 Traitement de nouvelles données géodésiques.....	115
4.2.1 Mesures GNSS par 4 stations permanentes	115
4.2.1.1 Mise en place.....	115
4.2.1.2 Calculs.....	116
4.2.1.3 Résultats	118
4.2.2 InSAR : multi-temporel sur données Envisat.....	122
4.2.2.1 Données.....	122
4.2.2.2 Calcul	123
4.2.2.3 Résultats	125
4.2.3 InSAR : multi-temporel sur données Sentinel-1a/b.....	134
4.2.3.1 Données.....	134
4.2.3.2 Calcul	135
4.2.3.3 Résultats	137
4.3 Application de la méthodologie de combinaison à Vauvert : période 2002-2009	142
4.3.1 Données	143
4.3.2 Mise en référence	143
4.3.2.1 Mise en référence planimétrique des champs de vitesses.....	143
4.3.2.2 Harmonisation des références altimétriques des champs de vitesses.....	144
4.3.3 Interpolation du champ de vitesses InSAR	148
4.3.4 Pondération des données	152

4.3.4.1	Nivellement	152
4.3.4.2	InSAR.....	152
4.3.5	Champ de vitesses combinées par krigeage-regression pondéré.....	154
4.3.5.1	Calcul.....	154
4.3.5.2	Modèle de vitesses combinées	158
4.3.5.3	Indice de fiabilité du champ de vitesses combinées.....	159
4.4	Application de la méthodologie de combinaison à Vauvert : période 2015-2017	
	161	
4.4.1	Données.....	161
4.4.2	Mise en référence	161
4.4.2.1	Mise en référence planimétrique des champs de vitesses.....	161
4.4.2.2	Harmonisation des références altimétriques des champs de vitesses.....	163
4.4.3	Combinaison des champs de vitesses InSAR en double géométrie	166
4.4.3.1	Interpolation des champs de vitesses InSAR.....	166
4.4.3.2	Détermination géométrique des composantes spatiales de la déformation	174
4.4.3.3	Comparaison des méthodes	181
4.4.4	Pondération des données	186
4.4.4.1	Nivellement	186
4.4.4.2	InSAR.....	186
4.4.5	Champ de vitesses combinées par krigeage-regression pondéré.....	188
4.4.5.1	Calcul.....	188
4.4.5.2	Modèle de vitesses combinées	193
4.4.5.3	Indice de fiabilité du champ de vitesses combinées.....	194
4.5	Conclusion.....	196

4.1 Présentation et contextes du site d'étude : exploitation salifère de Vauvert (Gard)

4.1.1 Présentation générale du site

Située dans le département français du Gard (Figure 4-1), à quelques kilomètres au Sud de Nîmes, la ville de Vauvert est notamment connue pour son arboriculture fruitière, sa viticulture liée aux Costières de Nîmes et sa saline à l'activité bientôt cinquantenaire. En effet, le sous-sol regorge localement de couches salifères, intéressant l'industrie chimique utilisant ce sel de gemme (aussi nommé halite) comme matière première pour la production de chlore, de soude et d'hydrogène. Ces éléments permettent la production de chlorure de vinyle monomère qui, par polymérisation, permet la production de polychlorure de vinyle, communément nommé PVC. Le PVC étant aujourd'hui l'un des trois composants plastiques les plus produits et utilisés au monde, l'importance de sites d'extraction continue tel que Vauvert est justifiée.

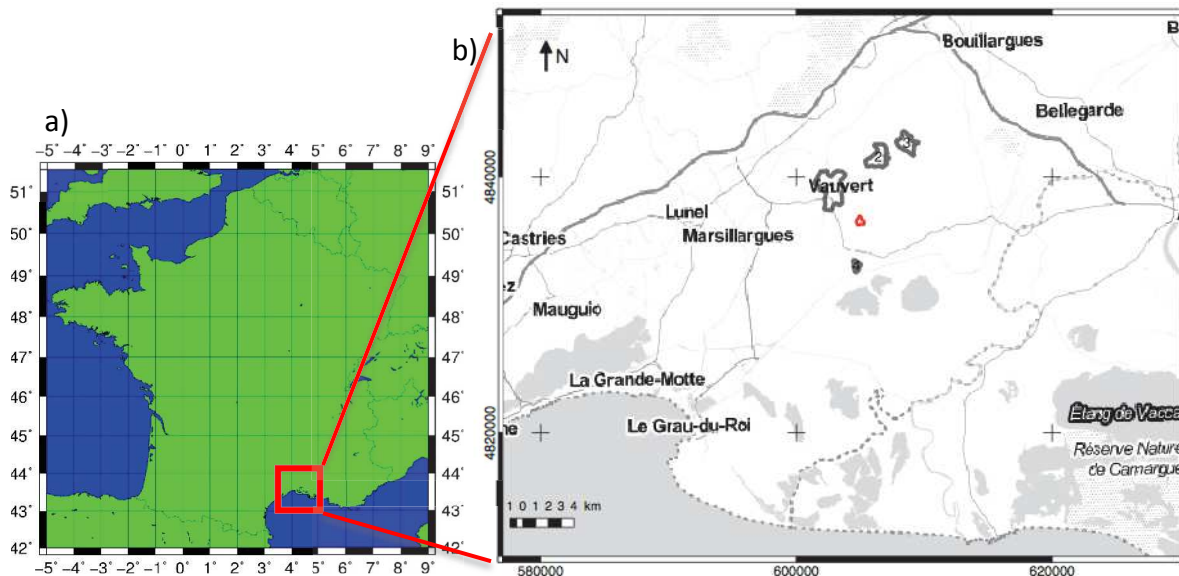


Figure 4-1 : (a) Localisation générale de la Saline de Vauvert. (b) Zoom local (Saline en rouge)

Ainsi la production de saumure par injection-extraction sur en moyenne 12 doublets de puits, permet depuis le début des années 1970 une production temporellement ininterrompue mais néanmoins variable en termes de quantité et de puits actifs (actuellement 37 puits forés). Cette production n'est pas sans conséquence sur l'environnement au sens topographique : malgré une injection de matière (de l'eau et/ou de la saumure réinjectée), l'extraction est plus importante que l'injection dans le bilan volumique et la masse de saumure qui remplace celle de sel est également plus faible. Cela conduit à une compensation de cette densité retirée en profondeur par un affaissement localisé en surface : une subsidence.

Il est important de rappeler brièvement le cadre juridique qui régit notamment le cadre environnemental et qui oblige la société concessionnaire (actuellement KEM ONE, par une mutation de la concession par décret du 13 Janvier 2016) à effectuer des mesures relatives à la subsidence. Ainsi, l'article 44 du décret n°95-696 du 9 Mai 1995 et ses nombreuses modifications par arrêtés mentionnent une obligation de détermination des limites des zones de subsidence connues avec description de la méthode de surveillance topographique retenue. En ce sens la société exploitante a missionné l'IGN (Institut Géographique National) en vue d'effectuer des mesures de nivellement chaque année à l'automne, afin de déterminer l'évolution spatiale et temporelle de la subsidence.

Ainsi, considérant toutes les caractéristiques du lieu citées ci-avant et comprenant l'importance et l'intérêt d'un tel site en vue de l'application de techniques de mesures géodésiques novatrices, un programme de recherche et développement a été entamé en 2009 par la société Fugro en partenariat avec (1) Géosciences Montpellier et (2) l'exploitant de la saline (Arkema puis KEM ONE). Ce programme de recherche et développement n'est pas le précurseur des mesures de la déformation à Vauvert mais s'inscrit dans un esprit de continuité avec des études externes précédemment menées. Aidé par la proximité géographique entre le lieu d'étude, les bureaux de la société Fugro GEOID et l'Université de Montpellier, ce partenariat a permis à ce jour de développer les points suivants :

- Une première phase du développement a permis la création de 3 marqueurs géodésiques pour mesures GNSS temporaires (ARKE, JOVI, MADA). Le positionnement de ces marqueurs a été déterminé en vue de (1) mesurer la magnitude maximale de la subsidence au centre de la zone affectée (point ARKE), et (2) d'estimer les limites de la mesure GNSS en bordure de cette même zone (point JOVI et MADA). La création de dalles béton agrémentées d'attaches pérennes et d'un repère de type « spit » (repère métallique scellé) au centre permet des mesures temporaires (campagnes) avec des mâts de type UNAVCO pour les points JOVI et MADA et au trépied (et embase) traditionnel au droit du point ARKE.
- Une étude InSAR interne au groupe Fugro consistant en une analyse PS-InSAR sur des archives ERS et ENVISAT, permettant une caractérisation plus fine des variations spatiales et temporelles de la déformation liée à l'activité de la saline.
- Un réseau de neuf points gravimétriques a été mis en place en 2015 sur trois profils se rejoignant au centre de la subsidence. Ce réseau, mesuré par gravimétrie relative, doit permettre d'amener à l'étude la notion de bilan de masse, ce que ne permettent pas les méthodes géodésiques classiques. Aidées par des données environnementales externes (par exemple pluviométrie, pression atmosphérique, données d'extraction de saumure), ces mesures permettent l'élaboration d'un protocole de mesures de micro-gravimétrie. Un point mesuré en gravimétrie absolue a de plus été créé en 2016, mesuré en 2016 et 2017.

De plus, dans le cadre du projet RESUM (Réseau de Subsidence Urbaine et Minière) porté par le BRGM, le CNES, RTE et RGPU, une étude DInSAR sur archive ERS a été menée (Raucoules et al., 2003). Cette étude fut la première à déterminer précisément l'étendue spatiale du bol de subsidence, amenant notamment à une extension du réseau de points nivelés.

Enfin, une surveillance de la micro-sismicité induite par l'activité minière a aussi été entreprise sur le site de Vauvert. Une première étude s'intéresse tout particulièrement à l'effet de la cessation d'activité sur les doublets de puits (Maisons et al., 1997). Les phénomènes de fluage produisent des changements de contrainte en profondeur et induisent de la micro-sismicité. Cette activité peut-être surveillée par un réseau de sismomètres lors de l'arrêt de l'injection/extraction sur certains doublets, ceci afin d'identifier une procédure d'abandon sécurisé de ceux-ci. Les besoins de surveillance de l'activité sismique ont permis une deuxième étude (Godano, 2009) pour assurer la sécurité lors de la production et de l'abandon de cavités d'une part, et dans le but d'augmenter la productivité d'autre part. Cette étude s'est focalisée sur l'amélioration des techniques de calcul de données sismiques (méthode d'inversion non linéaire).

La subsidence de Vauvert est donc un site idéal pour appliquer la méthodologie de combinaison de données géodésiques décrite dans ce manuscrit.

4.1.2 Cadre structural

Afin de mieux cerner le contexte géologique local il est important de rappeler quelques caractéristiques majeures du contexte géologique régional. Ces contextes sont notamment décrits par Valette (1991), Valette et Benedicto (1995) et Séranne et al., (2002). Le site d'extraction de saumure de Vauvert est situé dans une zone géologique régionale décrite comme complexe, comprenant trois formations majeures, entrecoupées par deux failles majeures (Figure 4-2) telles que :

- Le massif des Cévennes, aussi nommé relief des Cévennes cristallines, est constitué d'un socle paléozoïque formé par des schistes métamorphiques et des gneiss, recoupés au Carbonifère supérieur par des plutons granitiques intrusifs (par exemple Mont Aigoual, Mont Lozère). Ces Monts sont aujourd'hui parmi les plus élevés du Massif Central ce qui confère à la chaîne cévenole un rôle majeur dans l'étude actuelle du climat en Méditerranée,
- Une zone intermédiaire nommée « zone des Garrigues », constituée de calcaires jurassiques recoupée de bassins sédimentaires mineurs tertiaires,
- Une dernière zone basse, le bassin de la Camargue, résulte quant à lui de l'effondrement des Pyrénées d'une part, ainsi que d'une subsidence liée à l'épisode de rifting Oligo-Aquitainien (20-25 Ma) du Golfe du Lion d'autre part.

Le relief des Cévennes et la zone des Garrigues ont pour frontière la faille des Cévennes (aussi appelée Faisceau Cévenol). La zone des Garrigues et le bassin de la Camargue sont quant à eux délimités par la faille de Nîmes. Le bassin de Camargue est ainsi délimité dans sa partie nord-ouest par la faille de Nîmes, qui est une structure extensive importante orientée sud-est. La zone d'étude, Vauvert, se situe en bordure de ce bassin.

Le rifting Oligo-Aquitainien du Golfe du Lion et la subsidence liée ont ainsi permis une transgression de la mer Méditerranée, créant une étendue d'eau salée favorisant les dépôts de sel évaporitique par la variation de la profondeur de cette étendue d'eau. Ces dépôts atteignent jusqu'à 900 mètres d'épaisseur.

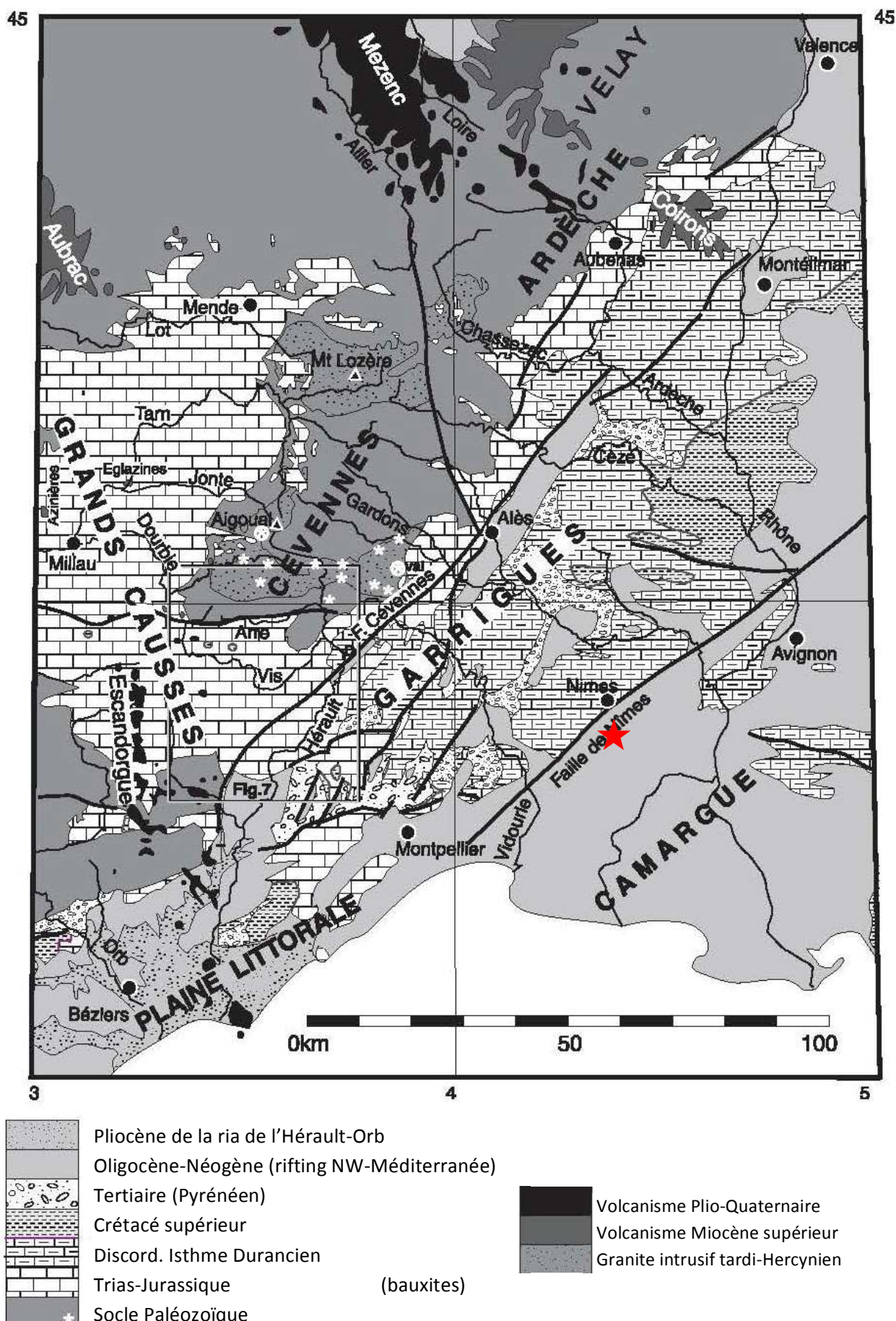


Figure 4-2 : Carte géologique simplifiée de la zone d'étude (modifié d'après Séranne et al., (2002). Étoile rouge : Saline de Vauvert.

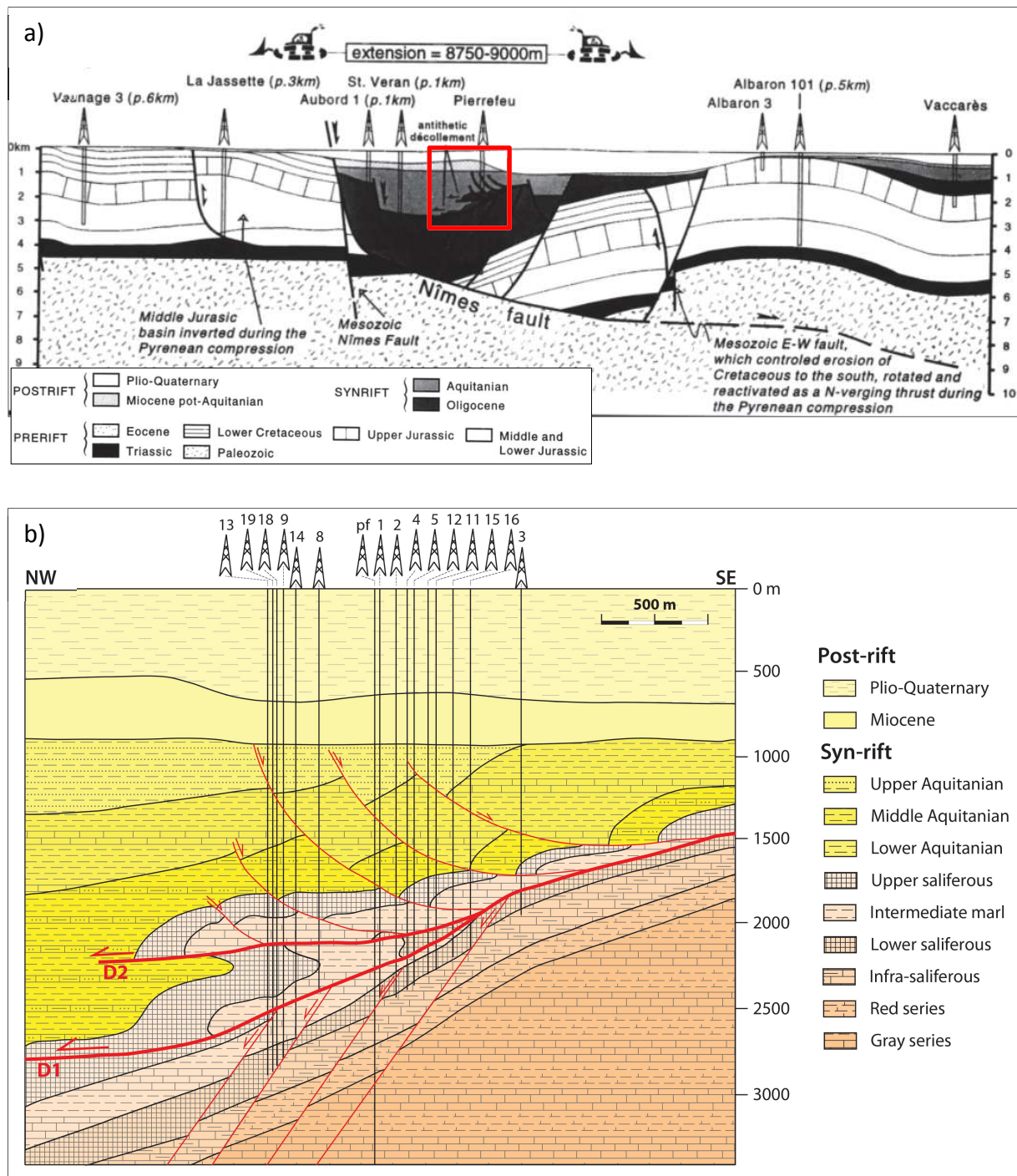


Figure 4-3 : (a) Profil géologique NW-SE traversant le Graben de Vistrenque présentant les structures géologiques traversées par les puits de forage à Vauvert. Adapté de Benedicto et al., (1996). (b) Agrandissement de détails (encadré rouge sur a) sur la zone d'extraction de Parrapon, adapté de Valette (1991).

La formation de sel est donc incluse dans une couche de sédiments syn-rift d'épaisseur variable atteignant jusqu'à 4000 m d'épaisseur, délimitée au fond par une première discordance avec des carbonates mésozoïques et recouverte par une seconde discordance avec des sédiments marins Burdigaliens (16-20 Ma, Figure 4-2, Figure 4-3 et Figure 4-4).

La formation de sel de 900 mètres d'épaisseur débute à environ 1900 mètres de profondeur et est divisée en trois séries distinctes (Figure 4-3 a et b) (Valette, 1991).

- La première série (Autochtone inférieure) est orientée SE-NW et est affectée par des failles oligocènes nord-ouest normales,
- La deuxième série (Allochtone inférieure) chevauche la première le long d'une structure inverse (D1) orientée nord-ouest,
- La troisième et dernière série (allochtone supérieure) chevauche la série allochtone inférieure le long du plan D2 et est affectée par des failles listriques normales orientées sud-est.

Une étude récente effectuée par Total (2003) estimait la réserve de sel restante à plus de 45 millions de tonnes pour le site de Vauvert, sur l'ensemble de l'exploitation, dans les formations géologiques, soit encore près de 30 ans d'exploitation à ce jour (en 2018).

4.1.3 Exploitation du site

Depuis bientôt 50 ans (création de l'entreprise d'exploitation de la saline en 1970 et mise en route de l'exploitation en 1973 par la société Rhone Progil), le gisement de sel (halite) de Vauvert est exploité en utilisant le procédé dit de dissolution grâce à un apport continu en eau (estimé à 3 millions m³ par an) issu du Bas-Rhône.

Sur le site nommé Parrapon, d'une superficie actuelle au sol supérieure à 14 km², des doublets de puits sont disséminés afin de quadriller en profondeur le gisement de sel. Ces doublets de puits (distants d'une dizaine de mètres) sont forés au moyen d'une technique classiquement utilisée en milieu pétrolier : le forage rotatif « rotary » avec injection de boue (bentonite). Cette injection permet d'obtenir une imperméabilité temporaire avant tubage (métallique), de stabiliser les parois de forage, d'évacuer les matériaux forés, de refroidir et lubrifier la tête de forage. Le tubage peut être adapté en fonction des couches traversées, principalement en fonction de la traversée de nappes phréatiques. Ceci nécessite un colmatage spécifique afin d'éviter toute fuite de saumure dans ce stockage naturel d'eau douce. Les forages traversent en effet la nappe dite du Burdigalien à environ 1km de profondeur.

Après validation par le géologue en charge du site de l'accès des puits à la couche de sel (série calcaréo-salifère Figure 4-4 (a)), la séquence de forage est stoppée, les puits sont tubés, et une injection d'eau sous haute pression (supérieure à 100 bars) est effectuée afin

de créer des micro-fractures dans le sel précipité entre les puits et ainsi créer une liaison entre ces puits, démarrant ainsi le procédé de dissolution et donc la production.

Ensuite, une circulation d'eau est réalisée à travers le réseau de microfailles entre les puits. L'eau peut être pure ou faiblement salée, issue d'une réinjection de saumure déjà extraite mais trop pauvre en sel selon les critères industriels. Le rôle des puits dans chaque doublet peut varier, injecteur ou extracteur (Figure 4-4 (b)), suivant (1) le blocage des puits par cristallisation du sel liée à la baisse rapide des conditions de température lors de la remontée et (2) le taux de salinité de la saumure en sortie. L'objectif étant une saumure de teneur en sel comprise entre 300 et 350 g/L. Ce taux est inférieur au taux de saturation à température et pression du saumoduc - pipeline dédié au transport de la saumure. La saumure est ainsi acheminée par le saumoduc sur environ 90 km aux usines chimiques de Fos-sur-Mer et de Lavera pour la production par électrolyse de chlore, de soude ou de chlorure de vinyle monomère, nécessaires à la production de polychlorure de vinyle (PVC). Tout est aujourd'hui la propriété de la société KEM ONE.

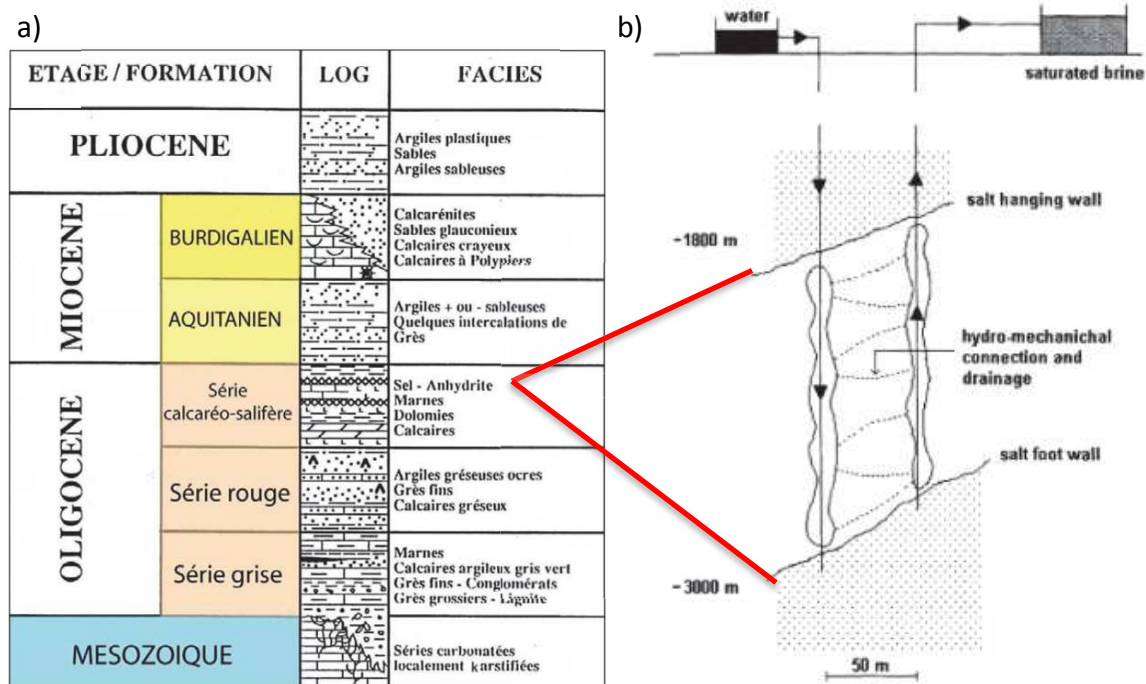


Figure 4-4 : (a) Rappel des faciès stratigraphiques, bassin de Camargue par Gorini et al., (1993), modifié par Bache, (2009) ; (b) Cycle d'injection/extraction pour l'extraction de saumure, et cavités associées en cours de production, sur le site de Vauvert, par Maisons et al., (1997) adapté par Raucoules et al., (2003).

Après des années d'extraction de la saumure, la production est arrêtée lorsque la saumure extraite est considérée comme trop pauvre en sel ou que l'inversion des puits d'injection et d'extraction ne permet plus d'empêcher le blocage des puits par la cristallisation de la saumure. Les cavités qui se sont formées au cours de ces années de

production sont cylindriques : environ 30 m de diamètre sur 500 m de hauteur (Maisons et al., 1997). Après l'arrêt de l'activité des puits liés, les cavités ne sont pas immédiatement stables, en raison des effets suivants (Berest et al., 1998) :

- Thermiques sur la saumure : échauffement et dilatation,
- De percolation de la saumure,
- De fluage des parois de la cavité.

De ce fait, la pression interne de la cavité va considérablement augmenter jusqu'à 200 bars mesurés en tête de certains puits. La seule manière de diminuer cette pression pour notamment à terme, abandonner les puits concernés, est d'effectuer des purges jusqu'à ce que les effets combinés de fluage et de colmatage par les particules autres que le sel, permettent à la pression en tête de puits d'atteindre un équilibre. Cet équilibre étant nécessaire afin d'éviter tout risque de réouverture violente d'un puits et/ou de pollution environnementale.

Ainsi, le ré-équilibrage de la pression en profondeur – qu'il soit dû à un défaut volumique entre l'injection et l'extraction, ou dû aux purges des puits en vue de leur abandon – a également des répercussions sur l'évolution de la topographie locale. La compensation en surface conduit à une subsidence.

L'activité sur la saline s'est un temps localisée sur le site de La Galine, dans la partie Est de la zone d'intérêt. Au fur et à mesure des années l'exploitation s'est déplacée vers le centre actuel de la concession (site de Parrapon), accueillant notamment les structures principales de l'exploitant (bureaux, centralisation de la production des puits vers un bac de stockage tampon avant envoi de la saumure vers le saumoduc). Actuellement les nouveaux puits sont créés en direction du Nord de la zone. Ces nouveaux puits sont généralement situés à quelques centaines de mètres des forages devenus improductifs, afin de mitiger le nombre (et donc l'impact) des infrastructures (canalisations d'arrivée d'eau et de sortie de saumure, accès routier).

L'historique de l'exploitation ainsi que la brève description des techniques depuis la création jusqu'à l'abandon des puits d'injection/production de saumure du site historique permettent de bien cerner les atouts majeurs du lieu en vue du développement de mesures géodésiques. On observe en effet que tous les éléments souvent liés aux limites de ces méthodes de mesures sont présents :

- Une zone au cadre structural complexe, mettant en jeu en outre, des failles, des bassins sédimentaires, des socles rocheux affleurants.
- Une évolution spatiale de l'activité, qui s'est d'abord développée sur le site de la Galine, puis centrée sur le site actuel au cœur de la concession, et qui tend à s'étendre vers le Nord actuellement.

- Une évolution temporelle des volumes extraits, à plusieurs échelles : longue concernant la production annuelle qui croît au cours du temps, et très rapide localement lors de la purge de puits en vue de leur abandon.
- A cela s'ajoute une topographie légèrement vallonnée, une végétation souvent dense : la zone est en partie boisée, en partie recouverte de vignes, et très peu urbanisée.

Parler du développement de mesures géodésiques sur Vauvert amène logiquement à décrire les études ayant déjà eu lieu, permettant une pré-caractérisation de la déformation de surface précise.

4.1.4 Indices géodésiques de la déformation : précédentes études

Les parties précédentes ont montré que de nombreuses caractéristiques du site d'étude le rendaient intéressant en vue d'une confrontation de méthodes de mesures géodésiques en vue, à terme, de les combiner.

Nous étudions les effets d'une extraction de matière (sel dissout) à forte profondeur (entre 1.9 et 3 km) qui n'est pas totalement compensée par une injection (d'eau ou de saumure faiblement concentrée). Nous sommes donc en présence d'un bilan volumique négatif devant nécessairement mener à une compensation visible en surface (au sens des mesures géodésiques). De plus, puisque l'extraction a lieu à forte profondeur, la question du temps de réponse (la compensation du delta volumique précité) en surface se pose, liée aux propriétés élastiques du milieu.

Malgré quelques contre-exemples isolés de témoignages de riverains (entendus lors des nombreuses campagnes de mesures) affirmant avoir vu le paysage se modifier au cours des décennies d'existence de l'exploitation de la saline, aucun effet visible d'une subsidence n'est visible en surface. Cette absence de visibilité en surface d'une quelconque déformation est due au point précédemment cité : le gradient de déformation et la magnitude maximale attendus sont faibles.

Il est donc rapidement apparu nécessaire de caractériser cette déformation de surface par des méthodes de mesures de l'évolution de la forme de la topographie. Ces mesures sont dites géodésiques.

4.1.4.1 Nivellement

La première mesure géodésique présentée est une mesure terrestre nommée nivellement direct. Le nivellement géométrique direct permet d'estimer des valeurs de dénivelées entre deux points mesurés et, par extension, sur des profils (chapitre 2).

Depuis 1995, pour les raisons évoquées en partie 4.1, la société concessionnaire (i.e. Arkema puis KEM ONE) a missionné l'IGN (Institut National de l'Information Géographique et Forestière) pour la réalisation de campagnes régulières – annuelles – de mesure des mouvements verticaux de surface liés à l'activité de la saline. Ces mesures sont effectuées en fin d'été, afin d'éviter autant que possible de mesurer l'effet d'un éventuel engorgement des sols en eau, typique de la région régulièrement affectée en automne par des pluies importantes liées aux épisodes cévenoles.

L'ensemble des résultats et interprétations inclus dans ce chapitre sont basés sur les rapports annuels de l'IGN auxquels la société KEM ONE nous a donné accès. Les rapports annuels sont incrémentaux. Le rapport 2017 contient donc l'historique complet des mesures depuis l'origine, en 1995.

Les profils de nivellement doivent mesurer des points physiquement établis (par exemple bornes, repères scellés, rivets). En plus du réseau national (RN) dont des bornes sont présentes dans la zone, l'IGN a créé deux réseaux de bornes : un réseau d'auscultation et un réseau de stabilité. Ce sont aujourd'hui une centaine de points qui constituent ces réseaux, ce nombre étant en constante évolution, certaines bornes pouvant en effet être retirées (suite à un arrachage, un mouvement, une destruction) et de nouvelles régulièrement créées. Les créations sont motivées par différentes raisons : création d'un nouveau puits d'extraction à mesurer, remplacement d'une borne détruite ou instable, densification du réseau existant.

Un rattachement au réseau NGF (Nivellement Général de la France) a été effectué à partir des altitudes IGN 69 dites « normales » des repères de nivellement – RN (mis en place et maintenus par l'IGN) – considérés comme stables. Ces repères sont situés sur les communes de Beauvoisin (au Nord de la saline) et le long d'une voie de chemin de fer au Sud de la zone d'étude. La **Figure 4-5** donne les emplacements des réseaux et permet de juger la dimension de ceux-ci.

Un nivellement direct est effectué via des niveaux électroniques de précision et des mires invar (alliage métallique au coefficient de dilatation thermique négligeable) en cheminement aller-retour. Les données constructeur de précision théorique d'un tel équipement sont une résolution de 0,1 mm et un écart type de 0,4 mm par kilomètre (rapport IGN, 2017).

Le réseau de points mesurés est compensé par la méthode des moindres carrés au moyen du logiciel Geolab. En résulte pour chaque mesure une valeur d'élévation et un indicateur de précision prenant en compte les fermetures de boucles compensées. Ce calcul est effectué en quatre étapes :

- Calcul des mailles de stabilité (constituées des points communs au réseau NGF, quatre points au Nord de la zone d'étude, deux points au Sud)
- Calcul des profils liant les mailles NGF
- Calcul de tous les profils du réseau d'auscultation

- Calcul de l'ensemble du réseau d'auscultation avec rattachement aux mailles de stabilité

Les dénivelées aller et retour sont utilisées dans chaque calcul, permettant (1) un contrôle sur les fermetures de boucle et (2) une compensation par moindres carrés en fonction du nombre de dénivelées aller et retour entre les repères. De plus une pondération est appliquée à chaque repère nivelé, en fonction du revêtement porteur du repère (route goudronnée, chemin stabilisé, terrain instable).

Depuis 2003 un seul point de référence est retenu, le RN10 de Gallician, à l'extrémité Sud de la zone d'étude. Ce point seul est donc la référence altimétrique relative pour tous les points mesurés des différents réseaux.

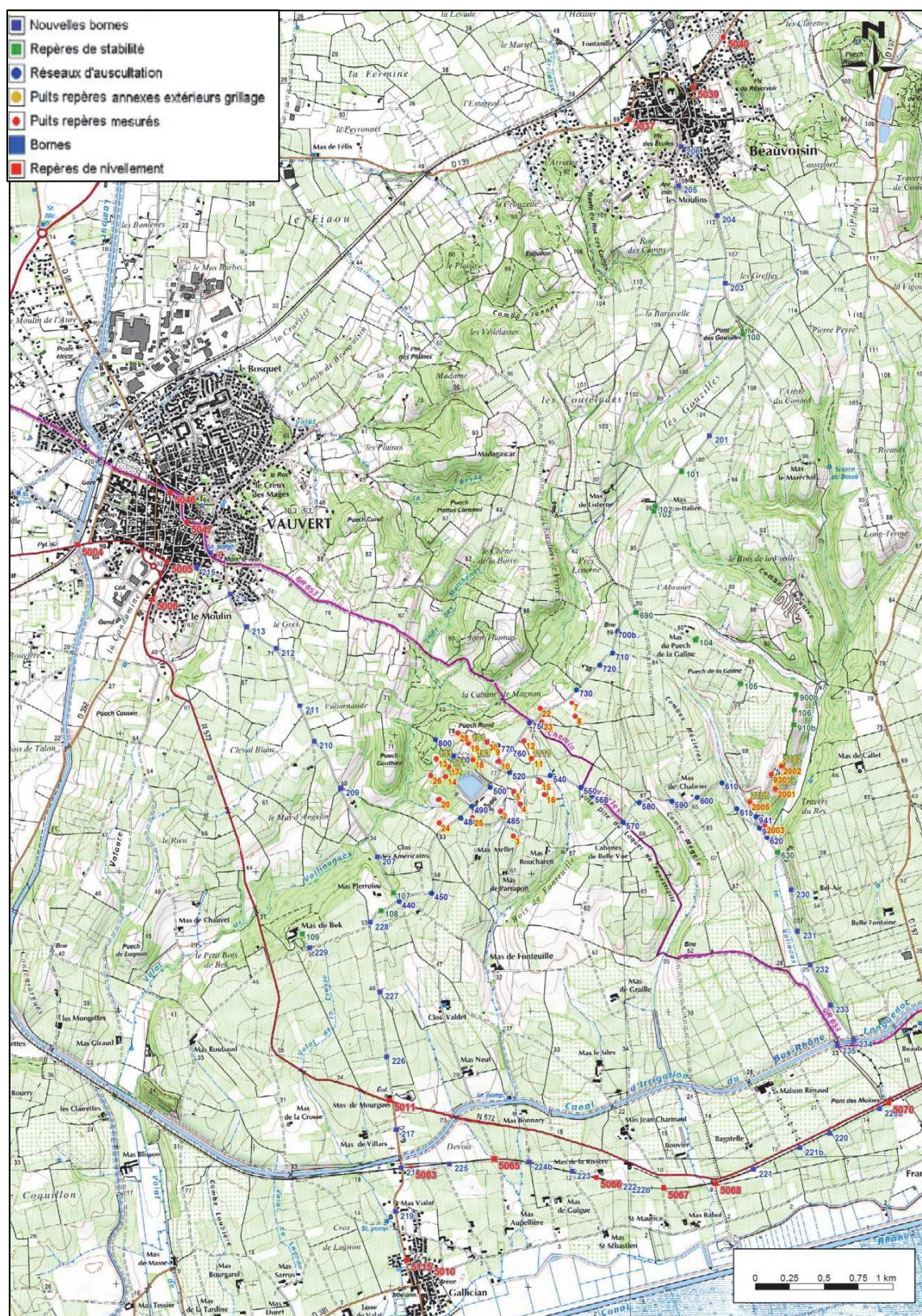


Figure 4-5 : Plan de situation des réseaux de nivellement mis en place, auscultés et maintenus par l'IGN sur et autour du site de Parrapon à Vauvert. (Source : rapport 2017 d'auscultation de l'IGN)

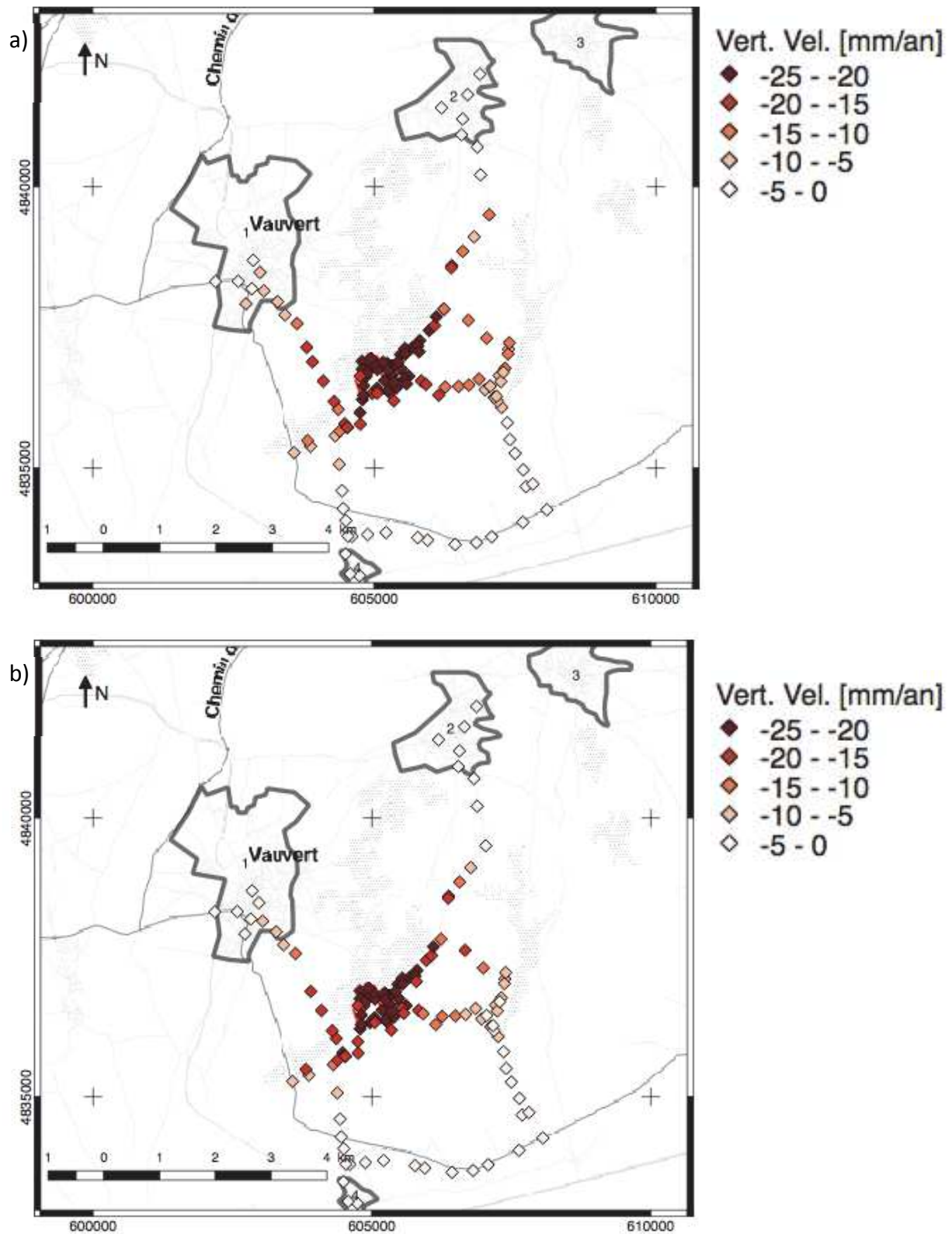


Figure 4-6 : Vitesses annuelles verticales des stations des réseaux nivelés de Vauvert sur les périodes (a) 1995-2017 (période totale) et (b) 2002-2009. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

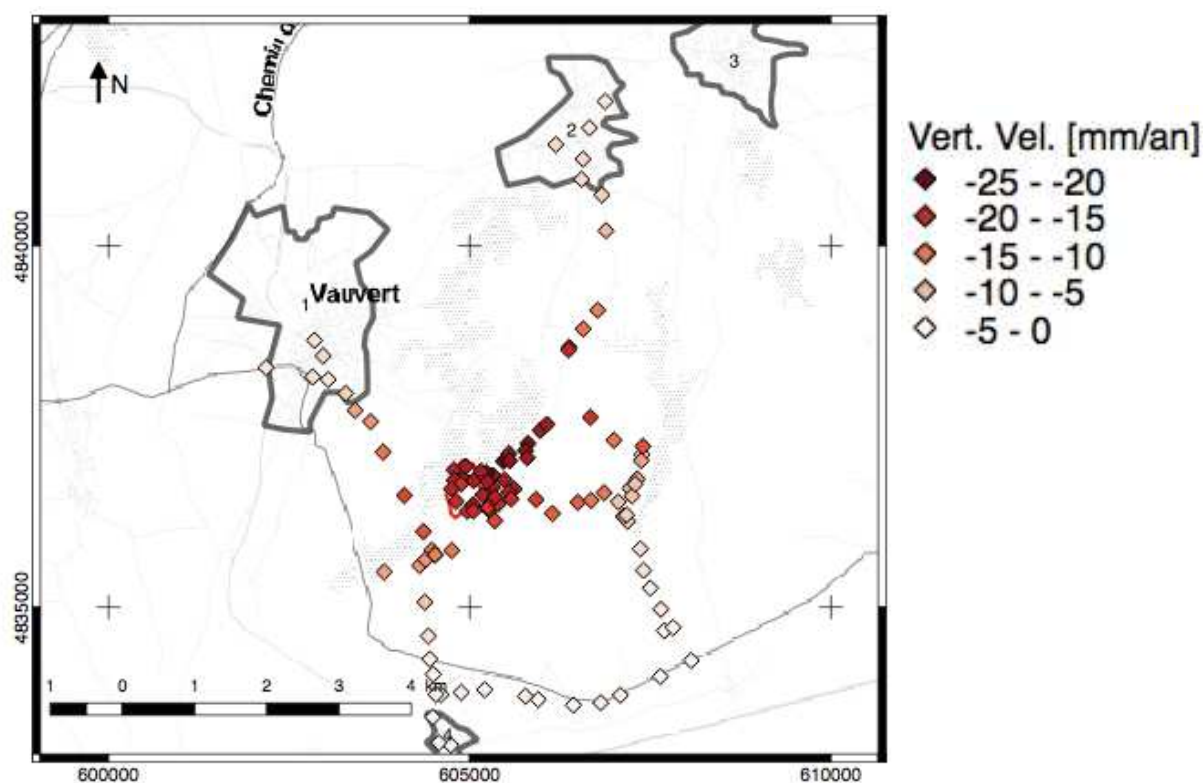


Figure 4-7 : Vitesses annuelles verticales des stations des réseaux nivelés de Vauvert sur la période 2015-2017. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

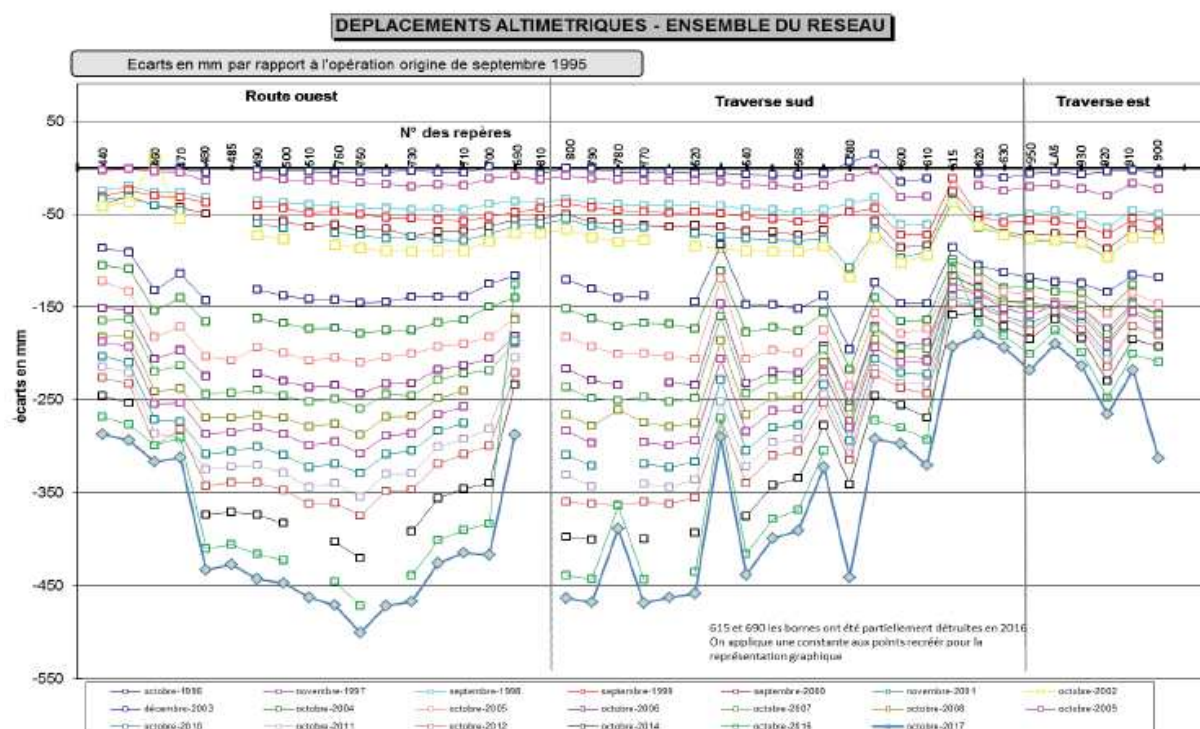


Figure 4-8 : Déplacement altimétrique de l'ensemble du réseau nivelé à Vauvert (Source : rapport 2017 d'auscultation de l'IGN).

La mesure de déplacement vertical par méthode de nivellement géométrique telle que mise en œuvre par l'IGN utilise un cahier des charges permettant l'obtention de précisions submillimétriques à même de caractériser la subsidence locale liée à l'extraction de sel, ainsi que ses évolutions tant spatiales que temporelles. Les résultats montrent un affaissement général des stations mesurées relativement au RN10. Les points situés dans la ville de Vauvert, à l'extrémité Nord-Ouest du réseau, se sont affaissés de 8.9 cm (RN47) et 8.8 cm (RN5) en 23 ans, les points situés à Beauvoisin, à l'extrémité Nord-Est du réseau, se sont affaissés au maximum de 2.8 cm (RN37) sur la même période. Les points de l'extrémité Sud de la zone d'étude sont quant à eux restés stables, mais la proximité avec le seul point de référence (RN10) rend cette analyse caduque. Globalement la subsidence atteint en moyenne sur la totalité de la période de mesures (1995-2017) un maximum de 2,2 cm/an (Figure 4-8) au centre d'un bol de forme précise difficilement identifiable à cause de la répartition spatiale des stations en profils. Nous touchons là à la limitation majeure du nivellement, la difficulté à mesurer la spatialisation de la déformation avec une mesure ponctuelle s'effectuant par profils comme le nivellement. La subsidence affecte aujourd'hui donc faiblement (quelques millimètres par an) les quartiers Sud-Est de la ville de Vauvert et le Sud de Beauvoisin.

L'étude de deux périodes particulières (Figure 4-6 (b) et Figure 4-7) montre un déplacement vers le Nord du bol de subsidence. L'emplacement du maximum de subsidence est impacté mais pas seulement. Les bornes situées au Nord, notamment sur la route de Beauvoisin sont de plus en plus affectées par la subsidence, passant d'une vitesse quasi nulle sur la période 2002-2009 à un quelques millimètres par an (par exemple 4 mm/an pour le point RN37 situé à Beauvoisin) sur la période 2015-2017.

4.1.4.2 Interférométrie satellitaire : sommation d'interférogrammes

Dans le cadre du projet RESUM (Réseau de Subsidence Urbaine et Minière) porté par le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), le CNES (Centre National d'Études Spatiales), RTE (Réseau de Transport d'Électricité) et RGPU (Réseau Génie Civil et Urbain), une étude DInSAR sur archive ERS a été menée par D. Raucoules et collaborateurs en 2003. Cette étude fut la première à déterminer de manière précise l'étendue spatiale du bol de subsidence, concluant notamment sur des recommandations en vue de l'optimisation du réseau de points nivelés. 16 images SAR provenant des satellites ERS-1 et ERS-2 (European Remote Sensing Satellites développés par l'Agence Spatiale Européenne – ESA) sur la période 1993/1999 ont été choisies. 18 interférogrammes (chapitre 2) ont été créés à partir de ces images radar par la technique Differential-InSAR (ou D-InSAR). Le choix de ces 18 interférogrammes a été fait selon des critères de courtes lignes de base perpendiculaires. Ce choix permet en effet de minimiser les erreurs liées aux décorrélations géométriques.

Une première étude est menée sur la cohérence des interférogrammes au cours du temps, afin de déterminer si l'évolution de la couverture végétale permet une mesure

interférométrie fiable au cours du temps. Et il s'avère que la présence d'agriculture rend la cohérence moyenne faible sur l'ensemble de la zone (valeur de cohérence inférieure à 0.3 en moyenne pour des interférogrammes de deux ans). Néanmoins la présence de vignes est plutôt positive pour l'évolution temporelle de cette cohérence : la présence d'armatures métallique, un sol rocailleux, et la géométrie des plantations rend le signal radar réfléchi de bonne qualité. Les interférogrammes obtenus sont filtrés au moyen d'un filtre dit de Goldstein (Goldstein and Werner, 1998). Au final, quatre des 18 interférogrammes sont retenus pour les raisons suivantes :

- Ils couvrent la période complète 1993/1999, le mouvement vertical n'étant pas de grande amplitude (centimétrique annuel), une trop courte période de mesures aurait rendu difficile l'interprétation,
- Les franges interférométriques de déformation (ou interprétées comme telles) sont clairement localisées, ce qui permet une estimation fine de (1) la magnitude maximale et (2) l'extension des zones déformées,
- Les franges mesurées ne sont pas liées à des artefacts atmosphériques, puisque ces franges sont similaires au cours du temps sur des interférogrammes indépendants, ce qui ne peut correspondre à des artefacts atmosphériques, par nature, aléatoires.

Une somme de la phase de trois des quatre interférogrammes retenus est effectuée. Le résultat est illustré ci-après et permet une mesure de la déformation totale cumulée entre Janvier 1993 et Mars 1999.

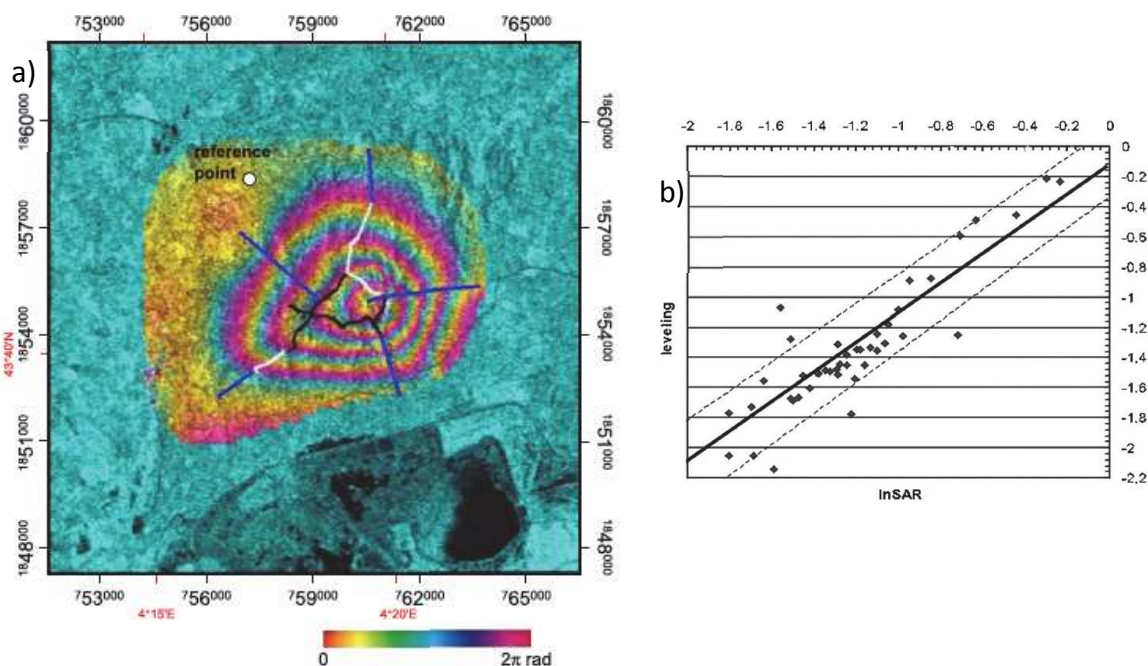


Figure 4-9 : (a) Somme des phases interférométriques de trois interférogrammes montrant la déformation cumulée sur la période Janvier 1993 – Mars 1999. Le point de référence est le point de départ du déroulement de phase. Les lignes bleu, noire et blanches correspondent aux profils simplifiés de nivellement. (b) Comparaison des taux de subsidence mesurés en InSAR et Nivellement. (D'après Raucoules et al., 2003)

Les interférogrammes sommés (Figure 4-9 (a)) montrent la présence d'un bol de subsidence d'environ 8 km de diamètre avec un maximum de subsidence mesuré à 2,2 cm/an. La comparaison effectuée avec les mesures annuelles de nivellement a montré une excellente cohérence (Figure 4-9 (b)), validant ainsi l'étude D-InSAR. L'étude présentée dans ce paragraphe a donc montré la capacité de l'InSAR (par la technique de sommation d'interférogrammes D-InSAR) à mesurer la subsidence à Vauvert, malgré des difficultés liées à la perte de cohérence au cours du temps, liée à une forte densité de végétation. Les résultats ont aussi permis d'évaluer les lacunes du réseau de nivellement et de proposer une amélioration (densification et extension) du réseau. Néanmoins cette étude a aussi montré des limites, celle-ci ne permet notamment pas ou peu de discuter de possibles évolutions temporelles et spatiales de la subsidence.

4.1.4.3 Interférométrie satellitaire : traitements multi-temporels

Tel que décrit en partie 4.1.1, un programme de recherche et développement a débuté en 2009 au sein de Fugro en collaboration avec Géosciences Montpellier en vue d'optimiser et de développer des méthodologies de mesures géodésiques novatrices. Dans ce cadre, en 2009/2010, une étude InSAR a été menée par Fugro. Celle-ci consistait en un traitement de données radar à synthèse d'ouverture (SAR) par des approches PS-InSAR et par interférométrie différentielle D-InSAR sur une période de 1992 à 2009. La zone d'étude considérée correspond à un rectangle d'environ 320 km² centré sur la saline de Vauvert. Les données utilisées ont été les suivantes :

- 68 images SAR issues des satellites imageurs ERS-1 et ERS-2, entre 1992 et 2000,
- 23 images SAR issues du satellite imageur Envisat, entre 2002 et 2009.

Les résultats des traitements PS-InSAR sont illustrés ci-après.

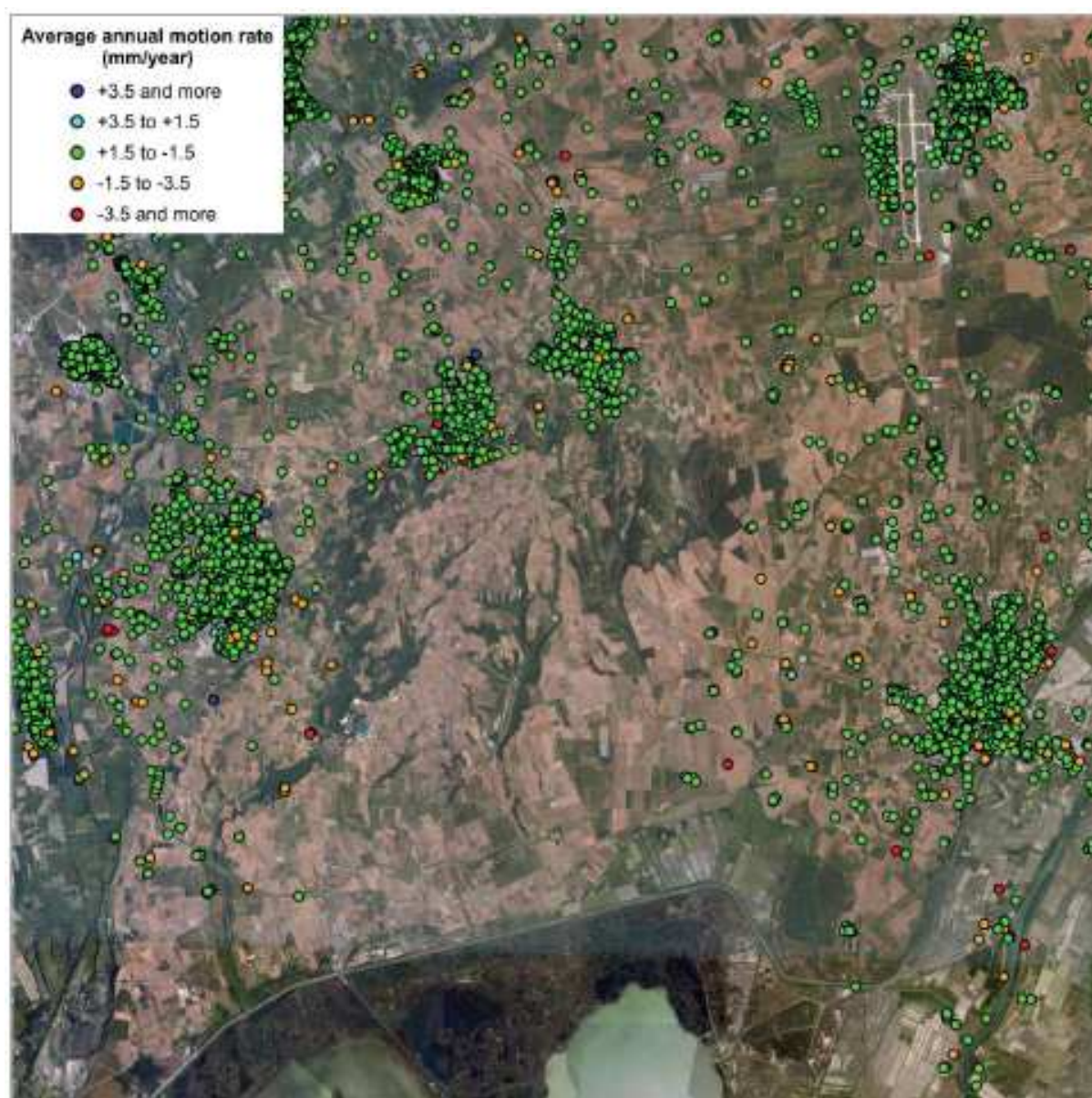


Figure 4-10 : Résultat de l'analyse PS-InSAR sur archive ERS (68 images SAR sur la période 1992-2000). (Fugro, 2009)

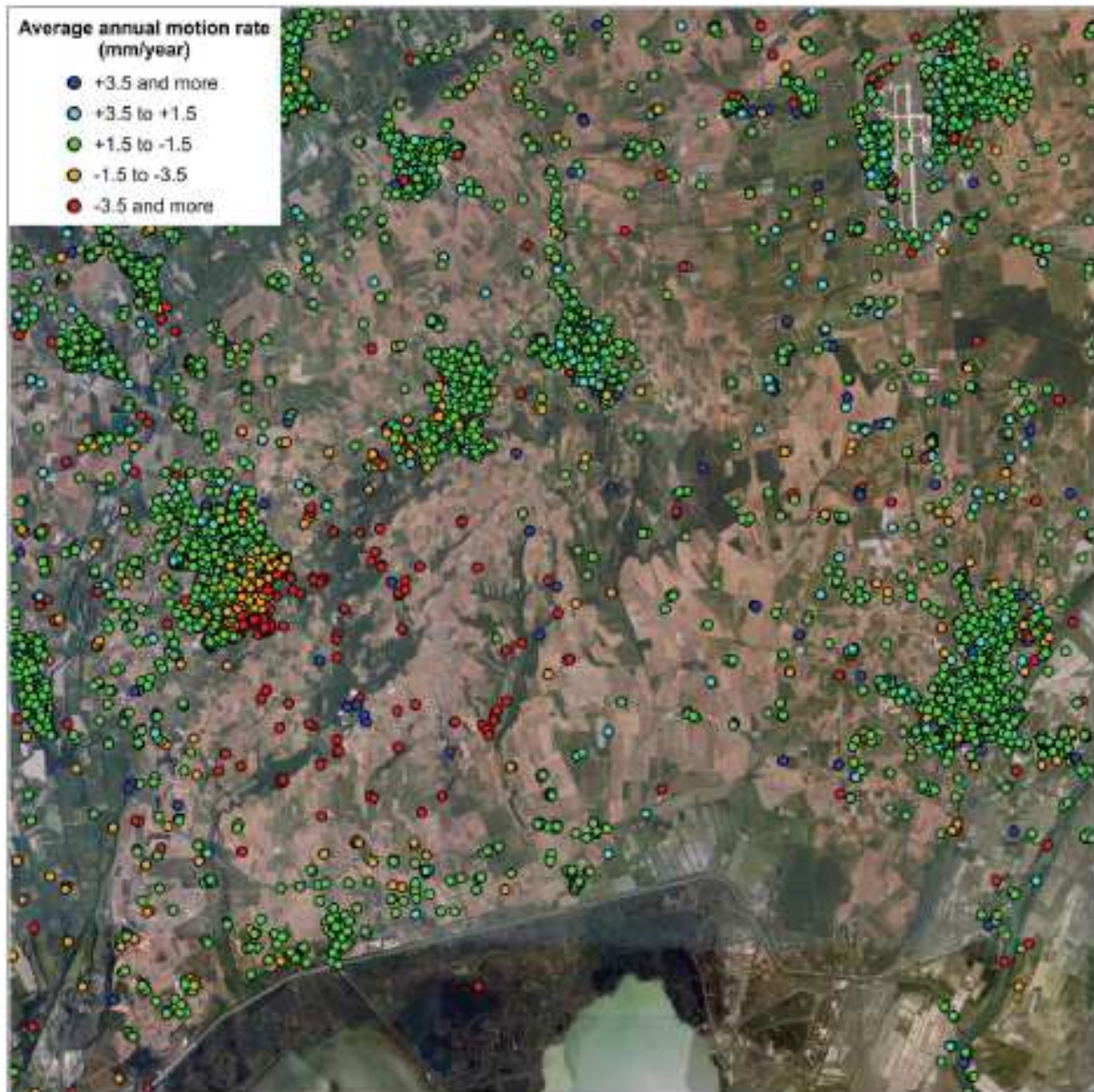


Figure 4-11 : Résultat de l'analyse PS-InSAR sur archive Envisat (23 images SAR sur la période 2002-2009). (Fugro, 2009)

Le traitement PS-InSAR sur archive ERS montre une absence de réflecteurs permanents dans le bol de subsidence, ce qui rend impossible la quantification de la déformation sur la période 1992-2000. Cette absence de données peut-être due à plusieurs facteurs : la nature très rurale et végétalisée de la zone, amplitude de mouvement trop importante ou non-linéarité de la déformation sur cette période. Cette même densité de réflecteurs permanents est meilleure sur le traitement PS-InSAR sur archive Envisat. Il est possible d'y mesurer un bol de subsidence d'environ 7 km de diamètre, avec un maximum de subsidence mesuré entre 1.8 et 2 cm/an en moyenne au centre du bol et atteignant 2.7 cm/an sur un point isolé. Cette subsidence ne semble pas atteindre les villes de Beauvoisin, Generac et Saint-Gilles. La partie Sud-Est de Vauvert est très faiblement affectée : vitesses mesurées

inférieures à 3.5 mm/an. Quant aux résultats DInSAR, ils indiquent la présence d'une subsidence persistante dans le temps qui correspond bien à l'activité minière connue dans la zone. L'extension et l'ampleur de la déformation mesurées par l'étude PS-InSAR sur archive Envisat sont constantes et identiques à ce qui avait été mesuré en PS-InSAR sur archive Envisat par Raucoules et al. (2003). Enfin, de nombreux points de mesures posent questions. En effet, à l'intérieur du bol des points semblent montrer un mouvement positif vers le satellite. Aucune étude n'ayant montré auparavant ce type de déformation, ces points sont considérés comme des artefacts ne caractérisant pas la déformation du bol de subsidence de Vauvert. Le paramètre du bruit sur la phase de chaque pixel au cours du temps ayant du être choisi élevé, afin d'augmenter le nombre de réflecteurs permanents, peut être à l'origine de ces artefacts.

4.1.4.4 GNSS

Toujours dans le cadre du projet de Recherche et développement précédemment décrit, la mise en place d'un premier réseau de bornes GNSS a été effectuée. Le premier point évalué lors de la prise de décision de la création d'un réseau local de bornes GNSS fut le choix du nombre et le positionnement des stations. Le choix s'est porté sur la création de 3 points physiques : un point au centre de la zone de subsidence, au maximum d'amplitude tel que mesuré par InSAR (Raucoules et al., 2003). Ce point fut nommé ARKE (en référence à la société Arkema alors propriétaire de la concession) et placé sur une dalle béton déjà existante (Figure 4-12 (b)), proche des bureaux de la société. Ces caractéristiques étaient alors idéales : la dalle existant depuis des années était déjà stabilisée, la zone ne présentait aucune activité proche connue, était sans masque pour la mesure GNSS, directement accessible en voiture, tout en étant éloignée des accès routiers publics. Une vis a ainsi été scellée dans la dalle béton, permettant un montage d'une antenne GNSS par centrage forcé, limitant les problématiques de mesure de hauteur d'antenne. Deux autres points ont été créés suivant l'étude du bol de subsidence mesuré par Raucoules et al. (2003). Un point en bordure Nord, MADA, proche du mas Madagascar (Figure 4-12 (a)) et un autre au Sud-Ouest, JOVI, proche du mas Jovis. Ces points sont des marqueurs de type « spit » scellés dans des dalles béton créées pour l'occasion. Des attaches métalliques sont aussi scellées afin de mesurer les points via des mâts dits Unavco.

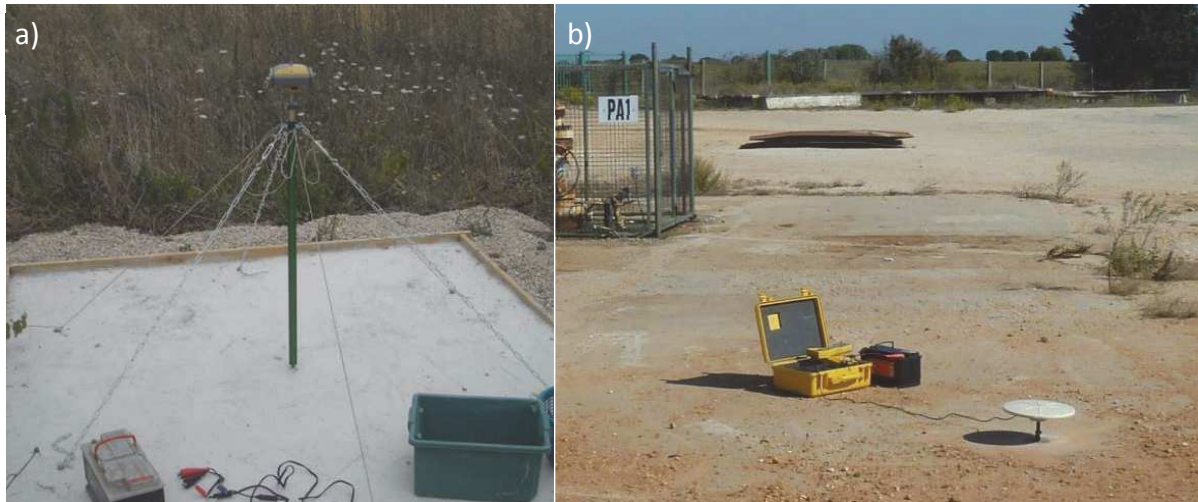


Figure 4-12 : (a) mesure du point MADA sur mât Unavco. (b) mesure du point ARKE.

Les mesures ont été effectuées annuellement entre 2009 et 2013 : trois sets GPS sont positionnés entre huit et dix jours en moyenne. Ensuite, le logiciel de calcul scientifique GPS Gamit-GlobK (Herring et al., 2010) est utilisé. Ce logiciel permet le calcul de coordonnées et de vitesses de stations mesurées en GPS, de manière permanente ou non. Quelle que soit la méthode de traitement choisie, ici par double différence, la qualité de coordonnées et/ou vitesses issues de mesures GNSS est étroitement liée aux conditions de mesures et à la stabilité du support. Les conditions de mesures sont ici optimisées par l'utilisation des mâts Unavco (JOVI et MADA) et d'une tige métallique à centrage forcé (ARKE), permettant une hauteur d'antenne constante entre les différentes sessions d'enregistrement et donc d'éviter des erreurs de mesure de celle-ci. Malheureusement une réorganisation de l'activité sur la base principale de la saline a mené à l'arrachement du repère scellé sur le point ARKE lors de travaux, en 2010. Un nouveau point a été créé au plus proche de l'ancien, mais les mesures avant et après l'événement ne se réfèrent pas exactement au même point. Cette destruction du point ARKE pose problème, néanmoins les mesures en vertical comparées entre la première session (2009) et la seconde en 2013 (sur le nouveau repère, donc), montrent une subsidence de l'ordre de 2,3 cm/an, ce qui correspond à l'amplitude attendue. On en déduit que l'altitude du nouveau repère scellé est très proche de celle du premier. Sur le positionnement horizontal le décalage semble néanmoins important et ne permet pas de conclusion quant au mouvement. Les points JOVI et MADA semblent, respectivement, affectés d'un affaissement de 7 mm/an et 15 mm/an. L'hypothèse d'origine quant à la stabilité supposée de ces stations (si l'on se réfère à l'étude InSAR décrite en section 4.1.4.2, ces deux points sont situés en bordure extérieure du bol de subsidence) est remise en cause. De plus, des mouvements horizontaux sont mesurés (Figure 4-13) : JOVI semble se déplacer de manière régulière vers le centre du bol, à hauteur de 8 mm/an, MADA semble se déplacer vers le Sud-Est mais l'amplitude semble affectée de biais (7 cm/an) liés à la dernière mesure, en 2013. En dehors de cette mesure le déplacement est de 8 mm/an vers le Sud-Est.

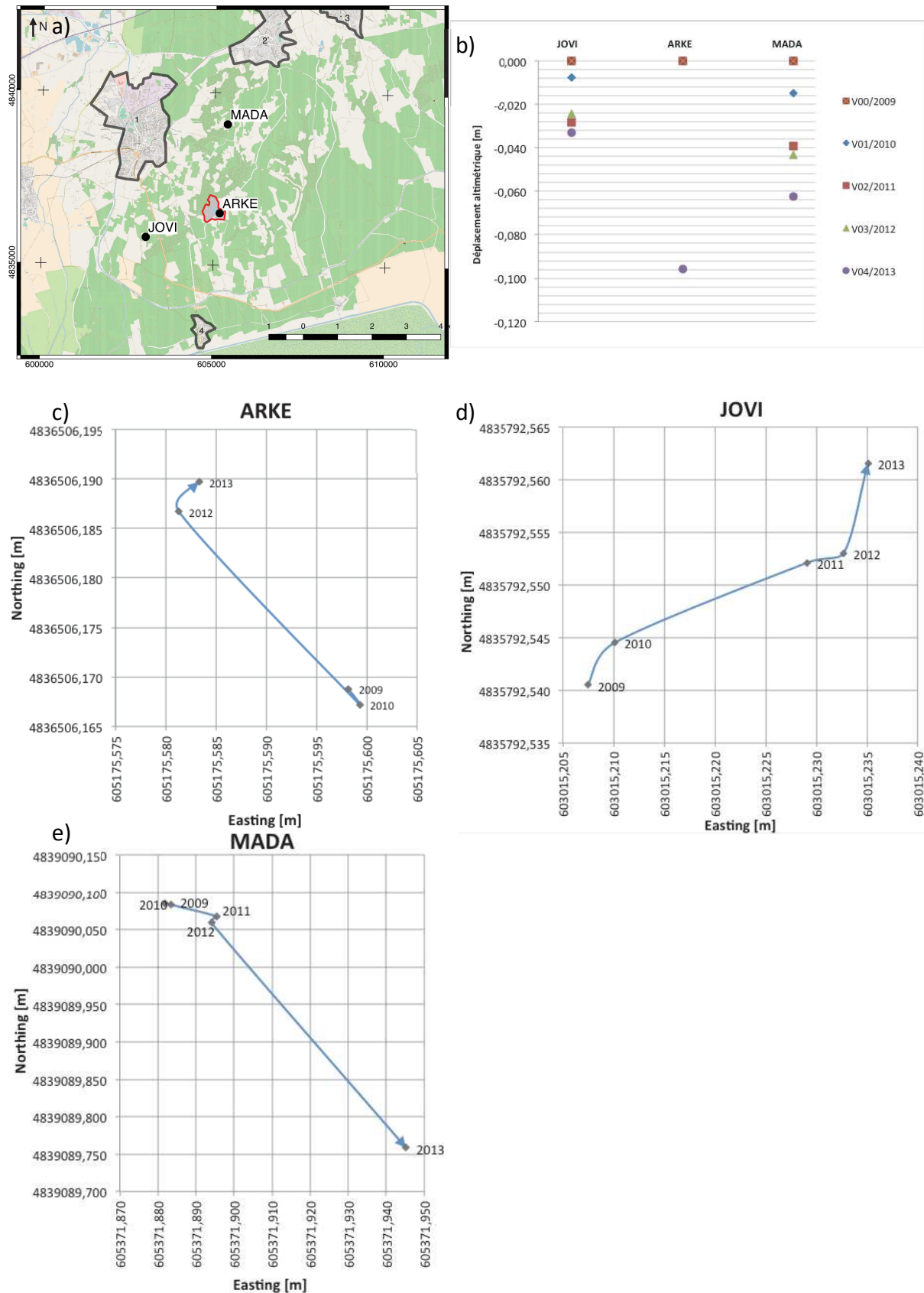


Figure 4-13 : (a) Emplacement des trois points mesurés en GNSS. (b) Subsidence mesurée au droit des points ARKE, JOVI et MADA sur la période 2009-2013. (resp. c, d et e) Représentation des déplacements horizontaux mesurés sur les stations ARKE, JOVI et MADA sur la période 2009-2013.

Les avantages d'une mesure de subsidence par GPS sont nombreux. Le référencement est très fin et précis, il est donc possible de discriminer les mouvements régionaux (par exemple tectonique, subsidence d'un bassin) des mouvements locaux (ici la subsidence liée à l'activité de la saline). De plus les techniques utilisées permettent une précision millimétrique si les conditions de mesures sont optimales. Ce sont justement ces conditions qui ont posé problème : destruction du point ARKE et augmentation non prévue de l'activité à proximité, augmentation importante de la végétation et donc des masques autour des points JOVI et MADA. Malgré cela, les résultats ont montré des caractéristiques très intéressantes, puisqu'ils montrent que les points en bordure du bol sont bien affectés de subsidence et qu'à ce mouvement vertical est associé un mouvement horizontal d'effondrement du bol vers son centre. Ces mesures ont été les premières mettant en évidence ce processus sur la zone d'étude. Cette étude a aussi pu mettre en lumière la principale faiblesse de la méthode : comme pour le nivellement, le nombre de points de mesure est forcément très limité. De plus la mesure par campagnes annuelles ne permet pas d'obtenir des séries temporelles continues sur des périodes suffisantes qui permettraient de discuter de (1) la linéarité des vitesses de déplacement mesurées et (2) de s'affranchir des imprécisions de mesures liées à la mise en place du matériel. Ces raisons ont mené à la décision de créer des points de mesures GNSS permanentes, ce qui est présenté et discuté en section 4.2.1.

4.1.5 Contextes : synthèse

Située en bordure Nord-Ouest du bassin de la Camargue, le site d'extraction de saumure de Vauvert est à plus d'un titre intéressant dans le cadre d'une étude visant à améliorer la connaissance sur des mesures géodésiques de déformation. En effet l'idée de compensation en surface d'un différentiel volumique en profondeur s'est vite avérée vraie. Mesurée par différentes techniques de mesure (par exemple nivellement, GNSS, InSAR), la subsidence est caractérisée par (1) un taux de déformation compris entre 2 et 3 cm/an et (2) une empreinte spatiale en "bol", formant un ovoïde quasi-symétrique avec un grand axe de direction nord-est / sud-ouest d'environ 8 km de long, forme et dimensions variant suivant les études effectuées. Devant cette variété de résultats obtenus par les différentes études, sur des techniques différentes, à des périodes différentes, il apparaît intéressant de combiner ces techniques afin de calculer un champ de vitesse dense à même de discuter des évolutions spatiales et temporelles de la subsidence à Vauvert.

4.2 Traitement de nouvelles données géodésiques

4.2.1 Mesures GNSS par 4 stations permanentes

4.2.1.1 Mise en place

Contrairement aux choix des emplacements des trois stations non permanentes ARKE, JOVI et MADA décrites en section 4.1.4.4, le choix de l'emplacement (Figure 4-14) de quatre stations permanentes a eu l'avantage de pouvoir utiliser les conclusions des différentes études citées en section 4.1.4. Ces quatre stations ont été mises en place respectivement en Novembre 2015 (station VAUV) et Octobre 2016 (stations VAU1, VAU2 et VAU3), à des emplacements permettant de caractériser la déformation et son gradient. La station VAUV, proche du centre de subsidence, doit permettre de mieux caractériser les variations de la déformation. Les stations VAU1 à VAU3, en bordure du bol, doivent permettre de discuter les variations de son extension spatiale. Ces quatre stations ayant aussi pour objectif de calibrer des modèles de l'évolution de la subsidence par inversion de données géodésiques. À noter que le site VAU3 est positionné sur le site historique de la Galine, site n'étant plus en production, mais où des purges de puits sont effectuées depuis 2015. Les stations VAUV et VAU3 ont été directement implantées sur des dalles de puits de l'exploitation, les antennes étant fixées à un trépied métallique fixe. Les trois autres sont fixées à des mâts métalliques. Le matériel utilisé est résumé en Tableau 3. L'enregistrement s'effectue en continu, à 30 secondes d'intervalle, et les données doivent être récupérées manuellement sur place. Les données utilisées s'arrêtent en Novembre 2017.

	Matériel		Mesures utilisées	
	Récepteur	Antenne	De	À
VAUV	Trimble NetRS	TRM57971.00	24/11/15	13/11/17
VAU1	Trimble NetR9	TRM57971.00	20/10/16	13/11/17
VAU2	Trimble NetRS	TRM41249.00	08/10/16	13/11/17
VAU3	Trimble NetR9	TRM57971.00	07/10/16	13/11/17

Tableau 3 : Matériel de mesure GNSS utilisé sur les stations permanentes de Vauvert et périodes de mesures utilisées.

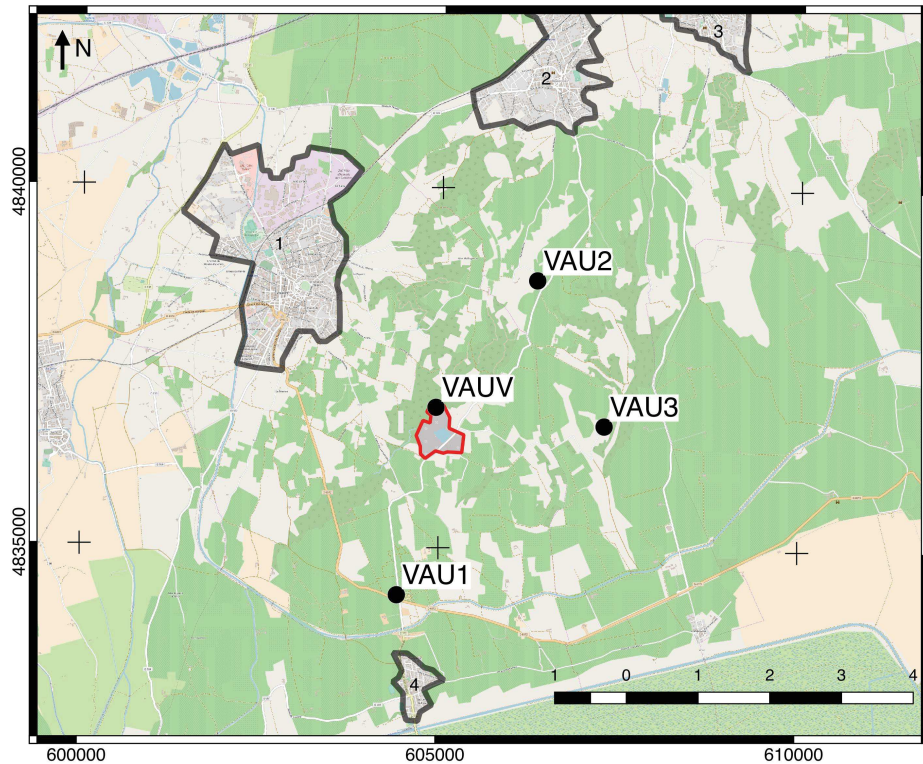


Figure 4-14 : Carte de positionnement de quatre stations permanentes à Vauvert. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

4.2.1.2 Calculs

Pour les projets de suivi de mouvements de stations par mesures GNSS permanentes, la procédure consiste à sélectionner des stations de référence régionales issues des réseaux globaux ou régionaux (par exemple IGS, NOAA, RGF). En pratique, la sélection de stations stables entourant la zone d'intérêt et de préférence situées sur la même plaque tectonique est effectuée. Cette stratégie de référencement permet de ne pas introduire de biais lors de l'application du mouvement des plaques tectoniques pour les stations dont la vitesse n'a pas été déterminée. Ainsi, le choix des stations de référencement optimales est d'autant plus important que le contexte géologique régional est complexe (par exemple proximité de bordure de plaque tectonique), ce qui n'est pas le cas de Vauvert. Ainsi, 26 stations de référence ont été intégrées au traitement des données GNSS sur la période considérée (2015-2017) : MICH, RST2, PRIE, MARS, AXPV, BUIS, VISN, AURI, CHRN, PALI, STGR, SAUV, SGIL, STMR, STBX, BANN, LUVI, MNTP, MTP2, FLRC, AIGL, AGDS, AGDE, PZNA, PUEC, HOLA (Figure 4-15). Ces stations font partie des réseaux permanents RGP, RENAG ou ORPHEON. L'utilisation d'un grand nombre de stations de références permet d'obtenir une bonne répartition spatiale de celles-ci tout en maintenant un référencement cohérent dans le temps en vue d'une surveillance à long terme (traitements futurs, post-2017).

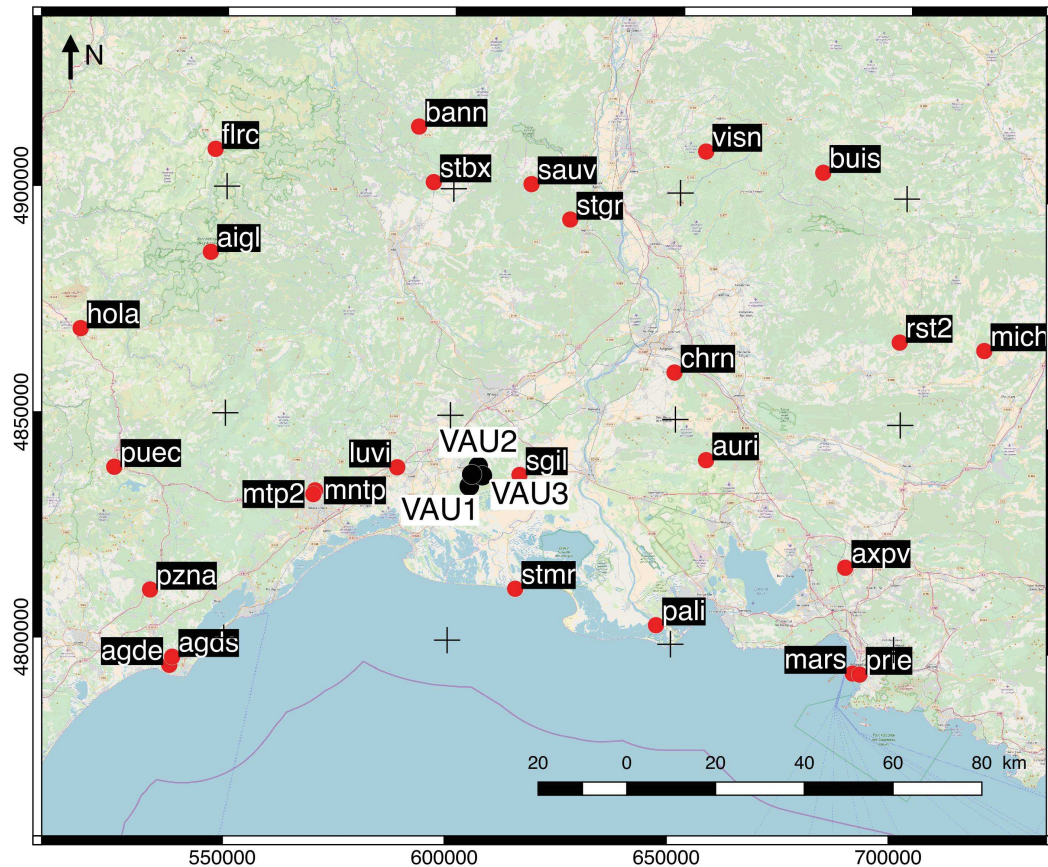


Figure 4-15 : Localisation du réseau de stations permanentes de références utilisé

Les données Rinex des quatre stations permanentes sont récupérées au format natif .dat. Le logiciel teqc (UNAVCO) est utilisé pour le passage au format RINEX. Les métadonnées (hauteurs d'antennes, nom du point, modèle et numéro de série des antennes et récepteurs) sont vérifiées. Outre les fichiers de données d'observations GNSS, ont été utilisés :

- Des éphémérides précises (.sp3 finaux).
- Des paramètres d'orientation de la Terre (IERS): Pôle, UT1, par rapport à la rotation de la Terre.
- Les tables (normes IERS / IGS) relatives à la précession et à la nutation de l'axe de rotation de la Terre.
- Un modèle de migration du centre de phase des antennes GNSS.
- Les éphémérides de marées terrestres et lunaires.
- Des modèles de déplacement de la croûte terrestre par les variations de masses issues des marées et de l'atmosphère.
- Des valeurs de biais de code différentiel (P1-C1, P1-P2).

- Des grilles de délais atmosphériques modélisés à l'aide des « Vienna Mapping Functions » (VMF1).

Le calcul est effectué à l'aide du logiciel scientifique Gamit-Globk v10.6 (Herring et al., 2010). Ce logiciel de calcul et d'analyse de données GPS a été développé entre le Massachusetts Institute of Technology (MIT), le Harvard-Smithsonian Center of Astrophysics (CfA), et la Scripps Institution of Oceanography (SIO). Son développement a pour objectifs l'estimation précise de coordonnées et de vitesses de stations GPS, de délais atmosphériques, d'orbites satellites et des paramètres d'orientation de la Terre. Les possibilités de paramétrage complet des calculs, l'utilisation des produits aux normes internationales récentes et la flexibilité de ce logiciel le rendent idéal dans le cadre de calculs précis (coordonnées et vitesses) de stations telles que mesurées à Vauvert.

La procédure de calcul a été la suivante. **Dans un premier temps** la méthode de la double différence sur la phase GPS est utilisée afin d'estimer (1) les coordonnées de la station, (2) le délai atmosphérique zénithal en chaque station (toutes les deux heures), (3) les paramètres orbitaux (dérivés des orbites précises fournies par MIT), et (4) les paramètres d'orientation terrestre (dérivés du mouvement polaire connu par application des modèles UT1-UTC fournis par l'IERS). Des contraintes faibles sont appliquées sur tous les paramètres. **Dans un deuxième temps**, sont utilisées des estimations peu contraintes des coordonnées journalières des stations, des orbites, des paramètres d'orientation de la Terre et de leurs matrices de variance/covariance dans un filtre de Kalman (module GlobK) pour estimer un ensemble cohérent de coordonnées et de vitesses. Les deux premières étapes sont réitérées en utilisant des coordonnées a priori résultant de la deuxième étape. Enfin, le déplacement des stations locales (VAUx) est calculé relativement aux stations de référence stables formant une pseudo sous-plaque tectonique (module glorg). On obtient donc pour chaque station des séries temporelles de coordonnées journalières ainsi que des valeurs de vitesses associées.

4.2.1.3 Résultats

Les résultats sont illustrés ci-après par (1) des séries temporelles de déplacement selon les trois composantes spatiales Nord, Est et Verticale et (2) par des valeurs de vitesses locales, mesurant l'effet de la subsidence, affranchie de tout déplacement tectonique régional. On observe :

- Sur le plan horizontal, un effondrement du bol vers son centre, tel que déjà mesuré avec les stations non permanentes
- Sur la verticale, une subsidence de magnitude maximale cohérente avec les précédentes études (2.5 cm/an), mais de magnitudes plus importantes aux bords du bol que celles précédemment mesurées.

Ce dernier point peut avoir plusieurs origines. Tout d'abord les séries temporelles des stations VAU1, VAU2 et VAU3 sont très courtes pour une analyse de vitesses : environ un an. Cette durée ne permet pas de calculer des vitesses fiables puisque le signal saisonnier annuel ne sera pas estimable. Celui-ci affecte donc potentiellement de manière importante le signal. Néanmoins une augmentation de la taille du bol de subsidence au cours de cette période n'est pas exclue à ce stade. Enfin la mesure d'un effet temporaire de purges de puits, associées à des effets environnementaux (pluviométrie) et une potentielle hausse de la production est possible.

Les résultats, en termes de vitesses, sont résumés dans le Tableau 4 ci après.

Station	Temps [ans]	Vitesses [mm/an]			RMS [mm]		
		V_North	V_East	V_Up	RMS_North	RMS_East	RMS_Up
VAU1	1,06	5,1	-0,1	-14,6	0,6	0,6	2,2
VAU2	1,09	-13,6	0,0	-25,0	0,7	0,7	2,3
VAU3	1,10	1,0	-11,9	-25,2	0,6	0,6	2,2
VAUV	1,88	-1,7	5,9	-26,0	1,0	0,7	2,7

Tableau 4 : Synthèse des résultats Gamit-GlobK sur données GPS de stations permanentes à Vauvert.

Les figures suivantes présentent les séries temporelles des quatre stations calculées. On observe sur la composante Nord de la série temporelle VAUV une étonnante composante cyclique annuelle, non observée sur les composantes Est et verticale. Sur ces composantes on observe en revanche un mouvement localisé en Décembre 2016 sur la composante Est et Mai 2017 sur la composante verticale. Les séries temporelles des stations VAU1, VAU2 et VAU3 sont beaucoup plus courtes ce qui rend difficile la détection d'éventuels cycles. Il est tout de même possible d'y détecter un mouvement localisé sur la composante verticale, à la même époque (environ Mai 2017) que pour la station VAUV. Ce mouvement apparent semble donc lié au calcul et non à un déplacement commun et synchronisé de ces stations.

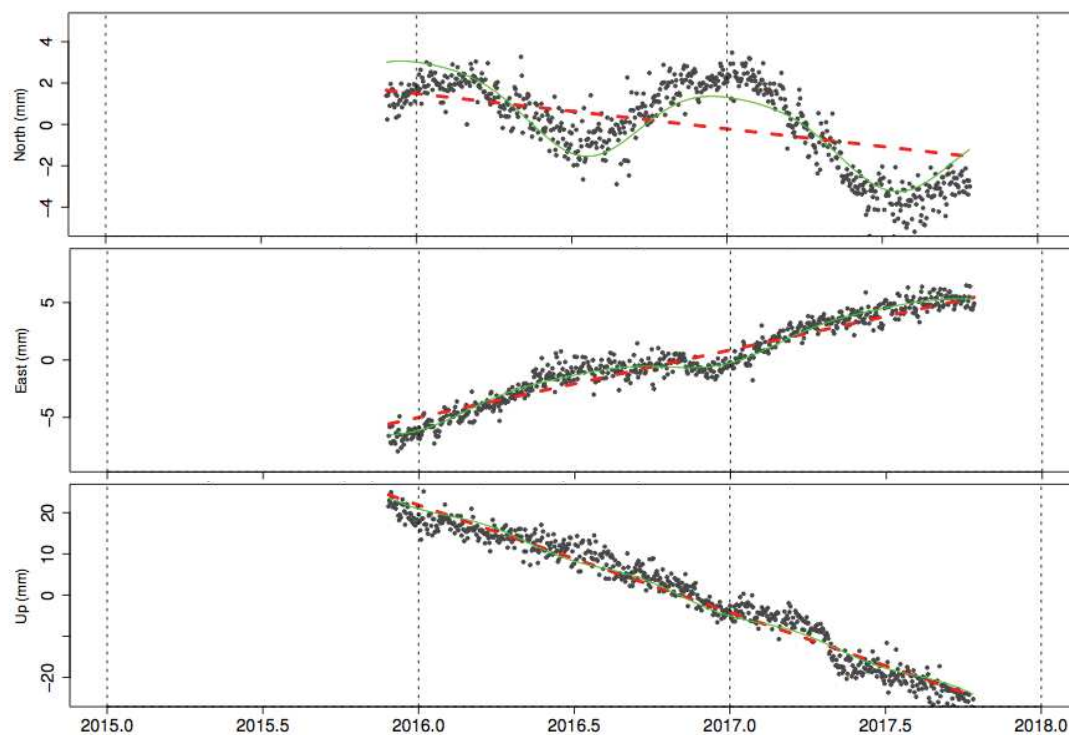


Figure 4-16 : Série temporelle de la station VAUV issue du calcul Gamit-GlobK.

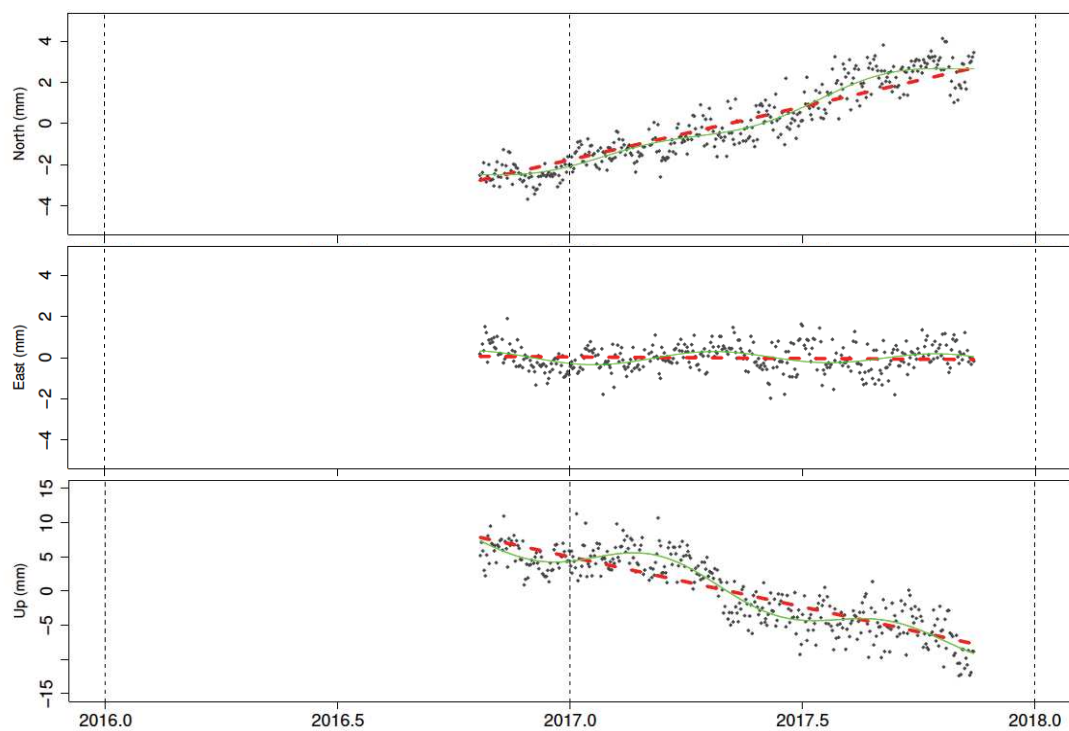


Figure 4-17 : Série temporelle de la station VAU1 issue du calcul Gamit-GlobK.

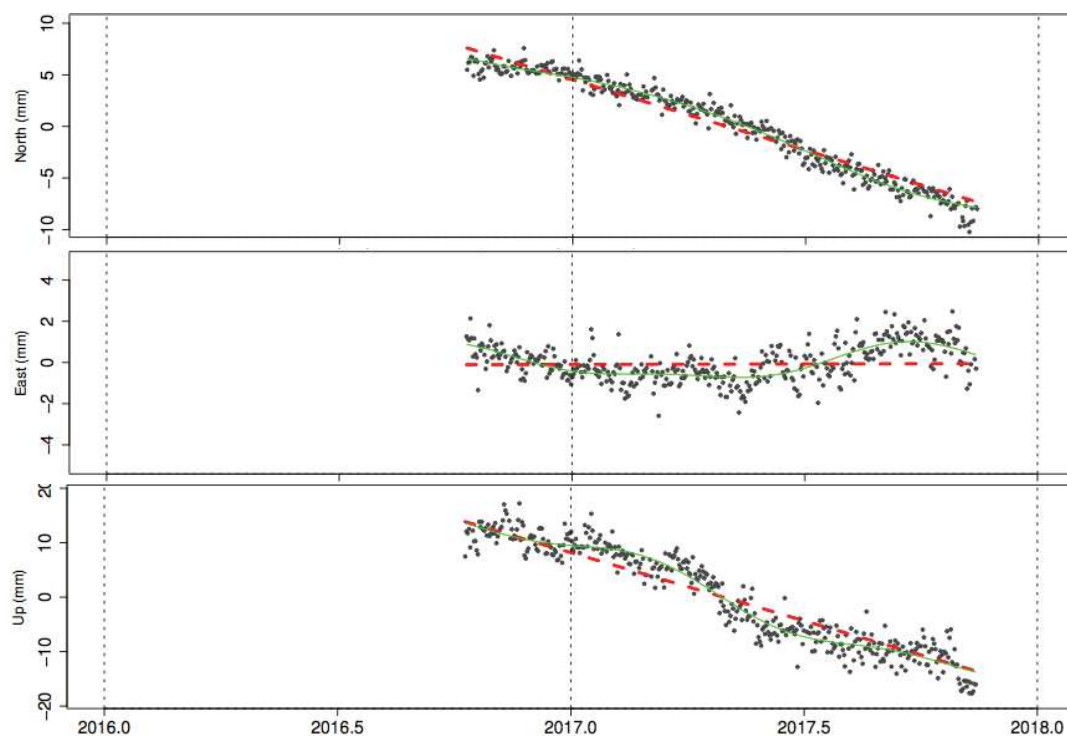


Figure 4-18 : Série temporelle de la station VAU2 issue du calcul Gamit-GlobK.

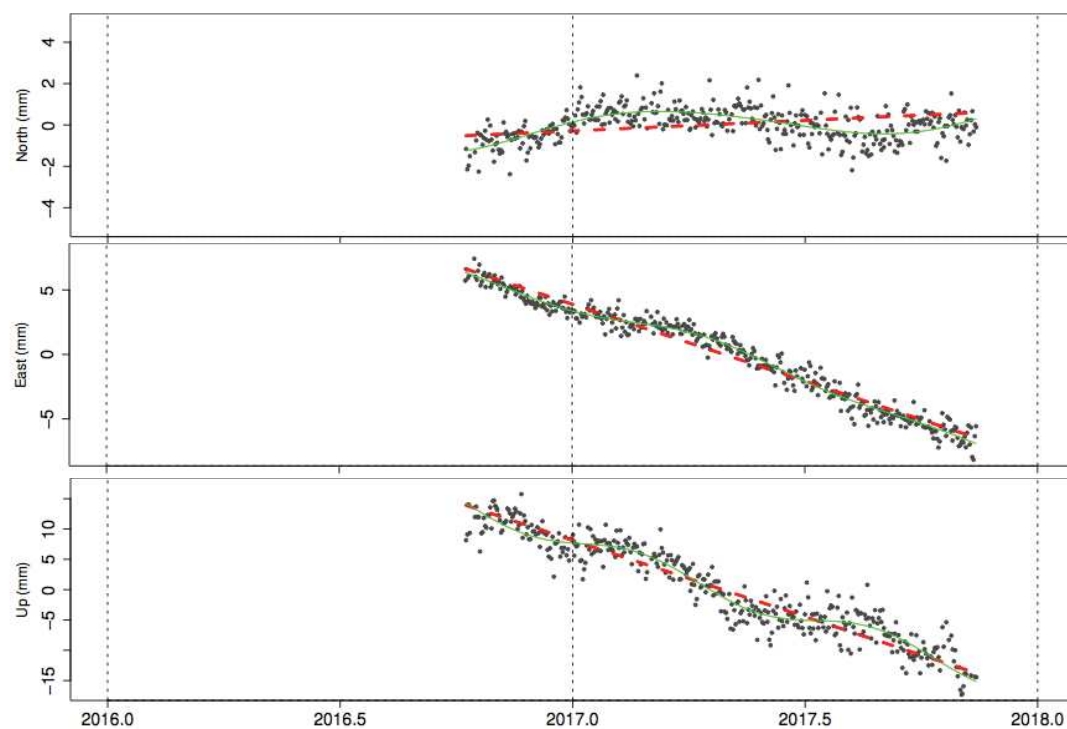


Figure 4-19 : Série temporelle de la station VAU3 issue du calcul Gamit-GlobK.

Les séries temporelles et les vitesses en dérivant sont maintenant connues sur les quatre stations permanentes VAUV, VAU1, VAU2 et VAU3, permettant leur intégration à une solution de combinaison de vitesses.

4.2.2 InSAR : multi-temporel sur données Envisat

4.2.2.1 Données

Des différentes bandes d'images SAR, la bande C est la plus couramment utilisée dans le cadre de projet de suivi de la déformation de surface. Elle permet en effet l'étude de mouvements fins sur des images à la résolution de quelques mètres à dizaines de mètres, résolution le plus souvent suffisante. Dans la liste des satellites imageurs en bande C, le choix s'est tout d'abord porté sur le satellite Envisat. Les images radar, fournies par l'ESA, sont en effet faciles d'accès, la série temporelle est suffisante pour des analyses PS-InSAR (PSI) et /ou Small-BASe (SBAS), et la précédente étude Fugro (section 4.1.4.3) a montré une plus grande capacité à maintenir permanents les réflecteurs naturels, comparativement aux images ERS. Les caractéristiques des images sont résumées ci-après :

- Envisat (bande C), ESA
- Format I2, angle d'incidence env. 23° sur la zone étudiée
- Dimension des images natives env. 100 km par 100 km (distance par azimuth)
- Géométrie(s) de mesure : descendante seulement, l'archive en géométrie ascendante étant trop peu fournie pour une étude multi-temporelle (moins de 10 images disponibles couvrant la zone d'étude)
- Nombre d'images disponibles (géométrie descendante) : 25
- Période d'acquisitions : 17 Décembre 2002 au 1^{er} Septembre 2009

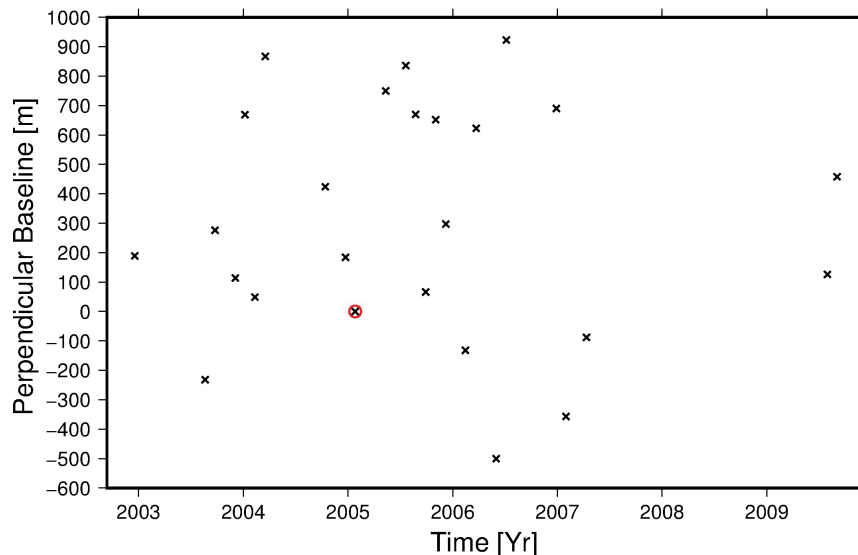


Figure 4-20 : Valeurs de lignes de base perpendiculaires en fonction du temps pour l'archive Envisat en géométrie descendante utilisée à Vauvert. Cercle rouge : image maîtresse pour traitement PS-InSAR.

Des données externes aux données radar sont utilisées lors du traitement, notamment :

- Un modèle numérique de terrain (MNT), le SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, Farr et Kobrick, 2000 ; Farr et al., 2007), à la résolution native de 90 m, ré-échantillonné à 30 m,
- Orbites satellites précises DORIS fournies par l'ESA.

Ces données radar et données externes permettent l'application d'algorithmes multi-temporels (de types PS-InSAR et SBAS-InSAR) ainsi qu'une analyse associée.

4.2.2.2 Calcul

Les images radar sont téléchargées dans leur format brut (« raw »). Elles sont d'abord synthétisées à l'aide de la chaîne de traitement ROI_PAC (Rosen et al., 2004). Ces images synthétisées sont dites SLC (Single Look Complex). Chaque pixel de ces images représente un nombre complexe et sa valeur contient donc à la fois des valeurs d'amplitude et de phase du signal radar. Les images SLC sont calées à l'aide des données d'orbite et d'altitude du satellite. Dans le cadre d'un traitement multi-temporel PS-InSAR, celles-ci sont ensuite géométriquement recalées relativement à une image dite maîtresse. Celle-ci est choisie de manière à minimiser à la fois les écarts orbitaux et les écarts temporels entre les prises de vues. Cela permet de minimiser les possibles futurs décorrélations spatiales et temporelles. En ce sens la prise de vue du 6 Décembre 2005 paraît idéale. Néanmoins l'analyse de la mesure de la composante humide de l'atmosphère par les spectromètres embarqués sur satellites Modis et Meris montrent une forte composante humide de l'atmosphère, menant à une faible couverture de mesure sur ces images (inférieure à 50%). Au contraire, la prise

de vue du 25 Janvier 2005 paraît certes moins idéalement placée sur la Figure 4-20, mais la couverture de mesures Modis et Meris est meilleure (respectivement 76.3% et 93.5%). Cette image radar est donc choisie comme image maîtresse.

Les interférogrammes sont ensuite créés avec la chaîne de traitement DORIS (Kampes et al., 1999 ; 2003). En chaque pixel une différence de phase est calculée. Les effets (1) des différences d'orbites entre les prises de vue, (2) sur la phase de la courbure terrestre et (3) de la différence de point de vue sur la topographie sont retirés. Il en résulte des franges liées à la déformation et aux erreurs résiduelles issues des calculs de (1), (2) et (3), ainsi que l'effet (délai) de la composante atmosphérique. La Figure 4-21 ci-après est l'un des interférogrammes calculé sur l'archive Envisat, entre le 17 Décembre 2002 et l'image maîtresse du 25 Janvier 2005. Au centre-Nord de l'image, des franges quasi-concentriques sont visibles, franges marquant la présence du bol de subsidence de Vauvert. Il doit être noté que la géométrie de la figure est inversée selon une symétrie d'axe Nord/Sud (cause : géométrie descendante).

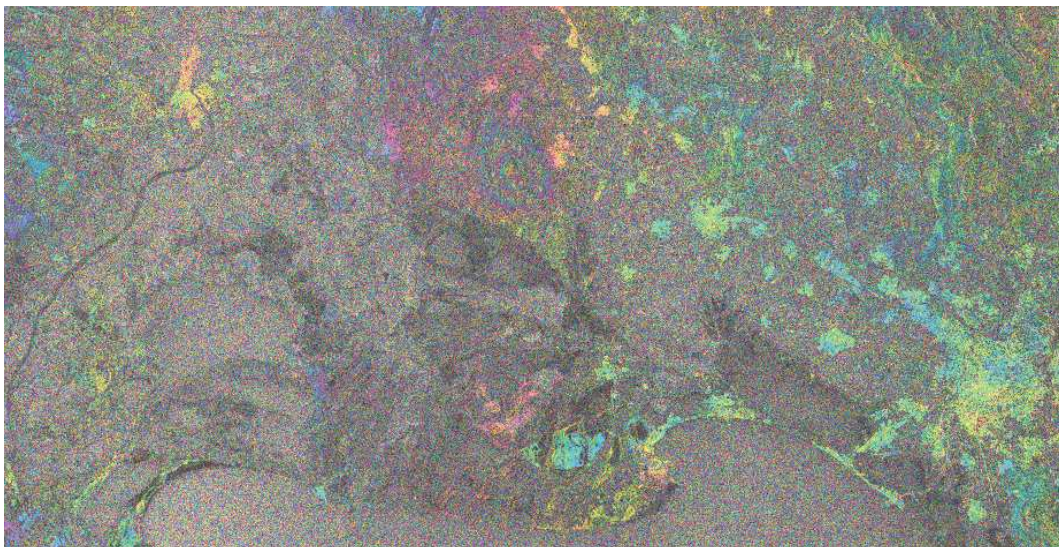


Figure 4-21 : Illustration d'une portion d'interférogramme sur couple d'images SLC (17/12/2002 – 25/01/2005) Envisat en géométrie descendante sur la région autour de la zone d'étude de Vauvert.

Après création des interférogrammes, ceux-ci sont traités avec la chaîne de traitement StaMPS (Hooper et al., 2004). Sur les interférogrammes issus d'images radar Envisat, il est possible d'appliquer les algorithmes PSI et SBAS. Dans le cadre de l'application de l'algorithme PSI, les pixels sont d'abord sélectionnés selon un critère de dispersion maximale d'amplitude. Ensuite le bruit sur la phase de ces pixels est estimé et une nouvelle sélection est menée, selon un critère de proportion maximum de « faux » PS. La sélection concerne ici 20 % maximum de faux PS parmi les pixels candidats au titre de réflecteurs permanents. Ensuite, l'erreur liée à la différence d'angle de vue, erreur non spatialement corrélée, est calculée et retirée. Enfin, la phase résultante, présentant des franges (aussi appelée phase

enroulée) est déroulée, avec comme point de référence le repère de nivellement RN10, référence du nivellement au Sud de la zone d'étude, à Gallician. Pour cela une référence absolue de vitesse est nécessaire : la vitesse moyenne des réflecteurs permanents est considérée nulle sur l'ensemble de la région étudiée. Le calcul de séries temporelles de déformation en chaque réflecteur permanent sélectionné est ainsi possible. Est finalement obtenu un champ de vitesses selon la ligne de visée du satellite (section 4.2.2.3).

Un deuxième calcul est effectué pour application de l'algorithme SBAS-InSAR. Sur les mêmes images SLC que précédemment, des interférogrammes sont créés de manière à limiter les décorrélatons spatiales et temporelles. Sont donc privilégiées les courtes lignes de bases (« Small base ») spatiales et temporelles entre deux prises de vues, telles que présentées en Figure 4-22 ci-après. Les interférogrammes sont ensuite créés de la même manière que pour le traitement PS-InSAR. Seuls les critères de longueurs de lignes de bases sont déterminés. En résulte la création de 114 interférogrammes (Figure 4-22).

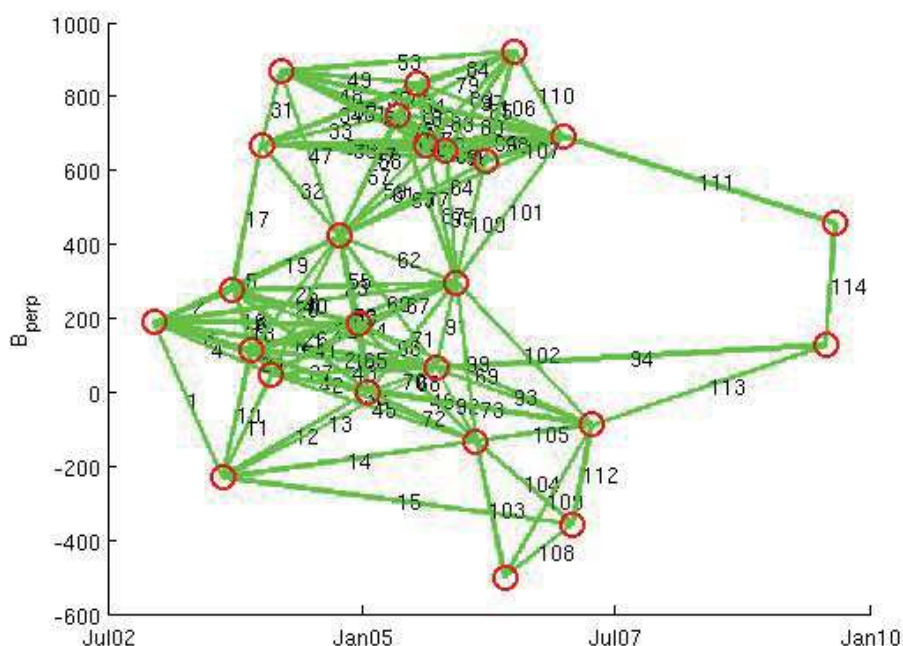


Figure 4-22 : Lignes de base perpendiculaires en fonction du temps pour l'archive Envisat en géométrie descendante utilisée à Vauvert. Lignes vertes : interférogrammes créés pour traitement SBAS.

Les résultats des traitements PS-InSAR et Small-BASe sur archive Envisat en géométrie descendante à Vauvert sont illustrés et décrits dans la section ci-après.

4.2.2.3 Résultats

Les résultats (vitesses et incertitudes associées) des traitements PSI et SBAS présentés en section 4.2.2.2 sont illustrés ci-après en Figure 4-23 et Figure 4-27. Ces illustrations rendent

compte des résultats sur et autour de la zone d'étude de Vauvert. Pour toutes les vitesses les conventions de signes sont identiques. Une vitesse positive montre un déplacement du point vers le satellite, et une vitesse négative montre un éloignement du point vis-à-vis du satellite. La direction satellite-points étant une combinaison géométrique des composantes verticale et horizontales (chapitre 3). Les vitesses sont issues du calcul d'une régression linéaire sur les séries temporelles de déplacement des réflecteurs permanents, et les incertitudes sont issues du calcul de la disparité des vitesses autour de la régression linéaire.

Le traitement par algorithme PSI (Figure 4-23) montre un bol de subsidence de magnitude maximale à 1.6 cm/an (los). Cette valeur est faible comparée aux valeurs mesurées dans les études historiques présentées en section 4.1.4. Néanmoins la comparaison avec l'étude PS-InSAR présentée en section 4.1.4.3 est rendue difficile par la présence de nombreux points de mesures montrant un comportement aléatoire dans cette précédente étude. Les dimensions du bol de subsidence sont cohérentes avec les précédentes études. On observe ici un bol de forme elliptique de grand axe orienté Sud-Ouest / Nord – Est d'environ 7.5 km et petit axe perpendiculaire d'environ 5 km.

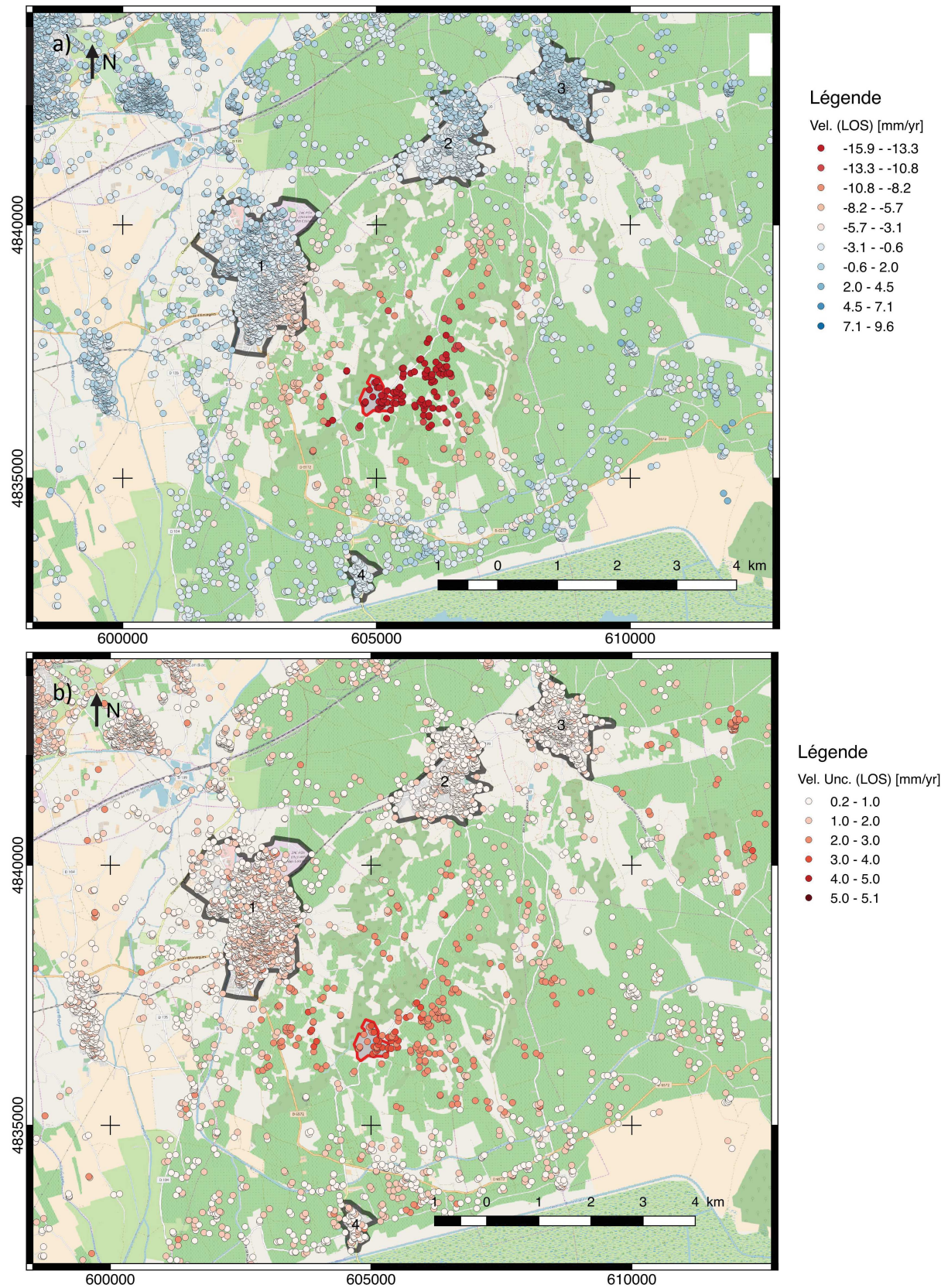


Figure 4-23 : (a) Champ de vitesse PS-InSAR sur archive Envisat en géométrie descendante (période 2002-2009) à Vauvert et (b) incertitudes associées. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

Les valeurs d'incertitudes sont faibles sur les zones stables (autour de 1 à 2 mm/an) et plus élevées en se rapprochant du centre du bol de subsidence (entre 3 et 5 mm/an). Plusieurs explications sont possibles. La première est la présence de végétation plus importante dans le bol de subsidence qu'autour, où villes et infrastructures (par exemple routes) sont plus nombreuses. Ces infrastructures étant de bons réflecteurs permanents, l'incertitude résultante sur ces points est moindre. Mais cette explication n'est pas pleinement satisfaisante, puisque (1) certaines zones végétalisées mais loin du bol présentent des incertitudes moins élevées, et que (2) les incertitudes les plus élevées sont présentes au centre du bol. La deuxième explication de ces incertitudes peut donc être liée à des mouvements non linéaires dans le temps, voire cycliques.

Il est intéressant à ce stade de comparer les résultats avec les vitesses issues du nivellement (présentés en section 4.1.4.1). Le réseau de nivellement étant mesuré annuellement, les données utilisées dans cette comparaison sont mesurées de 2002 à 2009, soit huit campagnes de mesures. La comparaison est effectuée de deux manières : (1) les réflecteurs permanents proches (100 m autour) des stations nivelées sont projetés sur deux profils (Figure 4-24) suivant ces stations nivelées et (2) un graphe de corrélation entre tous les points nivelés et les réflecteurs permanents proches (100 m) est créé. Les valeurs issues du nivellement sont projetées selon la ligne de visée du satellite. Les résultats sont présentés en Figure 4-25. Il apparaît clairement sur ces graphes que le nivellement mesure une subsidence sur un bol de dimensions identiques au traitement PS-InSAR sur archive Envisat, mais d'une magnitude maximale plus importante. Plus l'on s'approche du centre du bol plus l'InSAR semble sous-estimer la déformation, comme le reflète bien la tendance illustrée en Figure 4-26. À noter que cette figure semble montrer un « palier » de magnitude maximale mesurée en InSAR. Ce palier est en réalité issu de la méthode de détermination de la comparaison: les réflecteurs permanents et les points nivelés au centre de la zone de subsidence sont nombreux, deux stations nivelées proches (à moins de 100 m) ont donc les mêmes réflecteurs permanents proches et présentent donc les mêmes valeurs vitesses des réflecteurs correspondants.

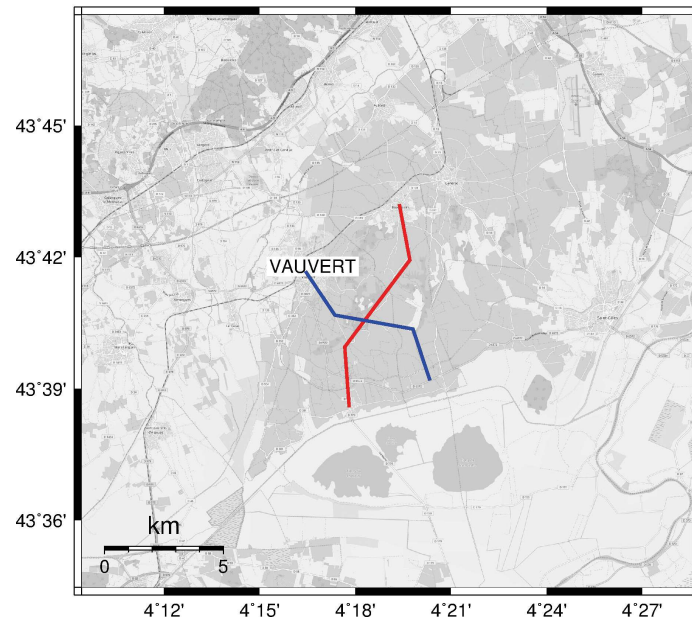


Figure 4-24 : Emplacement des profils de comparaison inSAR/Nivellement à Vauvert. Profil rouge = profil 1. Profil bleu = profil 2.

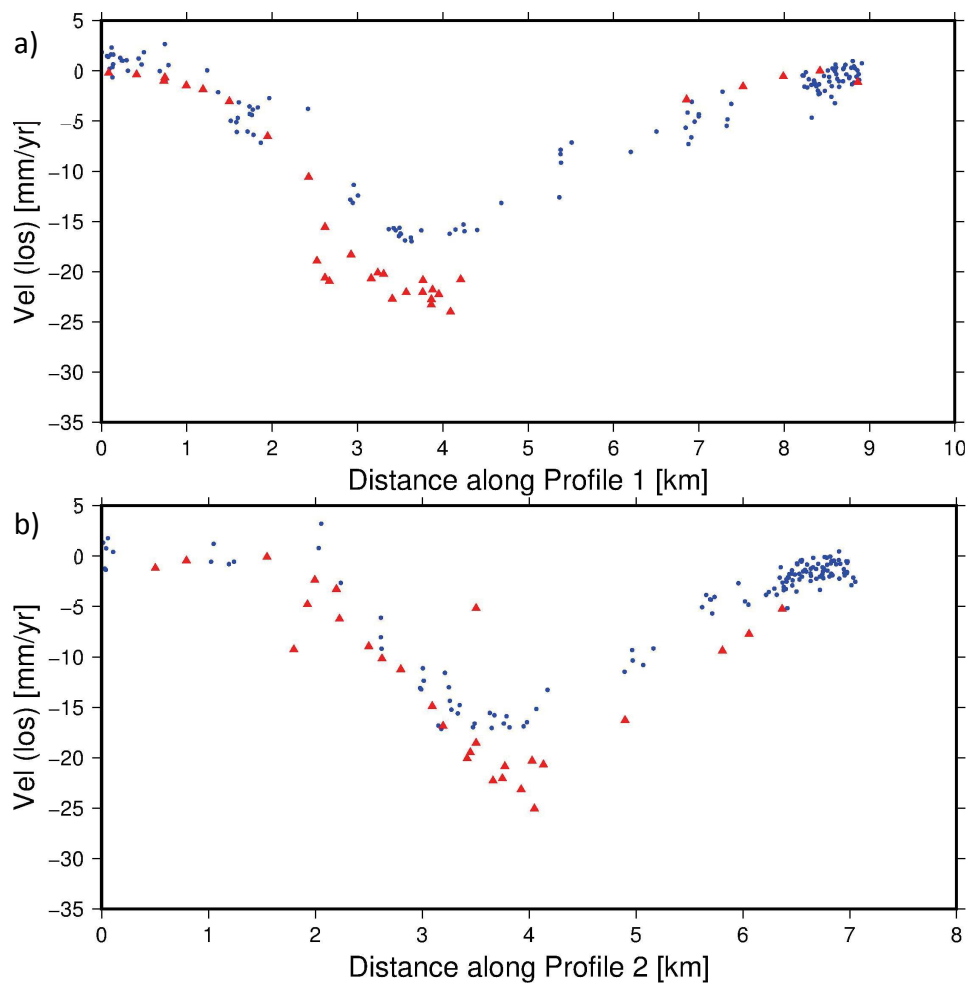


Figure 4-25 : Confrontation entre les résultats du traitement PS-InSAR sur archive Envisat (2002-2009) à Vauvert, (a) le long du profil 1, (b) le long du profil 2.

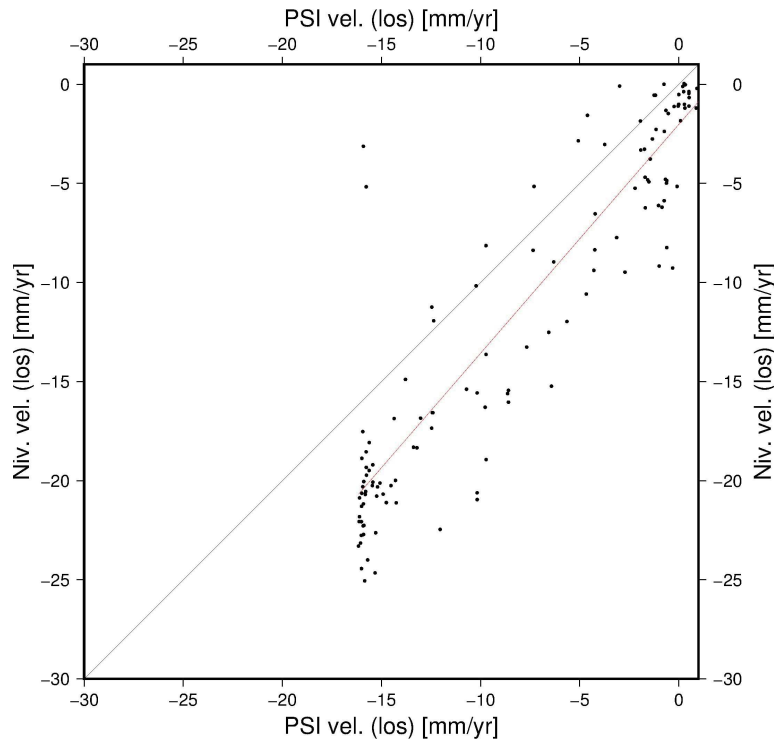


Figure 4-26 : Graphe de corrélation entre les points nivelés et les réflecteurs permanents inclus dans un rayon de 100 m

Le traitement par algorithme SBAS (Figure 4-27) montre un bol de subsidence de magnitude maximale de 2.4 cm/an. Cette valeur est plus proche des valeurs mesurées dans les études historiques présentées en section 4.1.4 que les valeurs issues du traitement PSI. Les dimensions du bol de subsidence sont similaires aux dimensions admises par l'étude PSI et aux précédentes études. On mesure un bol de forme elliptique de grand axe orienté Sud-Ouest / Nord – Est d'environ 7 km et petit axe perpendiculaire d'environ 4.5 km.

Les valeurs d'incertitudes varient similairement à celles de l'étude PSI. Leur valeur augmente en s'approchant du centre du bol, et varie localement de moins de 1 mm/an à 4 mm/an. L'explication de cette variation spatiale est identique à celle précédemment donnée.

La comparaison avec le nivellement (Figure 4-28) montre un haut degré de cohérence. En effet, que ce soit sur les profils de comparaison ou sur le graphe de corrélation on observe une forme du bol de subsidence identique pour les deux techniques et une magnitude similaire. Comme pour les résultats PS-InSAR une sous-estimation de la déformation maximale semble être détectée sur le traitement SBAS, mais celle-ci est minime (différence de 3 mm/an au maximum de subsidence).

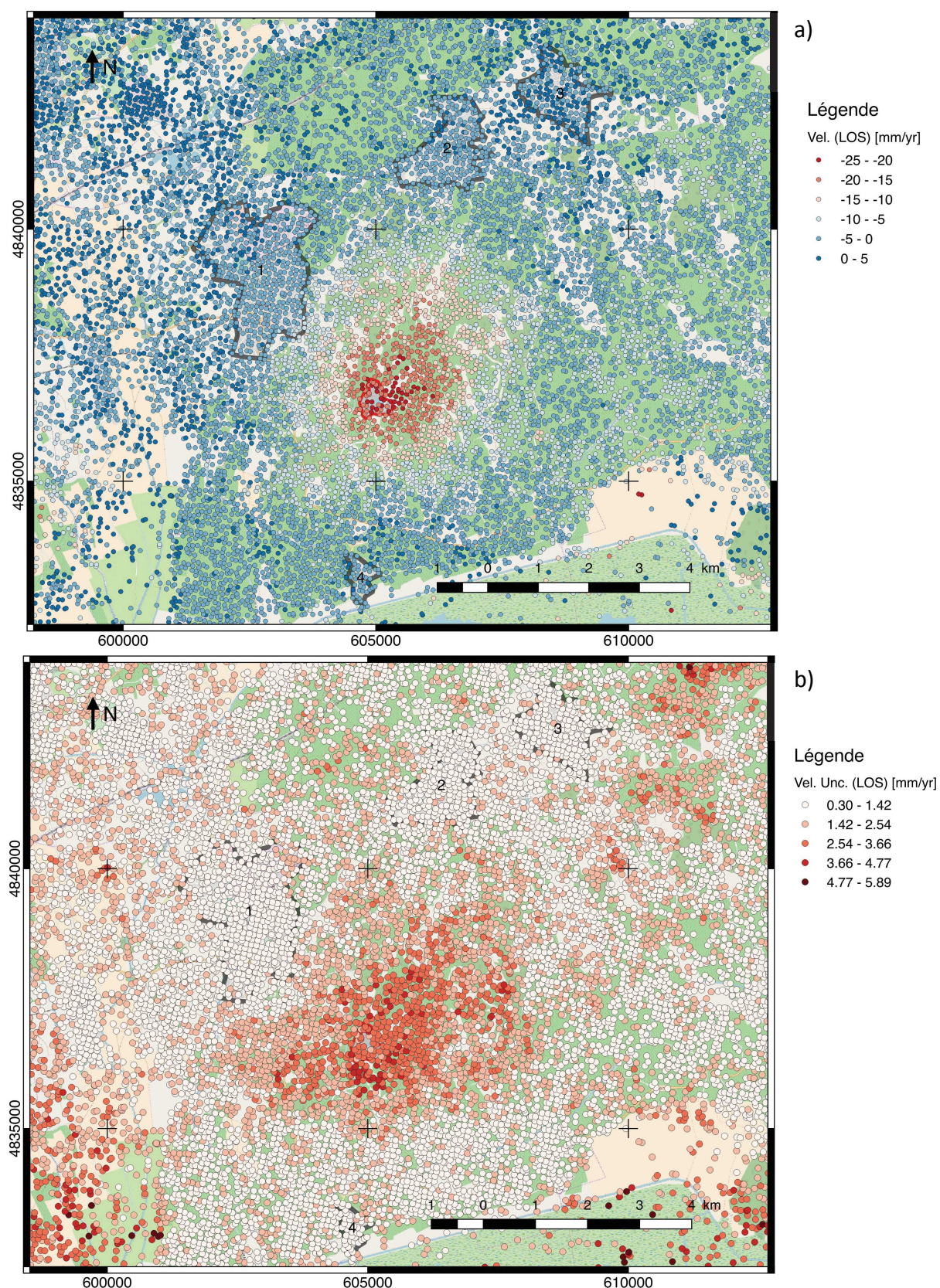


Figure 4-27 : (a) Champ de vitesse SBAS-InSAR sur archive Envisat en géométrie descendante (période 2002-2009) à Vauvert et (b) incertitudes associées. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

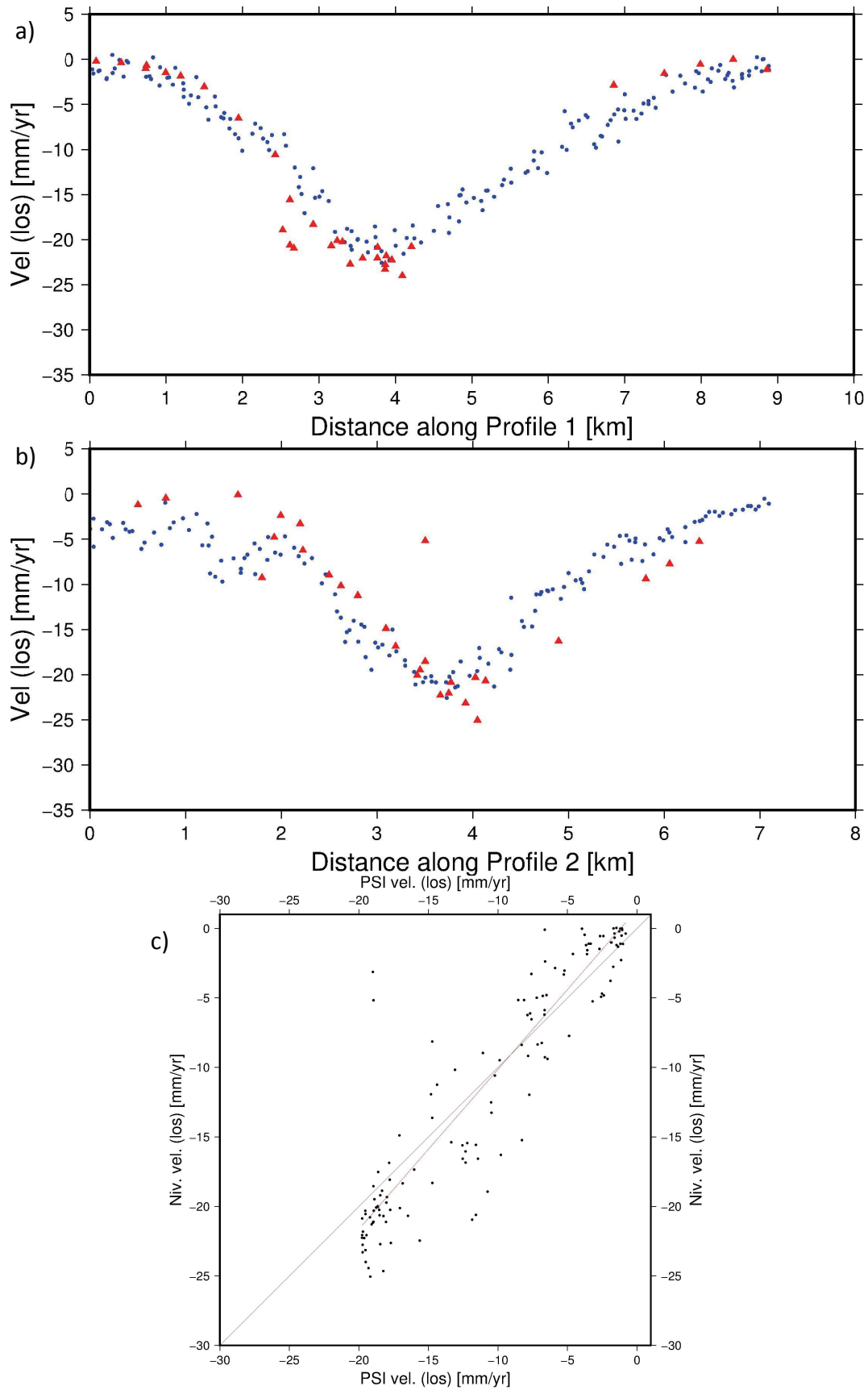


Figure 4-28 : Confrontation entre les résultats du traitement SBAS-InSAR sur archive Envisat (2002-2009) à Vauvert, (a) le long du profil 1, (b) le long du profil 2. (c) Graphe de corrélation entre les points nivelés et les réflecteurs permanents inclus dans un rayon de 100 m.

Les variations spatiales non aléatoires de l'incertitude sur les deux traitements ont donc pour origine potentielle des variations non linéaires du mouvement du sol. La Figure 4-29 illustre le moyen d'analyser ces variations. Une série temporelle de l'évolution de la position (selon la ligne de visée du satellite) des PS présents sur le site de la Galine ainsi que des stations nivelées y sont présentées. Les tendances (vitesses) ont été retirées afin de faciliter la discussion autour de la possible présence de variations temporaires de la déformation.

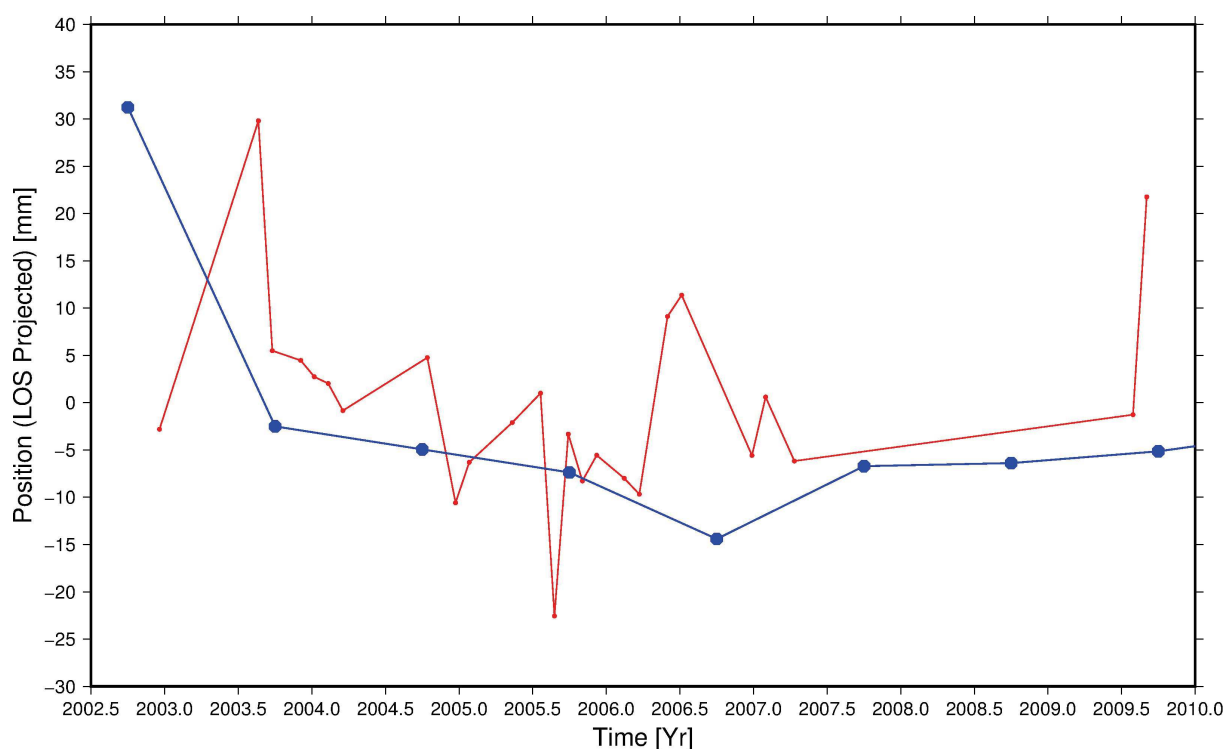


Figure 4-29 : Séries temporelles issues des traitement SBAS-InSAR (rouge) sur archive Envisat en géométrie descendante et nivellement (bleu), à l'Est du bol de subsidence de Vauvert, site de la Galine. Les tendances (vitesses) ont été retirées du signal.

La dispersion des positions des PS au cours du temps rend l'analyse difficile, néanmoins il est possible de déterminer deux périodes distinctes : entre 2002 et 2006, le nivellement et l'InSAR sont cohérents et montrent une subsidence supérieures à la tendance moyenne. Ensuite, sur la période 2006-2009, la subsidence semble plus constante et proche de la tendance moyenne sur la période totale (qui a été retirée du signal).

Ainsi, malgré une bonne couverture temporelle de l'archive Envisat, notamment entre 2002 et 2007, le nombre d'images reste trop limité pour estimer et caractériser d'éventuels cycles saisonniers ou cycles liés à l'exploitation de la saumure sur la saline de Vauvert. C'est l'un des arguments en faveur de l'utilisation d'images satellitaires à plus haute fréquence de prise de vues : Sentinel-1a/b.

4.2.3 InSAR : multi-temporel sur données Sentinel-1a/b

4.2.3.1 Données

Les images radar issues des satellites imageurs de la constellation Sentinel (Sentinel-1a et Sentinel-1b) sont choisies pour plusieurs raisons. Tout d'abord la bande de fréquence utilisée est identique à Envisat : la bande C. Cela doit permettre de faciliter la comparaison avec de précédentes études dans la même bande de fréquence, avec des caractéristiques (par exemple cohérence, capacité d'un point à être réflecteur permanent) similaires. Ensuite la redondance temporelle des mesures atteint 6 jours ce qui limite les décorrélation temporelles et la ligne de base perpendiculaire entre les prises de vues est très faible – au plus quelques dizaines de mètres – ce qui limite les décorrélation spatiales. La redondance temporelle est ici très intéressante en vue de discuter les éventuels cycles de déformation liés à la production. Enfin, l'accès à l'archive est aisé et le téléchargement automatisable. Les caractéristiques principales des images sont résumées ci-après :

- Satellites Sentinel-1a et Sentinel-1b (bande C), ESA
- Mode IW (Interferometric Wideswath) : images de 250 km de côté pour une résolution de 5x20 m
- Géométrie(s) de mesure disponible(s) : ascendante (orbite 59) et descendante (orbite 37)
- Nombre d'images retenues selon la géométrie : 101 (descendante) et 66 (ascendante)
- Période d'acquisitions : 18 Avril 2015 au 3 Décembre 2017
- Polarisation : VV-VH

La Figure 4-30 illustre les valeurs de distance perpendiculaire entre deux prises de vues pour toutes les images utilisées, dans les deux géométries.

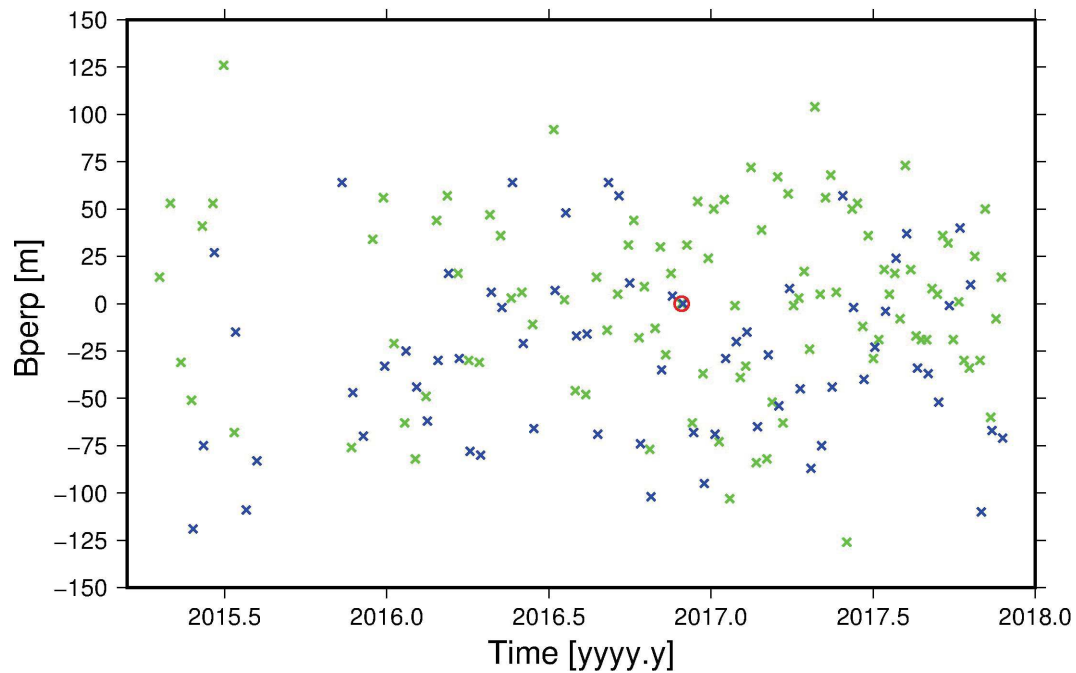


Figure 4-30 : Valeurs de lignes de base perpendiculaires en fonction du temps pour l'archive Sentinel-1a/b en géométries ascendante (croix bleues) et descendante (croix vertes) utilisées à Vauvert. Cercles rouges (confondus car images proches) : images maîtresse pour traitements PS-InSAR.

Des données externes sont utilisées dans le traitement, notamment :

- Modèle numérique de terrain (MNT) : SRTM (Farr et Kobrick, 2000 ; Farr et al., 2007), résolution 90 m,
- Orbites satellites précises DORIS fournies par l'ESA.

Ces données permettent un calcul multi-temporel et une analyse associée. Les logiciels utilisés ne permettant pas encore la création des fichiers nécessaires à l'application d'un algorithme SBAS avec StaMPS, seul le développement de la chaîne PS-InSAR a été développé et en partie automatisé. Le traitement est décrit ci-après.

4.2.3.2 Calcul

Contrairement aux images radar Envisat, téléchargées dans leur format natif brut, les images issues des satellites Sentinel-1a et Sentinel-1b sont directement téléchargées en SLC, le format brut n'étant pas accessible. L'étape de la création des SLC n'est donc pas nécessaire. La préparation des images et la création des interférogrammes sont donc effectuées avec le logiciel de l'ESA, SNAP. Ce logiciel libre permet d'automatiser le calcul via la création de fichiers .xml et leur automatisation via scripts, ici écrits en csh, et lancés via scripts gpt. À noter que, récemment, des scripts python d'automatisation du processus, depuis le téléchargement jusqu'aux interférogrammes, ont été mis en ligne (snap2stamps, Foumelis et al., 2018).

Le traitement est effectué selon les étapes suivantes.

- Les différentes sections de l'image (appelées « swaths ») sont séparées. Les images utilisées (images SLC en mode IW) sont en effet divisées en trois « swaths », soit trois portions égales de l'image totale. Chacun de ces « swaths » est divisé en « bursts », correspondant à des rafales de mesure radar. Chacun de ces « bursts » est traité de manière distincte.
- Les orbites précises fournies par l'ESA sont ensuite appliquées pour calculer au mieux la trajectoire du satellite et donc le positionnement géométrique de ces portions d'image.
- Une image maitresse est choisie grâce aux caractéristiques illustrés en Figure 4-30 : le temps et la ligne de base perpendiculaire. Les images du 26/11/2016 pour la géométrie descendante et 27/11/2016 pour la géométrie ascendante. Le module de « Back-geocoding » permet de co-enregistrer deux images SLC (image maitresse et image esclave) du même sous-domaine en utilisant les orbites des deux produits et un modèle numérique de terrain.
- L'étape suivante consiste en la création des interférogrammes complexes. Avec les orbites satellitaires connues, une correction de l'effet sur la phase de la courbure terrestre est appliquée. Le système de référence géodésique est défini par le système de référence des orbites de satellite (WGS84, système de référence utilisé par tous les systèmes SAR spatiaux).
- La phase topographique est retirée à l'interférogramme. Son calcul est effectué de telle sorte qu'un MNT (ici SRTM) est utilisé afin d'estimer les franges topographiques affectant l'image maitresse, dans sa géométrie radar.
- Ensuite l'information de l'altitude de chaque pixel est ajoutée au produit.
- Enfin, les interférogrammes et les combinaisons de SLC (« stacks ») sont exportés au format lisible par StaMPS.

Une fois les interférogrammes créés sous SNAP, ceux-ci sont importés et traités avec la chaîne de traitement StaMPS. Au moment du calcul seul l'export vers StaMPS pour le traitement PS-InSAR était disponible sous SNAP. Dans le cadre de l'application de l'algorithme PSI, les paramètres utilisés sont identiques à ceux utilisés sur l'archive Envisat. Les pixels sont d'abord sélectionnés selon un critère de dispersion d'amplitude. Ensuite la proportion maximum de « faux » PS est choisie à 20 %. L'erreur liée à la différence d'angle de vue, erreur non spatialement corrélée, est calculée et retirée. Enfin, la phase résultante, présentant des franges est déroulée. La référence de vitesse est identique à celle choisie pour le traitement présenté en section 4.2.2.2. Le calcul de séries temporelles de déformation et des vitesses en chaque réflecteur permanent sélectionné est enfin effectué.

4.2.3.3 Résultats

Les vitesses mesurées ainsi que les incertitudes qui leurs sont associées sont illustrées en Figure 4-31 (géométrie ascendante) et Figure 4-32 (géométrie descendante) ci après. Les conventions de signe et la méthode de calcul des vitesses sont identiques à celles présentées en section 4.2.2.3.

Les traitements PS-InSAR sur les archives Sentinel en géométrie ascendante et descendante montrent la présence du bol de subsidence. Les dimensions de ce bol et la magnitude maximale mesurée diffèrent. Les résultats sur l'archive en géométrie ascendante montrent un bol en forme d'ellipse d'environ 6 km de grand axe orienté Nord-Nord-Est et 4.5 km de petit axe. La magnitude maximale de subsidence est mesurée au centre du bol à 2.4 cm/an. Concernant la géométrie descendante, l'ellipse est mesurée avec un grand axe d'environ 5.5 km (orientation identique à la géométrie ascendante) et 4 km pour le petit axe. La magnitude maximale est identique, à 2.4 cm/an. La subsidence comprend une composante de déplacements horizontaux, ce qui explique la différence de vision de la déformation, selon deux visées obliques propres à chaque géométrie de mesure.

Les incertitudes associées sont plus faibles que les incertitudes mesurées sur l'archive Envisat puisque comprises dans l'intervalle $[0 ; 1]$ mm/an quelque soit la géométrie de mesure. Seuls quelques points montrent une incertitude supérieure à 1 mm/an.

La comparaison avec le nivellement montre un haut degré de cohérence, tant en géométrie ascendante (Figure 4-33) qu'en géométrie descendante (Figure 4-34). Seule la subsidence mesurée en géométrie ascendante mesure une subsidence sur Vauvert, que ne mesure pas la géométrie descendante, ni le nivellement. Ceci correspond à la composante planimétrique (liée à l'effondrement du bol), non mesurée par le nivellement, et pour lequel la géométrie ascendante est plus sensible sur cette partie Nord-Ouest du bol.

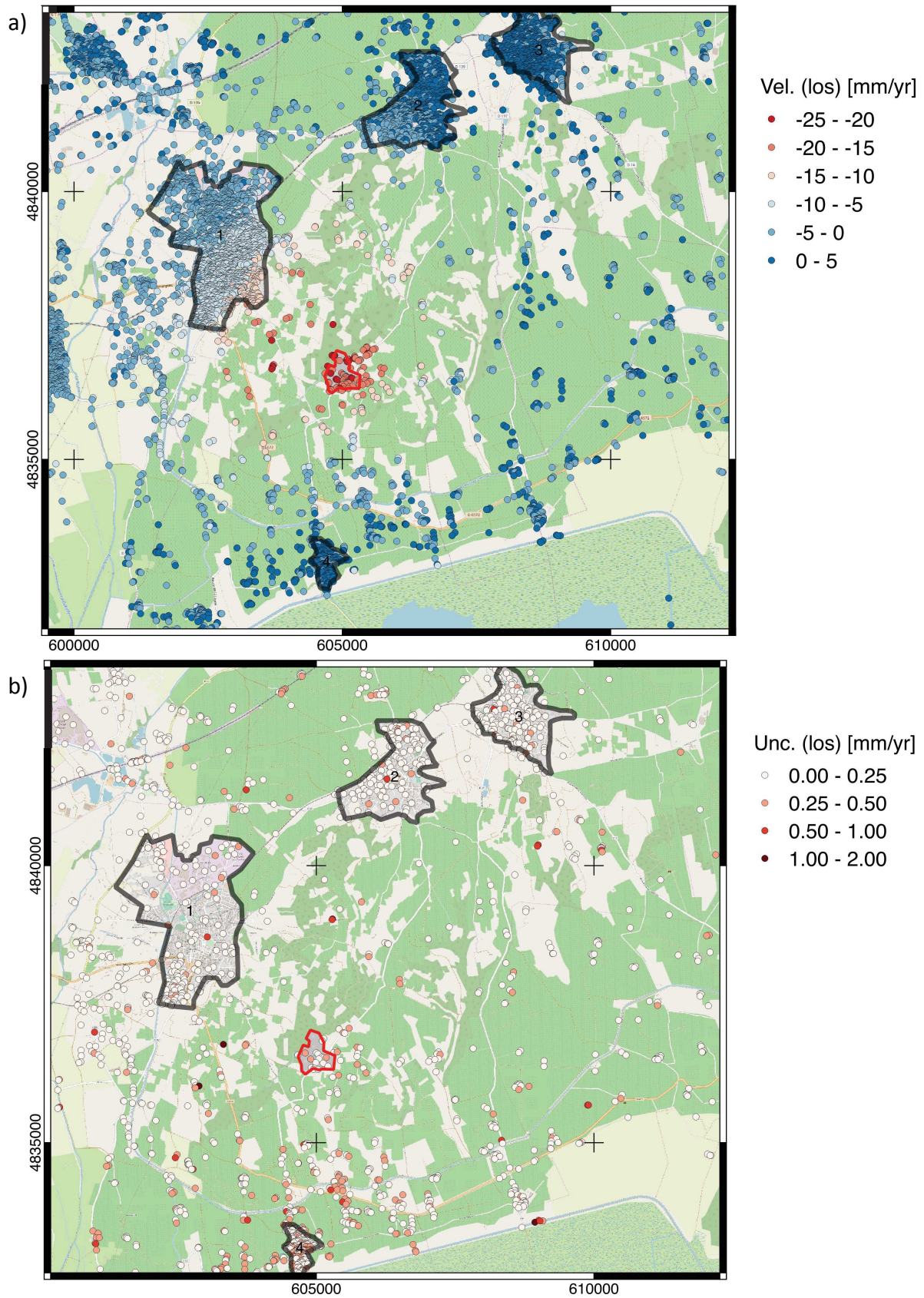


Figure 4-31 : (a) Champ de vitesse PS-InSAR sur archive Sentinel-1a/b en géométrie ascendante (période 2015-2017) à Vauvert et (b) incertitudes associées. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimitée par un trait rouge.

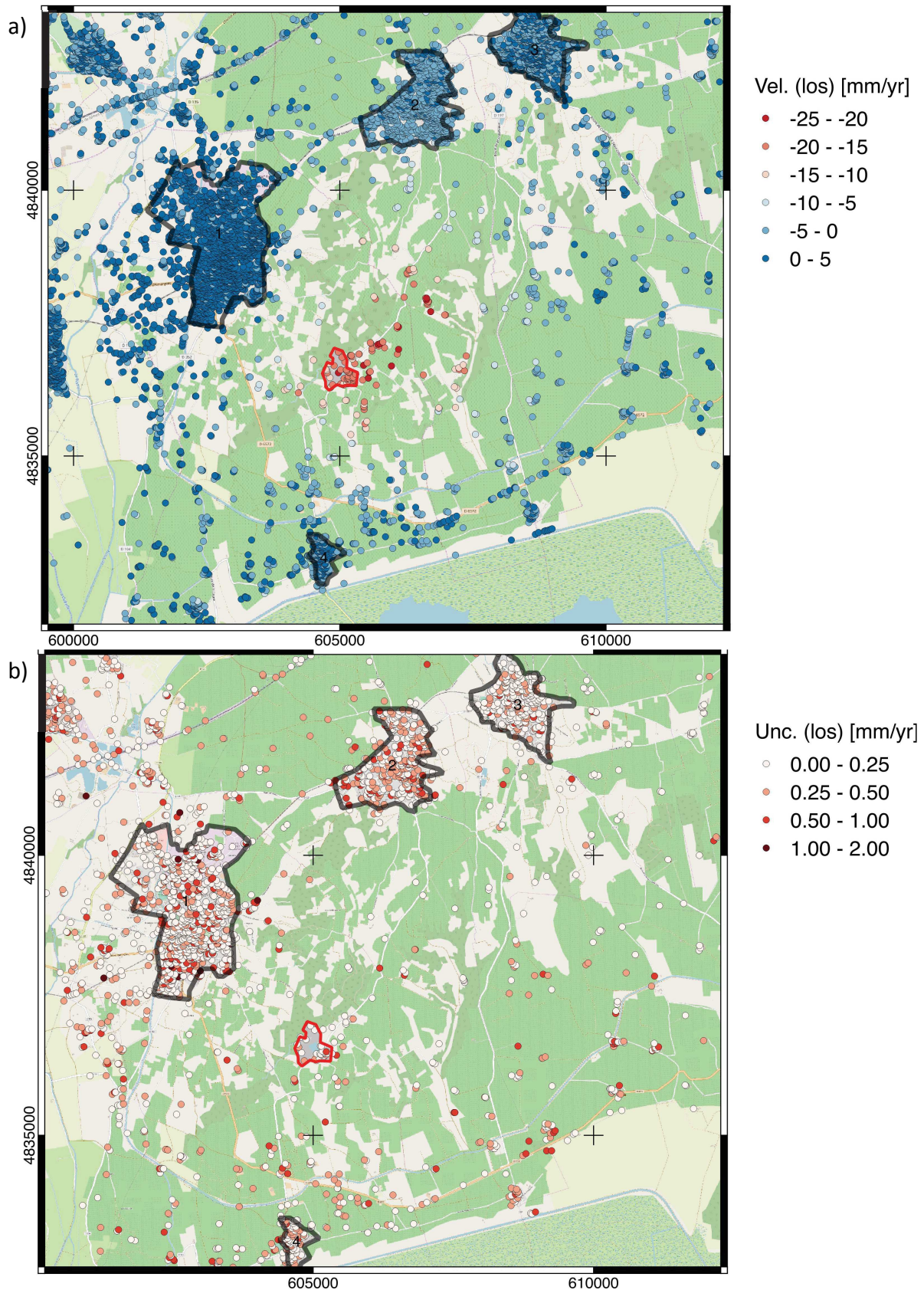


Figure 4-32 : (a) Champ de vitesse PS-InSAR sur archive Sentinel-1a/b en géométrie descendante (période 2015-2017) à Vauvert et (b) incertitudes associées. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimitée par un trait rouge.

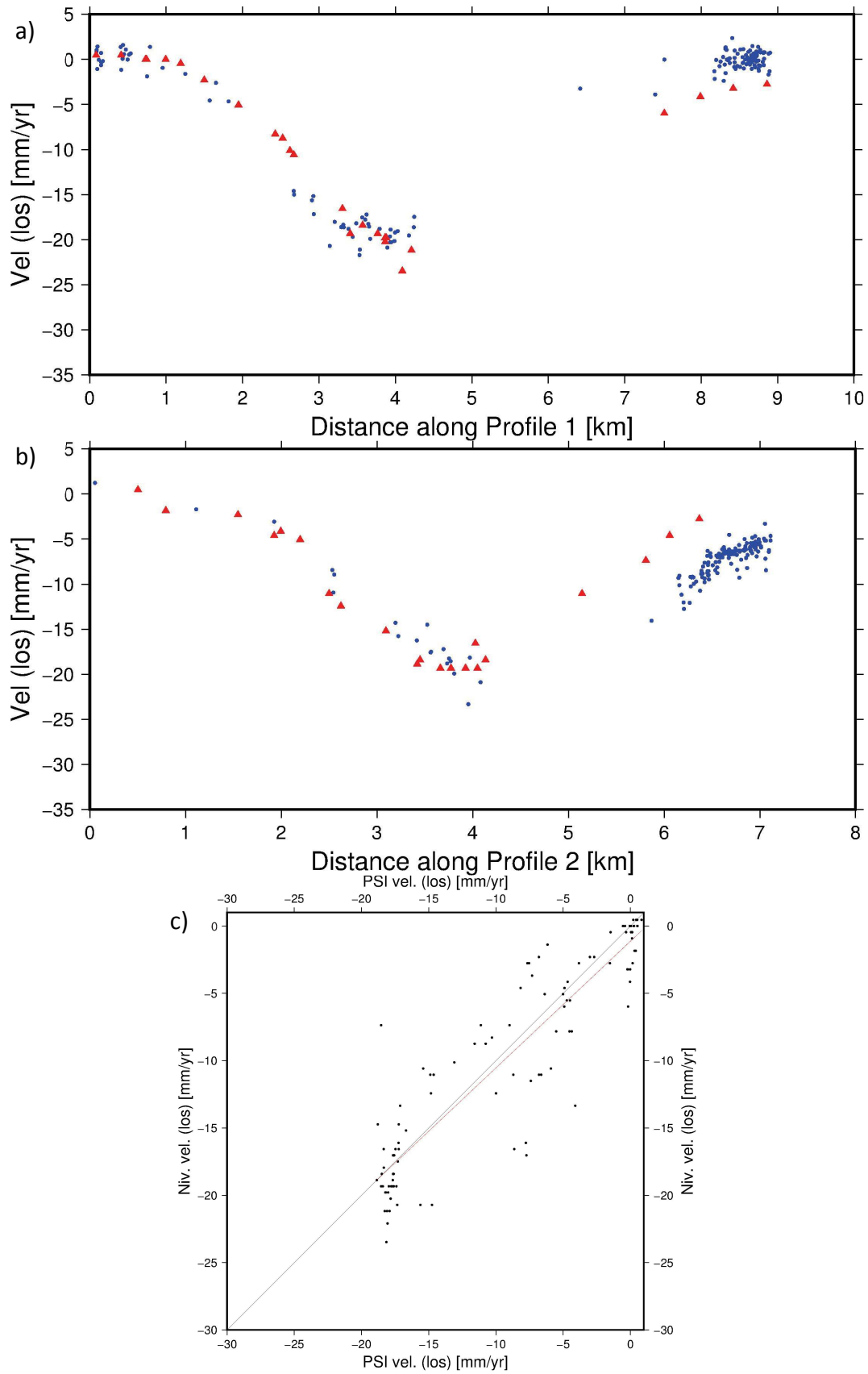


Figure 4-33 : Confrontation entre les résultats des traitements PS-InSAR sur archives Sentinel-1a/b en géométries ascendante sur période (2015-2017) à Vauvert, (a) le long du profil 1, (b) le long du profil 2. (c) Graphe de corrélation entre les points nivelés et les réflecteurs permanents inclus dans un rayon de 100 m.

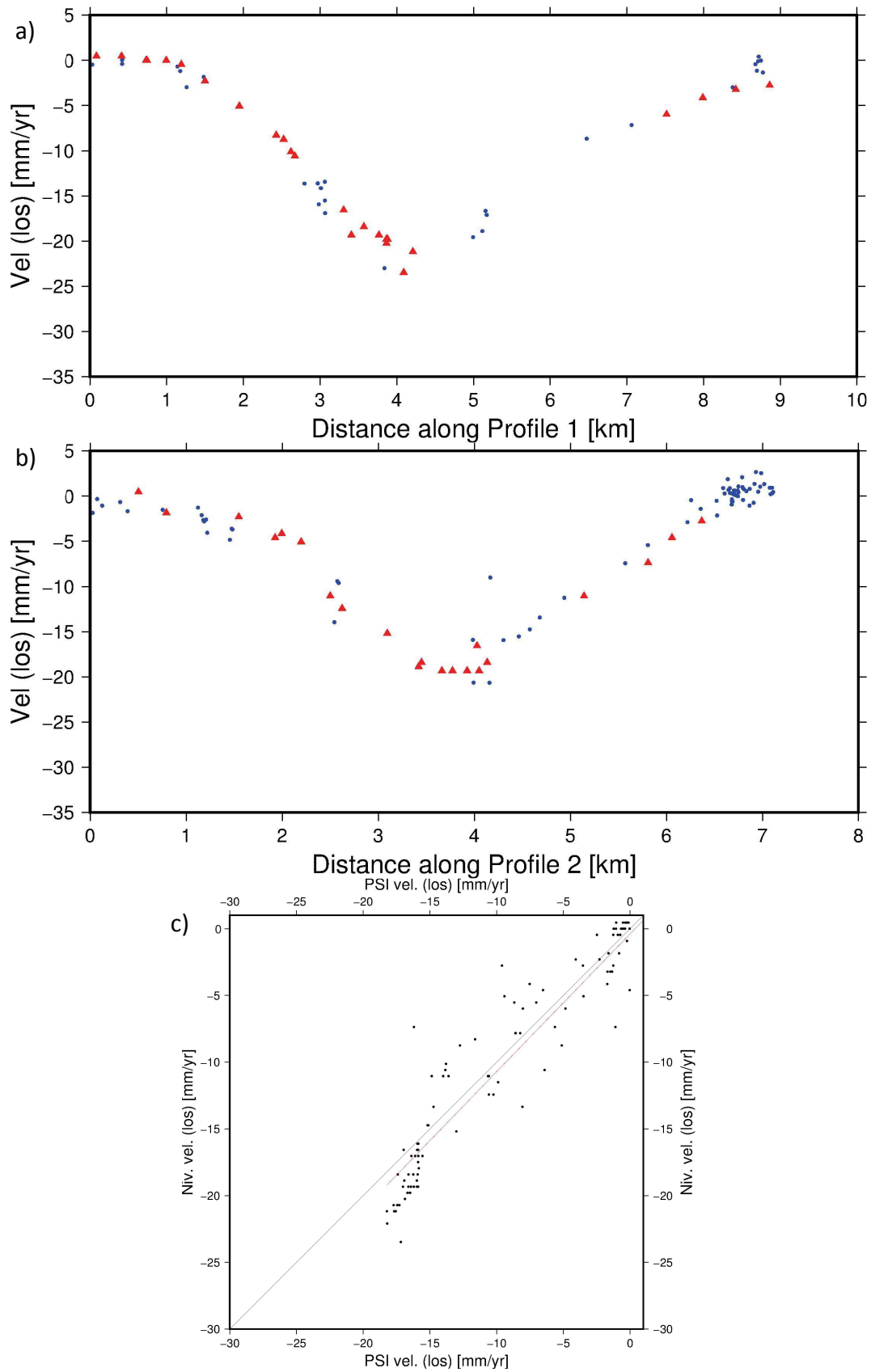


Figure 4-34 : Confrontation entre les résultats des traitements PS-InSAR sur archives Sentinel-1a/b en géométries descendante sur période (2015-2017) à Vauvert, (a) le long du profil 1, (b) le long du profil 2. (c) Graphe de corrélation entre les points nivelés et les réflecteurs permanents inclus dans un rayon de 100 m.

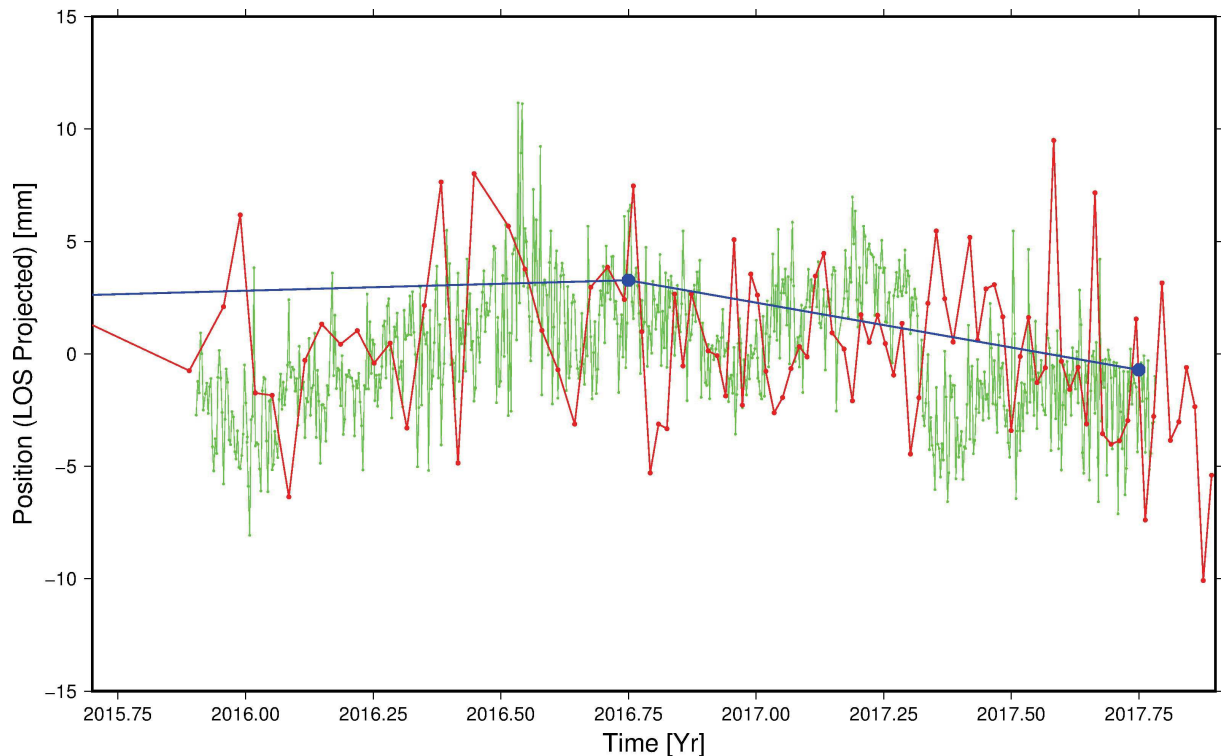


Figure 4-35 : Série temporelle issue du traitement PS-InSAR (rouge) sur archive Sentinel-1a/b en géométrie descendante, GPS (station VAUV, vert) et nivellement (bleu), autour de la station GPS VAUV, centre du bol de subsidence à Vauvert. Les tendances (vitesses) ont été retirées du signal. Positions projetées selon LOS.

L'analyse de la Figure 4-35 permet de déterminer deux sous-périodes distinctes de la déformation, au centre du bol de subsidence, proche de la station VAUV. Entre Janvier 2016 et Juillet 2016, l'InSAR, le GPS et dans une moindre mesure le nivellement, mesurent une subsidence inférieure à la subsidence moyenne (dont la tendance a été retirée). Une tendance inverse est observée entre Juillet 2016 et Novembre 2017.

Les champs de vitesses obtenus en sections 4.2.1.3, 4.2.2.3 et 4.2.3.3 mesurent une même subsidence, selon des directions, des résolutions, des précisions, et sur des périodes différentes. La méthodologie de combinaison présentée en chapitre 3 peut être appliquée.

4.3 Application de la méthodologie de combinaison à Vauvert : période 2002-2009

Les données décrites ci-avant en section 4.2 permettent diverses applications de la méthodologie de combinaison développée en chapitre 3. L'hypothèse de linéarité de la déformation n'étant pas discutée, il est nécessaire de combiner des données effectuées sur les mêmes périodes temporelles. Deux périodes sont ainsi retenues : une première (2002-2009) permet de combiner les résultats des traitements (1) InSAR sur archive Envisat

(section 4.2.2) et (2) nivellement (section 4.1.4.1). Une deuxième période (2015-2017) permet de combiner les résultats des traitements (1) InSAR sur archive Sentinel-1a/b (section 4.2.3), (2) GNSS permanent (section 4.2.1), et (3) nivellement (section 4.1.4.1). Cette section concerne la première application.

4.3.1 Données

L'archive Envisat a été traitée selon les algorithmes PS-InSAR, SBAS-InSAR. C'est ce dernier champ de vitesses qui est choisi afin d'être combiné. En effet, tel que décrit en section 4.2.2, ces résultats ont montré une très bonne couverture spatiale de réflecteurs permanents d'une part et des magnitudes de vitesses proches de celles mesurées en nivellement d'autre part. Le champ de vitesses SBAS-InSAR est donc le meilleur choix en vue de la combinaison.

Le nivellement quant à lui comprend l'ensemble des stations mesurées annuellement sur la période 2002-2009. Les stations ayant été construites et/ou détruites au cours de cette période ont été retirées. La combinaison peut donc suivre la variante 2 décrite en section 3.3.4.3 du chapitre 3.

4.3.2 Mise en référence

4.3.2.1 Mise en référence planimétrique des champs de vitesses

Un contrôle du positionnement spatial des réflecteurs permanents est effectué sur les résultats InSAR sur archive Envisat en géométrie descendante (section 4.2.2.3). Ce contrôle est rendu possible par l'identification de structures linéaires reconnaissables. En effet, routes, voies de chemin de fer, accotements de canaux, ou encore bâtiments isolés sont régulièrement reconnus comme réflecteurs permanents. Ces structures sont en outre faciles à relier à un fond de carte géoréférencé. Nous utilisons dans cette étude des données OpenStreetMap (OSM), dont la précision peut être localement inférieure au mètre si l'on observe la comparaison avec les emplacements des stations nivelées et stations GPS.

La Figure 4-36 est zoom exemple illustrant des décalages planimétriques entre les structures identifiées (par exemple accotements de berges, routes, voie ferrée) et le champ de vitesses InSAR correspondant. Un maximum de points de décalages entre réflecteurs permanents et les objets identifiés sur la carte géoréférencée sont mesurés dans les deux directions planimétriques. Une transformation à deux translations, Nord-Sud et Est-Ouest est donc appliquée. Les valeurs sont moyennées et une déviation standard sur ces mesures est calculée. On obtient une correction des décalages planimétriques (illustrée en Figure 4-36) suivante, correction basée sur 97 points de mesures :

- Une translation moyenne de 20 m +/- 3 m suivant la composante Nord-Sud,
- Une translation moyenne de - 25 m +/- 4 m suivant la composante Est-Ouest.

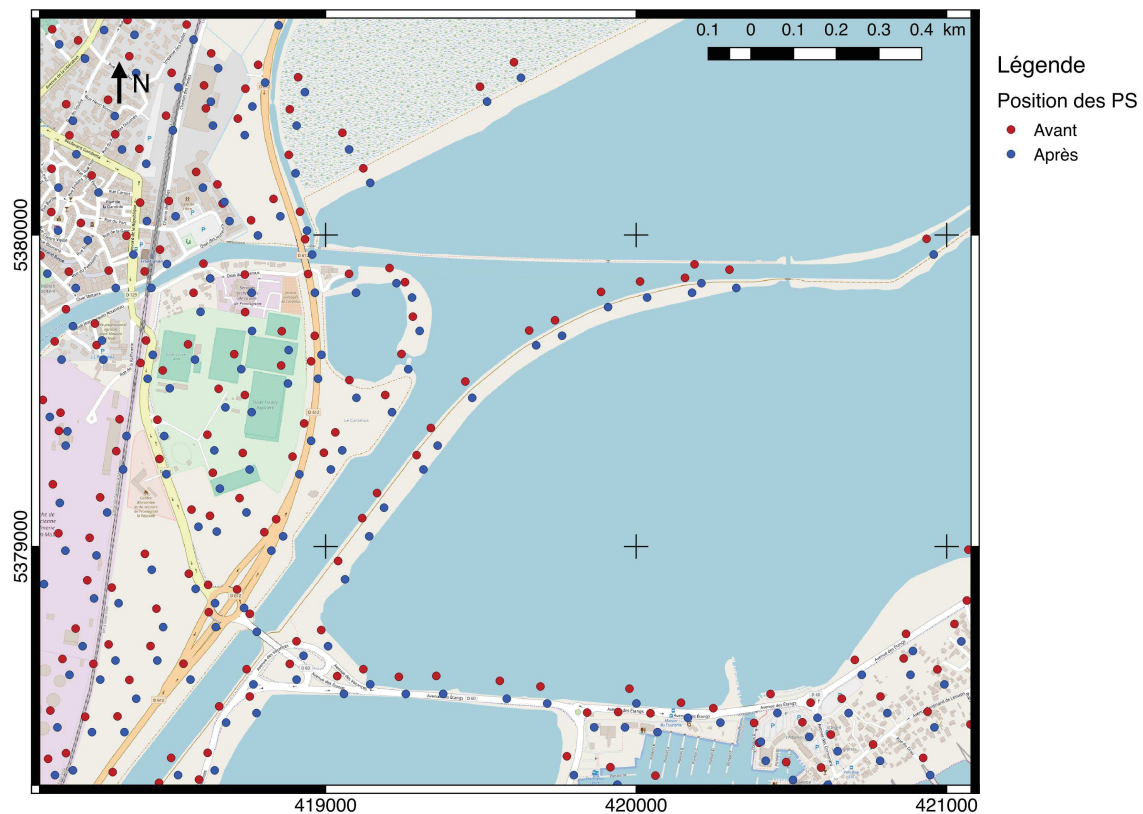


Figure 4-36 : Illustration cartographique du décalage planimétrique mesuré sur la zone d'étude. Position des réflecteurs permanents issus des champs de vitesses SBAS-InSAR sur archives Envisat en géométrie descendante avant correction (rouge) et après correction (bleu).

Ces valeurs sont appliquées à l'ensemble des résultats présentés en section 4.2.2.3. Le positionnement planimétrique des données géodésiques (InSAR et Nivellement) est ainsi considéré cohérent. La combinaison de ces données ne sera pas affectée par de possibles décalages dans le positionnement des points de mesures. La mise en référence altimétrique est maintenant appliquée et discutée.

4.3.2.2 Harmonisation des références altimétriques des champs de vitesses

L'objectif est ici de rendre la combinaison sur le site de Vauvert rigoureuse d'un point de vue géométrique. Autrement dit, les valeurs de déplacements et/ou de vitesses des techniques de mesures géodésiques doivent toutes être comprises dans la même dimension et se référer à un même système de référence ou au minimum à deux systèmes équivalents. Ceci est indispensable à la solution de combinaison, afin d'éviter de propager des fractions de vitesses issues d'un référencement différent.

Le nivellement est inclus dans le réseau NGF (Nivellement Général de la France), de référentiel altimétrique IGN 69, système de nivellement légal en France. Ce référentiel est caractérisé par des altitudes de type normal, avec un point de référence absolue : le marégraphe de Marseille (Nocquet et al., 1997). La référence spatiale locale du nivellement est un repère de nivellement (RN10) situé au Sud de la zone d'étude, à Gallician. Il serait nécessaire d'intégrer et d'étudier les vitesses sur d'autres repères de nivellement afin d'estimer d'éventuelles accumulations d'erreurs le long des profils menant à la mesure de faux dénivélées. Ceci n'est pas possible dans cette étude, n'ayant pas accès aux mesures et calculs mais seulement aux résultats. Ces résultats (section 4.1.4.1) ne sont donc pas modifiés.

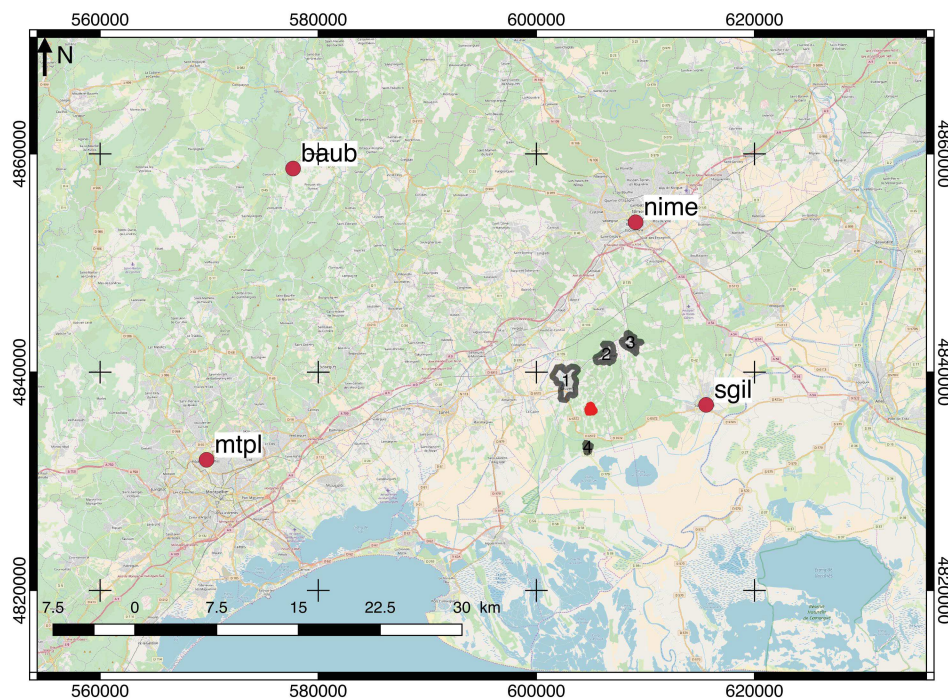


Figure 4-37 : Carte de localisation des stations GPS (points rouge) utilisées dans le calcul de la tendance bilinéaire à Vauvert. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

Les données radar satellitaire Envisat sont référencées de manière relative dans le temps (une image en référence) et l'espace (un point de l'espace en référence). Les satellites imageurs Envisat sont référencés par GPS dans une réalisation ITRF. Les résultats InSAR sont donc géométriquement directement comparables à des vitesses GPS. Sur le site d'étude à Vauvert, les traitements PS-InSAR ont été effectués relativement à un point au Sud de Vauvert considéré stable (RN10). Ensuite une correction est appliquée afin de désensibiliser les champs de vitesses finaux à l'erreur d'orbite résiduelle. Pour cela la méthode de retrait d'une tendance bilinéaire entre les données GPS régionales et les données InSAR est

retenue. Les stations GPS utilisées (Figure 4-37) sont les suivantes : mtpl (Montpellier), baub (Baubiac), sgil (Saint-Gilles) et nime (Nîmes). Les vitesses utilisées sont référencées dans l'ITRF 2008 avec comme référence la plaque Eurasie telle que définie par Altamimi et al., (2012). Ces stations ont été choisies car (1) des points de mesures InSAR proches de ces stations sont présents et (2) elles sont géométriquement bien disposées dans l'optique de calculer une rampe de tendance bilinéaire.

Les 100 points de mesures InSAR les plus proches de chaque point GPS sont sélectionnés et leurs valeurs de déplacement (selon la ligne de visée du satellite) sont moyennées. Ensuite la différence est faite entre ces valeurs et la valeur vitesse GPS (projetée selon la direction de visée du satellite) en chaque station. Enfin un plan décrivant au mieux (c'est-à-dire minimisant les écarts par moindres carrés) la spatialisation de ces différences est calculé. Les valeurs de corrections sont ensuite appliquées en tout point des champs de vitesses InSAR et le résultat sur la zone étudiée est quantifié en Tableau 5 et illustré en Figure 4-38.

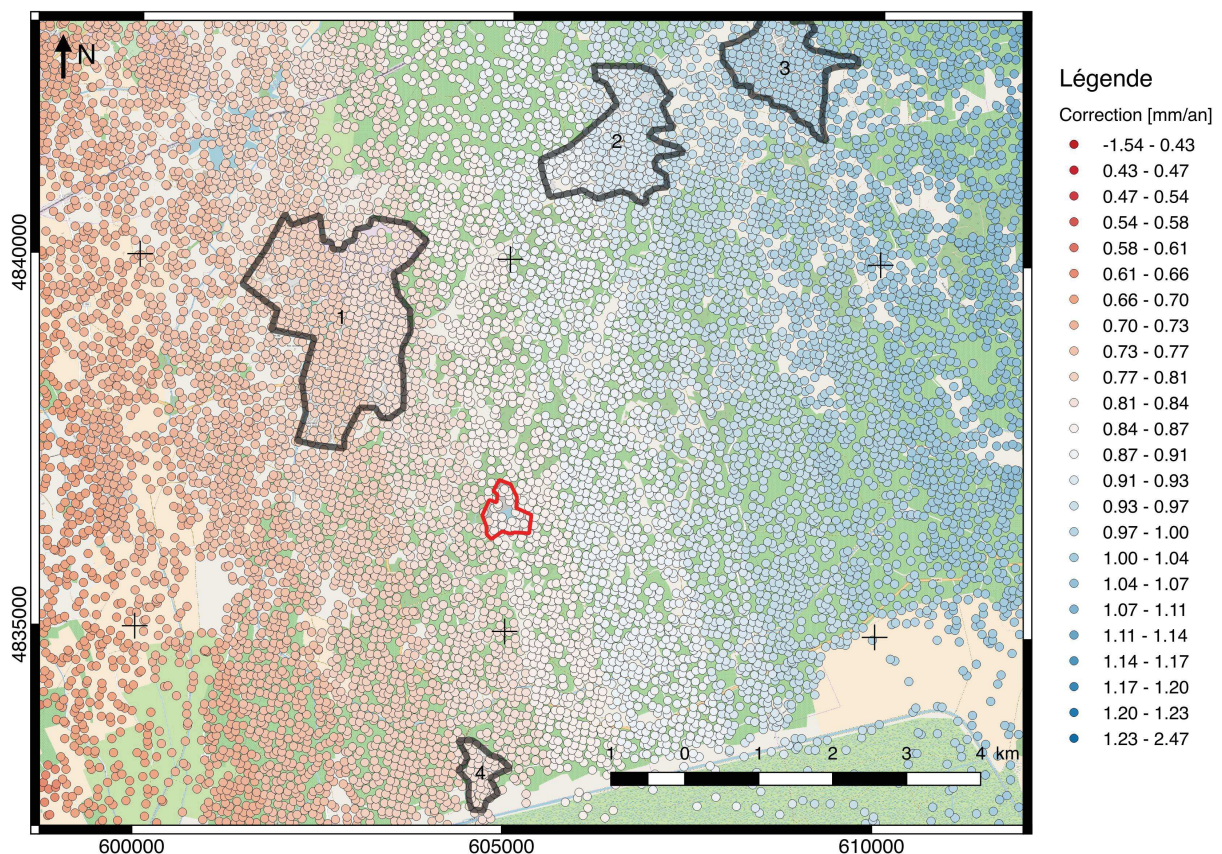


Figure 4-38 : Correction altimétrique issue du GPS sur champ de vitesses InSAR (archive Envisat, géométrie descendante, traitement SBAS-InSAR) à Vauvert par application d'une rampe bilinéaire minimisant les écarts par matrice de covariance. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

Géométrie InSAR	Moyenne de la différence InSAR – GPS avant retrait de la tendance bilinéaire	RMS	Moyenne de la différence InSAR – GPS après retrait de la tendance bilinéaire	RMS
Descendante	-0.58	0.88	0.01	0.36

Tableau 5 : Quantification de l'apport de l'application de la rampe bilinéaire entre le champ de vitesses InSAR (géométrie descendante) et le GPS (mm/an).

La corrélation entre vitesses GPS et vitesses InSAR à proximité des stations GPS est améliorée, telle qu'illustrée en Figure 4-39.

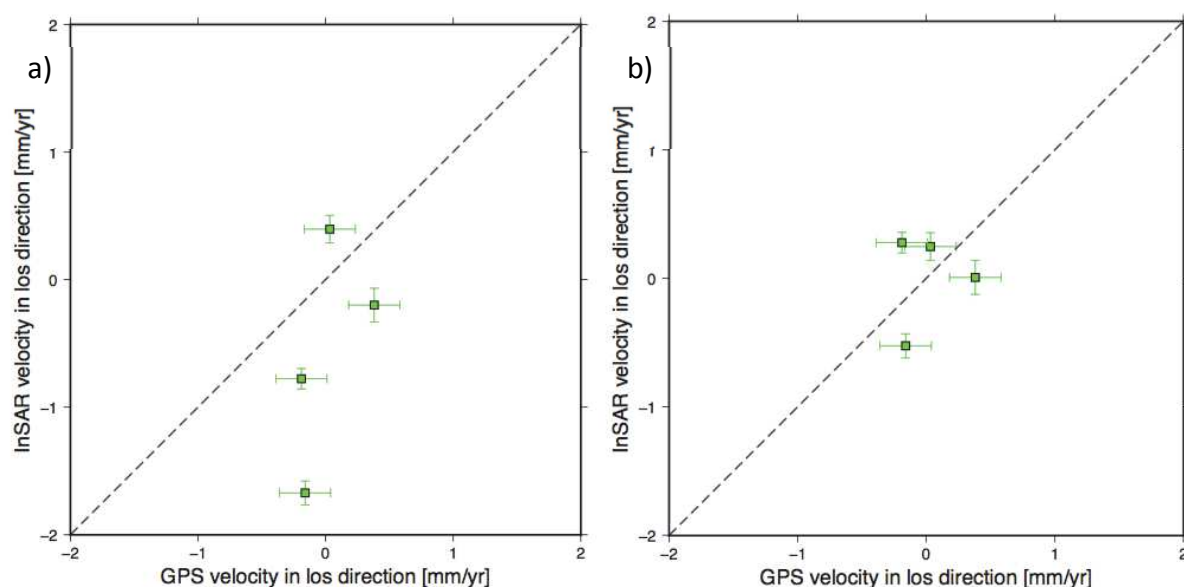


Figure 4-39 : Graphiques de corrélation entre les vitesses GPS et InSAR sur la zone d'étude, avant et après correction altimétrique.

Sur la zone d'étude l'effet d'un tel recalage des vitesses est réel mais faible. En effet, on observe une correction comprise dans l'intervalle $[0.7 ; 1]$ mm/an (Figure 4-38). Le Tableau 5 illustre le résultat de ce calcul d'une tendance bilinéaire sur la zone d'étude. Ainsi la méthode décrite dans cette section permet d'approcher les solutions InSAR aux champs de vitesses GPS. L'objectif de l'harmonisation en vue de la combinaison des références de ces champs de vitesses est ici atteint.

4.3.3 Interpolation du champ de vitesses InSAR

Dans le cadre des données disponibles sur la zone d'étude de Vauvert, pour la période 2002-2009, seules les données InSAR Envisat en géométrie descendante sont disponibles. Il n'est donc pas possible d'appliquer les méthodes de combinaison de ces géométries décrites en chapitre 3. La première étape effectuée est donc l'interpolation du champ de vitesses InSAR en géométrie descendante. L'interpolation des champs de vitesses InSAR (chapitre 3) requiert une étude de variogramme. Le variogramme expérimental et le modèle associé est calculé d'abord selon aucune direction préférentielle (Figure 4-40 et Tableau 6), il est donc dit omnidirectionnel.

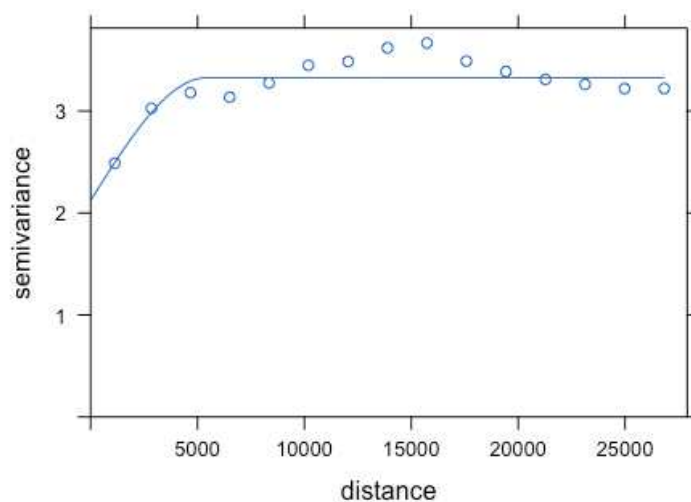


Figure 4-40 : Variogramme omnidirectionnel sur zone totale sur champ de vitesses InSAR et modèle associé. Variance en $(\text{mm/an})^2$ et distance en (m).

Modèle	Sphérique
Ordonnée à l'origine	2.1
Portée	5413

Tableau 6 : Paramètres associés au modèle de variogramme omnidirectionnel sur le champ de vitesses InSAR.

Le modèle de variogramme représentant la forme des variogrammes expérimentaux est une fonction sphérique. Si l'on observe le comportement à l'origine du modèle celui-ci est proche de $2 (\text{mm/an})^2$. Cette valeur correspond au carré de l'erreur de mesure (incertitude de l'InSAR). Le comportement du modèle montre un palier à 5.4 km. La variance se stabilise donc après cette distance, signifiant que les vitesses sont corrélées entre elles sur ~ 5 km.

Ce variogramme est omnidirectionnel, c'est-à-dire qu'il n'est calculé selon aucune direction préférentielle. Cela sous-entend donc que la déformation mesurée à Vauvert est isotrope. Or la géologie locale en surface présente des failles et la structure du sous-sol est affectée de décollements, plis et chevauchements, spatialement orientés (section 4.1.2). Il est donc nécessaire de vérifier l'hypothèse d'isotropie de la déformation de surface en estimant une ou plusieurs possible(s) orientation(s) préférentielle(s) de la déformation. Pour cela, des variogrammes sont calculés selon des directions définies : tous les 45° avec une tolérance de $\pm 22.5^\circ$ définissant la section de recherche des points afin de ne pas réutiliser les mêmes points entre deux variogrammes (Figure 4-41).

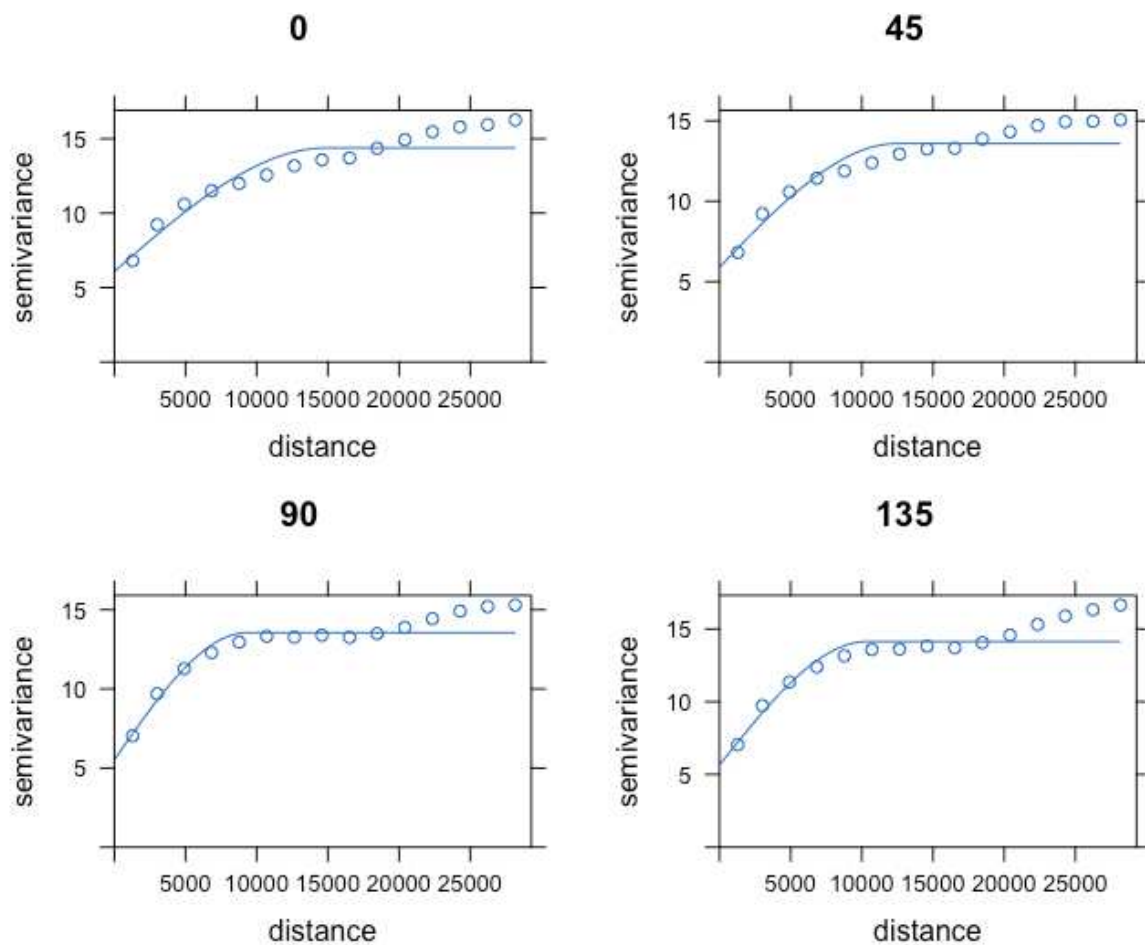


Figure 4-41 : Variogrammes directionnels expérimentaux et modélisés selon un pas de 45° et une tolérance de 22.5° le champ de vitesses InSAR. Variance en $(\text{mm/an})^2$ et distance en (m).

Les résultats de portée en fonction de l'angle sont illustrés en Figure 4-42 ci-après. Ainsi, cela permet de discuter de l'évolution de la valeur de portée estimée en fonction de l'angle du variogramme expérimental directionnel.

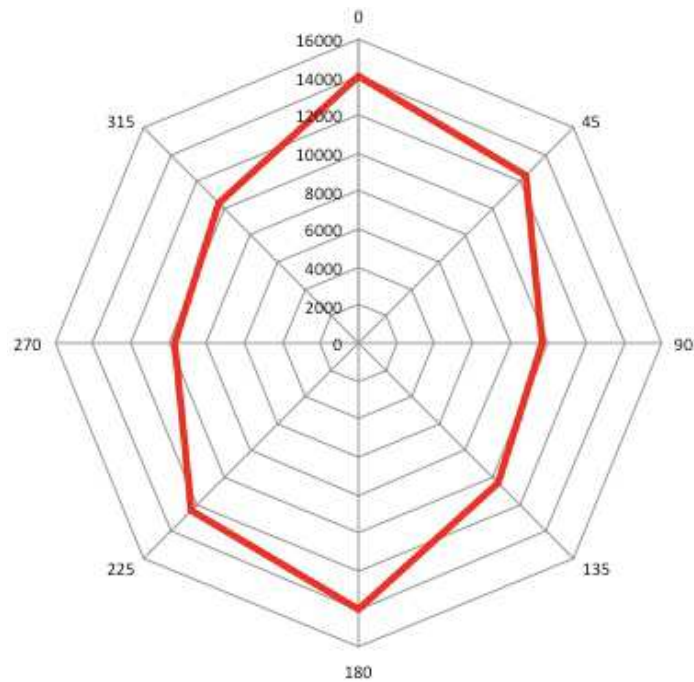


Figure 4-42 : Portée (m) en fonction de l'angle d'anisotropie (degrés) des variogrammes sur champ de vitesses InSAR.

La stationnarité de la variance à l'infini sur les variogrammes directionnels calculés sur l'échantillon restreint à Vauvert rend l'analyse de l'anisotropie possible. Les résultats semblent montrer une faible anisotropie selon une direction d'angle 0° par rapport au Nord. Cette direction d'anisotropie ne semble pas correspondre ni à l'orientation locale des structures géologiques ni à la géométrie des mesures InSAR. Or, la faille de Nîmes est orientée à environ 40° et la faille de Vauvert à environ 45° (Valette et Benedicto, 1995), angles étudié par le variogramme directionnel selon l'orientation 45° +/- 22.5°.

L'analyse des modèles de variogrammes directionnels ne permette pas dans cet exemple de rendre compte d'une anisotropie marquée de la déformation qui résulterait d'une accommodation par la subsidence locale des structures géologique de type failles, dont la présence est citée dans la littérature (par exemple Valette et al., 1995). Il est donc décidé à ce stade d'appliquer le modèle de variogramme sans hypothèse d'anisotropie, *i.e.* omnidirectionnel, présenté en Figure 4-40. Ce modèle est appliqué de telle sorte qu'en chaque point d'une grille d'interpolation au pas de 20 m, les valeurs de minimum 50 points et maximum 100 points les plus proches (à 5.4 km maximum) soient utilisés. Ces paramètres sont choisis dans l'optique d'être (1) cohérent avec la résolution native des champs de vitesses InSAR et (2) un compromis entre haute résolution pour l'analyse spatiale de la déformation et résolution raisonnable pour éviter de trop longues sessions de calculs. De plus la distance maximale de 5.4 km est définie par la valeur du palier (Tableau 6). L'application de ce modèle de variogramme omnidirectionnel permet d'obtenir le champ de vitesses interpolé avec des valeurs de variance de krigeage associées (Figure 4-43).

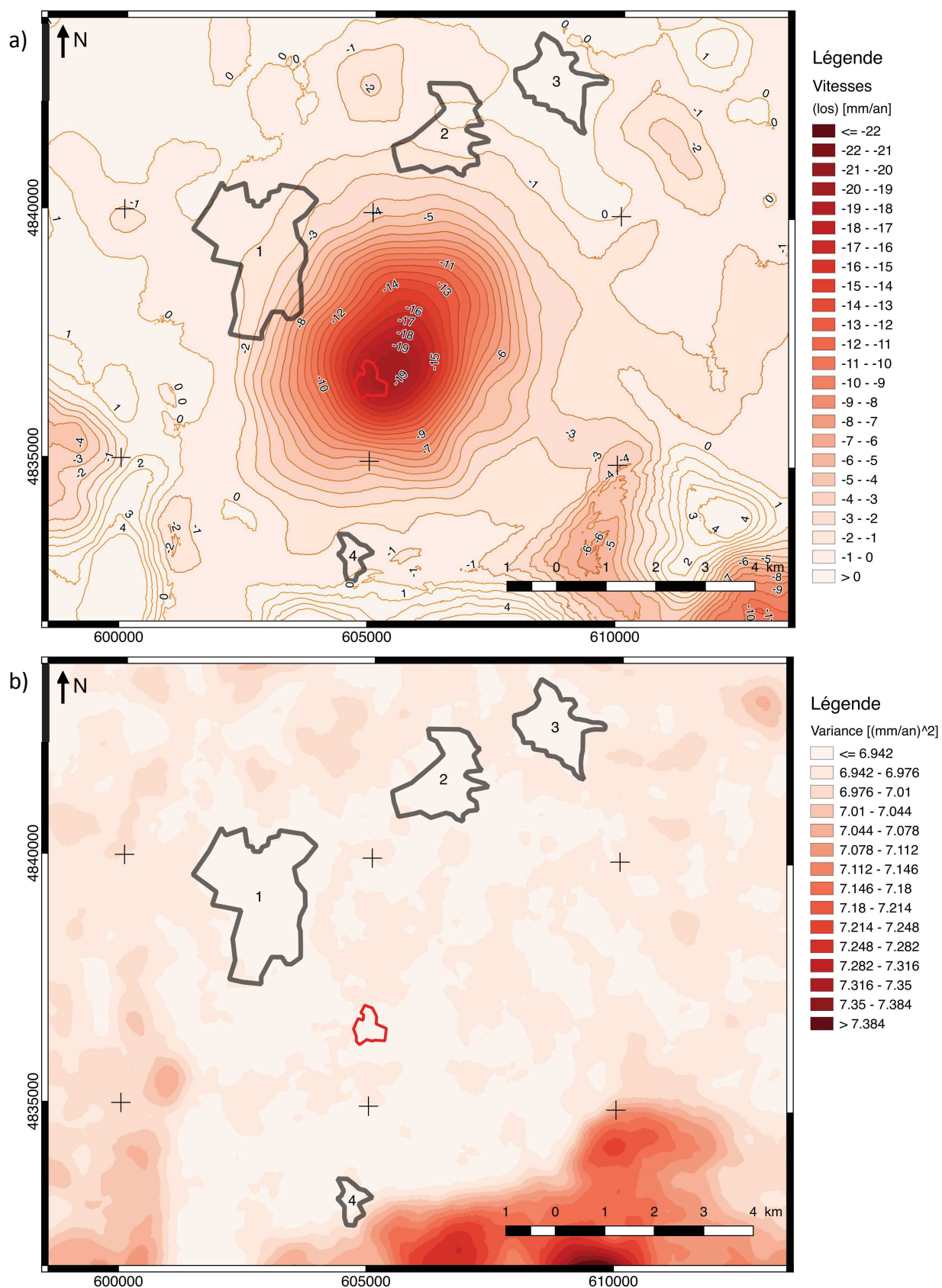


Figure 4-43 : (a) Champ de vitesses InSAR (archive Envisat, géométrie descendante) interpolé et (b) variance associée $((\text{mm/an})^2)$. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

Le bol de subsidence mesuré présente une forme d'ellipse de grand axe orienté Nord-Est/Sud-Ouest d'environ 8 km et petit axe 6 km. Le centre – le maximum de déformation – est mesuré au Nord-Est des infrastructures pour la géométrie descendante avec une valeur maximale de 19 mm/an (dans la direction de la ligne de visée du satellite). Les dimensions du bol de subsidence sont cohérentes avec les résultats des études historiques InSAR (Raucoules et al., 2003, Fugro, 2010). L'amplitude maximale mesurée est légèrement inférieure à ces études historiques. La variance du krigeage est directement liée à la densité de réflecteurs permanents InSAR. Néanmoins la forte densité de réflecteurs rend la spatialisation de la variance homogène.

4.3.4 Pondération des données

4.3.4.1 Nivellement

Des deux cas de figures évoqués dans la section 3.3.3.1 du chapitre 3, Vauvert correspond au premier. En effet les mesures et le calcul de compensation des boucles de nivellement sont effectués par une tierce personne, l'IGN rendant impossible l'étude et l'utilisation des valeurs de pondération utilisées car ces valeurs sont non publiées et non accessibles. Deux choix sont donc possibles. Le premier considère la solution de l'IGN homogène, puisque les erreurs sont compensées sur l'intégralité des points, et donc toutes les valeurs de déplacement sur les points nivelés ont la même incertitude. Par conséquent, des poids identiques doivent être appliqués à tous les points nivelés intégrés dans la solution de combinaison. Le deuxième choix considère que cette compensation est insuffisante : la pondération ne devant pas seulement prendre en compte l'incertitude de la mesure mais aussi la fiabilité des points mesurés, par exemple la stabilité physique de ces points dans le temps. Or les rapports de nivellement mentionnent plusieurs bornes montrant des instabilités au cours du temps. Les origines de ces instabilités peuvent être multiples. Des origines naturelles tout d'abord, avec une détérioration des repères et de leurs supports par les intempéries notamment. L'origine peut aussi être humaine, avec une détérioration, voire une destruction des repères, volontaire ou non, par exemple lors d'activités agricoles.

Les vitesses sur ces bornes sont donc pondérées de telle sorte que leurs mouvements affectent moins la solution de combinaison. En effet leurs mouvements sont soupçonnés être dus en partie à une instabilité de la borne elle-même, et non de la surface alentour. Un ratio de 1:2 est appliqué : les bornes instables (selon les rapports annuels de nivellement de l'IGN) ont moitié moins d'effet sur la solution finale que les bornes stables.

4.3.4.2 InSAR

À ce stade de la méthodologie, le champ de vitesses InSAR sur archive Envisat a été interpolé par krigeage ordinaire (section 4.3.3). Sur ce résultat il est possible de prendre en

considération les incertitudes associées aux vitesses et les erreurs (variance) liées à l'interpolation. Est donc appliquée la méthode de calcul d'une grille d'indices de pondération P_{insar} telle que décrite en section 3.3.3.2. À partir des grilles (1) de variance issues du krigeage ordinaire sur champ de vitesses InSAR, et (2) de la grille d'incertitudes de ce même champ de vitesses, l'indice P_{insar} est calculé (Figure 4-44).

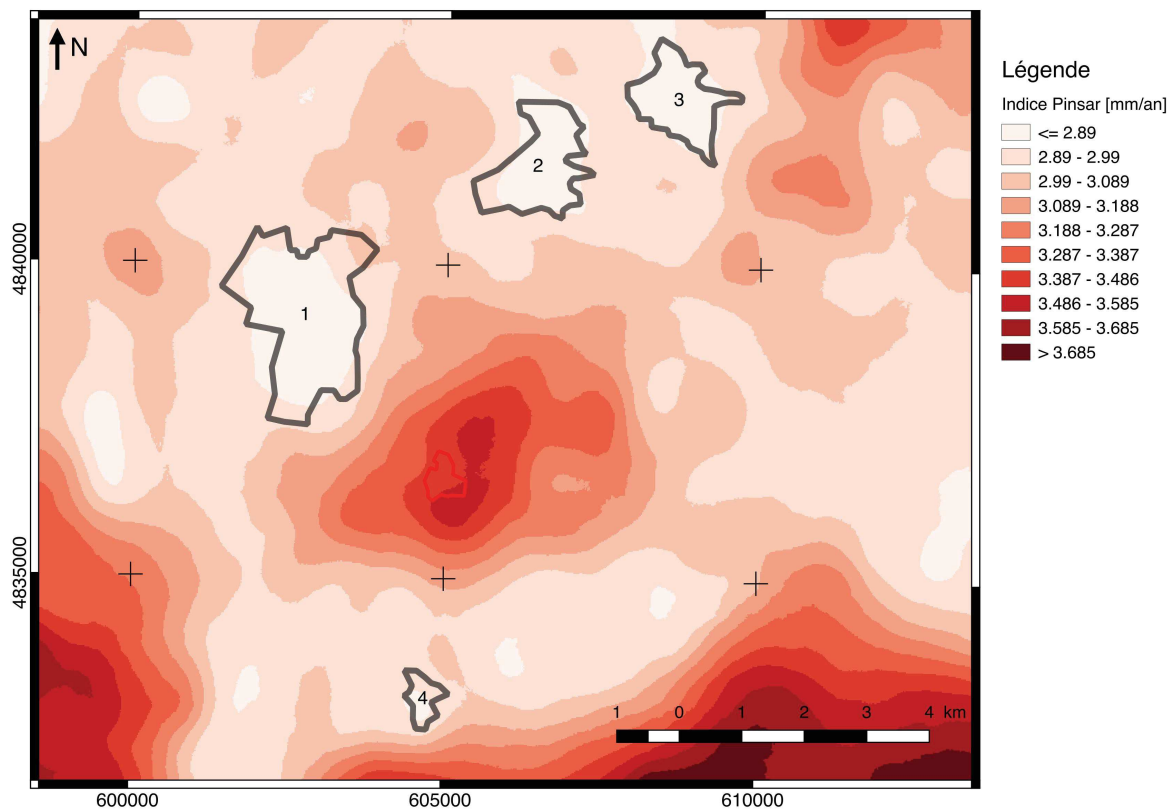


Figure 4-44 : Indice de pondération P_{insar} sur données InSAR (archive Envisat, géométrie descendante) à Vauvert. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

On observe les effets combinés de (1) la densité de réflecteurs et de (2) l'incertitude des vitesses. Le premier point correspond à l'augmentation de la variance du krigeage lorsque la densité de réflecteurs s'affaiblit. L'exemple le plus important se situe au Sud-Est de la zone d'étude, sur les étangs, où aucun réflecteur permanent n'est présent, l'indice y montre les valeurs les plus élevées (> 3.5 mm/an). Au contraire, sur les zones urbaines présentant les densités maximales de réflecteurs permanents, l'indice y est minimal (< 2.8 mm/an). Le champ de vitesses et les valeurs de pondération sont dorénavant prêts à être intégrés à la solution de combinaison.

4.3.5 Champ de vitesses combinées par krigeage-régression pondéré

4.3.5.1 Calcul

Le développement de la méthodologie de combinaison sur le site de Vauvert pour la période 2002-2009 implique des mesures InSAR (section 4.2.2) selon une unique géométrie de mesure (descendante) et nivellement (section 4.1.4.1). C'est donc la variante 2, décrite en section 3.3.4.3, qui est retenue. Cette variante permet en effet de combiner champs de vitesses InSAR et nivellement selon la ligne de visée du satellite imageur.

De manière pratique, les étapes décrites en chapitre 3 et particulièrement en section 3.3.4.2 sont suivies. La première étape consiste en un échantillonnage de la donnée la plus dense et la mieux répartie spatialement, ici l'InSAR, sur la donnée auxiliaire, le nivellement. Ensuite une régression linéaire est appliquée, entre l'InSAR d'une part et le nivellement d'autre part. La prédiction est présentée en Figure 4-45. On retrouve la forme du bol de subsidence mesuré en InSAR, avec des valeurs maximales proches de la subsidence maximale mesurée sur la période en nivellement : 2.2 cm/an. Une analyse statistique de la régression et des résidus est illustrée ci-après (Figure 4-46).

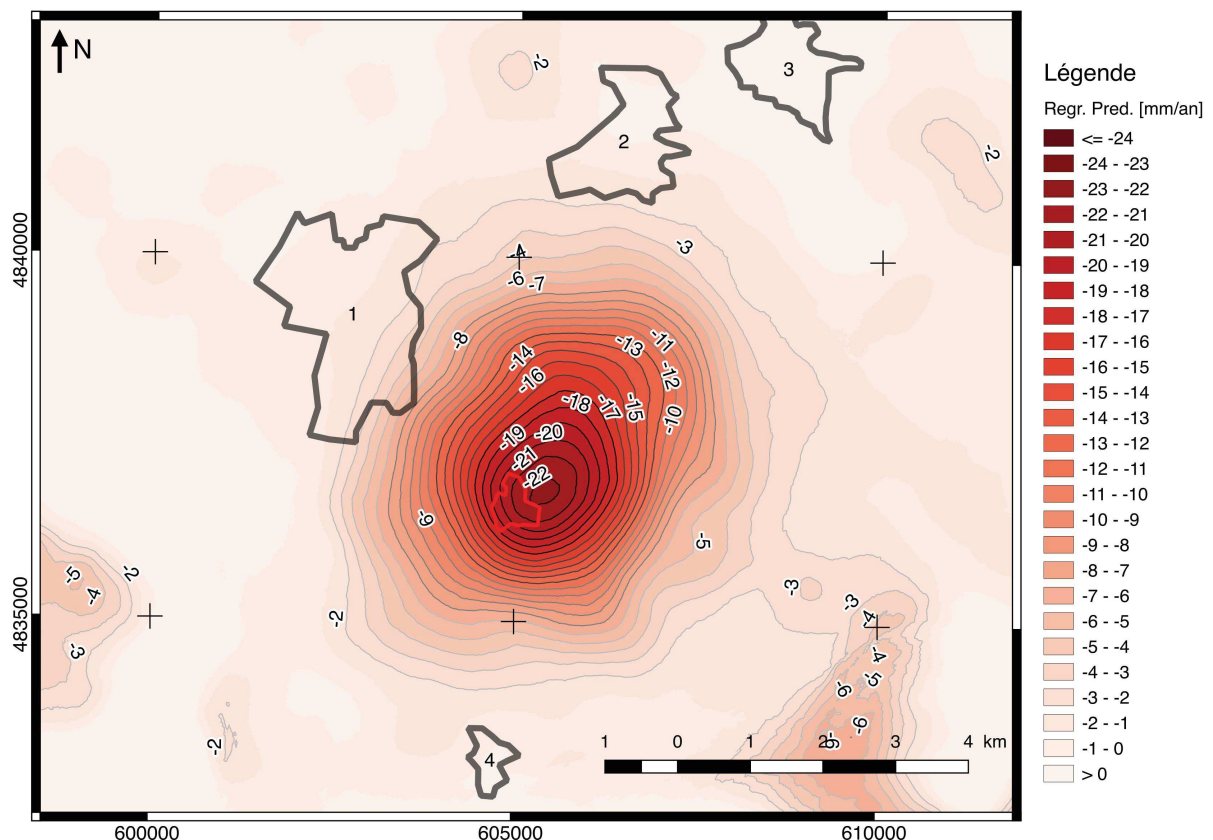


Figure 4-45 : Carte de prédiction de la régression. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

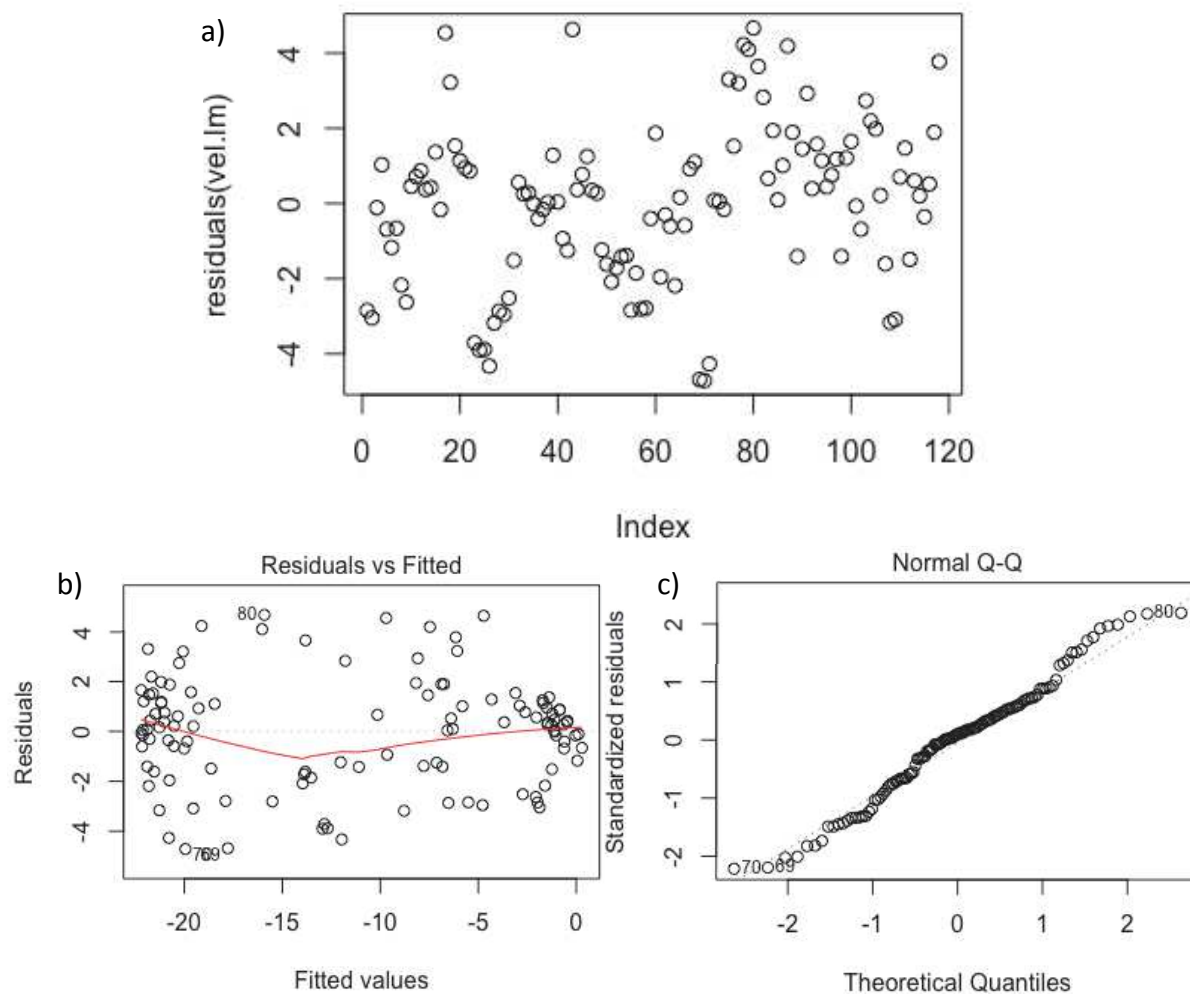


Figure 4-46 : Graphiques (a) de valeurs des résidus de la régression au droit des points nivelés, (b) et (c) de description statistique des résultats de la régression linéaire entre l'InSAR et le nivellement, sur le site de Vauvert.

Ces graphiques permettent l'analyse des résultats de la régression linéaire et donc, par extension, la modification éventuelle des paramètres qui la caractérisent, ainsi que la détection de valeurs aberrantes devant être écartées du calcul ou de nouveau pondérées afin d'inhiber leur effet dans l'interpolation des résidus de l'étape suivante.

Le graphique (b) de la Figure 4-46 nommé « Residuals vs Fitted » montre l'écart entre les observations et le modèle. L'hypothèse de base de la régression linéaire par moindres carrés est que les résidus ne peuvent être décrits par une fonction mathématique et que leur distribution est identique, partout. C'est le cas ici, où l'on n'observe pas un comportement spécifique des résidus autour de la valeur nulle. Aucune valeur ne montre un comportement différent. Dans le cas contraire où des points isolés sortiraient de la loi linéaire, ces points seraient à étudier (par exemple stabilité, incertitude) afin de décider quant à leur utilisation dans la combinaison. Ceci correspond à l'étape nommée « outlier detection » dans la Figure 3-15 de la section 3.3.4.2 du chapitre 3. De plus, si une loi mathématiquement pouvait décrire les données de ce graphique (fonction cyclique par exemple), ce comportement

serait nommé hétéroscédasticité, montrant des variances sur les résidus différentes entre les variables. Ce mot est l'opposé de l'homoscédasticité qui lui est utilisé dans le cas où la variance sur les résidus est identique et centrée sur une valeur nulle (c'est le cas ici). Le graphique nommé Q-Q (Quantiles) présente une forme classique. Les valeurs résiduelles suivent une loi linéaire, aucune valeur plus élevée ne sort de cette loi, ce qui marquerait – comme pour le graphique précédent – un comportement anormal des stations.

La deuxième étape consiste en l'interpolation des résidus de la prédiction. Le variogramme sur le résidu de la régression entre le nivellement et l'InSAR est calculé afin de permettre l'interpolation par krigeage, tel que décrit en section 3.3.2.2.3. Le variogramme est illustré ci-après.

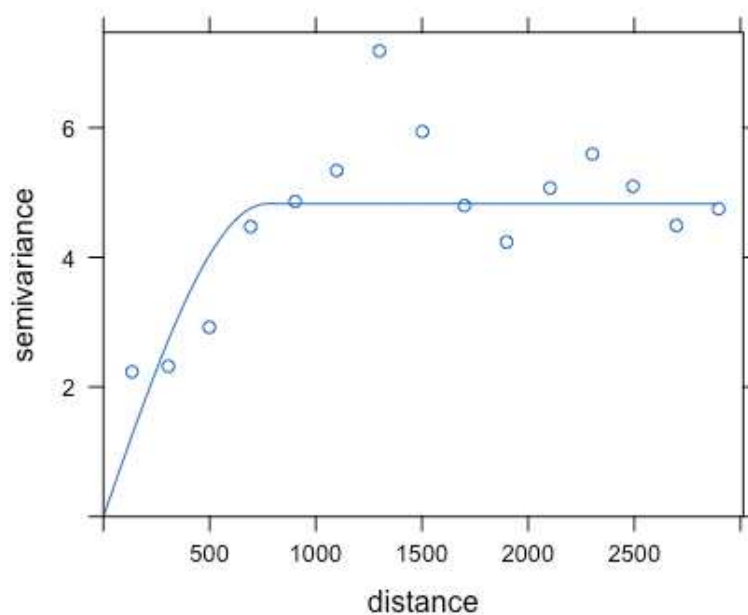


Figure 4-47 : Variogramme expérimental et modèle sphérique associé, calculés sur les résidus de la régression linéaire.

Le modèle de variogramme est une fonction sphérique de faible portée. Cette dernière caractéristique est liée à la faible corrélation spatiale entre les résidus de la régression. Après la détermination des paramètres du modèle de variogramme, le krigeage est effectué sur ces mêmes résidus. Les résultats sont illustrés en Figure 4-48. Le résultat est un modèle de vitesses de faibles magnitudes, puisque comprises dans l'intervalle $[-4 ; 4]$ mm/an.

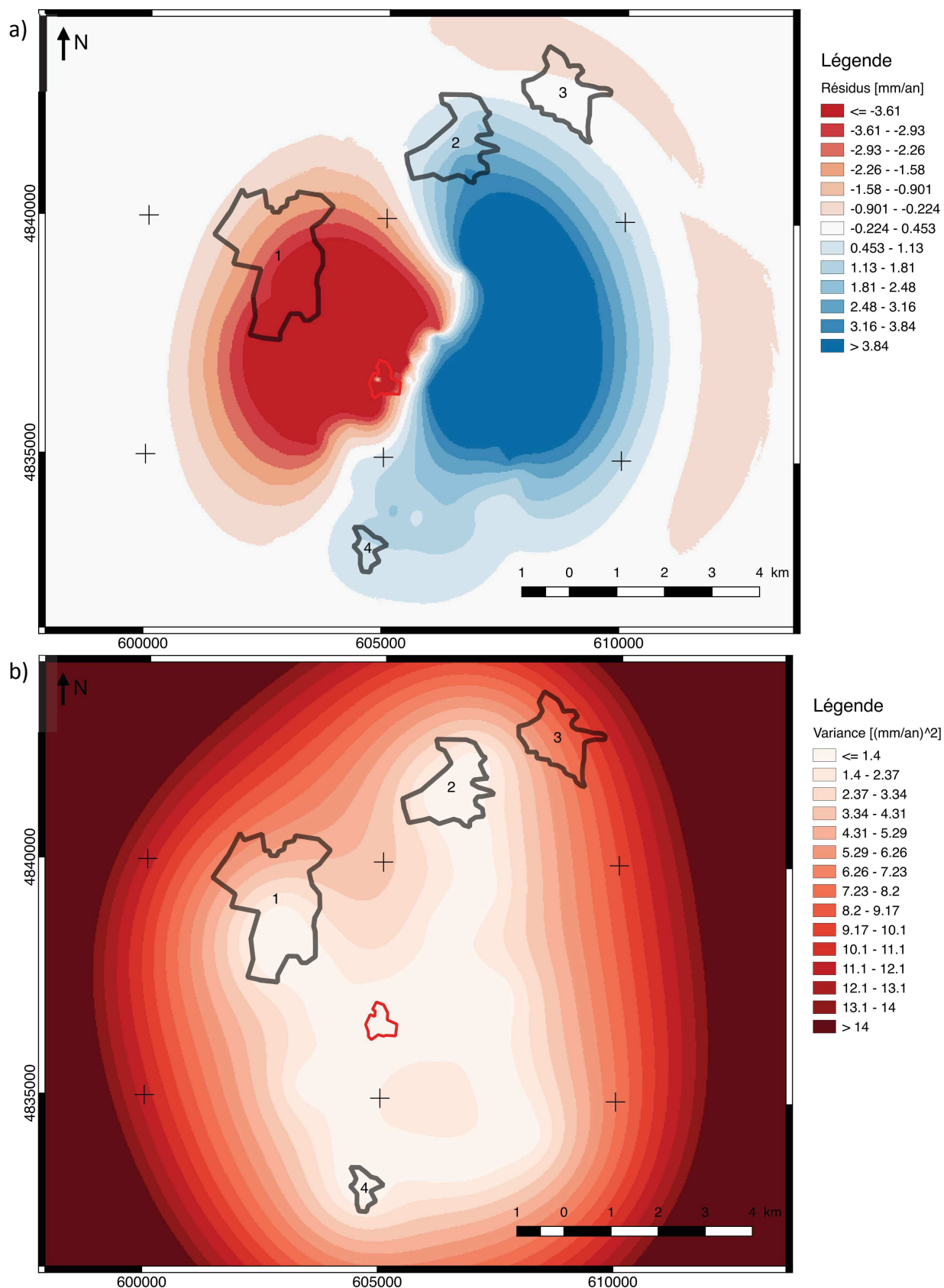


Figure 4-48 : Résultat du krigage des résidus (a) et variance associée (b). Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

La régression amène le champ de vitesse InSAR au plus proche des vitesses mesurées par le nivellement. Mais un résidu subsiste (celui-là même illustré en Figure 4-48), que l'on peut diviser en deux éléments. Le premier élément observé est une alternance entre une zone de vitesses positives à l'Est et négatives à l'Ouest. Cette part du résidu est liée à l'effet géométrique de l'effondrement du bol. En effet, tel que montré par les mesures GPS (section 4.1.4.4 et 4.2.1), une forte composante planimétrique est mesurée (centimétrique) vers le centre du bol de subsidence. Le nivellement est aveugle vis-à-vis de cette composante. Sa projection selon la ligne de visée du satellite est donc exempte de l'effet de cette composante. Au contraire, les vitesses InSAR sont mesurées selon une ligne oblique. Sont donc mesurées des proportions inégales des trois composantes spatiales de la déformation (Chapitre 3). La régression, de nature linéaire, ne corrige pas ces vitesses affectant l'InSAR, issues de l'effondrement, de forme complexe et de faible amplitude. Les résidus sont donc principalement révélateurs de la composante planimétrique issue de l'effondrement du bol, affectant les mesures InSAR. Le produit final de la combinaison est donc un modèle de vitesses verticales mesurées selon la ligne de visée du satellite. Ensuite un deuxième élément est visible. Des petites hétérogénéités spatiales de la déformation sont visibles et sont à l'origine du rapprochement de courbes de niveau le long des profils de nivellement.

Enfin, la variance du krigage des résidus est très faible ($< 1 \text{ (mm/an)}^2$) à l'approche des points nivelés et atteint des valeurs importantes ($> 1 \text{ (cm/an)}^2$) en s'éloignant de ces points.

4.3.5.2 *Modèle de vitesses combinées*

Le modèle de vitesses final est issu de la combinaison du résultat de la régression (Figure 4-45) et du résultat de l'interpolation des résidus de la régression (Figure 4-48 (a)), selon la technique décrite en section 3.3.4.2 du chapitre 3. Le résultat est illustré en Figure 4-49 ci-après.

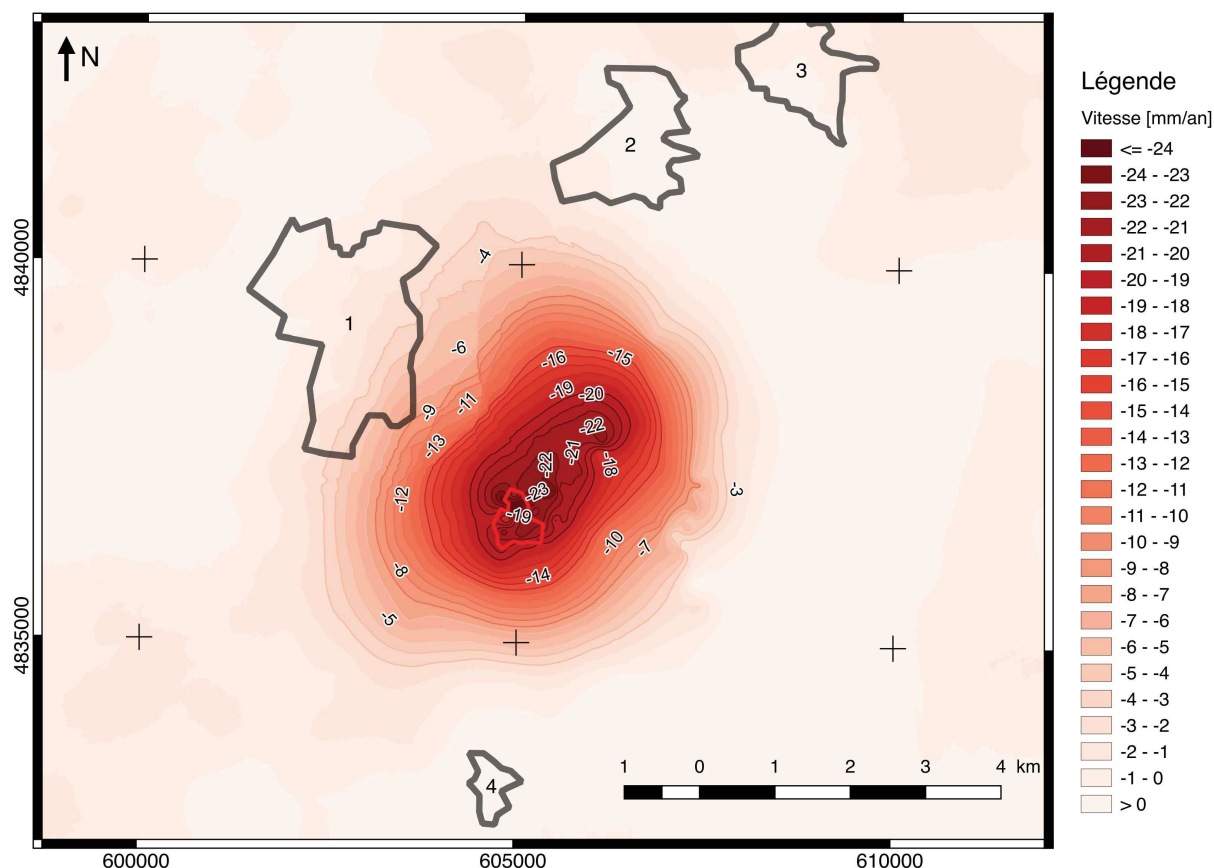


Figure 4-49 : Modèle de vitesse issu du krigeage-régression pondéré sur données InSAR et nivellement à Vauvert. Les valeurs sont données dans la ligne de visée du satellite Envisat en géométrie descendante. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

La méthodologie de combinaison permet donc d'obtenir un champ de vitesses selon la ligne de visée du satellite imageur SAR tout en retirant l'effet de la mesure des composantes Nord-Sud et Est-Ouest. Ce champ de vitesse atteint la magnitude maximale de 2.4 cm/an au Nord de la zone contenant les infrastructures principales de la saline de Vauvert. Le bol de subsidence forme une ellipse de grand axe d'environ 7.1 km de long dans la direction Nord-Est/Sud-Ouest et de petit axe perpendiculaire d'environ 6 km. Les villes de Beauvoisin, Générac et Gallician ne sont pas affectées par cette subsidence. Au contraire, les quartiers Sud-Est de la zone urbaine de Vauvert sont affectés par une subsidence comprise dans l'intervalle [0, -7] mm/an. La distance minimale entre ces valeurs maximales étant d'environ 1.7 km, aucun effet visible à l'œil nu n'est attendu.

4.3.5.3 Indice de fiabilité du champ de vitesses combinées

Est ensuite calculé l'indice de fiabilité P_{combi} de la solution, tel que décrit en section 3.3.4.4, en chaque point de la grille, prenant en considération les incertitudes de chaque

technique et l'incertitude associée à l'interpolation. Cet indice de fiabilité est illustré en Figure 4-50 ci-après.

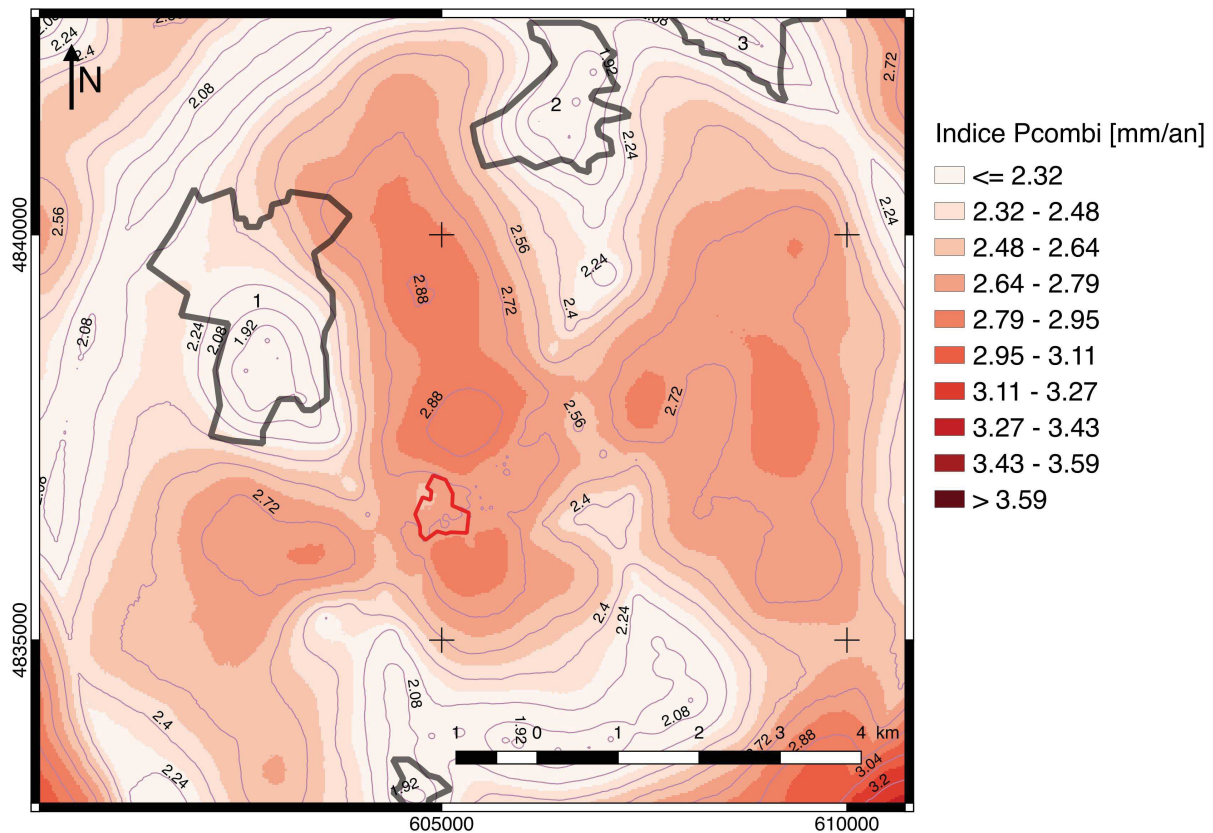


Figure 4-50 : Indice de fiabilité P_{combi} issu de l'application de la méthodologie de combinaison à Vauvert sur données InSAR Envisat (géométrie descendante) et nivellement. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

On observe sur cet indice P_{combi} la trame principale des mesures de nivellement. En effet, tel que décrit en section précédente et notamment sur la Figure 4-48 (b), l'incertitude liée à la technique du krigeage-régression pondérée est principalement liée à la spatialisation de la donnée de prédiction, ici le nivellement. On retrouve donc cet élément ici. En dehors de cette trame l'indice de fiabilité varie dans l'intervalle [2.3 ; 3.2] mm/an.

L'application de la méthodologie de combinaison sur la période 2002-2009 a permis de combiner des données de nivellement et InSAR. Ces données ont été combinées selon un axe oblique à la verticale correspondant à la ligne de visée du satellite Envisat en géométrie descendante. Le modèle final représente des vitesses liées au mouvement vertical seul de la subsidence. Il est maintenant possible de s'intéresser à une nouvelle période, 2015-2017, permettant l'application d'une autre variante de la méthode de combinaison.

4.4 Application de la méthodologie de combinaison à Vauvert : période 2015-2017

La première application de la méthodologie de combinaison sur la période 2002-2009 a permis de combiner les résultats des traitements InSAR sur archive Envisat et nivellement. Une deuxième application est effectuée, utilisant des données issues des résultats des traitements InSAR sur archive Sentinel-1a/b, GNSS permanent, et nivellement sur la période 2015-2017.

4.4.1 Données

Tel que décrit en section 4.2.3, les données inSAR utilisées sont issues de deux géométries de mesures différentes : ascendante et descendante. Ces données ont été indépendamment traitées par application d'un algorithme PS-InSAR menant à deux champs de vitesses selon les lignes de visées respectives.

Le nivellement, de manière identique à l'application précédente, comprend l'ensemble des stations mesurées annuellement sur la période 2015-2017 (section 4.1.4.1). Les stations ayant été construites et/ou détruites au cours de cette période ont été retirées.

Les données GPS incluent des vitesses dans les trois dimensions de l'espace pour les quatre stations nommées VAUV, VAU1, VAU2 et VAU3 (section 4.2.1).

La combinaison peut donc suivre la variante 1 illustrée en section 3.3.4.3 du chapitre 3).

4.4.2 Mise en référence

4.4.2.1 Mise en référence planimétrique des champs de vitesses

Un contrôle du positionnement spatial des réflecteurs permanents est effectué par application de la technique décrite en section 4.3.2.1 de mise en référence planimétrique des champs de vitesses InSAR, sur les résultats PS-InSAR sur archives Sentinel-1a/b en géométries ascendante et descendante (section 4.2.2.3).

La Figure 4-51 est une illustration du décalage planimétrique entre les structures identifiées (ici routes et voie ferrée) et les champs de vitesses PS-InSAR correspondants, sur une zone voisine de Vauvert. Un maximum de points de décalages entre réflecteurs permanents et les objets identifiés sur la carte géoréférencée sont mesurés dans les deux directions planimétriques. Une transformation à deux paramètres (translations Nord-Sud et Est-Ouest) est donc appliquée. Les valeurs de décalages sont moyennées et une déviation standard sur ces mesures est calculée. Les décalages planimétriques (illustrée en Figure 4-51) sont les suivants :

- Une translation moyenne de 37 m $\pm$ 5 m suivant la composante Nord-Sud et 98 m $\pm$ 8 m suivant la composante Est-Ouest sur le champs de vitesses PS-InSAR en géométrie ascendante (112 points mesurés pour cette estimation).
- Une translation moyenne de 13 m $\pm$ 4 m suivant la composante Nord-Sud et 40 m $\pm$ 6 m suivant la composante Est-Ouest sur le champs de vitesses PS-InSAR en géométrie descendante (130 points mesurés pour cette estimation). Les valeurs d'incertitudes reflètent la difficulté opérationnelle à relier précisément les PS aux objets correspondants.

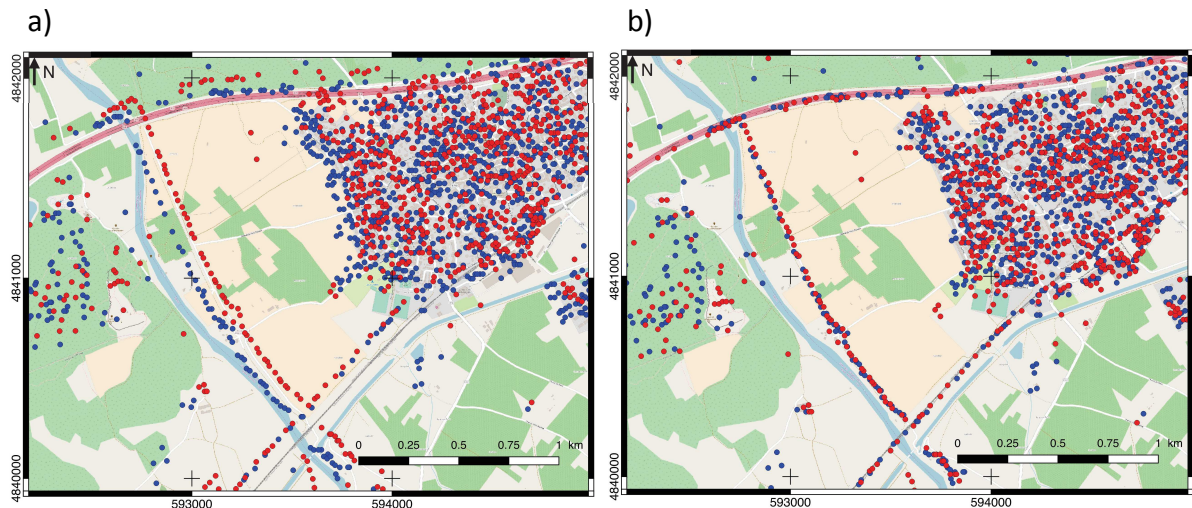


Figure 4-51 : Illustrations cartographiques du décalage planimétrique mesuré sur la zone d'étude. (a) Position des réflecteurs permanents issus des champs de vitesses PS-InSAR sur archives Sentinel-1a/b en géométries ascendantes (bleu) et descendante (rouge) avant correction et (b) après correction.

Certaines valeurs paraissent élevées au regard de la précision attendue du géoréférencement planimétrique. Le modèle numérique de terrain utilisé étant le SRTM3 au pas de 90 m, la valeur de décalage de 98 m $\pm$ 8 m paraît donc forte. L'origine la plus plausible d'un tel décalage, légèrement supérieur à la résolution du MNT est la méthode de détermination elle-même : la zone d'intérêt étudiée contient peu de reliefs forts à même de corrélérer précisément la phase topographique vue en géométrie radar calculée par SNAP et le MNT SRTM3. De plus, les très faibles distances entre les positions des satellites entre deux prises de vue SAR (quelques dizaines de mètres maximum pour Sentinel) diminuent l'effet stéréoscopique nécessaire au calcul de cette phase topographique. Cela mène à l'imprécision élevée mesurée.

Ces valeurs sont appliquées aux champs de vitesses InSAR et incertitudes associées. Le positionnement planimétrique des données géodésiques est ainsi considéré cohérent. La combinaison de ces données ne sera pas affectée par de possibles décalages dans le positionnement des points de mesures. En conséquence la mise en référence altimétrique est maintenant appliquée et discutée.

4.4.2.2 Harmonisation des références altimétriques des champs de vitesses

Les données radar satellitaire Sentinel-1a/b sont traitées par la technique PS-InSAR (algorithme StaMPS) et référencées de manière relative dans le temps (une image en référence) et l'espace (un point de l'espace en référence). Les satellites imageurs Sentinel-1a/b sont référencés par GPS dans l'ITRF 2008. Les résultats InSAR sont donc géométriquement cohérents et compatibles avec les résultats GPS.

Concernant la référence des vitesses, sur le site d'étude à Vauvert, les traitements PS-InSAR ont été effectués relativement à un point au Sud de Vauvert (RN10, Gallician), choisi car considéré stable. Ensuite une correction (retrait d'une tendance bilinéaire) en tout point identique à celle décrite en section 4.3.2.2 est appliquée. Le résultat sur la zone étudiée est illustré en Figure 4-52.

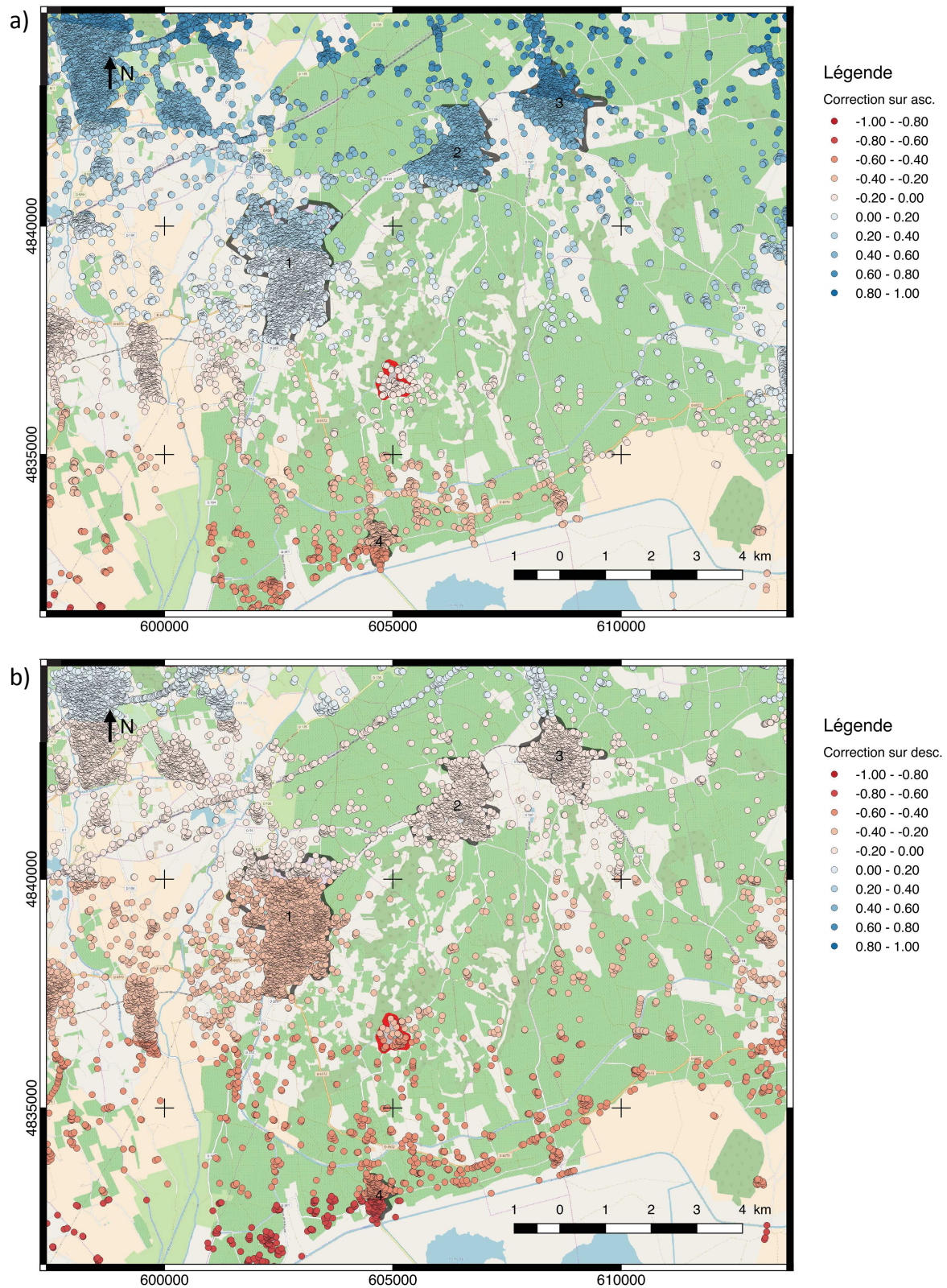


Figure 4-52 : Correction altimétrique issue du GPS sur les champs de vitesses InSAR ascendant (a) et descendant (b) à Vauvert par application d'une rampe bilinéaire minimisant les écarts par matrice de covariance. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

Géométrie InSAR	Moyenne de la différence InSAR – GPS avant retrait de la tendance bilinéaire	RMS	Moyenne de la différence InSAR – GPS après retrait de la tendance bilinéaire	RMS
Ascendante	-0.49	1.89	-0.06	1.46
Descendante	-0.20	0.66	0.01	0.11

Tableau 7 : Quantification de l'apport de l'application de la rampe bilinéaire entre les champs de vitesse PS-InSAR (géométries ascendante et descendante) et le GPS (mm/an).

La corrélation entre vitesses GPS et vitesses InSAR à proximité des stations GPS est améliorée, telle qu'illustrée en Figure 4-53.

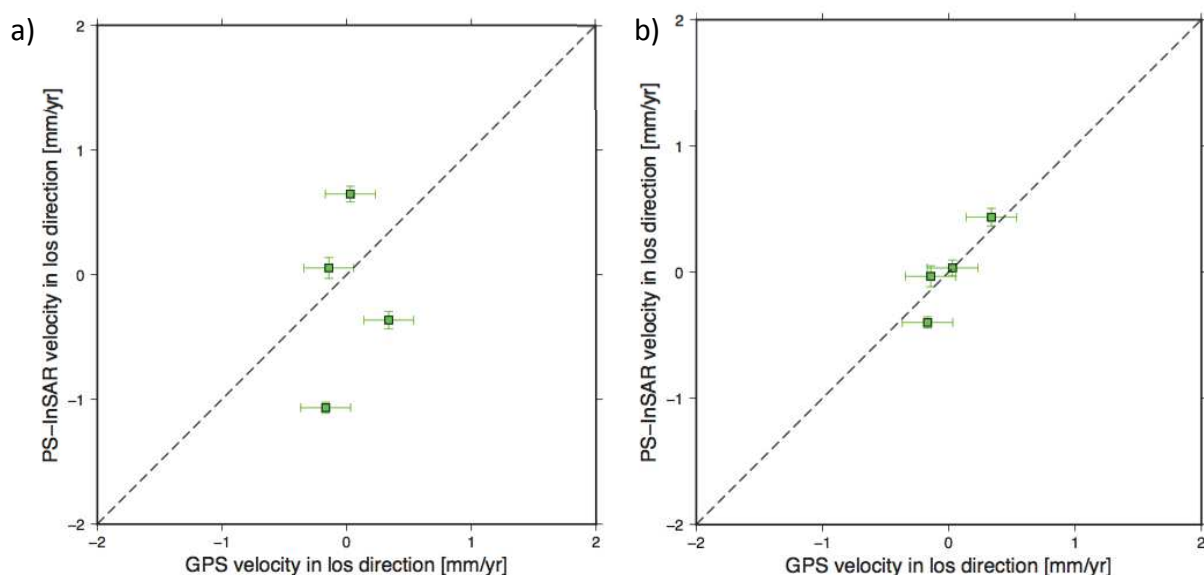


Figure 4-53 : Graphiques de corrélation entre les vitesses GPS et InSAR (géométrie descendante) sur la zone d'étude, avant et après correction altimétrique.

Sur la zone d'étude l'effet d'un tel recalage des vitesses est mineur. En effet, on observe une correction comprise dans l'intervalle $[-0.5 ; 0.5]$ mm/an en géométrie ascendante et $[-0.6 ; 0]$ mm/an en géométrie descendante. (Figure 4-52). Le Tableau 7 illustre le résultat de ce calcul d'une tendance bilinéaire sur la zone d'étude. Ainsi la méthode décrite dans cette section permet d'approcher les solutions InSAR aux champs de vitesses GPS, afin d'harmoniser ces champs de vitesses en vue de la combinaison.

Il est néanmoins plus difficile de juger une éventuelle différence de vitesse entre les références du nivellement et du GPS. En effet, le nivellement est restreint à la zone de subsidence de Vauvert avec pour référence un repère de nivellement dont on ne connaît pas la stabilité au cours du temps. De plus les stations GPS utilisées MTPL, BAUB, SGIL et NIME

ne sont pas mesurées régulièrement par nivellement. On ne peut donc pas effectuer la méthode de correction altimétrique décrite ci-avant, sur ces données. Il n'est de plus pas possible de vérifier la stabilité du repère de nivellement RN10.

4.4.3 Combinaison des champs de vitesses InSAR en double géométrie

4.4.3.1 Interpolation des champs de vitesses InSAR

L'interpolation des champs de vitesses InSAR requiert une étude de la variance en fonction de la distance entre les points mesurés à travers une analyse de variogrammes. Des variogrammes expérimentaux et les modèles associés sont calculés et présentés sur la Figure 4-54 et le Tableau 8 ci-après.

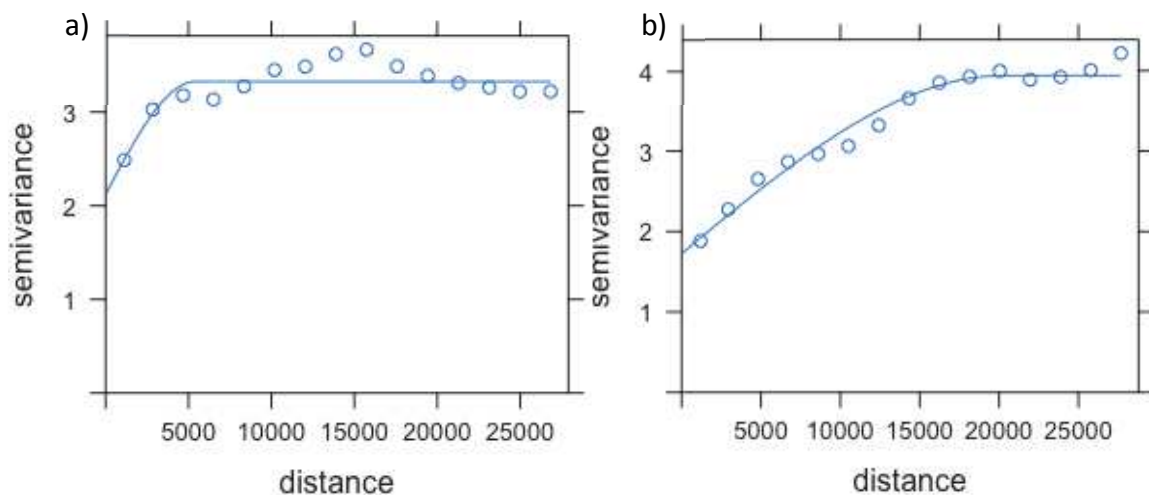


Figure 4-54 : (a) Variogramme omnidirectionnel sur zone totale sur champ de vitesses InSAR en géométrie ascendante et modèle associé. Variance en $(\text{mm/an})^2$ et distance en (m). (b) Idem que (a) mais pour une géométrie descendante.

	Ascendant	Descendant
Modèle	Sphérique	Sphérique
Ordonnée à l'origine	2.1	1.7
Portée	5413	20248

Tableau 8 : Paramètres associés aux modèles de variogrammes omnidirectionnels sur zone totale sur champ de vitesses InSAR en géométries ascendante et descendante.

Pour les deux géométries, le modèle de variogramme représentant la forme des variogrammes expérimentaux est une fonction sphérique, dans les deux cas. Si l'on compare

les comportements à l'origine (effet de pépité) sur les deux géométries on remarque que les valeurs sont très proches de 2 (mm/an)^2 . La similitude entre cette valeur pour les deux géométries était attendue. En effet, les deux géométries mesurent selon deux vues différentes la même déformation, selon des caractéristiques (bruit sur le signal) similaires. Le comportement de la variance selon la distance et son ordonnée à l'origine sont donc comparables. Seuls les comportements à l'infini marquent une différence, puisque le palier est atteint à 5.4 km ($3,3 \text{ (mm/an)}^2$) en géométrie ascendante (Figure 4-54 (a)) contre plus de 20 km ($3,9 \text{ (mm/an)}^2$) en géométrie descendante (Figure 4-54 (b)).

Ces variogrammes sont omnidirectionnels. Il est nécessaire de vérifier l'hypothèse d'isotropie de la déformation de surface en estimant une ou plusieurs possible(s) orientation(s) préférentielle(s) de la déformation. Ainsi, de manière identique à l'application sur la période 2002-2009 (section 4.3.3), des variogrammes sont calculés selon des directions définies : tous les 45° avec une tolérance de $\pm 22.5^\circ$ définissant la section de recherche des points afin de ne pas réutiliser les mêmes points entre deux variogrammes. Ces variogrammes sont calculés sur les champs de vitesses ascendant et descendant de (1) la totalité des points (Figure 4-55 et Figure 4-56) et (2) sur un échantillon restreint à la zone de déformation et aux failles proches alentours (Figure 4-57 et Figure 4-58).

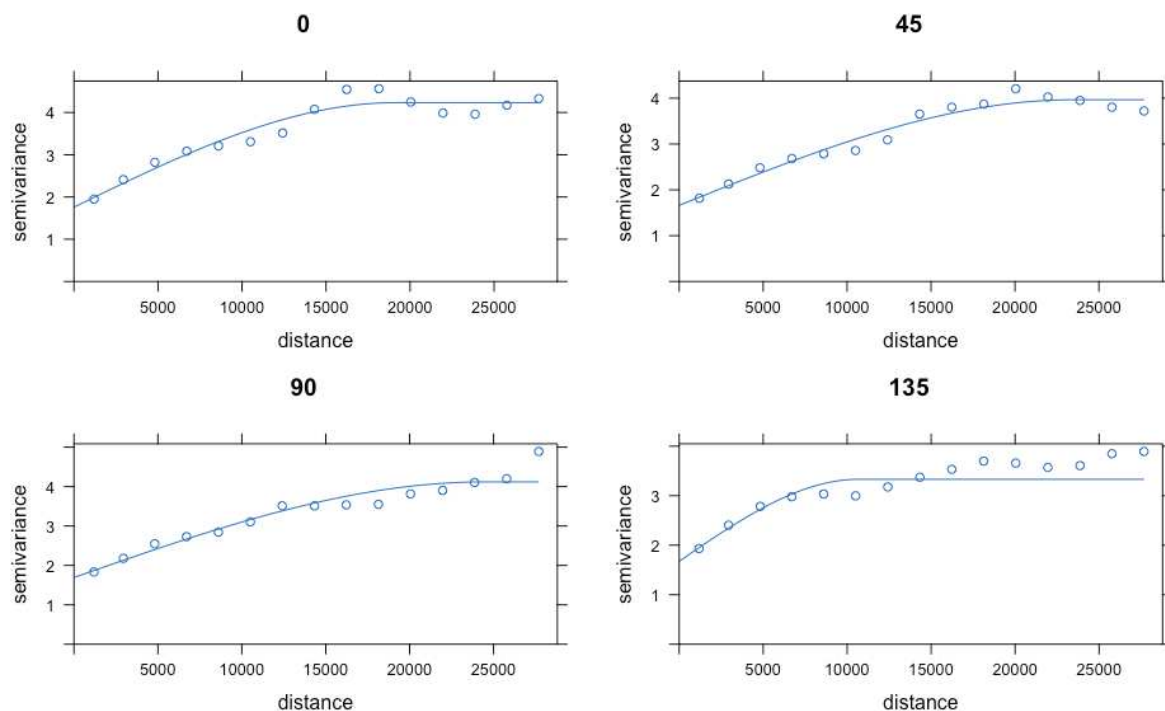


Figure 4-55 : Variogrammes directionnels expérimentaux et modélisés selon un pas de 45° et une tolérance de 22.5° sur l'échantillon total du champ de vitesses InSAR en géométrie ascendante. Variance en $(\text{mm/an})^2$ et distance en (m).

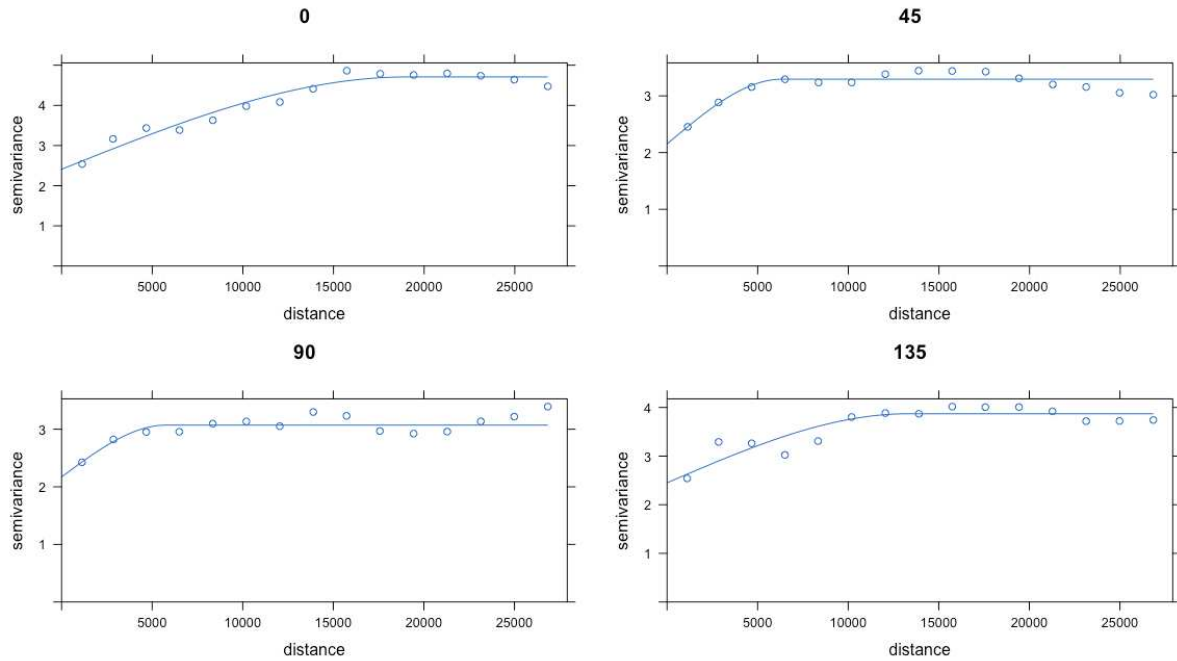


Figure 4-56 : Variogrammes directionnels expérimentaux et modélisés selon un pas de 45° et une tolérance de 22.5° sur l'échantillon total du champ de vitesses InSAR en géométrie descendante. Variance en $(\text{mm/an})^2$ et distance en (m).

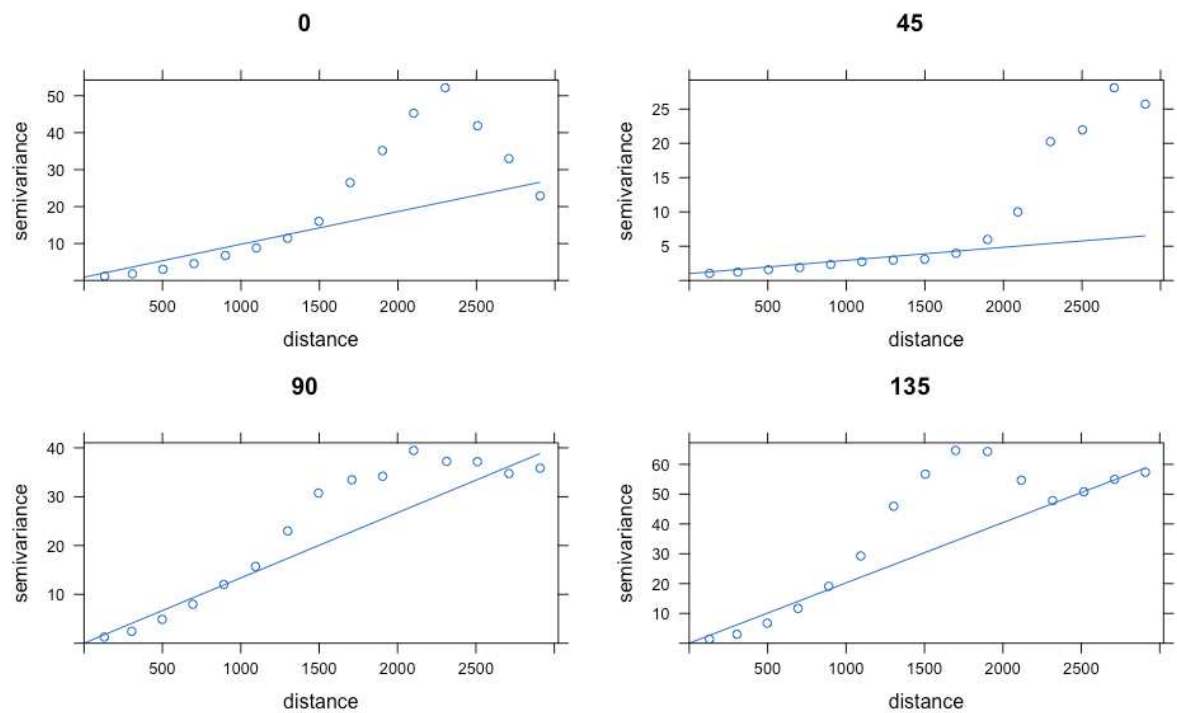


Figure 4-57 : Variogrammes directionnels expérimentaux et modélisés selon un pas de 45° et une tolérance de 22.5° sur une zone restreinte à la zone de déformation de Vauvert, sur champ de vitesses InSAR en géométrie ascendante. Variance en $(\text{mm/an})^2$ et distance en (m).

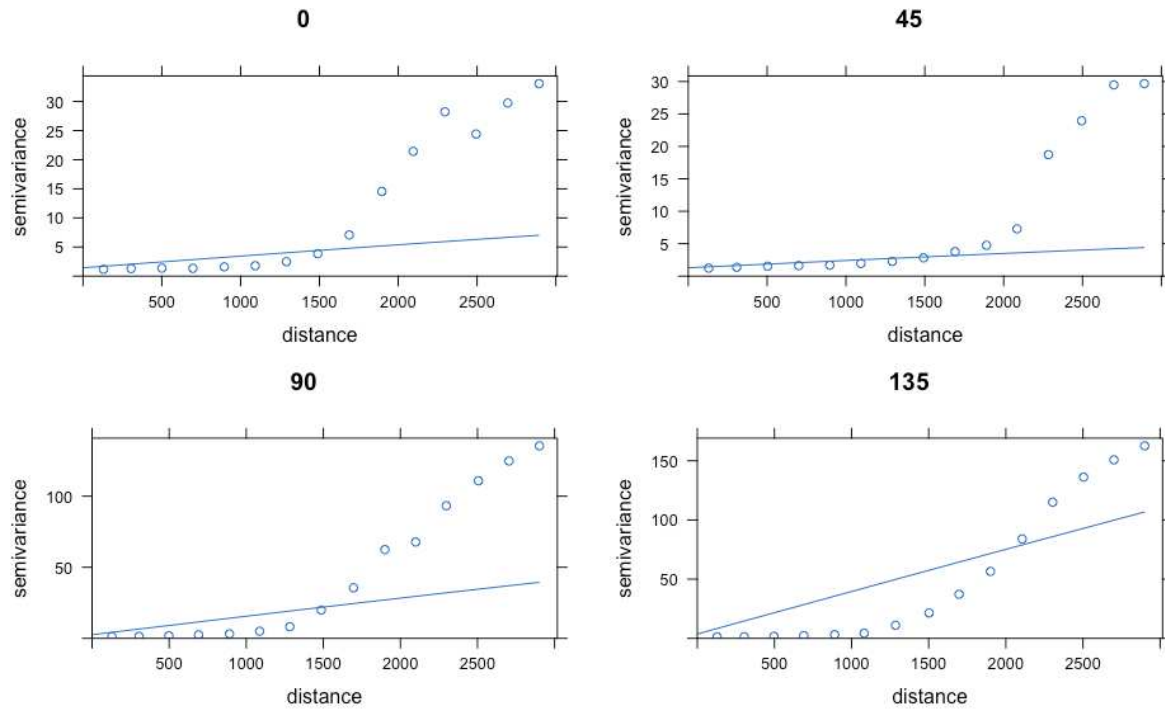


Figure 4-58 : Variogrammes directionnels expérimentaux et modélisés selon un pas de 45° et une tolérance de 22.5° sur une zone restreinte à la zone de déformation de Vauvert, sur champ de vitesses InSAR en géométrie descendante. Variance en $(\text{mm/an})^2$ et distance en (m).

On observe ici que le fait de restreindre l'échantillon à la seule zone affectée par la déformation (subsidence) rend complexe l'analyse des variogrammes (Figure 4-57 et Figure 4-58). Sur les variogrammes expérimentaux présentés en Figure 4-57 et en Figure 4-58, la stationnarité n'est pas atteinte avant la distance maximale. Cette distance correspond à la moitié du maximum de distance mesurable sur les échantillons. Le calcul du modèle de variogramme (i.e. forme du modèle, ordonnée à l'origine, portée) est effectué via la librairie R *gstat*. Les résultats de portée en fonction de l'angle sont illustrés en Figure 4-59 ci-après (pointillés).

A contrario, il est possible d'analyser la présence d'anisotropie sur l'échantillon total (Figure 4-55 et Figure 4-56). En effet les paramètres de modèle de variogrammes représentatifs peuvent être calculés. Ainsi, cela permet de discuter de l'évolution de la valeur de portée estimée en fonction de l'angle du variogramme expérimental directionnel. La Figure 4-59 ci-après illustre les valeurs de portée (en mètres) en fonction de l'angle des variogrammes directionnels sur (1) la zone totale et (2) la zone restreinte à la zone d'étude de Vauvert.

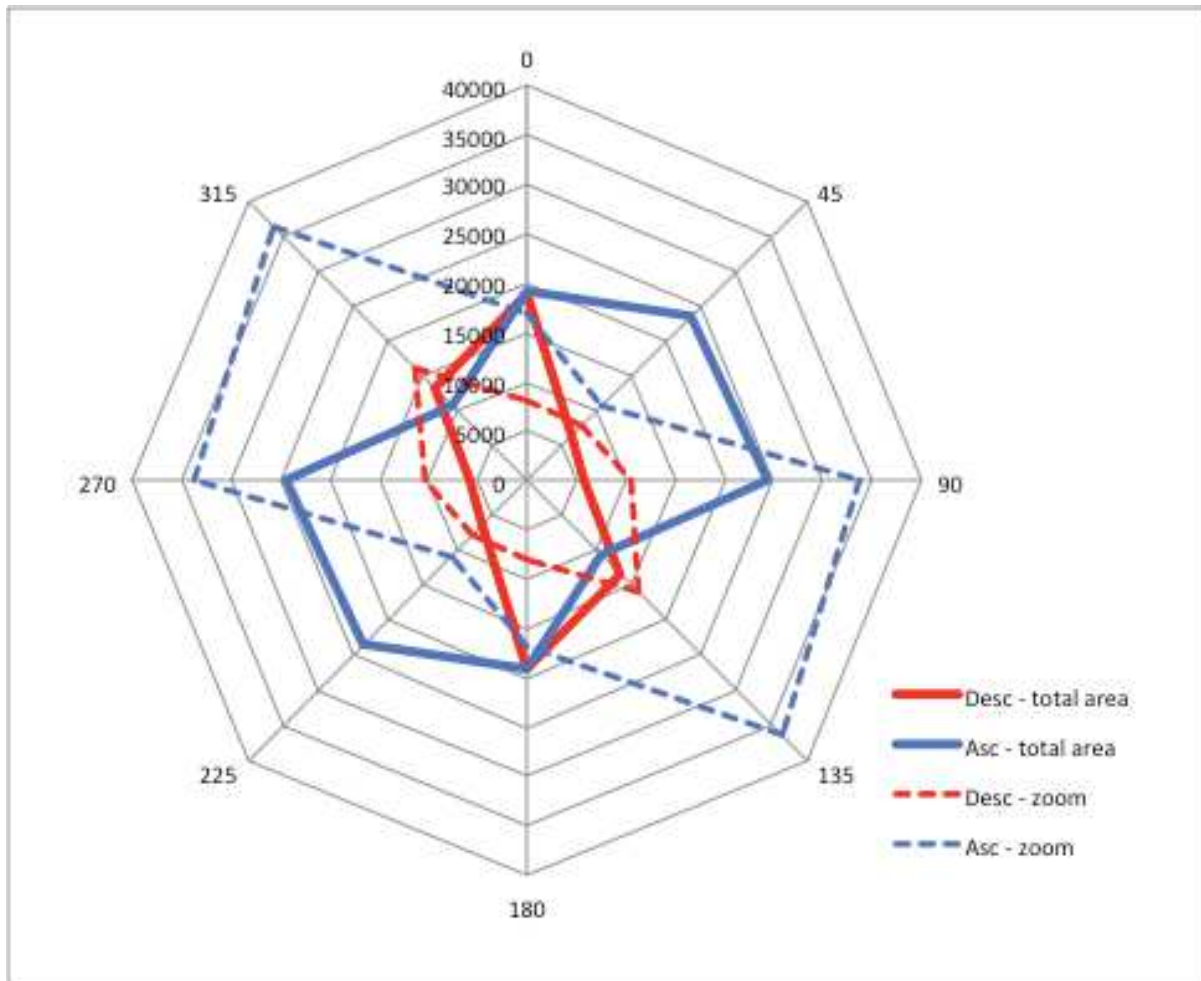


Figure 4-59 : Portée (m) en fonction de l'angle d'anisotropie (degrés) des variogrammes sur zone totale et géométries descendante et ascendante.

La non-stationnarité de la variance à l'infini sur les variogrammes directionnels calculés sur l'échantillon restreint à Vauvert rend l'analyse difficile. En effet les paramètres des modèles de variogrammes, notamment la portée, ne sont pas représentatifs des variogrammes expérimentaux. La vue de ces résultats ne permet donc pas de conclure quant à une anisotropie.

Sur les échantillons totaux, l'analyse de l'évolution des valeurs de portées des modèles de variogrammes montre une anisotropie selon un axe orienté à 45° par rapport au Nord pour la géométrie ascendante et environ 170° pour la géométrie descendante. L'analyse est identique à celle effectuée en section 4.3.3. Ces directions ne correspondent pas à l'orientation locale des structures géologiques.

Ainsi l'analyse des modèles de variogrammes directionnels ne permet pas de rendre compte d'une anisotropie de la déformation qui résulterait d'une accommodation par la subsidence locale des structures géologiques (par exemple failles). Il est donc décidé à ce stade d'appliquer les modèles de variogrammes avec hypothèse d'isotropie, présentés en Figure 4-54, sur la zone totale. De manière identique à la première application sur le champ

de vitesses dérivé des images Envisat, ces modèles sont appliqués de telle sorte qu'en chaque point d'une grille d'interpolation au pas de 20 m, les valeurs de minimum 50 points et maximum 100 points les plus proches (à 5 km près) soient utilisés.

L'application de ces modèles de variogrammes omnidirectionnels, modélisant une déformation isotrope quelle que soit la géométrie de mesure, permet d'obtenir les champs de vitesses interpolés illustrés en Figure 4-60, avec des valeurs de variance de krigeage associées illustrées en Figure 4-61 ci-après.

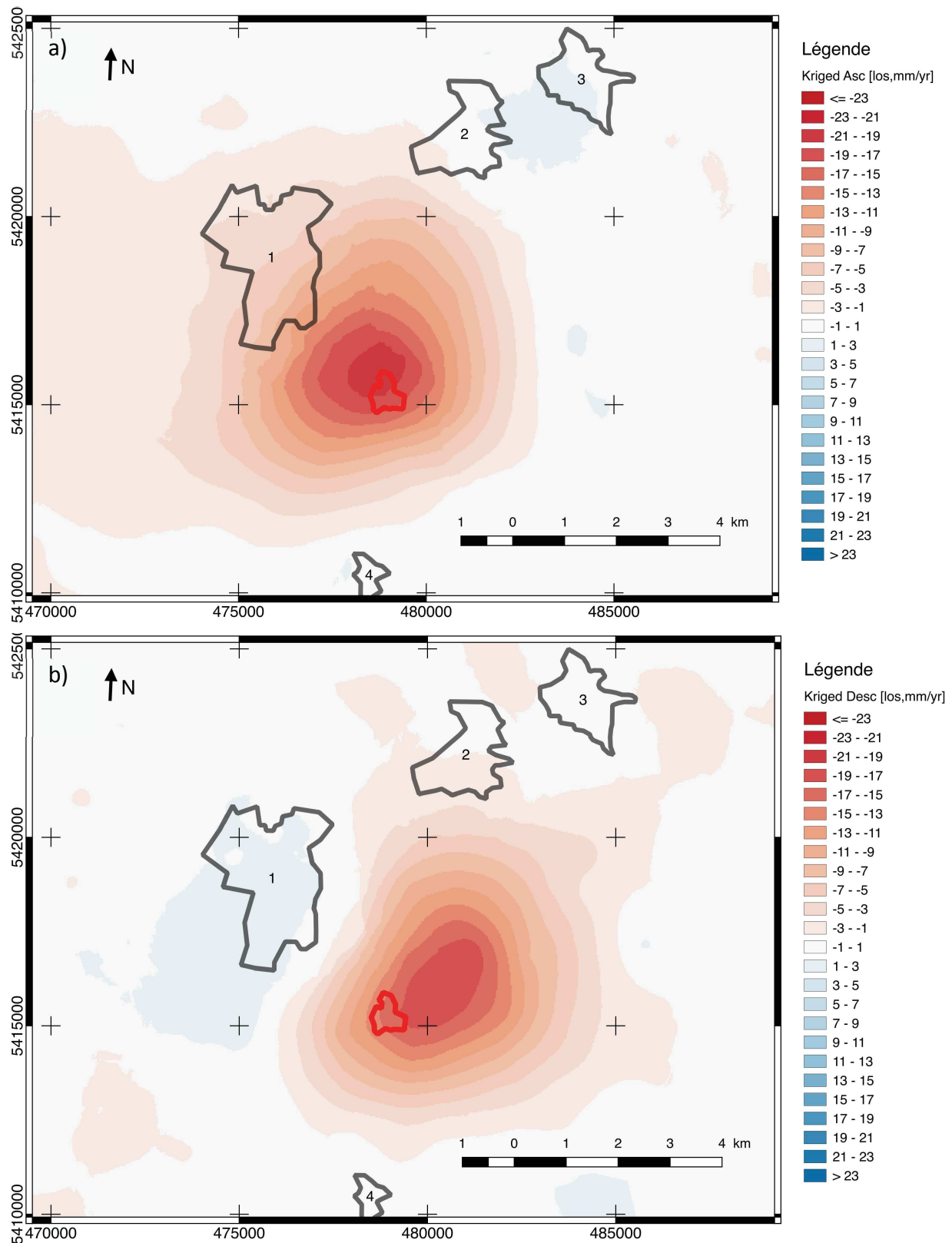


Figure 4-60 : (a) Champ de vitesses InSAR (archive Sentinel-1a/b, géométrie ascendante) interpolé par krigeage ordinaire. (b) Idem mais sur archive Sentinel-1a/b en géométrie descendante. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

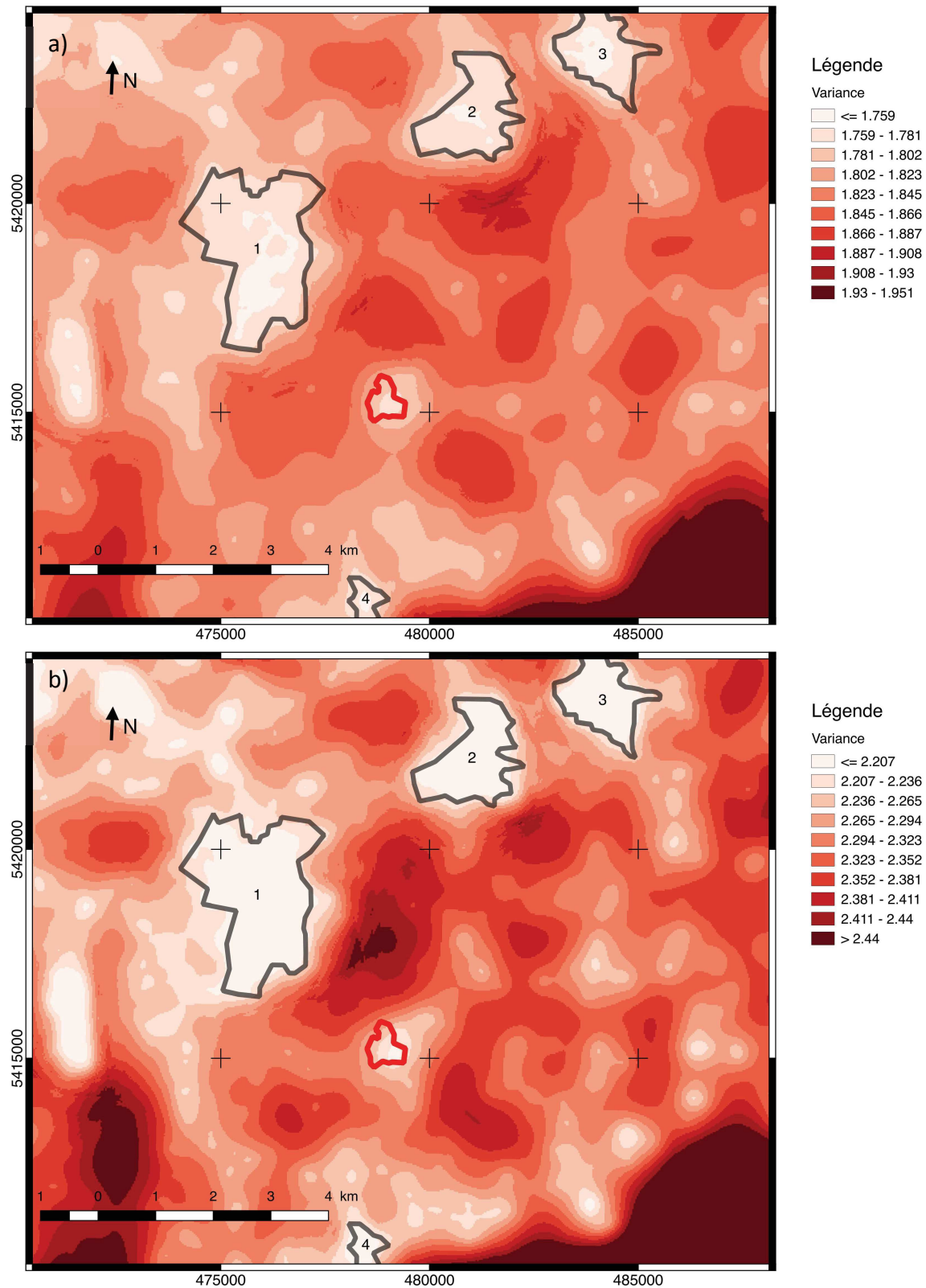


Figure 4-61 : (a) Variance (en $(\text{mm/an})^2$) du krigeage ordinaire sur champ de vitesses InSAR (archive Sentinel-1a/b, géométrie ascendante) (b) Idem mais sur archive Sentinel-1a/b en géométrie descendante. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

On observe sur ces figures une subsidence de même amplitude mais de dimensions et formes différentes. Le bol de subsidence mesuré en géométrie ascendante présente une forme circulaire de diamètre égal à environ 8 km. En géométrie descendante la forme est plus proche d'une ellipse de grand axe d'environ 8.5 km et petit axe 6.9 km. Le centre – le maximum de déformation – est mesuré (1) proche des infrastructures de la saline pour la géométrie ascendante, avec une valeur maximale de 2.1 cm/an et (2) au Nord-Est des infrastructures pour la géométrie descendante avec une valeur maximale de 1.9 cm/an. Les dimensions du bol de subsidence sont cohérentes avec les résultats des études historiques InSAR (Raucoules et al., 2003, Fugro, 2010). L'amplitude maximale mesurée est inférieure à ces études historiques. Ces différences entre résultats mesurant la même déformation au même moment, sont au moins en partie dues à la géométrie de mesure qui, selon un angle d'incidence donné, mesure les trois composantes spatiales de la déformation selon des proportions différentes de l'autre géométrie. Cette déformation étant un bol présentant une subsidence ainsi que des mouvements planimétriques vers son centre (un effondrement), on observe un phénomène géométrique de décalage apparent du bol.

La variance du krigeage suit une spatialisation directement corrélée à la densité de points de mesure InSAR (densité de réflecteurs permanents), et ce de la même manière pour les deux géométries. La variance est minimale là où la densité de réflecteurs permanents est maximale (zones urbaines, villages, et infrastructures de la concession), et maximale là où la densité de réflecteurs permanents est faible (zones fortement végétalisées, étangs au Sud de la zone etc.). On observe de plus une variance globale plus élevée lorsqu'elle est issue du krigeage sur champ de vitesse en géométrie descendante qu'ascendante. L'origine de ce phénomène étant toujours la densité spatiale de réflecteurs permanents, plus élevée sur le champ de vitesses en géométrie ascendante.

4.4.3.2 Détermination géométrique des composantes spatiales de la déformation

Après la création de quatre grilles (deux grilles de modèles de vitesses et leur variance associée estimés par krigeage en section 4.4.3.1) les trois composantes spatiales de la déformation, V_E, V_N, V_U , peuvent être estimées et leurs résultats discutés.

Les proportions de chaque composante (U_E, U_N, U_U) mesurées par chaque géométrie sont estimées dans une première étape. Pour cela on détermine l'angle d'incidence moyen θ_p sur la zone d'étude, pour chaque géométrie. On obtient :

$$\theta_{p,moyen}^{asc} = 36^\circ$$

$$\theta_{p,moyen}^{desc} = 33^\circ$$

On estime ensuite les composantes (U_E, U_N, U_U) pour chaque géométrie, selon les équations citées en chapitre 3 et on obtient :

$$U_E^{asc} = -0.54$$

$$U_E^{desc} = 0.49$$

$$U_N^{asc} = 0.12$$

$$U_N^{desc} = -0.11$$

$$U_U^{asc} = 0.80$$

$$U_U^{desc} = 0.84$$

Il est maintenant possible de confronter les trois méthodes d'estimation des trois composantes de la déformation aux données de Vauvert. La **première méthode** considère que la vitesse verticale V_U peut être approchée en retirant la composante V_E sur V_{LOS} , sans connaître V_N . Elle permet donc le calcul de la composante Est et des composantes verticale et Nord fusionnées (chapitre 3). Cette méthode permet d'obtenir les modèles de vitesses suivants (Figure 4-62 et Figure 4-63).

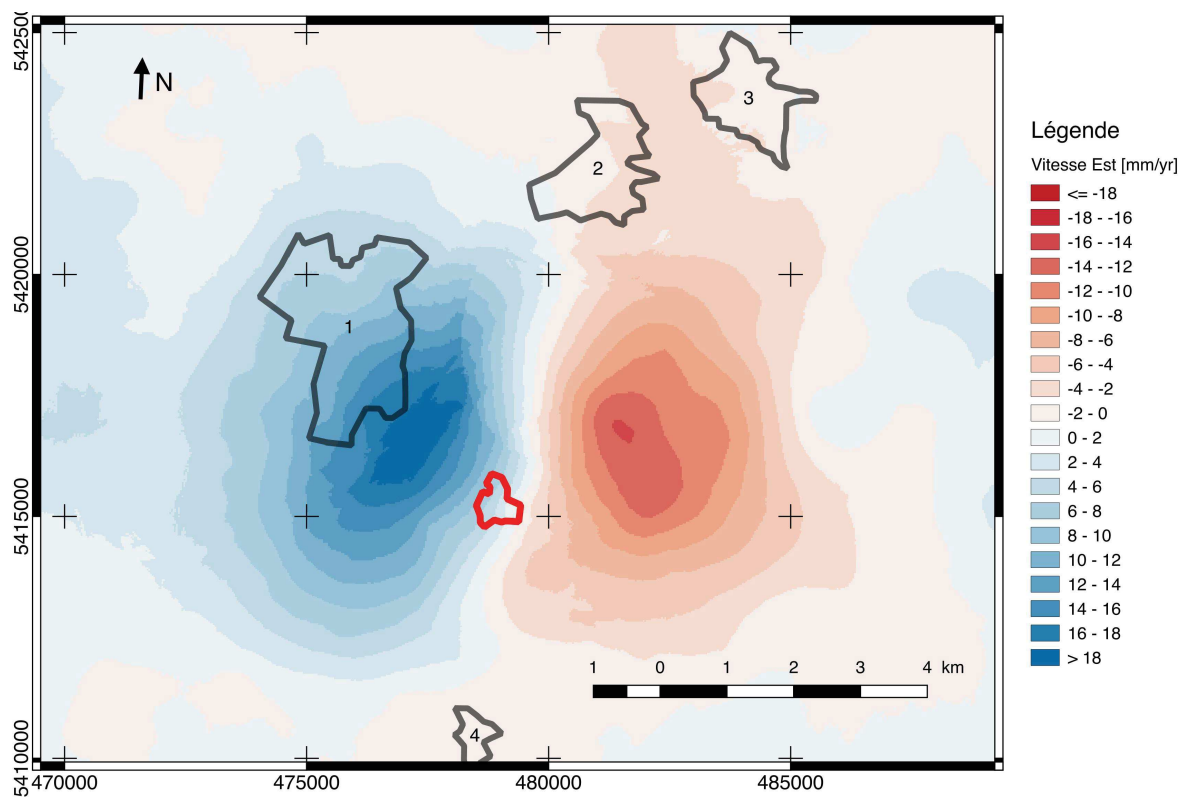


Figure 4-62 : Composante Est-Ouest (positif vers l'Est) de la déformation à Vauvert via la méthode 1. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

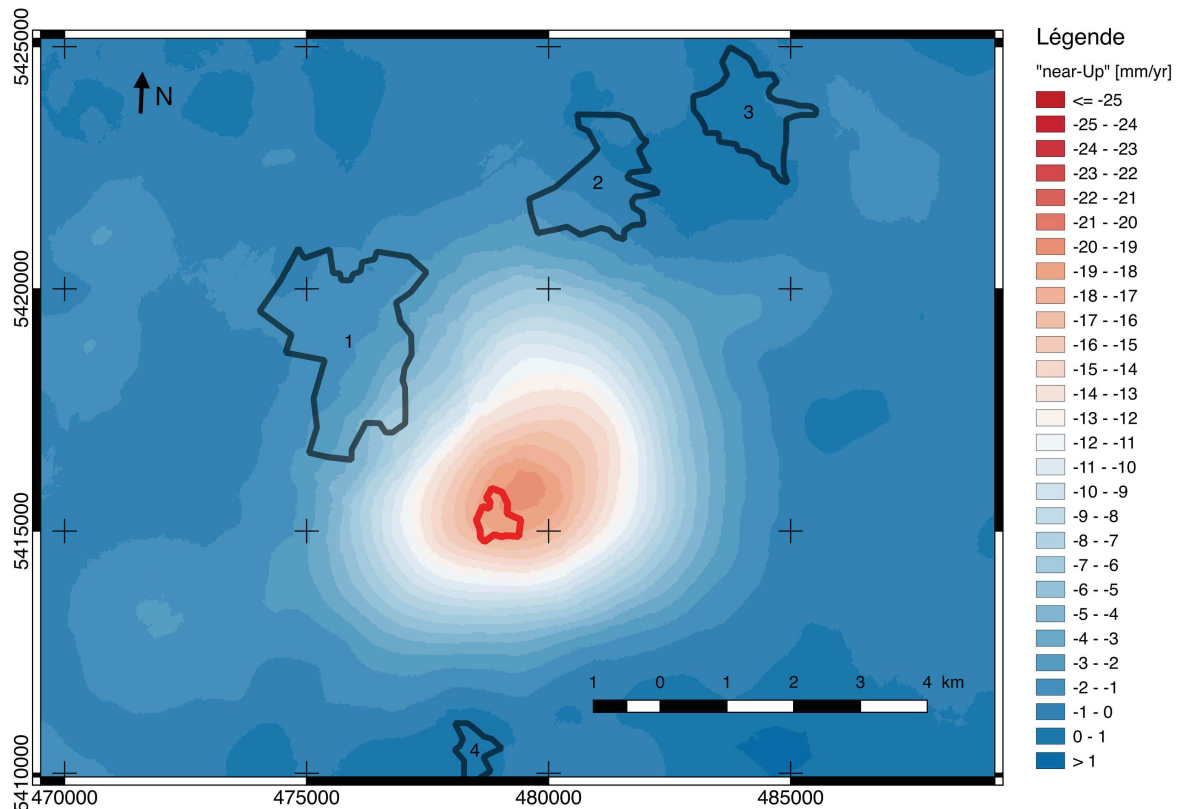


Figure 4-63 : Composante « quasi-verticale » de la déformation à Vauvert (combinaison des composantes verticale et Nord) via la méthode 1. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

La Figure 4-62 présente un mouvement maximal vers l'Est entre la ville de Vauvert et les infrastructures de la concession de l'ordre de 1.8 cm/an. Cette composante vers l'Est affecte la totalité de la zone urbaine de Vauvert avec un gradient faible, et semble s'étendre au delà de Vauvert, à l'Ouest. Ce résultat est le premier, toute étude confondue, à montrer un mouvement dans cette zone. Le mouvement vers l'Ouest de la moitié Est de la zone atteint un maximum de 1.6 cm/an, et semble affecter dans une faible mesure les zones urbaines de Beauvoisin et Générac. La composante « quasi-verticale » illustrée en Figure 4-63 montre un bol de subsidence centré à 500 m au Nord-Est des infrastructures principales de la concession. Sa magnitude maximale atteint 2.0 cm/an. Les quartiers résidentiels au Sud-Est de Vauvert sont affectés d'une subsidence maximale de 0.6 cm/an.

L'utilisation de cette méthode n'est pas satisfaisante dans le cadre de l'étude de la subsidence de Vauvert. En effet, les mesures GPS (section 4.1.4.4 et section 4.2.1.3) montrent des vecteurs vitesses avec des composantes Est-Ouest et Nord-Sud. La **méthode 2** expliquée en section 3.3.2.3 du chapitre 3 est ainsi appliquée, considérant l'hypothèse de déformation radiale du bol de subsidence. On obtient les modèles de vitesse suivants pour les composantes Nord-Sud et verticale (Figure 4-64). La carte des vitesses sur la composante Est est identique à la première méthode (Figure 4-62).

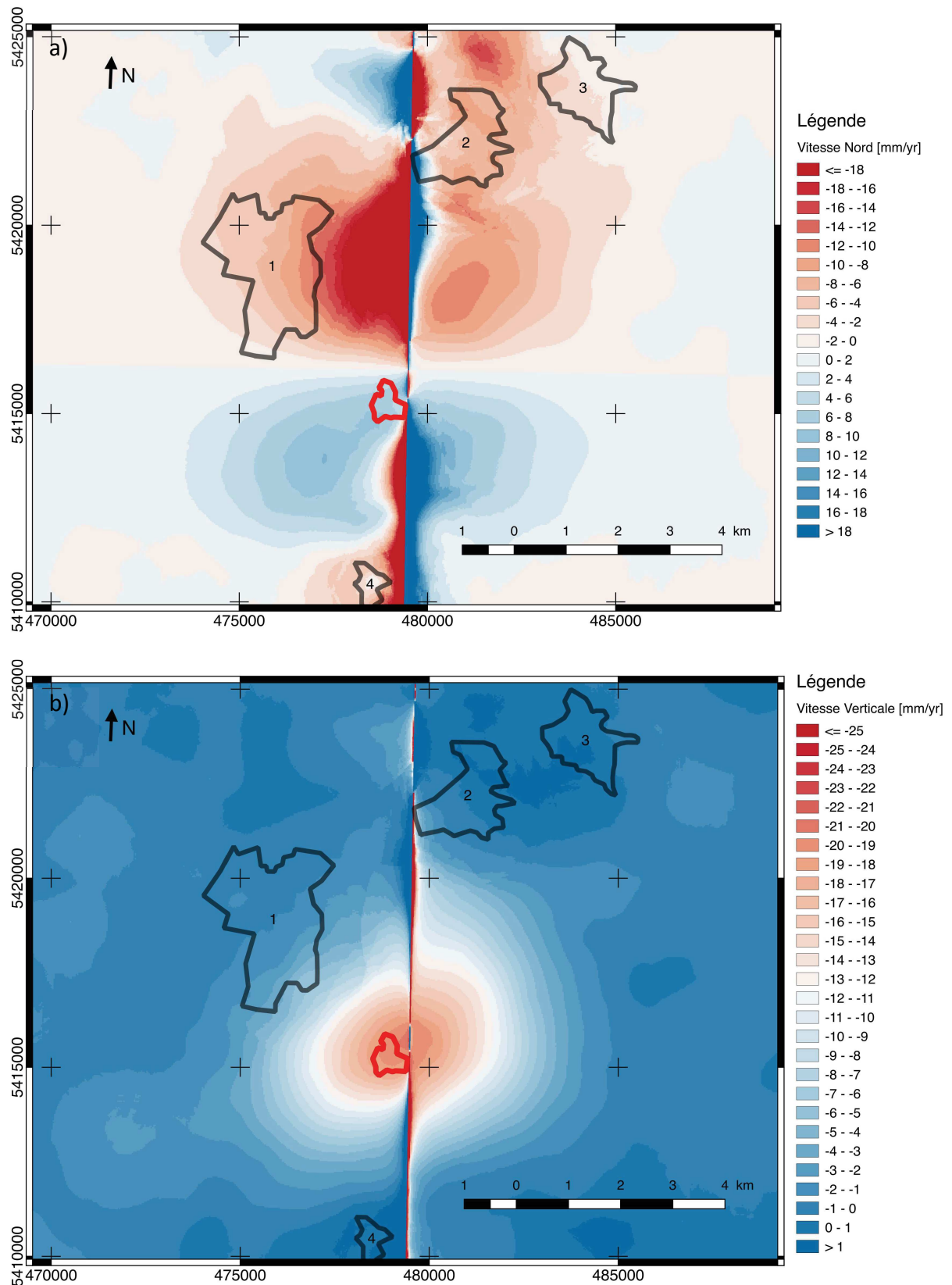


Figure 4-64 : (a) Composante Nord-Sud (positif vers le Nord) et (b) composante verticale de la déformation (vitesse [mm/yr]) estimée à Vauvert via la méthode 2. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

On observe sur ces précédentes figures l'effet de l'effondrement de la surface du sol vers le centre de subsidence : la moitié Nord du bol montre un mouvement vers le Sud et inversement. En s'approchant de l'axe Nord-Sud du centre de la subsidence, les valeurs sont largement sur/sous-estimées et finissent par tendre vers l'infini. La magnitude maximale est donc difficilement estimable, les valeurs atteignant environ 1.2 cm/an en dehors des zones proches de l'axe central. L'effondrement du bol est mesuré au-delà des villes de Vauvert et Beauvoisin. La magnitude maximale du modèle de vitesse verticale atteint une subsidence de 2.0 cm/an hors zone affectée des valeurs sur/sous-estimées précédemment citées.

Afin d'estimer la composante Nord-Sud (et donc la composante verticale) là où la méthode 2 ne le peut, la **méthode 3** est appliquée. Ces zones étant aussi les plus affectées par la déformation Nord-Sud, il apparaît ici intéressant d'estimer cette composante, même si les hypothèses nécessaires sont plus restrictives que pour le méthode 2. Les équations permettant le calcul de V_E , V_N , V_U décrites en section 3.3.2.3 sont utilisées. Le profil (coupe Est-Ouest passant par le maximum de subsidence, Figure 4-65) est projeté selon un angle α . Les composantes intermédiaires V_{pe} et V_{pw} (les vitesses dans le plan horizontal d'un point p projetées sur les sections, respectivement, Est et Ouest par rapport au centre de subsidence du profil EW passant par le centre de subsidence) et la composante horizontale V_h (la vitesse dans le plan horizontal d'un point p) sont illustrées en Figure 4-66. Les termes employés sont décrits et illustrés en chapitre 3.

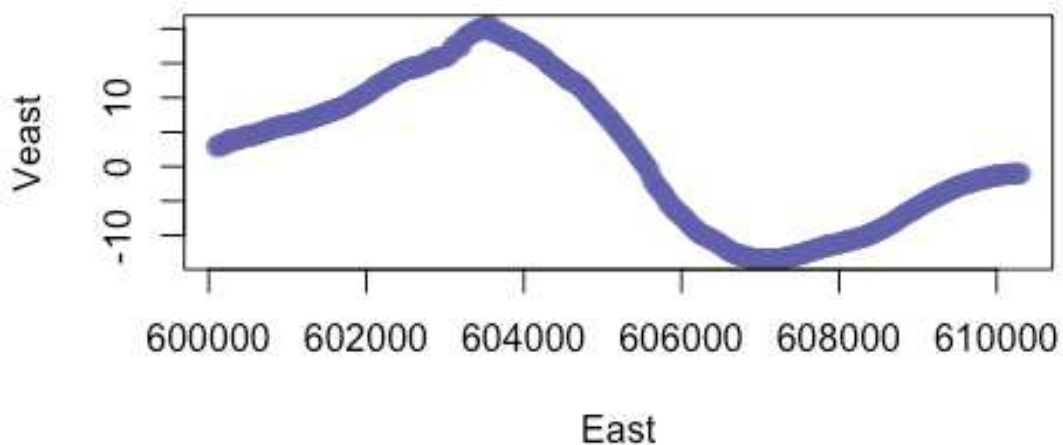


Figure 4-65 : Coupe EW (m) passant par le maximum de subsidence, mesurant la composante Est-Ouest de la déformation (mm/an) sur le bol de subsidence de Vauvert

On obtient les champs de vitesses V_N et V_U (Figure 4-67). La carte des vitesses sur la composante Est est identique à la première méthode (Figure 4-62).

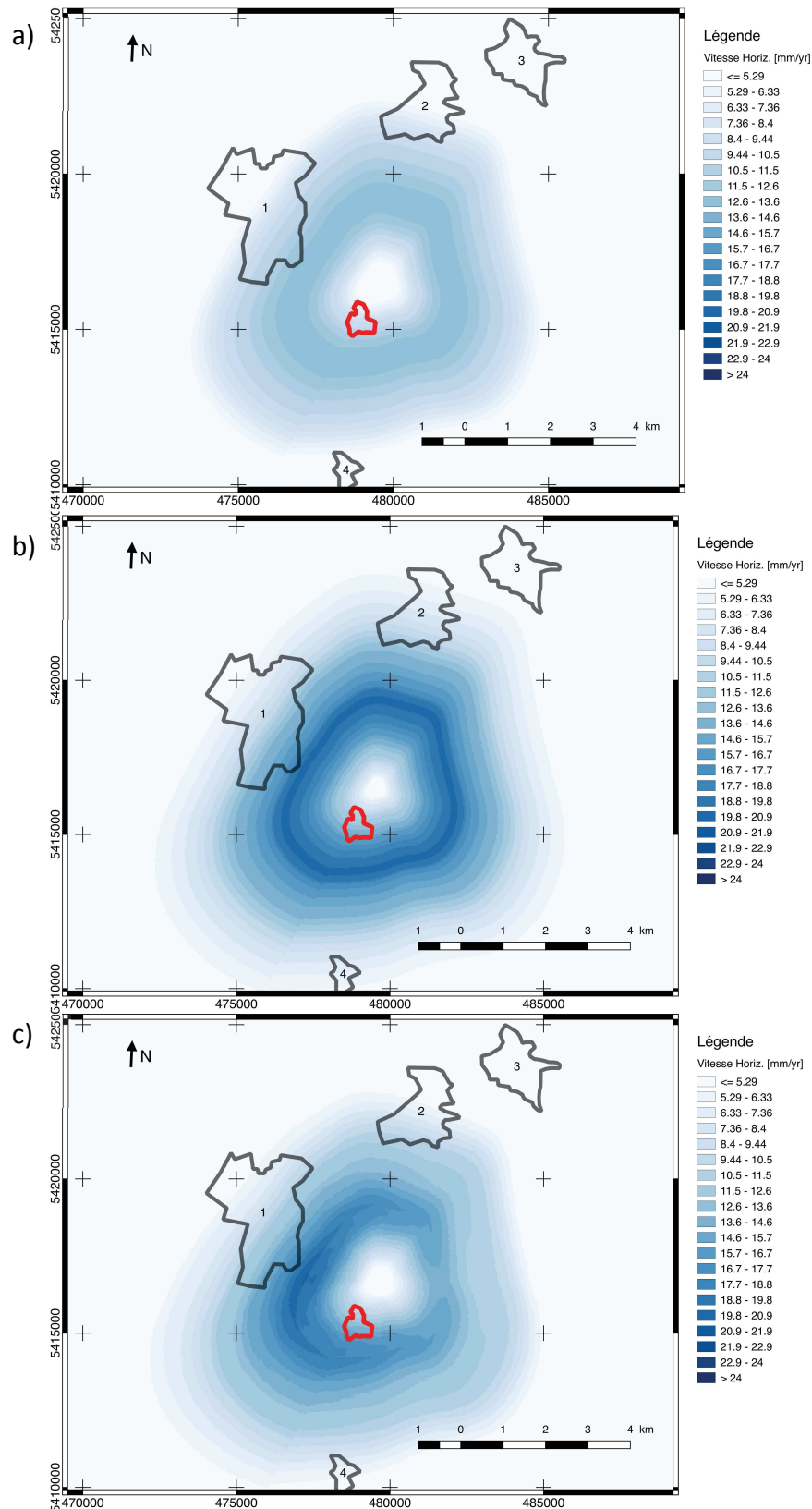


Figure 4-66 : (a) Champs de vitesse $|V_{pe}|$, (b) Champs de vitesse V_{pw} et (c) Composante horizontale V_h estimés sur le bol de subsidence de Vauvert. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

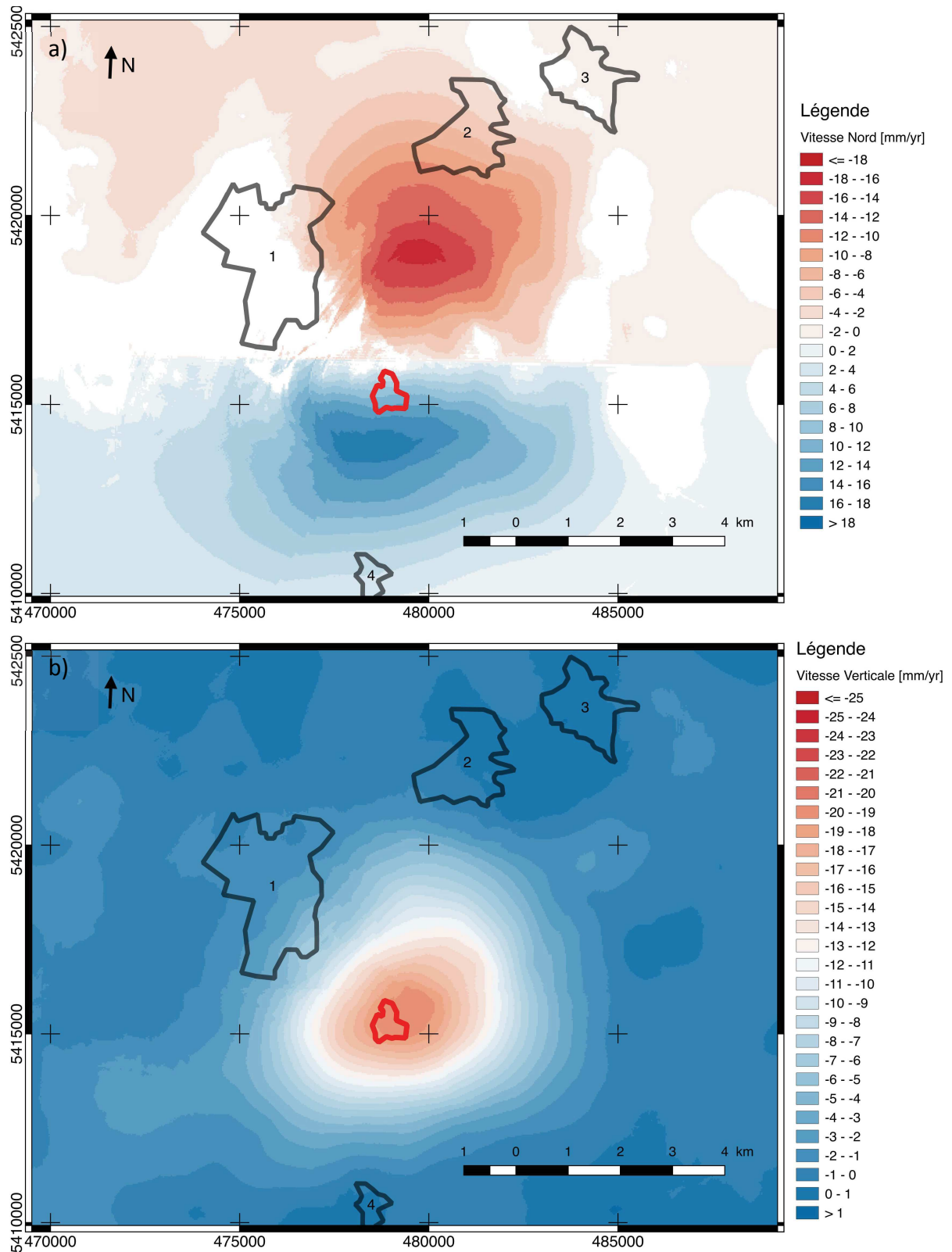


Figure 4-67 : (a) Composante Nord-Sud V_N (positif vers le Nord) et (b) Composante verticale V_U de la déformation (vitesse [mm/yr]) estimée à Vauvert via la méthode 3. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

De manière identique à la méthode 2, on observe sur la Figure 4-67 (a) l'effet de l'effondrement de la surface du sol vers le centre de subsidence. La magnitude maximale atteint 1.8 cm/an vers le Nord et 1.7 cm/an vers le Sud. On n'observe plus de sur/sous-estimations telles qu'observées dans la méthode 2. Néanmoins des zones où la valeur de la composante Est-Ouest mesurée (Figure 4-62) est plus importante que la valeur de la composante horizontale V_h sont observées. Ces petites hétérogénéités montrent que l'effondrement n'est pas en tout point du bol parfaitement dirigé vers son centre et que (2) en conséquence le profil Est-Ouest (Figure 4-65) n'est pas l'exacte représentation du maximum de cette composante vitesse Est-Ouest. La magnitude maximale du modèle de vitesse verticale atteint une subsidence de 2.0 cm/an et les dimensions du bol sont équivalentes à celle mesurées par la méthode 2.

Cette section a permis de décrire et illustrer trois méthodes d'estimation des trois composantes spatiales de la déformation. Dans la section suivante ces méthodes sont comparées afin de déterminer vers quelle solution s'orienter dans le cadre de cette application de la méthodologie de combinaison de données géodésique.

4.4.3.3 Comparaison des méthodes

Les résultats sont comparés avec les résultats du calcul GPS ci-après. L'estimation de la composante Nord n'est pas effectuée entre la méthode 1 et les méthodes 2 et 3 puisque la méthode 1 n'estime pas cette composante.

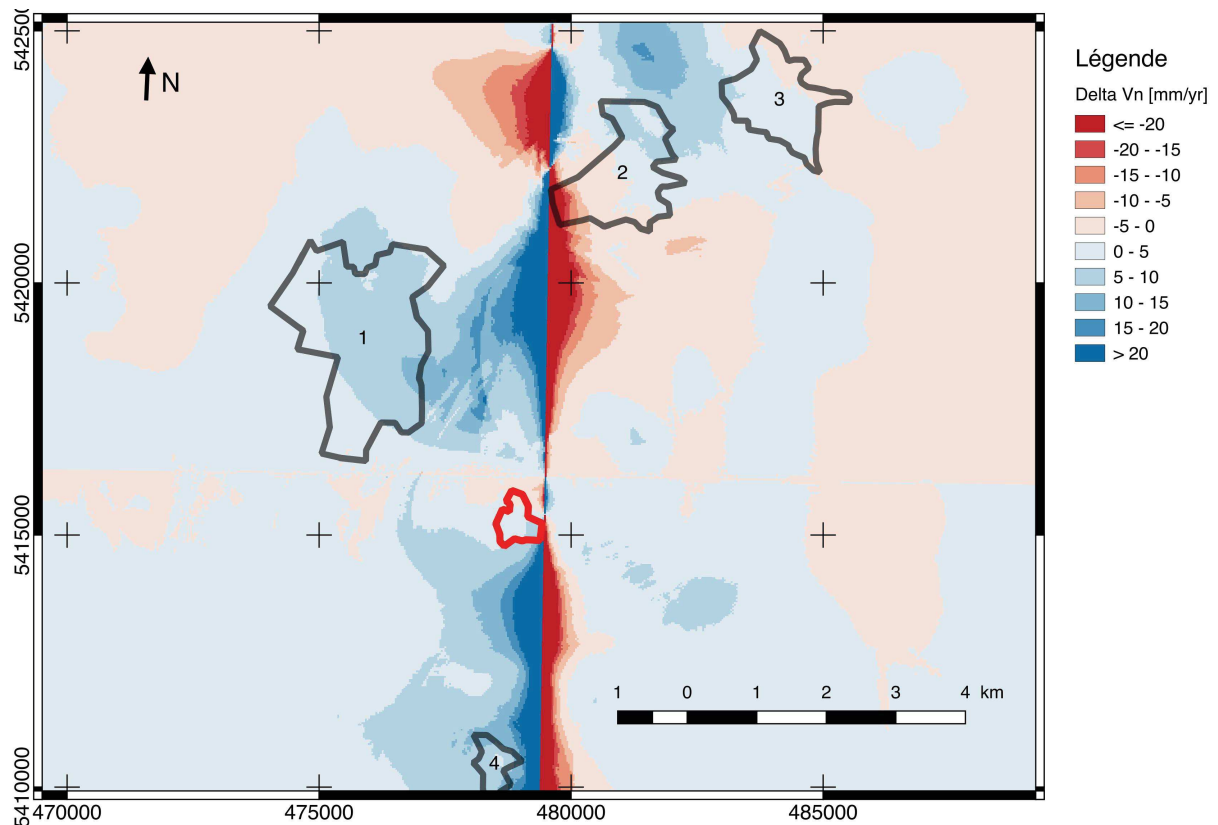


Figure 4-68 : Différence entre les estimations de la composante Nord de la déformation de Vauvert par les méthodes 2 et 3. (Méthode 3 – méthode 2). Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

La Figure 4-68 compare les résultats des estimations de la composante Nord de la déformation par les méthodes 2 et 3. On y observe une correspondance satisfaisante entre les deux méthodes sur la majorité de la zone, et des valeurs très importantes (> 2 cm/an) lorsque l'on s'approche de l'axe Nord-Sud passant par le centre de déformation. On retrouve ici la différence majeure entre les deux approches : la méthode 2 ne permet pas d'estimer la composante Nord de la déformation à l'approche de l'axe de déformation Nord-Sud maximale. La méthode 3 quant à elle permet une estimation de la composante Nord sur l'intégralité du bol de subsidence, mais des artefacts y sont visibles (la Figure 4-67 (a) et explication en section 3.3.2.3.). En revanche, entre la zone urbaine de Vauvert et l'axe Nord-Sud passant par le maximum de subsidence, on observe des différences entre les deux estimations atteignant localement 1 cm/an. Cette zone ne doit pas être affectée par la limitation mathématique de la capacité de la méthode 2 à estimer la composante Nord (puisque trop éloignée de l'axe Nord-Sud). Cette différence est donc due à une hétérogénéité spatiale de la magnitude des vitesses horizontales de la déformation du bol de subsidence, hétérogénéité non prise en compte dans la méthode 3.

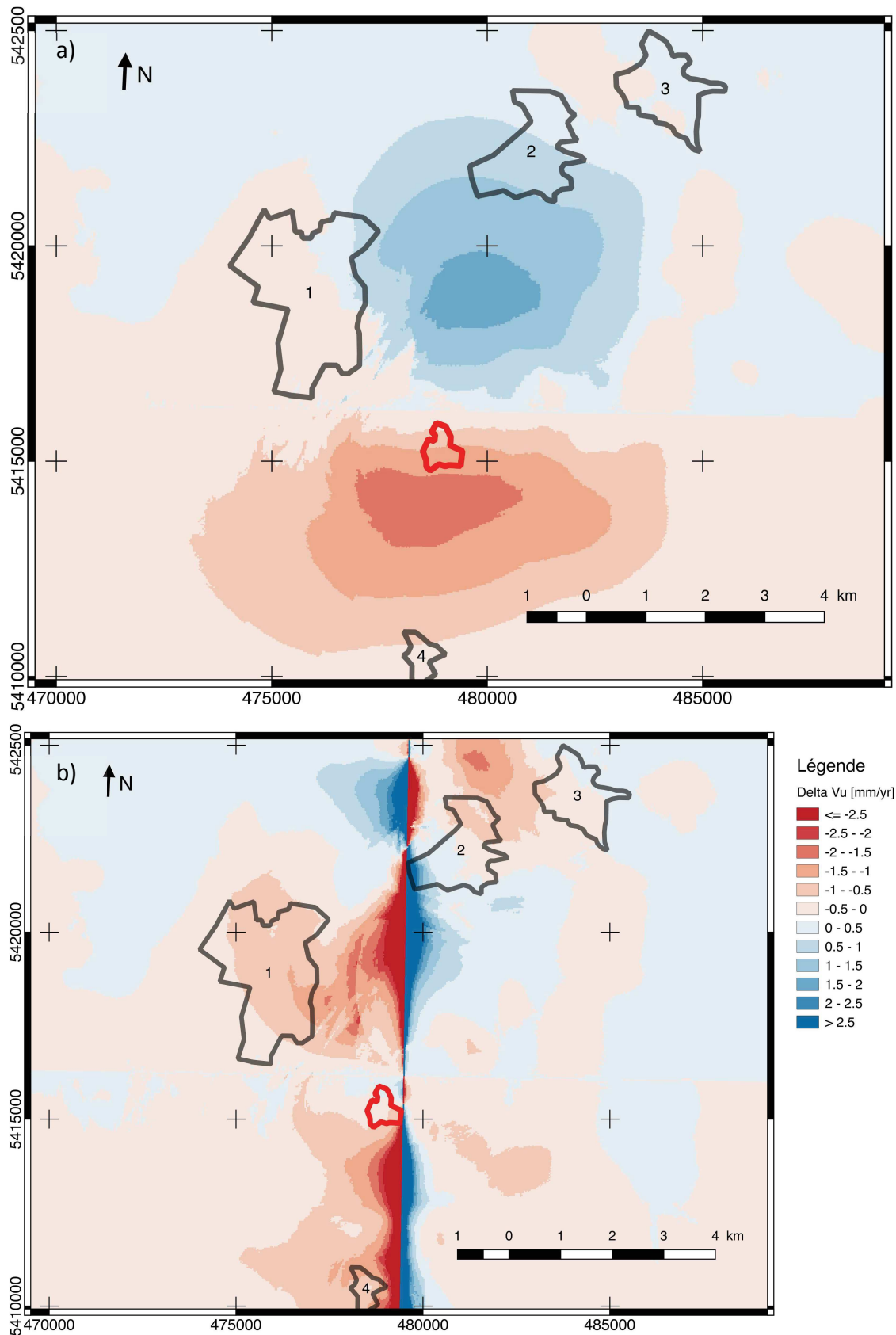


Figure 4-69: Différence entre les estimations de la composante verticales de la déformation de Vauvert par (a) les méthodes 1 et 3. (Méthode 3 – méthode 1) et (b) par les méthodes 2 et 3. (Méthode 3 – méthode 2). Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

Les différences entre les estimations de la composante verticale de la déformation selon la méthode employée découlent directement des différences décrites sur les estimations de la composante Nord de cette même déformation. Ainsi on retrouve (La Figure 4-69 (b)) la problématique de l'artefact sur l'axe Nord-Sud rencontré lors de l'application de la méthode 2. En dehors de cet artefact les différences sont minimales comprises dans l'intervalle $[-1 ; 1]$ mm/an. La Figure 4-69 (a) quant à elle illustre bien la non-estimation de la composante Nord par la méthode 1, cette figure permet donc d'estimer spatialement l'effet de la composante Nord sur la composante quasi verticale mesurée avec cette méthode 1.

Afin d'estimer l'apport de ces méthodes d'estimation des trois composantes spatiales de la déformation, des comparaisons avec les champs de vitesses calculées sur les stations GPS (pour les composantes horizontales) et stations nivelées (pour la composante verticale) présentes dans le bol de subsidence sont effectuées.

Composante	InSAR vs GPS		
	Est	Nord	
$f(x)=ax+b$	Méthodes 1, 2 & 3	Méthode 2	Méthode 3
b	0.6584	-6.736	-4.8237
a	0.7484	0.761	0.8042
Composante	InSAR vs Nivellement		
	Verticale		
$f(x)=ax+b$	Méthode 1	Méthode 2	Méthode 3
b	-0.05435	-0.772	0.1949
a	1.12887	1.004	1.0763

Tableau 9 : Résultats statistiques de la comparaison entre les différentes méthodes d'estimation des trois composantes spatiales de la déformation sur les champs de déformation InSAR avec le GPS (horizontal) et le nivellement (vertical)

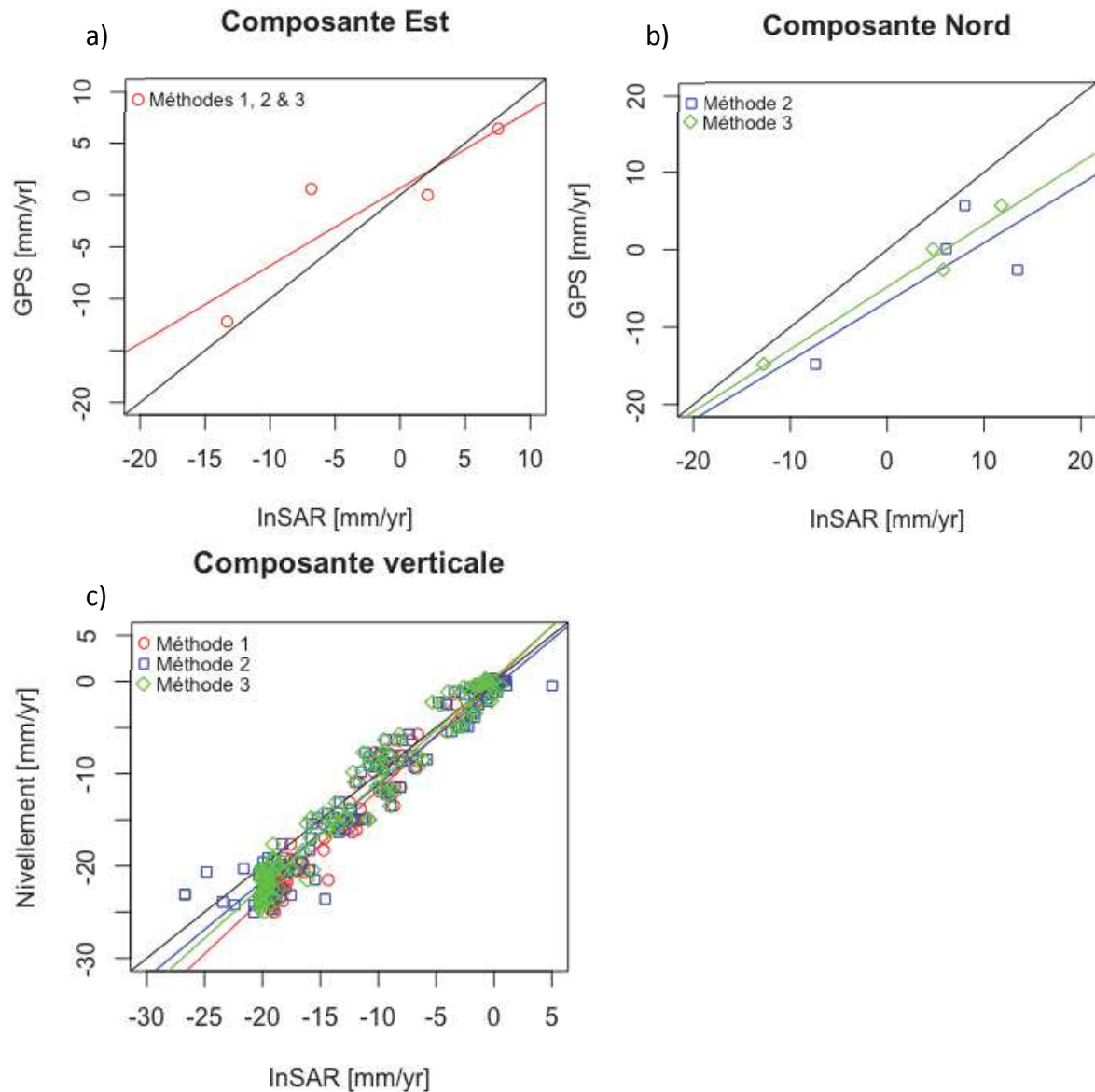


Figure 4-70 : Comparaison entre les différentes méthodes d'estimation des trois composantes spatiales de la déformation sur les champs de déformation InSAR avec le GPS (horizontal (a) et (b)) et le nivellement (vertical, (c)) à Vauvert.

Les composantes horizontales Nord et Est ne sont comparables qu'avec les mesures horizontales correspondantes mesurées en GPS. La comparaison ne peut donc s'effectuer que sur 4 stations, ce qui est statistiquement peu. Néanmoins quelques observations sont possibles. Tout d'abord, sur la composante Est, la méthode d'estimation est identique pour les trois méthodes. On ne peut donc observer qu'une corrélation et il en ressort que, en dehors de la station VAUV qui ne mesure aucun déplacement en GPS alors que l'InSAR mesure ce point à environ - 6 mm/an, les trois stations (VAU1, VAU2 et VAU3) montrent une excellente corrélation entre les mesures GPS et InSAR (géométries ascendante et descendante combinées). Dans l'ordre d'estimation des méthodologies présentées, la composante Nord est ensuite discutée. On observe sur cette composante une meilleure

(sensible) corrélation entre les mesures GPS et les mesures InSAR avec la méthode 3 qu'avec la méthode 2, tant sur le coefficient que sur l'ordonnée à l'origine des droites de régressions linéaires. Enfin, la composante verticale (ou proche-verticale pour la méthode 1, qui inclut – pour rappel – les composantes verticale et Nord projetés sur la verticale) est comparée au nivellement. L'ordonnée à l'origine de la droite de corrélation de la méthode 3 est plus proche de l'origine que celle de la méthode 2, mais le coefficient de corrélation pour la méthode 2 est plus proche de 1 que pour la méthode 3 (très sensiblement). Les méthodes 2 et 3, d'un point de vue comparaison statistique avec une méthode indépendante – le nivellement – sont très proches.

Il est donc possible d'utiliser l'une ou l'autre méthode pour la suite de la méthodologie, le choix pouvant être établi selon le projet et ses données. Pour la suite du chapitre et l'utilisation de l'InSAR comme modèle de vitesse d'entrée de la méthode de combinaison, la méthode 3 est retenue, permettant une estimation de la composante Nord sur l'intégralité du bol de subsidence. La comparaison avec le GPS ayant montré que sa capacité théorique moindre (comparativement à la méthode 2) à mesurer les hétérogénéités de la magnitude de déformation dans sa composante horizontale n'impacte pas négativement le résultat final.

Il apparaît donc maintenant possible de décrire l'application de la méthodologie de combinaison à Vauvert sur la composante verticale des champs de vitesses décrits dans cette section.

4.4.4 Pondération des données

4.4.4.1 Nivellement

La méthode de pondération des mesures de nivellement est strictement identique à la méthode décrite en section 4.3.4.1, seule la période des données diffère.

4.4.4.2 InSAR

Les deux champs de vitesses InSAR issus des traitements PS-InSAR (section 4.2.3.3) ont été indépendamment interpolés par krigeage ordinaire et combinés (section 4.4.3.1). Dans ces résultats il est possible de prendre en considération les incertitudes associées (écart-type) et les erreurs (variance) liées à l'interpolation. Est donc appliquée la méthode de calcul d'une grille d'indice de pondération nommée P_{insar} telle que décrite en section 3.3.3.2 et déjà appliquée en section 4.3.4.2 sur la période antérieure. À partir des grilles (1) de variance issues du krigeage ordinaire sur champs de vitesses (resp. ascendant et descendant, Figure 4-61), et (2) des grilles d'incertitudes de ces mêmes champs de vitesses, les indices respectifs P_{asc} et P_{desc} sont calculés (Figure 4-71), ainsi que l'indice total P_{insar} (Figure 4-72).

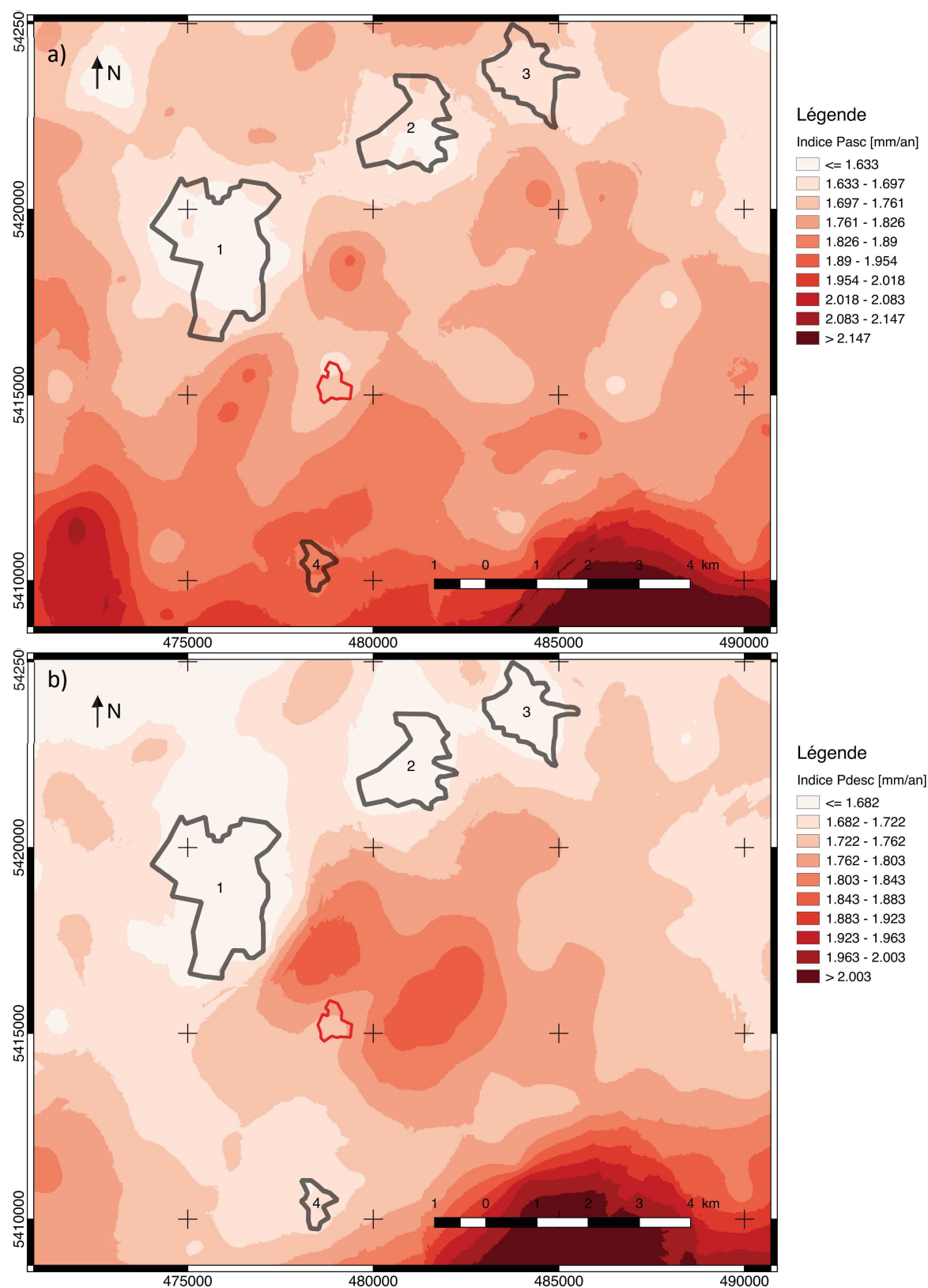


Figure 4-71 : Indices de pondération (a) P_{asc} et (b) P_{desc} sur données PS-InSAR sur archives Sentinel-1a/b à Vauvert. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

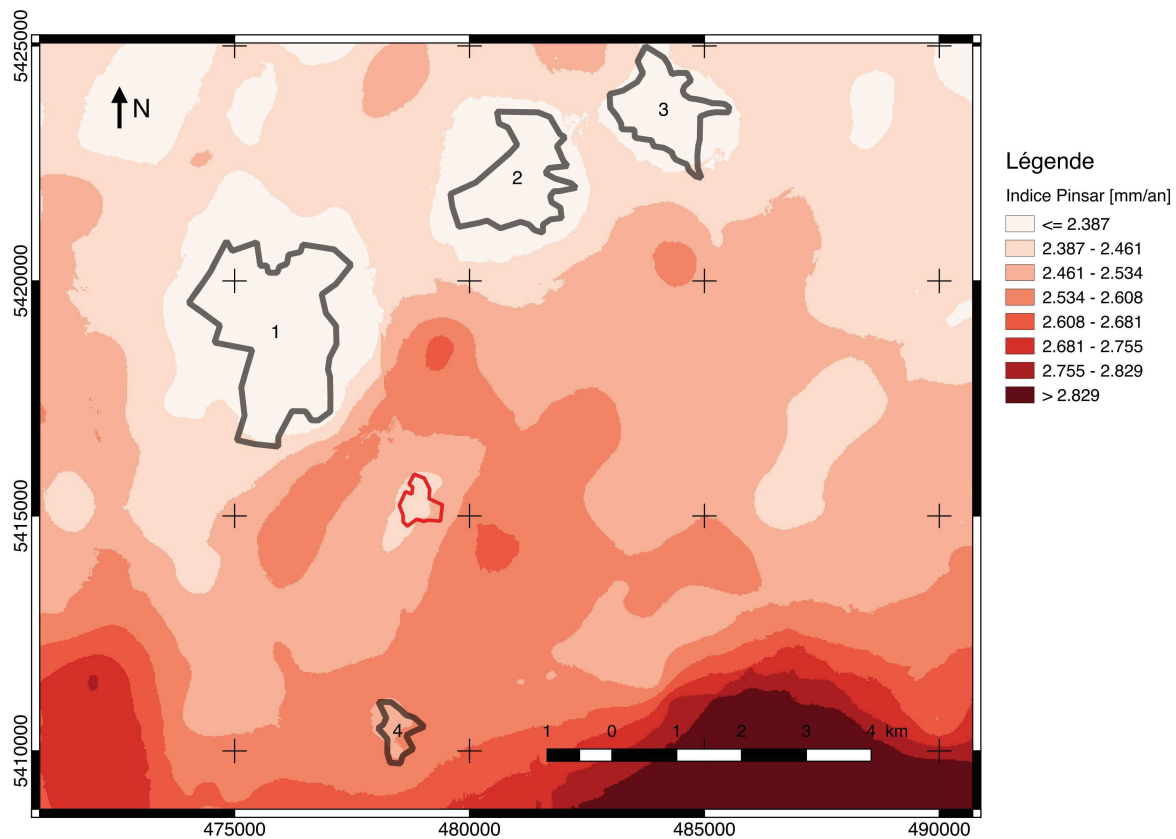


Figure 4-72 : Indice de pondération final P_{insar} sur données PS-InSAR sur archives Sentinel-1a/b à Vauvert. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

On observe sur la Figure 4-71 les effets combinés de (1) la densité de réflecteurs (augmentation de la variance du krigeage lorsque la densité de réflecteurs diminue) et dans une moindre mesure de (2) l'incertitude des vitesses. On retrouve, au Sud-Est de la zone d'étude, sur les étangs, un indice avec des valeurs plus élevées (> 2 mm/an). Les zones urbaines présentant les densités maximales de réflecteurs permanents, l'indice y est toujours minimal (environ 1.6 mm/an). Le deuxième point est plus visible sur l'indice P_{desc} . On retrouve enfin ces effets combinés sur la Figure 4-72. Les champs de vitesses et les valeurs de pondération sont dorénavant prêts à être combinées.

4.4.5 Champ de vitesses combinées par krigeage-regression pondéré

4.4.5.1 Calcul

Le développement de la méthodologie de combinaison sur le site de Vauvert pour la période 2015-2017 peut concerner des mesures InSAR (section 4.2.3), GPS (section 4.2.1) et nivellement (section 4.1.4.1). Les mesures GPS sont effectuées sur 4 stations permanentes

situées dans le bol de subsidence. De plus ces stations sont proches de repères nivelés. L'apport des données GPS directement dans la solution de combinaison serait donc faible, au contraire d'une situation où un nombre plus important de stations serait présent et/ou ces stations seraient placées loin des mesures de nivellement. C'est donc la variante 1, décrite en section 3.3.4.3, qui est retenue. Cette variante permet de combiner champs de vitesses InSAR et nivellement d'une part, et confronter le résultat avec les valeurs de vitesses issues du traitement GPS d'autre part.

Les étapes décrites en chapitre 3 (section 3.3.4.2) sont suivies. Après un échantillonnage de la donnée la plus dense et la mieux spatialement répartie (InSAR), sur la donnée auxiliaire (nivellement), une régression linéaire est appliquée. La prédiction est présentée en Figure 4-73. Le bol de subsidence est mesuré avec des valeurs maximales de 2.2 cm/an. Une analyse statistique de la régression et des résidus est illustrée ci-après (Figure 4-74).

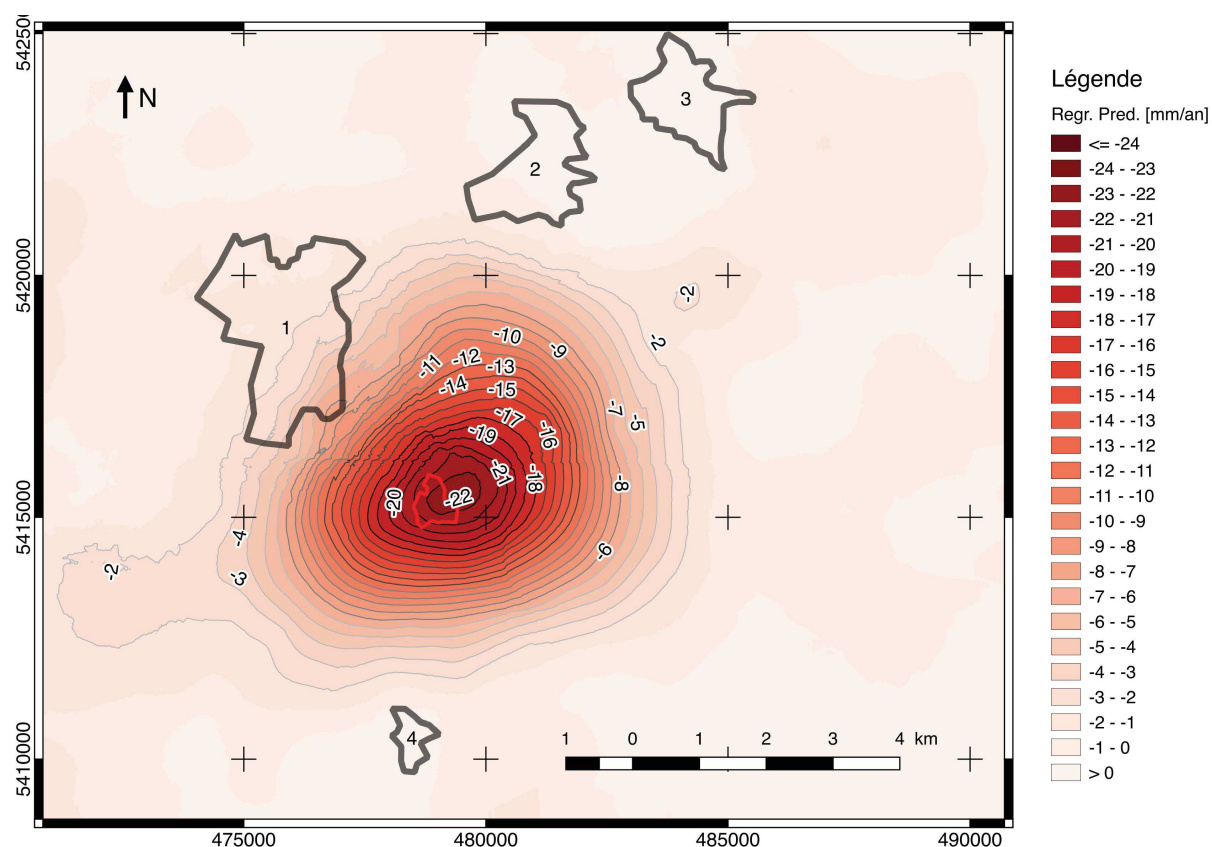


Figure 4-73 : Carte de prédiction de la régression. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Général, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

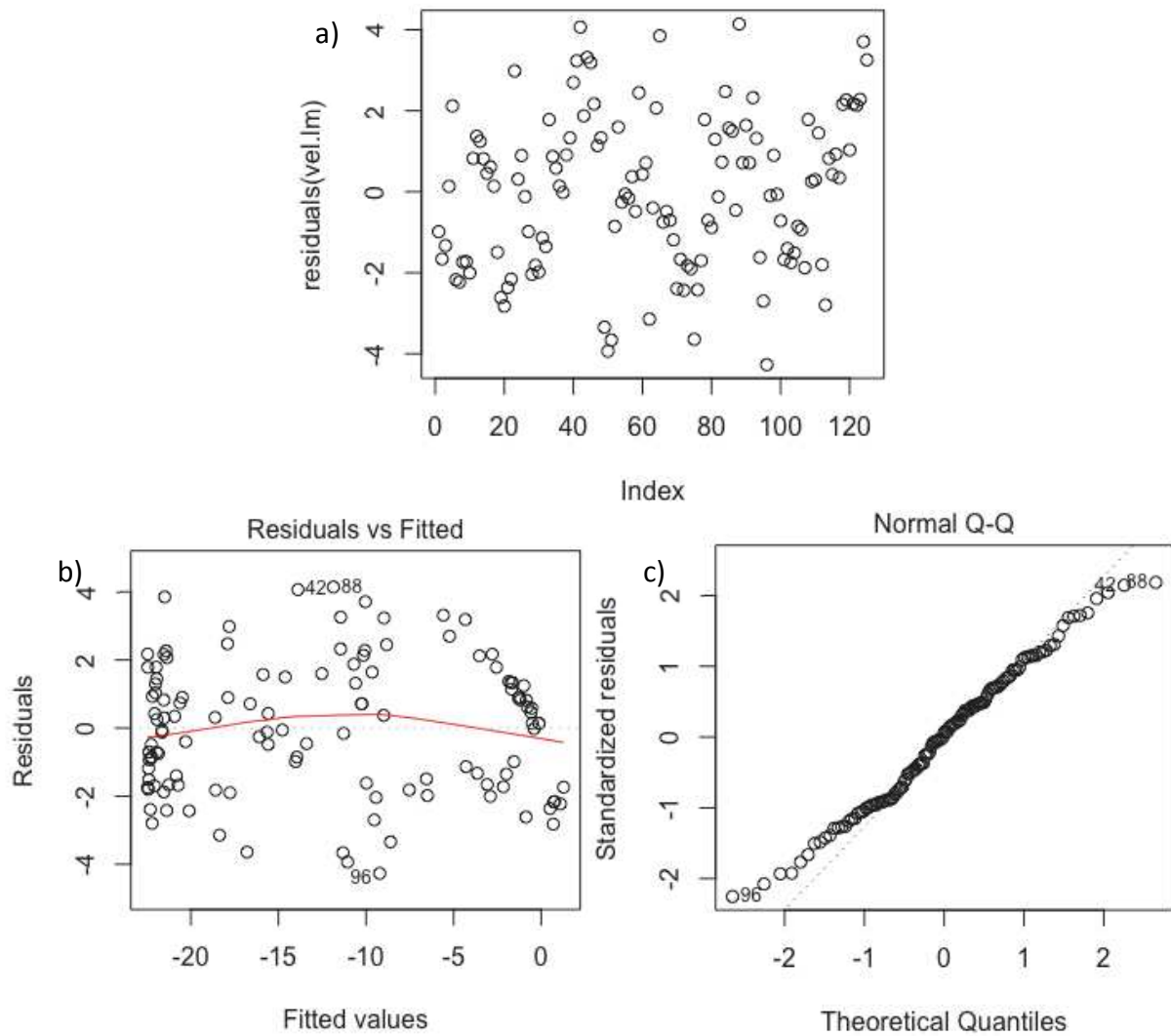


Figure 4-74 : Graphiques (a) des résidus de la régression au droit des points nivelés, (b) et (c) de description statistique des résultats de la régression linéaire entre l'InSAR (composante verticale issue de la combinaison des géométries ascendante et descendante) et le nivellement sur le site de Vauvert.

Le graphique (b) de la Figure 4-74 montre l'écart entre les observations et le modèle. On n'observe pas un comportement spécifique des résidus autour de la valeur nulle. Nous sommes dans un cas d'homoscédasticité comme expliqué en section 4.3.5.1. Le graphique Q-Q (Quantiles) présente une forme classique. Les valeurs résiduelles suivent une loi linéaire et aucune valeur ne sort de cette loi, ce qui marquerait un comportement anormal des stations.

Ensuite une interpolation des résidus de la prédiction est effectuée. Pour cela le variogramme (Figure 4-75) sur le résidu de la régression entre le nivellement et l'InSAR est calculé afin de permettre l'interpolation par krigeage, tel que décrit en section 3.3.2.2.3.

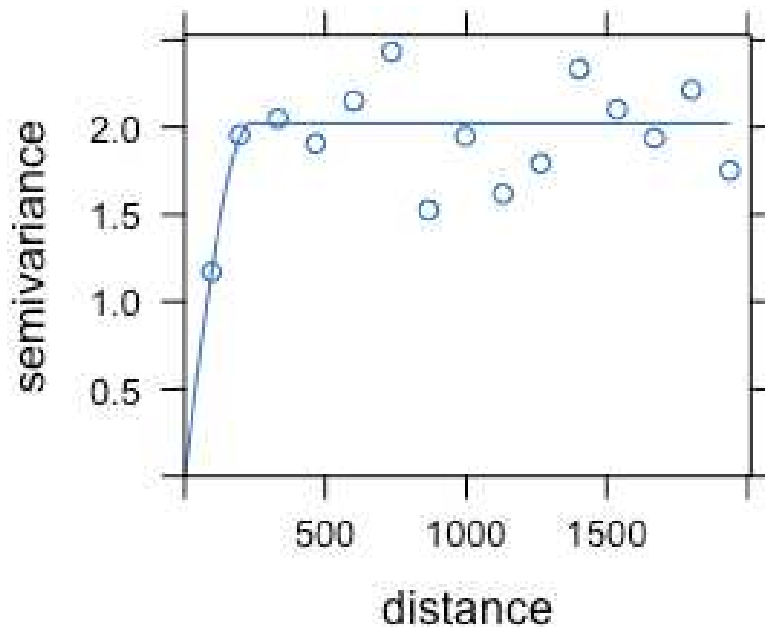


Figure 4-75 : Variogramme expérimental et modèle sphérique associé, calculés sur les résidus de la régression linéaire.

Le modèle de variogramme obtenu est une fonction sphérique de faible portée, proche d'un modèle « pépite ». Ceci étant lié à l'aspect aléatoire marqué de la spatialisation de résidus de la régression. Après la détermination des paramètres du modèle de variogramme, le krigeage est effectué sur ces mêmes résidus. Les résultats sont illustrés en Figure 4-76.

Le résultat est un modèle de vitesses sur lequel la trame d'observation (profils) du nivellement est visible. La difficulté est ici d'utiliser des paramètres permettant une interpolation au centre du bol, où la densité de mesures de nivellement est importante, tout en permettant une interpolation réaliste entre les profils, où aucune mesure de nivellement n'est effectuée. À proximité de ces profils, la régression seule ne permet pas de rendre la prédiction égale aux valeurs de nivellement, mais seulement de s'en approcher. Sur ces résidus, un léger basculement (vitesses positives au Sud et négatives au Nord) est mesuré. L'interpolation des résidus permet donc de calculer le modèle de vitesse nécessaire afin de rendre le modèle de vitesse combiné final identique à la donnée auxiliaire, ici le nivellement, au droit des points nivelés. Enfin la variance du krigeage des résidus montre des valeurs très faibles (proches de 0 (mm/an)^2) à l'approche des points nivelés et atteint des valeurs importantes ($> \text{(mm/an)}^2$) en s'éloignant de ces points.

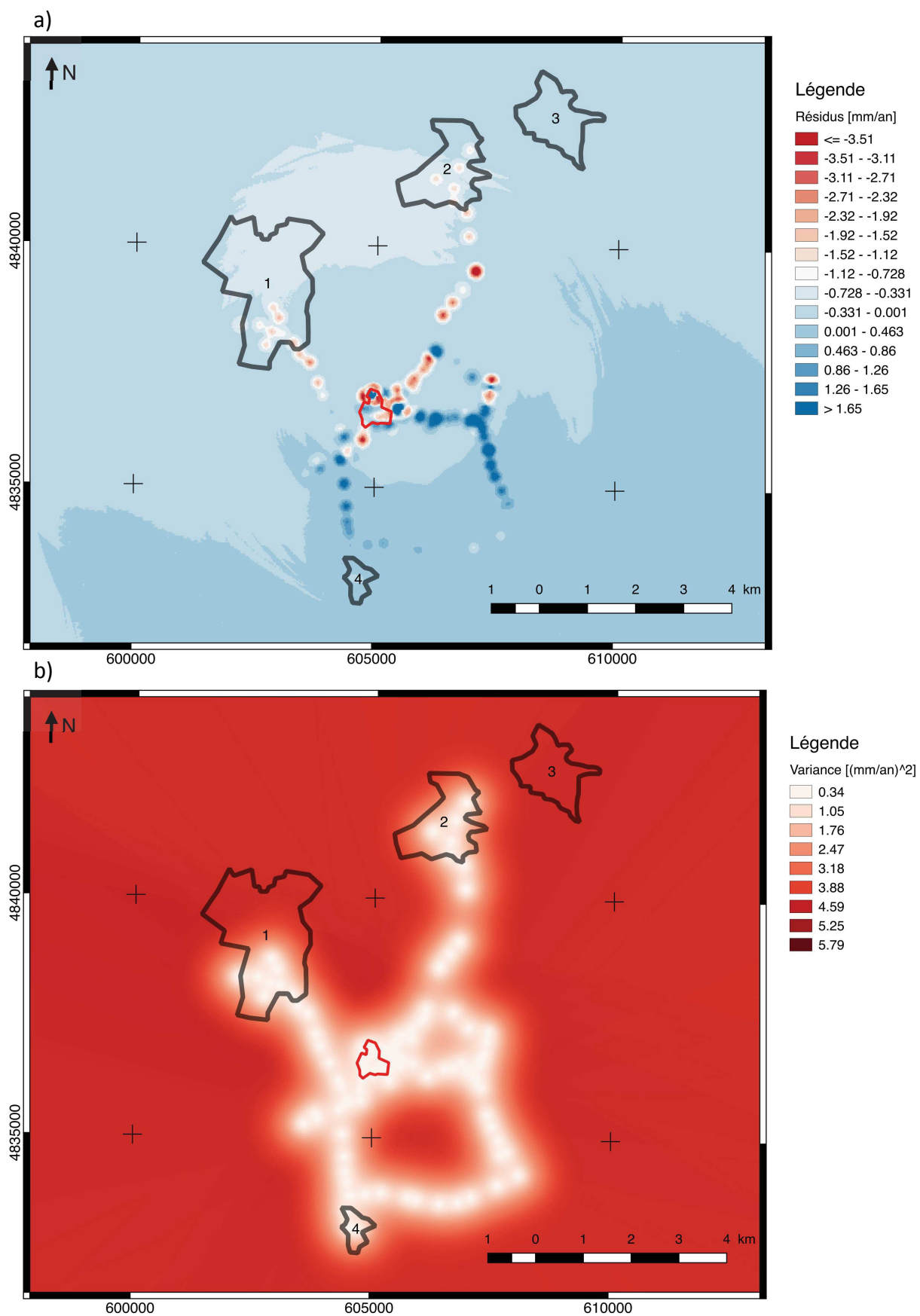


Figure 4-76 : Résultat du krigeage des résidus (a) et variance associée (b). Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

4.4.5.2 Modèle de vitesses combinées

Le modèle de vitesses verticales final est issu de la combinaison du résultat de la régression (Figure 4-73) et du résultat de l'interpolation des résidus de la régression (Figure 4-76 (a)), selon la technique expliquée en chapitre 3. Le résultat est illustré en Figure 4-77 ci-après.

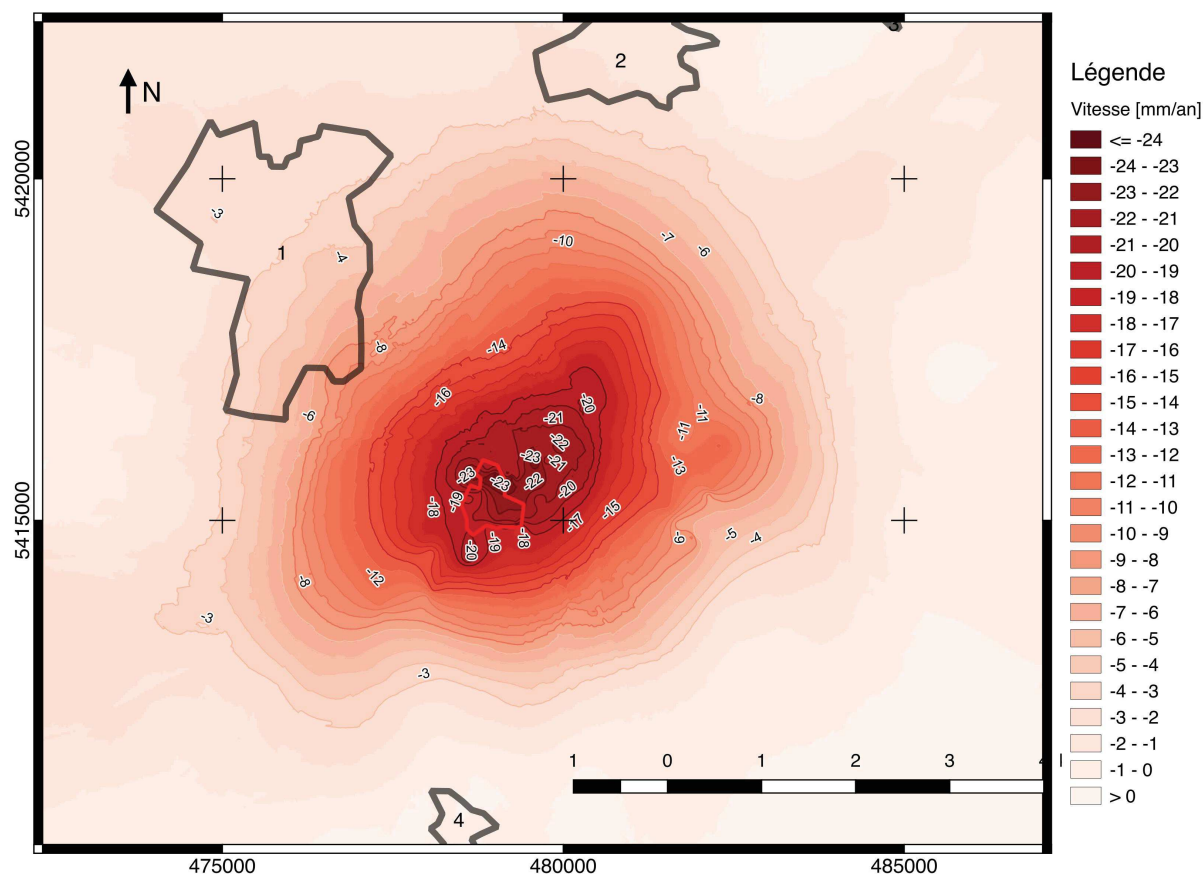


Figure 4-77 : Modèle de vitesse issu du krigeage-régression pondéré sur données InSAR et nivellement à Vauvert. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

Le champ de vitesses verticales atteint la magnitude maximale de 2.4 cm/an au Nord de la zone contenant les infrastructures centrales de la saline. Le bol de subsidence forme une ellipse de grand axe d'environ 7.6 km de long dans la direction Nord-Est/Sud-Ouest et de petit axe perpendiculaire d'environ 6.9 km de long. La zone urbaine de Vauvert est affectée par une subsidence comprise dans l'intervalle [0, -9] mm/an. La distance minimale entre ces valeurs maximales est d'environ 2.8 km : aucun effet visible sur les infrastructures n'est attendu, le gradient spatial de la déformation étant de fait très faible. Les villes de Beauvoisin, Générac et de Gallician ne sont pas affectées par cette subsidence.

Si l'on compare les valeurs de ce champ de vitesses combinées avec les vitesses du nivellement et des quatre stations GPS présentées en section 4.2.1, on obtient la Figure 4-78 suivante.

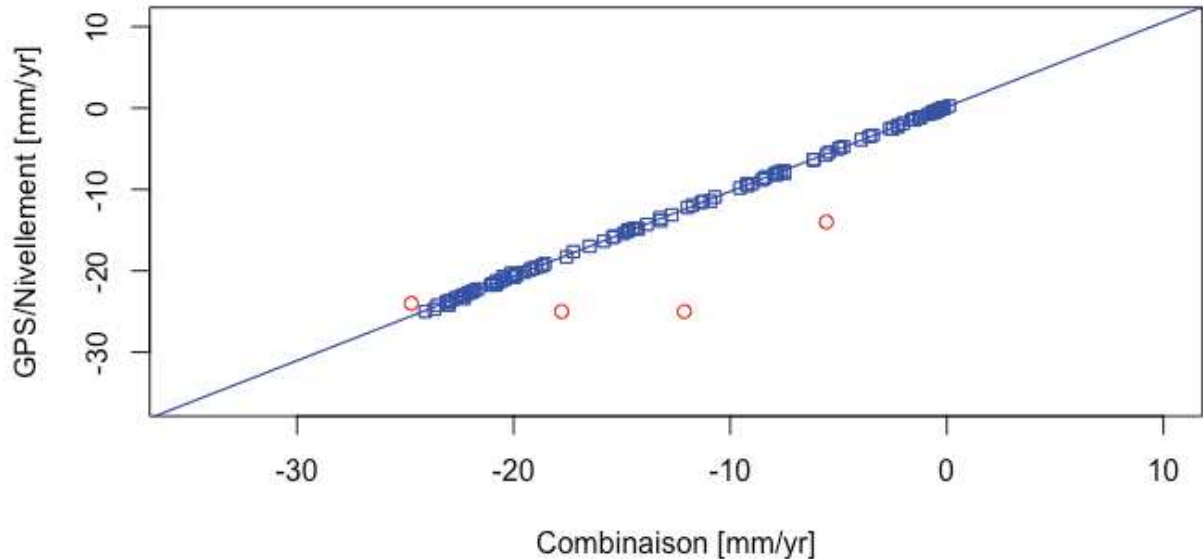


Figure 4-78 : Comparaison entre les vitesses issues du modèle combiné, le nivellement et le GPS à Vauvert.

La station VAUV, mesurant deux ans de déformation à Vauvert, montre une excellente corrélation avec le modèle combiné (< 1 mm/an). Les stations VAU1, VAU2 et VAU3 montrent des vitesses plus élevées en GPS que la solution combinée. Ces stations ayant mesuré la déformation sur une seule année, il est difficile de tirer une conclusion quant à ces différences. Celles-ci peuvent provenir (1) du temps trop court d'observation GPS, l'estimation des vitesses serait affectée par des phénomènes transitoires tel que des signaux saisonniers empêchant un calcul précis des vitesses de subsidence, (2) contrairement à la station VAUV, ces trois stations n'ont pas été mesurées sur la même période que les mesures combinées menant à la Figure 4-77, une évolution de la subsidence est possible, et cette comparaison traite donc de l'étude de mouvements différents. Il est fort probable que les points (1) et (2) soient à l'origine des différences notées sur la Figure 4-78.

4.4.5.3 Indice de fiabilité du champ de vitesses combinées

On calcule ensuite l'indice de fiabilité P_{combi} de la solution, tel que décrit en section 3.3.4.4, en chaque point de la grille, prenant en considération les incertitudes de chaque technique et l'incertitude associée aux interpolations.

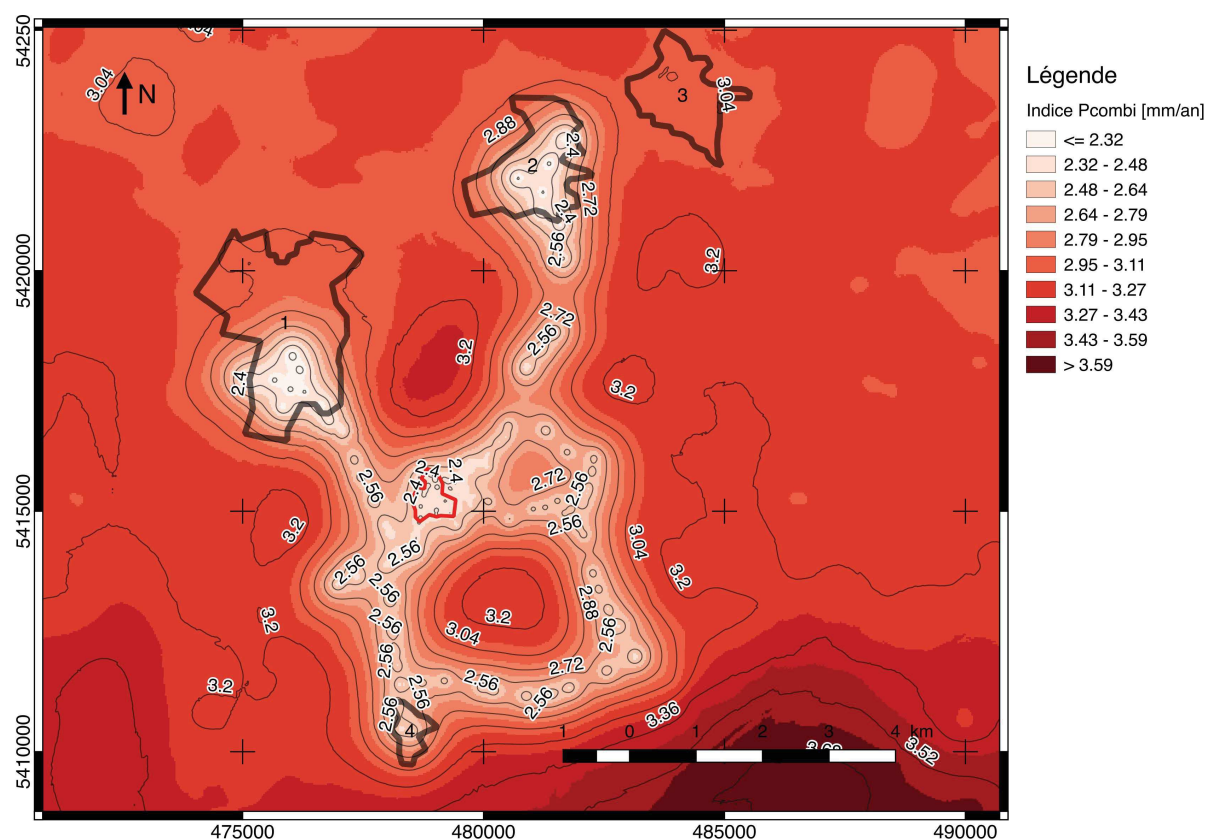


Figure 4-79 : Indice de fiabilité P_{combi} issu de l'application de la méthodologie de combinaison à Vauvert sur données InSAR Sentinel-1a/b (géométries ascendante et descendante) et nivellement. Les zones urbaines (1 : Vauvert, 2 : Beauvoisin, 3 : Générac, 4 : Gallician) sont représentées par un trait noir et l'emplacement des infrastructures de la concession de Vauvert est délimité par un trait rouge.

On observe sur cet indice P_{combi} la même trame principale des mesures de nivellement que sur la Figure 4-76 (b). En effet, tel que décrit en section 4.4.5.2, l'incertitude liée à la technique du krigeage-régression pondérée est principalement liée à la spatialisation de la donnée de prédiction, ici le nivellement. On retrouve donc cet élément ici. En dehors de cette trame l'indice de fiabilité varie dans l'intervalle [3 ; 3.5] mm/an. Ces valeurs sont plus élevées que pour l'application de la méthodologie sur archive Envisat dont l'indice P_{combi} a été décrit en section 4.3.5.3. Ceci provient principalement du plus grand nombre de données utilisées et d'étapes nécessaires à leur combinaison (calcul des trois composantes de la déformation sur double géométrie InSAR).

L'application de la méthodologie de combinaison sur la période 2015-2017 a donc permis de combiner des données de nivellement et InSAR en double géométrie. La double géométrie INSAR a permis le calcul d'un champ de vitesses InSAR combinées verticales. Le modèle de vitesses final, combinant InSAR vertical et nivellement, représente des vitesses liées au mouvement vertical seul de la subsidence. La comparaison avec le GPS a permis de montrer une excellente corrélation au centre du bol (à proximité de la station VAUV), mais des périodes d'observation différentes et des séries temporelles GPS courtes (un an) sur les

autres stations ne permet pas de valider le modèle de vitesses final sur les bords du bol de subsidence.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire deux applications de la méthodologie de combinaison de mesures géodésiques sur la zone d'intérêt de Vauvert.

La ville de Vauvert accueille en effet depuis des décennies une exploitation minière de sel par injection/extraction ayant pour effet un affaissement de la surface du sol. Cet affaissement a été historiquement mesuré à maximum 2.2 cm/an. La forme de la déformation est un bol de plusieurs kilomètres de rayon.

Il est donc apparu intéressant d'utiliser ce site comme test à la méthodologie de combinaison décrite au chapitre 3.

Pour cela des données ont été traitées sur deux périodes distinctes : 2002-2009 et 2015-2017. Ces périodes correspondent aux périodes des données InSAR utilisées, respectivement Envisat et Sentinel-1a/b.

Sur la première période (2002-2009) les données InSAR (vitesses issues d'un traitement SBAS-InSAR sur archive Envisat en géométrie descendante) et les données de nivellement (vitesses calculées sur la même période à partir de mesures annuelles) ont été combinées. Il en résulte un modèle de vitesse selon la ligne de visée du satellite Envisat en géométrie descendante. Le bol de subsidence forme une ellipse de grand axe d'environ 7.1 km de long dans la direction Nord-Est/Sud-Ouest et de petit axe perpendiculaire d'environ 6 km. La magnitude maximale atteint 2.4 cm/an. L'indice de fiabilité correspondant a été calculé dans l'intervalle [2.3 ; 3.2] mm/an.

Sur la deuxième période (2015-2017) les données InSAR (vitesses issues de traitements PS-InSAR sur archive Sentinel-1a/b en géométries ascendante et descendante) et les données de nivellement (vitesses calculées sur la même période à partir des mesures annuelles) ont été utilisées. Pour cela les géométries ascendante et descendante de l'InSAR ont tout d'abord été combinées afin d'obtenir, par différentes méthodes, un modèle de vitesse InSAR vertical. Les différentes méthodes ont été décrites en chapitre 3. La combinaison de mesures géodésiques a donc pu être effectuée selon la verticale. En résulte un bol de subsidence formant une ellipse de grand a axe d'environ 7.6 km de long dans la direction Nord-Est/Sud-Ouest et de petit axe perpendiculaire d'environ 6.9 km La magnitude maximale atteint 2.4 cm/an selon la verticale. L'indice de fiabilité correspondant a été calculé dans l'intervalle [3 ; 3.5] mm/an.

Pour les deux périodes d'application la ville de Vauvert est affectée de vitesses inférieures à 1 cm/an et présentant un gradient spatial de déformation trop faible pour affecter les structures civiles.

Ces résultats permettent maintenant une discussion sur les points suivants :

- Confrontation à un modèle physique de la dynamique du réservoir afin de déterminer si la solution de combinaison permet d'observer l'effet de la structure complexe du sous-sol et son éventuel contrôle de la subsidence
- l'apport de la méthodologie à un cas d'étude de subsidence déjà mesurée par des méthodes de mesures géodésiques séparées,

Ces points sont l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 5

Interprétation, conclusion et perspectives

Sommaire

5.1 Synthèse de la méthodologie.....	200
5.1.1 Rappel des contextes et objectifs	200
5.1.2 Bilan du développement méthodologique	202
5.2 Apport du produit de la méthodologie et confrontation à une inversion de données	203
5.2.1 Evolution de la déformation à Vauvert.....	203
5.2.2 Inversion de données sur les résultats de la combinaison	213
5.2.2.1 Définitions et algorithme utilisé.....	213
5.2.2.2 Application.....	215
5.3 Perspectives	221

5.1 Synthèse de la méthodologie

5.1.1 Rappel des contextes et objectifs

Dans ce manuscrit, j'ai pu décrire le développement d'une méthodologie de combinaison de mesures géodésiques appliquée à l'étude d'une subsidence anthropique long terme. Le développement de cette méthodologie s'est basé sur un contexte qui peut être résumé comme suit.

Parmi les études des déformations de la surface de l'écorce terrestre entrent en jeu les notions de variations spatiales ou d'évolutions temporelles, suivant des fonctions plus ou moins complexes : longueur(s) d'onde(s) et géométrie(s), magnitude(s), orientation(s), vitesse(s), phénomènes transitoires ou saisonniers. Que ce soit pour l'étude de déformations d'origines naturelles (par exemple tassements ou volcanisme) ou anthropiques (par exemple pompage d'eau, d'hydrocarbures, effondrement de toit de mines), tous ces paramètres doivent être étudiés précisément. Pour cette étude, il a donc tout d'abord été nécessaire de lister les différents types de mouvements du sol : subsidence, surrection, glissement de terrain, chute de bloc ou encore effondrement. Devant les caractéristiques différentes de ces mouvements, certains ont été choisis comme cibles d'étude de la méthode de combinaison. Compte tenu de leurs caractéristiques, les mouvements de très grande magnitude et/ou soudains (par exemple chutes de blocs, effondrements), les mouvements trop lents (par exemple évolution lente d'une chaîne de montagne), ou de grande amplitude spatiale (mouvements lithosphériques), n'ont pas été retenus, mais les mouvements de type subsidence ou surrection de magnitudes moyennes, c'est-à-dire millimétrique à pluri-décimétrique annuel sont les mouvements cible de la méthodologie. En effet, ces déformations représentent des aléas pouvant présenter des risques importants pour ces activités humaines, et par conséquent leur surveillance est une obligation, pour les acteurs économiques comme pour l'Autorité Publique.

Ce suivi est communément effectué via l'utilisation de mesures géodésiques. Les plus courantes sont, historiquement (1) le nivellement géométrique, permettant les mesures précises de dénivelées le long de profils, (2) le GNSS (principalement la constellation GPS), permettant des mesures ponctuelles de déplacements dans les trois dimensions de l'espace, à différentes fréquences et sur différentes durées (par exemple de quelques heures par an à une mesure continue), et (3) plus récemment l'interférométrie satellitaire InSAR, permettant des mesures à très haute densité spatiale selon la ligne de visée des satellites. D'autres techniques existent mais n'ont pas été décrites dans ce manuscrit, par exemple l'inclinométrie, la téchéométrie, la corrélation d'images optiques, les mesures LiDAR, ou encore la micro-gravimétrie, même si celle-ci n'est pas une technique exclusivement géodésique.

Les avantages et lacunes de chacune des techniques mentionnées ont été brièvement décrits en chapitre 2, et sont liés principalement aux trois points cités ci-après :

- La facilité de mise en place. Le nivellement est une technique longue à mettre en œuvre et nécessite le suivi de procédures rigoureuses et complexes. La mise en station GNSS est plus simple et nécessite moins de moyens humains. Néanmoins le coût du matériel limite naturellement le nombre de points mesurables. Ce coût pouvant être amélioré avec la mise en place de stations semi-permanentes observées régulièrement (par exemple annuellement). Enfin les constellations de satellites imageurs radar permettent à l'utilisateur d'obtenir des données sans aucune mesure supplémentaire.
- La précision des techniques de mesures est un paramètre important, notamment quand les mouvements à mesurer sont de faibles amplitudes. Le nivellement est une technique de mesures mature dont la précision, selon les conditions de mesures, la procédure suivie, le matériel utilisé, ou encore la longueur des profils mesurés, peut-être inférieure au millimètre, voire dixième de millimètres (Nocquet et al., 2016). Les mesures GPS, dans des conditions particulières (durée d'observation, matériel utilisé, traitement) atteignent aussi des précisions inférieures au millimètre. Enfin l'InSAR permet de quantifier des déformations millimétriques et des vitesses de déformation de l'ordre du mm/an.
- L'intégrité ou la fiabilité des mesures, autrement dit, la validité des incertitudes associées. Les biais et autres erreurs résiduels difficilement réductibles (InSAR, GPS, nivellement) tels que les artefacts atmosphériques de l'InSAR dans certaines zones difficiles (grande variabilité de la troposphère) ou du GNSS épisodique trop court, ou les cheminements de nivellement non fermés (compensés) sur des mailles d'ordre inférieur à leurs extrémités.

En effet, les conditions de mesures, les erreurs de manipulation des instruments lors de leur mise en place, les conditions atmosphériques lors des mesures, l'impossibilité de mesurer de longues séries temporelles ou encore des traitements utilisant des données externes à la précision incertaine, rendent ces précisions en réalité souvent difficiles à atteindre. Devant ces éléments, deux attitudes sont possibles. Tout d'abord (1) une amélioration, technique par technique, de tous les éléments cités, augmentant la précision et la fiabilité de chacun des champs de vitesses correspondant et (2) une combinaison utilisant les avantages de chacune des techniques tout en minimisant les inconvénients, ou au minimum en les prenant en compte. Ces deux attitudes sont compatibles entre elles, le point (2) pouvant se nourrir de champs de vitesses améliorés par le point (1). Le choix a donc été fait de développer le deuxième point. C'est donc en ce sens que la solution de combinaison de mesures géodésiques a été créée.

Les objectifs inhérents à la création de cette méthodologie de combinaison ont été définis, correspondant notamment aux objectifs classiques d'études menées régulièrement par la société Fugro GEOID. Ces objectifs sont directement liés aux contraintes rencontrées lors d'études de mouvements du sol :

- Combiner un nombre variable de champs de vitesses issus de différentes techniques de mesures géodésiques, présentant des densités de mesures et des incertitudes différentes,
- Obtenir (1) un modèle de vitesses spatialement dense et (2) des incertitudes liées aux incertitudes des champs de vitesses initiaux mais aussi à la méthode de combinaison,
- Selon les mesures géodésiques disponibles le modèle de vitesses pourra être calculé selon une ou plusieurs direction(s) spatiale(s), au minimum une, au mieux dans les trois dimensions spatiales,
- Confronter la méthodologie à un cas d'étude et discuter de son apport.

5.1.2 Bilan du développement méthodologique

Afin de répondre aux objectifs résumés ci-avant, la méthodologie de combinaison a été développée au chapitre 3.

Le premier objectif pris en considération a été la nécessité de créer une structure permettant l'utilisation d'un nombre variable de champs de vitesses issus de techniques de mesures différentes (par exemple GNSS, InSAR, nivellement). Cet objectif est rendu nécessaire dans l'optique de l'application de la méthodologie à des cas d'études où les mesures, historiques et/ou actuelles, sont variables. En ce sens la technique du krigeage-régression pondéré a été retenue. En effet, cette technique permet de combiner des champs de vitesses tout en les différenciant par des valeurs de pondérations liées aux incertitudes sur chacun des jeux de données. Une fois cette technique retenue, formant le coeur de la méthodologie, la préparation en amont des champs de vitesses a été décrite.

Cette préparation comprend tout d'abord l'harmonisation des références des différentes techniques. Ensuite, selon les mesures disponibles, la possibilité de mesurer une à trois dimensions spatiales de la déformation a été étudiée. Des techniques de mesures citées, seule une permet des mesures dans les trois dimensions de l'espace : le GNSS. Le nivellement ne mesure que des différences d'altitude, et l'InSAR mesure selon une dimension propre à chaque pixel : la direction entre le satellite imageur et ce pixel. La possibilité de mesurer selon deux géométries différentes en InSAR a été mentionnée, et via différentes hypothèses, l'obtention d'un champ de vitesses 3D a été analysée.

Les incertitudes ont été prises en compte par l'intégration de valeurs de pondération lors de l'étape du krigeage-régression. Ces valeurs de pondération peuvent être modifiées selon des données environnementales externes aux mesures, telle que, par exemple, la connaissance de la stabilité physique des repères de nivellement.

Quelles que soient les techniques utilisées, la méthodologie passe par une étape d'interpolation spatiale des données. L'incertitude finale n'est donc pas seulement liée aux incertitudes propres à chaque jeu de données, mais aussi à l'incertitude liée à l'interpolation.

C'est l'un des avantages de l'interpolation par krigeage, celui-ci permet une estimation de la variance en chaque point estimé, correspondant au carré de l'incertitude de l'interpolation. La création d'un indice de fiabilité, prenant en compte les incertitudes natives des mesures géodésiques ainsi que cette variance du krigeage, a été réalisée.

Toutes ces étapes ont été codées en langage de programmation R. L'utilisation de ce langage, libre, permet en effet un accès à de nombreuses bibliothèques de calcul (notamment d'interpolation par krigeage) et la présence d'une communauté active permet une aide et des débogages rapides. De plus, la possibilité d'intégration des modules créés dans un environnement SIG (QGIS) est un argument nécessaire à l'utilisation future de la solution au sein de l'entreprise Fugro GEOID, présentant la solution sous le nom de GEOMON (inspiré du terme anglais « geomonitring », correspondant au suivi par la mesure physique de déplacements de la surface du sol, de structures anthropiques).

Ainsi, afin de discuter et valider les choix techniques du développement méthodologique, la confrontation à un cas d'étude réel a été effectuée.

5.2 Apport du produit de la méthodologie et confrontation à une inversion de données

5.2.1 Evolution de la déformation à Vauvert

Un site d'étude de confrontation à la méthodologie a dû être choisi. À proximité de Montpellier se trouve un site d'extraction de sel, où la subsidence avérée est mesurée depuis de nombreuses années. Ce site, proche de la ville de Vauvert, (Gard), présente de nombreuses caractéristiques qui ont été présentées en chapitre 4, le rendant idéal pour une telle étude.

Pour la combinaison, trois techniques de mesures distinctes ont été utilisées :

- Le GPS. Quatre stations permanentes ont été mesurées, sur deux ans (2015 à 2017) pour une station, et sur un an (2016-2017) pour trois stations. Les données ont été traitées par le logiciel scientifique Gamit-GlobK.
- L'InSAR. Deux périodes ont été étudiées : la première, 2002-2009, permettant le traitement d'une archive Envisat en géométrie descendante, et une deuxième, 2015-2017, permettant le traitement d'archives Sentinel-1a/b en géométries ascendante et descendante. Le logiciel StaMPS a été notamment utilisé pour le traitement multi-temporel des interférogrammes.
- Le Nivellement. Mesuré annuellement depuis 1995 par l'IGN.

Les données utilisées dans le cadre de l'application de la méthodologie de combinaison correspondent aux périodes mesurées en InSAR et nivellement d'une part (2002-2009) et InSAR, Nivellement et GPS d'autre part (2015-2017). Les caractéristiques différentes

(nombre de techniques de mesures, géométries) permettent une confrontation à deux cas différents sur une même zone d'étude.

Suivant une variante de la méthodologie décrite en chapitre 3, la combinaison InSAR (champ de vitesses en géométrie descendante) et nivellement a été effectuée. De par les caractéristiques de la méthode employée (le krigeage-régression) et les données utilisées (le nivellement comme donnée principale, l'InSAR comme donnée auxiliaire), le résultat de la combinaison est un modèle de vitesse mesurant la composante verticale seule de la déformation et un indice de fiabilité associé.

Suivant une autre variante de la méthodologie, la combinaison InSAR (champs de vitesses en géométries ascendante et descendante) et nivellement a été calculée. Le choix de ne pas utiliser les données GPS dans la solution de combinaison a été fait car (1) l'apport de 4 stations, proche des stations nivelées, est négligeable et (2) cela permet de les utiliser comme contrôle indépendant du modèle final. Les deux géométries InSAR permettent tout d'abord une estimation d'un modèle de vitesses InSAR selon la verticale, et sa combinaison avec le nivellement permet d'obtenir un modèle de vitesses et un indice de fiabilité.

Quelle que soit la variante, des stations GPS régionales ont été utilisées afin d'harmoniser les références de vitesses InSAR, GNSS et nivellement.

Cette application sur le site de Vauvert a donc permis de mettre en lumière les avantages mais aussi les limites actuelles de la méthodologie. Les avantages sont les suivants :

- La possibilité de combiner InSAR (une ou deux géométries), GNSS (mesures permanentes ou non), nivellement, et possiblement tout autre mesure de déplacement (par exemple laser aéroporté LiDAR, station totale, inclinométrie, micro-gravimétrie).
- Utiliser les avantages de chacune des techniques de mesure pour minimiser les inconvénients. Par exemple utiliser la densité de mesures de l'InSAR et la précision du nivellement pour obtenir un modèle de vitesses dense et précis. Cet avantage est double : sur des données archivées il permet d'améliorer la connaissance globale d'une déformation passée. Sur des études futures, il permet une optimisation des réseaux et des temps de mesures, et donc des coûts liés.
- Selon les données disponibles, mesurer une déformation de surface dans une à trois directions spatiales.
- Prendre en considération les incertitudes pendant la combinaison.

Les limites actuelles de la méthodologie sont liées aux points suivants.

- Lors de la combinaison des champs de vitesses InSAR en double géométrie, de nombreuses hypothèses ont été faites. Malgré la validation des résultats de la méthode retenue via un contrôle externe indépendant par la confrontation aux vitesses issues du GPS, ce nombre de points de contrôle est limité (4) et les durées d'observation courtes (1

an pour trois stations, 2 ans pour 1 station). Si une augmentation du nombre de stations permanentes n'est pas à l'ordre du jour sur la zone d'étude, un allongement des séries temporelles sera au minimum nécessaire en vue d'une validation des premiers résultats, et de nouvelles mesures épisodiques sont envisagées.

- La méthodologie de combinaison peut prendre en entrée des valeurs de déformation de la surface, mesurées selon un intervalle de temps suffisant pour que toutes les techniques convergent, avec une incertitude acceptable. Or ce temps varie selon les techniques. La solution de combinaison ne peut donc en aucun cas remplacer l'étude des séries temporelles de chacune des techniques. Cette étude est donc effectuée en amont de l'application de la méthodologie, afin de discuter d'éventuels effets transitoires dont la période serait inférieure à la période considérée pour la combinaison.
- Ce dernier point illustre une limite de la méthode : celle-ci ne permet pas de produire des séries temporelles combinées. Pour cela il serait nécessaire non pas de repenser la méthode, mais de déterminer la possibilité de combiner des valeurs de déplacements sur des périodes temporelles différentes. Ceci afin d'obtenir ces séries temporelles combinées.
- Dans le cas où même la mesure la plus dense n'est pas capable de mesurer un signal sur des zones isolées, à cause d'un couvert végétal trop important par exemple, et qu'aucune autre technique n'y est présente, alors la solution de combinaison donnera tout de même une valeur de déformation. L'indice de fiabilité y sera minimal, il faut néanmoins toujours garder à l'esprit ce qui provient des données originelles et ce qui provient de l'interpolation. De cela dépend l'interprétation finale.

Après avoir traité de la méthodologie et de ses applications au site d'étude de Vauvert, il est nécessaire de discuter de son apport. Cet apport peut-être double : d'une part une connaissance améliorée de l'évolution de la déformation du site et d'autre part le lien entre cette déformation et le cadre structural.

Deux périodes sont considérées : 2002-2009 et 2015-2017. Ces périodes ont été choisies car elles correspondent à deux périodes pour lesquelles des mesures InSAR distinctes sont archivées pour la zone étudiée, et pour lesquelles des mesures autres sont disponibles (nivellement pour la période 2002-2009 et nivellement et GPS pour la période 2015-2017). Les résultats des applications de la méthodologie de combinaison sont des modèles de vitesses et des grilles d'indices de fiabilité associés. Les vitesses résultantes ne sont donc pas calculées sur des intervalles identiques. L'analyse de ces résultats seuls (chapitre 4) est limitée à la discussion sur les vitesses de déformation de surface sur les périodes considérées. Il apparaît intéressant de confronter ces résultats entre eux, afin de déterminer les caractéristiques d'une évolution des vitesses de la déformation, ainsi qu'à des données externes, afin de trouver des éléments d'explication à ces évolutions. Les données externes pouvant être le cadre structural ou encore l'évolution de la production de sel au cours du temps.

Afin de discuter de l'évolution de la subsidence de Vauvert, il est d'abord nécessaire de la quantifier. Les résultats de chacune des combinaisons sont illustrés en Figure 5-1. La différence entre ces combinaisons est quantifiée en Figure 5-4. Les figurés utilisés sur ces figures sont volontairement moins détaillés que sur les figures présentant les résultats en chapitre 4, afin de faciliter l'interprétation et la comparaison avec les éléments externes.

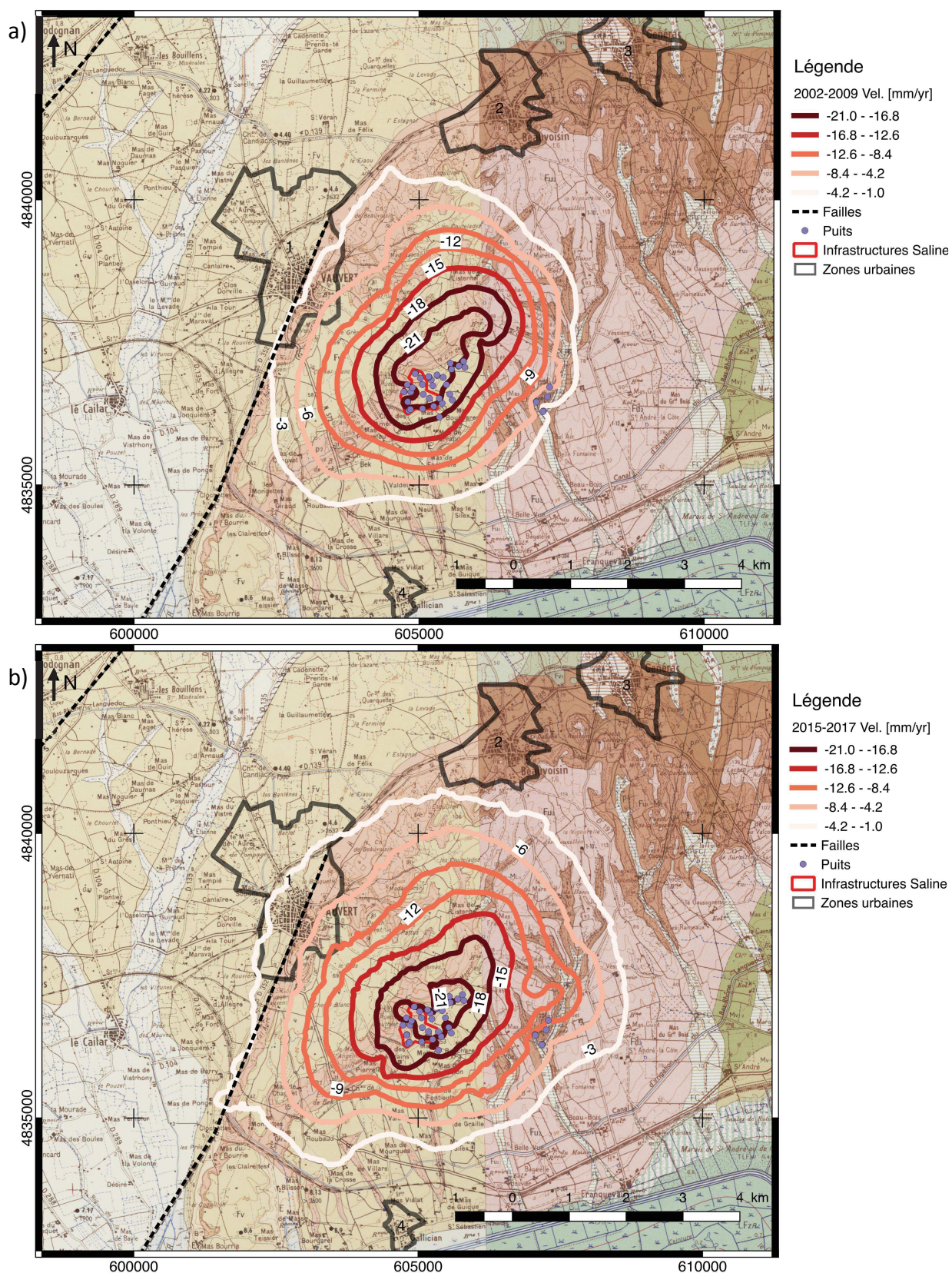


Figure 5-1 : Iso-contours de la subsidence (vitesses verticales en mm/an) à Vauvert issus des modèles de vitesses combinés sur les périodes (a) 2002-2009 et (b) 2015-2017. Fond de carte géologique au 1:50000 (BRGM).

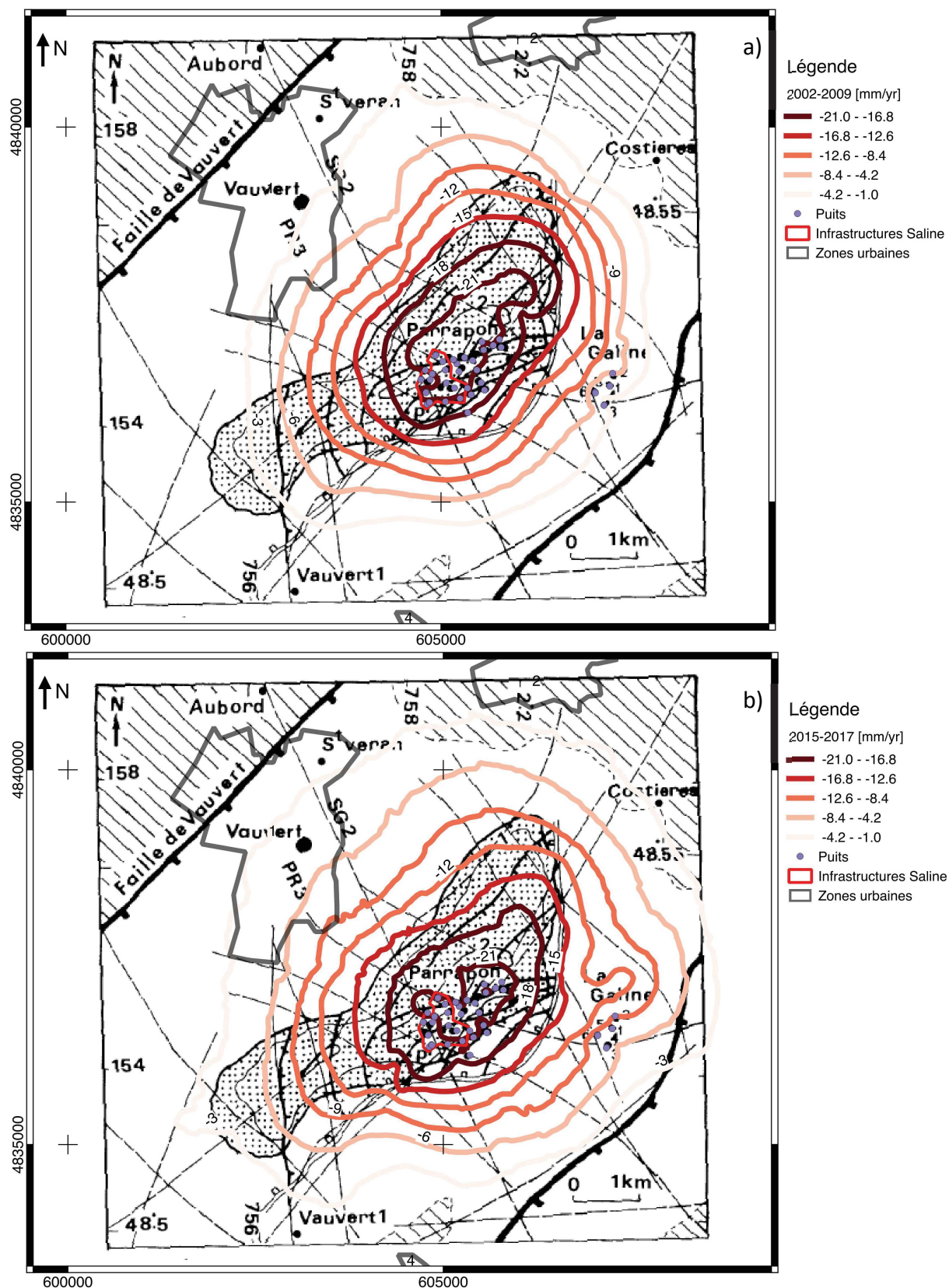


Figure 5-2 : Iso-contours de la subsidence (vitesses verticales en mm/an) à Vauvert issus des modèles de vitesses combinés sur les périodes (a) 2002-2009 et (b) 2015-2017. Fond de carte selon plan de position des unités salifères autochtones et allochtones et structures associées (Valette et al., 1995).

Les caractéristiques de la subsidence sur chacune des périodes sont les suivantes (rappel du chapitre 4) :

- La période 2002-2009 est affectée d'une subsidence moyenne maximale de 2.2 cm/an sur une emprise formant un bol de subsidence en ellipse de grand axe d'environ 7.1 km de long selon une direction d'environ 40° par rapport au Nord. L'incertitude liée à ces vitesses varie dans l'intervalle [2.3 ; 3.2] mm/an. Le maximum de subsidence est situé à environ 500 m au Nord/Nord-Est des infrastructures centrales de la saline (Figure 5-1 et Figure 5-2).
- La période 2015-2017 est affectée d'une subsidence moyenne maximale de 2.4 cm/an sur une emprise en surface formant une ellipse de dimensions et forme différentes de la période 2002-2009. En effet, le grand axe d'environ 7.6 km de long est orienté selon un angle d'environ 45° par rapport au Nord. L'incertitude liée à ces vitesses varie dans l'intervalle [3 ; 3.5] mm/an. Le maximum de subsidence est situé à quelques centaines de mètres (environ 400 m) plus au Sud que lors de la première période (Figure 5-1 et Figure 5-2).

Le fond de carte géologique ainsi que le figuré spécifique aux failles notifiées sur ce fond de carte (Figure 5-1) permet d'observer le lien éventuel entre la déformation de surface et le cadre structural. Selon la carte géologique, la faille de Nîmes, visible dans l'angle Nord-Ouest des cartes, a une orientation de l'ordre de N40°E avec un pendage Sud-Est. La faille de Vauvert est quant à elle divisée en deux sections, la première au Sud, orientée à N31°E et la deuxième, traversant la zone urbaine de Vauvert, orientée à N22°E. Néanmoins Valette et Benedicto (1995) figurent cette dernière avec une orientation d'environ N45°E et une localisation plus au Nord (Figure 5-2). Les orientations des grands axes des ellipses décrivant les emprises des bols de subsidence sur les deux périodes étudiées sont très proches de cette dernière valeur.

La faille de Vauvert semble donc être une barrière naturelle à l'extension en surface de la partie Ouest du bol de subsidence. Malgré une extension globale du bol entre la première et la deuxième période étudiée, celle-ci est en effet plus faible vers l'Ouest (- 2 mm/an) et plus forte à l'Est (jusqu'à - 8 mm/an). Néanmoins les faibles valeurs d'évolution de la subsidence à l'Ouest peuvent être mises en doute car proches voire inférieures à l'incertitude associée aux champs de vitesses. Les valeurs à l'Est sont largement supérieures à l'incertitude, montrant donc une accélération de la subsidence. Enfin au Nord des infrastructures de la saline une diminution de la subsidence est au contraire mesurée. Tout comme sur la partie ouest de la subsidence, les magnitudes mesurées sont très faibles. Il apparaît ainsi que le point le plus intéressant de la comparaison des solutions concerne l'augmentation de la subsidence, proche du site de la Galine (environ 500 m au Nord de ce site, Figure 5-1 (b) et Figure 5-2 (b)). Or, tel que décrit en chapitre 4, ce site est depuis fin 2015 sujet à des purges de puits, purges qui n'ont pas eu lieu au cours de la première période étudiée. La possibilité d'un lien direct entre la purge et cette accélération localisée de la subsidence, atteignant - 8 mm/an, est donc très forte.

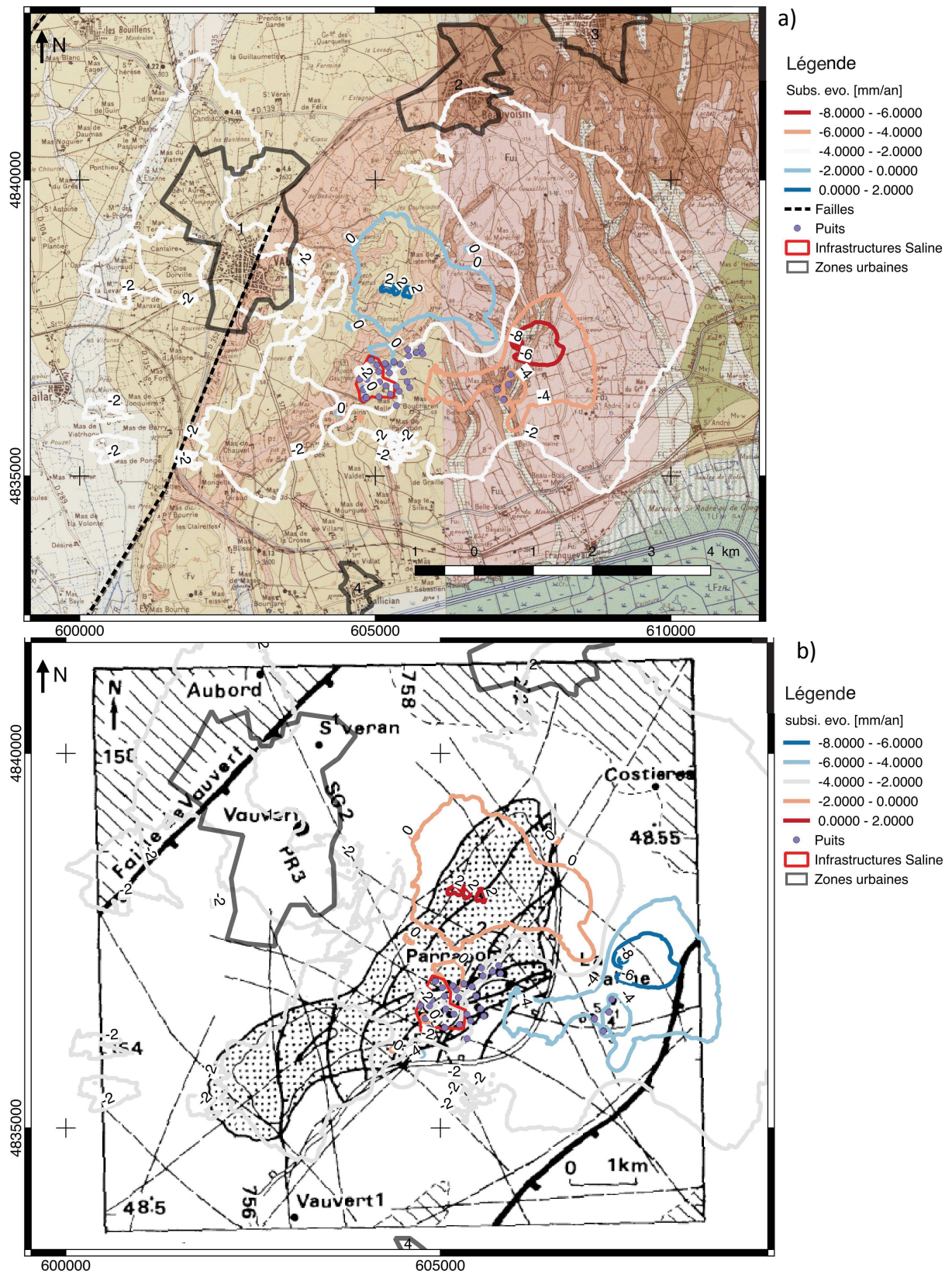


Figure 5-3 : Iso-contours des différences entre les modèles combinés (2015-2017) – (2002-2009). (a) Fond de carte géologique au 1:50000 (BRGM) et (b) Fond de carte selon plan de position des unités salifères autochtones et allochtones et structures associées (Valette et al., 1995).

En dehors de cette zone, les faibles valeurs observées (environ - 2 mm/an) d'augmentation de la subsidence observées ne peuvent être reliées à l'évolution de la production. En effet, la production moyenne annuelle a diminué de 26 420 T/an entre les deux périodes étudiées (Figure 5-5), représentant une diminution de 2.6%. Cette diminution, ramenée en termes de volume, correspond à 12 231 m³/an. Or le volume en surface issu de la différence entre les deux solutions (Figure 5-3, la valeur en chaque pixel est multipliée par la surface du pixel et le total est sommé) est d'environ 349 m³ seulement, correspondant à 755 T de sel. Il apparaît ici que l'évolution de la production n'explique pas la totalité de la différence globale de subsidence mesurée entre les deux périodes.

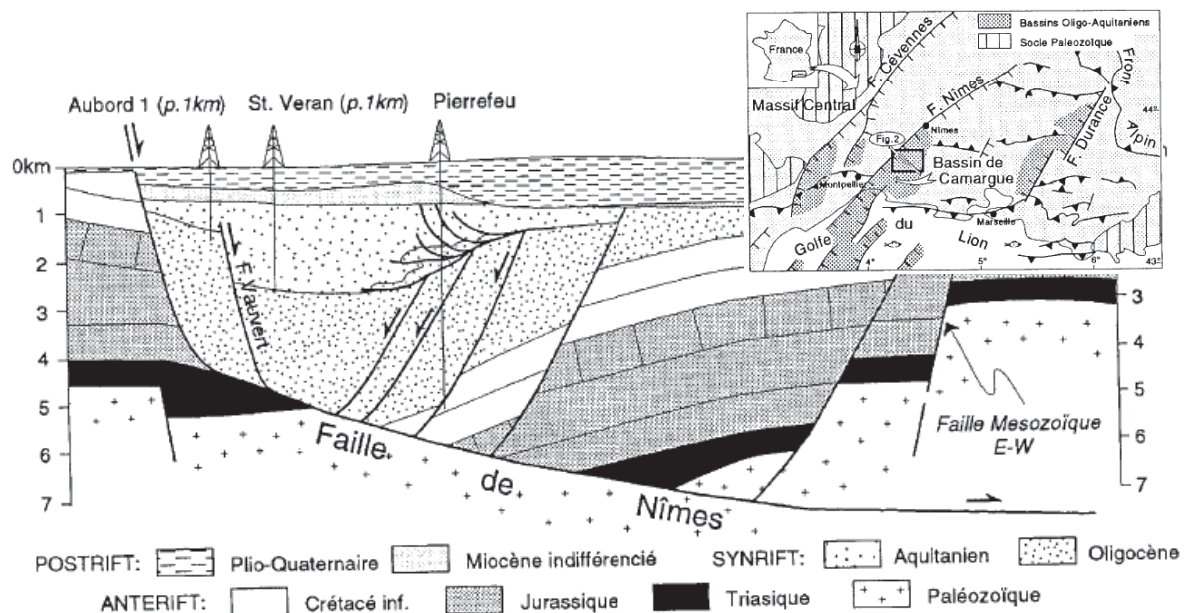


Figure 5-4 : Coupe géologique (NW-SE) à travers le bassin de Camargue, passant par le bol de subsidence de Vauvert (Localisation de la carte en encadré. Valette et al., 1995).

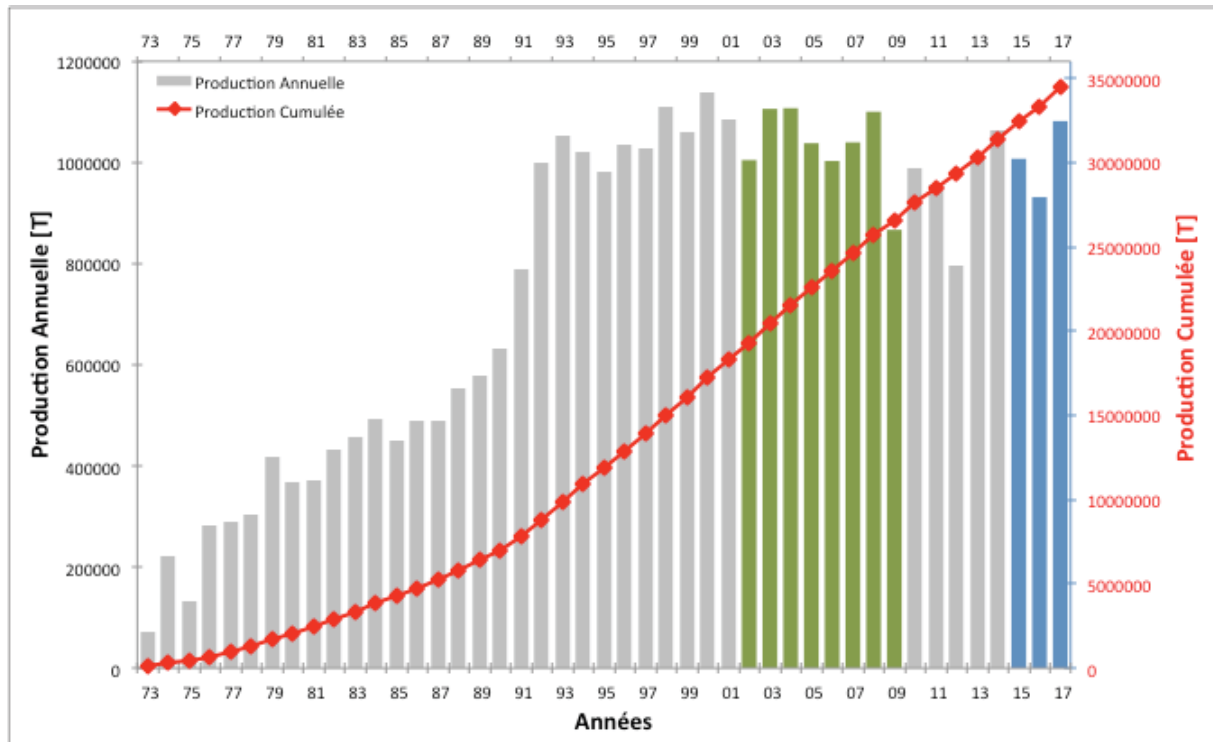


Figure 5-5 : Evolution de la production de la saline de Vauvert, de 1973 à 2017 (Données KEM ONE). Rouge : production cumulée depuis 1973, vert : production sur la période 2002-2009, bleu : production sur la période 2015-2017.

L'accélération de la subsidence affecte donc peu l'Ouest du bol de déformation. La faille de Vauvert n'atteint pas la surface (Figure 5-4) mais s'arrête localement à environ 1 km de profondeur. Les faibles vitesses de subsidence mesurées au-delà (à l'Ouest) de la faille de Vauvert montrent donc un faible effet de propagation de la déformation. Ce n'est pas la différence de faciès géologiques qui est en cause, car il faut atteindre la faille de Nîmes pour retrouver des formations anté-rift du Jurassique et Crétacé inférieur. Enfin la Figure 5-2 illustre en carte la localisation des unités respectivement autochtone et allochtone liée aux décollements (chapitre 4). La superposition de (1) l'évolution de la subsidence entre les périodes étudiées, (2) la carte géologique et (3) le plan de position des unités salifères autochtones et allochtones et structures associées, ne met pas en évidence un lien direct entre cadre géologique et évolution de la subsidence. Les éléments principaux suivants sont donc retenus :

- Entre les deux périodes de mesures, le centre de subsidence est mesuré avec une localisation constante, à quelques centaines de mètres au Nord-Est des infrastructures principales de la Saline,
- Est observée une accélération globale de la subsidence : en termes d'amplitude maximale et d'emprise spatiale,
- Cette accélération est surtout marquée à l'Est du bol de subsidence.

Ce n'est pas une augmentation de la production entre les deux périodes qui est à l'origine de l'accélération globale. De plus les valeurs de cette accélération sont légèrement plus faibles en comparaison des incertitudes des vitesses liées. Il n'est donc pas possible de conclure quant à la possibilité d'un lien entre production totale, extension du bol et accélération globale récente de la subsidence.

Ensuite est observée une proximité entre la zone montrant l'accélération maximale de la subsidence et le site de la Galine. Les purges de puits depuis 2015, expliquent cette accélération. On peut en effet assimiler les purges des puits comme une reprise locale brutale de la production.

Néanmoins certaines problématiques ne sont pas résolues, telles que :

- L'agrandissement du bol peut-il être dû à une migration verticale de la source (les profondeurs d'extraction) ?
- Est-il possible de corréler directement la différence de volume en surface et différence de volume produit ?
- Le cadre structural seul (notamment la présence de failles et leur orientation) peut-il expliquer la forme en ellipse de la subsidence ou d'autres éléments sont à considérer, tels que le rôle de l'emplacement des sources/puits ?

Ces questions sont discutées avec l'application d'un algorithme d'inversion de données (les modèles finaux de vitesses) permettant d'obtenir un déficit de volume (l'extraction) et la localisation d'une source, à l'origine de la déformation de surface.

L'application de la méthodologie de combinaison sur deux périodes différentes permet une étude de l'évolution de la subsidence à Vauvert. Cette étude amène à de nouvelles problématiques rendant intéressante la confrontation entre ces données et un algorithme d'inversion de données (Furst, 2018). Ceci afin d'estimer les caractéristiques physiques (évolution des volumes extraits, point(s) source(s)) à l'origine de cette évolution de la déformation. L'application d'un tel algorithme permettra de plus de discuter de l'origine de l'hétérogénéité de la déformation ainsi que son évolution face à un modèle simple de point source (Mogi, 1958).

5.2.2 Inversion de données sur les résultats de la combinaison

5.2.2.1 Définitions et algorithme utilisé

Afin de relier la déformation mesurée en surface aux caractéristiques du réservoir en profondeur, une inversion basée sur un modèle de Mogi (Mogi, 1958) est utilisée. Ce modèle permet de modéliser les caractéristiques physiques simplifiées du réservoir. Puisque le bol de subsidence peut être assimilé à une sphère, au premier ordre, nous pouvons supposer que l'extraction du sel des couches profondes peut être assimilée à une source ponctuelle.

Le modèle considère une source sphérique dans un demi espace élastique homogène. Cette source est définie par un rayon a et un centre de profondeur z orthogonale à la surface (plan pour lequel $z = 0$). Une pression P , uniforme, est appliquée à la surface de cette source. Ces éléments mènent à un système à quatre variables (Figure 5-6) : les trois dimensions spatiales $\vec{x}(x_s, y_s, z_s)$ et la pression P . Le modèle prédit le déplacement de surface tridimensionnel $\vec{u}(u_x, u_y, u_z)$ selon un vecteur unitaire $\vec{n}_1$ dans la direction passant par la source et le point d'observation, tel que :

$$\vec{u}(a, R, P, \vec{n}_1) = \frac{(1 - \nu)Pa^3}{\mu R^2} \vec{n}_1$$

Avec $R = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (-z_s)^2}$ la distance entre le point d'observation et la surface $(x, y, 0)$, ν et μ respectivement le coefficient de Poisson et le module de cisaillement.

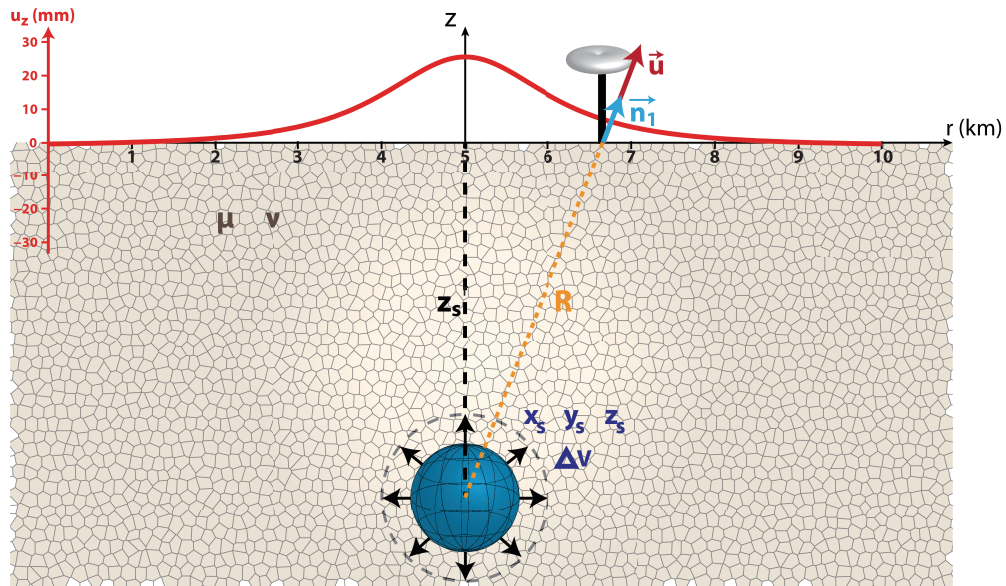


Figure 5-6 : Représentation de la variation isotrope d'un volume ΔV inclus dans un demi espace élastique homogène à 1500 m de profondeur (d'après Mogi, 1958). Mouvements verticaux (courbe rouge) et basculement (courbe verte) associés. (Modifié d'après Furst, 2018).

Si l'on introduit dans l'équation précédente le changement volumétrique ΔV associé à la déformation tel que :

$$\Delta V = \frac{\pi}{\mu} Pa^3$$

On obtient :

$$\vec{u}(R, \Delta V, \vec{n}_1) = \frac{1 - \nu}{\pi R^2} \Delta V \vec{n}_1$$

L'incertitude δV correspondante est donnée par l'équation (Furst, 2018) :

$$\delta V = RMS_{tilt} / (\alpha_{max} - \alpha_{min})$$

Avec RMS_{tilt} le résidu moyen entre les valeurs observées et les valeurs modélisées, α_{min} et α_{max} les valeurs respectivement minimales et maximales des composantes de $\vec{\alpha}$, avec α le vecteur modèle de l'équation de Mogi.

Par conséquent, la déformation de la surface peut être obtenue en utilisant soit la variation de volume de la source ΔV soit le rayon associé à la pression P . Néanmoins, le rayon a de la source étant souvent inconnu, le changement de volume de la source ponctuelle est plus communément estimé que les changements de pression (Mossop et Segall, 1999). Il est cependant nécessaire d'appliquer un certain nombre de simplifications et d'hypothèses telles que :

- La source est considérée ponctuelle. Cette approximation est considérée valable tant que la profondeur de cette source est au moins trois fois supérieure à son rayon (Battaglia et al., 2013),
- Le demi espace est considéré élastique et homogène,
- La source est ici unique et considérée sphérique, pour les raisons évoquées précédemment : la subsidence en surface peut être assimilée à un bol sphérique en surface, au premier ordre,
- La pression est considérée constante à la surface de la source,
- Dans le cas d'une forte dépression, le volume final peut être négatif, ce qui est physiquement impossible.

Les déplacements produits par les changements de volume ou de pression sont ici introduits à l'aide des modèles de vitesses issus de l'application de la méthodologie de combinaison sur deux périodes distinctes (chapitre 4). L'inversion de ces données s'effectue par itérations successives de l'estimation des quatre paramètres (trois positions et ΔV). Ainsi, un ensemble optimal de ces paramètres du modèle physique doit produire des données modélisées proches des observations et de leurs incertitudes. Néanmoins la notion de paramètres optimaux n'est pas triviale. Est utilisé un algorithme d'optimisation semi-déterministe de recherche de ces paramètres développé par Mohammadi et Saïac (2003). L'algorithme d'inversion utilisé a été développé dans le cadre de la thèse de S. Furst (2018).

5.2.2.2 Application

Les vitesses issues de la combinaison de données géodésiques sur les périodes 2002-2009 et 2015-2017 (chapitre 4) sont inversées. Les données sont moyennées sur une grille au pas de 100 m, afin de réduire le temps de calcul. Les paramètres suivants de la source sont calculés :

- Les coordonnées planimétriques Nord et Est. L'algorithme traitant les données en termes de distances, ces coordonnées sont en mètres, ici données en projection UTM 31N.
- La profondeur de la source, distance relative à la surface, en mètres.
- Le différentiel de volume de la source à l'origine de la déformation de surface, en m^3 . Ce différentiel se référant à des vitesses annuelles, cette valeur est donc à interpréter en m^3/an , dans l'intervalle considéré.

Contrairement aux résultats de volumes, les résultats de position de la source sont donnés sans valeurs d'incertitude, l'algorithme n'étant encore en mesure de donner ce type de valeurs. Les résultats sont résumés dans le Tableau 10 ci-après.

	2002-2009	2015-2017
E (m)	605 252	605 277
N (m)	4 837 290	4 837 180
Z (m)	- 1 558	- 1 998
$\Delta V(\text{m}^3/\text{an})$	- 288 269	- 411 768
$\delta V(\text{m}^3/\text{an})$	29 696	22 092

Tableau 10 : Paramètres de la source de subsidence calculés par application de l'algorithme d'inversion (Furst, 2018) sur modèles de vitesses resp. 2002-2009 et 2015-2017.

La stabilité de la position planimétrique (X,Y) de la source semble être liée au fait que la méthode ne considère qu'un seul point source. En effet, de nouveaux puits ont été créés entre la première et la deuxième période. Ces nouveaux puits étant proches des anciens, leur position moyenne varie trop peu pour que la position de la source moyenne soit clairement impactée. Seul un faible déplacement (une centaine de mètres) vers le Sud-Est est mesuré. Cela pouvant être dû à la réactivation des puits de la Galine par les purges.

Les valeurs de profondeur de la source sont dans un ordre de grandeur cohérent avec la littérature sur le sujet à Vauvert (Valette, 1995) puisque l'on observe des profondeurs de respectivement 1558 m et 1998 m.

Ces valeurs augmentent donc entre les deux périodes de manière significative (environ 22% d'augmentation). Cette différence peut s'expliquer par de nouveaux puits en activité entre les deux périodes. Les cavités, dans ces nouveaux puits, se forment d'abord au fond, à la profondeur maximale. Au cours de la vie des puits le toit des cavités saline remontent vers la surface, diminuant ainsi la profondeur moyenne du centre de la source. Ainsi la création de nouveaux puits augmente la profondeur moyenne des puits.

Enfin, les valeurs de volumes sont dans un ordre de grandeur proche des valeurs de production. En effet, passer ces valeurs en tonnes (par application simple de la masse volumique du sel, de 2.16 g/cm^3) rend des valeurs d'environ 623 000 T/an pour la première

période et 889 000 T/an pour la deuxième période. La production ayant été mesurée respectivement en moyenne à 1 033 466 T/an et 1 007 045 T/an (Figure 5-5). Si au premier ordre les valeurs sont cohérentes, l'inversion de données montre une augmentation de la production, ce qui n'est pas vérifié avec les données réelles, montrant au contraire une très faible diminution. La valeur théorique de la masse volumique du sel n'a pas non plus été vérifiée, le tonnage de sel produit pouvant inclure une portion d'eau.

Ainsi, les limites de l'application de l'inversion sur un site d'étude tel que Vauvert sont connues (par exemple un seul point source ponctuel sphérique, homogénéité du semi-espace élastique infini) et ne permettent pas, en l'état, d'estimer avec précision les caractéristiques physiques de l'évolution du réservoir à l'origine de la déformation de surface. L'objectif de l'application de l'inversion de données n'est donc pas de discuter de l'évolution du réservoir en profondeur, mais de discuter de l'effet des hétérogénéités du sol sur la déformation de surface. Ces hétérogénéités peuvent notamment être liées au cadre structural et contraindre la déformation (forme, magnitude, gradients). Ainsi, les modèles de déformation de la surface prédits par l'inversion, caractérisés par les paramètres cités en Tableau 10, sont illustrés en Figure 5-7. Les résultats sont des modèles de vitesses verticales. La forme de bol de subsidence et les iso-contours de la déformation sont observés comme concentriques, tels qu'attendus au regard des caractéristiques du modèle utilisé (un seul point source et homogénéité du sous-sol).

Ensuite, au regard des limitations de la méthode d'inversion citées précédemment, il n'apparaît pas utile de discuter l'évolution de la subsidence par différence entre les modèles de vitesses présentés en (Figure 5-7), ne connaissant pas les incertitudes associées. Faisant l'hypothèse que ces incertitudes sont constantes entre les deux périodes, il apparaît au contraire plus intéressant de soustraire les vitesses issues de ces modèles directs aux vitesses issues de la méthodologie de combinaison. Les résultats sont illustrés en Figure 5-8.

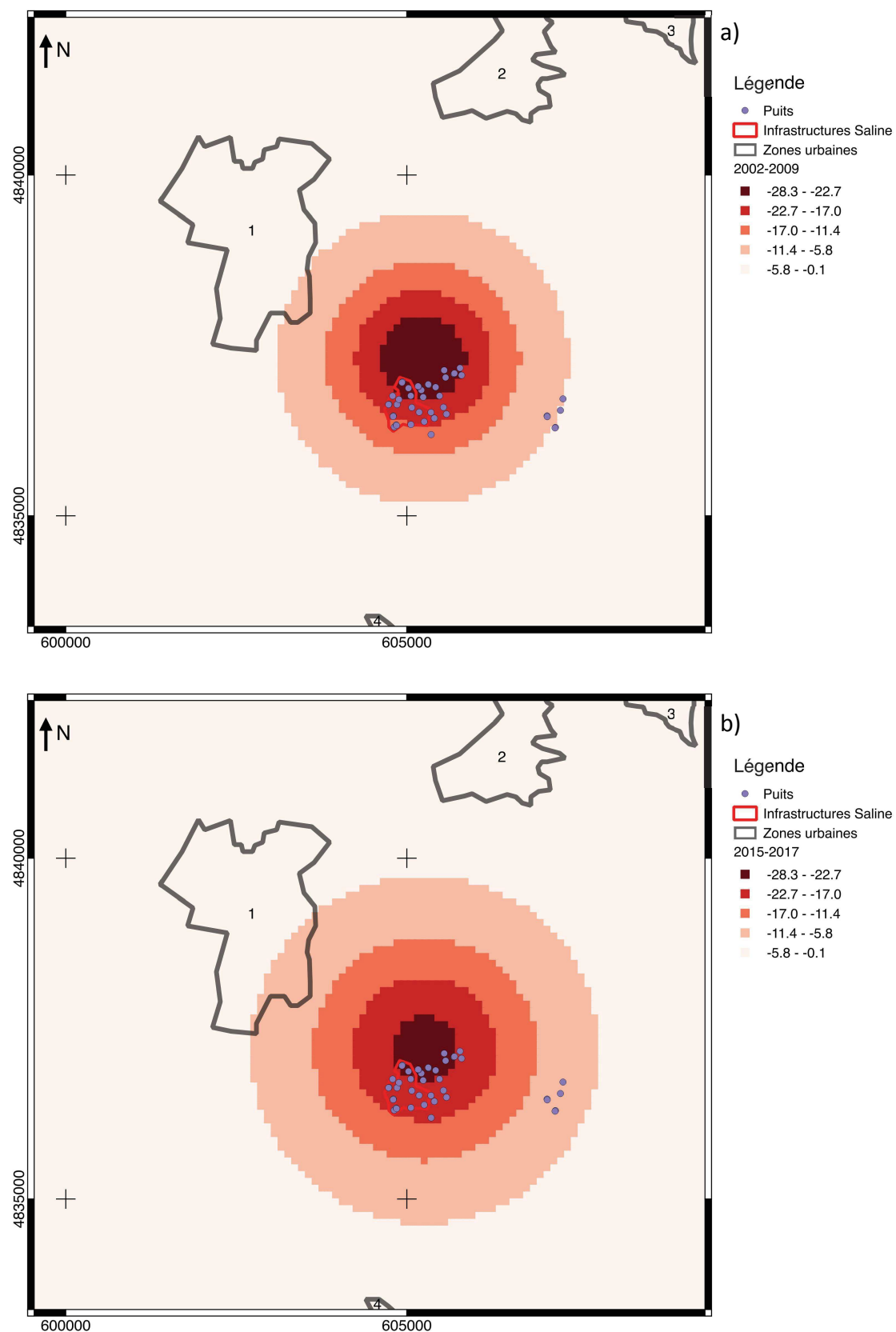


Figure 5-7 : Modèles synthétiques issus des meilleurs combinaison de paramètres issus de l'inversion de données (Mogi, 1958 ; Furst, 2018) issues de l'application de la méthodologie de combinaison à Vauvert sur la période (a) 2002-2009 et (b) 2015-2017. Vitesse en [mm/an].

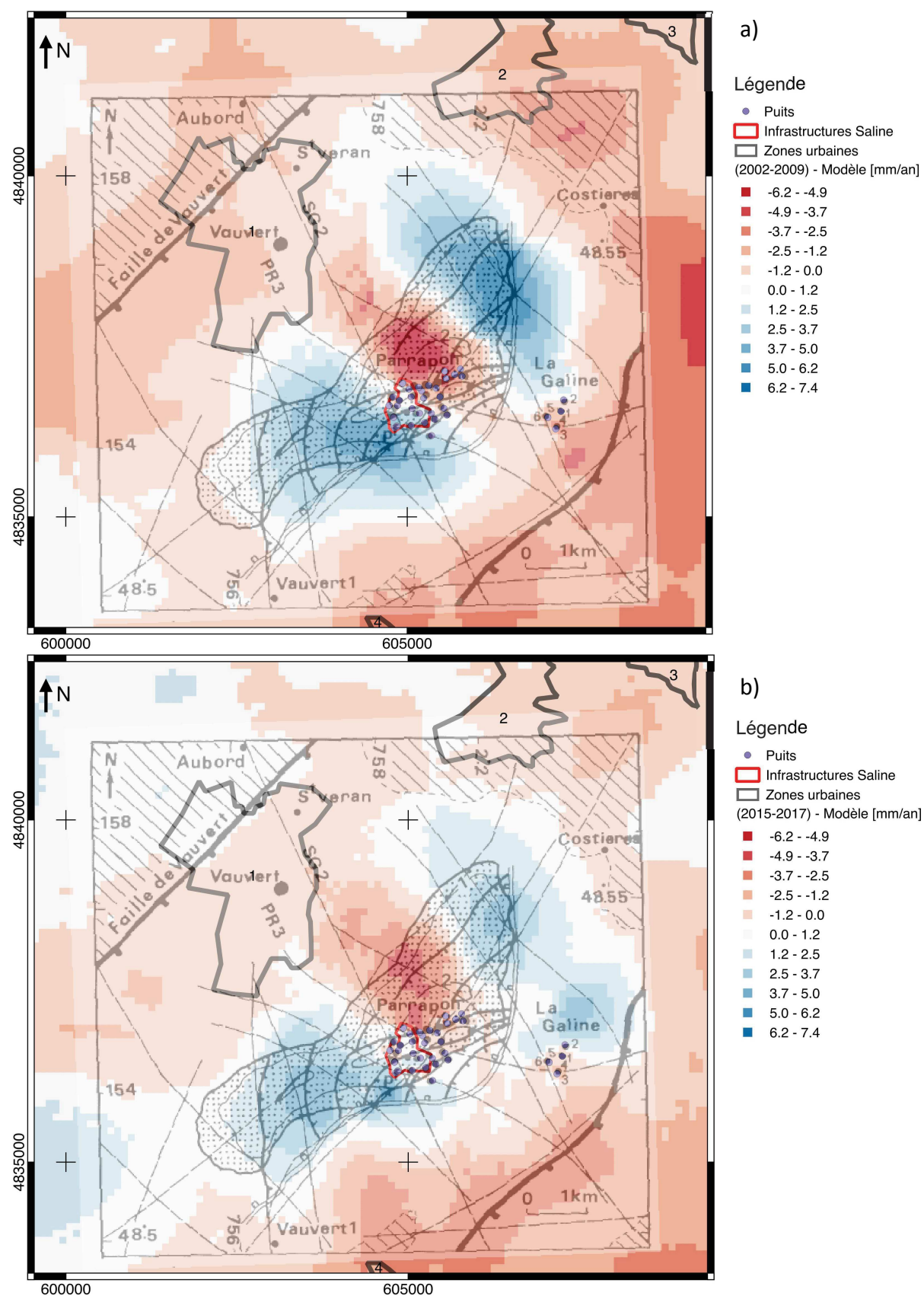


Figure 5-8 : Différence entre (1) les modèles synthétiques issus des meilleures combinaisons de paramètres calculés par l'inversion de données (Mogi, 1958 ; Furst, 2018) et (2) les résultats issus de l'application de la méthodologie de combinaison au cours des périodes (a) 2002-2009 et (b) 2015-2017

Ces comparaisons (Figure 5-8), confrontées au plan de position des unités salifères respectivement autochtones et allochtones (Valette et al., 1995), apportent les éléments de discussion suivants. Tout d'abord elles montrent que l'une des hypothèses suivantes est limitante :

- L'isotropie du milieu de déformation utilisée par l'inversion : une orientation dans la direction de l'axe correspondant à la longueur maximale de l'unité allochtone est montrée, quelle que soit la période de mesures,
- Une source unique permet d'obtenir un modèle satisfaisant : le nombre réel de sources est supérieur à un et doit être pris en compte.

En surface, la forme réelle du bol de subsidence est une ellipse. Il en résulte des surfaces, au Nord-Est et au Sud-Ouest, où la différence entre modèle et valeurs mesurées est positive. Au centre l'effet inverse est observé. Donc l'extension spatiale de la déformation en ellipse est compensée par une déformation moindre en son centre

Sur la deuxième période de mesures, on retrouve tout d'abord la même différence entre l'ellipse observée sur le modèle issu de la combinaison et le modèle direct, ce qui confirme l'interprétation faite ci-avant : un contrôle par le cadre structural en profondeur est visible en surface. De plus, une nouvelle hétérogénéité non expliquée par le modèle est présente au Nord du site de la Galine. Ce point a déjà été observé en section précédente. L'interprétation de cette hétérogénéité locale serait une accélération de la subsidence proche de ces puits historiques, purgés depuis Novembre 2015. Ainsi, en plus de la limite majeure citée lors de l'étude de la première période (absence de prise en compte de la structure géologique du sous-sol par le modèle direct), l'application d'un seul point source est ici problématique, puisque la production est effectuée sur deux sites non co-localisés.

Ainsi la réponse en surface au retrait de matière en profondeur est contrôlée par les structures présentes entre la source et la surface. De plus, si l'on calcule la différence de volume totale ΔV_t telle que, pour un nombre n de pixels i :

$$\Delta V_t = s_{pixel} \sum_{i=1}^n \Delta M_i$$

Avec s_{pixel} la surface d'un pixel (ici 10 000 m²), ΔM la valeur en chaque pixel de la différence entre la solution de combinaison et la valeur estimée par le modèle direct.

Ensuite, le résultat ΔV_t est ramené à une masse de sel : on obtient un total d'environ - 51 507 T pour la première période et environ - 4 795 T pour la deuxième. Soit des différences inférieures à 5% de la production totale annuelle, malgré des incertitudes sur ΔV inconnues. Le modèle semble donc bien décrire un volume déplacé en surface cohérent avec les mesures de la déformation. L'unique point source semble être une approximation dont l'effet n'est pas visible. Puisque la spatialisation de la déformation (la forme en bol) ne suit

pas la spatialisation de l'emplacement des puits, un modèle avec autant de points sources que de puits ne semble pas être un test utile sur cette période. La limite majeure sur cette première période est donc l'absence de prise en considération de la structure géologique du sous-sol.

5.3 Perspectives

Les sections précédentes ont permis de montrer l'apport de la solution de combinaison à un cas d'étude réel : l'extraction de sel à Vauvert. Ce cas d'étude présente des caractéristiques que l'on peut considérer comme courantes, si l'on se réfère à l'expérience acquise sur de nombreux autres cas d'études au sein de la société Fugro GEOID. On observe en effet une déformation de la surface directement corrélée à une activité extractive, ici de saumure.

Afin de décrire cette déformation et ses hétérogénéités, une confrontation à l'application d'un algorithme d'inversion de données a été effectuée. La discussion des résultats a permis de mettre en évidence une orientation préférentielle de la subsidence selon un axe corrélé à l'orientation des structures du sous-sol. Cette déformation en surface est, au premier abord, constante au cours du temps, tant en termes de dimension de la zone affectée en surface que de magnitudes. De plus, si l'on s'intéresse plus en détails à ces évolutions, on observe une accélération (de l'ordre de -8 mm/an) entre les périodes 2002-2009 et 2015-2017, accélération dont la provenance est expliquée par les purges de puits sur le site de la Galine depuis fin 2015. La capacité de la solution de combinaison à améliorer la connaissance de la déformation de surface sur un cas d'étude comme la subsidence de Vauvert est donc prouvée. Néanmoins il apparaît nécessaire de confronter la méthodologie à différents cas de figures (par exemple mouvements de translation tels que glissements de terrain, surrections localisées, subsidence non constante). Nul doute que ce type de problématique récurrente dans les domaines liés à l'activité de Fugro GEOID amènera de nouveaux sites de tests dans un futur proche.

De plus, l'aspect transitoire n'est pas pris en compte dans la méthodologie, puisque les données de Vauvert ont été traitées en termes de vitesses sur respectivement 7 ans et 2 ans. Dans le cadre de projets où les vitesses sont constantes, ou assimilées constantes sur les périodes considérées, cela ne pose pas de problème d'interprétation. Néanmoins dans le cadre d'études présentant des mouvements transitoires et/ou cycliques, les vitesses long-terme montrent leur limite, ne permettant pas une étude de la déformation voire pire, menant à une interprétation erronée. Ce type de mouvements peut être notamment présent dans le cadre de l'étude de mouvements de surface liés à l'évolution du niveau d'une nappe phréatique, remplie irrégulièrement par les apports en eau et dont le pompage est lui aussi irrégulier (saisonnalité). Ainsi il pourra apparaître nécessaire d'appliquer la méthodologie de combinaison sur des données de déplacements sur de courtes périodes et

de manière successive, afin de discuter de l'évolution d'effets transitoires, ce que la méthodologie de combinaison permet.

La méthodologie de combinaison permet, suivant les données disponibles, de calculer des modèles de vitesses dans les trois directions spatiales de la déformation. Néanmoins, tel que montré dans les chapitre 3 et chapitre 4, cela nécessite d'accepter des hypothèses fortes. La confrontation à des données externes (ici GPS) a permis de valider partiellement ces hypothèses sur le site de Vauvert pour la période 2015-2017. Partiellement car ces données GPS ne sont représentées que par 4 stations dont trois ne mesurant qu'un an. Il sera ainsi nécessaire de valider de manière plus fiable ces hypothèses, au minimum en augmentant les durées d'observation, au mieux en augmentant le nombre de stations GPS sur des points stratégiques (bordures du bol de subsidence). Ce dernier point n'est pas à l'ordre du jour, il pourra donc être nécessaire d'utiliser un autre cas d'étude afin de valider ces hypothèses.

Enfin, actuellement, les scripts sont écrits en langage R, et lancés individuellement sous RStudio, pour la majorité, d'autres sont écrits en langages Matlab (notamment l'utilisation des stations GPS régionales comme référence des champs de vitesses InSAR), ou encore en C-Shell. Dans un objectif d'utilisation des algorithmes en production, il sera nécessaire de modifier ces scripts afin de les intégrer dans une solution logicielle SIG (QGIS). Plusieurs avantages à cette intégration :

- Tout d'abord la simplification des étapes de calcul. Une seule interface permettant en effet une centralisation de tous les fichiers, d'entrée, intermédiaires, et de sortie/résultats.
- Cette simplification de la procédure de calcul doit permettre, à terme, de rendre le logiciel accessible sans connaissance particulière du code R. Seules les modifications de l'algorithme demanderont une modification du code.
- L'aspect visuel, des résultats intermédiaires et finaux, est un aspect important dans le cadre d'étude de mouvements du sol et de sa corrélation à des données externes. Ceci offrant la possibilité d'ajouter de nombreuses informations (par exemple géologiques, géographiques, hydrologiques, ou de production), permettant de faciliter la sélection de sous-séries spatiales et sous-séries temporelles. L'intégration de la solution à un environnement SIG permet l'utilisation des modules, aux options souvent pléthoriques, de création de cartes. Cet aspect est fondamental, puisqu'un résultat n'est rien sans sa visualisation claire et précise.
- L'optimisation du temps est un aspect tout aussi important. En effet, l'utilisation d'un seul logiciel, depuis l'importation des données jusqu'à la représentation des résultats, mène à un gain de temps humain (moins de manipulations nécessaires, probabilité d'erreurs moindre). Le temps machine, principalement lié aux caractéristiques du support hardware, est plus difficile à optimiser, mais son importance est moindre puisque ce temps peut-être optimisé sur les nuits et week-ends.

Cette description de perspectives d'amélioration de la méthodologie n'est pas exhaustive. En effet, de l'application de cette méthodologie sur de nouveaux cas d'études est attendue la mise en lumière de nouvelles problématiques, notamment concernant les paramètres temporel (sous séries temporelles) et spatial (sous-zones d'études homogènes). La structuration de l'algorithme a été pensée afin d'être à tout moment modifiée pour répondre à ces nouvelles problématiques. Néanmoins il est certain que de nombreux développements seront nécessaires afin de rendre la méthodologie mature.

Références

Allen, D. R., & Mayuga, M. N. (1969, September). The mechanics of compaction and rebound, Wilmington oil field, Long Beach, California, USA. In *First International Association of Hydrological Sciences and UNESCO Land Subsidence Symposium, Tokyo* (Vol. 2, pp. 410-423).

Altamimi, Z., Métivier, L., & Collilieux, X. (2012). ITRF2008 plate motion model. *Journal of geophysical research: solid earth*, 117(B7).

Bache, F., Olivet, J. L., Gorini, C., Aslanian, D., Labails, C., & Rabineau, M. (2010). Evolution of rifted continental margins: the case of the Gulf of Lions (Western Mediterranean Basin). *Earth and Planetary Science Letters*, 292(3-4), 345-356.

Baillargeon, S. (2005). Le krigeage: revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations.

Bastin, S., Champollion, C., Bock, O., Drobinski, P., & Masson, F. (2007). Diurnal cycle of water vapor as documented by a dense GPS network in a coastal area during ESCOMPTE IOP2. *Journal of applied meteorology and climatology*, 46(2), 167-182.

Battaglia, M., Cervelli, P. F., & Murray, J. R. (2013). *Modeling Crustal Deformation Near Active Faults and Volcanic Centers--a Catalog of Deformation Models*. US Department of the Interior, US Geological Survey.

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383.

Berest, P., Brouard, B., & Durup, G. (1998). Abandon des cavités salines. *Revue française de géotechnique*, (82), 23-36.

Benedicto, A., Labaume, P., Séguret, M., & Séranne, M. (1996). Low-angle crustal ramp and basin geometry in the Gulf of Lion passive margin: Oligocene-Aquitainian Vistrenque graben, SE France. *Tectonics*, 15(6), 1192-1212.

Bonilla, M.G., 1982, Evaluation of potential surface faulting and other tectonic deformation: U.S. Geological Survey Open-File Report 82-732, 58 p.

Burdack, J. (2013). *Combinaison des techniques PSInSAR et GNSS par cumul des équations normales* (Engineering Sciences [physics]).

Bürgmann, R., Rosen, P. A., & Fielding, E. J. (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual review of earth and planetary sciences*, 28(1), 169-209.

Catalão, J., Nico, G., Hanssen, R., & Catita, C. (2010, March). Integration of InSAR and GPS for vertical deformation monitoring: a case study in Faial and Pico Islands. In *Proceedings Fringe 2009 Workshop*.

Catalão, J., Nico, G., Hanssen, R., & Catita, C. (2011). Merging GPS and atmospherically corrected InSAR data to map 3-D terrain displacement velocity. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 49(6), 2354-2360.

Cavalié, O. (2007). *Mesures InSAR et modélisation de faibles déformations d'origine anthropique (lac Mead, USA) ou tectonique (faille de Haiyuan, Chine)* (Doctoral dissertation, Université Paris Sud-Paris XI).

Chaubey, N., Upadhyay, S., Joshi, A., Mishra, N., Patra, S. K., & Chowdhury, S. (2016, April). Improvement in InSAR phase unwrapping using external DEM. In *Communication and Signal Processing (ICCSP), 2016 International Conference on* (pp. 0078-0082). IEEE.

Costantini, M., Malvarosa, F., & Minati, F. (2012). A general formulation for redundant integration of finite differences and phase unwrapping on a sparse multidimensional domain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(3), 758-768.

Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 43(1), 27-29.

Dai, F. C., Lee, C. F., & Ngai, Y. Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering geology*, 64(1), 65-87.

Daya, A. A., & Bejari, H. (2015). A comparative study between simple kriging and ordinary kriging for estimating and modeling the Cu concentration in Chehlkureh deposit, SE Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(8), 6003-6020.

Denis, L., Tupin, F., Darbon, J., & Sigelle, M. (2008, July). A regularization approach for InSAR and optical data fusion. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International* (Vol. 2, pp. II-97). IEEE.

Doin, M. P., Guillaso, S., Jolivet, R., Lasserre, C., Lodge, F., Ducret, G., & Grandin, R. (2011, September). Presentation of the small baseline NSBAS processing chain on a case example: The Etna deformation monitoring from 2003 to 2010 using Envisat data. In *Proceedings of the Fringe Symposium* (pp. 3434-3437). ES.

Duquenne, F., Botton, S., Peyret, F., Bétaille, D., & Willis, P. (2005). Localisation et navigation par satellites. *Edition Hermès lavoisier, 2e édition revue et augmentée, ISBN, 2-7462*.

Emardson, T. R., Simons, M., & Webb, F. H. (2003). Neutral atmospheric delay in interferometric synthetic aperture radar applications: Statistical description and mitigation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B5).

Farr, T. G., & Kobrick, M. (2000). Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 81(48), 583-585.

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., ... & Seal, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of geophysics*, 45(2).

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

Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., ... & Rocca, F. (2007). Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5), 1142-1153.

Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9), 3460-3470.

Fialko, Y. (2006). Interseismic strain accumulation and the earthquake potential on the southern San Andreas fault system. *Nature*, 441(7096), 968.

Foumelis, M., Delgado Blasco, J. M., Desnos, Y. L., Engdahl, M., Fernández, D., Veci, L., ... & Wong, C. (2018, April). ESA SNAP-StaMPS Integrated Processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 20, p. 3764).

Fuhrmann, T., Cuenca, M. C., Knöpfler, A., Van Leijen, F. J., Mayer, M., Westerhaus, M., ... & Heck, B. (2015, January). Combining InSAR, levelling and GNSS for the estimation of 3D surface displacements. In *Ouwehand L., Fringe 2015 Workshop, 23 March 2015 through 27 March 2015, SP-731*. European Space Agency.

Fuhrmann, T., Caro Cuenca, M., Knöpfler, A., Van Leijen, F. J., Mayer, M., Westerhaus, M., ... & Heck, B. (2015). Estimation of small surface displacements in the Upper Rhine Graben

area from a combined analysis of PS-InSAR, levelling and GNSS data. *Geophysical Journal International*, 203(1), 614-631.

Fuhrmann, T., Garthwaite, M., Lawrie, S., & Brown, N. (2018). Combination of GNSS and InSAR for Future Australian Datums. Conference: IGNS Symposium 2018.

Furst, S. (2018). *Multi-objective optimization for joint inversion of geodetic data* (Doctoral dissertation, Université Montpellier).

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.

Godano, M. (2009). *Étude théorique sur le calcul des mécanismes au foyer dans un réservoir et application à la sismicité de la saline de Vauvert (Gard)* (Doctoral dissertation, Université Nice Sophia Antipolis).

Goldstein, R. (1995). Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry. *Geophysical research letters*, 22(18), 2517-2520.

Goldstein, R. M., & Werner, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical research letters*, 25(21), 4035-4038.

Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford Univ. Press, New York. *Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford Univ. Press, New York.*

Goovaerts, P. (1999). Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89(1-2), 1-45.

Gorini, C., Le Marrec, A., & Mauffret, A. (1993). Contribution to the structural and sedimentary history of the Gulf of Lions (western Mediterranean) from the ECORS profiles, industrial seismic profiles and well data. *Bulletin de la Société géologique de France*, 164(3), 353-363.

Gourmelen, N., Amelung, F., & Lanari, R. (2010). Interferometric synthetic aperture radar–GPS integration: Interseismic strain accumulation across the Hunter Mountain fault in the eastern California shear zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B9).

Grandjean, G., Pennetier, C., Bitri, A., Meric, O., & Malet, J. P. (2006). Caractérisation de la structure interne et de l'état hydrique de glissements argilo-marneux par tomographie géophysique: l'exemple du glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes du Sud, France). *Comptes Rendus Geoscience*, 338(9), 587-595.

- Hager, B. H., King, R. W., & Murray, M. H. (1991). Measurement of crustal deformation using the Global Positioning System. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 19(1), 351-382.
- Hammond, W. C., Lib, Z., Plaga, H. P., Kreemera, C., & Blewitta, G. (2010). Integrated INSAR and GPS studies of crustal deformation in the Western Great Basin, Western United States. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 38(Part 8), 39-43.
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis* (Vol. 2). Springer Science & Business Media.
- Henderson, C. R. (1973). Sire evaluation and genetic trends. *Journal of Animal Science*, 1973(Symposium), 10-41.
- Hengl, T., Heuvelink, G. B., & Stein, A. (2004). A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*, 120(1-2), 75-93.
- Hengl, T., Heuvelink, G. B., & Rossiter, D. G. (2007). About regression-kriging: from equations to case studies. *Computers & geosciences*, 33(10), 1301-1315.
- Herring, Thomas. "MATLAB Tools for viewing GPS velocities and time series." *GPS solutions* 7.3 (2003): 194-199.
- Herring, T. A., King, R. W., & McClusky, S. C. (2010). Introduction to Gamit/Globk. *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts*.
- Hetland, E. A., Musé, P., Simons, M., Lin, Y. N., Agram, P. S., & DiCaprio, C. J. (2012). Multiscale InSAR time series (MInTS) analysis of surface deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B2).
- Heuvelink, G. B. M., & Webster, R. (2001). Modelling soil variation: past, present, and future. *Geoderma*, 100(3-4), 269-301.
- 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).
- Hooper, A., Segall, P., & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7).
- Hooper, A. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16).

Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arıkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514, 1-13.

Iris, J. M. (1986). Analyse et interprétation de la variabilité spatiale de la densité apparente dans trois matériaux ferrallitiques. *Science du sol*, 24(3), 246-256.

Jolivet, R., Grandin, R., Lasserre, C., Doin, M. P., & Peltzer, G. (2011). Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data. *Geophysical Research Letters*, 38(17).

Jouanne, F., Ménard, G., & Darmendrail, X. (1995). Present-day vertical displacements in the north-western Alps and southern Jura Mountains: Data from leveling comparisons. *Tectonics*, 14(3), 606-616.

Jouanne, F., Genaudeau, N., Ménard, G., & Darmendrail, X. (1998). Estimating present-day displacement fields and tectonic deformation in active mountain belts: an example from the Chartreuse Massif and the southern Jura Mountains, western Alps. *Tectonophysics*, 296(3-4), 403-419.

Kampes, B., & Usai, S. (1999, August). Doris: The delft object-oriented radar interferometric software. In *2nd international symposium on operationalization of remote sensing, enschede, the netherlands* (Vol. 16, p. 20). Citeseer.

Kampes, B. M., Hanssen, R. F., & Perski, Z. (2003, December). Radar interferometry with public domain tools. In *Proceedings of FRINGE* (Vol. 3).

Kampes, B. M. (2006). The Permanent Scatterer Technique. *Radar interferometry: Persistent Scatterer Technique*, 5-30.

Kampes, B. M., & Adam, N. (2006, February). The STUN algorithm for persistent scatterer interferometry. In *Fringe 2005 Workshop* (Vol. 610).

Kashani, I., Wielgosz, P., & Grejner-Brzezinska, D. A. (2004). On the reliability of the VCV Matrix: A case study based on GAMIT and Bernese GPS Software. *GPS Solutions*, 8(4), 193-199.

Kierulf, H. P., Ouassou, M., Simpson, M. J. R., & Vestøl, O. (2013). A continuous velocity field for Norway. *Journal of Geodesy*, 87(4), 337-349.

King, G., Klinger, Y., Bowman, D., & Tapponnier, P. (2005). Slip-partitioned surface breaks for the M w 7.8 2001 Kokoxili earthquake, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2), 731-738.

Lanari, R., Mora Sacristan, Ó., Manunta, M., Mallorquí Franquet, J. J., Berardino, P., & Sansoti, E. (2004). A small baseline DIFSAR approach for investigating deformations on full resolution SAR interferograms.

Li, T., & Wang, S. (1992). *Landslide hazards and their mitigation in China*. Science Press.

Lu, C. H., Ni, C. F., Chang, C. P., Yen, J. Y., & Hung, W. C. (2015). Combination with precise leveling and PSInSAR observations to quantify pumping-induced land subsidence in central Taiwan. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 77.

Lundgren, P., Hetland, E. A., Liu, Z., & Fielding, E. J. (2009). Southern San Andreas-San Jacinto fault system slip rates estimated from earthquake cycle models constrained by GPS and interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B2).

Lyons, S., & Sandwell, D. (2003). Fault creep along the southern San Andreas from interferometric synthetic aperture radar, permanent scatterers, and stacking. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B1).

McDougall, I., Brown, F. H., & Fleagle, J. G. (2005). Stratigraphic placement and age of modern humans from Kibish, Ethiopia. *Nature*, 433(7027), 733.

Mahapatra, P., van der Marel, H., van Leijen, F., Samiei-Esfahany, S., Klees, R., & Hanssen, R. (2018). InSAR datum connection using GNSS-augmented radar transponders. *Journal of Geodesy*, 92(1), 21-32.

Maisons, C., Fortier, E., & Valette, M. (1997). Induced microseismicity and procedure for closure of brine production caverns. In *Seismicity Associated with Mines, Reservoirs and Fluid Injections* (pp. 585-603). Birkhäuser, Basel.

Marcotte D. (2006). Krigage. *Chapitre 5, cours de Géostatistique de l'école polytechnique de Montréal*.

Marinkovic, P., Ketelaar, G., van Leijen, F., & Hanssen, R. (2007, November). InSAR quality control: Analysis of five years of corner reflector time series. In *Proceedings of Fringe 2007 Workshop (ESA SP-649), Frascati, Italy* (pp. 26-30).

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.

Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of geophysics*, 36(4), 441-500.

Matheron, G. (1962). *Traité de géostatistique appliquée, tome i: Mémoires du bureau de recherches géologiques et minières. Editions Technip, Paris, 14.*

Matheron, G. (1963). *Traité de géostatistique appliquée: Le krigeage, volume 2 de Mémoires du Bureau de recherches géologiques et minières, Paris, France. Editions Technip, 86.*

Mogi, K., (1958). Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Earthq Res Inst*, 36, 99-134.

Mohammadi, B., & Saiac, J. H. (2003). *Pratique de la simulation numérique*. Dunod.

Mossop, A., & Segall, P. (1999). Volume strain within The Geysers geothermal field. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B12), 29113-29131.

Muller, J. P., Morley, J., Walker, A., Kitmitto, K., Mitchell, K., Chugani, K., ... & Dowman, I. (2001). The LANDMAP project for the automated creation and validation of multiresolution orthorectified satellite image products and a 1" DEM of the British Isles from ERS tandem SAR interferometry.

Nagel, N. B. (2001). Compaction and subsidence issues within the petroleum industry: From Wilmington to Ekofisk and beyond. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(1-2), 3-14.

National Research Council. (1991). *Mitigating losses from land subsidence in the United States*. National Academies Press.

Neter, J., Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., & Wasserman, W. (1996). *Applied linear statistical models* (Vol. 4, p. 318). Chicago: Irwin.

Nguyen, H., Vernant, P., Mazzotti, S., Khazaradze, G., & Asensio Ferreira, E. (2016). 3D GPS velocity field and its implications on the present-day postorogenic deformation of the Western Alps and Pyrenees. *Solid Earth*, 2016, vol. 7, p. 1349-1363.

Nocquet, J. M., Sue, C., Walpersdorf, A., Tran, T., Lenôtre, N., Vernant, P., ... & Chery, J. (2016). Present-day uplift of the western Alps. *Scientific reports*, 6, 28404.

Odeh, I. O., McBratney, A. B., & Chittleborough, D. J. (1995). Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. *Geoderma*, 67(3-4), 215-226.

Poland, J. F. (1969). *Land Subsidence and Aquifer-system Compaction, Santa Clara Valley, California, USA* (pp. 285-292). United States, Department of the Interior, Geological Survey.

- Pratt, W. E., & Johnson, D. W. (1926). Local subsidence of the Goose Creek oil field. *The Journal of Geology*, 34(7, Part 1), 577-590.
- Raucoules, D., Maisons, C., Carnec, C., Le Mouelic, S., King, C., & Hosford, S. (2003). Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France): Comparison with ground-based measurement. *Remote sensing of environment*, 88(4), 468-478.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Peltzer, G., & Simons, M. (2004). Updated repeat orbit interferometry package released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 85(5), 47-47.
- Sandwell, D. T., & Price, E. J. (1998). Phase gradient approach to stacking interferograms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B12), 30183-30204.
- Schirrmann, M., Hamdorf, A., Giebel, A., Gleiniger, F., Pflanz, M., & Dammer, K. H. (2017). Regression Kriging for Improving Crop Height Models Fusing Ultra-Sonic Sensing with UAV Imagery. *Remote Sensing*, 9(7), 665.
- Schmidt, D. A., & Bürgmann, R. (2003). Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B9).
- Séranne, M., Camus, H., Lucazeau, F., Barbarand, J., & Quinif, Y. (2002). Surrection et érosion polyphasées de la bordure cévenole. Un exemple de morphogenèse lente. *Bull. Soc. géol. Fr*, 173(2), 97-112.
- Shanker, A. P., & Zebker, H. (2010). Edgelist phase unwrapping algorithm for time series InSAR analysis. *JOSA A*, 27(3), 605-612.
- Shirzaei, M., & Walter, T. R. (2011). Estimating the effect of satellite orbital error using wavelet-based robust regression applied to InSAR deformation data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(11), 4600-4605.
- Simonetto, E., Durand, S., Burdack, J., Polidori, L., Morel, L., & Nicolas-Duroy, J. (2014). Combination of INSAR and GNSS measurements for ground displacement monitoring. *Procedia Technology*, 16, 192-198.
- United States. Federal Geodetic Control Committee, & Bossler, J. D. (1984). *Standards and specifications for geodetic control networks*. Federal Geodetic Control Committee.
- Valette, M. (1991). *Etude structurale du gisement salifère oligocène de Vauvert (Gard)* (Doctoral dissertation, Montpellier 2).

Valette, M., & Benedicto, A. (1995). Chevauchements gravitaires halotectoniques dans le bassin distensif de Camargue (marge du golfe du Lion, SE de la France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 166(2), 137-147.

Wegener, A., Lerner, A., Achache, J., & Gohau, G. (1924). *La genèse des continents et des océans: théorie des translations continentales*. Ch. Bourgeois.

Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T., & Wiesmann, A. (2003, July). Interferometric point target analysis for deformation mapping. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International* (Vol. 7, pp. 4362-4364). IEEE.

Williams, S., Bock, Y., & Fang, P. (1998). Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B11), 27051-27067.

Wood, C. (2016). Comparing Simple and Ordinary Kriging Methods For 2015 Iowa Precipitation.

Wright, T., Parsons, B., & Fielding, E. (2001). Measurement of interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2117-2120.

Wright, T. J., Lu, Z., & Wicks, C. (2004). Constraining the slip distribution and fault geometry of the M w 7.9, 3 November 2002, Denali fault earthquake with Interferometric Synthetic Aperture Radar and Global Positioning System data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(6B), S175-S189.

Zimmerman, D., Pavlik, C., Ruggles, A., & Armstrong, M. P. (1999). An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting. *Mathematical Geology*, 31(4), 375-390.

Zebker, H. A., & Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 30(5), 950-959.

Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A., & Werner, C. L. (1994). On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B10), 19617-19634.

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.