



École Doctorale  
d'Informatique,  
Télécommunications  
et Électronique de Paris

# Thèse

présentée pour obtenir le grade de docteur  
de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications  
Spécialité : Signal et Images

## Penélope López Quiroz

Séries temporelles de la subsidence de la  
ville de Mexico obtenues par  
interférométrie radar.

Soutenue le 14 novembre 2008 devant le jury composé de

Nicolas Florsch  
Claudio Prati  
Bénédicte Fruneau  
Jean-Marie Nicolas  
Pierre Briole  
Florence Tupin  
Marie-Pierre Doin  
Francesco Sarti

Président  
Rapporteurs  
Examineurs  
Directeurs de thèse  
Invité



---

## Résumé

Dans la ville de Mexico, les taux de subsidence atteignent 40 cm/an, principalement à cause de la compaction du sol provoquée par la surexploitation de l'aquifère du Bassin de Mexico. Au cours de cette thèse nous cartographions de manière précise en temps et en espace la subsidence de la ville de Mexico en utilisant l'interférométrie radar sur un ensemble de 38 images ENVISAT acquises entre fin 2002 et début 2007. Nous présentons les problèmes de déroulement dus à la perte de cohérence et au grand nombre de franges. Nous avons surmonté ces difficultés en utilisant une nouvelle méthodologie aidant l'étape de déroulement. Elle est basée sur le fait que la forme de la déformation est similaire tout a long de la période étudiée. Cela nous a permis de construire un stack à partir des 5 meilleurs interférogrammes représentant le taux de déformation pour une période fixée. Avant de dérouler, le nombre de franges est réduit grâce à l'utilisation d'une version pondérée du stack et l'estimation de la contribution atmosphérique verticalement stratifiée. La phase résiduelle, contenant moins de franges, est plus facilement déroulable que celle de l'interférogramme original. Cette méthodologie est appliquée de façon itérative. Les 71 interférogrammes construits avec de petites lignes de base sont inversés pour obtenir les délais de phase entre les 38 acquisitions successives. La redondance de notre base de données interférométrique nous a permis de quantifier les erreurs de déroulement et montrer qu'ils sont fortement réduits au cours des itérations. Une carte de RMS représentant la fermeture du système permet de mesurer la fiabilité de la valeur de phase sur chaque pixel. De plus, nous présentons un nouvel algorithme pour analyser les séries temporelles, qui diffère de l'algorithme classique SVD et qui est mieux adapté à notre base de données. Les séries de la déformation sont alors présentés pour chaque pixel imageant la zone métropolitaine de la ville de Mexico avec une résolution spatiale de 20 x 20 m. Finalement, les composantes non linéaires de la déformation sont modélisées et analysées.

---

## Abstract

In Mexico city, subsidence rates reach up to 40 cm/yr mainly due to soil compaction led by the over exploitation of the Mexico Basin aquifer. In this work we map the spatial and temporal patterns of the Mexico city subsidence by differential radar interferometry, using 38 ENVISAT images acquired between end of 2002 and beginning of 2007. We present the severe interferogram unwrapping problems partly due to the coherence loss but mostly due to the high fringe rates. This difficulties are overcome by designing a new methodology that help the unwrapping step. Our approach is based on the fact that the deformation shape is stable for similar time intervals during the studied period. As a result, a stack of the five best interferograms can be used to compute an average deformation rate for a fixed time interval. Before unwrapping, the number of fringes is then decreased in wrapped interferograms using a scaled version of the stack together with the estimation of the atmospheric phase contribution related with the troposphere vertical stratification. The residual phase, containing less fringes, is more easily unwrapped than the original interferogram. The unwrapping procedure is applied in three iterative steps. The 71 small baseline unwrapped interferograms are inverted to obtain increments of radar propagation delays between the 38 acquisition dates. Based on the redundancy of the interferometric data base, we quantify the unwrapping errors and show that they are strongly decreased by iterations in the unwrapping process. A map of the RMS interferometric system misclosure allows to define the unwrapping reliability for each pixel. Moreover, we present a new algorithm for time series analysis that differs from classical SVD decomposition and is best suited to the present data base. Accurate deformation time series are then derived over the metropolitan area of the city with a spatial resolution of 20 x 20 m. Finally, the nonlinear components of the deformation are modelised and analysed.

---

## Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Marie-Pierre Doin, de l'Ecole Normale Supérieure de Paris, qui m'a supportée (dans son bureau et ailleurs) au cours de mes deux dernières années de thèse. Par dessus tout, j'ai apprécié sa gentillesse, sa disponibilité, son enthousiasme et ses grandes qualités humaines. Elle a su m'encourager quand j'ai eu le plus besoin. Ensuite viennent Florence Tupin et Pierre Briole, grâce auxquels j'ai pu commencer ma thèse à Telecom en collaboration avec l'IPGP et puis avec l'ENS. Ils ont su guider mes recherches tout en me laissant une grande liberté, ils m'ont proposé de travailler avec l'un des sujets de thèse les plus intéressants que je n'aurais jamais pu imaginer ! et puis ils m'ont permis la connaissance des grosses personnalités dans le monde de l'InSAR.

Je remercie aussi les membres du jury : Nicolas Florsch, de l'Université Paris 6, qui a accepté de présider le jury, mes rapporteurs, Bénédicte Fruneau, de l'Université de Marne la Vallée et Claudio Prati, du Politecnico di Milano, et mon invité d'honneur, Francesco Sarti, de l'Agence Spatiale Européenne.

Des remerciements particuliers vont à Cécile Lasserre, de l'ENS et Jean-Marie Nicolas, de Telecom, pour s'intéresser à mes travaux, les discussions enrichissantes, leur disponibilité et leur gentillesse.

Un grand merci aux copains de bureau et aux amis (de Telecom, de l'ENS et ailleurs !, vous savez de qui je parle ; ) ).

Merci également aux membres des trois départements qui m'ont gentiment accueilli (TSI à Telecom, Sismologie à l'IPGP, et Géologie à l'ENS).

Finalement, je tiens à remercier grandement ma famille pour son soutien et ses encouragements continus depuis l'autre côté de la mer.

---



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>i</b>
<b>1 Interférométrie radar, InSAR</b>	<b>1</b>
1.1 Principe . . . . .	1
1.2 Images radar d'ouverture synthétique . . . . .	1
1.2.1 Des images raw aux images SLC . . . . .	1
1.3 Calcul d'un interférogramme . . . . .	3
1.3.1 Recalage des images SLC . . . . .	4
1.3.2 Phase interférométrique . . . . .	4
1.4 Contenu de la phase interférométrique . . . . .	5
1.4.1 Contribution de la terre plate ou phase orbitale . . . . .	5
1.4.2 Phase topographique . . . . .	6
1.4.3 Phase atmosphérique . . . . .	6
1.4.4 Bruit dans la phase . . . . .	7
1.4.5 Déroulement de la phase interférométrique . . . . .	8
1.5 Mesure des mouvements de terrain par interférométrie . . . . .	9
1.5.1 Mesure de la déformation à partir des interférogrammes construits avec des petites lignes de base . . . . .	10
1.5.1.1 Usai et al. [1999], Usai [2003] . . . . .	10
1.5.1.2 Berardino et al. [2002] . . . . .	11
1.5.1.3 Schmidt and Bürgmann [2003] . . . . .	13
1.5.1.4 Cavalié et al. [2007] . . . . .	13
1.5.2 Réflecteurs Persistants . . . . .	14
1.5.2.1 Ferretti et al. 2000 . . . . .	14
1.5.3 Bilan des méthodes présentées pour mesurer la déformation . . . . .	16
<b>2 Le problème de la subsidence dans la Ville de Mexico</b>	<b>17</b>
2.1 Introduction . . . . .	17
2.2 Cadre géologique de la Vallée de Mexico . . . . .	17
2.2.1 Stratigraphie de la zone lacustre . . . . .	18
2.2.2 Stratigraphie de la zone alluviale . . . . .	20
2.2.3 Stratigraphie de la zone des montagnes et volcans . . . . .	21
2.3 Cadre hydrologique de la Vallée de Mexico . . . . .	21
2.3.1 Introduction . . . . .	21
2.3.2 Caractéristiques hydrauliques des formations aquitard-aquifère . . . . .	23
2.3.3 Hydrodynamique des argiles de Mexico [Kumate and Mazari [1990]] . . . . .	24
2.3.4 Extraction de l'eau de l'aquifère : Puits et pompage . . . . .	25
2.4 Problèmes hydrauliques de la Ville de Mexico . . . . .	27

---

2.5	Subsidence . . . . .	30
2.5.1	Causes . . . . .	30
2.5.2	Conséquences . . . . .	32
2.5.2.1	Centre Ville . . . . .	32
2.5.2.2	Zones de transition . . . . .	32
2.5.3	Mesures de la subsidence . . . . .	33
2.5.3.1	Nivellement . . . . .	33
2.5.3.2	GPS . . . . .	33
2.5.4	Solutions envisagées . . . . .	33
2.5.4.1	Approvisionnement d'eau . . . . .	33
2.5.4.2	Limiter les affaissements . . . . .	35
<b>3</b>	<b>Mesure de la subsidence par interférométrie dans la Ville de Mexico</b>	<b>37</b>
3.1	Introduction . . . . .	37
3.2	InSAR sur la Ville de Mexico : État de l'art . . . . .	37
3.2.1	Strozzi and Wegmuller [1999] . . . . .	37
3.2.2	Carnec et al. [2000] . . . . .	38
3.2.3	Strozzi et al. [2003] . . . . .	39
3.2.4	Strozzi et al. [2004] . . . . .	40
3.2.5	Cabral-Cano et al. [2008] . . . . .	40
3.2.6	Bilan et besoin de développement d'une méthode dédiée. . . . .	41
3.3	Données et formation d'interférogrammes . . . . .	42
3.4	Correction du délai de phase atmosphérique . . . . .	48
3.5	Correction des erreurs orbitales . . . . .	49
3.6	Stack d'interférogrammes . . . . .	51
3.7	Inversion . . . . .	52
3.8	Identification des erreurs de déroulement . . . . .	54
3.9	Résoudre les problèmes de déroulement . . . . .	57
3.9.1	Utilisation d'aide au déroulement dans de précédentes études . . . . .	58
3.9.1.1	Strozzi and Wegmuller [1999] . . . . .	58
3.9.1.2	Yun et al. [2007] . . . . .	58
3.9.1.3	Pinel et al. [2008] . . . . .	58
3.9.2	Principes de la méthode de déroulement itérative . . . . .	59
3.9.3	Etapes itératives . . . . .	60
3.9.4	Déroulement de la phase résiduelle . . . . .	63
3.9.5	Etape de nettoyage . . . . .	63
3.9.6	Analyse de l'amélioration apportée par l'aide au déroulement . . . . .	64
3.9.6.1	Relation entre phase de l'interférogramme et phase du stack . . . . .	64
3.9.6.2	Cartes d'écart à la fermeture par interférogramme . . . . .	65
3.9.6.3	Amélioration de la fermeture par interférogramme après la première itération . . . . .	66
3.9.6.4	Fermeture globale du réseau d'interferogramme . . . . .	67
3.9.6.5	Bilan de l'aide au déroulement . . . . .	68
3.10	Méthode pour construire les séries temporelles de la subsidence . . . . .	70
3.10.1	Principe de l'inversion "contrainte" . . . . .	70
3.10.2	Liens manquants . . . . .	71
3.10.3	Statistiques de l'inversion . . . . .	74

---

---

<b>4</b>	<b>Analyse des séries temporelles de subsidence.</b>	<b>77</b>
4.1	Introduction . . . . .	77
4.2	Comportement linéaire de la déformation dans le temps . . . . .	77
4.2.1	Séries temporelles de la subsidence . . . . .	77
4.2.2	Comparaison entre la vitesse moyenne et le stack d'interférogrammes	79
4.2.2.1	Avantages . . . . .	79
4.2.2.2	Désavantages . . . . .	80
4.2.2.3	Comparaison quantitative : précision . . . . .	81
4.2.2.4	Comparaison qualitative : discussion . . . . .	81
4.2.3	Zone de référencement . . . . .	83
4.3	Accélération ou décélération de la subsidence . . . . .	85
4.3.1	Ecart à la linéarité . . . . .	85
4.3.2	Modélisation . . . . .	87
4.3.3	Précision . . . . .	88
4.4	Correction de MNT . . . . .	88
4.5	Recherche d'un signal périodique en temps . . . . .	92
4.5.1	Calcul des résidus : atmosphère et déformation résiduelle . . . . .	92
4.5.2	Détermination de la "qualité" de chaque image . . . . .	94
4.5.3	Écart à l'évolution quadratique en temps . . . . .	95
4.5.4	Modélisation avec comportement périodique en temps . . . . .	96
4.6	Comparaison de mesures de la subsidence : InSAR, nivellement, GPS . . . .	100
4.6.0.1	InSAR-nivellement . . . . .	100
4.6.0.2	InSAR-GPS . . . . .	101
4.7	Réponse de la compaction de l'aquitard aux variations de niveaux potentiométriques. . . . .	104
	<b>Conclusion</b>	<b>105</b>
	<b>A Mosaïque d'interférogrammes</b>	<b>113</b>
	<b>B Mosaïque de résidus par date</b>	<b>123</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>133</b>

---



# Introduction

En préambule, j'aimerais préciser le contexte dans lequel s'inscrit cette thèse. Elle est le résultat d'un projet réalisé en collaboration entre Telecom ParisTech et le Laboratoire de géologie de l'École Normale Supérieure. De ce fait, elle comporte un aspect méthodologique et un autre applicatif. Elle a été financée presque entièrement par le Conseil National de Science et Technologie mexicain, CONACyT. L'un des principaux objectifs de ce conseil est de favoriser le développement scientifique et technologique à travers le financement de projets qui permettent aux boursiers l'acquisition d'expertises qui pourront être mises au profit du pays et de la société mexicaine. C'est pourquoi au cours de cette thèse il m'est apparu important de démontrer la qualité et l'utilité des mesures effectuées. Cela m'a permis de me plonger dans les spécificités de la technique de l'interférométrie radar (jusqu'à maintenant peu utilisée au Mexique) et en même temps m'a poussée à m'intéresser à la nature du problème à résoudre, dans ce cas, la subsidence de la ville de Mexico. À travers donc une analyse à la fois méthodologique et applicative j'ai pu reconnaître la complexité du problème et comprendre les raisons pour lesquelles aucune solution n'a pu être mise en oeuvre à ce jour. Toutefois, l'intérêt d'une cartographie précise de la subsidence et l'expertise acquise en interférométrie radar ouvrent la porte à bon nombre de développements qui pourront être exploités après la thèse au profit de mon pays. En effet, du fait de sa grande extension géographique, il est important d'utiliser des techniques de télédétection de grandes résolution et couverture spatiales, qui n'ont pas besoin d'analyse in situ, permettant le suivi des mouvements de terrain, fréquents au Mexique tels que les mouvements de plaques tectoniques, tremblements de terre, mouvements d'origine volcanique, subsidence urbaine et non urbaine.

La subsidence affecte la ville de Mexico depuis plus d'un siècle, ayant débuté peu de temps après l'exploitation de l'aquifère de la Vallée de Mexico. La surpopulation, faisant de Mexico la deuxième ville la plus peuplée au monde, entraîne une consommation excessive d'eau et une forte surexploitation de l'aquifère. Cet aquifère est couvert par une couche peu perméable de dépôts lacustres argileux extrêmement compressibles appelée aquitard. C'est principalement sur l'aquitard que la ville de Mexico est bâtie. La subsidence est le résultat de la compaction des dépôts argileux dans l'aquitard. Cette compaction a lieu quand la baisse des niveaux potentiométriques dans l'aquifère entraîne par diffusion le drainage et la diminution de la pression du fluide dans l'aquitard. Du fait des propriétés des argiles, changeantes d'une zone à l'autre dans l'aquitard, et des variations d'épaisseur de la couche argileuse, les taux de subsidence ne sont pas uniformes à travers la ville. Des gradients différentiels de déformation affectent les structures clés telles que les constructions domestiques et historiques, les réseaux routiers et le système de drainage entre autres. A l'heure actuelle, la subsidence de la ville de Mexico est mesurée par nivellements réalisés tous les 3-4 ans. Son échantillonnage spatial et temporel s'avère parfois insuffisant pour analyser en détail les structures en danger et limiter leur nombre.

---

Au contraire, l'utilisation d'une technique comme l'interférométrie radar (ou InSAR) devrait permettre de fournir des mesures de grande densité spatiale avec un pas de temps idéal de 35 jours. Plusieurs études publiées basées sur l'InSAR cartographient la subsidence dans la ville de Mexico [Strozzi and Wegmuller [1999], Carnec et al. [2000], Cabral-Cano et al. [2008]]. Toutefois, leur précision est limitée (pluri-centimétrique) du fait du faible nombre d'interférogrammes utilisés. Au cours de cette thèse, je me suis attachée à produire des mesures de la subsidence par InSAR les plus précises possible, en utilisant l'ensemble des acquisitions radar disponibles sur Mexico.

L'interférométrie radar est une technique utilisée à partir de la fin des années 80 pour mesurer les déformations du sol. Les premiers résultats acquis par cette technique proviennent de l'analyse d'un seul interférogramme, issu d'une seule paire d'images [Gabriel et al. [1989], Massonnet et al. [1994]]. Cette configuration est une des plus simples et parfois la seule possible à exploiter du fait du nombre limité d'acquisitions sur certaines zones d'étude. Néanmoins, même si elle s'avère très utile pour estimer des déformations caractérisées par des amplitudes importantes, de l'ordre de quelques décimètres à mètres, elle présente trois limitations principales. La première concerne l'estimation de la déformation, limitée à une estimation "finie" entre les deux dates d'acquisitions. La deuxième concerne la précision des mesures qui du fait de l'utilisation d'une seule paire interférométrique est polluée par les contributions de la phase autres que la déformation, i.e. phase atmosphérique, erreur orbitale et erreur de MNT. La troisième limite est la décorrélation temporelle et géométrique, qui empêche l'exploitation de l'ensemble de la scène.

Pour surmonter une ou plusieurs de ces limitations des méthodologies utilisant plusieurs images ont été proposées Lyons and Sandwell [2003], Usai [2003], Ferretti et al. [2001]. Elles peuvent être divisées en trois groupes utilisant : des sommations d'interférogrammes, des interférogrammes à petites lignes de base ou des réflecteurs persistants pour construire des séries temporelles.

La sommation [Lyons and Sandwell [2003], Wright et al. [2001], Cavalié et al. [2008]] permet, à partir du moyennage de plusieurs interférogrammes déroulés, de diminuer le bruit dans la mesure de déformation. Cela n'est efficace que si l'on somme des interférogrammes "indépendants". Par exemple, lorsque l'on somme plusieurs interférogrammes ayant l'image maîtresse en commun, l'effet atmosphérique lié à l'acquisition commune est additionné et n'est donc pas éliminé [Mouélic et al. [2005]]. Il est alors difficile de profiter de l'ensemble des acquisitions pour améliorer le rapport signal sur bruit. De plus, pour sommer les interférogrammes, on fait l'hypothèse de la linéarité dans le temps de la déformation étudiée. Des approches permettant le suivi de l'évolution temporelle de la déformation ont alors été proposées. C'est le cas des séries temporelles construites à partir de la sélection de réflecteurs persistants (ou PS) [Ferretti et al. [2001], Kampes [2006], Hooper et al. [2004], Werner et al. [2003]] ou bien de la formation d'interférogrammes à petites lignes de base [Usai [2003], Berardino et al. [2002], Schmidt and Bürgmann [2003], Cavalié et al. [2007]], toutes les deux adaptées aux applications en milieu urbain.

Pour suivre l'évolution de la subsidence de la ville de Mexico, j'ai eu accès, dans un premier temps, à un ensemble de 19 images ERS-1&2 appartenant à la trace descendante 255, couvrant la période 1995-2000. J'ai commencé par construire un ensemble d'interférogrammes à faible ligne de base perpendiculaire. Toutefois, ceux-ci étaient dans de nombreux cas fortement bruités et impossibles à dérouler. Ceci est dû au mauvais échantillonnage en temps du jeu d'images ERS qui ne présente pas d'images en 1998 et présente uniquement une

---

---

image en 1997. De ce fait, la construction d'interférogrammes avec des lignes de base temporelles de plus d'un an est nécessaire. Les forts taux de subsidence créant de nombreuses franges (jusqu'à une frange par pixel) sur des interférogrammes à plus d'un an empêchaient alors le correct déroulement des franges. Nous avons ensuite décidé d'utiliser une approche de type PS pour mesurer la déformation du fait de sa performance sur les zones urbaines. La méthode de Hooper et al. [2004] a été choisie car son installation et mise en oeuvre s'avéraient simples du fait de sa libre distribution. Un grand nombre de pixels a été sélectionné sur la base de la stabilité de leur caractéristiques de rétrodiffusion et de leur phase. Toutefois, l'étape de déroulement n'a pas pu être effectuée correctement, malgré plusieurs tentatives. En effet, le déroulement 3-D (en temps et en espace) de la phase est difficile du fait des forts gradients temporels et spatiaux de subsidence. Finalement, j'ai commandé un ensemble de 39 images ENVISAT bien échantillonnées en temps, couvrant la période 2002-2007, qui m'est apparu plus approprié pour obtenir des séries temporelles de subsidence sur la Zone Métropolitaine de Mexico. Avec l'objectif de limiter la complexité de l'étape de déroulement, j'ai décidé d'utiliser une approche utilisant des interférogrammes avec des petites lignes de base perpendiculaires (<500 m) et temporelles (<9 mois) et de mettre en oeuvre une méthode d'aide au déroulement spatial des franges. En outre, cette approche avec un système d'interferogrammes redondants permet de tester la fermeture du réseau interférométrique et donc de quantifier les erreurs de déroulement. Une méthode d'inversion adaptée aux données sur la ville de Mexico a été développée par la suite pour obtenir des séries temporelles de subsidence avec une densité spatiale de points maximale.

Le rapport de thèse est rédigé en quatre chapitres :

Le chapitre 1 en présente le principe de l'interférométrie radar et les méthodes, basée sur cette technique, permettant de suivre l'évolution en temps des mouvements de terrain. Puis une introduction au problème de la subsidence est faite dans le chapitre 2 où le cadre hydrogéologique de la région comprenant la ville de Mexico est abordé comme un préambule pour présenter par la suite les causes et conséquences de la subsidence dans la ville et les méthodes utilisées à l'heure actuelle pour la mesurer.

Je commence dans le chapitre 3 par présenter les travaux déjà publiés utilisant l'InSAR pour mesurer la subsidence de la ville de Mexico Puis je montre comment la mise en oeuvre de certaines techniques permet de résoudre le problème du déroulement des interférogrammes sur la ville de Mexico. Enfin, une méthode d'inversion adaptée aux données interférométriques sur la ville est présentée. Cette méthode permet d'une part l'identification des erreurs éventuelles de déroulement et d'autre part de gérer le cas de groupes d'images indépendants. Finalement, des cartes qualifient la qualité des mesures sur chaque pixel cohérent, où le nombre d'images, d'interférogrammes et de liens manquants utilisés au cours de l'inversion sont comptabilisés.

Le chapitre 4 est focalisé sur l'analyse des résultats issus de l'application des méthodes exposées dans le chapitre précédent. La carte de vitesse moyenne pour la période comprise entre la fin de 2002 et le début de 2007 et les séries temporelles correspondantes à chaque pixel de 20 x 20 m sont analysées. Une comparaison entre la carte de vitesse moyenne et la sommation d'interférogrammes montre l'intérêt en terme de précision de calculer des séries temporelles même dans le cas où la déformation s'avère presque complètement linéaire. Puis, les écarts à la déformation linéaire sont présentés et divisés en termes quadratiques (accélération et décélération) et périodiques en temps. Enfin, la comparaison des mesures InSAR avec d'autres mesures de la subsidence dans la ville (nivellement, GPS) est réalisée.

---



# Chapitre 1

## Interférométrie radar, InSAR

### 1.1 Principe

L'interférométrie radar est une technique relativement récente qui a connu un grand développement à partir de la fin des années 80, quand sa capacité pour mesurer les déformations du terrain a été prouvée [Gabriel et al. [1989], Massonnet et al. [1994]]. Pour mesurer les déformations au sol, cette technique utilise une antenne d'ouverture synthétique. L'antenne, qui normalement est portée par un avion ou par un satellite, illumine le terrain avec des micro-ondes (voir Figure 1.1). La vitesse de propagation de ces ondes électromagnétiques peut être considérée comme constante dans le milieu de propagation. Les ondes électromagnétiques rétrodiffusées par les objets au sol ont une information sur la position des objets qui peut être obtenue en analysant le temps entre l'émission de l'onde et la réception de l'onde rétrodiffusée. Ces échos réfléchis par la surface sont collectés et traités pour produire une image avec des pixels contenant des nombres complexes, c'est à dire affichant amplitude et phase.

### 1.2 Images radar d'ouverture synthétique

#### 1.2.1 Des images raw aux images SLC

Les données raw, aussi appelées brutes, correspondent au signal rétrodiffusé par le sol et reçu par l'antenne. Elles sont présentées sous forme d'un tableau bidimensionnel construit à partir du délai et de la force du signal rétrodiffusé dépendant respectivement de la distance entre le satellite et le sol et de la rugosité et des propriétés diélectriques de la surface imagée. Convertir des données raw en SLC (Single Look Complex) revient à résoudre le problème inverse qui est de reconstruire la réponse de chaque diffuseur à partir d'une série de signaux rétrodiffusés. Cette procédure est connue sous le nom de focalisation SAR ou traitement d'ouverture synthétique. De nombreux systèmes de focalisation existent dans la littérature : range-Doppler [Zebker et al. [1994], Curlander and McDonough [1991]], PRISME [Massonnet et al. [1994]] et d'autres [Bamler [1992]]. En gros cette procédure utilise une succession de filtres, d'abord appliqués sur la direction de la distance et puis de l'azimut, pour convertir les nombreux échos d'un diffuseur, étalés en distance et azimut, en un seul objet sur l'image radar (voir Figure 1.2). Au cours de l'application des filtres, dans le domaine spectral, le choix entre le traitement à zéro doppler ou bien doppler centroïde doit être fait. La fréquence doppler centroïde détermine la fréquence centrale

---

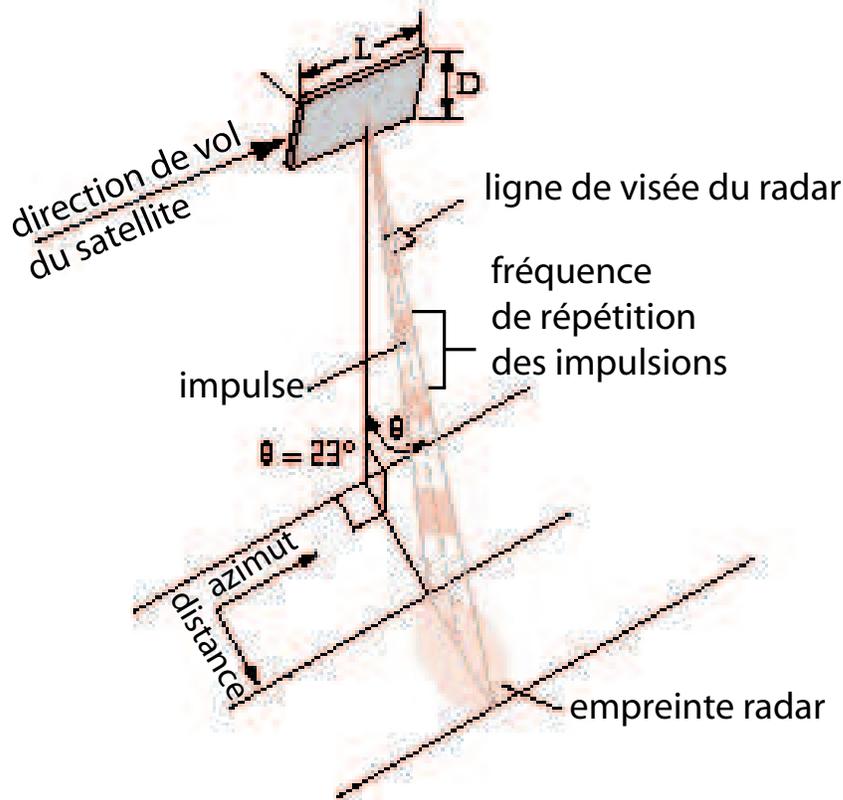


FIG. 1.1 – Géométrie d’acquisition d’une image SAR. L’empreinte d’une seule impulsion est indiquée avec un ombrage rose. La largeur d’une image SAR en entier correspond à la largeur de l’empreinte dans la direction de l’axe distance (de la portée proche à la portée lointaine), la longueur est mesurée le long de la direction de l’axe azimutal (de l’azimut premier à l’azimut tardif) contenant plusieurs impulsions.  $L$  et  $D$  déterminent les dimensions de l’antenne, e.g., 10 et 1.3 m respectivement pour ENVISAT.  $\theta$  correspond à l’angle de visée. Image modifiée d’après <http://pubs.usgs.gov/fs/fs-051-00/>

de la fenêtre utilisée par les filtres. Pour construire un interférogramme, les spectres des images doivent se chevaucher. Pour cela les focalisations prennent en compte une fréquence doppler centroïde moyenne des deux images.

La valeur du pixel  $z$  de l’image SLC peut être alors représentée par  $z = Ae^{j\phi} = \sum_{n=1}^{N_d} a_n e^{j\phi_n}$ , où les valeurs  $a_n e^{j\phi_n}$  correspondent à la réponse de chaque rétrodiffuseur dans une cellule de résolution ( $\sim 1$  pixel). L’amplitude ou radiométrie,  $A$ , représente la réflectivité du sol à l’onde électromagnétique. La phase est composée de deux termes,  $\phi = \phi_{propre} + \phi_D$ , où  $\phi_{propre}$  est liée aux propriétés de rétrodiffusion des diffuseurs élémentaires et  $\phi_D$  est la phase proportionnelle à la distance entre l’antenne et le sol. La phase propre,  $\phi = \phi_{propre}$ , est une variable déterministe, résultat d’interférences constructives ou destructives dans la cellule de résolution. Pourtant, elle est difficilement modélisable et variable d’un pixel à l’autre et selon l’orientation du rai électromagnétique. C’est pourquoi elle est considérée comme aléatoire. C’est aussi la raison pour laquelle une seule image ne suffit

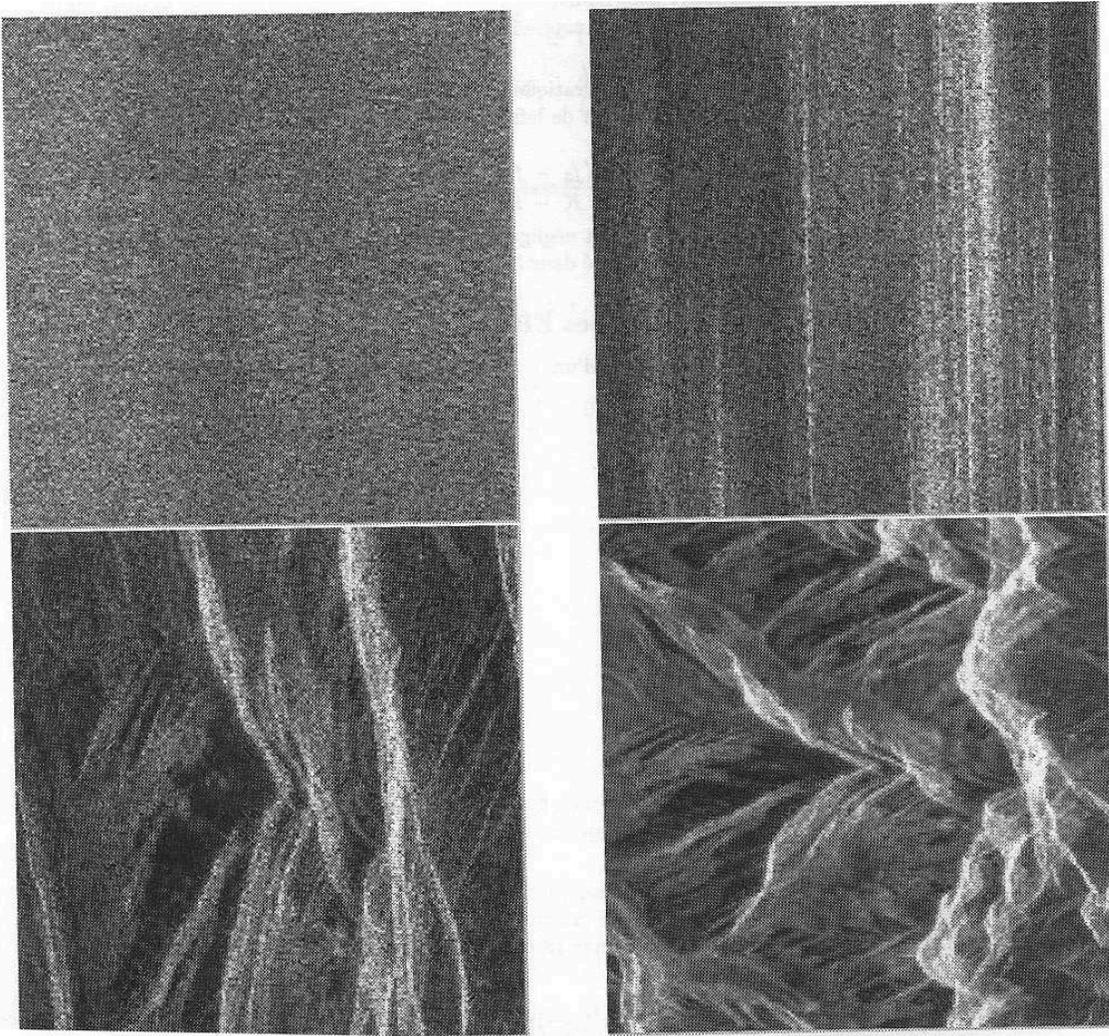


FIG. 1.2 – Passage d’une image RAW à SLC ©ESA sur le massif du Mont Blanc. En haute à gauche, Image brute RAW. En haut à droite, filtrage adapté en distance. En bas à gauche, synthèse d’ouverture. En bas a droite, image multivue. Images tirées d’un cours d’Imagerie Radar à Synthèse d’Ouverture de Telecom ParisTech.

pas pour tirer des informations concernant la distance sol-satellite. Néanmoins, si nous la mesurons sous exactement les mêmes conditions géométriques, elle est reproductible. Lorsqu’on calcule un interférogramme, on multiplie une image par le complexe conjugué de l’autre et la phase propre de chaque cellule de résolution est annulée, permettant de conserver seulement le terme proportionnel à la distance.

### 1.3 Calcul d’un interférogramme

Un interférogramme est calculé à partir de deux images radar prises sur la même scène avec un angle d’incidence  $\theta$  légèrement différent (voir Figure 1.3). Avant de calculer un interférogramme, une étape de recalage d’images est nécessaire.

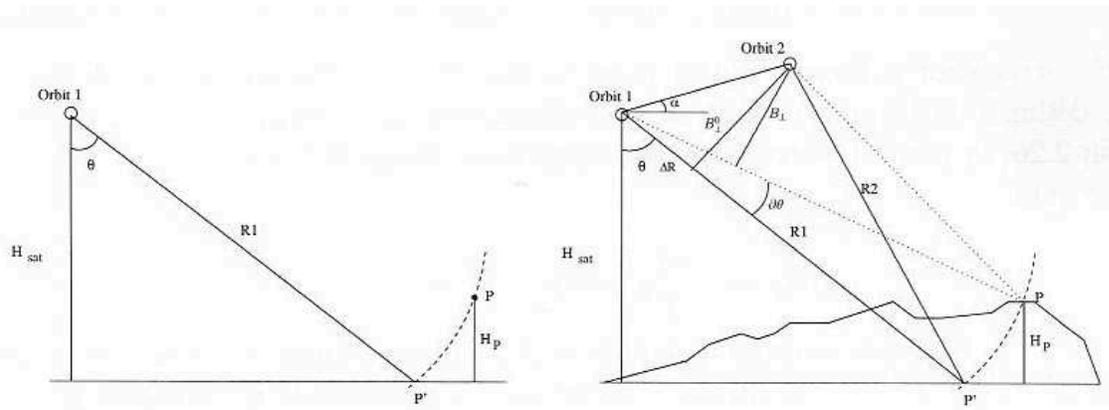


FIG. 1.3 – Configuration simple et interférométrique d'une cible située à la distance  $R$  du satellite ( $R_1$  lors du premier passage du satellite et  $R_2$  lors du second) et d'altitude  $H_p$  par rapport à une surface de référence. (a) Le point  $P'$  situé sur la surface de référence ( $H_{p'} = 0$ ) et le point  $P$  (d'altitude  $H_p$ ) se situent à la même distance du satellite. Les deux points ne peuvent pas être distingués à partir d'un seul passage du satellite. (b) Configuration pour un couple interférométrique : les deux orbites sont séparées par une ligne de base,  $B$ , et observent la cible avec deux angles de vue différents. D'après Hanssen [2001].

### 1.3.1 Recalage des images SLC

Il s'agit de mettre une image, souvent appelée esclave, sous la géométrie d'une autre image, appelée master. Pour cela, des techniques de corrélation sont utilisées souvent appliquées en deux étapes : la corrélation grossière et la fine. Pour la corrélation grossière, les décalages sont calculés par corrélation d'images dans un intervalle assez large autour d'une valeur initiale obtenue à partir des orbites ou à partir du repérage visuel d'un même point sur les deux images. La corrélation fine se fait aussi sur les images d'intensité suréchantillonnées (au moins d'un facteur deux). Le but est de trouver, pour un groupe de points uniformément répartis sur les images, les décalages sous pixeliques en distance et azimuth pour lesquels nous avons un pic de corrélation, puis d'ajuster une transformation polynômiale sur ces points pour déterminer les décalages

$$\Delta\rho = a_\rho + b_\rho x + c_\rho y + d_\rho xy + \dots \quad (1.1)$$

$$\Delta a = a_a + b_a x + c_a y + d_a xy + \dots \quad (1.2)$$

pour chaque pixel de l'image où  $\Delta\rho$  est le décalage en distance,  $\Delta a$  le décalage en azimuth,  $x$  et  $y$  représentant les positions du pixel en distance et azimuth. Une étape de rééchantillonnage et d'interpolation est ensuite faite afin d'obtenir l'image esclave finalement recalée dans la géométrie de l'image maîtresse.

### 1.3.2 Phase interférométrique

Un interférogramme (voir Figure 1.4) est calculé à partir de la multiplication complexe (pixel à pixel) des images SAR SLC et peut être représenté par :

$$y_1 y_2^* = |y_1| e^{j\phi_1} |y_2| e^{-j\phi_2} = |y_1| |y_2| e^{j(\phi_1 - \phi_2)} = |y_1| |y_2| e^{j(\phi_{int})}$$



FIG. 1.4 – Phase,  $\phi_{int}$ , de l’interférogramme brut, imageant la zone métropolitaine de la ville de Mexico (ZMVM) à partir de données Envisat.

## 1.4 Contenu de la phase interférométrique

La phase d’un interférogramme contient plusieurs informations et peut être représentée par :

$$\phi_{int} = \phi_{flat} + \phi_{topo} + \phi_{def} + \phi_{atm} + \phi_{noise} \quad (1.3)$$

où  $\phi_{flat}$  est le délai de phase associé à la contribution de la terre plate,  $\phi_{topo}$  est le délai de phase associé à la phase topographique,  $\phi_{def}$  est le délai de phase représentant le déplacement du terrain sur la ligne de visée du radar (LOS, Line Of Sight),  $\phi_{atm}$  est le délai de phase associé à la contribution atmosphérique et  $\phi_{noise}$  est le délai de phase associé au bruit dû aux agents qui dégradent le signal comme les erreurs de recalage, le bruit thermique ou les modifications de la phase propre du pixel par décorrelation temporelle ou géométrique. Si nous sommes intéressés à extraire le terme représentant le déplacement ayant lieu entre les deux acquisitions,  $\phi_{def}$ , une connaissance des caractéristiques des termes qui l’accompagnent et leur modélisation est nécessaire.

### 1.4.1 Contribution de la terre plate ou phase orbitale

Ce délai de phase est provoqué par le décalage entre les deux orbites utilisées pour les acquisitions SAR. Il est proportionnel à la distance sur la ligne de visée du radar,  $\Delta r$ , d’un point imagé par le radar par rapport à un point appartenant à une surface de référence :

$$\phi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda R} \frac{B_{\perp} \Delta r}{\tan \theta} \quad (1.4)$$

où  $\lambda$  est la longueur d’onde du rai électromagnétique. En général, la ligne de base perpendiculaire,  $B_{\perp}$ , est calculée à partir des données précises des orbites. La référence est définie

par l'ellipsoïde global WGS84. Les orbites précises pour les satellites ERS et ENVISAT sont calculées par le Department of Earth Observation and Space Systems (DEOS) of the Delft University of Technology [Scharroo and Visser [1998]]. Toutefois, elles présentent des erreurs de l'ordre de 10 cm et donc une contribution résiduelle,  $\phi_{flat_{res}}$ , reste contenue dans la phase interférométrique,

$$\phi_{int} = \phi_{flat_{res}} + \phi_{topo} + \phi_{def} + \phi_{atm} + \phi_{noise} \quad (1.5)$$

Cette contribution résiduelle peut aller jusqu'à trois ou quatre franges dans un interférogramme, ce qui rend difficile l'extraction du délai de phase lié à la déformation. Pour corriger du terme  $\phi_{flat_{res}}$ , Hanssen [2001] propose une solution basée sur l'ajustement d'un plan à travers l'interférogramme (voir section 3.5).

### 1.4.2 Phase topographique

Les franges topographiques,  $\phi_{topo}$ , sont dues à la géométrie d'acquisition différente entre les deux passages du satellite. Ceci crée un effet stéréoscopique qui produit des franges épousant les contours topographiques. La phase topographique peut être représentée par :

$$\phi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda R} \frac{B_{\perp} \Delta h}{\sin \theta} \quad (1.6)$$

Elle est proportionnelle à la ligne de base perpendiculaire,  $B_{\perp}$ , et à la topographie  $\Delta h$ , contenue dans le Modèle Numérique de Terrain, MNT. Pour limiter la contribution de ce terme à la phase interférométrique,  $B_{\perp}$  est souvent limitée à des valeurs inférieures à 300 ou 400 m. Encore une fois, ce terme nécessite d'être retiré de l'interférogramme pour pouvoir obtenir le terme lié à la déformation. Néanmoins, des erreurs sur l'estimation du MNT causent l'introduction d'un nouveau terme de phase résiduelle  $\phi_{topo_{res}}$  contenue dans la phase interférométrique :

$$\phi_{int} = \phi_{flat_{res}} + \phi_{topo_{res}} + \phi_{def} + \phi_{atm} + \phi_{noise} \quad (1.7)$$

Des approches utilisant plusieurs images et donc interférogrammes pour mesurer la déformation profitent de cette redondance d'information pour corriger la phase interférométrique,  $\phi_{int}$ , du terme  $\phi_{topo_{res}}$  (voir section 3.10).

### 1.4.3 Phase atmosphérique

Outre la décorrélation spatiale ou temporelle qui affecte les interférogrammes, l'atmosphère est l'un des principaux facteurs qui empêchent l'extraction du signal interférométrique rapporté à la déformation. Actuellement, il n'existe pas de techniques pour mesurer ou modéliser avec précision et de manière automatisée, la contribution de la phase atmosphérique sur les interférogrammes. Pourtant, de nombreuses études ont été menées pour essayer de connaître la nature, le comportement de ces signaux et leur signature sur les interférogrammes.

Le signal atmosphérique peut être séparé en troposphérique et ionosphérique. La contribution ionosphérique pour les interférogrammes ERS ou ENVISAT (bande C) est considérablement atténuée sur les interférogrammes lors des étapes de correction d'orbites puisqu'elle peut être approximée par un polynôme de degré 2 sur la longueur de l'image SAR. Le signal troposphérique présent dans un interférogramme dépend des caractéristiques météorologiques de la région étudiée au moment de l'acquisition. Le contenu du signal

atmosphérique est très variable en temps ; certains interférogrammes peuvent être peu affectés, pour d'autres le signal interférométrique peut être complètement dominé par les contributions atmosphériques. De nombreuses études ont démontré que le contenu de vapeur d'eau dans la troposphère, modifiant la réfractivité du signal électromagnétique, est à l'origine des contributions atmosphériques dans les interférogrammes.

Hanssen [2001] a classé le signal troposphérique en deux grands groupes : contributions turbulentes et verticalement stratifiées. Les premières sont le résultat de processus turbulents dans l'atmosphère. Ils produisent des hétérogénéités tridimensionnelles sur la réfractivité lors de l'acquisition des images SAR et affectent à la fois terrain plat et montagnes. Les contributions verticalement stratifiées sont le résultat de la variation des profils verticaux de réfractivité au moment de l'acquisition des images SAR, en considérant l'absence d'hétérogénéités dans les couches horizontales. Ce type de perturbation affecte seulement les terrains montagneux et est corrélé avec la topographie.

Dans la littérature il existe différentes approches pour essayer de corriger les interférogrammes des contributions atmosphériques. Elles peuvent être séparées en approches nécessitant ou non des données extérieures. Les premières utilisent soit des données provenant des GPS<sup>1</sup> [Wadge et al. [2002], Li et al. [2006b], Li et al. [2006c]], des GPS et d'images MODIS<sup>2</sup> [Li et al. [2005]], d'images MERIS<sup>3</sup>[Li et al. [2006d], Li et al. [2006a]] soit de données météorologiques associées à des modèles météorologiques méso-échelle, NH3D ou MM5) [Delacourt et al. [1998], Wadge et al. [2002], Puysegur et al. [2007]].

Les approches où les données externes ne sont pas nécessaires cherchent à corriger la contribution du signal troposphérique verticalement stratifié à partir de la corrélation existante entre la phase et la topographie. Cette correction dépend de la topographie associée à la région étudiée et son application peut s'avérer plus au moins efficace puisque l'hypothèse de couches horizontalement homogènes est difficilement vérifiable à l'échelle de la scène imagée par le radar. Pourtant, même si elle ne corrige qu'une partie des contributions atmosphériques, dans la plupart des cas, elle permet de diminuer fortement le bruit sur la phase des interférogrammes auxquels elle est appliquée. Des études témoignant de cette amélioration peuvent être trouvées dans [Beauducel et al. [2000], Remy et al. [2003], Chaabane et al. [2007], Cavalié et al. [2007]] (voir section 3.4).

#### 1.4.4 Bruit dans la phase

Malgré les corrections qui s'appliquent à la phase interférométrique pour essayer de séparer le signal associé à la déformation, quelques contributions peuvent rester contenues dans la phase et nuire à la précision des mesures finales.

La cohérence d'un interférogramme est une mesure déterminant le degré de similarité entre les deux images utilisées lors de sa construction.

$$d(x, y) = \frac{|\sum_{x', y' \in \nu_{xy}} z_1(x', y') z_2^*(x', y')|}{\sqrt{\sum_{x', y' \in \nu_{xy}} |z_1(x', y')|^2} \sqrt{\sum_{x', y' \in \nu_{xy}} |z_2(x', y')|^2}} \quad (1.8)$$

où  $x, y$ , sont les coordonnées distance et azimuth respectivement,  $\nu_{xy}$  est le voisinage du pixel  $(x, y)$ ,  $z_1(x, y)$  et  $z_2(x, y)$  sont les deux images SLC. Elle dépend surtout des mécanismes de rétrodiffusion des diffuseurs sur la scène imagée qui doivent rester inchangés entre les deux

---

<sup>1</sup>Global Positioning System

<sup>2</sup>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

<sup>3</sup>Medium Resolution Imaging Spectrometer Instrument

acquisitions pour avoir une cohérence maximale. Néanmoins, la décorrélation peut être causée par plusieurs sources qui produisent des termes à effet multiplicatif sur la phase interférométrique, parmi les principales nous pouvons citer la décorrélation thermique, qui dépend des caractéristiques du système capteur ; la décorrélation géométrique, causée par la différence d'angle d'incidence entre les deux acquisitions et dépendant donc de la ligne de base perpendiculaire,  $B_{\perp}$  ; la décorrélation temporelle causée par des changements physiques du terrain imagé, ayant eu lieu entre les deux acquisitions (Figure 1.5), affectant les caractéristiques de rétrodiffusion de la surface ; la décorrélation dépendant du choix du Doppler centroïde lors de l'étape de focalisation et correspondant aux variations d'angle de vue en azimut ou squint ; la décorrélation due au traitement, dépendant de la qualité de l'interpolation des images lors de l'étape du recalage. En général, il est possible de diminuer les effets de ces contributions en limitant les valeurs des  $B_{\perp}$  et  $B_t$ <sup>4</sup> utilisées, et en utilisant des fréquences doppler centroïde moyennes. La ligne de base perpendiculaire critique au delà de laquelle il existe une décorrélation totale du signal interférométrique est égale à 1100 m pour ENVISAT.

#### 1.4.5 Déroulement de la phase interférométrique

La phase interférométrique est due au trajet aller-retour de l'onde envoyée par le radar. A chaque fois que l'onde parcourt une distance égale à la longueur d'onde  $\lambda$ , sa phase augmente de  $2\pi$ . Cette distance n'est donc connue que modulo  $2\pi$ . Divers algorithmes existent pour dérouler la phase, i.e., pour connaître le bon multiple de  $2\pi$ , et obtenir la vraie distance entre le capteur et la cible,  $\psi_{déroulée}$ ,

$$\psi_{déroulée} = \phi_{enroulée} + 2\pi n \quad (1.9)$$

La procédure la plus simple pour dérouler la phase consiste à réaliser une somme des différences de phase (intégration des gradients de phase) autour d'un chemin bouclé, en commençant par un point de référence. La phase est supposée lisse avec des variations lentes, alors les différences de phase entre deux pixels voisins sont censées être comprises en un demi tour de phase ( $\pm\pi$  radians). Même si cette hypothèse est presque toujours valable, la présence de discontinuités de phase, provoquées par le bruit de décorrélation ou des gradients de déformation élevés, cause des inconsistances (aussi appelées résidus) donnant différents résultats dépendant du chemin d'intégration suivi. Pour surmonter ce problème, différentes stratégies ont été développées. Parmi les plus connues, nous pouvons citer celles qui essaient de minimiser la norme  $L_p$  des résidus, tel est le cas de la méthode des Moindres Carres non pondérés, ULMS<sup>5</sup>, (p=2) [Strang and Borre [1997]], la méthode des Moindres Carrés pondérés, WLMS<sup>6</sup>, (p=2) [Ghiglia and Pritt [1998], Spagnolini [1995], Davidson and Bamler [1999], Pritt [1997]], la méthode du coût minimal, MCF<sup>7</sup>, (p=1) [Costantini [1998], Flynn [1997]], la méthode Branch-cut et d'autres approches utilisant p=0 [Goldstein et al. [1988], Ghiglia and Romero [1996], Chen and Zebker [2000]]. D'autres solutions comme la croissance de régions [Xu and Cumming [1999]], le filtrage de Kalman [Loffeld [1996]] et les algorithmes basés sur un modèle [Friedlander and Francos [1996]] ont aussi été proposées. Aller plus dans le détail de chacune des méthodes est en dehors

<sup>4</sup>la ligne de base temporelle, représentant l'écart en temps entre les deux acquisitions utilisées pour construire un interférogramme

<sup>5</sup>Unweighted Least Mean Squares method

<sup>6</sup>Weighted Least Mean Squares method

<sup>7</sup>Minimum Cost Flow

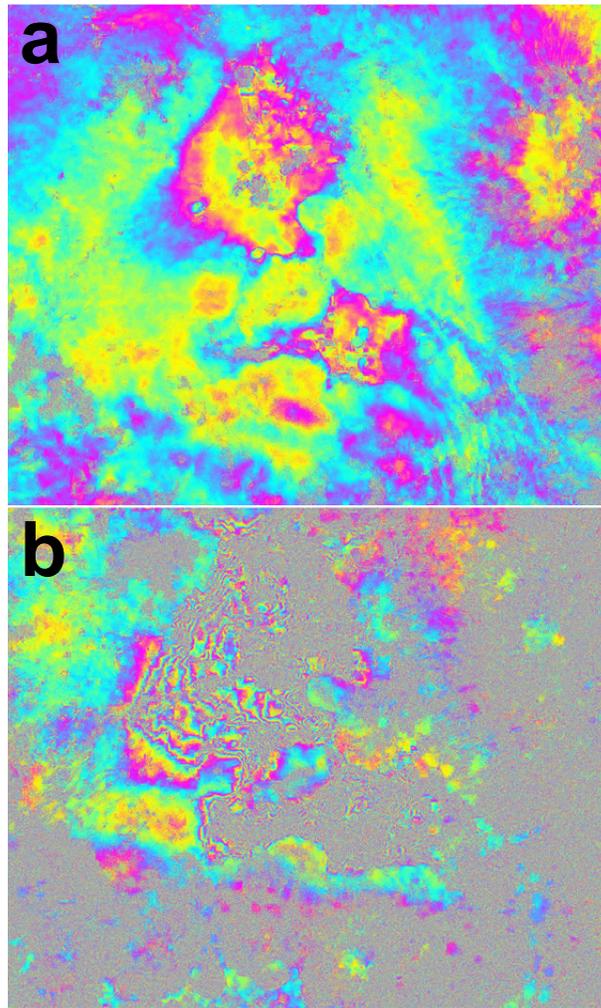


FIG. 1.5 – a) et b) Phase,  $\phi_{int} = \phi_{flat_{res}} + \phi_{topo_{res}} + \phi_{def} + \phi_{atm} + \phi_{noise}$  des interférogrammes, imageant la ZMVM. Les contributions orbitales et topographiques ont été enlevées. La décorrélation visible dans (b) et pratiquement absente de (a) est directement liée à la ligne de base temporelle,  $B_t$ , égale à 35 et 9 x 35 jours, respectivement et dans une moindre mesure à  $B_{\perp}$  égale à 24 et 265 m, respectivement.

des objectifs de cette thèse. Toutefois, il est important de dire qu'à l'heure actuelle aucun algorithme ne peut être qualifié de meilleur, car le déroulement de phase continue d'être un sujet de recherche active où des améliorations importantes sont encore attendues [Ferretti et al. [2007]].

## 1.5 Mesure des mouvements de terrain par interférométrie

Cela fait presque 20 ans depuis que l'interférométrie fût utilisée pour la première fois pour mesurer des déformations du terrain [Gabriel et al. [1989]]. Depuis, l'application de la technique a évolué. Tout au début, les groupes de recherche se servaient de l'application de l'InSAR standard, où une paire d'images SAR est utilisée pour construire un seul interférogramme. Les avantages étaient clairs ; large couverture des images et grande résolution spatiale, mais des désavantages ont aussi été découverts. La précision des mesures

reste limitée surtout à cause du bruit et des contributions atmosphériques qui masquent la phase, limitant son application à l'étude des déformations avec une magnitude considérable (de l'ordre des décimètres aux mètres). De plus, la modélisation précise et détaillée des déformations en temps, ayant lieu entre deux acquisitions avec une  $B_t$  importante, n'est pas possible. D'un côté, parce que des acquisitions intermédiaires, permettant le suivi des variations de la vitesse de déformation, ne sont pas utilisées (à l'intérieur du pas de temps étudié), et d'un autre côté parce que le bruit de décorrélation nuit aux interférogrammes avec des lignes de base importantes ( $B_t$ ,  $B_\perp$ ).

De nombreuses approches ont commencé à être développées à partir de la fin des années 90 [Usai et al. [1999], Ferretti et al. [2001], Berardino et al. [2002], Schmidt and Bürgmann [2003]] pour essayer de résoudre ces problèmes et d'exploiter au mieux les bases de données fournies par les satellites portant des capteurs SAR. La précision des mesures et la capacité de suivre en temps l'évolution des déformations ont été améliorées par les approches utilisant plusieurs acquisitions sur une même scène. Grâce à la redondance d'information apportée par le fait d'utiliser plusieurs interférogrammes, il est possible de diminuer le bruit sur les mesures et de séparer le délai de phase rapporté à la déformation du reste du signal interférométrique à partir de l'estimation des termes associés à l'erreur du MNT,  $\phi_{topores}$ , les contributions atmosphériques,  $\phi_{atm}$  et le résidu orbital,  $\phi_{flatres}$ . Le suivi de l'évolution de la déformation est restreint en temps par le nombre d'acquisitions disponibles sur la zone d'étude, et en espace, par le nombre de pixels non bruités ou cohérents.

Deux grande classes de techniques principales ont été développées pour mesurer de manière précise la déformation à partir d'une série d'acquisitions sur la même zone. Elles sont présentées dans les sections suivantes.

### 1.5.1 Mesure de la déformation à partir des interférogrammes construits avec des petites lignes de base

Une des différences de cette technique par rapport à celle des réflecteurs persistants (section 1.5.2) est l'utilisation d'interférogrammes à petites lignes de base. Cela vient principalement du critère utilisé pour choisir les pixels, avec un bas niveau de bruit, qui seront utilisés par la suite pour mesurer la déformation. En effet, en général pour cette technique, le choix des pixels est basé sur le niveau de cohérence spatiale du délai de phase. Le but est donc de construire des interférogrammes les plus cohérents possibles. Comme cela a été dit dans la section 1.4.4, une des façons de maximiser la cohérence des interférogrammes est de limiter les lignes de base perpendiculaire,  $B_\perp$ , et temporelle,  $B_t$ , même si ceci peut signifier l'exclusion de certaines images disponibles sur la zone étudiée. Des travaux utilisant cette approche sont présentés dans les sections qui suivent.

#### 1.5.1.1 Usai et al. [1999], Usai [2003]

**Prétraitement** Tout d'abord, l'auteur applique un prétraitement sur chacun des interférogrammes qui consiste à enlever la contribution topographique, à dérouler leurs franges et à les référencer tous par rapport à un même point de l'image (typiquement un point qui ne bouge pas). Dans la pratique, la valeur de référence est calculée en moyennant toutes les valeurs de phase déroulées des pixels contenus dans une fenêtre carrée de  $0.004^\circ$ , située dans une zone non déformable. Puisque cette valeur de référence peut être biaisée par les erreurs de déroulement, des tests de fermeture sur des triplets d'interférogrammes sont effectués.

Les interférogrammes  $AB$ ,  $BC$  et  $CA$ , construits à partir des acquisitions SAR  $A$ ,  $B$  et  $C$

sont donc combinés linéairement. Si les interférogrammes ne sont pas biaisés nous pouvons espérer que la somme sur chacun des pixels appartenant à l'interférogramme résiduel soit égale à zéro :

$$D_{AB}(i, j) + D_{BC}(i, j) + D_{CA}(i, j) = 0 \quad (1.10)$$

où  $D$  est le délai de phase déroulé et référencé et  $(i, j)$  sont les coordonnées d'un pixel quelconque. De même, si l'un des interférogrammes est biaisé, e.g.,  $D'_{AB}(i, j) = D_{AB}(i, j) + K$ , où  $K = cte$ , nous nous attendons à un biais sur la valeur absolue de la déformation sur chaque pixel et donc pas de fermeture.

$$D'_{AB}(i, j) + D_{BC}(i, j) + D_{CA}(i, j) = K \quad (1.11)$$

Quand un triplet ne ferme pas, elle crée de nouveaux triplets pour comparer chacun des trois interférogrammes avec d'autres et repérer celui qui est biaisé, en espérant que celui-ci causera des biais sur chacun des triplets dans lesquels il sera mis. Le biais estimé est calculé à partir du pic de l'histogramme calculé sur toutes les valeurs de l'interférogramme résiduel. Elle fait cela de manière itérative jusqu'à ce que tous les biais soient égaux à zéro. Finalement, elle met tous les interférogrammes dans la même géométrie.

**Méthode** Usai et al. [1999] a proposé l'utilisation d'une série d'interférogrammes se chevauchant en temps pour suivre l'évolution du délai de phase. Le problème est de trouver le délai de phase cumulé sur chacune des dates correspondantes aux acquisition SAR utilisées, à partir des valeurs des phases contenues dans les interférogrammes construits. Le problème inverse est résolu en utilisant la méthode des moindres carrés. Les valeurs des phases,  $y = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N]$ , contenues dans les  $N$  interférogrammes sont considérées comme données d'entrée. La méthode cherche à estimer les valeurs des délais de phase cumulés  $x = [d_2, d_3, \dots, d_M]$ , pour les  $M - 1$  dates d'acquisition des images SAR en considérant le délai de phase sur la première acquisition,  $d_1$ , nul. Le système peut être écrit alors comme :

$$y = Ax \quad (1.12)$$

Les lignes de la matrice  $A$ , correspondent à chaque interférogramme, tandis que ses colonnes correspondent aux dates d'acquisitions des images SAR. Pour l'interférogramme  $k$ ,

$$I_k = I_{d_i} - I_{d_j} \quad (1.13)$$

les valeurs pour la ligne  $k$  sont tous égaux à zéro sauf pour les colonnes  $i$  et  $j$  où les valeurs sont 1 et  $-1$  respectivement. Les valeurs de phase estimées sont alors calculées à partir de

$$\hat{x} = (A^t A)^{-1} A^t y \quad (1.14)$$

Pour résoudre le problème des groupes d'images disjoints, i.e. non liés entre eux, elle calcule des interférogrammes simulés de la déformation à partir de l'interpolation des résultats obtenus pour un premier groupe d'images.

### 1.5.1.2 Berardino et al. [2002]

**Prétraitement** La méthode est appliquée sur des interférogrammes calculés avec une ligne de base perpendiculaire  $B_{\perp}$  plus petite que 130 m. Une étape de multilook complexe (range : 4 looks, azimuth : 20) a été utilisée. La phase topographique a été enlevée. Les interférogrammes ont été déroulés et leur phase a été référencée par rapport à un pixel

montrant une déformation nulle. Un seuil de cohérence spatiale égal à 0.25 a été utilisé. L'approche est appliquée aux pixels qui ont une cohérence plus grande que le seuil sur au moins 30% des interférogrammes.

**Méthode** Berardino et al. [2002] appliquent la méthode de Singular Value Decomposition (SVD) pour résoudre (1.12) en présence de groupes d'interférogrammes disjoints. En effet, la matrice  $A$  de l'équation (1.12) est une matrice dépendant des données disponibles. Si toutes les acquisitions appartiennent à un même groupe d'interférogrammes, le système est bien déterminé ou surdéterminé et peut être résolu en utilisant (1.14). Par contre, si les acquisitions appartiennent à différents groupes d'interférogrammes disjoints, la matrice  $A^t A$  dans (1.14) devient singulière. Une solution est donc d'appliquer la méthode SVD qui permet le calcul de la matrice pseudo inverse de  $A$  et donc la solution Least Squares (LS) de norme minimale. Pour un groupe de  $N$  interférogrammes et  $M+1$  images, les valeurs estimées de la phase sont alors calculées à partir de

$$\hat{\phi} = \mathbf{A}^+ y \quad \text{avec} \quad \mathbf{A}^+ = \mathbf{V}\mathbf{S}^+\mathbf{U}^t \quad (1.15)$$

où  $\mathbf{U}$  est une matrice orthogonale ( $N \times N$ ) dont les  $M$  premiers colonnes contiennent les vecteurs propres de  $\mathbf{A}\mathbf{A}^t$ ,  $\mathbf{V}$  est une matrice orthogonale ( $M \times N$ ) dont les colonnes contiennent les vecteurs propres de  $\mathbf{A}^t\mathbf{A}$  et  $\mathbf{S}$  est une matrice ( $N \times N$ ) dont les entrées sont les racines carrées des valeurs propres correspondantes de la matrice  $\mathbf{A}\mathbf{A}^t$ . Les auteurs rajoutent une modification au système en définissant le vecteur d'inconnues  $x$  comme des incréments de vitesse,  $v_l$ , entre deux pas de temps successifs,  $t_{l-1}$  et  $t_l$  :

$$v^T = [v_1 = \frac{d_1}{t_1 - t_0}, \dots, v_M = \frac{d_M - d_{M-1}}{t_M - t_{M-1}}] \quad (1.16)$$

Au lieu de (1.13) ils utilisent donc :

$$I_k = \sum_{l=j+1}^i (t_l - t_{l-1})v_l \quad (1.17)$$

Le système est donc défini par :

$$y = Bv \quad (1.18)$$

Il peut être modifié pour introduire des informations concernant le comportement de la déformation, avec  $\mathbf{v} = \mathbf{M}\mathbf{p}$ , le vecteur  $\mathbf{p}$  contenant par exemple la vitesse et l'accélération de la déformation, de façon à avoir :

$$y = \mathbf{B}\mathbf{M}\mathbf{p} \quad (1.19)$$

Sur un premier jeu d'interférogrammes déroulés, Berardino et al. [2002] estiment conjointement les erreurs de MNT et la composante passe-bas de la déformation en temps à travers la solution au sens des moindres carrés du système

$$y = [\mathbf{B}\mathbf{M}, \mathbf{c}]\mathbf{p} \quad (1.20)$$

où  $\mathbf{c}^t = [(4\pi/\lambda)(B_{\perp 1}/r \sin \theta), \dots, (4\pi/\lambda)(B_{\perp M}/r \sin \theta)]$ . Ces estimations sont ôtées des interférogrammes enroulés pour réduire le nombre de franges à dérouler. Après un deuxième déroulement, la composante de la déformation issue du filtre passe-bas est rajoutée pour former un deuxième groupe d'interférogrammes déroulés.

C'est à ce stade que l'algorithme SVD est appliqué. Les effets atmosphériques sont estimés en appliquant une cascade de filtres passe-bas en espace et passe-haut en temps (à la façon de Ferretti et al. [2001]) sur les résultats de l'inversion SVD. Finalement, ils sont ôtés du signal de déformation estimé par l'inversion.

### 1.5.1.3 Schmidt and Bürgmann [2003]

**Prétraitement** En utilisant une approche similaire, Schmidt and Bürgmann [2003] ont inversé des interférogrammes calculés avec une  $B_{\perp}$  plus petite que 200 m avec l'intention de réduire au maximum les erreurs rapportées à la topographie. Les interférogrammes ont aussi été multilookés (range= 8 looks, azimuth=40 looks) et filtrés avec le filtre adaptatif inclu dans ROI\_PAC [Goldstein and Werner [1998]]. Ils ont été corrigés de la phase topographique et des contributions orbitales, puis le déroulement a été appliqué et finalement une étape de ré-estimation de la phase orbitale a été faite. Les interférogrammes ont été référencés par rapport à une colline qui est censée ne pas se déformer.

**Méthode** Schmidt and Bürgmann [2003] inversent les interférogrammes pour trouver les incréments,  $m$ , du délai de phase entre deux images successives à partir de :

$$d = Gm \quad (1.21)$$

où  $d$  est le vecteur contenant les données des phases interférométriques  $\phi_{ij}$  et  $G$  est construite à partir de :

$$\phi_{ij} = \sum_{k=i}^{j-1} m_k \quad \text{pour} \quad i < j \quad (1.22)$$

L'inversion est appliquée sur les pixels cohérents sur tous les interférogrammes.

**Lissage** Pour essayer de corriger les contributions atmosphériques produisant des sauts sur les séries temporelles, ils font l'hypothèse que les accélérations de la déformation sont petites. Le nouveau système devient :

$$\begin{bmatrix} G \\ \gamma^2 \frac{d}{dt^2} \end{bmatrix} m = \begin{bmatrix} d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

où  $\gamma$  est un facteur qui détermine le degré de lissage de la série temporelle en assumant moins de déformation sur les interférogrammes couvrant des périodes petites et plus de déformation sur ceux qui couvrent des longues périodes.

### 1.5.1.4 Cavalié et al. [2007]

**Prétraitement** Cavalié et al. [2007] utilisent une variante de l'approche proposée par Schmidt and Bürgmann [2003]. Ils utilisent une inversion au sens des moindres carrés du système 1.21. Sur les pixels pour lesquels ce système est sous-déterminé, ils utilisent une inversion SVD. Ils inversent 241 interférogrammes construits avec le logiciel ROI\_PAC à partir de 43 images. Ces interférogrammes ont été construits avec des lignes de base perpendiculaires plus petites que 300 m. Ils ont été corrigés de la phase topographique et des contributions orbitales puis multilookés (distance= 4 looks, azimuth= 20 looks), filtrés (avec le filtre adaptatif) et déroulés avec ROI\_PAC. Cavalié et al. [2007] utilisent une méthodologie pour corriger les interférogrammes des contributions orbitales résiduelles

(en estimant le plan incliné "tordu" qui correspond le mieux à la phase interférométrique des pixels placés en champ lointain) et des contributions atmosphériques stratifiées (à travers d'une régression linéaire entre les valeurs de phase et d'altitude). Ces contributions atmosphériques stratifiées sont analysées par date d'acquisition grâce à l'inversion des pentes phase/topographie. Chaque interférogramme est référencé de façon à avoir un délai de phase en champ lointain nul.

**Méthode** Comme cela a été dit, dans un premier temps Cavalié et al. [2007] utilisent une inversion au sens des moindres carrés du système présenté par Schmidt and Bürgmann [2003] (équation 1.21). Sur les pixels pour lesquels ce système est sous déterminé, ils utilisent une inversion SVD.

**Lissage** Pour réduire l'influence des contributions atmosphériques aléatoires sur les interférogrammes, ils utilisent une inversion contrainte pour minimiser la courbure de l'évolution temporelle de la phase. De plus, un terme proportionnel à la ligne de base perpendiculaire est inclu pour limiter les effets des erreurs du modèle numérique de terrain. Le système à inverser devient alors :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{d}' \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{G}' & \mathbf{b}' \\ \gamma^2 \omega_i \frac{d}{dt^2} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{m} \\ e_{DEM} \end{pmatrix} \quad (1.24)$$

où  $\mathbf{b}$  est le vecteur de ligne de base perpendiculaire et  $e_{DEM}$  est le coefficient de proportionnalité entre la phase et la ligne de base, dû aux erreurs de MNT.  $\mathbf{d}$ ,  $\mathbf{G}$ , and  $\mathbf{b}$  sont pondérés par la matrice  $\mathbf{W}$  ( $\mathbf{d}' = \mathbf{Wd}$ ,  $\mathbf{G}' = \mathbf{WG}$ , et  $\mathbf{b}' = \mathbf{Wb}$ ).  $\mathbf{W}$  pondère les interférogrammes dans l'inversion en fonction de la "qualité" des deux images les composant, "qualité" fonction de l'amplitude de l'écran de phase atmosphérique.  $\gamma$  est le coefficient de lissage introduit pour pondérer les contraintes de courbure minimale  $\frac{dm}{dt^2}$  (où  $t$  est le temps).  $w_i$  pondère les différentes lignes de lissage en fonction de l'écart de temps moyen entre les acquisitions successives utilisées pour minimiser la courbure.

## 1.5.2 Réflecteurs Persistants

En général, les approches de type "réflecteurs persistants" utilisent comme premier critère pour choisir les pixels la stabilité de leur mesure d'amplitude. Cela permet l'utilisation de pixels intrinsèquement cohérents, i.e., avec un niveau faible du bruit, à travers tout l'intervalle de temps étudié indépendamment de leur voisinage spatial. Ces pixels ont la caractéristique de renvoyer le même signal rétrodiffusé pour n'importe quelle géométrie (i.e. pas de décorrelation géométrique du signal). L'utilisation de toutes les images disponibles sur la zone étudiée est possible du fait de l'absence de contraintes pour choisir la ligne de base perpendiculaire et temporelle des interférogrammes. Dans la section suivante nous montrons une des principales approches existantes.

### 1.5.2.1 Ferretti et al. 2000

L'approche proposée par Ferretti et al. 2000, connue sous le nom de "Permanent Scatterers Technique" a été brevetée et le terme "Permanent Scatterers" bénéficie d'une marque déposée. Ses créateurs l'exploitent à travers une entreprise appelée TeleRilevamento Europa, c'est pourquoi les détails de la méthode et son implémentation ne sont pas toujours clairs sur les publications. Ses principales étapes de traitement sont décrites par la suite.

A partir de  $K + 1$  acquisitions ou images SAR disponibles sur la scène d'intérêt,  $K$  interférogrammes sont construits en faisant interférer chacune des images avec une même image maître. Pour éviter l'aliasing, les images SAR sont suréchantillonnées d'un facteur deux en distance et en azimut avant de construire chaque interférogramme. Aucune étape de filtrage n'est appliquée aux interférogrammes. Le choix de l'image maître est fait de façons à limiter la dispersion des lignes de base perpendiculaires [Colesanti et al. [2003]]. La phase topographique simulée à partir du MNT est supprimée sur tous les interférogrammes. Le modèle de phase interférométrique utilisé est :

$$\phi^k = \phi_{topo}^k + \phi_{def}^k + \phi_{atm}^k + \phi_{noise}^k \quad (1.25)$$

où  $\phi_{topo}^k$  est le délai de phase dû aux erreurs sur le MNT,  $\phi_{def}^k$  est le délai de phase dû au déplacement du point,  $\phi_{atm}^k$  est le délai de phase atmosphérique, et  $\phi_{noise}^k$  est le bruit de décorrélation. La phase topographique peut être écrite comme :

$$\phi_{topo}^k = \beta_x^k \Delta h_x \quad (1.26)$$

où  $\beta_x^k$  est le facteur de conversion élévation-phase pour le point  $x$  et dépend de la ligne de base perpendiculaire  $B_{\perp}^k$  et  $\Delta h_x$  est l'élévation du point par rapport à la surface de référence, aussi appelée erreur du MNT. Un modèle linéaire est utilisé pour modéliser le déplacement sur chaque point :

$$\phi_{x,def}^k = -\frac{4\pi}{\lambda} B_t^k v(x) \quad (1.27)$$

où  $B_t^k$  est la ligne de base temporelle par rapport à l'image maître et  $v(x)$  est le taux de déplacement moyen du point  $x$ . Le déplacement non-linéaire est contenu dans  $\phi_{noise}^k$ . La phase atmosphérique,  $\phi_{atm}^k$ , sera estimée sur un ensemble de pixels appelés candidats à réflecteurs persistants choisis en utilisant un seuil sur l'indice de dispersion de l'amplitude :

$$D_a = \hat{\sigma}_{\phi} = \frac{\sigma_a}{\mu_a} \quad (1.28)$$

où  $\sigma_a$  et  $\mu_a$  sont respectivement l'écart-type et la moyenne de l'amplitude d'un pixel en temps. L'estimation de  $\phi_{atm}^k$  se fait à partir du filtrage de la phase résiduelle  $e_{x,y}^k$  :

$$e_{x,y}^k = \phi_{x,y}^k - (\beta_x^k \Delta h_{x,y} + \frac{4\pi}{\lambda} B_t^k v(x,y)) \quad (1.29)$$

après estimation des paramètres modélisés  $\beta_x^k \Delta h_{x,y}$  et  $\frac{4\pi}{\lambda} B_t^k v(x,y)$ , sachant que le signal atmosphérique est corrélé en espace. L'estimation des paramètres modélisés est faite entre pixels voisins, car les contributions non modélisées doivent être plus petites que  $\pi$  du fait de l'utilisation de la phase non déroulée des interférogrammes. L'effet des contributions atmosphériques est considérablement réduit ainsi. Une fois ces estimations faites, la phase résiduelle est calculée et intégrée pour être déroulée (à travers un algorithme de moindres carrés pondérés) sur chacun des candidats réflecteurs persistants et par rapport à un pixel de référence. Finalement la phase résiduelle déroulée est filtrée pour isoler la composante atmosphérique. D'abord un filtre temporel passe-haut est appliqué pour retirer, s'il en existe, les termes du déplacement corrélés en temps. Puis un filtre spatial passe-bas est appliqué pour enlever le bruit aléatoire. Le résultat est une estimation des contributions atmosphériques à grande longueur d'onde qui seront interpolées par la suite sur tous les

pixels (et pas seulement les candidats), pour les enlever des interférogrammes différentiels. La procédure est redémarrée pour sélectionner plus de pixels réflecteurs persistants. Cette fois-ci, la procédure est appliquée pixel par pixel et non entre pixels voisins puisque les contributions atmosphériques ont été enlevées. Finalement une estimation de la déformation linéaire, des erreurs du MNT et de la déformation non linéaire (à partir du filtrage passe-bas de la phase résiduelle) est obtenue.

D'autres méthodes utilisant des réflecteurs persistants existent dans la littérature. Tel est le cas des approches développés par Hooper et al. [2004] à l'Université de Stanford (STAMPS), Kampes [2006] au DLR<sup>8</sup> en collaboration avec l'Université de Delft (STUN), Werner et al. [2003] et son équipe Gamma en Suisse (IPTA). La plupart d'entre eux ont en général ajouté des modifications et améliorations à la méthode originale proposée par Ferretti et al. [2001].

### 1.5.3 Bilan des méthodes présentées pour mesurer la déformation

Les deux méthodes présentées précédemment ont chacune des avantages et des inconvénients. Dans la première approche, les problèmes de décorrélation présents sur les interférogrammes construits avec des lignes de base importantes peuvent empêcher l'utilisation de la totalité d'images sur la zone étudiée. Par contre, dans l'approche des réflecteurs persistants, grâce au critère de sélection des pixels, toutes les images peuvent être utilisées pour construire les interférogrammes avec des lignes de base pouvant aller au delà de la base critique perpendiculaire et avec n'importe quel écart temporel. Pourtant, la densité de pixels sur lesquels il est possible d'obtenir des mesures de la déformation est souvent plus importante quand on utilise l'approche des petites lignes de base.

Le choix de l'approche à utiliser dépendra souvent de l'application. L'approche des petites lignes de base permet de récupérer l'information portée par différents types de réflecteurs, du fait du filtre appliqué en distance sur les SLCs avant de former l'interférogramme. Par contre, le critère de sélection étant en général la cohérence spatiale, un pixel isolé au milieu d'une zone à couverture végétal changeante ne peut pas être pris en compte. Ainsi sur les zones couvertes par la végétation, en utilisant l'approche des petites lignes de base, nous risquons de perdre la cohérence sur nos interférogrammes assez vite, surtout si nous travaillons avec des images issues des radars en bande C. Ceci n'est pas toujours un problème pour l'approche des réflecteurs persistants, où la sélection des pixels ne dépend pas des propriétés des voisins (comme c'est le cas pour la cohérence spatiale) et des pixels isolés se trouvant au milieu de pixels non cohérents peuvent toujours être utilisés pour mesurer la déformation. L'approche "réflecteurs persistants", en sélectionnant des réflecteurs "points", dont la réponse dépend peu de l'angle d'incidence, est adapté au milieu urbanisé où ce type de réflecteur est présent. De ce fait, le désavantage de ce type d'approche est la densité spatiale réduite des pixels mesurant la déformation par rapport à celle atteinte en utilisant l'approche de petites lignes de base. Actuellement de nouvelles approches combinant les avantages de ces deux méthodologies sont développées [Hooper [2008]].

---

<sup>8</sup>German Aerospace Center

---

## Chapitre 2

# Le problème de la subsidence dans la Ville de Mexico

### 2.1 Introduction

Mexico est la deuxième ville la plus peuplée au monde. Sa zone métropolitaine compte vingt deux millions d'habitants. Ils viennent de tous les coins du pays. Un modèle économique inapproprié, qui ne soutient pas le développement des activités agricoles en province, favorise la concentration des nombreuses personnes en quête d'emploi dans la capitale. Cela entraîne des problèmes d'approvisionnement des services comme celui du logement et de l'eau entre autres. En effet, la surpopulation engendre une consommation excessive d'eau. A l'heure actuelle, 70% de l'eau consommée par les habitants de la ville provient de l'aquifère situé juste en dessous. L'aquifère est surexploité, c'est à dire que l'eau est extraite plus rapidement qu'elle n'est rechargée. Les conséquences incluent bien sûr avant tout l'épuisement de la source, mais entre temps, un grave problème de subsidence affecte les structures clefs de la ville telles que les constructions domestiques et historiques, le réseau routier, les installations d'approvisionnement d'eau et de gaz, les réseaux d'électricité et de téléphone et le système de drainage (voir figure 2.1). La connaissance des origines et caractéristiques du sol sur lequel la ville de Mexico est bâtie est donc indispensable afin de proposer les méthodologies les mieux adaptées pour analyser le phénomène de la subsidence. La plupart de cette compilation a été faite à partir des références suivantes [Santoyo-Villa et al. [2005], Kumate and Mazari [1990]]

### 2.2 Cadre géologique de la Vallée de Mexico

La ville de Mexico se trouve dans la partie sud d'une large cuvette endoréique (naturellement fermée), un peu à l'est de l'axe néovolcanique mexicain (Figure 2.2). Cette cuvette contient une plaine appelée Vallée de Mexico. La Vallée est le résultat d'une complexe série de mouvements tectoniques. Elle a été fermée il y a 600,000 années suite à la formation de la Sierra Chichinautzin au sud. Dans la direction nord-sud, elle mesure 90 km et dans la direction est-ouest, elle mesure presque 100 km au nord et 50 km au sud couvrant une superficie de 9600 km<sup>2</sup>. L'élévation de sa partie plate est de 2240 mSNM<sup>1</sup> au sud et 2390 mSNM au nord. Les montagnes qui l'entourent mesurent environ 3000 mSNM et leur pic le plus haut est le toujours actif volcan Popocatepetl à 5500 mSNM. Le sol

---

<sup>1</sup>mètres Sur le Niveau de la Mer

---

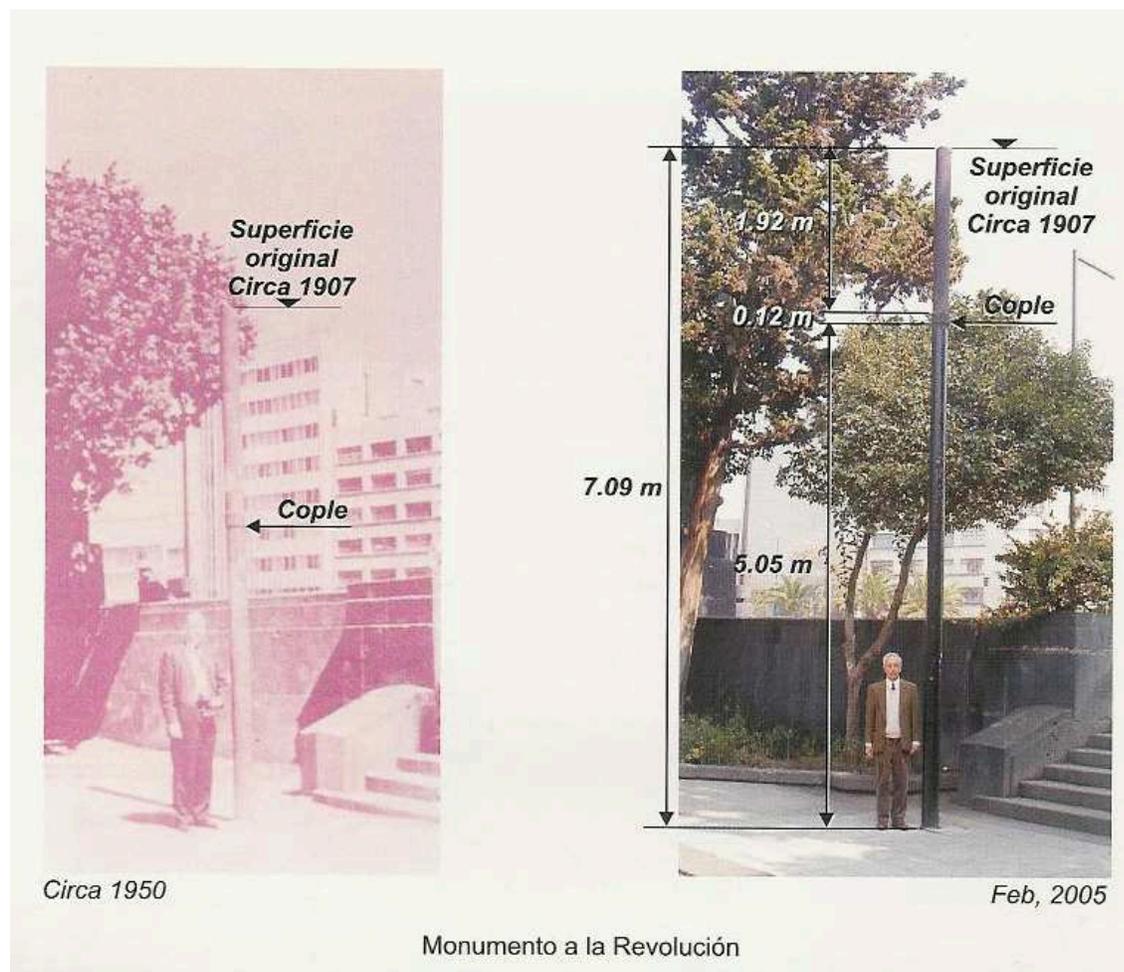


FIG. 2.1 – Puit de pompage au centre ville où la subsidence peut être mesurée. Le terrain autour du puit a subsidé d'au moins 2.5 m entre 1950 et 2005. D'après [Santoyo-Villa et al. [2005]].

de la Vallée, reposant sur une base composée par des roches sédimentaires marines, est le résultat d'une série des formations volcaniques formant des couches pouvant atteindre jusqu'à 2000 m d'épaisseur. En effet, tout au long des 600 000 dernières années et grâce à l'activité volcanique de la zone, des dépôts de cendre et d'autres matériaux volcaniques ont formé des couches avec des propriétés différentes et plus ou moins consolidées, dépendant des niveaux d'eau contenus variables du fait des périodes glaciaires et interglaciaires. Sur la figure 2.2, les principales formation géologiques sont présentées. Trois zones principales sont considérées sur le terrain de la zone métropolitaine de la ville de Mexico : la zone lacustre dominant le centre, la zone alluviale présente sur la zone de transition ou aux bords de la plaine et la zone volcanique ou montagneuse.

### 2.2.1 Stratigraphie de la zone lacustre

La zone lacustre est composée par une série complexe de couches de différents types d'argile avec des profondeurs variables. Ces couches argileuses sont le résultat des réactions physiques et chimiques entre les matériaux alluviaux et les dépôts de cendres volcaniques

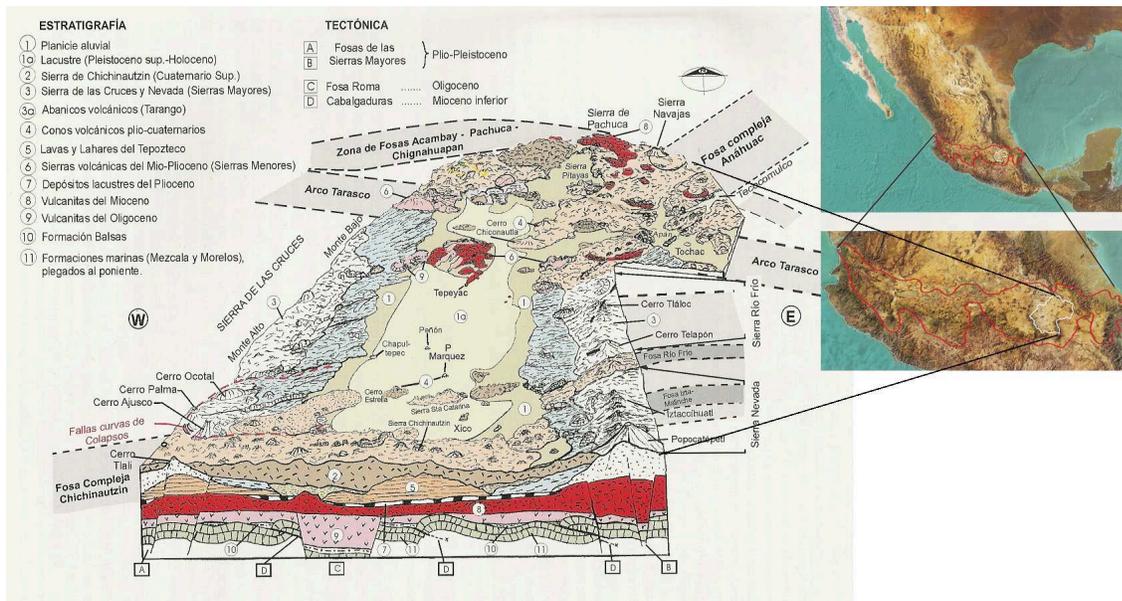


FIG. 2.2 – Localisation de la Vallée de Mexico. Principales sections géologiques : (1a) Lacustre, (1) Alluvial, (2, 3, 3a, 4, 6) Montagnes et volcans. Figure modifiée d'après [Santoyo-Villa et al. [2005]].

sédimentant en milieu lacustre dans l'ambiance lacustre où les colonnes de microorganismes et une végétation aquatique coexistaient. Les principales couches sont présentées suivant un ordre de profondeur croissant ; les couches supérieures sont en général plus molles, la dureté du reste augmentant proportionnellement à sa profondeur (voir Figure 2.3 ).

### 1. Couche superficielle

- Remplissage artificiel : Il est composé des restes de constructions et du matériel archéologique. Son épaisseur est variable. Au centre ville (ancienne Tenochtitlan) cela va de 1 m à 7 m. Sous la cathédrale en particulier, il peut mesurer plus de 15 m. Il n'existe pas du tout aux bords du lac.
- Sol mou : Il s'agit des dépôts alluviaux moux de très petite épaisseur.
- Couche superficielle naturelle : Formée par l'évaporation solaire lorsque les niveaux d'eaux du lac descendaient au cours de l'assèchement.

### 2. Formation argileuse supérieure

- Argiles pré consolidées superficielles : Elles ont été durcies et consolidées grâce à l'évaporation solaire, les revêtements, les charges externes, et l'eau prise par les racines des arbres.
- Argiles normalement consolidées : Elles se trouvent en dessous des profondeurs affectées par les surcharges externes en en dessus des argiles consolidées par pompage, elles sont également exposées à la consolidation.
- Argiles profondes consolidées : Elles sont consolidées à cause du pompage qui fait diminuer la pression de l'eau interstitielle.
- Lentilles dures : Elles sont intercalées avec les argiles et sont composés par des encroûtements des basaltes et du verre du pommez. En général, elles sont plus perméables que les argiles.

### 3. Capa Dura (couche dure) : Composée par de la boue et de la boue sablonneuse à la

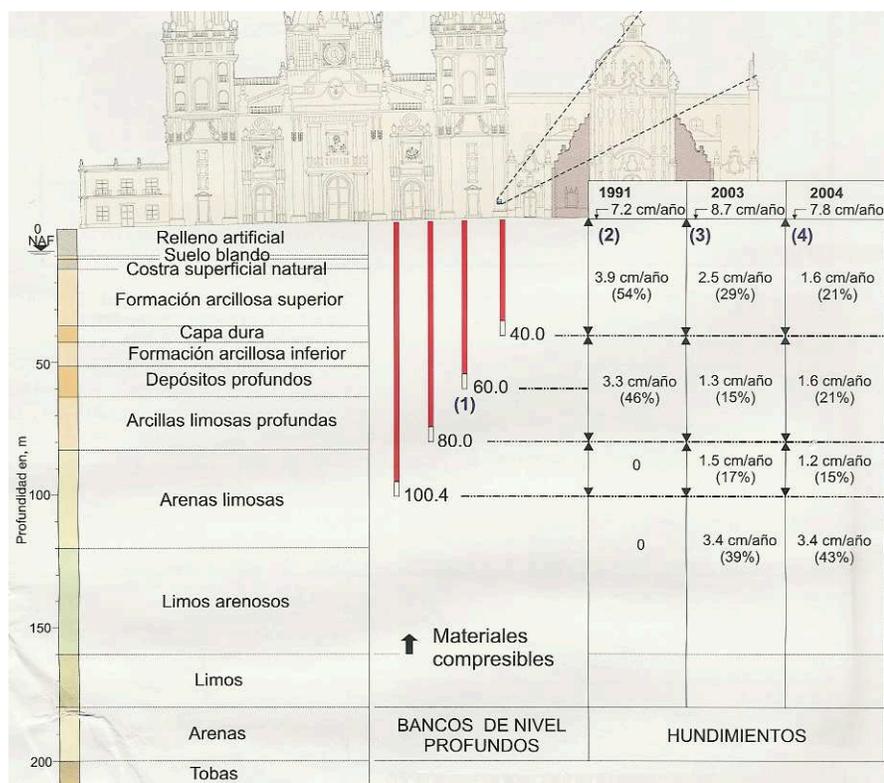


FIG. 2.3 – Principales couches avec profondeurs et distribution des affaissements annuels mesurés entre 1991 et 2004 sur des points de nivellement profonds placés sous la Cathédrale. Ces mesures correspondent à un seul endroit mais permettent d’imaginer que la subsidence se manifeste aussi dans les couches argileuses profondes que l’on considèrerait non compressibles. D’après [Santoyo-Villa et al. [2005]].

fois cimentée et intercalée avec des argiles. Son épaisseur est variable : très fine sur la zone centrale du lac, elle peut atteindre 5 m sur les bords. C’est sur cette couche que les piliers des bâtiments lourds sont fixés.

4. Formation argileuse inférieure : Couches d’argiles séparées par des lentilles dures avec une disposition semblable à celle de la formation argileuse supérieure. Elle peut atteindre 15 mètres d’épaisseur au centre du lac et presque disparaître aux bords.
5. Dépôts profonds : Série de couches composées de sable, graviers alluviaux d’argiles cimentées et de carbonate de calcium. La partie supérieure est plus dure que celle du bas.
6. Autres formations argileuses : Elles ne reçoivent pas beaucoup d’attention puisque elle sont censées être très consolidées et donc ne pas influencer le comportement des ciments des bâtiments par exemple.

### 2.2.2 Stratigraphie de la zone alluviale

Les dépôts alluviaux forment une zone de transition entre la zone lacustre et les montagnes et volcans qui entourent la plaine centrale. Grâce aux dégèlements successifs ayant eu lieu à la fin des périodes glaciaires, des rivières descendaient par les montagnes pour se

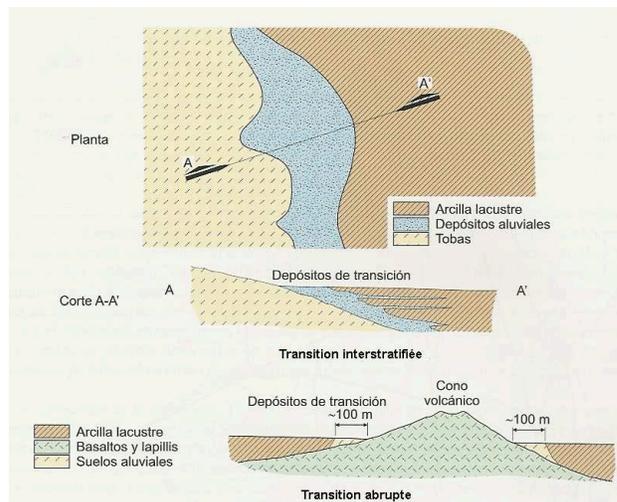


FIG. 2.4 – Zones de transition typique entre les sols argileux de la zone lacustre et les roches de la zone montagneuse. Les sols alluviaux peuvent former des transitions intercalées avec les argiles ou bien des transitions abruptes présentant des largeurs très minces (environ 100m). Puisque les zones montagneuses ne sont pas censées se déformer et les zones argileuses se compactent fortement, de très forts gradients différentiels de déformation sont présents dans les zones de transition, les rendant très risquées à la construction. Malheureusement ce type d'information n'était pas pris en compte lorsque nombre de constructions ont été planifiées, il a encore quelques années. D'après [Santoyo-Villa et al. [2005]].

jeter dans la plaine où se trouvait le lac. Des matériaux alluviaux se sont alors déposés et parfois introduits de façon intercalée ou abrupte dans le corps lacustre (Figure 2.4).

### 2.2.3 Stratigraphie de la zone des montagnes et volcans

Il s'agit d'éléments lithologiques (tuf, des sables ponce, basalte) produits par des éruptions volcaniques présentant parfois des fractures ou failles créant des zones instables qui présentent des risques de glissement pouvant être déclenchés par des séismes ou des mouvements tectoniques.

## 2.3 Cadre hydrologique de la Vallée de Mexico

### 2.3.1 Introduction

L'aquitard de la ville de México est une couche semi-perméable composée de la formation argileuse supérieure, de la capa dura et de la formation argileuse inférieure. Le flux dans ses couches est vertical avec une forte perte de charge. L'emmagasinement dans l'aquitard est important et sa variation, due aux transferts d'eau vers l'aquifère au-dessous, est la cause de sa compaction et donc de la subsidence totale observée en surface [Rivera-Bustos [1990]]. L'aquifère de la ville est une nappe perméable initialement captive, confinée sous l'aquitard. Une nappe est dite captive si elle est surmontée par une formation peu perméable et si la charge hydraulique de l'eau qu'elle contient est supérieure au toit de la nappe. Aujourd'hui, l'aquifère est partiellement libre, i.e., le niveau potentiométrique est descendu par endroit sous le toit de l'aquifère [Carrera-Hernández and Gaskin [2007]].

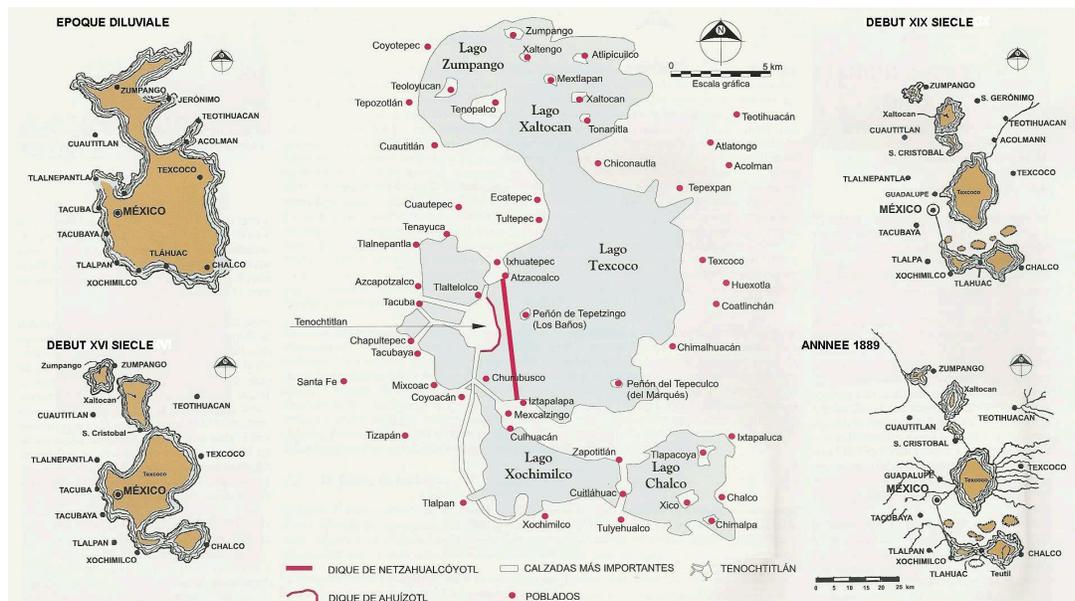


FIG. 2.5 – Évolution des lacs principaux : Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco et Chalco. Au centre, la localisation de l'ancienne Tenochtitlan avec ses principales avenues (Calzadas) et digues de contrôle hydraulique (traits rouges). Figure modifiée d'après [Santoyo-Villa et al. [2005]].

Lorsque la charge hydraulique est supérieure à la cote du sol, l'eau remonte jusqu'à la surface en cas de forage, on parle de puits artésien (et de nappe artésienne). Lorsqu'on exploite ce type de nappe, on baisse peu à peu la charge hydraulique et on peut perdre cet artésianisme. C'est le cas de l'aquifère de la ville de Mexico qui est fortement surexploité. Son niveau potentiométrique (niveau d'eau) était au-dessus de la surface du terrain au début du siècle. Effectivement, il y avait plusieurs sources autour de la ville et les forages étaient artésiens. Actuellement le niveau potentiométrique se trouve plus de 40 m en-dessous de la surface du terrain. À Ecatepec par exemple, une baisse totale du niveau potentiométrique de 70 m a eu lieu dans la période de 1975 à 2002 [Carrera-Hernández and Gaskin [2007]]. L'exploitation de l'aquifère a entraîné la drainance verticale de l'aquitard situé au-dessus [Rivera-Bustos [1990]].

Le terme subsidence correspond au tassement ou affaissement de la surface du sol dû à différents processus. Dans le cas de la ville de Mexico, le terme indique les effets de mouvements du sous-sol associés à l'extraction d'eau souterraine.

La compaction est le tassement dans le temps d'un terrain peu perméable saturé d'eau, dû à l'application d'une surcharge extérieure. Cette surcharge est encaissée en partie par la phase solide (augmentation de la contrainte effective), et en partie par l'eau interstitielle (augmentation de la pression). En augmentant cette pression, on établit un écoulement transitoire avec drainance d'eau et on augmente progressivement la contrainte effective en diminuant la pression de fluide. Dans le cas de la ville de México, la compaction est avant tout liée à la chute de la pression de fluide dans l'aquitard, associée à la diminution du niveau piezométrique dans l'aquifère.

La contrainte effective est la somme de deux contraintes, l'une est la contrainte gravitationnelle (due à la pesanteur) et l'autre est une contrainte dynamique associée à la déformation du squelette de grains. Elles compriment le squelette solide directement de grain à grain

en modifiant l'indice des vides et donc les propriétés mécaniques.

La conductivité hydraulique ( $K$ ) et la transmissivité ( $T$ ) sont des propriétés indirectes de l'aquifère.  $T$  est égale à  $K$  intégré sur l'épaisseur verticale ( $b$ ) de l'aquifère. Ces propriétés sont des mesures de la capacité d'un aquifère à conduire l'eau.

### 2.3.2 Caractéristiques hydrauliques des formations aquitard-aquifère

L'aquitard de la ville de Mexico est très peu perméable. La perméabilité d'un matériau (une roche, un sol, etc) est sa capacité à laisser passer un fluide. L'aquitard de la ville de Mexico a cependant des perméabilités verticales de l'ordre de  $10^{-8}$  à  $10^{-9}$  m/s. Cette formation joue un rôle très important pour la ville de Mexico puisque, d'une part, c'est là que sont ancrés les pieux des grands bâtiments, et d'autre part, cet aquitard présente un flux de drainage important vers l'aquifère pompé au-dessous, ce qui entraîne une compaction des argiles et une subsidence importante due à sa très grande compressibilité [Rivera-Bustos [1990]].

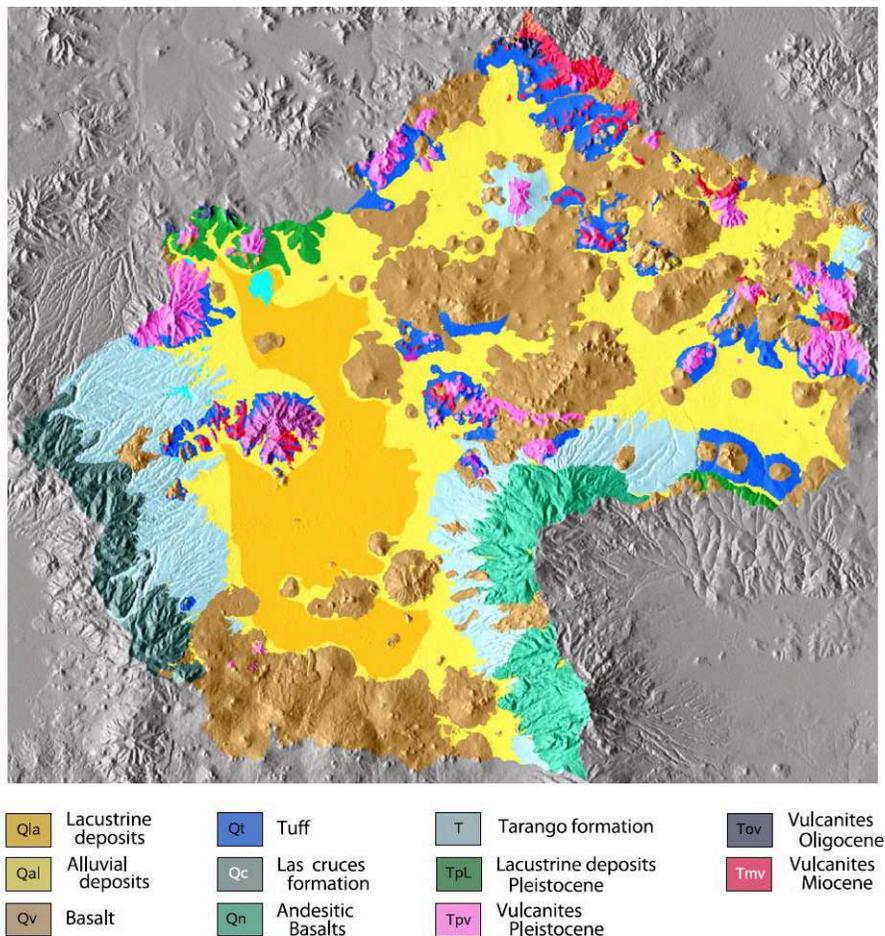


FIG. 2.6 – Géologie de la surface du bassin de Mexico. Les dépôts d'argiles lacustres (aquitard) sont représentés par la couleur orange, les zones d'aquifère alluvial, basaltique et de la formation Tarango sont en couleur jaune, marron et bleu ciel, respectivement. Figure modifiée d'après [Carrera-Hernández and Gaskin [2007]].

L'aquifère de la ville de Mexico peut être divisé en trois aquifères : l'aquifère alluvial, l'aquifère basaltique et l'aquifère de la formation Tarango [Rivera-Bustos [1990]] (voir figure 2.6).

**Aquifère alluvial :** Il est constitué d'une alternance de sables, d'argiles et de graviers dont l'épaisseur atteint plus de 1000 mètres en certains points et qui occupe tout le centre de la cuvette; il constitue l'aquifère principal de la cuvette et il est très fortement exploité par des centaines de puits repartis dans toute la ville et dans ses environs pour l'alimentation en eau de la ville de Mexico. Cet aquifère est captif (sous le dépôt d'argiles de la plaine) sauf dans les bordures, près du piémont, dans les quatre directions où il devient un aquifère libre rechargé par l'infiltration directe de la pluie. La transmissivité est de l'ordre de  $2 \times 10^{-2}$  à  $6 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s. Le coefficient d'emmagasinement varie de  $10^{-2}$  à  $10^{-4}$  si l'aquifère est captif, et de 0.1 à 0.2 si l'aquifère est libre. Cet aquifère est très mal connu au delà de 200 m de profondeur. Le débit des puits (à une profondeur moyenne de 200 m) était de l'ordre de 40 à 70 l/s en 1984 [Lesser [1984]].

**Aquifère basaltique :** Il est constitué de basaltes très perméables qui barrent la cuvette dans la sierra Chichinautzin, les coulées basaltiques sont contemporaines ou postérieures aux alluvions et parfois interstratifiées avec eux. Dans cet aquifère doté d'une très grande perméabilité de fissure, les puits avaient un débit de l'ordre de 100 à 150 l/s et parfois d'avantage en 1984 [Lesser [1984]]. La transmissivité des basaltes s'avère difficile à établir, on parle de l'ordre de 0.1 à 0.5 m<sup>2</sup>/s. Les basaltes de la sierra Chichinautzin (au sud de la cuvette) ont donné naissance, au contact avec les alluvions moins perméables, à des sources de débordement captées autrefois pour l'alimentation en eau potable de la ville de Mexico. Par suite de l'abaissement du niveau potentiométrique, dû à l'exploitation de l'aquifère dans la plaine, les sources se sont asséchées progressivement, et les écoulements souterrains provenant des basaltes sont captés actuellement par une série de puits implantés au pied des collines.

**Aquifère de la formation Tarango :** Il est constitué par des arènes volcaniques, des cendres et des fragments de roche déposés au pied de volcans andésitiques lors des éruptions, pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres d'épaisseur en certains points. C'est une formation de piémont sur les andésites localisées à l'est, ouest et nord de la ville de Mexico avec une constitution très variée et un certain degré de cimentation qui rend cet aquifère peu perméable. Ses caractéristiques hydrauliques sont à peu près semblables à celles de l'aquifère alluvial, avec des débits plus faibles (15 à 40 l/s en 1984 [Lesser [1984]]) et une profondeur des puits un peu plus importante (jusqu'à 350 mètres) liée à la position topographique en piémont de la formation Tarango.

### 2.3.3 Hydrodynamique des argiles de Mexico [Kumate and Mazari [1990]]

Les variations dans la composition des argiles de Mexico sont extrêmes dans des échantillons éloignés les uns des autres d'à peine 5 à 10 cm sur la verticale.

Un des indices les plus importants des argiles de la ville de Mexico est la teneur en eau  $w$  (définie comme le poids de l'eau divisé par le poids du solide) exprimée en pourcentage. Trois sondages sont présentés par la suite. Ils ont été effectués en 1950. Malheureusement, nous n'avons pas pu avoir accès à des mesures plus récentes. Toutefois, elles sont présentées à titre indicatif pour illustrer les caractéristiques des argiles de la ville de Mexico. Le premier sondage fut effectué en 1951 sur une zone du lac vierge où il n'existait pas

de charges sur la surface ni de pompage remarquable. La moyenne de la teneur d'eau des couches d'argiles qui composent la formation argileuse supérieure variait entre 332 et 402 %. Dans la formation argileuse inférieure, la moyenne était de 204 % indicative du poids des couches susjacentes et d'une certaine influence du pompage dans l'aquifère sousjacent. Dans la capa dura, la teneur d'eau était d'à peine 50 %.

Couche	w (1950)	w (1986)
R	82	108
1ere	288	303
2eme	282	252
3eme	298	244
4eme	208	186
CD	-	55
FAI	-	144

TAB. 2.1 – Valeurs de la teneur en eau  $w$  (en %) pour un même point mesurées en 1950 et 1986

La table 2.1 présente les valeurs de  $w$  pour une autre zone avec des bâtiments légers mais avec des pertes de pression importantes de l'aquifère. Les deux colonnes montrent les valeurs mesurées au cours de deux sondages, le premier réalisé en 1950 et le deuxième en 1986. Il est possible de constater que le pompage n'a pas beaucoup affecté les couches correspondantes au remplissage et les deux premières couches de la formation argileuse supérieure, par contre la troisième couche a diminué sa teneur en eau de 50 %. Sur une troisième zone avec des bâtiments lourds et affectée par un pompage intense et prolongé, la teneur en eau des couches est constante avec la profondeur avec une valeur moyenne égale à 232% en 1951, ce qui décrit une déjà consolidée verticalement par des charges importantes superficielles et par un pompage en profondeur intense et prolongé. En général, sur les zones de transition composées de couches de matériaux plus rigides, la teneur en eau est plus petite que 100%. La résistance à la compression simple des argiles de la cuvette de Mexico est très faible et très dépendante de sa teneur en eau. Face à un état d'effort compressif prolongé, les argiles saturées subissent des déformations différentielles au cours du temps nécessaire pour permettre le drainage de l'eau interstitielle (consolidation), étant donné sa faible perméabilité. La propriété qui décrit la magnitude de la déformation à long terme des nappes argileuses soumis à la consolidation est sa compressibilité. La compressibilité peut être définie comme :

$$C = -\frac{\Delta e}{\Delta p} = \frac{\text{décrément du rapport de vides}}{\text{incrément de la pression appliquée}} \quad (2.1)$$

### 2.3.4 Extraction de l'eau de l'aquifère : Puits et pompage

Le déséquilibre hydraulique provoqué par le pompage induit le flux et la perte d'eau de la structure des sols argileux de la ville de Mexico. Dans la ville, les premières extractions d'eau ont été faites dans l'année 1847. En 1850, les ingénieurs et architectes commencent à percevoir les premiers signes d'affaissement des bâtiments. En 1857, 168 puits opèrent de manière artésienne. En 1870, la ville compte 1000 puits qui ne sont plus artésiens et ont besoin de pomper l'eau.

L'information concernant le nombre de puits qui fonctionnent actuellement pour pomper

l'eau de l'aquifère est ambiguë. La vallée est située dans une zone géographique politiquement partagée et ses ressources sont donc gérées par au moins deux départements. De ce fait, l'information n'a jamais été formellement échangée et donc en général, il n'est possible d'y avoir accès que de manière partielle. Actuellement, 1600 puits sont supposés exister dans la ville, mais ce chiffre n'est pas fiable et ne prend pas en compte les puits clandestins.

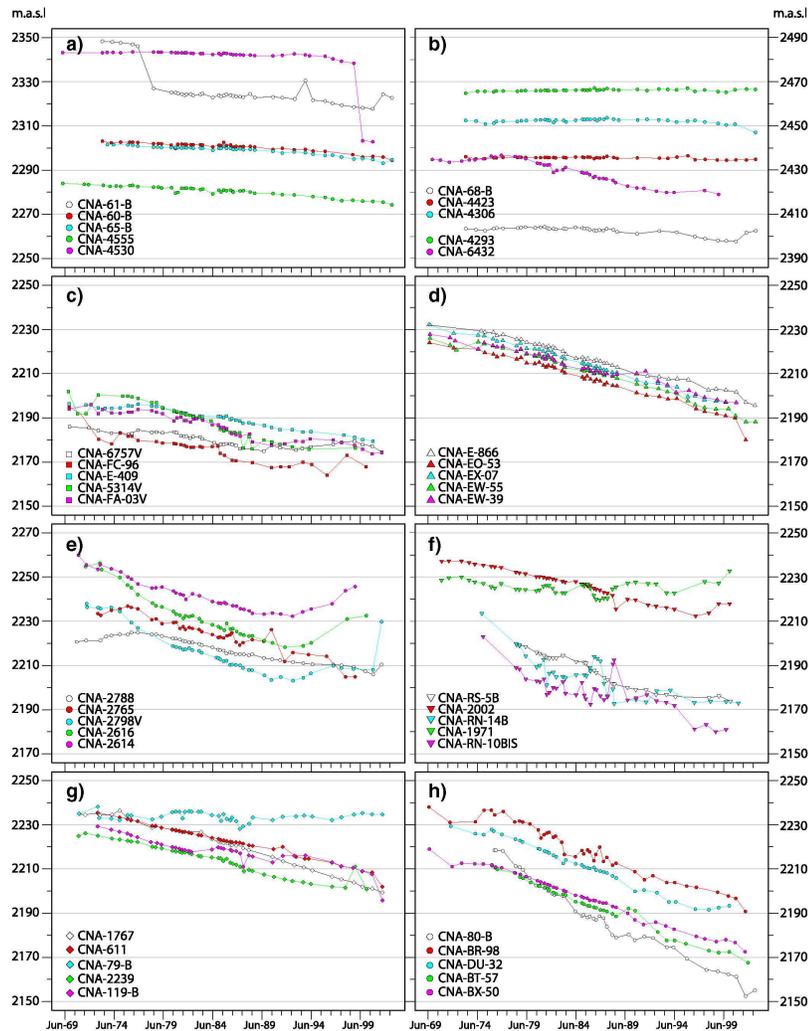


FIG. 2.7 – Évolution temporelle du niveau d'eau souterrain pour 40 puits distribués dans différentes zones de la cuvette de Mexico. a) Pachuca. b) Apan. c) Centre ville (Mexico). d) Texcoco. e) Sud de la ville de Mexico. f) Tlahuac. g) Chalco. h) Ecatepec. Figure d'après [Carrera-Hernández and Gaskin [2007]].

Néanmoins, Carrera-Hernández and Gaskin [2007] ont fait un effort pour construire une base de données contenant la plupart de l'information existante concernant les puits et leurs débits sur la cuvette de Mexico. La figure 2.7 montre l'évolution du niveau potentiométrique pour 40 puits localisés sur la zone sud de la cuvette de Mexico (voir figure 2.8), pour la période 1969-2002. Il est possible d'apprécier que la vitesse de descente du niveau potentiométrique (niveau d'eau dans l'aquifère) varie d'une zone à l'autre de la cuvette. En général, les courbes montrent une descente du niveau potentiométrique sauf dans le cas de Apan (figure 2.7b) localisé en dehors de la zone métropolitaine de la ville.

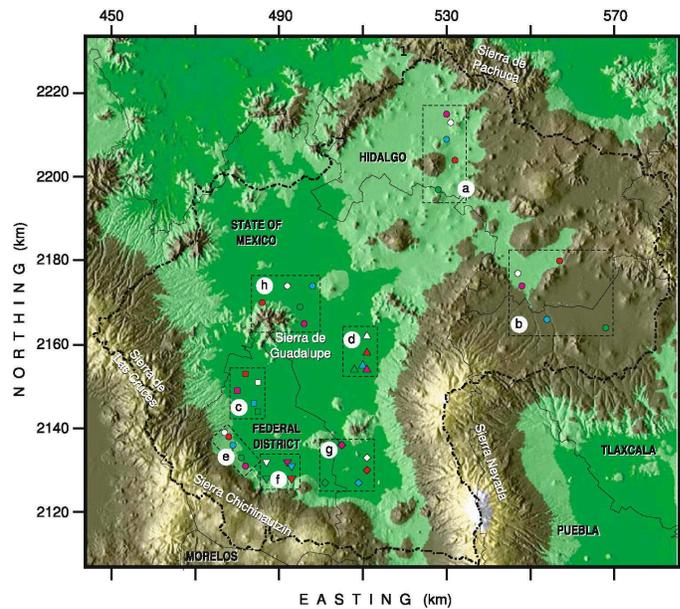


FIG. 2.8 – Localisation des puits présentés sur la figure 2.7. Figure modifiée d'après [Carrera-Hernández and Gaskin [2007]].

Les taux de descente du niveau potentiométrique les plus importants se trouvent dans la zone d'Ecatepec (figure 2.7h). Un des puits localisés dans cette zone montre une descente de 70 m pour la période 1975-2002. Sur les figures 2.7e) et f) correspondants aux zones du sud de la ville de Mexico et à Tlahuac, respectivement, le niveau potentiométrique descend puis remonte sur la plupart des puits [Carrera-Hernández and Gaskin [2007]]. Une analyse spatiale de l'évolution des niveaux potentiométriques est présentée sur la figure 2.9, pour six pas de temps entre 1975 et 2000. Les contours noirs sont limités aux zones de dépôts alluviaux, les contours blancs représentent le niveau potentiométrique de 2200 mSNM. En 1975, le contour à 2200 mSNM renferme une petite zone près de la Sierra de Guadalupe. Par contre en 2000, le contour renferme la totalité de la zone centrale de la cuvette. Notez que l'on ne dispose que de peu d'informations sur la zone du centre ville et de l'aéroport.

Dans la cuvette de Mexico, les taux de descente du niveau potetiométrique sont en moyenne de 1 m/an. Les taux les plus élevés se trouvent dans la zone de Ecatepec, où ils atteignent entre 2.5 m/an et 1.8 m/an. Ces taux peuvent être expliqués par les taux de pompage élevés pour la zone atteignant en moyenne les 1.5 m<sup>3</sup>/s. Cela contraste avec les taux de pompage des puits localisés dans la zone sud de la cuvette variant entre 0.69 et 0.60 m<sup>3</sup>/s. Les taux de pompage avec la localisation des puits sur la zone métropolitaine de la ville de Mexico sont présentés sur la figure 2.10.

## 2.4 Problèmes hydrauliques de la Ville de Mexico

Avant l'apparition de l'homme dans la Vallée de Mexico (environ 25 000 ans av. JC), le bilan hydrologique était simplement le résultat de l'apport des pluies contre l'évaporation solaire de l'eau. C'est pourquoi anciennement cette vallée était couverte par un énorme lac (Figure 2.5). Même s'il était alimenté par de nombreux fleuves, rivières et sources, il n'était

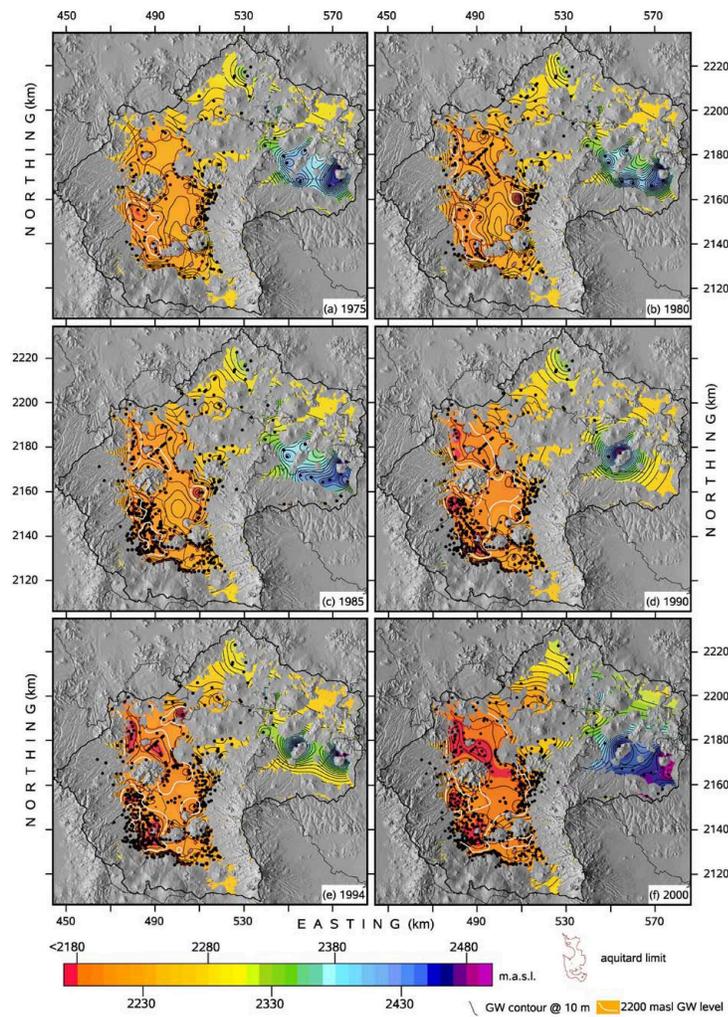


FIG. 2.9 – Évolution spatiale du niveau d'eau souterrain. Les points noirs représentent les puits pris en compte pour l'interpolation du niveau potentiométrique. Les lignes de contour noires représentent l'élévation de l'eau tous les 10 mètres. Le contour blanc représente 2200 mSNM. Figure d'après [Carrera-Hernández and Gaskin [2007]].

pas très profond et le dépôt des matériaux y était continu. La partie la plus profonde correspondait à la zone de Texcoco. Grâce à l'évaporation de l'eau recueillie en étanches, du sel y était produit depuis l'ère préhispanique. Lors du réchauffement climatique, le niveau d'eau diminua induisant la formation de lacs séparés. En 1864, les altitudes des cinq lacs principaux ont été mesurées par rapport à celle du lac principal (cote=0) appelé Lago de Texcoco. Le lac de Zumpango avait une élévation relative de 5.06 m et coulait vers celui du Xaltocan placé à 3 m sur le niveau de celui du Texcoco (le plus bas de tous). Les lacs de Chalco et Xochimilco avaient des élévations de 2.57 m et 2.60 m, respectivement. De ce fait, tous les lacs coulaient vers celui du Texcoco pour former un seul lac lorsque les niveaux d'eau augmentaient, et se séparaient pendant les périodes de sécheresse (Figure 2.5).

La capitale de l'empire aztèque fut construite au milieu de cet ensemble de lacs sur un îlot qui a été étendu en déposant artificiellement du sable. Les risques d'inondations, causées

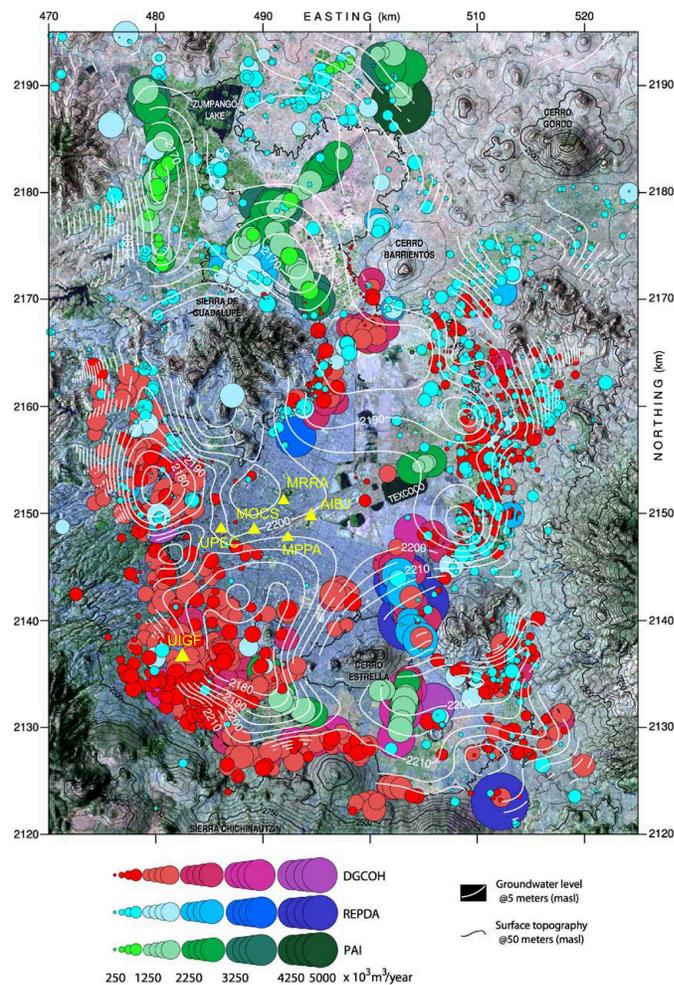


FIG. 2.10 – Distribution spatiale des puits et des taux du pompage correspondants. Les différentes couleurs identifient les agences qui gèrent les puits : rouge-DGCOH, bleu-REPDA, vert-PAI. Le diamètre des puits avec des taux d'extraction supérieures à  $5000 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$  sont exagérés. Les contours blancs sont pour l'année 2000. Les triangles jaunes représentent les stations GPS existantes. Figure modifiée d'après [Carrera-Hernández and Gaskin [2007]].

par des pluies de grande intensité, obligèrent les aztèques à construire un système de digues de contrôle hydraulique avec des portes s'ouvrant et se fermant selon les besoins. Pendant l'époque de la conquête espagnole, une partie importante de ce système fut détruite laissant la ville sans protection face aux inondations. Pendant la domination espagnole, des travaux de restauration du système hydraulique ont été faits, mais les espagnols, se méfiant des compétences des indigènes, qui étaient les seuls à contrôler le système, poussèrent le gouvernement à proposer des alternatives pour faire descendre le niveau d'eau des lacs. Plusieurs projets ont été depuis proposés, parmi les plus importants nous pouvons mentionner un ravin pour dévier les cours des deux principaux fleuves alimentant le lac et la construction d'autres digues. Cependant ces projets n'ont pas vraiment aboutis et les inondations continuèrent à se présenter, la plus sévère étant celle de 1629 au cours de laquelle de fortes pluies maintinèrent pendant cinq ans la nouvelle Espagne presque deux mètres sous

le niveau de l'eau. C'est après l'indépendance, en 1889, qu'un projet pour construire un drainage et une grande conduite d'eau (Gran Canal) est finalement mis en œuvre (Figure 2.11). Les travaux ont été achevés en 1900 mais trente ans plus tard le drainage, construit

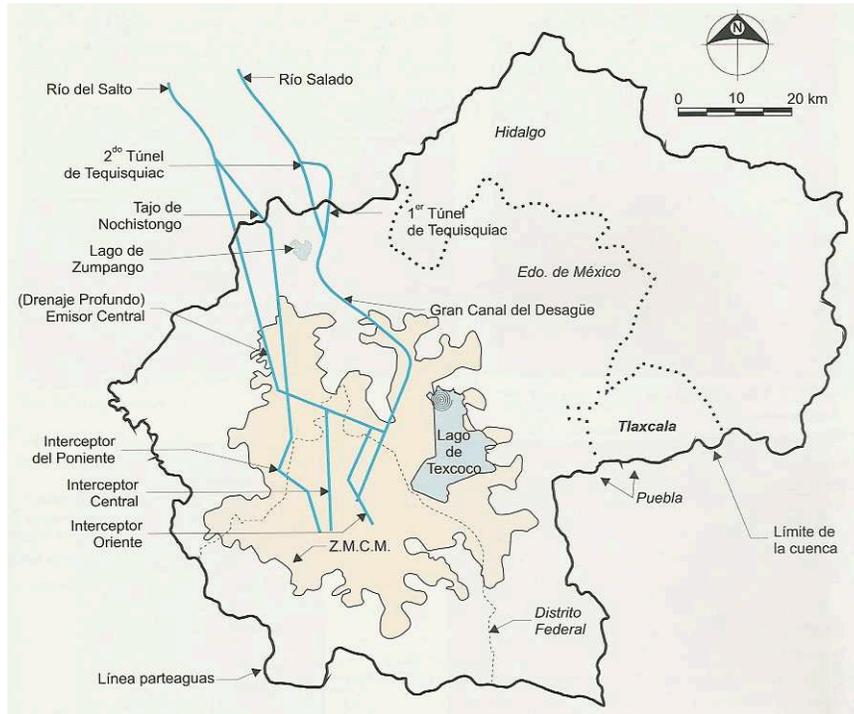


FIG. 2.11 – Localisation des ouvrages principaux de drainage dans la Vallée de Mexico. A l'heure actuelle, ce réseau est fortement affecté par les gradients différentiels de subsidence qui obligent le gouvernement de la ville à effectuer des travaux de restauration constamment. D'après [Santoyo-Villa et al. [2005]].

avec une pente spécifique permettant le flux des eaux par gravité, devient moins efficace dû au problème de la subsidence. En 1967, la construction du système de drainage profond a commencé et a été achevée en 1975. Il a été construit près de la capa dura en supposant que, à cette profondeur, il serait protégé des affaissements différentiels provoqués par la subsidence. Néanmoins, aujourd'hui nous savons que la subsidence affecte des couches plus profondes que celle de la capa dura. Les problèmes de surpopulation de la ville continuent depuis à maintenir la surexploitation de l'aquifère engendrant la subsidence et avec elle des dysfonctionnements affectant les structures clés de la ville.

## 2.5 Subsidence

### 2.5.1 Causes

Le phénomène de subsidence dans la ville de Mexico est le résultat d'un processus de consolidation des couches argileuses. Cette consolidation a lieu quand l'argile perd de l'eau. La perte d'eau est entraînée par différentes causes :

1. Les charges appliquées en surface : provoquées par les constructions dans la ville et les remplissages artificiels.

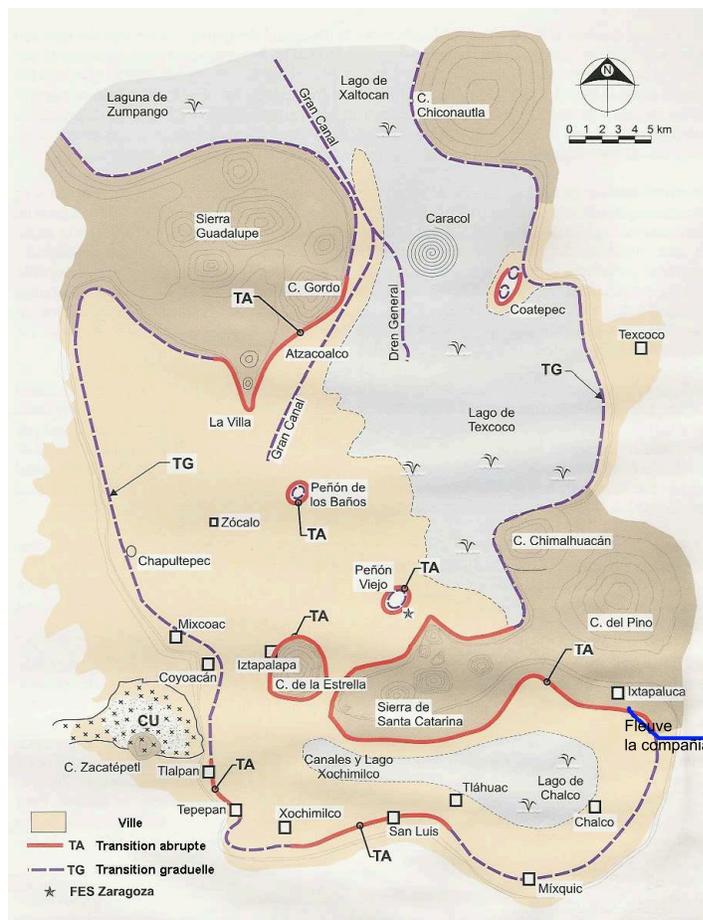


FIG. 2.12 – Localisation des zones de transition. Cette figure met en évidence les zones les plus risquées de la ville, affectées par de très forts gradients différentiels de subsidence due aux caractéristiques des zones de transition. En effet, c'est le long des zones de transition abrupte que les plus grands risques se sont manifestés, tel est le cas de l'effondrement de la Basilique de Guadalupe située dans la région de La Villa ou bien encore les fissures des structures guidant le cours du fleuve de la Compañía, qui ont provoqué une grosse inondation en 2000. Figure modifiée d'après [Santoyo-Villa et al. [2005]].

2. Extraction de l'eau superficielle : Les eaux superficielles sont extraites lors de constructions de tunnels ou caves, pour des réseaux de transport (métro) ou de drainage.
3. Extraction de l'eau de l'aquifère : Principal responsable du problème de subsidence.
4. Évaporation solaire : Certaines études suggèrent que l'évaporation solaire de l'eau contenue dans les couches les plus superficielles du sol de la vallée peut engendrer un affaissement de 75 cm pendant la saison de sécheresse. Le sol n'est capable de récupérer que 10% de son élévation originale pendant la saison des pluies. [Alberro [1990], Alberro et al. [2000]].
5. Extraction de l'eau par les arbres : D'autres études suggèrent que des arbres tels que les hêtres et les bouleaux peuvent consommer jusqu'au 500 litres par jour pendant l'été tandis que les peupliers et eucalyptus consomment environ 200 litres par jour. Malheureusement, même si un recensement très précis a été mené par l'Université

Autonome Métropolitaine (UAM), concernant les espèces d'arbres présentes dans la vallée, des estimations de la quantité d'eau consommée n'ont jamais été réalisées [Martinez and Chacalo [1994]].

6. Pertes d'eau provoquées par des puits qui ne sont plus utilisés mais n'ont pas été clôturés.

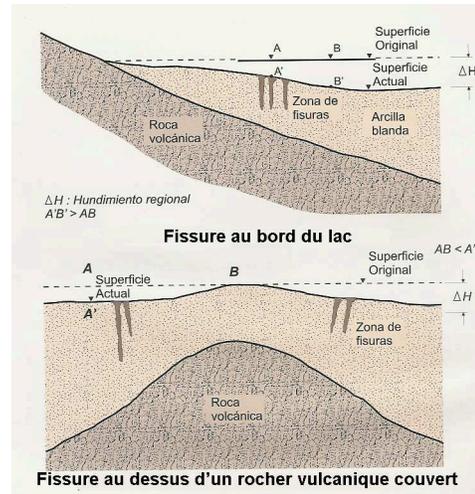


FIG. 2.13 – Mécanisme de formation de fissures dans les zones de transition. Les affaissements régionaux,  $\Delta H$ , provoquent des fissures qui peuvent fracturer des structures clés de la ville. D'après [Santoyo-Villa et al. [2005]].

## 2.5.2 Conséquences

Puisque le sol de la vallée et ses propriétés ne sont pas les mêmes partout, les taux d'affaissement varient d'une zone à l'autre provoquant de forts gradients de subsidence dans la plaine, caractérisant la destructivité du phénomène. La figure 2.3, montrant que la compaction a lieu au delà de 80 m de profondeur dans une zone, permet d'imaginer la complexité de la problématique subie par la ville.

### 2.5.2.1 Centre Ville

Dans la zone du centre ville, de nombreux bâtiments faisant partie du patrimoine architectural ont été fracturés à cause de la subsidence et rendus vulnérables face aux mouvements tectoniques. Le Conseil National pour la Culture et les Arts a identifié 46 bâtiments en conditions critiques qui doivent être réparés urgemment. De plus, le réseau de drainage, bâti en supposant une subsidence nulle à la profondeur à laquelle il a été construit, perd progressivement sa pente originale et souffre de fractures à cause des affaissement différentiels, les fuites d'eaux d'égout pouvant par infiltration contaminer l'aquifère.

### 2.5.2.2 Zones de transition

Les zones de transition abrupte, où le sol lacustre s'affine fortement et vient au contact avec les roches volcaniques sur les flancs des montagnes ou volcans, présentent les plus grands affaissements différentiels dans la ville (Figure 2.12). Cela entraîne l'apparition de

---

fissures (Figure 2.13) qui endommagent les structures urbaines. Parmi les plus importants, nous pouvons citer au nord l'effondrement de la Basilique de Guadalupe à partir des années 40, et les zones autour du Cerro Gordo. À l'est, des affaissements différentiels autour du Peñon de los Baños, Peñon del Marquez et dans la Calzada Zaragoza ont même entraîné des accidents automobiles. Finalement au sud des fissures se sont produites autour du Cerro de la Estrella sur les flancs de la Sierra Sta. Catarina et dans les entourages de Noria, Tepepan et Xico. Plus au sud, dans la zone de Chalco, une forte inondation eut lieu l'année 2000, quand les structures cimentées guidant le cours du fleuve de la Compañía se sont fissurées laissant couler l'eau.

## 2.5.3 Mesures de la subsidence

### 2.5.3.1 Nivellement

En 1860, les premiers "essais" de nivellement sont faits pour mesurer la subsidence. Toutefois, ils n'ont pas abouti puisque les points de référence utilisés subsidaient aussi. Depuis l'année 1975, et jusqu'à nos jours, des mesures de nivellement sont réalisées sur un réseau de points répartis dans la ville. Ces mesures s'effectuent tous les 2 ou 3 ans, pourtant parfois, plusieurs années passent sans effectuer de mesures. Cela dépend souvent du budget que le gouvernement accorde aux institutions chargées de les réaliser. Actuellement, le Sistema de Aguas de la Ciudad de Mexico est chargé des nivellements sur la zone métropolitaine de la ville de Mexico. Sur la figure 2.14 la subsidence moyenne annuelle entre 1992 et 2005 est montrée.

### 2.5.3.2 GPS

Sur la ville de Mexico, il existe peu de stations GPS. Leur densité n'est pas suffisante pour mesurer la subsidence de la ville avec la précision et la résolution nécessaires. Quelques stations permanentes existent. Une d'entre elles est placée dans l'université, UIGF, depuis 1997, une autre est placée au centre ville, UPEC, depuis avril 2004, le reste (MRRA, MPAA, et MOCS) sont placées autour de l'aéroport depuis 2005. Une dernière station dans l'aéroport, AIBJ, a été mesuré 10 fois par session de 24 heures chacune à la fin de la saison de sécheresse (Mai-Juin) entre 1995 et 2001. Les localisations (approximatives) des stations se trouvent sur la carte de la figure 2.10.

## 2.5.4 Solutions envisagées

### 2.5.4.1 Approvisionnement d'eau

Sur la figure 2.15, l'évolution de la quantité d'eau extraite au cours du dernier siècle est montrée. A l'heure actuelle, l'approvisionnement d'eau dans la ville dépend de plusieurs sources. 70 % provient de l'aquifère de la vallée, le reste provenant des systèmes Cutzamala et Lerma localisés en dehors de la vallée. Le coût de cette configuration nécessitant du pompage et le transport de l'eau est assez élevé. De nouvelles sources d'eau sont envisagées pour combler les besoins de la population qui continue de croître, mais elles sont très distantes de la ville, le coût d'approvisionnement empêchant la durabilité du procédé. Il existe aussi la possibilité de traiter les eaux usées pour les réutiliser, procédé qui n'est actuellement pas effectué.

L'exploitation de l'aquifère profond constitue aussi une alternative à analyser. Il est en effet confiné par un bloc d'argiles supposé très consolidé et donc incapable de contribuer

---

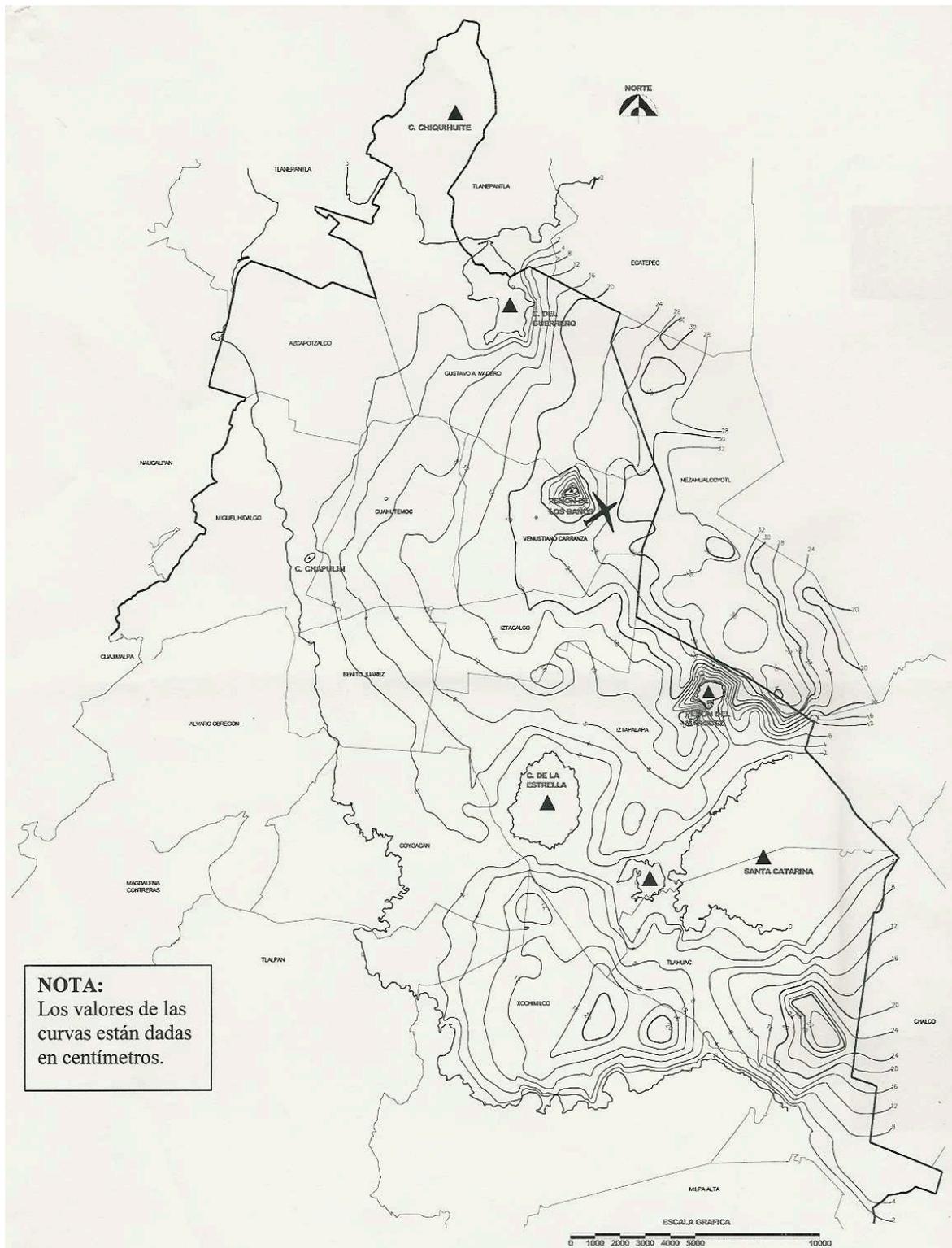


FIG. 2.14 – Subsidence moyenne annuelle entre 1992 est 2005. Nivellements réalisés par le Sistema de Aguas de la Ciudad de Mexico. Les valeurs des courbes sont en cm/an.

au processus de subsidence.

Enfin, la création et diffusion massive de nouvelles campagnes de sensibilisation de la population face à la gravité du problème restent fondamentales.

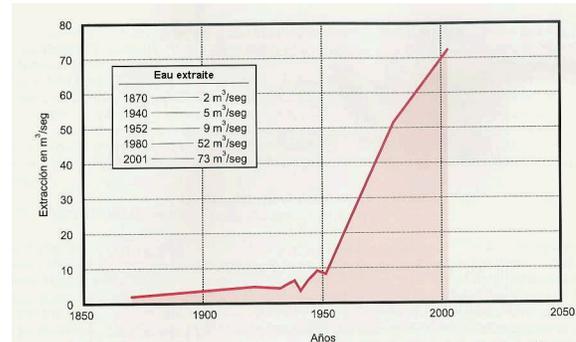


FIG. 2.15 – Quantification de l'extraction d'eau de l'aquifère situé dans la Vallée de Mexico. D'après [Santoyo-Villa et al. [2005]].

#### 2.5.4.2 Limiter les affaissements

Pour atténuer les effets de la subsidence, des stratégies pour injecter de l'eau dans les couches argileuses ont été proposées, néanmoins pour les mettre en oeuvre, une analyse doit être faite en amont, pour connaître avec précision les caractéristiques et comportements de chaque couche dans la vallée.

En effet, l'efficacité des actions visant à limiter les effets de la subsidence dépend de la qualité et quantité de l'information disponible pour son analyse. À ce propos, l'Université Nationale Autonome du Mexique (UNAM) et en particulier son Institut d'Ingénierie a réalisé un effort pour compiler l'information hydrogéologique de la vallée dans un système d'information géographique contenant des cartes géologiques, topographiques et cadastrales, des anciens plans et des données issues des études géophysiques dans la région. Malheureusement, cette information n'est pas toujours facile d'accès entre les différents groupes de recherche des disciplines impliquées dans le problème de subsidence de la ville, de plus elle nécessite de l'information instrumentale permettant l'actualisation des modèles hydrogéologiques de la vallée.

Concernant la modélisation, plusieurs pistes existent pour essayer de mieux décrire le processus de subsidence. Une des pistes consiste à quantifier de manière précise la corrélation entre l'extraction d'eau de l'aquifère et la subsidence. Toutefois, l'information n'étant pas facile d'accès, à l'heure actuelle seules des estimations ont été réalisées [Rivera-Bustos [1990], Aguilar-Perez et al. [2006]]. Concernant les mesures topographiques, les nivellements sont censés être effectués une fois tous les quatre ans, mais à cause des problèmes de budget, ce n'est pas toujours le cas. Du côté des taux d'extraction d'eau, il existe un problème de partage d'information entre les deux départements mettant à jour le registre des puits existants dans la vallée, de plus des problèmes d'organisation de l'information à l'intérieur des départements existent aussi rendant l'information incomplète et pas tout à fait fiable.

Côté instrumentation, l'installation d'un réseau de piézomètres et d'instruments de nivellement pour caractériser les différents effets et taux de subsidence au sein des couches argileuses à différentes profondeurs s'avère nécessaire. L'utilisation de techniques permet-

tant la mesure globale, automatique et continue des affaissements joue donc un rôle très important et doit être privilégiée.

---

## Chapitre 3

# Mesure de la subsidence par interférométrie dans la Ville de Mexico

### 3.1 Introduction

Avec l'intention de contribuer à la compréhension du problème de la subsidence dans la Ville de Mexico, j'ai utilisé l'interférométrie radar comme outil pour cartographier de manière précise en temps et en espace l'affaissement de la ville de Mexico. J'ai ainsi généré des séries temporelles de la déformation sur toute la zone métropolitaine. Des travaux, utilisant l'interférométrie radar sur la Ville de Mexico ont été déjà présentés dans le passé, toutefois jamais des séries temporelles de la déformation n'ont été montrées, ceci du fait de problèmes de perte de cohérence et du grand nombre de franges de déformation présentes dans les interférogrammes. Pour surmonter ces problèmes, nous avons mis au point une méthodologie d'aide au déroulement appliquée en trois étapes itératives. Puis nous avons inversé 71 interférogrammes pour en tirer les incréments de délais de propagation entre 38 dates d'acquisition, obtenant les séries de déformation sur la zone métropolitaine de la ville de Mexico sur chaque pixel de 20 x 20 m. La méthodologie détaillée est présentée dans les sections suivantes mais d'abord un état de l'art sur l'utilisation de l'InSAR pour mesurer la subsidence de la ville de Mexico est présenté.

Le chapitre, dans une version abrégée, a fait l'objet d'une soumission de publication dans un numéro spécial du Journal of Applied Geophysics, qui porte sur les travaux présentés dans le cadre du workshop FRINGE 2007.

### 3.2 InSAR sur la Ville de Mexico : État de l'art

#### 3.2.1 Strozzi and Wegmuller [1999]

Les auteurs utilisent des interférogrammes construits à partir des images ERS-1/2 acquises entre janvier 1996 et septembre 1997. Les interférogrammes traités avec le logiciel Gamma, sont passés par une étape de multilook (distance 2, azimuth 10), filtrage de bande commune (doppler moyen), suppression des franges topographiques à partir d'un MNT issu d'une paire tandem, filtrage adaptatif, et finalement les étapes de déroulement de phase et géocodage. Trois interférogrammes ont été finalement préservés; un interférogramme

---

construit à partir des acquisitions (aaaa.mm.jj) de deux passages ascendants du satellite, 1996.01.10-1996.05.28 (140 = 4 x 35 jours) et deux interférogrammes 1995.12.29-1996.05.16 (140 = 4 x 35 jours) et 1996.06.21-1997.09.19 (455 = 13 x 35 jours), construits à partir des images acquises lors des passages descendants du satellite. L'interférogramme à 455 jours n'était pas directement déroulable à cause du grand nombre des franges contenues. Ils ont donc utilisé l'interférogramme déroulé à 140 jours comme modèle de subsidence, l'ont multiplié par 455/140 et l'ont oté de celui à 455 jours, afin de diminuer le nombre de franges à dérouler. Une fois déroulées les franges résiduelles, l'interférogramme modèle (pondéré par son facteur) est rajouté pour interpréter les résultats. Une subsidence maximale de 47 cm/an est rapportée pour la zone qui se trouve au sud-est de l'aéroport, localisée à Ciudad Nezahualcoyotl.

### 3.2.2 Carnec et al. [2000]

Carnec et al. utilisent des interférogrammes ERS-1/2 pour contraindre l'estimation des paramètres d'un modèle hydrogéologique qui simule le système multicouches de l'aquifère de la Ville de Mexico et sa compaction. Le nombre d'interférogrammes et les paramètres utilisés pour leur traitement ne sont pas précisés. Il s'agit de deux interférogrammes, construits par Strozzi and Wegmuller [1999] (section 3.2.1) à partir des quatre acquisitions, 1995.12.29-1996.05.16 et 1996.06.21-1997.09.19, avec des lignes de base temporelles de 140 (4 x 35) et 455 (13 x 35) jours respectivement (voir Figure 3.1). Le modèle de déformation/compaction utilisé est celui présenté par Rivera-Bustos [1990]. L'écoulement d'eau et la dépressurisation dans l'aquifère sont modélisés en 3D à une échelle régionale conjointement au calcul 1D de l'équation de consolidation des aquitards, avec un paramètre de compaction non linéaire. L'ajustement de la subsidence calculée à celle mesurée, permet de mieux estimer les épaisseurs d'argiles et leurs propriétés hydromécaniques. Cependant l'ajustement présenté dans ce papier n'est pas excellent. L'accord semble correct sur la zone de Chalco au sud et sur le maximum de subsidence de la zone urbaine de Mexico. D'autres "poches" de subsidence sont prédites par le modèle mais non observées.

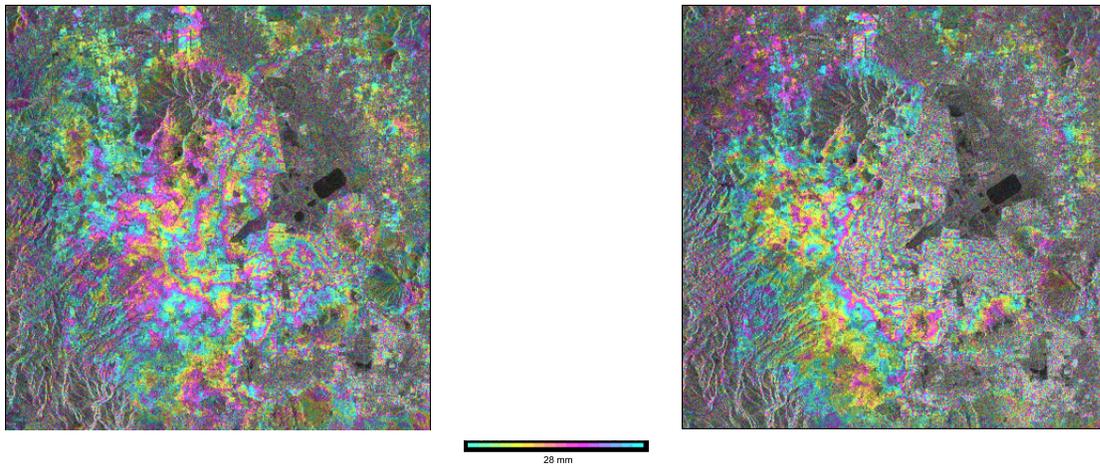


FIG. 3.1 – À gauche interférogramme 1995.12.29-1996.05.16. À droite interférogramme 1996.06.21-1997.09.19. Figure d'après Carnec et al. [2000].

### 3.2.3 Strozzi et al. [2003]

Strozzi et al. [2003] travaillent avec des images du satellite JERS (bande L) pour estimer les taux de subsidence sur la Ville de Mexico et comparer avec les résultats obtenus sur les images ERS. Ils construisent un premier stack composé de deux interférogrammes à partir des images ERS acquises entre décembre 1995 et mai 1996. Puis deux autre stacks composés de deux et trois interférogrammes construits à partir des images JERS acquises de mars 1994 à septembre 1996, et d'avril 1996 à septembre 1996, respectivement. Les détails du traitement des interférogrammes JERS ne sont pas présentés entièrement. Finalement, les mesures tirées de l'utilisation des données ERS sont combinées avec celles tirées des données JERS. La subsidence maximale dans la zone de Nezahualcoyotl (sud-est de l'aéroport), atteint plus de 40 cm/an (voir Figure 3.2). Le stack JERS entre Avril 1996 et Septembre 1996, montre également la subsidence sur la zone de Chalco au sud. Un maximum de 50 cm/an y est atteint dans sa partie ouest. Notez que le stack combiné présente une tendance est-ouest en dehors des deux zones subsidentes, probablement d'origine orbitale, et gênant le référencement (valeurs à  $\sim 15$  cm/an au nord-est de l'image).

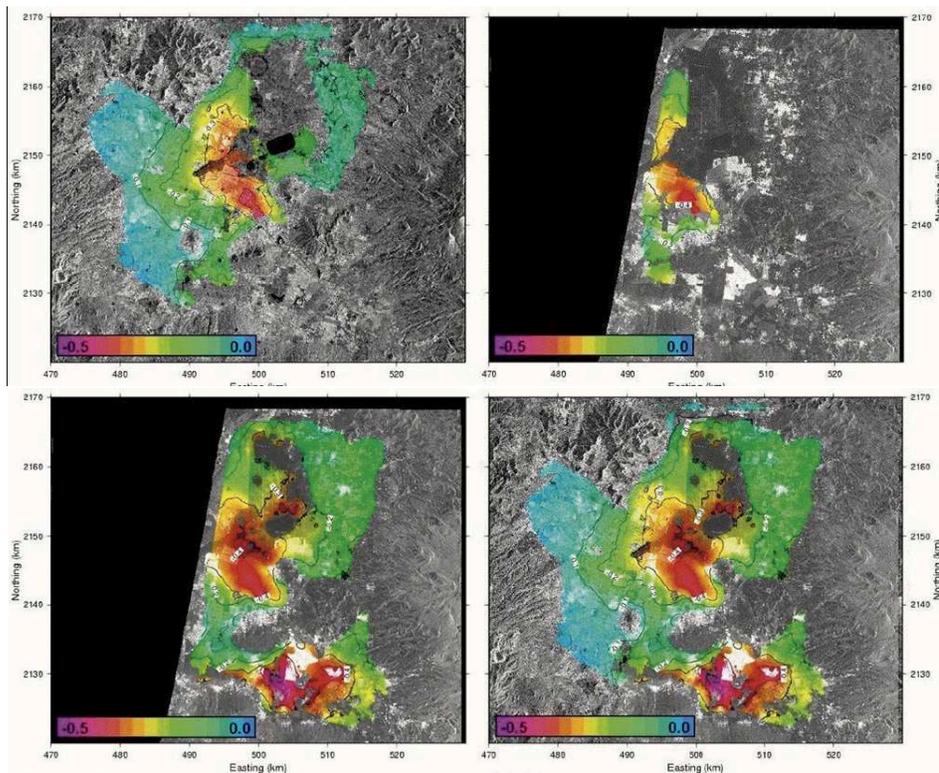


FIG. 3.2 – Taux de subsidence en mètres/an pour la ville de Mexico à partir de : a) En haut à gauche, deux paires d'images ERS entre Décembre 1995 et Mai 1996, b) En haut à droite, deux paires d'images JERS entre Mars 1994 et Septembre 1996, c) En bas à gauche, trois paires d'images JERS entre Avril 1996 et Septembre 1996 et d) En bas à droite, des taux ERS- JERS combinés pour 1996. Figure d'après Strozzi et al. [2003].

### 3.2.4 Strozzi et al. [2004]

Strozzi et al. [2004] utilisent deux interférogrammes à 70 jours, cette fois-ci construits à partir des images ENVISAT acquises le 2003.06.20-2003.08.29 et 2003.07.25-2003.10.03. Les interférogrammes traités avec le logiciel Gamma, sont passés par une étape de multilook (distance 2, azimuth 10), filtrage de bande commune (doppler moyen), suppression des franges topographiques à partir d'un DEM SRTM, filtrage adaptatif, et finalement les étapes de déroulement de phase et géocodage. Le taux de subsidence estimé rapporté dépasse les 30 cm/an pour l'année 2003 (voir Figure 3.3).

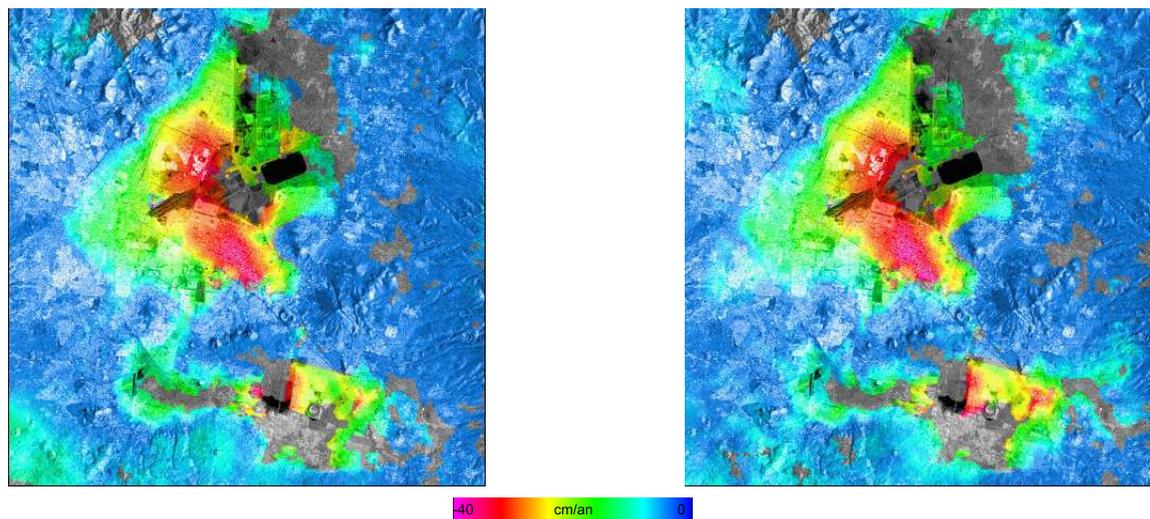


FIG. 3.3 – À gauche interférogramme 20.06.2003-29.08.2003. À droite interférogramme 25.07.2003-03.10.2003. Une image de intensité est placée en dessous des valeurs de phase. Figure d'après Strozzi et al. [2004].

### 3.2.5 Cabral-Cano et al. [2008]

À partir de quelques images ERS-2 et ENVISAT, Cabral-Cano et al. [2008] présentent trois interférogrammes libellés 1996, 2000 et 2003, dont les dates d'acquisition ne sont pas précisées (voir Figure 3.4). Les détails du traitement des interférogrammes ne sont pas non plus présentés. La vitesse de subsidence maximale atteint 37.8 cm/an. Les taux de subsidence estimés à partir des interférogrammes sont comparés à ceux estimés avec des données GPS sur 5 stations continues situées sur les zones du centre ville et de l'aéroport. Les mesures InSAR sont comparées à deux profils de nivellement mesurés tous les deux ans entre 1985 et 2002. L'accord semble correct sur le profil est, mais n'est pas satisfaisant sur le profil ouest avec des différences de l'ordre de 50 mm/an. Cependant, on peut noter les problèmes de référencement dans la zone ouest de l'image marquée 2003, probablement associés à des résidus orbitaux. Ces problèmes sont présentés par Cabral-Cano et al. [2008] comme partiellement résolus par ajustement aux mesures GPS. Notez également l'absence de cohérence sur la zone de subsidence au sud (Chalco) lors de l'utilisation des couples ERS (1996-2000). Enfin, la partie nord de la zone principale de subsidence verrait son taux de subsidence décroître de 1996 à 2003. Cependant ceci demanderait à être confirmé par une comparaison quantitative des différents interférogrammes couvrant différentes périodes. Cela semble en désaccord avec les stacks présentés sur la figure 3.2. On ne peut pas non

plus exclure une forte influence des délais atmosphériques dont l'effet reste fort sur des interférogrammes à  $B_t < 6$  mois sur des stacks comprenant peu d'interférogrammes. La question de l'évolution temporelle de la subsidence et d'éventuels effets saisonniers reste donc aujourd'hui ouverte.

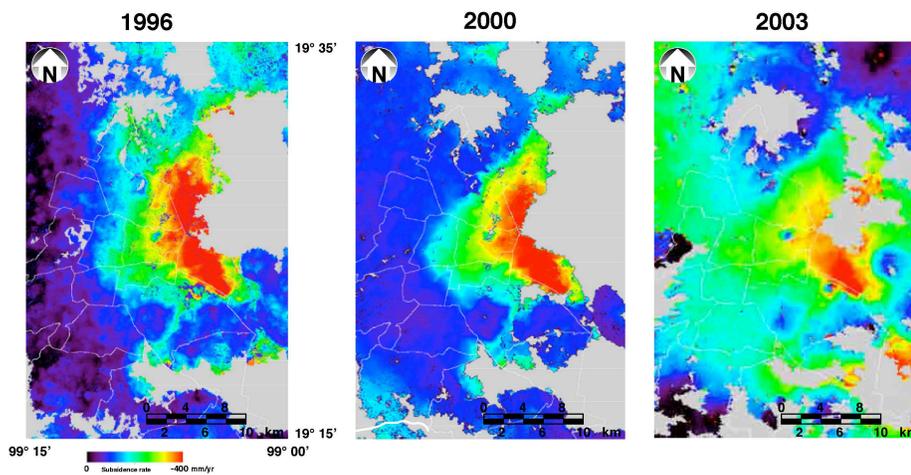


FIG. 3.4 – Taux de subsidence annuel pour 1996, 2000 et 2003. Figure d'après Cabral-Cano et al. [2008]

### 3.2.6 Bilan et besoin de développement d'une méthode dédiée.

Dans les travaux précédemment présentés, le traitement subi par les interférogrammes n'est pas toujours précisé sauf dans Strozzi and Wegmuller [1999] et Strozzi et al. [2004]. A chaque fois, le nombre d'interférogrammes utilisés reste très limité à cause des problèmes de déroulement, difficiles à résoudre. Concernant la méthodologie utilisée pour estimer la subsidence, elle n'est pas mentionnée sauf de manière partielle dans Strozzi et al. [2003], qui utilise des stacks d'interférogrammes. Toutefois, la qualité de cette estimation est limitée par les contributions au délai de propagation autre que la déformation, qui peuvent bruyier le signal fortement et qui ne sont pas considérées dans les publications mentionnées. Tel est le cas des erreurs provoquées par l'utilisation d'un MNT construit à partir d'une paire tandem, moins précis que celui de SRTM ; les erreurs (pouvant atteindre trois à quatre franges) dues aux contributions résiduelles de la phase orbitale, qui ne semblent pas être corrigées, les erreurs dues aux contributions atmosphériques, loin d'être négligeables relativement à la déformation sur des interférogrammes à  $B_t < 5$  mois. Tout cela entraîne un manque important de précision sur la mesure de la subsidence. Le besoin d'avoir des mesures fiables et actualisées est clair si nous tenons à contribuer à la compréhension du problème et à sa résolution.

Il ressort des études sur la subsidence mentionnées plus haut la nécessité de :

- cartographier avec précision par InSAR le taux de subsidence, en éliminant proprement résidus orbitaux et effets atmosphériques.
- associer à cette cartographie une estimation sur la précision des taux obtenus.
- comparer quantitativement mesures InSAR, les quelques mesures GPS et les mesures de nivellement.
- comparer quantitativement les cartes obtenues entre 1995 et 2008 afin de rechercher d'éventuelles variations temporelles du taux de subsidence

- rechercher d'éventuels effets saisonniers interannuels qui pourraient représenter la trace d'une réponse instantanée de la compaction de l'aquitard aux variations des niveaux potentiométriques.

L'ensemble des ces objectifs ne sera pas atteint dans le cours de cette thèse. Cependant, j'essaierai de répondre à certains points à travers une analyse poussée de l'ensemble des données radar ENVISAT. Pour cela, il faut surmonter les problèmes de déroulement dus à la perte de cohérence mais surtout au grand nombre de franges présentes sur les interférogrammes. Dans ce travail, nous développons une méthodologie d'aide au déroulement basée sur l'utilisation d'une sommation d'interférogrammes, représentant la déformation sur 35 jours. Ce stack, composé des cinq meilleurs interférogrammes, est pondéré pour qu'en l'ôtant de chaque interférogramme, le nombre de franges soit réduit au maximum. Cette réduction des franges n'est efficace que si la forme de la déformation est très similaire d'un intervalle à l'autre de la période étudiée. On retire également de chaque interférogramme le délai associé à la contribution atmosphérique verticalement stratifiée. La phase résiduelle contenant moins de franges est plus facilement déroulable par rapport à l'interférogramme original. La procédure de déroulement est appliquée en trois étapes itératives.

Les 71 interférogrammes de cette étude sont déroulés et ensuite inversés pour tester la fermeture du réseau d'interférogrammes sur chacun des pixels. Les erreurs de déroulement sont ainsi identifiées et quantifiées et je montre qu'elles diminuent fortement au cours des étapes itératives. Finalement, un algorithme différent du SVD classique et mieux adapté aux données sur la ville de Mexico est proposé et utilisé pour obtenir les séries temporelles de la déformation avec une résolution spatiale de 20 x 20 m.

Notre méthode a été automatisée et pourrait inclure continuellement les nouvelles acquisitions ENVISAT. Ses résultats s'avèrent vraiment utiles à différents niveaux. D'abord, pour le gouvernement de la ville qui doit dépenser des sommes importantes pour déployer dans les rues tous les 4 ans (et ce n'est pas toujours le cas) des dizaines de travailleurs avec l'objectif de mesurer les altitudes des points de nivellement étalés dans la ville. De plus, d'importantes sommes sont aussi dépensées pour réaliser de nombreuses restaurations de structures de la ville (bâtiments, drainage, avenues) touchées par les gros gradients différentiels de subsidence, mettant en danger la population. Côté recherche, ce travail bénéficie aussi aux personnes chargées d'élaborer des plans de risque de la ville et de proposer des mesures de mitigation de la déformation, travaillant avec des cartes de la subsidence qui ont besoin d'être actualisées.

Les étapes principales du développement de notre méthode sont présentées ci-dessous. Elles sont résumées sur le diagramme présenté sur la figure 3.5. Les résultats seront discutés au chapitre suivant.

### 3.3 Données et formation d'interférogrammes

Pour cette étude, un groupe de 39 images ENVISAT centrées sur la Ville de Mexico (Figure 3.6) et pourvu par l'Agence Spatiale Européenne fut utilisé. Ces images ont été acquises au cours de 4 ans, entre Novembre 2002 et Mars 2007 suivant la trajectoire d'une trace descendante. Pour construire les interférogrammes, les lignes de base temporelles ( $B_t$ ) et perpendiculaires ( $B_{\perp}$ ) ont été limitées à moins de 9 mois et moins de 500 m respectivement. En effet, au delà de 3 mois les interférogrammes présentent une perte de cohérence significative et un nombre considérable de franges. Avec l'objectif de lier les 39 images, environ 80 interférogrammes ont été construits dans un premier temps. Du fait des problèmes de décorrélation causés par des lignes de base très importantes, finalement

---

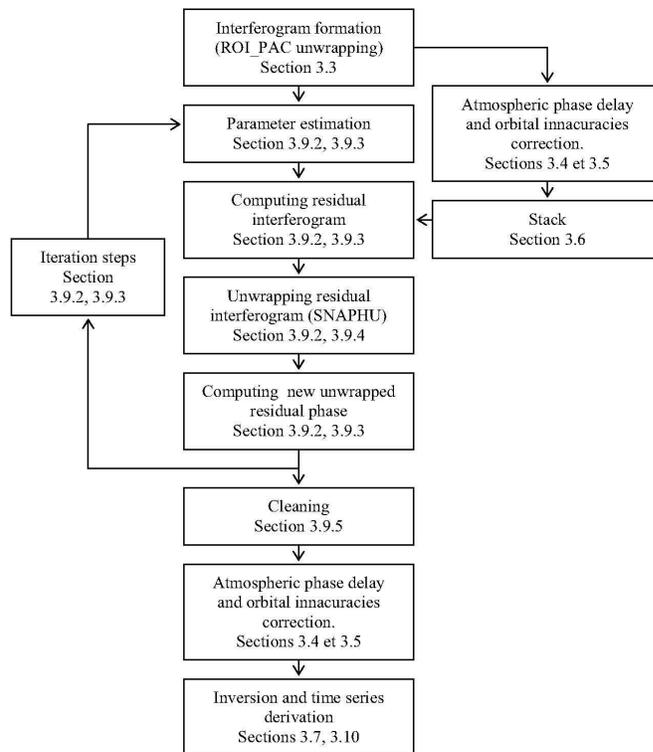


FIG. 3.5 – Principales étapes de traitement et sections du manuscrit correspondantes.

un total de 71 interférogrammes furent préservés, reliant 38 des 39 images par des liens redondants quand cela a été possible (Figure 3.7).

Les interférogrammes ont été construits et déroulés avec le logiciel ROI\_PAC (Repeat Orbit Interferometry Package) conçu au JPL/Caltech<sup>1</sup> [Rosen et al. [2004]].

**Les franges orbitales** ont été supprimées en utilisant des orbites calculées par le Department of Earth Observation and Space Systems (DEOS) of the Delft University of Technology [Scharroo and Visser [1998]].

**Les franges topographiques** ont été enlevées en utilisant un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) avec une résolution de 3 arc second [Farr and Kobrick [2000]].

**Une étape de multilook** de 5 looks en azimut, pour avoir une résolution du pixel au sol de 20 x 20 m, a aussi été appliquée.

**Filtrage adaptatif** Pour augmenter le rapport signal sur bruit sur les interférogrammes, le filtre spatial non-linéaire adaptatif de ROI\_PAC a été utilisé [Goldstein and Werner [1998]]. La non-stationnarité du spectre des franges des interférogrammes a besoin d'un filtre adaptatif qui puisse correspondre au spectre des franges locales. Le filtre dérivé du spectre a donc une largeur de bande variable et utilise une bande large dans les zones bruitées (basse corrélation) et une bande passante plus étroite sur les zones où la corrélation est haute et la phase peut être lissée. En général, le filtre améliore la visibilité des franges en réduisant le bruit issu de la décorrélation temporelle et spatiale. Le filtre n'atténue pas les forts gradients de franges lorsque ceux ci sont

<sup>1</sup>Jet Propulsion Laboratory/ California Institute of Technology

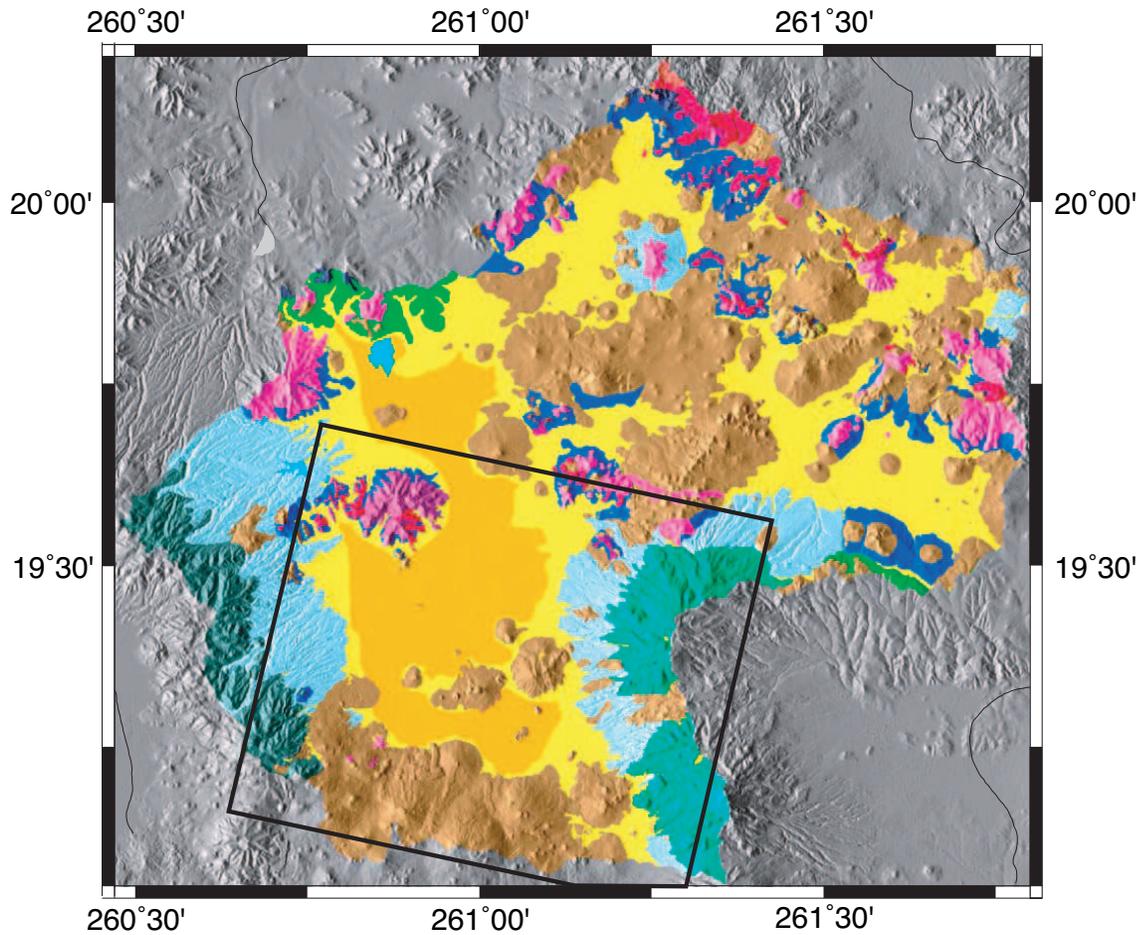


FIG. 3.6 – Principales couches hydrogéologiques affleurant en surface et relief SRTM d'après Carrera-Hernández and Gaskin [2007]. Dépôts lacustres représentant l'aquitard (Orange), Dépôts alluviaux représentant l'aquifère (Jaune), Roches volcaniques sur les montagnes et volcans (Marron et autres couleurs). Le carré noir encadre la zone étudiée.

peu bruités. Cependant, pour quelques interférogrammes à  $B_t > 6$  mois et dans les zones de très forts gradients, ces derniers, proches de l'aliasing et bruités, peuvent être modifiés par le filtrage.

**Recalage sur la géométrie d'une image maîtresse** Algorithme, contenu dans ROI\_PAC, basé sur la corrélation d'amplitudes.

**Le déroulement de la phase** a été fait en utilisant l'algorithme branch-cut de ROI\_PAC [Goldstein et al. [1988]]. Pour dérouler, cet algorithme a besoin d'une continuité de la zone cohérente. Des "coupures" marquent alors les zones incohérentes. Pour dérouler les zones entourées de "coupures", la création de ponts définis par l'utilisateur est possible dans ROI\_PAC. Toutefois, la procédure devient pénible lorsque de nombreuses zones cohérentes et isolées existent dans les interférogrammes. C'est le cas de nombreux interférogrammes sur la ville de Mexico où des zones de décorrélation non urbanisées ou cultivées empêchent le déroulement continu de la totalité de l'interférogramme. Dans un premier temps, nous avons donc choisi de dérouler l'ensemble des interférogrammes à partir d'une zone qui corrèle bien, même si la zone déroulable est

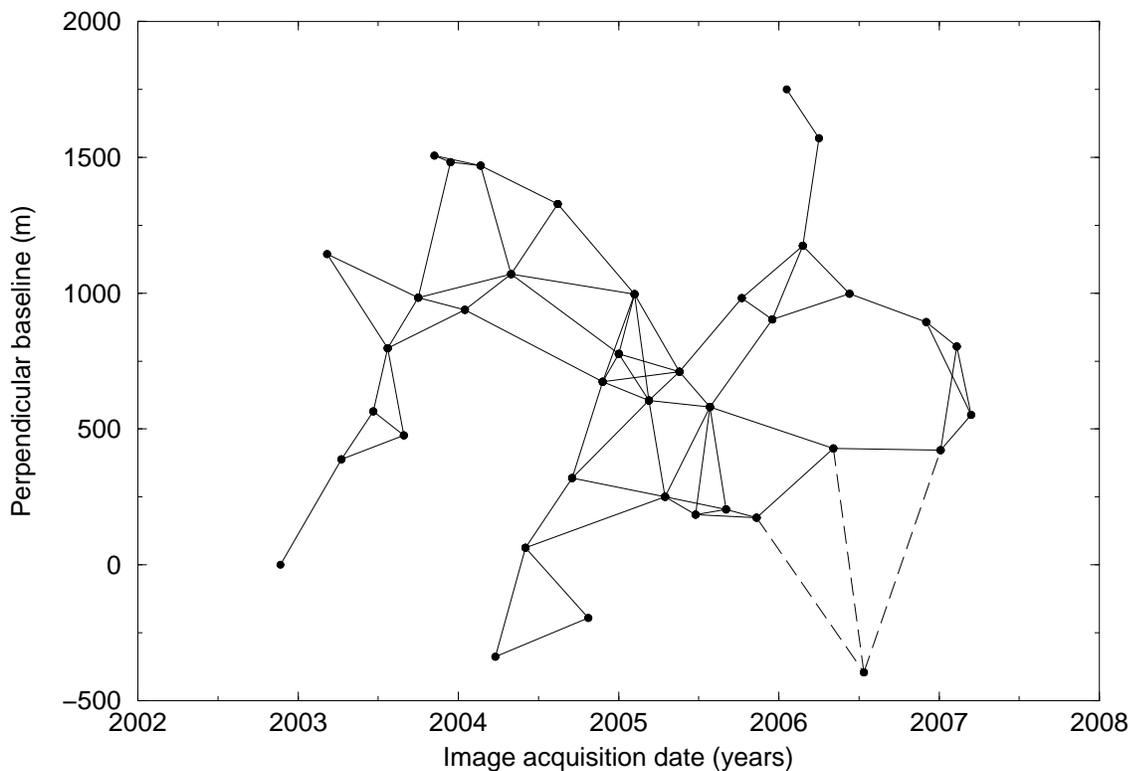


FIG. 3.7 – Base de données : images et interférogrammes. Les points représentent les 39 dates d’acquisition des images. Les lignes pleines représentent les 71 interférogrammes calculés pour cette étude. Les lignes pointillées montrent un groupe d’interférogrammes avec des lignes de base perpendiculaires  $B_{\perp} > 500$  qui n’a pas été utilisé dû à sa décorrélation géométrique. Ces interférogrammes auraient pu lier le groupe des 71 interférogrammes avec l’image de Juillet 2006. Finalement, seules 38 images ont été utilisées.

limitée aux zones initialement connectées et cohérentes. Par la suite, un autre logiciel de déroulement sera utilisé (SNAPHU, voir 3.9.3).

**Géocodage** Avec l’objectif de limiter la propagation d’erreurs générées par la précision du géocodage, cette étape est réalisée tout à la fin de l’étude, i.e. toute la méthodologie est appliquée sur des interférogrammes en géométrie radar recalés sur la géométrie d’une image master.

Une mosaïque contenant tous les interférogrammes recalés non déroulés, utilisés dans cette étude, est présentée dans l’Annexe A. Chaque interférogramme est identifié par une paire de dates d’acquisition (aaaa.mm.jj). Les interférogrammes sont classés par groupes d’intervalle de  $B_t$  croissant (1-2, 3-4, 5-9, cycles de 35 jours). Dans chaque groupe,  $B_{\perp}$  croît. Nous pouvons noter que la plupart des interférogrammes sont composés de plusieurs zones cohérentes isolées les unes des autres, limitant l’extension de la zone déroulable. Les forts gradients différentiels de phase augmentent proportionnellement avec la ligne de base temporelle  $B_t$ . Les franges sont par endroits bien trop serrées pour pouvoir les suivre en continuité. Par contre, la forme de la déformation à en juger qualitativement par la forme des franges, semble rester similaire sur les interférogrammes à 7, 8 et 9 cycles. Des interférogrammes fortement bruités par des contributions atmosphériques verticalement stratifiées et turbulentes sont présentés sur A.2 et A.17 respectivement. Des interférogrammes vi-

siblement touchés par les contributions des orbites peuvent aussi être repérés sur A.3 et A.9. Le bruit augmente pour les lignes de base  $B_t$  et  $B_\perp$  importantes. Pour mieux analyser l'évolution de la cohérence, une mosaïque contenant les cartes de cohérence moyenne pour certains groupes d'interférogrammes (classés par  $B_t$  et  $B_\perp$ ) est présentée sur la Figure 3.8. Les zones non urbanisées mais plates, où la cohérence se perd assez facilement lorsque  $B_t$  varie (parcourir la mosaïque de manière horizontale), peuvent être localisées grâce à l'image optique satellitaire présentée sur la Figure 3.9. Les variations de la ligne de base perpendiculaire  $B_\perp$ , causant la décorrélation géométrique et pondérant l'influence des erreurs contenues dans le MNT, peuvent être appréciées en parcourant la mosaïque verticalement. Elles affectent l'ensemble de la zone, mais pas nécessairement plus fortement les zones à couvert végétal.

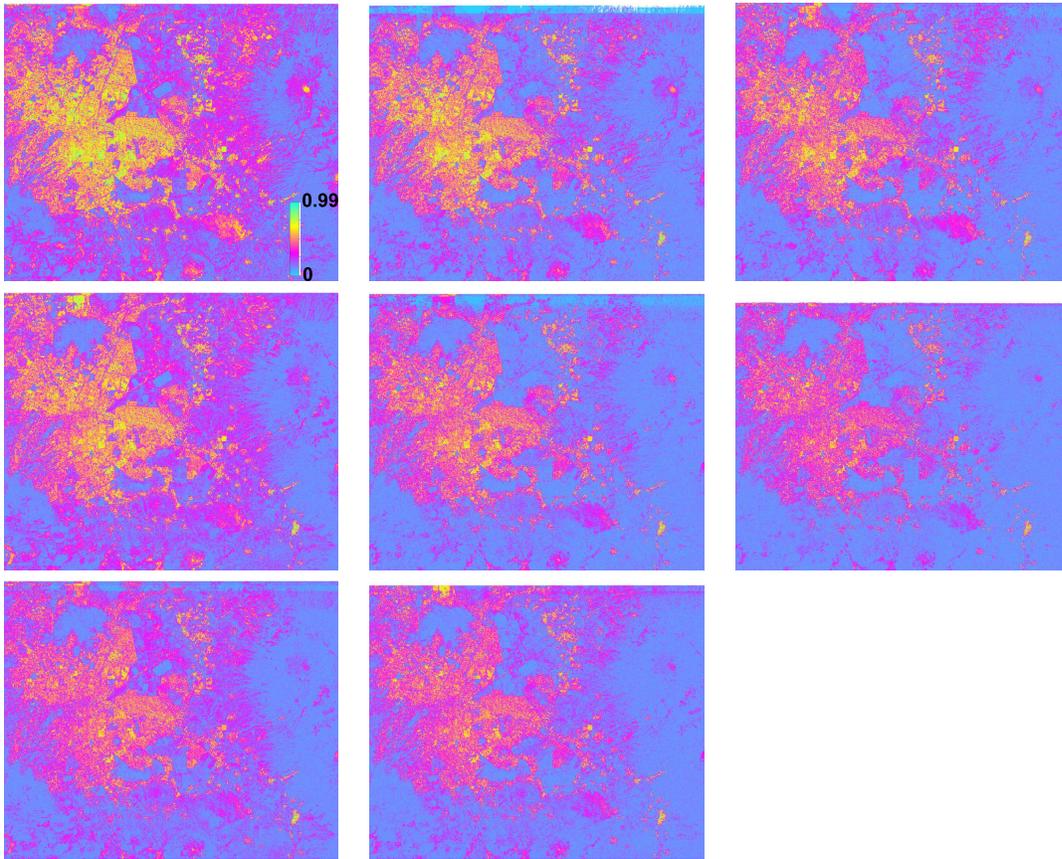


FIG. 3.8 – Cartes de cohérence moyenne pour différents groupes d'interférogrammes. De gauche à droite,  $B_t$  : 1-2 cycles, 3-4 cycles et 5-9 cycles (1 cycle = 35 jours) et de haut en bas,  $B_\perp$  : 0-150 m, 150-300 m et  $> 300$  m. Les zones urbaines et non urbaines où la cohérence se perd assez facilement peuvent être repérées à l'aide de la carte google earth (Figure 3.9). Voir la localisation géographique sur la figure 3.6.

Pour mieux identifier l'extension de la déformation, nous avons superposé la carte de subsidence moyenne (somme de 5 interférogrammes, voir section 3.6) en couleur au MNT en intensité noir et blanc (Figure 3.10). Les zones claires, représentant les valeurs d'altitude plus petites que 2250 mSNM<sup>2</sup>, laissent voir que la déformation est presque

---

<sup>2</sup>mètres sur le niveau de la mer



FIG. 3.9 – Carte google earth cartographiant la zone étudiée. La carte est coupée approximativement aux mêmes dimensions que les cartes de cohérence présentées. Figure 3.8

complètement concentrée sur la zone plate de la cuvette, c'est à dire dans l'ancienne zone lacustre de la plaine.

L'analyse des graphiques entre la phase interférométrique et l'altitude permet de vérifier que la déformation a lieu presque exclusivement sur la zone plate anciennement lacustre (exemple Figure 3.11). Sur le graphique de gauche, un pic contenant la plupart des valeurs de forte phase (subsidence) est visible. La dispersion de la phase pour des altitudes supérieures à 2250 mSNM peut être interprétée comme étant principalement d'origine atmosphérique ( $\pm 1.5$  rad dans cet exemple). Un zoom sur le graphique (figure de droite) permet d'apprécier que la subsidence est concentrée sur la zone avec des altitudes plus petites que 2250 mSNM délimitées par la ligne rouge. Nous pouvons également noter une surprenante corrélation négative entre phase (subsidence) et altitude en dessous de 2235 mSNM.

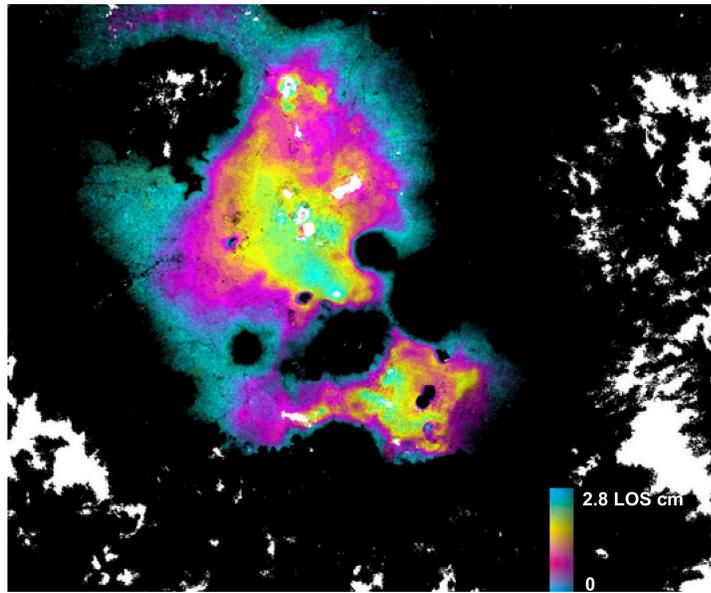


FIG. 3.10 – Somme des 5 meilleurs interférogrammes placés sur une image d’amplitude noir et blanc du MNT SRTM, soulignant la zone d’altitude plus petite que 2250 mSNM. En dehors de cette zone (élévation > 2250mSNM, en noir) les gradients de phase, donc la déformation est proche de zéro.

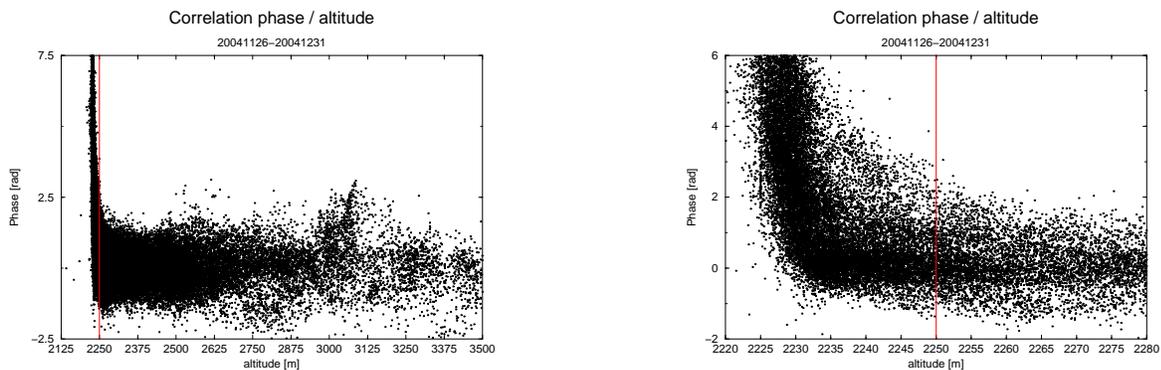


FIG. 3.11 – Exemple de relation entre le délai de la phase et l’altitude pour l’interférogramme 2004.11.26-2004.12.31. a) A gauche : graphique traçant la phase en fonction de l’altitude, b) A droite zoom sur (a). Les plus fortes valeurs de phase sont situées sur les zones à altitude plus petite que 2250 mSNM comme le montrent les lignes rouges.

### 3.4 Correction du délai de phase atmosphérique

Dans cette étude, nous avons choisi de corriger les contributions atmosphériques sans utiliser de données externes. Nous corrigeons donc du signal troposphérique verticalement stratifié à partir de l’estimation de la corrélation existante entre la phase et la topographie. En effet, le délai de propagation de l’onde électromagnétique dépend du contenu intégré en vapeur d’eau de l’air traversé par l’onde électromagnétique, fonction de l’altitude de la scène (voir chapitre 1.4.3). Puisque la subsidence est presque complètement concentrée sur la partie plate de la cuvette (élévation < 2250mSNM), le signal de déformation n’est que peu affecté par les délais atmosphériques stratifiés. Toutefois, il est important d’enlever

cette contribution en dehors de la zone plate, sur les flancs montagneux où sa magnitude peut être significative sur quelques interférogrammes, car elle nuit à l'estimation de la phase sur cette zone, considérée comme phase de référence (déformation = 0). L'estimation de la contribution verticalement stratifiée est faite sur chaque interférogramme à travers une régression linéaire entre la phase interférométrique et l'altitude [Cavalié et al. [2007]]. Cette estimation est faite sur tous les pixels déroulés de l'interférogramme sauf ceux qui se trouvent dans la zone plate (Figure 3.12). Une estimation précise et stable de la phase de référence est essentielle pour obtenir ensuite une série temporelle de déformation de bonne qualité (voir Usai [2003], Cavalié et al. [2007]).

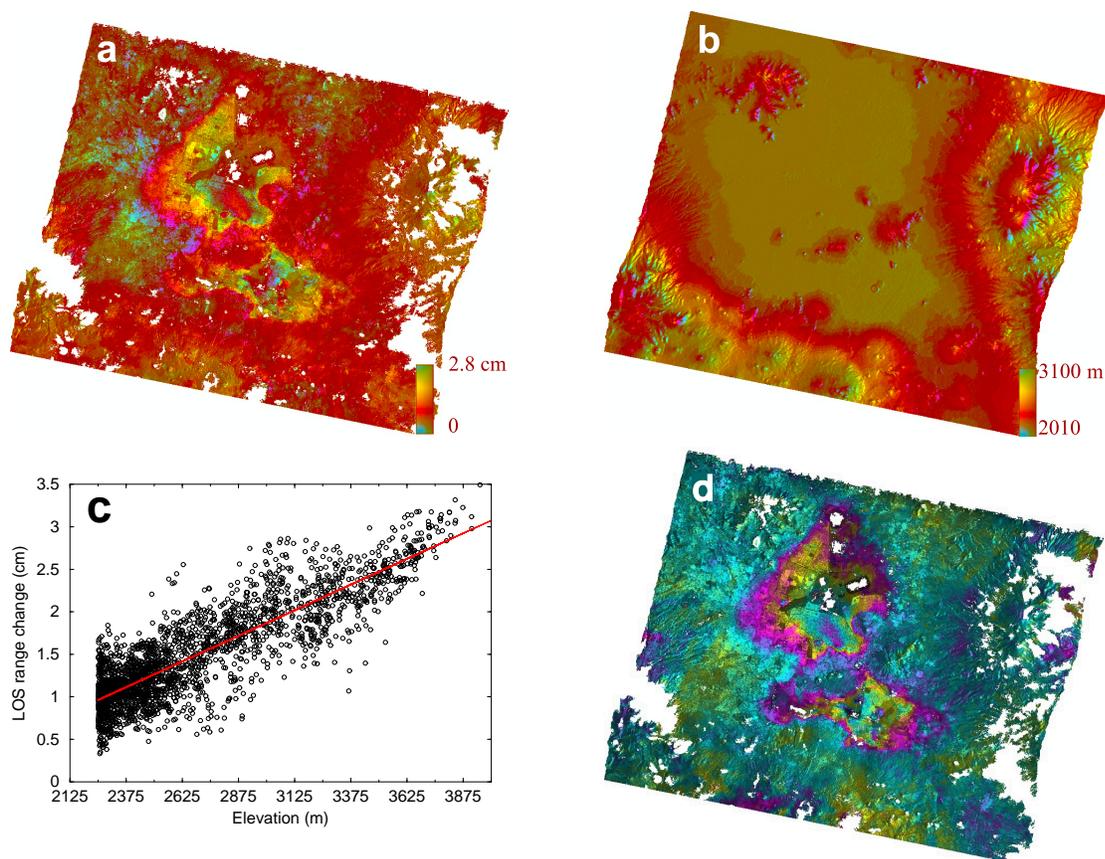


FIG. 3.12 – a) Interférogramme original 2004.11.26 - 2004.12.31. La phase interférométrique augmente avec l'altitude sur les flancs des volcans en dehors de la zone lacustre de la cuvette. b) MNT de la zone. c) Délai interférométrique mesuré sur la ligne de visée du radar tracé en fonction de l'élévation. La zone plate (élévation plus petite que 2250 mSNM), où le phénomène de la subsidence se produit, est masquée au moment d'appliquer la régression linéaire représentée par la ligne rouge. d) Interférogramme corrigé de la contribution de l'atmosphère stratifiée et de la rampe orbitale résiduelle. La phase en dehors de la zone de déformation est fixée égale à zéro en moyenne.

### 3.5 Correction des erreurs orbitales

Les paramètres orbitaux utilisés pour aplatir les interférogrammes ne sont pas suffisamment précis pour enlever complètement les franges orbitales des interférogrammes lors du

traitement effectué par ROI\_PAC. Pour supprimer les contributions orbitales résiduelles,  $\phi_{orb}$ , nous estimons le plan incliné "tordu" qui correspond le mieux à la phase interférométrique des pixels placés au champ lointain (zone montagneuse, déformation = 0). Le plan incliné est représenté par

$$\phi_{orb} = (ax + b)y + cx + d \quad (3.1)$$

où  $x$  et  $y$  sont les coordonnées du pixel en distance et en azimuth. Pour diminuer l'influence des outliers, un filtre médiane pondéré par la cohérence est d'abord appliqué à la phase interférométrique aux interférogrammes sur des petites fenêtres glissantes.

Dans la pratique, nous avons estimé conjointement la rampe résiduelle orbitale et la contribution de phase atmosphérique stratifiée en ajustant :

$$\phi_0 = (ax + b)y + cx + d + \beta z \quad \text{pour} \quad z > 2250mSNM, \quad (3.2)$$

où  $z$  est l'élévation et  $a, b, c, d$  et  $\beta$  sont obtenus à travers une minimisation aux moindres carrés de l'équation 3.2. L'estimation conjointe du plan orbital et de la contribution stratifiée est essentielle car, du fait de la covariance non nulle entre les variables  $z, x, y$  et  $xy$ , l'estimation de  $\beta$  dépend de celles de  $a, b$  et  $c$ . Notez que pour certains interférogrammes dont le déroulement avec ROI\_PAC n'est que partiel (uniquement quart NW par exemple), l'estimation de  $\beta$  est trop corrélée à l'estimation de  $c$  pour ne pas être biaisée.

Le fait de supprimer les contributions orbitales et troposphériques stratifiées (voir Figure 3.13) nous permet de travailler avec des interférogrammes dont la phase (donc la déformation) est référencée en moyenne à zéro sur les zones montagneuses (élévation plus grande que 2250 mSNM).

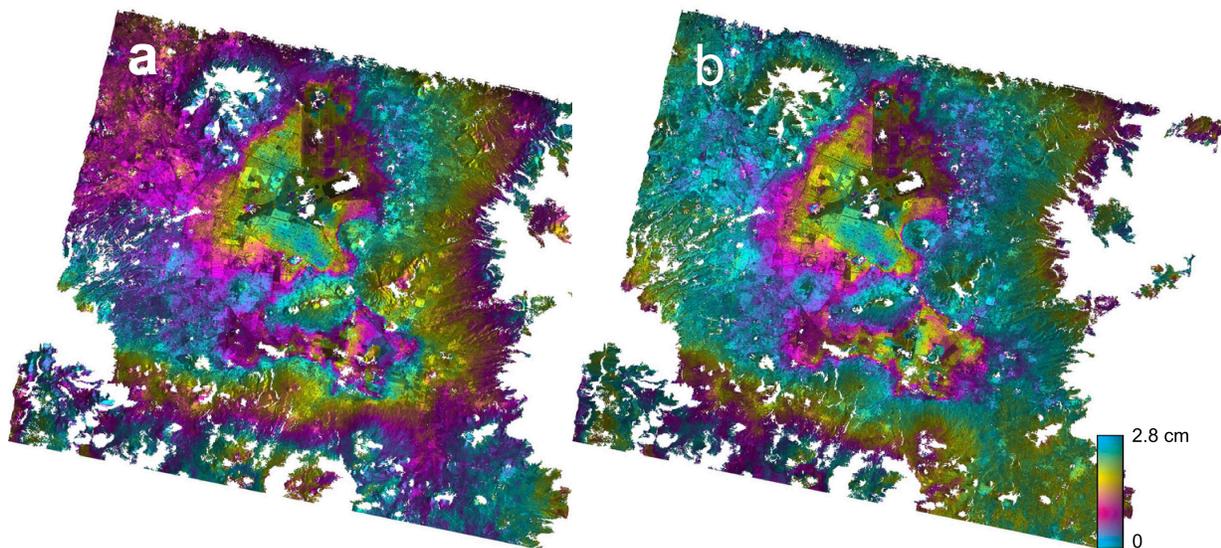


FIG. 3.13 – a) Interférogramme avant correction de la phase résiduelle orbitale. Une rampe traversant la scène d'est en ouest et du Nord au Sud peut être repérée. b) Interférogramme après correction de la phase résiduelle orbitale. La phase autour de la zone subsidente est plus homogène. Il reste un signal troposphérique associé à la topographie.

### 3.6 Stack d'interférogrammes

Parmi les 71 interférogrammes déroulés qui ont été construits pour cette étude, nous avons sélectionné les 5 meilleurs (Figure 3.14) : 2003.11.07 - 2003.12.12, 2003.12.12 - 2004.02.20, 2004.11.26 - 2004.12.31, 2004.12.31 - 2005.02.04 et 2004.12.31 - 2005.03.11. Ces interférogrammes ont été sélectionnés pour leur rapport signal sur bruit élevé. Ces interférogrammes correspondent tous à deux périodes d'hiver, l'hiver 2003-2004 et l'hiver 2004-2005. Les interférogrammes ont été aplatis, la phase topographique a été enlevée, ils ont été déroulés et corrigés des contributions atmosphériques et des erreurs orbitales.

Nous avons construit une sommation d'interférogrammes en moyennant les phases, pour représenter la déformation sur 35 jours. Les interférogrammes ayant des lignes des bases temporelles  $B_t$  différentes de 35 jours ont été pondérés par un facteur  $\alpha_i$  (Figure 3.15), avant de les moyennner de façon à avoir sur tous la même amplitude de déformation que celle retrouvée sur l'interférogramme de référence  $\phi_{ref}$ , 2004.12.31 - 2005.02.04 (35 jours). Même s'ils représentent la déformation au cours de deux hivers différents (2003 - 2004 et 2004 - 2005), ils révèlent des tendances de déformation très similaires, ce qui m'a permis de moyennner la phase sur chaque pixel  $l$ ,

$$\phi_{stack}^l = \frac{1}{N_l} \left( \phi_{ref} + \sum_{i=2}^{N_l} \phi_i / \alpha_i \right) \quad (3.3)$$

où  $N_l$  est le nombre d'interférogrammes avec une phase valide pour le pixel  $l$ .

Sur la figure 3.16, nous avons tracé les phases de chaque interférogramme et celle du stack le long du profil présenté sur la figure 3.17 où le stack d'interférogrammes est présenté. Les segments ombrés sur la figure 3.16 soulignent les zones montagneuses de forte élévation où il n'y a pas de déformation. Des gradients de déformation très importants sont présents sur les flancs des montagnes et volcans, allant jusqu'à 2.5 cm ( $\sim 1$  frange) sur 35 jours à travers 210 m ( $\sim 10$  pixels), comme par exemple sur les flancs du petit volcan présent au milieu de la zone subsidente (km 24-25 sur la figure 3.16). Notez alors qu'un interférogramme à 10 x 35 jours ( $\sim 1$  an) présenterait un gradient de frange (sur les flancs de ce volcan) de l'ordre de 1 frange par pixel!

Il est important de noter que grâce à la suppression des effets atmosphériques stratifiés et à la correction des erreurs orbitales, la phase en dehors de la zone de déformation (plaine) est plate et très proche de zéro. La forme du délai de phase, et donc la déformation induite, est similaire d'un profil à l'autre sur les différents interférogrammes. Pour éviter la propagation de bruit aux étapes du traitement subséquentes (voir section 3.9), le stack est fortement lissé en appliquant le filtre linéaire adaptatif de ROI\_PAC (voir Figures 3.16 et 3.17, ligne noire).

Pour mesurer qualitativement la qualité du stack, il est important de simuler la phase interférométrique que l'on obtiendrait avec une déformation cumulée sur 6 cycles (6 x 35 jours) : l'échelle de couleur du stack brut est donc changée d'un facteur 6 pour obtenir un cycle de couleur tous les 2.8 cm (Figure 3.18a). On voit que le bruit est fortement amplifié, allant jusqu'à une perte de cohérence simulée sur certaines zones. Ce stack simulé à 6 cycles ne pourra donc être utilisé pour aider au déroulement des interférogrammes enroulés à 6 cycles. C'est pourquoi le filtrage préalable du stack est indispensable. Sur le stack filtré et simulé à 6 cycles (Figure 3.18a), les zones à forts gradients de déformation sont préservées et les zones bruitées sont lissées, présentant un rapport signal sur bruit plus élevé par rapport à celui du stack original. Avant tout, utilisé ensuite (voir 3.9), comme

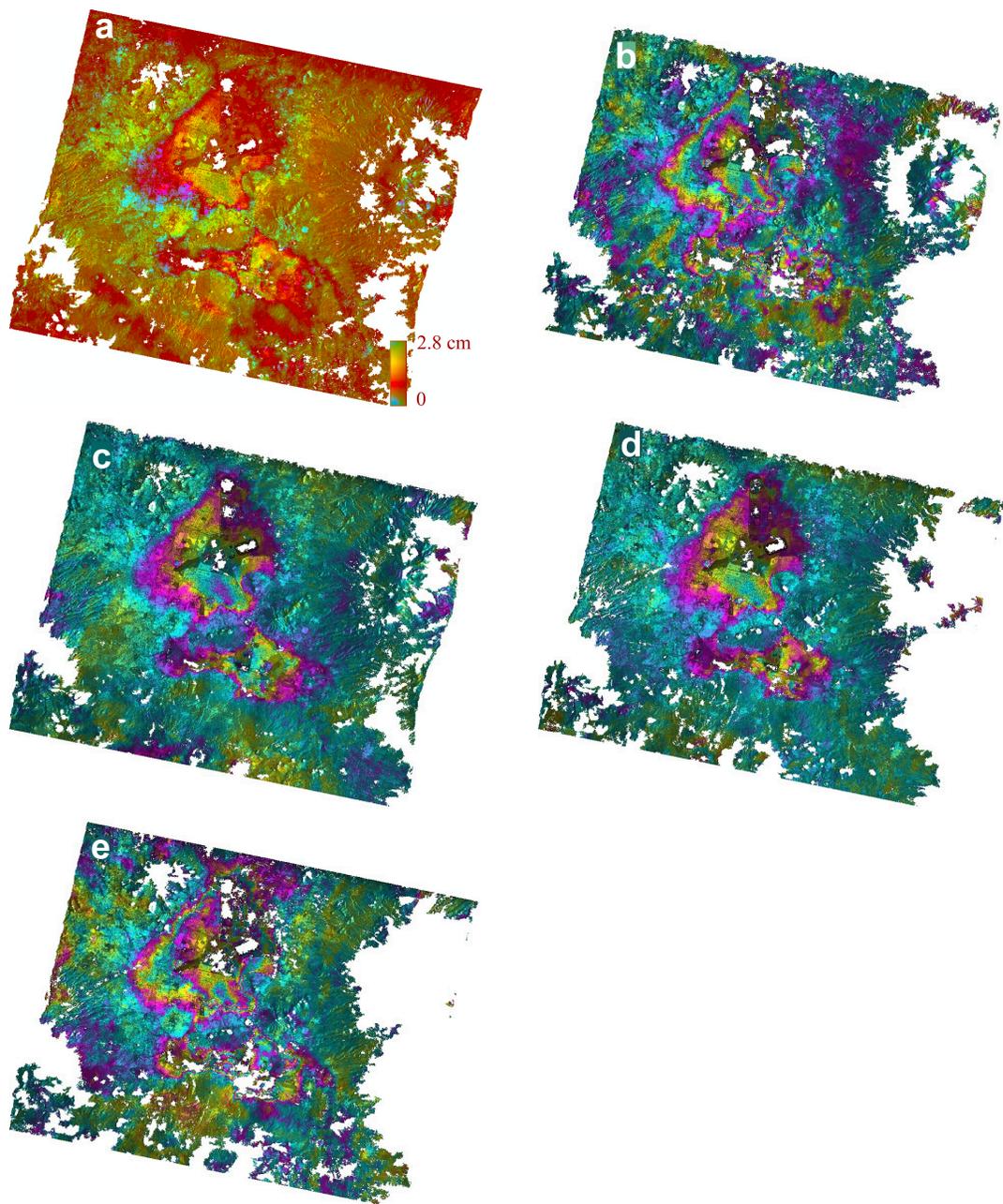


FIG. 3.14 – Les 5 meilleurs interférogrammes déroulés et corrigés des effets atmosphériques verticalement stratifiés et des résidus orbitaux. (a) 2003.11.07-2003.12.12, (b) 2003.12.12-2004.02.20, (c) 2004.11.26-2004.12.31, (d) 2004.12.31-2005.02.04, (e) 2004.12.31-2005.03.11.

aide au déroulement d'interférogrammes à plusieurs mois, il ne nuira pas à la cohérence de la phase résiduelle enroulée.

### 3.7 Inversion

Une fois tous les interférogrammes déroulés avec le logiciel branch-cut de ROI\_PAC, nous obtenons des séries temporelles du délai de phase en utilisant une inversion par

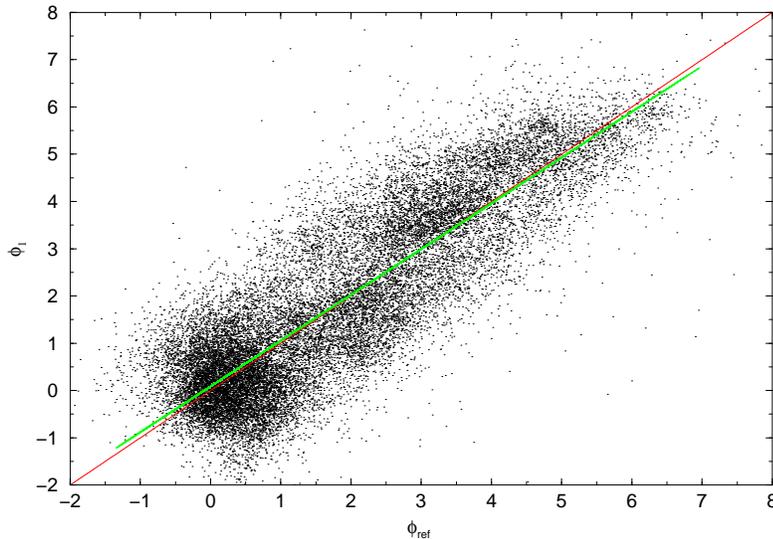


FIG. 3.15 – Graphique traçant la phase de l'interférogramme 2003.11.07-2003.12.12,  $B_t = 35$  jours,  $\phi_1$ , en fonction de la phase de l'interférogramme choisi comme référence 2004.12.31 - 2005.02.04,  $B_t = 35$  jours,  $\phi_{ref}$ . La ligne rouge simule une relation linéaire de pente égale à 1. La ligne verte est le résultat de la régression appliquée au nuage de points. La pente de la régression est égale à  $\alpha_1$  pour l'interférogramme  $\phi_1$ . L'écart autour de la régression peut être dû à des variations temporelles de la forme de la subsidence, à des délais atmosphériques "turbulents", à du bruit sur la phase ou à des erreurs de déroulement. Dans cet interférogramme l'écart est de l'ordre de  $\pm 1.5$  rad

moindres carrés considérant chaque pixel indépendamment de ses voisins [Cavalié et al. [2007]]. Le nombre d'interférogrammes valides,  $N_l$ , et le nombre d'images,  $M_l$ , incluses dans ce groupe d'interférogrammes peut s'avérer plus petit que le nombre total d'interférogrammes ( $N = 71$ ), et le nombre total d'images ( $M = 38$ ) pour un pixel donné. En effet, dépendant de la localisation du pixel  $l$ , quelques liens interférométriques présents sur la figure 3.7 peuvent ne pas être valides à cause de la perte de cohérence sur certaines zones en particulier non urbanisées.

Alors, pour chaque pixel  $l$ , l'équation linéaire :

$$\mathbf{d}_l = \mathbf{G}_l \mathbf{m}_l \quad (3.4)$$

est résolue, où  $\mathbf{d}_l$  est le vecteur incluant les données, i.e., la phase des  $N_l$  interférogrammes valides pour le pixel  $l$ ;  $\mathbf{m}_l$  est le vecteur contenant les inconnues, i.e., les  $M_l - 1$  délais de phase entre deux images successives pour le pixel  $l$ ;  $\mathbf{G}_l$  est la matrice de  $N_l \times (M_l - 1)$  comprenant zéros et uns, construite en considérant que la phase d'un interférogramme,  $\phi_{ij}^l$ , est la somme des incréments de phase successifs,  $m_k^l$ , entre les images  $i$  et  $j$ ,

$$\phi_{ij}^l = \sum_{k=i}^{j-1} m_k^l \quad (3.5)$$

L'inversion est appliquée sur tous les pixels trouvés cohérents sur au moins 40 interférogrammes. Pour certains pixels ( $\sim 40\%$  du total des pixels inversés) il existe des liens manquants. C'est à dire que plusieurs groupes d'images peuvent n'être liés entre eux par

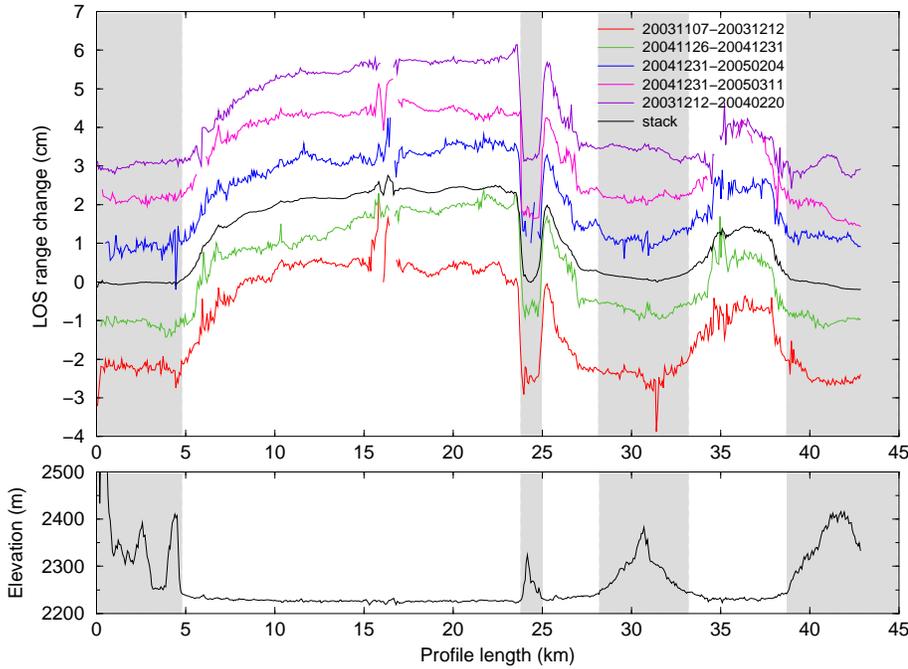


FIG. 3.16 – Profils à travers le stack (ligne continue noire) et les cinq meilleurs interférogrammes (lignes en couleur). Tous les profils sont pondérés pour représenter la déformation sur 35 jours. Les profils des interférogrammes ont été translatés de 1 cm pour l’affichage. Les zones ombrées correspondent à des élévations plus grandes que 2250mSNM où la déformation est proche de zéro. Voir la localisation du profil sur la figure 3.17.

aucun interférogramme. Le système est alors non déterminé, i.e.  $\mathbf{G}_l^T \mathbf{G}_l$  est une matrice singulière : La méthode de Singular Value Decomposition, est appliquée à la place de celle des moindres carrés pour résoudre l’équation (3.4). Pour chaque pixel, je compare le rang de la matrice ( $\mathbf{G}_l^T \mathbf{G}_l$ ) avec le nombre d’inconnues ( $M_l - 1$ ) pour quantifier le nombre de liens manquants. L’inversion n’est réalisée que si  $N_l > N/2$  (i.e. 35 interférogrammes).

### 3.8 Identification des erreurs de déroulement

Quand les interférogrammes analysés présentent de la redondance entre eux, les erreurs de déroulement peuvent être détectées à travers des inconsistances de fermeture du réseau interférométrique. Pour évaluer la fermeture du système interférométrique en chaque pixel,  $l$ , nous calculons pour tous les interférogrammes, le résidu RMS (Root Mean Square) entre la phase observée des interférogrammes,  $\phi_{ij}^l$ , et celle estimée par la somme des incréments de phase successifs [Cavalié et al. [2007]] :

$$\phi_{RMS_{pixel}}^l = \left[ \frac{1}{N_l} \sum_{ij \in N_l} \left( \phi_{ij}^l - \sum_{k=i}^{j-1} m_k^l \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

Pour estimer le degré de consistance d’un interférogramme,  $ij$ , dans le système interférométrique global, nous calculons aussi le RMS pour tous les pixels  $P$  valides de l’interféro-

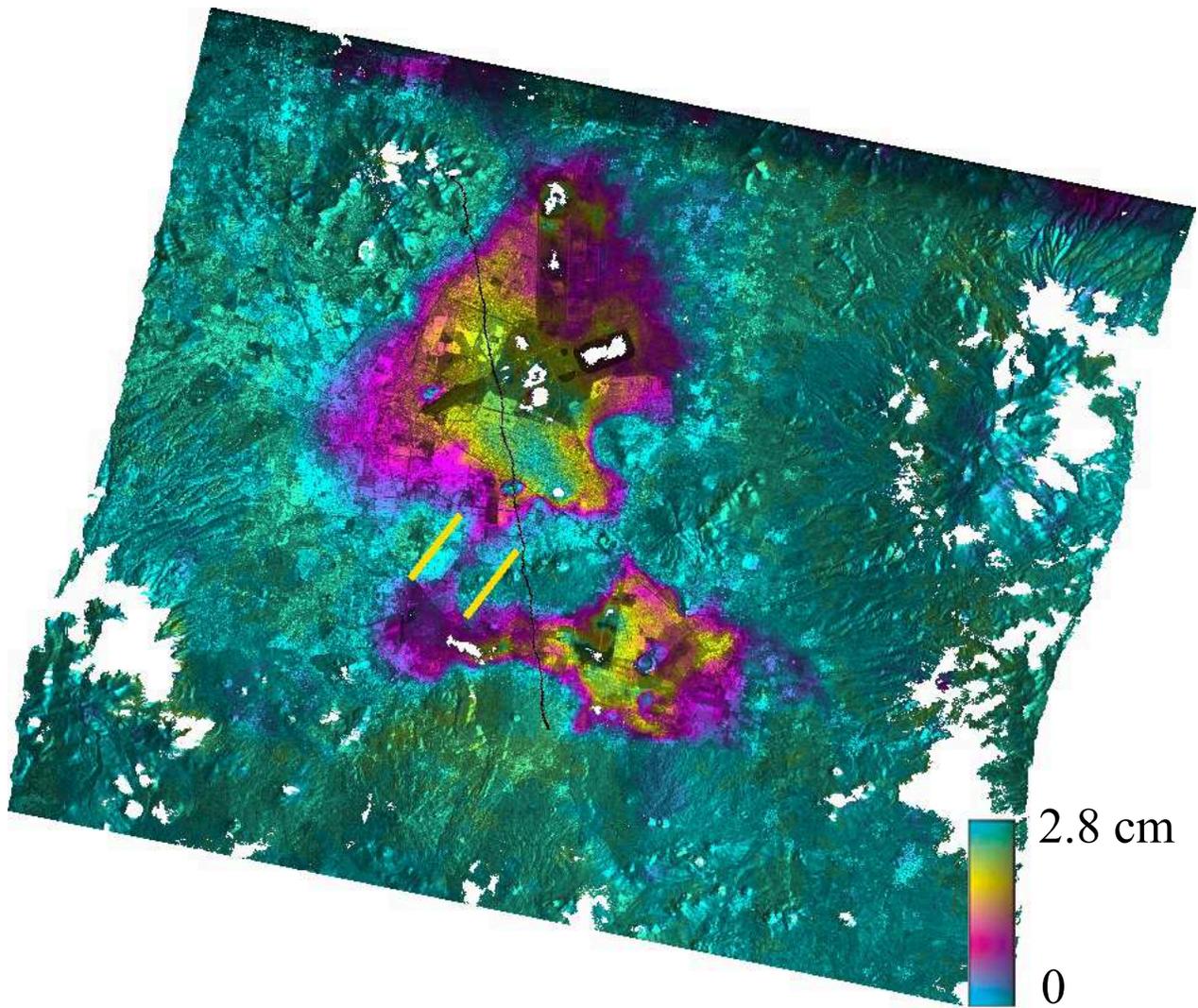


FIG. 3.17 – Stack des cinq meilleurs interférogrammes. Les interférogrammes déroulés et corrigés sur la figure 3.14 sont sommés pour représenter la déformation moyenne sur 35 jours. La ligne noire montre la localisation des profils sur la figure 3.16. La zone entre les deux lignes parallèles jaunes est un très étroit couloir de subsidence, présentant de forts gradients de déformation, à travers lequel de nombreuses erreurs de déroulement ont lieu sur un nombre important d’interférogrammes. Ce couloir lie les deux zones principales de subsidence.

gramme,

$$\phi_{RMS_{ifg}}^{ij} = \left[ \frac{1}{P} \sum_{l \in P} \left( \phi_{ij}^l - \sum_{k=i}^{j-1} m_k^l \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.7)$$

Finalement, nous avons aussi étudié la carte de l’écart à la fermeture pour chaque interférogramme,

$$\left| \phi_{ij}^l - \sum_{k=i}^{j-1} m_k^l \right| \quad (3.8)$$

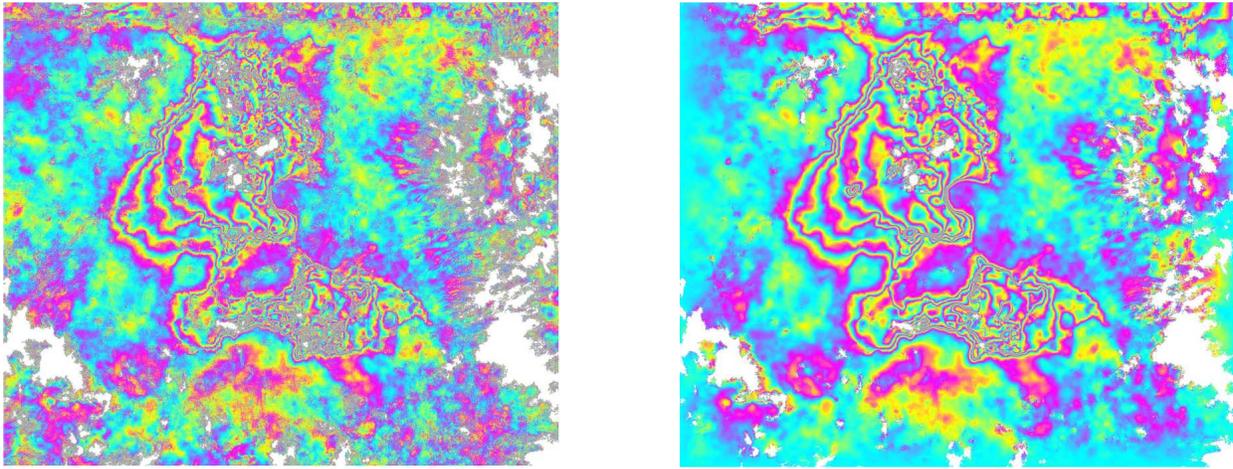


FIG. 3.18 – À gauche : La déformation à 7 mois (6 x 35 jours) simulée à partir de la sommation des 5 meilleurs interférogrammes (1 frange = 2.8 cm). À droite : La déformation à 6 mois simulée à partir du stack filtré par le filtre adaptatif de ROI\_PAC (1 frange = 2.8 cm).

pour identifier la localisation des inconsistances et pouvoir isoler celles qui correspondent aux erreurs de déroulement.

La figure 3.19a présente la carte de l'erreur globale de fermeture  $\phi_{RMS_{pixel}}^l$  résultant de l'inversion des interférogrammes déroulés avec ROI\_PAC. Elle indique la présence de nombreuses erreurs de déroulement sur ce premier jeu d'interférogrammes produits. La figure 3.19b montre l'erreur de fermeture par interférogramme,  $\phi_{RMS_{ifq}}^{ij}$ , avec des pics pour les interférogrammes 2, 3, 25 et 32, qui dénotent des inconsistances dues aux erreurs de déroulement présents sur quelques-uns d'entre eux. Nous avons analysé l'ensemble de ces interférogrammes de plus près. La figure 3.19c, montre la carte d'écart à la fermeture pour l'interférogramme 3, contenant des erreurs contenues sur la carte 3.19a, montrant les plus larges valeurs de RMS. Une inspection de l'interférogramme en question (Figure 3.19d) indique la localisation de nombreuses erreurs de déroulement avec une forme géométrique et une extension peu commune avec l'algorithme branch-cut de ROI\_PAC. Une erreur du déroulement plus courante est présentée sur les figures 3.19e et f, sur l'interférogramme 25. La carte d'écart à la fermeture affiche un plan incliné et un changement soudain à travers une ligne courbée (en jaune) causé par une erreur de déroulement (Figure 3.19f) à travers le couloir de subsidence discuté plus haut (Figure 3.17, entre lignes jaunes). Une inconsistance de phase de  $2\pi$  apparaît alors dans les zones non subsidentes de part et d'autre du couloir. Par conséquent, l'aplatissement Est-Ouest de l'interférogramme est faux et n'est pas consistant avec l'ensemble des aplatissements du réseau de l'interférogramme (Figure 3.19f). Ceci produit l'inclinaison de la carte d'écart à la fermeture sur la figure 3.19e.

Cette analyse traduit la nécessité de développer une méthode pour guider le déroulement des interférogrammes, ayant pour but le nettoyage des erreurs de déroulement et permettant ainsi une estimation précise des mesures de la déformation.

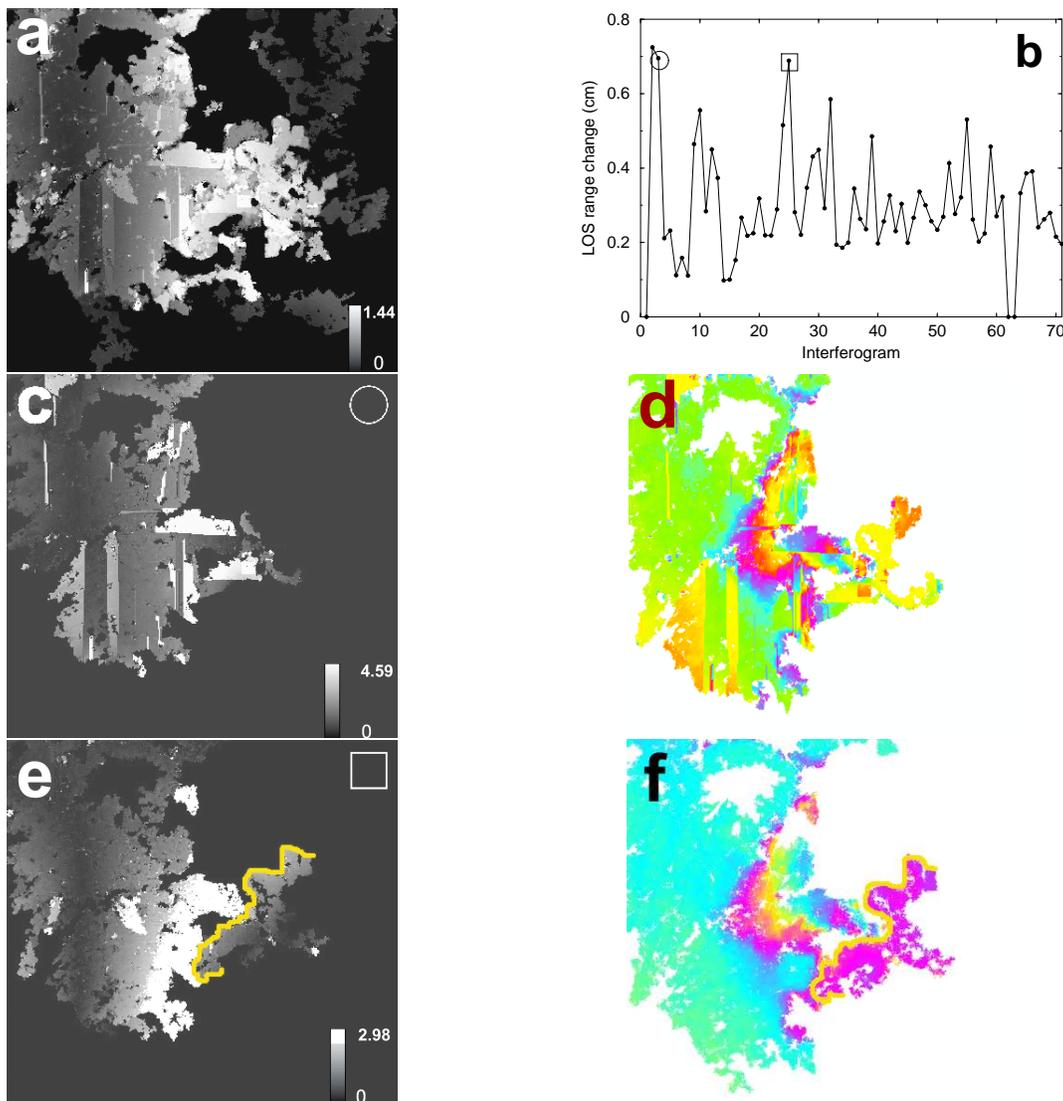


FIG. 3.19 – a) Carte de l'erreur globale de fermeture, RMS,  $\phi_{RMS_{pixel}}^l$ , montrant les inconsistances du réseau d'interférogrammes déroulés en utilisant l'algorithme branch cut de ROI\_PAC. Le RMS augmente des zones noires aux zones blanches. b) Fermeture du réseau d'interférogrammes représenté par interférogramme,  $\phi_{RMS_{ifg}}^{ij}$ . Deux pics identifiés par un rond (O) et un carré (□) sont analysés sur les panneaux suivants. c) Carte d'écart à la fermeture pour l'interférogramme 3 (O : 20030307-20031003) affichant quelques-unes des erreurs retrouvées sur (a). d) Interférogramme 3 déroulé avec ROI\_PAC montrant de très grosses erreurs de déroulement (échelle : 13.51 LOS cm/frange). e) Carte d'écart à la fermeture pour l'interférogramme 25 (□ : 20040430-20050204) montrant un gradient global sur l'image et un saut de phase à travers la ligne jaune. f) Interférogramme correspondant montrant l'erreur de déroulement à travers la ligne jaune (échelle : 18.02 LOS cm/frange). Toutes les échelles sont en LOS cm.

### 3.9 Résoudre les problèmes de déroulement

Le principal problème du traitement des interférogrammes de la Ville de Mexico se situe à l'étape de déroulement. Ces problèmes n'ont rien à voir avec l'efficacité de l'algorithme

de déroulement de ROI\_PAC, mais plutôt avec la perte de cohérence, le grand nombre de franges et l'amplitude des gradients présents sur les interférogrammes. Les gradients de déformation sont très importants et atteignent parfois une frange tous les deux pixels (taux d'aliasing) sur des interférogrammes à un an par exemple. Pour les interférogrammes avec une ligne de base temporelle  $B_t$  plus grande que 70 jours, la cohérence descend alors que le nombre de franges augmente. Le déroulement devient donc très difficile et le développement d'une méthode pour le guider devient nécessaire.

### 3.9.1 Utilisation d'aide au déroulement dans de précédentes études

Le deux premières approches présentées dessous visent l'aide au déroulement des interférogrammes avec un très grand nombre de franges. Le troisième aide le déroulement pour en diminuer le risque d'erreurs. Sur les interférogrammes avec de très forts gradients, l'aliasing peut empêcher le correct déroulement des franges. Ces approches utilisent des estimations d'une partie de la déformation pour diminuer les franges et ainsi réduire les problèmes d'aliasing pouvant affecter la performance des algorithmes de déroulement.

#### 3.9.1.1 Strozzi and Wegmuller [1999]

Comme cela a été dit dans la section 3.2.1, Strozzi and Wegmuller [1999] utilisent un interférogramme à temps court comme modèle de la déformation pour aider le déroulement des interférogrammes à durées plus longues sur la Ville de Mexico, caractérisés par de gros gradients de déformation. Un interférogramme à 4 mois a été utilisé comme modèle pour aider le déroulement d'un autre à 13 mois. La déformation contenue dans l'interférogramme modèle est ramenée à 1 mois puis multipliée par 13 pour être supprimée de l'interférogramme à 13 mois puis rajoutée après déroulement de la phase résiduelle.

#### 3.9.1.2 Yun et al. [2007]

Dans leur article, Yun et al. [2007] proposent une méthode d'aide au déroulement des interférogrammes affichant de grosses déformations. Ils étudient le cas des interférogrammes sur le volcan Sierra Negra sur l'île Isabella aux Galápagos. Sur ce site, la déformation étant large et complexe, gêne le recalage précis des images et donc la construction d'interférogrammes cohérents. Après avoir essayé sans succès différents algorithmes pour ajuster le champ de décalage en distance et azimuth par une fonction polynomiale, ils décident d'utiliser une approche utilisant l'ensemble des décalages en distance et en azimuth pour appliquer la distorsion à l'image esclave (rubber-sheeting). L'offset en distance est utilisé par la suite pour simuler un interférogramme contenant une bonne partie de la déformation totale. Après l'avoir filtré, il est supprimé de l'interférogramme original puis rajouté, une fois la phase interférométrique résiduelle déroulée.

#### 3.9.1.3 Pinel et al. [2008]

Pinel et al. [2008] mesurent les déformations de deux volcans les plus actifs au Mexique : le Popocatépetl et le Colima. Pour surmonter le problème du manque d'information sur les flancs des volcans couverts par la végétation, ils appliquent une approche mixant les avantages de la méthode des réflecteurs persistants (Hooper et al. [2004]) et des petites lignes de base (Hooper [2008]). Les volcans présentent des dénivelés importants,  $\sim 3000$  m, et le délai de phase dû aux variations de stratification de la troposphère peut atteindre

---

plusieurs franges sur les flancs. Pour aider le déroulement de la phase interférométrique, ils estiment le délai de phase dû aux contributions verticalement stratifiées, le suppriment de l'interférogramme original, puis le rajoutent après déroulement. Cette estimation est soit obtenue par corrélation entre la phase interférométrique enroulée et l'élévation, soit obtenue à priori en utilisant le modèle atmosphérique NARR.

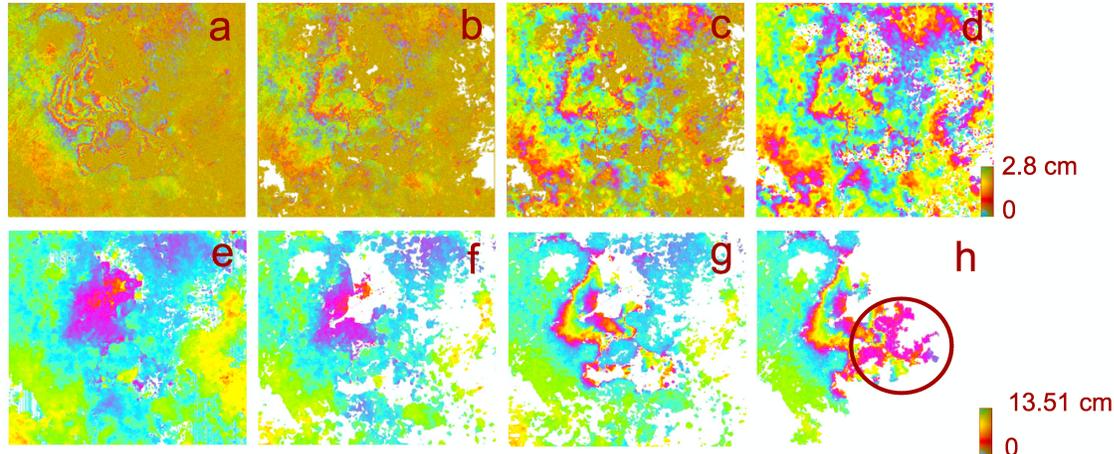


FIG. 3.20 – a) Phase de l'interférogramme enroulé et non filtré,  $e^{i\phi_{raw}}$ , b) Interférogramme résiduel enroulé,  $e^{i\phi_{res}^1}$ , après avoir ôté de la phase celle du stack pondéré par  $\alpha_1$ . Au cours de cette première estimation,  $\alpha_1$  est sous estimé, i.e., une partie de la déformation est toujours présente sur l'interférogramme résiduel. c) Interférogramme résiduel enroulé filtré avec le filtre adaptatif de ROI\_PAC,  $e^{i\phi_{res}^{adf}}$ , d) Interférogramme résiduel filtré par le filtre passe-bas,  $e^{i\phi_{res}^{lp}}$ , e) Phase résiduelle déroulée par SNAPHU,  $\phi_{res}^{lp_{unw}}$  f) Phase résiduelle déroulée masquée sur les zones non cohérentes présentes sur (c) et sur laquelle les hautes fréquences du résidu (c)-(d) sont restituées,  $\phi_{res}^{adf_{unw}}$ , g) Phase interférométrique déroulée et filtrée  $\phi_{unw}^2$ , sur laquelle la version pondérée du stack a été rajoutée. h) Interférogramme déroulé avec l'algorithme branch-cut de ROI\_PAC,  $\phi_{unw}^1$ , montré pour comparaison avec (g). L'erreur de déroulement (dans le cercle noir) a disparu sur (g). Voir section 3.9.3 pour plus de détails.

### 3.9.2 Principes de la méthode de déroulement itérative

Notre méthode s'appuie sur le fait que la déformation sur les interférogrammes est très similaire d'une période à l'autre de la durée de notre étude. Nous supposons donc que la déformation  $D(x, y, t)$  peut s'écrire comme

$$D(x, y, t) = F(x, y)T(t) + F'(x, y, t) \quad (3.9)$$

où la fonction  $F'$  est d'amplitude nettement plus faible que  $D$  et présente des gradients de déformation nettement plus faibles. La fonction  $T(t)$  peut être quelconque. Le principe consiste à utiliser le stack d'interférogrammes,  $\phi_{stack}$ , comme estimation de la forme principale de la déformation  $F(x, y)$  et  $\alpha$  comme un coefficient multiplicatif ajustable de  $F(x, y)$ , représentant la variation de  $T(t)$  entre  $t_i$  et  $t_j$ .

La phase de nos interférogrammes est ainsi décrite comme :

$$\phi_{ifg} = \underbrace{\alpha\phi_{stack}}_{def} + \underbrace{(ax + b)y + cx + d}_{orbital} + \underbrace{\beta z}_{atm_{vert}} + \underbrace{\phi_n}_{def, atm_{turb}, DEM_{erreur, bruit}} \quad (3.10)$$

où  $\phi_{ifg}$  est la phase interférométrique,  $\alpha\phi_{stack}$  est la phase pondérée du stack, représentant une partie importante de la déformation (i.e.,  $F(x, y)T(t)$ ),  $(ax + b)y + cx + d$  est la contribution orbitale résiduelle,  $\beta z$  est la contribution de l'atmosphère stratifiée et  $\phi_n$  est la phase contenant : la déformation qui ne suit pas la forme du stack (i.e.,  $F'(x, y, t)$ ), la contribution atmosphérique turbulente, les erreurs du DEM et le bruit de la phase (décorrélation, bruit thermique, recalage, etc.)

Pour aider au déroulement des interférogrammes, nous avons construit la phase résiduelle enroulée de l'interférogramme  $e^{i\phi_{res}}$  à partir de la phase brute, enroulée et non filtrée, de l'interférogramme  $e^{i\phi_{raw}}$  :

$$e^{i\phi_{res}} = e^{i(\phi_{raw} - \alpha\phi_{stack} - \beta z)} \quad (3.11)$$

en supprimant le terme de phase pondéré du stack et la contribution de l'atmosphère stratifiée. La phase résiduelle enroulée a moins de franges et des gradients de phase relativement plus lisses que l'interférogramme original, devenant plus facilement déroulable. Pour cela, il est bien sûr nécessaire que la phase enroulée,  $e^{i\alpha\phi_{stack}}$ , soit peu bruitée (voir plus haut section 3.6 et figure 3.17).

Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  doivent être évalués à partir d'un interférogramme,  $\phi_{unw}$ , obtenu lors d'une étape précédente. Nous effectuons donc les étapes suivantes de manière itérative :

1. Estimation des paramètres  $\alpha_n$  et  $\beta_n$  ainsi que du plan orbital résiduel en utilisant l'équation (3.10) et l'interférogramme déroulé de l'étape précédente,  $\phi_{unw}^n$ . Pour l'étape  $n=1$ , les interférogrammes déroulés par ROI\_PAC sont utilisés ( $\phi_{unw}^1$ ).
2. Calcul de l'interférogramme résiduel enroulé,  $e^{i\phi_{res}^n} = e^{i(\phi_{raw} - \alpha_n\phi_{stack} - \beta_n z)}$
3. Déroulement de l'interférogramme résiduel  $e^{i\phi_{res}^n}$ . Cette étape est décrite dans la section 3.9.3. A la fin de cette étape, l'interférogramme résiduel déroulé,  $\phi_{res_{unw}}^n$ , est filtré avec le filtre adaptatif de ROI\_PAC. La figure (3.20) montre un interférogramme suivant les différentes étapes du déroulement de la phase résiduelle.
4. Calcul du nouvel interférogramme filtré et déroulé à partir de  $\phi_{unw}^{n+1} = \phi_{res_{unw}}^n + \alpha_n\phi_{stack} + \beta_n z$

Les étapes (1) à (4) sont incluses dans deux itérations décrites en détail dans la section suivante.

### 3.9.3 Etapes itératives

Les étapes itératives qui permettent la construction de trois groupes d'interférogrammes, présentant une amélioration incrémentale de déroulement, sont décrites ici en détail. Le premier groupe ( $n=1$ ) est déroulé par ROI\_PAC (voir section 3.3). Sa phase est représentée par  $\phi_{unw}^1$ .

Le deuxième ( $n=2$ ) et troisième ( $n=3$ ) groupes sont le résultat de deux itérations dont le déroulement est basé sur SNAPHU [Chen and Zebker [2000]]. Les détails de ces itérations sont présentés ci dessous.

- a) Construction du deuxième groupe d'interférogrammes déroulés,  $n=2$ .

- 1) L'estimation des paramètres de l'équation (3.10) à partir de  $\phi_{unw}^1$ , n'est pas toujours précise à ce stade du traitement. En effet, des erreurs de déroulement parfois importantes sont présentes sur ce premier groupe d'interférogrammes, de plus la plupart d'entre eux n'ont pas pu être déroulés en entier et de manière continue à cause du manque de cohérence qui déconnecte les régions du champ proche de celles du champ lointain. Cela provoque des erreurs et des problèmes de précision sur l'estimation du plan incliné orbital ( $a_1, b_1, c_1, d_1$ ), de la contribution atmosphérique ( $\beta_1$ ) et du facteur d'échelle  $\alpha_1$  appliqué au stack.
- 2) Puisque la précision des estimations des paramètres  $a_1, b_1, c_1, d_1$  et  $\beta_1$  n'est pas suffisamment précise, l'interférogramme résiduel  $e^{i\phi_{res}^1}$  est calculé seulement à partir de

$$e^{i\phi_{res}^1} = e^{i(\phi_{raw} - \alpha_1 \phi_{stack})} \quad (3.12)$$

Notons que la version pondérée du stack est supprimée de l'interférogramme brut enroulé non filtré,  $e^{i\phi_{raw}}$ , dans le but de conserver le plus fidèlement possible la structure des gros gradients de déformation qui sont proches de l'aliasing et peuvent être atténués ou détruits par le filtrage adaptatif. Après qu'une partie importante de la déformation ait été retirée de l'interférogramme brut, les gradients de phase devraient être plus faibles et donc filtrés sans perte d'informations. Le filtre adaptatif est donc appliqué sur l'interférogramme résiduel  $e^{i\phi_{res}^1}$ .

- 3) Le déroulement de l'interférogramme résiduel filtré est fait en utilisant la procédure décrite dans la section 3.9.4. Nous avons choisi d'utiliser SNAPHU pour dérouler les interférogrammes en entier en incluant même les régions qui ont été déconnectées à cause de la perte de cohérence sur les zones couvertes de végétation.

Grâce à la suppression d'une version pondérée du stack, la phase résiduelle  $e^{i\phi_{res}^1}$  comporte moins de franges. De plus, elle devient plus facilement déroulable après l'application d'un filtre passe-bas.

- 4) La nouvelle phase déroulée,

$$\phi_{unw}^2 = \phi_{res}^1 + \alpha_1 \phi_{stack} \quad (3.13)$$

présente beaucoup moins d'erreurs de déroulement que  $\phi_{unw}^1$ . En particulier, les erreurs de déroulement à travers le canal étroit (voir Figures 3.17, 3.19e et 3.19f), liant les deux grandes zones de subsidence, ont disparu. De plus, grâce à l'utilisation de SNAPHU, le déroulement est effectué aussi sur le champ lointain, dans des zones cohérentes qui peuvent être déconnectées entre elles.

- b) Construction du troisième groupe d'interférogrammes déroulés, n=3.

- 1) Les paramètres de l'équation (3.10) sont maintenant estimés à partir de  $\phi_{unw}^2$ . Cette fois-ci les paramètres ( $a_2, b_2, c_2, d_2$ ) liés aux erreurs orbitales et  $\beta_2$  lié à la contribution atmosphérique sont mieux définis et avec plus de précision par rapport à ceux qui ont été calculés à l'étape précédente. De même, nous obtenons une meilleure estimation du facteur pondérant le stack  $\alpha_2$ . Ceci est dû à la diminution des erreurs de déroulement sur  $\phi_{unw}^2$  et à l'agrandissement de la zone déroulée.

- 2) L'interférogramme résiduel,  $e^{i\phi_{res}^2}$ , est alors calculé à partir de l'interférogramme brut original,  $e^{i\phi_{raw}}$ , et des paramètres  $\alpha_2$  et  $\beta_2$ ,

$$e^{i\phi_{res}^2} = e^{i(\phi_{raw} - \alpha_2\phi_{stack} - \beta_2z)} \quad (3.14)$$

- 3) Pareil que (a)(3).  
4) La nouvelle phase déroulée,

$$\phi_{unw}^3 = \phi_{res}^2 + \alpha_2\phi_{stack} + \beta_2z \quad (3.15)$$

présente à son tour moins d'erreurs de déroulement que  $\phi_{unw}^2$ .

Finalement, les paramètres de l'équation (3.10) sont ré-estimés pour construire un groupe d'interférogrammes corrigés des erreurs orbitales résiduelles et de la contribution tropostatique.

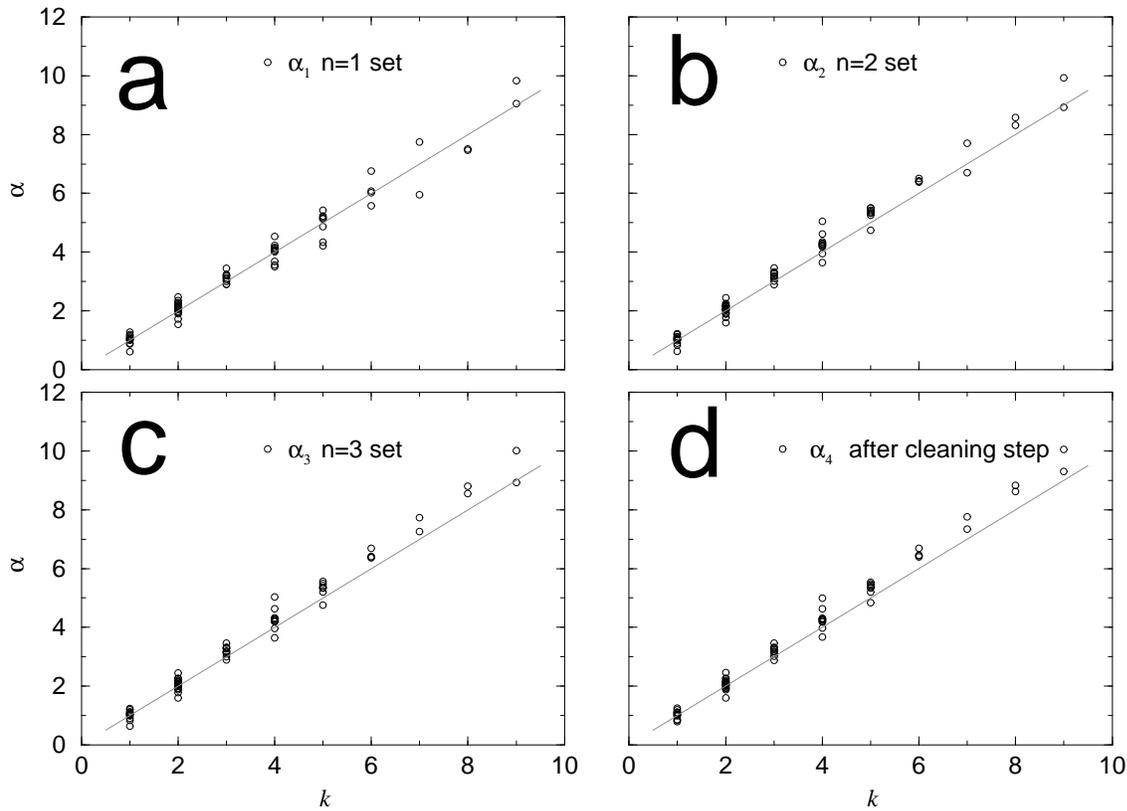


FIG. 3.21 – (a-d) Facteurs de pondération  $\alpha$  calculés entre chaque interférogramme et le stack (Figure 3.17) pour les groupes d'interférogrammes ( $n=1$ ,  $n=2$ ,  $n=3$  et après l'étape de nettoyage). Les lignes grises continues montrent la valeur attendue si la vitesse de déformation est constante,  $\alpha_n = k$ , pour les interférogrammes avec une ligne de base temporelle égale à  $k \times 35$  jours. Cette prédiction est vérifiée dans le cas où la subsidence varie linéairement dans le temps.

Il faut noter que le facteur pondérateur,  $\alpha_n$ , est un paramètre libre qui ne contraint pas la forme de l'évolution temporelle de la subsidence (i.e.,  $T(t)$ ). De plus, la phase résiduelle

déroulée,  $\phi_{res}^{n_{unw}}$ , contient la partie de la déformation qui n'est pas proportionnelle au stack. Ainsi, la nouvelle phase déroulée,  $\phi_{unw}^{n+1}$ , n'est pas forcée de suivre une forme particulière en temps ou en espace à condition que les gradients de déformation de l'interférogramme résiduel soient suffisamment modérés pour permettre le déroulement sans erreurs. Sur la figure 3.21, nous comparons les valeurs estimées de  $\alpha_1$  à  $\alpha_4$  par rapport à celles attendues pour une subsidence linéaire en temps. Les valeurs de  $\alpha$  changent légèrement d'une itération à l'autre mais en général restent très proches des prévisions linéaires avec quelques écarts qui peuvent être dûs aux contributions atmosphériques non corrigées et à une déformation non linéaire en temps.

### 3.9.4 Déroulement de la phase résiduelle

Nous présentons ci-dessous les étapes de la procédure pour dérouler la phase résiduelle. La figure 3.20 montre l'évolution de la procédure appliquée sur un exemple.

- Nous avons appliqué d'abord le filtre non linéaire, spatial et adaptatif de ROI\_PAC, sur l'interférogramme résiduel  $e^{i\phi_{res}}$  (figure 3.20b) afin d'obtenir  $e^{i\phi_{res}^{adf}}$  (figure 3.20c).
- L'interférogramme résiduel est ensuite à nouveau filtré avec un filtre passe-bas, qui calcule la moyenne de la phase complexe sur des fenêtres adaptatives et glissantes pour obtenir :  $e^{i\phi_{res}^{lp}}$  (Figure 3.20d). L'application de ce filtre s'est avérée nécessaire pour réussir à faire tourner l'algorithme de déroulement de SNAPHU sur une machine conventionnelle et en un temps raisonnable. Grâce également à l'application de ce filtre, quelques régions non cohérentes et déconnectés sur  $e^{i\phi_{res}^{adf}}$  ont pu être remplacées par des valeurs interpolées de la phase, facilitant le déroulement et diminuant la probabilité de commettre des erreurs.
- Une fois le filtre passe-bas appliqué, l'interférogramme,  $e^{i\phi_{res}^{lp}}$ , est déroulé en utilisant SNAPHU pour obtenir  $\phi_{res}^{lp_{unw}}$  (Figure 3.20e).
- En supposant que le résidu haute fréquence de la phase,  $e^{i(\phi_{res}^{adf} - \phi_{res}^{lp})}$ , est dans l'intervalle  $[-\pi, \pi]$ , nous le rajoutons à  $\phi_{res}^{lp_{unw}}$  pour obtenir la phase résiduelle finale déroulée,  $\phi_{res}^{adf_{unw}}$  (Figure 3.20f). Au cours de cette étape, nous masquons les zones qui étaient bruitées après avoir appliqué le filtre adaptatif. (Ces zones sont montrées sur la Figure 3.20c et peuvent être comparées au masque sur la figure 3.20f).

Notons ici que les interférogrammes finaux obtenus sont filtrés : on ne pourra pas espérer reconstruire ensuite une déformation ou une erreur de MNT ponctuelle. De plus, l'hypothèse que le résidu haute fréquence des interférogrammes à petite baseline ( $B_t$  et  $B_\perp$ ) soit compris entre  $(-\pi, \pi)$ , bien que peu contraignante, pourrait briser des structures locales de toute petite taille et avec une phase relative variant fortement avec  $B_t$  ou  $B_\perp$  (avec un taux de subsidence relatif supérieur à  $\sim \frac{\pi \times 365}{9 \times 35} = 3.64$  rad/an ou avec une erreur de MNT proportionnelle à  $B_\perp$  supérieure à  $\frac{\pi}{500} = 0.0063$  rad/m, où  $B_t^{max} = 9 \times 35$  jours et  $B_\perp^{max} = 500$  m).

### 3.9.5 Etape de nettoyage

Une fois les étapes itératives appliquées, la plupart des erreurs de déroulement ont été supprimées des interférogrammes. Malheureusement, localement il existe encore quelques erreurs résiduelles. Ces erreurs peuvent être détectées sur les cartes d'écart mais aussi sur les graphiques traçant la phase interférométrique en fonction soit de la phase du stack soit

de l'altitude, où ils apparaissent comme un double nuage de points (voir un exemple figure 3.22). Nous avons donc décidé de masquer sur chaque interférogramme, tous les pixels pour lesquels la phase  $\phi = \phi_{unw}^3 - \alpha_3 \phi_{stack} - (a_3 x + b_3)y - c_3 x - d_3 - \beta_3 z$  a une amplitude plus grande que 4 radians. Cette dernière étape masque seulement les valeurs de phase des pixels auxquels nous n'accordons pas assez de confiance.

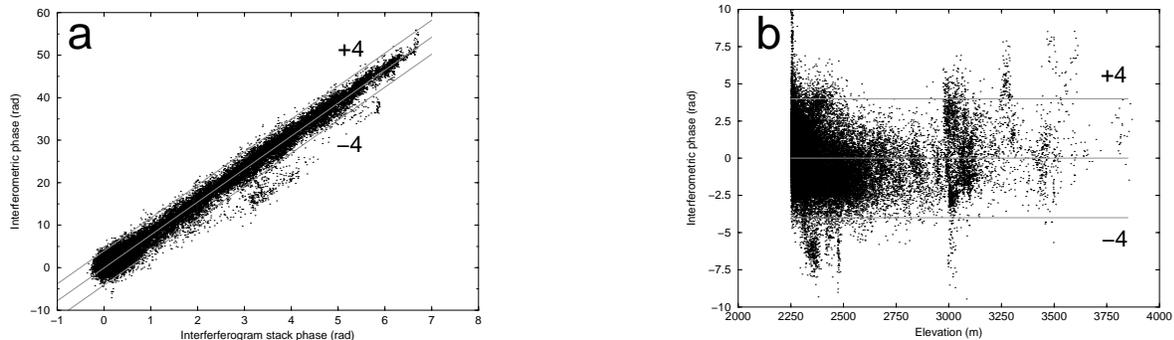


FIG. 3.22 – a) Délai de phase de l'interférogramme 2004.04.30-2004.12.31 fonction de la phase du stack (la pente de la régression est  $\alpha_3$ ) et b) Délai de phase fonction de l'altitude (la pente de la régression est  $\beta_3$ ). Les pixels dont la phase diffère de plus de  $\pm 4$  rad de la régression sont masqués lors de l'étape de nettoyage.

### 3.9.6 Analyse de l'amélioration apportée par l'aide au déroulement

Afin de vérifier que notre méthode permet effectivement d'améliorer le déroulement des interférogrammes, nous avons inspecté l'évolution des interférogrammes au cours des différentes étapes de la procédure et les mesures de fermeture correspondantes.

#### 3.9.6.1 Relation entre phase de l'interférogramme et phase du stack

La figure 3.23 montre la phase interférométrique en fonction de la phase du stack, au cours des différentes étapes du traitement, pour l'interférogramme 2004.09.17-2005.04.15. Nous pouvons noter la diminution progressive des erreurs de déroulement présentes sur l'interférogramme en question. Sur la figure 3.23a correspondante à la phase interférométrique déroulée par ROI\_PAC (groupe d'interférogrammes  $n=1$ ), la droite rouge du milieu souligne l'orientation du principal nuage de points. Les deux autres droites rouges à  $-\pi$  et  $+\pi$  de la régression encerclent les valeurs de phase peu probablement bruitées par des erreurs de déroulement. En dehors de ces valeurs, une série d'erreurs de déroulement est identifiable à travers la présence de tendances multiples parallèles à  $\pm 2\pi$  de la tendance principale. La figure 3.23b montre la relation entre phase de l'interférogramme et phase du stack après application de la première itération (groupe d'interférogrammes  $n=2$ , déroulé par SNAPHU). Les erreurs initiales à  $\pm 2\pi$  (et éventuellement  $\pm 4\pi$ ) ont disparues, toutefois un nouvel ensemble de valeurs à  $-2\pi$  est présent à cause de la médiocre estimation de  $\alpha_1$  par régression sur le graphe de la figure 3.23a et de la non prise en compte de  $\beta_1$  dans le calcul de l'interférogramme résiduel. Sur la figure 3.23c, l'utilisation de nouvelles estimations de  $\alpha$  et  $\beta$  (i.e.,  $\alpha_2$  et  $\beta_2$ ) contribuent au correct déroulement de la phase interférométrique (groupe d'interférogrammes  $n=3$ , déroulé par SNAPHU) qui sur le graphique montre une seule tendance. Finalement, sur la figure 3.23d le graphique montre la

phase interférométrique (groupe d'interférogrammes  $n=4$ ) après avoir appliqué l'étape de nettoyage.

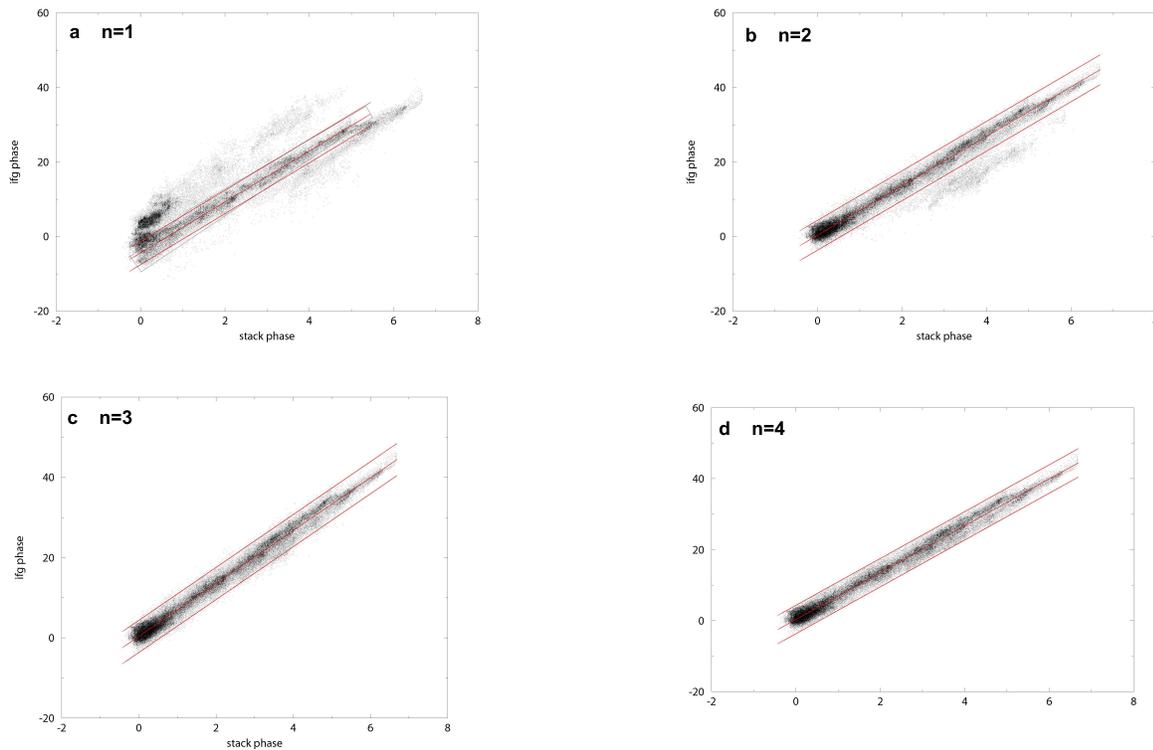


FIG. 3.23 – Phase interférométrique en fonction de la phase du stack pour l'interférogramme 2004.09.17-2005.04.15. a) Étape  $n=1$ . La phase interférométrique a été déroulée par ROI\_PAC. b) Étape  $n=2$ . La phase interférométrique résiduelle a été déroulée par SNAPHU. c) Étape  $n=3$ . La phase interférométrique a été déroulée par SNAPHU. d) Étape  $n=4$ , après le nettoyage.

### 3.9.6.2 Cartes d'écart à la fermeture par interférogramme

Afin d'analyser comment les différentes étapes du traitement permettent (ou non) de s'affranchir d'erreurs de déroulement, nous avons examiné les cartes d'écart à la fermeture pour chaque interférogramme au cours des différentes étapes. Sur la figure 3.24, nous montrons le cas de l'interférogramme 2004.04.30-2005.02.04. Sur la figure 3.24a, la carte d'écart issue de l'interférogramme déroulé par ROI\_PAC est montrée. Elle affiche une erreur de déroulement assez commune sur les interférogrammes représentée par un plan incliné et un changement soudain de RMS à travers le passage étroit qui sépare les deux principales zones de subsidence (voir figure 3.17). D'autres zones représentées par des petites taches blanches en haut et à gauche sur l'image laissent voir des erreurs de déroulement locales. Sur la figure 3.24b, la carte d'écart issue du déroulement au cours de la première itération est présentée. L'erreur principale présente sur l'image précédente a disparu et seules de petites zones d'erreurs locales restent. Sur la figure 3.24c, issue du déroulement au cours de la deuxième itération, la plupart des erreurs de déroulement ont disparu. Seules des erreurs sur la périphérie restent importantes, dues en partie au manque d'information sur le

champ lointain et au manque de continuité entre les zones cohérentes. Finalement, l'étape de nettoyage masque les pixels sur lesquels nous n'avons pas assez de confiance et permet encore de supprimer quelques erreurs de déroulement (Figure 3.24d).

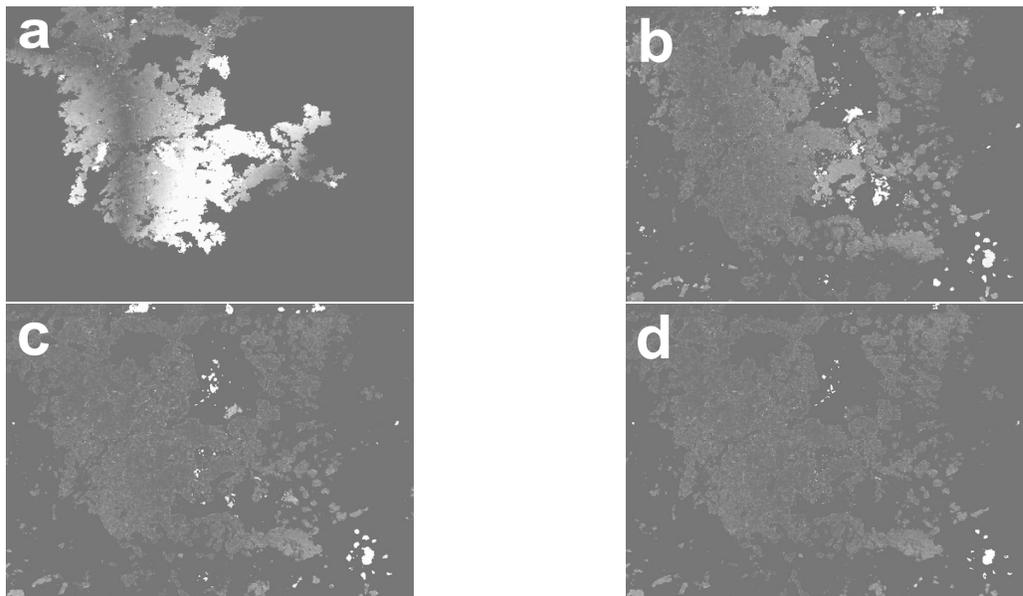


FIG. 3.24 – Évolution au cours du traitement des cartes d'écart à la fermeture pour l'interférogramme 2004.04.30-2005.02.04. a) Interférogramme déroulé par ROI\_PAC,  $n=1$ . b) Interférogramme déroulé avec SNAPHU, première itération,  $n=2$ . c) Interférogramme déroulé avec SNAPHU, deuxième itération,  $n=3$ . d) Interférogramme nettoyé,  $n=4$ . L'échelle du noir (0 LOS cm) au blanc (2.25 LOS cm) est la même pour les quatre figures.

### 3.9.6.3 Amélioration de la fermeture par interférogramme après la première itération

Nous nous sommes demandés comment améliorer le déroulement après application de la première aide au déroulement. En effet, en regardant les valeurs de  $\phi_{RMS_{ifg}}^{ij}$  pour le jeu d'interférogrammes issu de la première itération d'aide au déroulement,  $n=2$  (Figure 3.25, courbe rouge), on voit qu'il reste quelques fortes inconsistances dans le jeu d'interférogrammes. Nous avons inspecté l'un des interférogrammes qui restait avec un  $\phi_{RMS_{ifg}}^{ij}$  élevé (interférogramme : 2004.01.16- 2004.11.26, (9 x 35 jours) Figure 3.25), même après avoir été aidé. Nous avons changé à la main la valeur estimée de  $\alpha_1$  en la remplaçant par  $k$ ,  $k$  étant le nombre de cycles de 35 jours,  $k = 9$ , et nous avons réitéré l'aide au déroulement pour cet interférogramme. Puis, nous avons estimé à nouveau les valeurs de  $\phi_{RMS_{ifg}}^{ij}$  (Figure 3.25, courbe noire). La valeur de l'interférogramme en question a diminué. Ainsi, le déroulement des franges résiduelles obtenues après la première estimation de  $\alpha_1$  ( $\sim 10$ ) n'était pas correct, mais le devient en employant  $\alpha_1 = 9$ . Puisque le système d'interférogrammes est redondant, l'amélioration de cet interférogramme a un effet sur l'écart à la fermeture d'autres interférogrammes. Ainsi les valeurs de  $\phi_{RMS_{ifg}}^{ij}$  pour les interférogrammes 2004.01.16-2004.04.30 et 2004.04.30 -2004.12.31 ont aussi diminuée. Le même exercice a été appliqué sur l'interférogramme 2004.09.17-2005.04.15 qui a influencé la valeur de  $\phi_{RMS_{ifg}}$  de l'interférogramme 2005.03.11-2005.04.15. Nous avons fait tourner

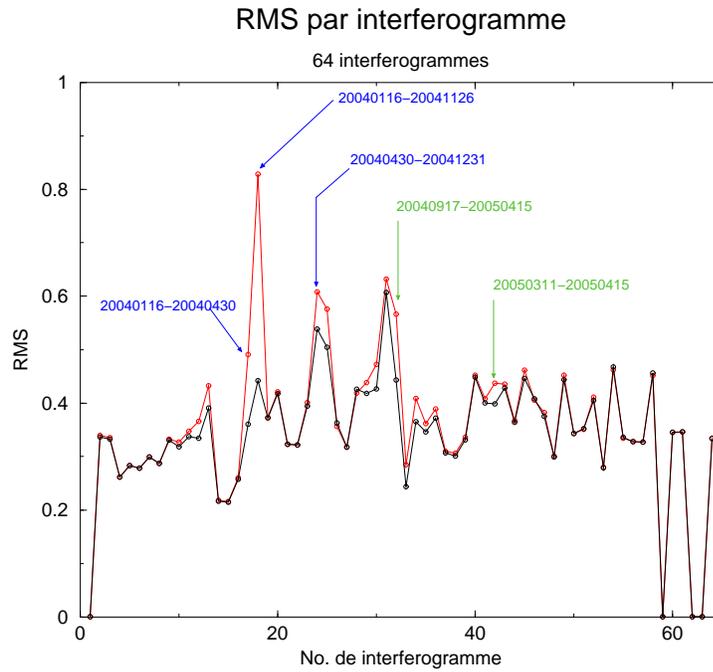


FIG. 3.25 – Graphique montrant l'écart RMS à la fermeture par interférogramme,  $\phi_{RMS_{ifg}}^{ij}$ , pour un groupe de 64 interférogrammes déroulés avec SNAPHU ( $n=2$ ) en utilisant l'aide au déroulement présentée sur la section 3.9.2. En rouge, les valeurs de  $\phi_{RMS_{ifg}}^{ij}$  (rad) originales. En noir, les valeurs de  $\phi_{RMS_{ifg}}^{ij}$  (rad) après correction sur 2 interférogrammes, 20040116-20041126 et 20040917-20050415. La correction des erreurs sur un des interférogrammes a un effet sur les autres du fait de la redondance du système.

l'aide au déroulement uniquement pour cet interférogramme, en remplaçant la valeur de  $\alpha_1$  par sa deuxième estimation,  $\alpha_2$ . La valeur de  $\phi_{RMS_{ifg}}^{ij}$  pour l'interférogramme diminue alors grâce à l'amélioration de l'estimation de  $\alpha$  faite au cours de la première itération (entre  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ ) et grâce au fait d'avoir inclut l'estimation du paramètre  $\beta_2$ .

### 3.9.6.4 Fermeture globale du réseau d'interférogramme

Nous avons aussi inspecté l'évolution de la carte globale de RMS par pixel,  $\phi_{RMS_{pixel}}$ , au cours des différentes étapes du traitement (Figure 3.26). La figure 3.26a montre l'évolution des inconsistances dans la base de données interférométriques,  $\phi_{RMS_{ifg}}$ , pour les groupes d'interférogrammes 1 à 3 et après l'étape de nettoyage. En général, une forte décroissance des valeurs de RMS est visible en passant du premier groupe d'interférogrammes déroulés avec ROI\_PAC au deuxième groupe. Cela veut dire que de nombreuses erreurs de déroulement ont été supprimées en utilisant la méthode d'aide au déroulement par le stack. Les améliorations se poursuivent en passant du deuxième au troisième groupe et même après l'étape de nettoyage. La figure 3.26b présente la carte des problèmes de fermeture par pixel,  $\phi_{RMS_{pixel}}$ , correspondante au deuxième groupe d'interférogrammes. Les zones claires présentant le plus d'erreurs, soulignent les zones végétalisées ou récemment urbanisées, où le bruit dû à la décorrélation temporelle entrave un déroulement sans erreurs. L'extension de ces zones est fortement diminuée sur le troisième groupe d'interférogrammes (Figure 3.26c). L'étape de nettoyage permet de supprimer la plupart des inconsistances rémanentes dans

la base de données interférométriques (Figure 3.26d).

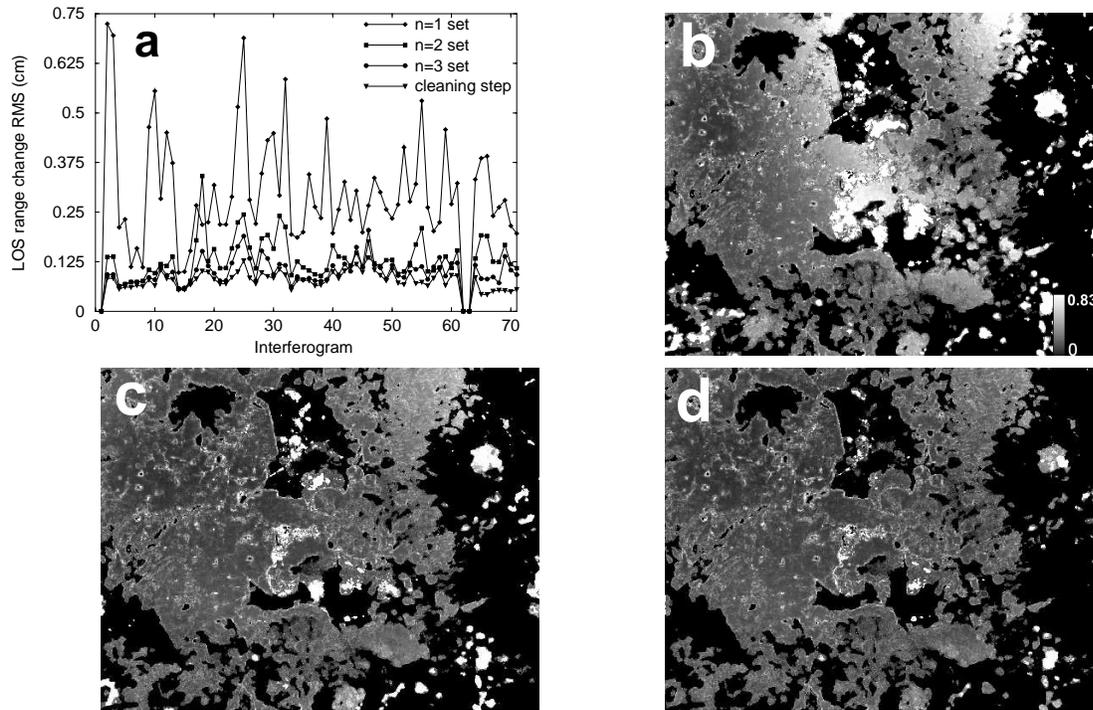


FIG. 3.26 – a) Évolution de la fermeture dans la base de données interférométriques,  $\phi_{RMS_{ifg}}$ , pour les groupes 1 à 3 et après nettoyage. Les valeurs de RMS sont en général largement diminuées par rapport à l'étape de déroulement faite par ROI\_PAC (n=1). Cela exprime une grande amélioration de la qualité du déroulement des interférogrammes. Les améliorations se poursuivent sur les groupes 2 et 3 et jusqu'à l'étape de nettoyage. b) Carte de fermeture du système,  $\phi_{RMS_{pixel}}$ , pour le groupe d'interférogrammes n=2. c)  $\phi_{RMS_{pixel}}$  pour le groupe n=3. d)  $\phi_{RMS_{pixel}}$  après nettoyage. L'échelle en LOS cm est présentée dans le coin SE de la carte (b)

### 3.9.6.5 Bilan de l'aide au déroulement

La méthode d'aide au déroulement présentée plus haut se base sur la similarité de la forme  $F(x, y)$  de la déformation au cours du temps (i.e.  $D(x, y, t) = F(x, y)T(t) + F'(x, y, t)$  avec  $F'(x, y, t)$  assez petit devant  $F(x, y)T(t)$ ). Elle ne fait pas appel à une fonction du temps particulière  $T(t)$ , et le déroulement est basé sur la continuité spatiale de la phase. En effet  $T(t)$  peut être une fonction quelconque. Imaginons le cas où  $T(t)$  est monotoniquement croissante, linéaire ou non linéaire (Figure 3.27a). De façon générale, la déformation au cours de temps  $D(x, y, t)$  peut représenté par

$$D(x, y, t) = F(x, y)[T(t_j) - T(t_i)] + F'(x, y, t) \quad (3.16)$$

où  $T(t_j) - T(t_i) = \alpha_{ij}$  et  $\alpha_{ij} > 0$ . La forme principale de la déformation  $F(x, y)$  peut être représenté par

$$F(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \phi_{ij} / \alpha_{ij} \quad (3.17)$$

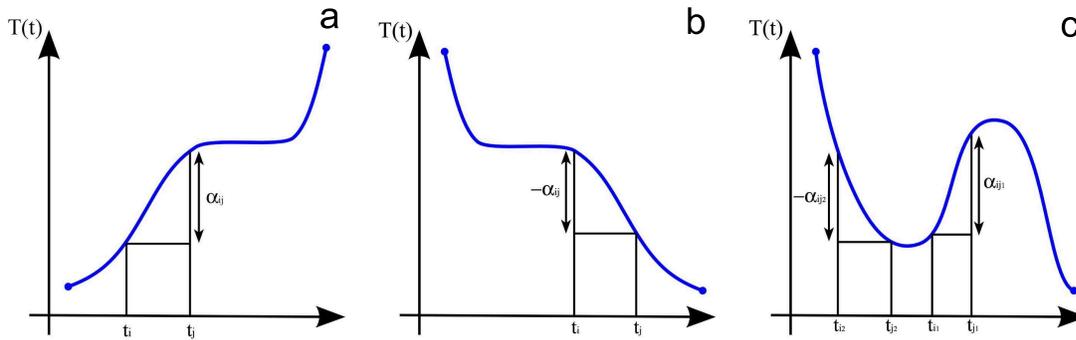


FIG. 3.27 – La méthode d'aide au déroulement peut être appliquée aux cas où la forme de la déformation  $F(x, y)$  est similaire au cours du temps et pour lesquels  $T(t)$  peut être quelconque.

Pour le cas particulière où  $T(t)$  est linéaire  $\alpha_{ij} = T(t_j) - T(t_i) = t_j - t_i$ . De même, dans le cas où  $T(t)$  est monotiquement croissante (linéaire ou non linéaire) (Figure 3.27b),  $D(x, y, t)$  et  $F(x, y)$  restent représentées par les équations 3.16 et 3.17 sauf que  $\alpha_{ij} < 0$ . Dans le cas d'une  $T(t)$  quadratique où bien à comportement sinusoidal (Figure 3.27c), il faudra veiller à construire  $F(x, y)$  avec soin, prenant en compte la variabilité de  $T(t)$ . En effet, les valeurs  $\alpha_{ijk}$  peuvent être négatives où positives (e.g.  $\alpha_{ij1} = T(t_{j1}) - T(t_{i1}) > 0$ ,  $\alpha_{ij2} = T(t_{j2}) - T(t_{i2}) < 0$ ). Le stack ou forme principale de la déformation  $F(x, y)$  pourra continuer à être représenté par l'équation 3.17 où  $\alpha_{ij} = \alpha_{ijk}$  si  $T(t)$  est monotiquement croissante entre  $t_i$  et  $t_j$  et  $\alpha_{ij} = -\alpha_{ijk}$  si  $T(t)$  est monotiquement décroissante entre  $t_i$  et  $t_j$ .

Puisque la fonction  $T(t)$  n'est pas connue en général, une analyse de la totalité des interférogrammes devra être faite en amont pour avoir une idée de sa nature et comportement avant d'appliquer la méthode d'aide au déroulement. Toutefois, il faut dire que dans le cas d'une déformation au cours du temps,  $D(x, y, t)$ , dominée par plus d'un type de déformation (i.e.  $D(x, y, t) = G_1(x, y)T_1(t) + G_2(x, y)T_2(t) + G'(x, y, t)$ ), notre approche n'est plus valable. En effet supposons que  $T_1(t)$  est une fonction monotiquement croissante (ou décroissante) et  $T_2(t)$  une fonction sinusoidale avec des amplitudes ( $G_1(x, y)$  et  $G_2(x, y)$ ) similaires. L'effet des apports de chaque contribution serait mélangé de façon à empêcher la correcte construction de  $G_1(x, y)$  et  $G_2(x, y)$ .

Par opposition, la méthode PS "classique" développée par Ferretti et al. [2001] base le déroulement sur une évolution temporelle principalement linéaire de la déformation (i.e.  $D(x, y, t) = G(x, y)t + G'(x, y, t)$ ), la partie non linéaire  $G'(x, y, t)$  étant récupérée après le déroulement par analyse des résidus. Le déroulement est temporel et en fonction de  $B_{\perp}$  et contraint la phase d'origine atmosphérique, orbitale et déformation non linéaire à rester entre  $-\pi$  et  $+\pi$ , sous peine de commettre des erreurs de déroulement. Des itérations avec déroulement spatial des résidus permettent de lever partiellement cette dernière hypothèse contraignante. Le déroulement étant basé sur la continuité en  $B_t$  et  $B_{\perp}$  de la phase, la méthode PS "classique" permet par contre de reconstituer des déformations ponctuelles.

Remarquez que dans le cas de Mexico, la subsidence atteint 350 rad en 4.2 ans avec 38 images, i.e. on obtient en moyenne 7.5 rad entre 2 images successives. On voit ici que cela va conduire à un fort aliasing temporel, d'autant plus qu'il sera augmenté par le bruit sur la phase et la prise en compte de l'erreur de MNT fonction de  $B_{\perp}$ . Les forts taux de

subsidence sur Mexico ne sont donc pas favorables au déroulement temporel de la phase.

## 3.10 Méthode pour construire les séries temporelles de la subsidence

### 3.10.1 Principe de l'inversion "contrainte"

Une première version des séries temporelles de la déformation a été obtenue à partir de l'inversion décrite dans la section 3.7 en utilisant l'équation (3.4). Elle montre une subsidence presque parfaitement linéaire au cours de la période étudiée. Toutefois, pour les pixels pour lesquels le système n'est pas déterminé, i.e. pour lesquels  $\mathbf{G}_l^T \mathbf{G}_l$  est singulière à cause d'au moins un lien critique manquant, le réseau d'interférogrammes est séparé en deux ou plus groupes d'images indépendants et la décomposition SVD est utilisée à la place de l'algorithme de moindres carrés pour obtenir les séries temporelles de la déformation [Berardino et al. [2002]]. Dans cette étude, dû à la configuration particulière du graphe de la figure 3.7, il existe pour certains pixels des groupes d'images indépendants qui ne présentent pas de chevauchements géométriques ( $B_\perp$ ) ou temporels ( $B_t$ ). Le délai de phase incrémentale entre deux images successives appartenant à deux groupes d'images distincts en temps est alors mis à zéro par la décomposition SVD. Cela biaise le comportement temporel de la déformation et en conséquence les taux estimés de subsidence. Ce biais est expliqué plus en détail sur un exemple section 3.10.2. Pour surmonter ce problème, au lieu d'employer la décomposition SVD, nous ajoutons des contraintes à l'inversion par moindres carrés.

Définissons d'abord la phase cumulée en temps pour l'instant  $t_k$  et le pixel  $l$ ,  $\phi_k^l$ ,

$$\begin{aligned} \phi_k^l &= \sum_{i=1}^{k-1} m_i^l & \text{si } M_l \geq k \geq 2 \\ \phi_1^l &= 0 & \text{si } k = 1 \end{aligned}$$

où  $m_i^l$  représente les incréments du délai de phase entre deux images successives pour le pixel  $l$ . L'inspection des séries temporelles obtenues précédemment montre qu'il est raisonnable de modéliser  $\phi_k^l$  à partir d'une fonction quadratique en temps. La contrainte additionnelle incluse dans l'inversion devient alors,

$$\phi_k^l = a_t^l(t_k - t_1) + b_t^l(t_k - t_1)^2 + e^l B_\perp^k + c_t^l \quad (3.18)$$

où  $e B_\perp^k$  représente la phase due à l'erreur du MNT corrélée avec la ligne de base perpendiculaire,  $B_\perp^k$ .

Nous avons donc utilisé les moindres carrés pour inverser le système  $\mathbf{d}^c = \mathbf{G}^c \mathbf{m}^c$ , présenté sur la figure 3.28. Le poids  $\gamma$ , qui pondère les lignes additionnelles ajoutées à  $\mathbf{G}$ , est suffisamment petit pour que : a) si  $\mathbf{G}_l^T \mathbf{G}_l$  est inversible, les incréments  $m_k^l$  ne sont pas affectés par la contrainte additionnelle (3.18), b) si ce n'est pas le cas, la contrainte additionnelle fixe les délais relatifs entre groupes d'images indépendants. Dans tous les cas,  $a_t$ ,  $b_t$  et  $e$  sont les coefficients qui correspondent le mieux aux délais cumulés de la phase, eux mêmes contraints par la base de données interférométriques.

Les différences entre cette inversion "contrainte" et l'inversion "SVD" peuvent être vues en calculant le taux de subsidence moyen ou vitesse d'affaissement à partir d'un fit linéaire de  $(\phi_k^l - e^l B_\perp^k)$  (Figure 3.29). On voit un bruit sur la carte de vitesse obtenue avec l'inversion SVD, à courte échelle spatiale, qui est présent principalement sur les pixels avec liens manquants. Une partie de ce bruit disparaît après application de l'inversion "contrainte". Pour les pixels sans liens manquants, les deux taux de subsidence sont identiques.

$$\begin{bmatrix} d_1^i \\ \vdots \\ d_k^i \\ \vdots \\ d_{N_i}^i \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \gamma \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} & & & \\ & & & \\ & & G_i & \\ & & & \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 1 & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & \ddots & 0 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -B_{\perp}^1 & -1 \\ -(t_2 - t_1) & -(t_2 - t_1)^2 & -B_{\perp}^2 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -(t_{M_i} - t_1) & -(t_{M_i} - t_1)^2 & -B_{\perp}^{M_i} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1^i \\ \vdots \\ m_{M_i}^i \\ a_i^i \\ b_i^i \\ e^i \\ c_i^i \end{bmatrix}$$

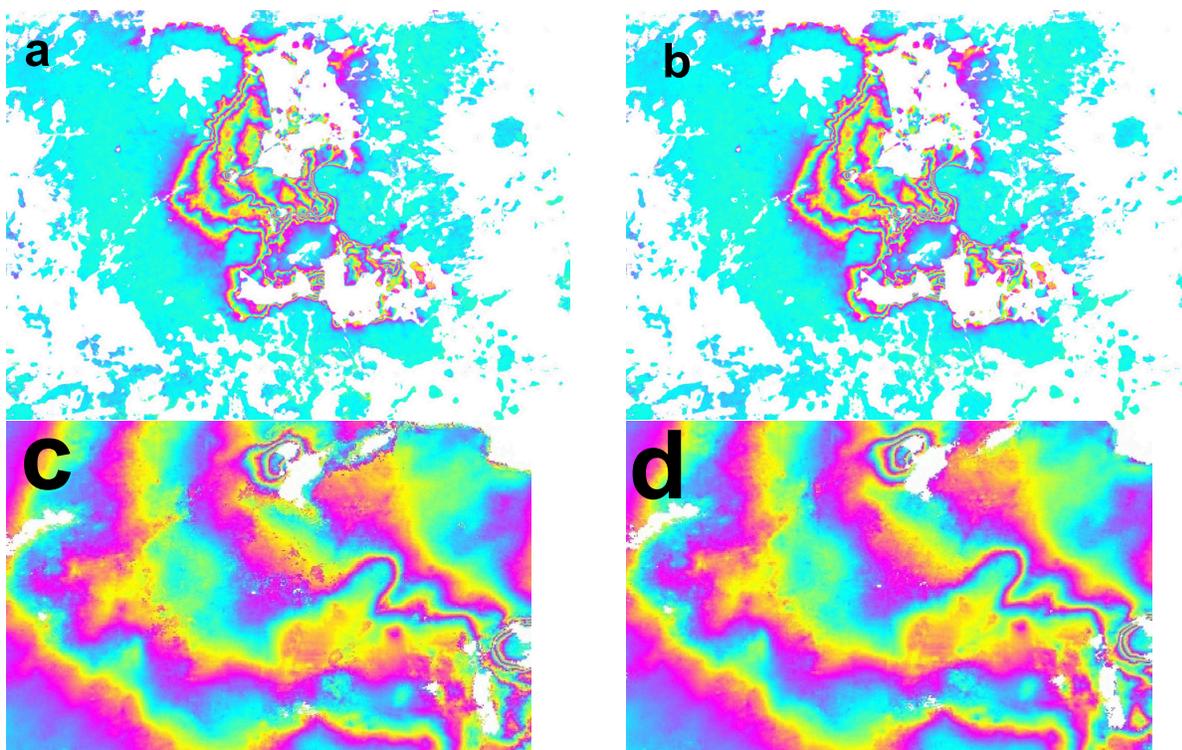
FIG. 3.28 – Système  $\mathbf{d}^c = \mathbf{G}^c \mathbf{m}^c$ 

FIG. 3.29 – a) Carte de subsidence moyenne obtenue après inversion SVD du réseau d'interférogrammes. b) Carte de subsidence moyenne obtenue après inversion "contrainte" (voir section 3.10.1). d) zoom sur (a), e) zoom sur (b). Echelle : 6.76 LOS cm / frange.

### 3.10.2 Liens manquants

La configuration du réseau d'interférogrammes de la figure 3.7 présente des groupes d'images liées par des "liens faibles", i.e. avec des liens interférométriques présentant des lignes de base temporelle et perpendiculaire importantes (nuisant à la cohérence) et peu redondants (i.e., peu dupliqués). Quand, à cause du problème de décorrélation sur les interférogrammes, un interférogramme devient le seul à lier deux groupes d'images, l'interférogramme est considéré comme un lien critique. Il se trouve, dans le cas de la configuration

de la figure 3.7, que les liens faibles ou critiques séparent souvent des groupes d'images ne présentant pas de chevauchement en temps ou selon  $B_{\perp}$ . Les délais de phase, définis relativement les uns aux autres à l'intérieur de chaque groupe indépendant, ne peuvent pas alors être raboutés d'un groupe à l'autre. Cela crée un effet marche sur la série temporelle qui biaise nos estimations du taux moyen de subsidence. Pour éviter ce problème, la contrainte qui modélise le comportement de la série temporelle (voir équation 3.18) va déterminer le délai entre les groupes d'images successifs en  $B_t$  ou  $B_{\perp}$ .

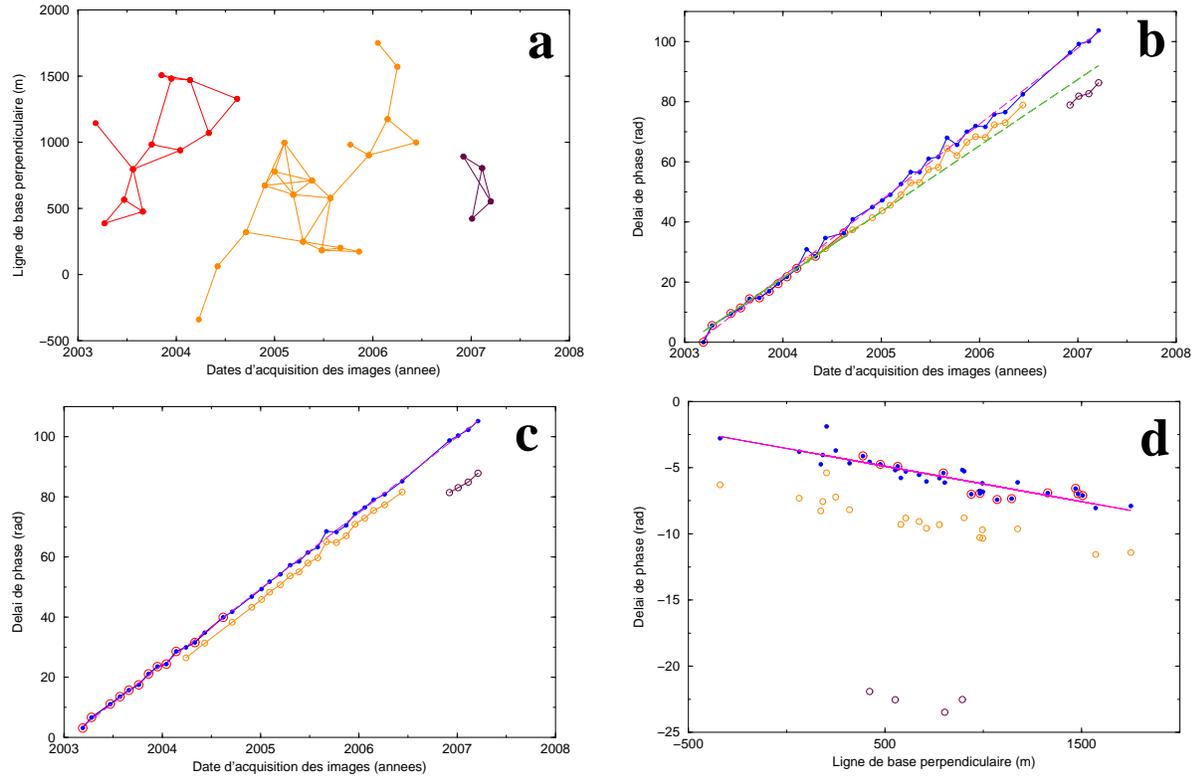


FIG. 3.30 – a) Exemple de distribution des images et interférogrammes pour un pixel donné en fonction du temps et de la ligne de base perpendiculaire, b) Séries temporelles montrant la phase interférométrique cumulée pour le même pixel. Le résultat de l'inversion SVD, est représenté par trois couleurs selon les groupes d'images indépendants (rouge, orange et bleu). La courbe bleue montre le résultat de l'inversion contrainte. Les lignes tiretées verte et rose donnent les taux de subsidence moyen issu de la régression linéaire de la phase cumulée obtenue par inversion SVD et inversion contrainte, respectivement. c) Phase cumulée corrigée de l'erreur de MNT ( $\phi_k^l - e^l B_{\perp}^k$ ) en fonction du temps. Pour les symboles voir panneau (b). d) Phase cumulée corrigée de l'évolution temporelle ( $\phi_k^l - a_t^l(t_k - t_1) - b_t^l(t_k - t_1)^2$ ) en fonction de  $B_{\perp}^k$ . Pour les symboles voir panneau (b). Les délais de phase obtenus par SVD présentent trois tendances identiques et parallèles pour chaque groupe, identique à la tendance obtenue par inversion contrainte (ajustement en rose sur points bleus).

Sur la figure 3.30a, je donne pour exemple la configuration du graphe de la figure 3.7 pour un pixel donné. Sur le graphe, deux liens critiques sont absents (i.e. le rang de  $\mathbf{G}_l^T \mathbf{G}_l$  est égal à  $n - 2$ , où  $n$  est le nombre d'inconnues) formant trois groupes d'images indépendants. Au total 35 images sur un total de 38 et 53 interférogrammes sur un total de 71 ont

été utilisés au moment de l'inversion. On voit que les groupes d'images orange et rouge se chevauchent en temps et en  $B_{\perp}$ , et que les groupes orange et marron ne se chevauchent pas en temps. Sur la figure 3.30b, il est possible de voir les séries temporelles de la phase cumulée obtenues par inversion SVD et par inversion contrainte. La première, représentée par trois groupes d'images indépendants (cercles rouge, orange et marron), est issue de l'inversion avec SVD. La deuxième, représentée par un seul type de symbole (points bleus), est issue de l'inversion avec contraintes.

Du fait des liens manquants entre les groupes d'images, la première série temporelle est bruitée. Apparemment, le rabouillage entre les deux premiers groupes indépendants (rouge et orange) est fait grâce au chevauchement temporel de quelques images sur les deux groupes. Par contre, le lien entre les groupes indépendants orange et marron n'est pas correct avec la mise à zéro du délai de phase incrémental entre les deux groupes d'images successifs. En conséquence, la ligne pointillée verte, issue de la régression sur toutes les images, représente mal le taux réel de subsidence.

Sur la deuxième série temporelle, ces délais de phase incrémentaux sont remplacés par la modélisation de la phase,  $\phi_k^l = a_t^l(t_k - t_1) + b_t^l(t_k - t_1)^2 + e^l B_{\perp}^k + c_t^l$ . Les valeurs de phase pour ce premier groupe d'images correspondent très bien à celles obtenues par l'inversion SVD (point bleus et cercles rouges sur figure 3.30b, c et d). Au niveau du premier changement de groupes d'images (transition rouge-orange), le délai entre les deux groupes est calculé à partir de la modélisation de la phase. Un effet de tiraillement semble exister sur la figure 3.30b où la nouvelle solution (points bleus) est parallèle à la solution SVD du deuxième groupe (orange). Ces tiraillements seront identifiés par la suite comme liés aux erreurs de MNT. Au niveau du deuxième changement de groupes d'images indépendants (transition orange-marron), l'effet de marche a disparu et les quatre dernières images sont liées avec succès aux premières grâce à l'utilisation de la phase modélisée. La ligne pointillée magenta représente la régression sur les images et présente un taux de subsidence plus fort que celui obtenu après l'inversion SVD.

Sur la figure 3.30c, la contribution de la phase liée à la ligne de base perpendiculaire a été enlevée,  $\phi = \phi_k^l - e^l B_{\perp}^k$ , i.e. l'erreur du MNT a été corrigée, sur les deux séries temporelles de phase cumulée. La série temporelle, obtenue par "inversion contrainte" est plus consistante et moins bruitée que la série temporelle issue de l'inversion SVD. Dans ce dernier cas, les problèmes de rabouillage sont plus évidents même entre les deux premiers groupes d'images rouge et orange qui se chevauchent temporellement.

Sur la figure 3.30d, l'estimation des paramètres  $a_t$  et  $b_t$  obtenues par l'inversion "contrainte", permet d'enlever les contributions linéaires et quadratiques en temps sur la phase interférométrique des deux séries temporelles. On peut alors représenter le délai de phase en fonction de  $B_{\perp}$ . Sur ce graphe, la phase issue de l'inversion "contrainte" (points bleus) est beaucoup moins bruitée en fonction de  $B_{\perp}$  que celle issue de l'inversion SVD. La pente de la régression (courbe couleur magenta),  $e$ , est bien définie. Les phases obtenues par inversion SVD, pour chaque groupe indépendant d'images (rouge, orange, marron), permettent de voir la même tendance en fonction de la ligne de base perpendiculaire, mais décalée entre chaque groupe.

En conclusion, l'inversion SVD crée des décalages assez systématiques de la phase analysée en fonction de  $B_t$  ou  $B_{\perp}$ , si les groupes d'images ne se chevauchent pas en  $B_t$  ou  $B_{\perp}$ , ou si la partie chevauchante en temps de deux groupes d'images ne présente pas de recouvrement en  $B_{\perp}$ . L'inversion "contrainte" permet de résoudre ce problème.

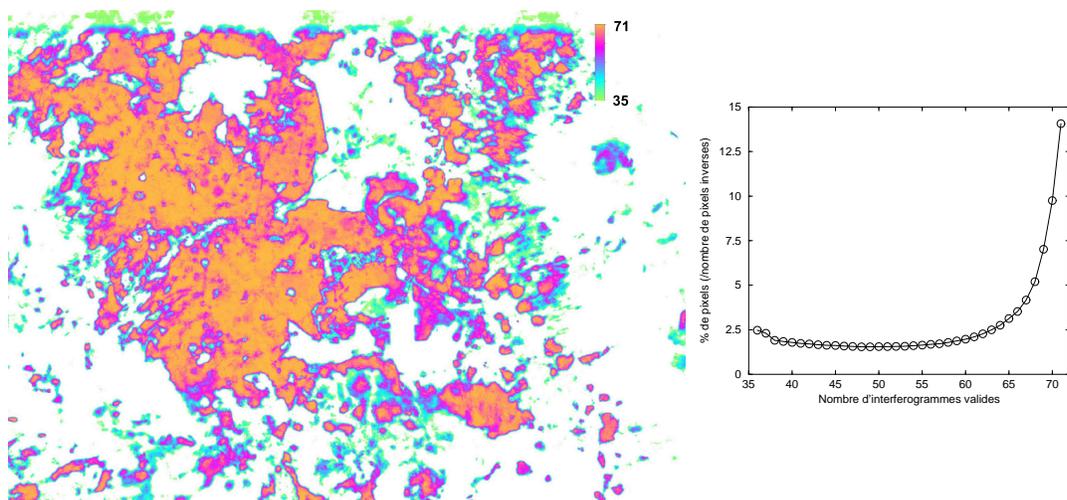


FIG. 3.31 – a) Carte avec le nombre d'interférogrammes utilisés pour chacun des pixels inversés. b) Histogramme du nombre d'interférogrammes utilisés.

### 3.10.3 Statistiques de l'inversion

L'inversion a été appliquée sur tous les pixels pour lesquels il existe au moins 35 interférogrammes valides (i.e. déroulés sur le pixel), soit la moitié du nombre total d'interférogrammes. Cela concerne  $6 \times 10^6$  pixels avec une résolution de  $20 \times 20$  m, soit 49.4 % des pixels de la zone étudiée.

La figure 3.31a montre en carte le nombre d'interférogrammes utilisés pour chaque pixel au moment de l'inversion. Seuls 15 % des pixels inversés ont tous les 71 interférogrammes valides (Figure 3.31b). Toutefois, 50 % des pixels inversés ont plus de 63 interférogrammes valides. Cela nous permet garder une forte redondance pour la moitié des pixels inversés.

La figure 3.32a présente une carte avec le nombre d'images utilisées sur chaque pixel. 52 % des pixels inversés utilisent la totalité des 38 images (Fig. 3.32b).

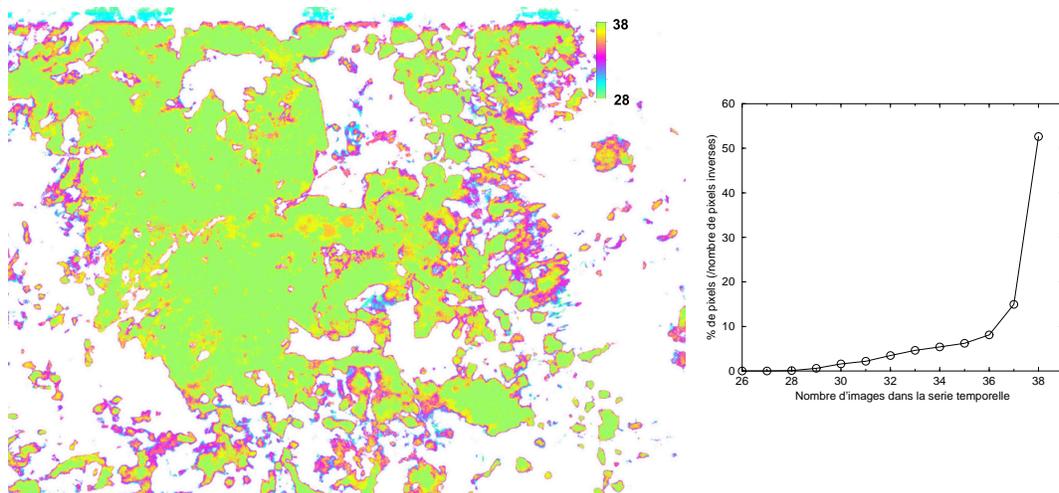


FIG. 3.32 – a) Carte avec le nombre d'images utilisées pour chacun des pixels inversés, b) Histogramme du nombre d'images utilisées.

La figure 3.33a présente la carte des liens manquants par pixel.  $3.5 \times 10^6$  pixels, avec

une résolution 20 x 20 m, n'ont aucun lien manquant (voir Figure 3.33b). Cela nous permet d'assurer la qualité des séries temporelles due à la continuité des mesures de phase sur 58 % des pixels inversés. 84 % des pixels ont au plus 2 liens manquants.

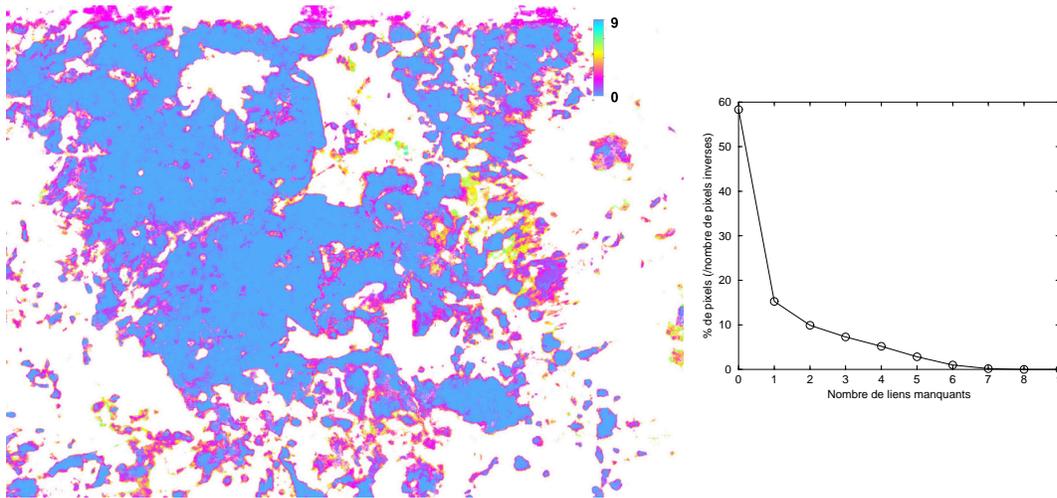


FIG. 3.33 – a) Carte avec le nombre des liens manquants pour chacun des pixels inversés. b) Histogramme du nombre de liens manquants.

La figure 3.34a montre la carte finale de RMS par pixel de l'inversion. Quelques petites zones colorées de façon homogène, au nord sur la région du lac de Texcoco, au sud sur la région du Chalco et à l'est sur les montagnes, soulignent de possibles erreurs de déroulement. Pour ces zones, la valeur de RMS est comprise entre 0.4 et 0.7 radians. La plupart des pixels montrent une couleur bleue, représentant des valeurs de RMS comprises entre 0.1 et 0.2 radians. Ces valeurs montent dès que nous nous déplaçons vers les zones non inversées (zones violettes, 0.2-0.3 rad). Sur la figure 3.34b, une statistique sur la carte de RMS nous permet de retrouver un pic à 0.17 rad, représentatif du bruit sur phase de la plupart des pixels inversés. Les valeurs de RMS plus grandes que 0.35 rad sont considérées comme représentatives des pixels avec de possibles erreurs de déroulement. Toutefois ils représentent moins de 5 % des pixels inversés.

Ces quatre cartes présentent les hétérogénéités possibles sur la qualité des séries temporelles de la phase inversée. Par exemple, les pixels avec un RMS > 0.35 rad ne pourront pas être utilisés pour rechercher des comportements temporels non linéaires. De même, on préférera analyser d'abord les séries temporelles de phase sans liens manquants, et avec le plus possible d'images et d'interférogrammes utilisés.

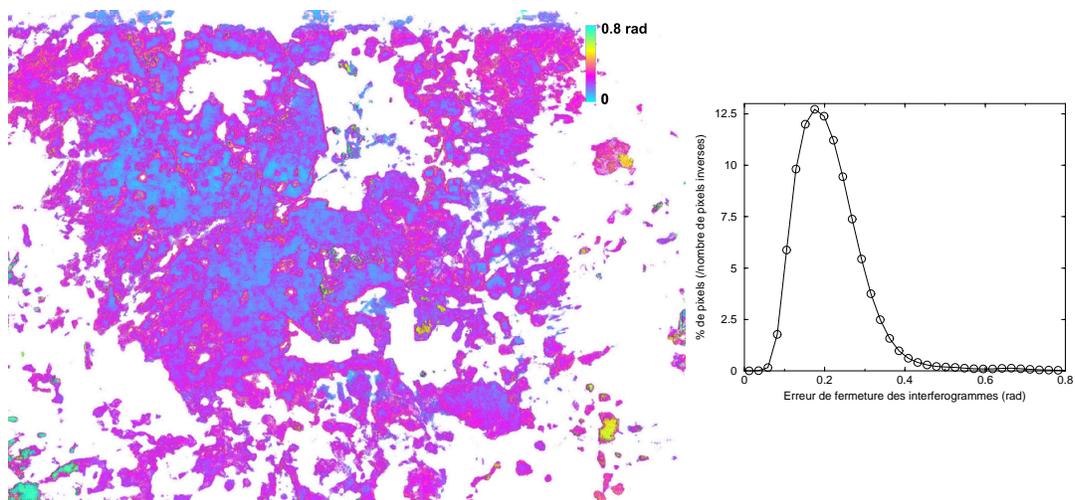


FIG. 3.34 – a) Carte de RMS par pixel. b) Statistique sur (a). Le bruit représentatif de la plupart des pixels inversés.

## Chapitre 4

# Analyse des séries temporelles de subsidence.

### 4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la méthodologie utilisée pour obtenir les séries temporelles de l'affaissement sur la ville de Mexico. Sur certains pixels avec des liens manquants, donc  $\mathbf{G}_l^T \mathbf{G}_l$  singulière, une inversion contrainte a été utilisée au lieu d'une inversion SVD. Pour le reste des pixels (58 %), nous n'avons pas utilisé de contraintes. C'est donc sur ces pixels que nous allons nous baser pour analyser le comportement de la déformation.

### 4.2 Comportement linéaire de la déformation dans le temps

#### 4.2.1 Séries temporelles de la subsidence

Nous présentons sur la figure 4.1a quelques séries temporelles correspondants aux pixels situés sur la carte de vitesse moyenne présentée sur la figure 4.1c. Sur les séries temporelles 1, 2, 3 et 6, il est possible d'apprécier les forts taux de subsidence sur la ville et ses variations d'une zone à autre. Nous pouvons noter également l'extrême linéarité de la subsidence dans le temps et la très faible dispersion des mesures autour de la tendance linéaire. Sur la figure 4.1b, les séries temporelles 4 et 5 sont montrées avec plus de détail. La série 5 correspond à un pixel situé dans la zone de référence (altitude > 2250mSNM). Il est possible de voir que cette référence n'a pas exactement un taux de subsidence nul mais plutôt un soulèvement de l'ordre de 0.25 cm/an. La série 4 correspond à un pixel sur une montagne, faisant partie du réseau montagneux de la Sierra Santa Catarina. Il se trouve à une altitude supérieure à 2250 mSNM et pourtant il montre une subsidence non négligeable de l'ordre de 0.25 cm/an.

La carte de subsidence de la figure 4.1c montre les taux annuels de subsidence moyenne sur chaque pixel de l'image. Ces taux correspondent à la valeur de  $\bar{v}$  issue de l'ajustement du modèle,

$$\phi_k = \bar{v}(t_k - t_1) + eB_{\perp}^k + c \quad (4.1)$$

sur les séries temporelles de chaque pixel, où  $\phi_k$  est le délai de phase inversé pour chaque image  $k$ ,  $t_k$  est le temps et  $B_{\perp}^k$  la ligne de base perpendiculaire de l'image  $k$ .

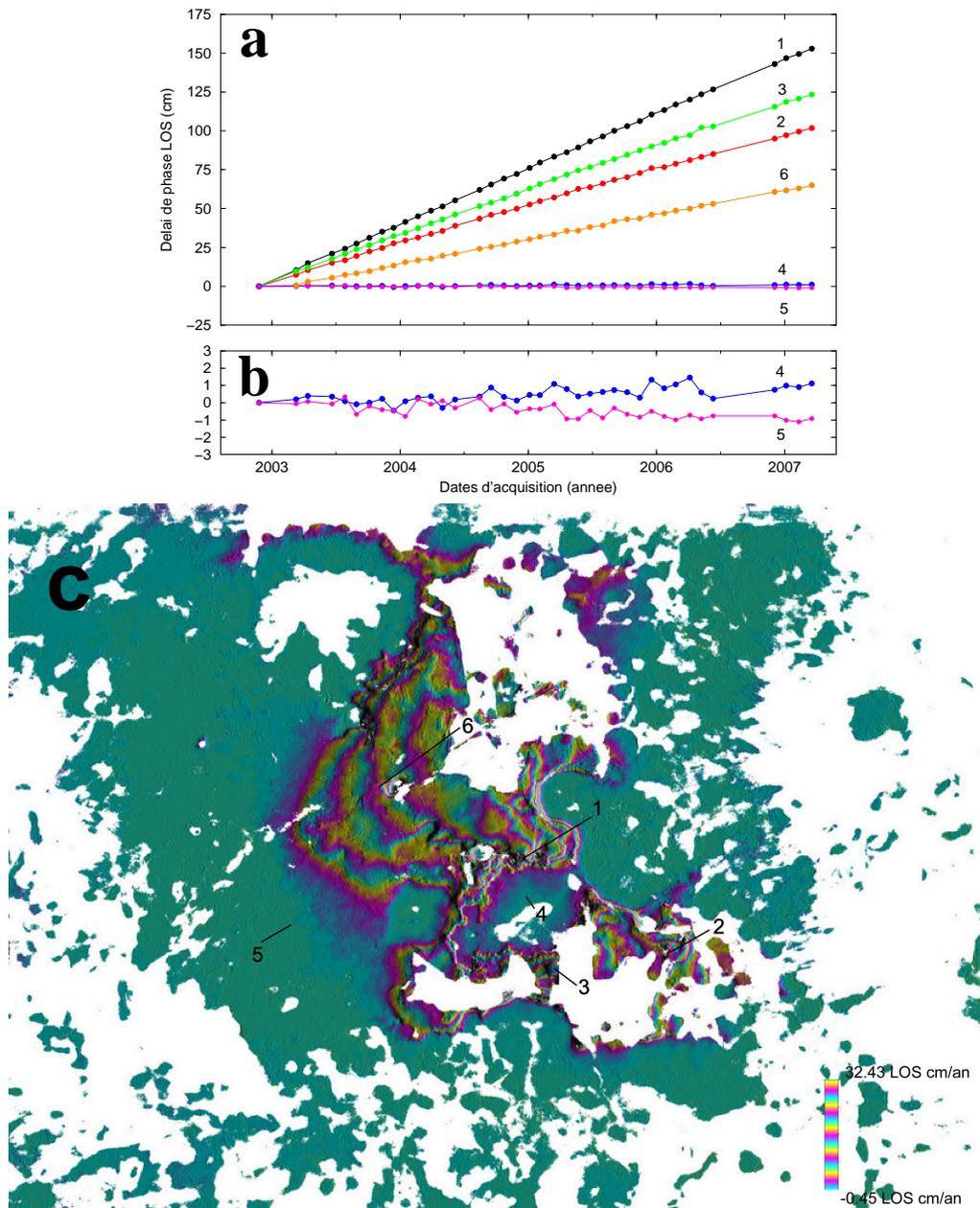


FIG. 4.1 – a) et b) Séries temporelles sur des pixels localisés sur la carte (c), c) Carte des valeurs de vitesse moyenne annuelle par pixel.

Le résultat principal de cette étude est que la déformation sur les séries temporelles est extraordinairement linéaire dans le temps entre la fin de 2002 et le début du 2007. Ceci est démontré par la carte du coefficient de corrélation entre la déformation et le temps, présentée dans la Figure 4.2. Dans les zones roses, le coefficient de corrélation est positif et atteint le plus souvent 0.9999. Cette zone rose marque bien l'extension de la zone subsidente, comprenant même des zones à faible taux de subsidence, qui seraient plutôt qualifiées de zones de transition entre la zone lacustre et le substrat volcanique. Même dans ces zones "intermédiaires", non couvertes par des argiles imperméables, la subsidence semble principalement linéaire dans le temps. Les zones jaunes représentent des

coefficients de corrélation négatifs proche de -0.7. Remarquons que la totalité de la surface correspondante à la montagne de la Sierra Sta. Catarina subside. Par ailleurs, une grande partie de la zone de référence, proche de la zone subsidente, apparaît en soulèvement relatif. Le champs lointain, bien que mal défini, semble avoir une vitesse moyenne nulle.

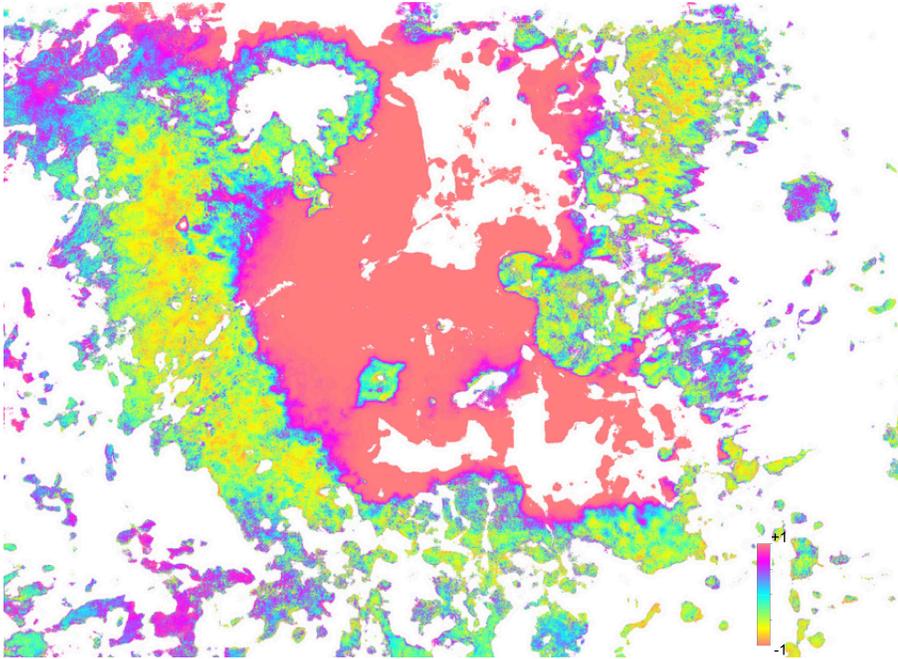


FIG. 4.2 – Carte du coefficient de corrélation entre la déformation et le temps.

## 4.2.2 Comparaison entre la vitesse moyenne et le stack d’interférogrammes

Puisqu’une bonne partie de la déformation peut être considérée comme étant linéaire dans le temps, nous pouvons nous poser la question de l’utilité de construire des séries temporelles quand on peut très simplement construire le stack des meilleurs interférogrammes.

### 4.2.2.1 Avantages

Tout d’abord, il faut dire que le niveau de bruit contenu dans la carte de déformation moyenne,  $\bar{v}$ , est beaucoup plus faible que celui du stack. Cela peut être constaté sur la Figure 4.3, où la déformation moyenne annuelle est présentée avec la même échelle de couleur à la fois sur le stack et sur la carte de vitesse moyenne,  $\bar{v}$ , obtenue à partir de la modélisation des séries temporelles par l’équation 4.1. Sur le stack (figure 4.3a) le bruit, principalement atmosphérique, ressort sur les zones montagneuses considérées de référencement. On voit qu’il est de l’ordre d’un cycle de couleur, c’est à dire d’environ 6 cm/an. Par contre, sur la carte de vitesse moyenne,  $\bar{v}$  (figure 4.3b), les zones de référencement sont bien homogènes et libres du bruit atmosphérique et cela, sans avoir eu besoin de filtrer, comme c’est le cas pour le stack d’interférogrammes. L’analyse en série temporelle permet donc de limiter très fortement l’impact des artefacts atmosphériques turbulents. De plus, les forts gradients de subsidence sont plus finement définis sur la carte de subsidence moyenne,  $\bar{v}$  que sur le stack, ici filtré pour réduire le bruit local de phase.

#### 4.2.2.2 Désavantages

Le seul désavantage de la carte de subsidence moyenne,  $\bar{v}$ , consiste en sa couverture spatiale, un peu faible, par rapport à celle du stack. Ceci est dû à la décorrélation des interférogrammes, sur les zones non urbanisées de la ville de Mexico.

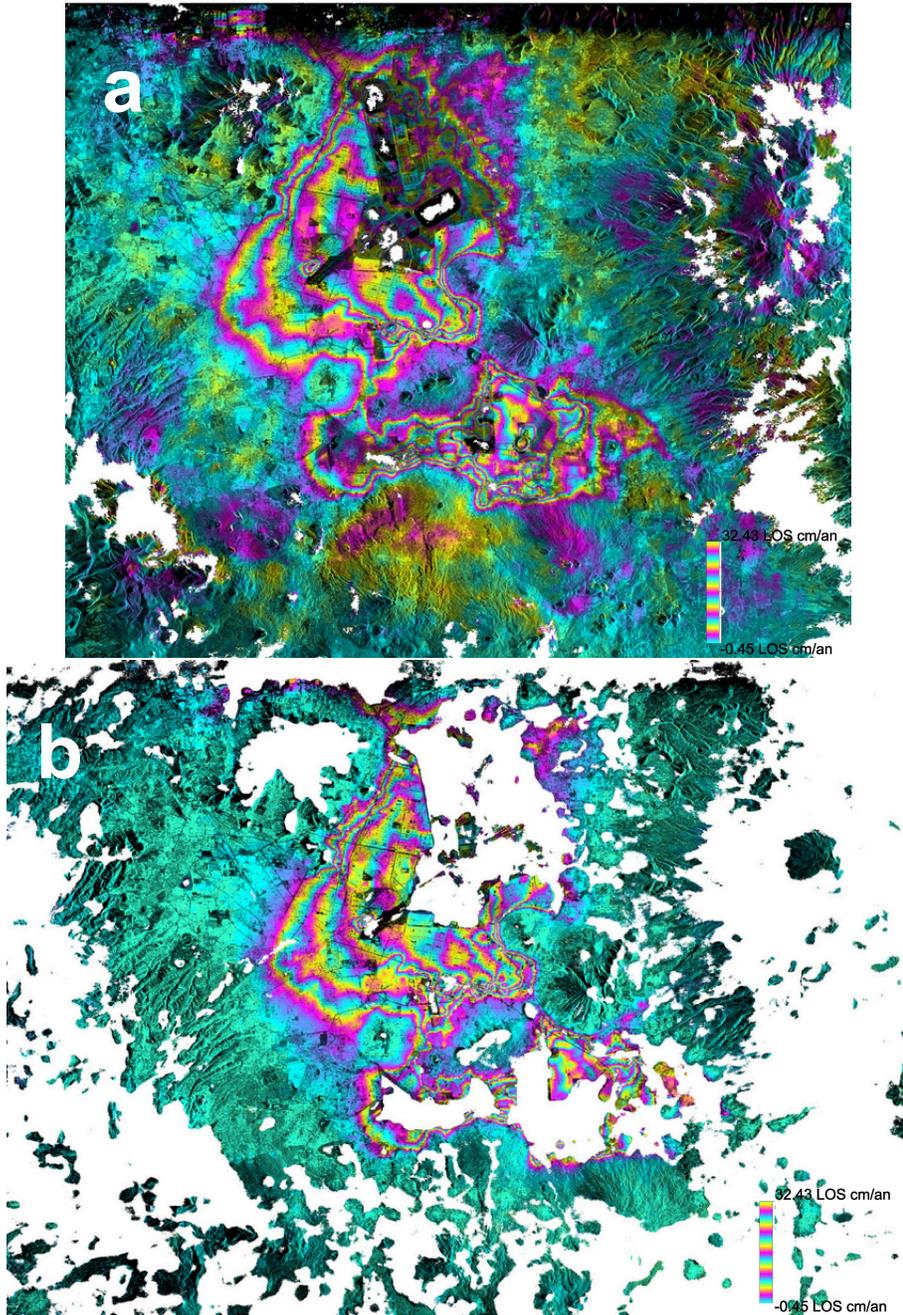


FIG. 4.3 – a) Stack filtré des 5 meilleurs interférogrammes, montrant la subsidence annuelle moyenne, b) Carte de subsidence moyenne annuelle,  $\bar{v}$ , calculée à partir de l'équation 4.1.

### 4.2.2.3 Comparaison quantitative : précision

La précision de la vitesse moyenne annuelle  $\bar{v}$ , donnée par son écart type,  $\sigma_{\bar{v}}$ , est de l'ordre de 0.2 mm/an pour les zones les mieux définies et de 0.4 mm/an dans les zones moins bien définies. Pour l'obtenir, nous avons calculé l'erreur sur l'estimation des paramètres  $\bar{v}$  et  $e$ , en utilisant la matrice de covariance de la régression. Nous faisons l'hypothèse, justifiée ici, que le bruit sur chaque valeur de phase (pour chaque date d'acquisition) est indépendant du bruit sur les autres valeurs de phase. L'écart type décroît donc en  $\sqrt{M_l - 3}$  où  $M_l$  est le nombre d'images pour le pixel  $l$ . D'autre part, l'erreur sur  $\bar{v}$  n'est que très peu corrélée à l'erreur sur  $e$ . Ceci dit, l'estimation de  $\sigma_{\bar{v}}$  ne prend pas en compte l'impact sur la série temporelle de possibles erreurs de déroulement, i.e., cette estimation est correcte en l'absence des erreurs de déroulement. Il faudrait donc tenir compte également de la carte d'erreur de fermeture,  $\phi_{RMS_{pixel}}$ , et masquer les zones à  $\phi_{RMS_{pixel}} > 0.35$  rad. Enfin, le nombre de degrés de liberté,  $M_l - 3$ , est réduit s'il y a  $L$  liens manquants à  $M_l - L - 3$ . Pour ce qui est du stack, nous avons estimé sa précision à partir de,

$$\sigma_{stack} = \frac{1}{\sqrt{\text{no. ifg}}} \left( \frac{2APS}{\text{no. cycles}} \cdot \frac{\text{no. cycles}}{\text{an}} \right)$$

où "no. ifg" est égal à 3 puisque il existe des images partagées sur l'ensemble initial de 5 interférogrammes (2003.11.07-2003.12.12 et 2003.12.12-2004.02.02 font 2003.11.07-2004.02.02, par exemple), où l'*APS* (Atmospheric Phase Screen) est égal à 2.7 LOS cm, l'ordre de grandeur des résidus par date (voir section 4.5.1), où "no. de cycles" est le nombre de cycles moyen (1 cycle = 35 jours), égal à 2.3, et "no. de cycles par an" est égal à 10.42. Cela nous donne une erreur grossièrement estimée sur le stack de l'ordre de 3.5 cm/an, beaucoup plus élevée par rapport à celle sur  $\bar{v}$ .

### 4.2.2.4 Comparaison qualitative : discussion

Sur la Figure 4.4, nous montrons un zoom sur le stack et la carte de subsidence moyenne,  $\bar{v}$ . La Figure 4.4a, correspond au stack avant d'appliquer le filtre adaptatif de ROI\_PAC. Nous pouvons noter un niveau de bruit local important principalement dû au bruit de décorrélation sur la phase, amplifié par l'échelle de couleur utilisée. Sur la Figure 4.4b, la même zone sur le stack mais après filtrage par ROI\_PAC est montrée. Le bruit a considérablement diminué et la plupart des petites structures ont été préservées, bien que en atténuant légèrement les gradients de franges les plus forts. Pourtant nous n'écartons pas la possibilité d'avoir emporté avec le filtre des structures à très petite longueur d'onde, pouvant représenter des déformations très localisées. Sur la Figure 4.4c, la même zone sur la carte de subsidence moyenne,  $\bar{v}$ , est montrée. A première vue, elle semble plus bruitée que le stack filtré, mais la plupart des petites longueurs d'onde doivent être interprétées comme information précieuse que le stack filtré n'est pas capable de fournir. Une petite analyse a été faite pour le constater. Nous avons étudié 6 structures à petite longueur d'onde sur la vitesse moyenne (Fig. 4.4c), repositionnées également sur les cartes du stack (Fig. 4.4b), de l'amplitude (Fig. 4.4d), de la vitesse moyenne superposée à l'amplitude (Fig. 4.4e) et du RMS par pixel,  $\phi_{RMS_{pixel}}^l$  (Fig. 4.4f). Quelques-unes de ces structures sont présentes dans le stack mais d'autres ne le sont pas. Cela nous permet de confirmer que l'utilisation du stack au cours de l'aide au déroulement n'influence pas nos résultats finaux. La carte de RMS par pixel, représentant la fermeture du système, nous permet de savoir s'il s'agit de vraies structures ou d'artefacts produits par des éventuelles erreurs de déroulement.

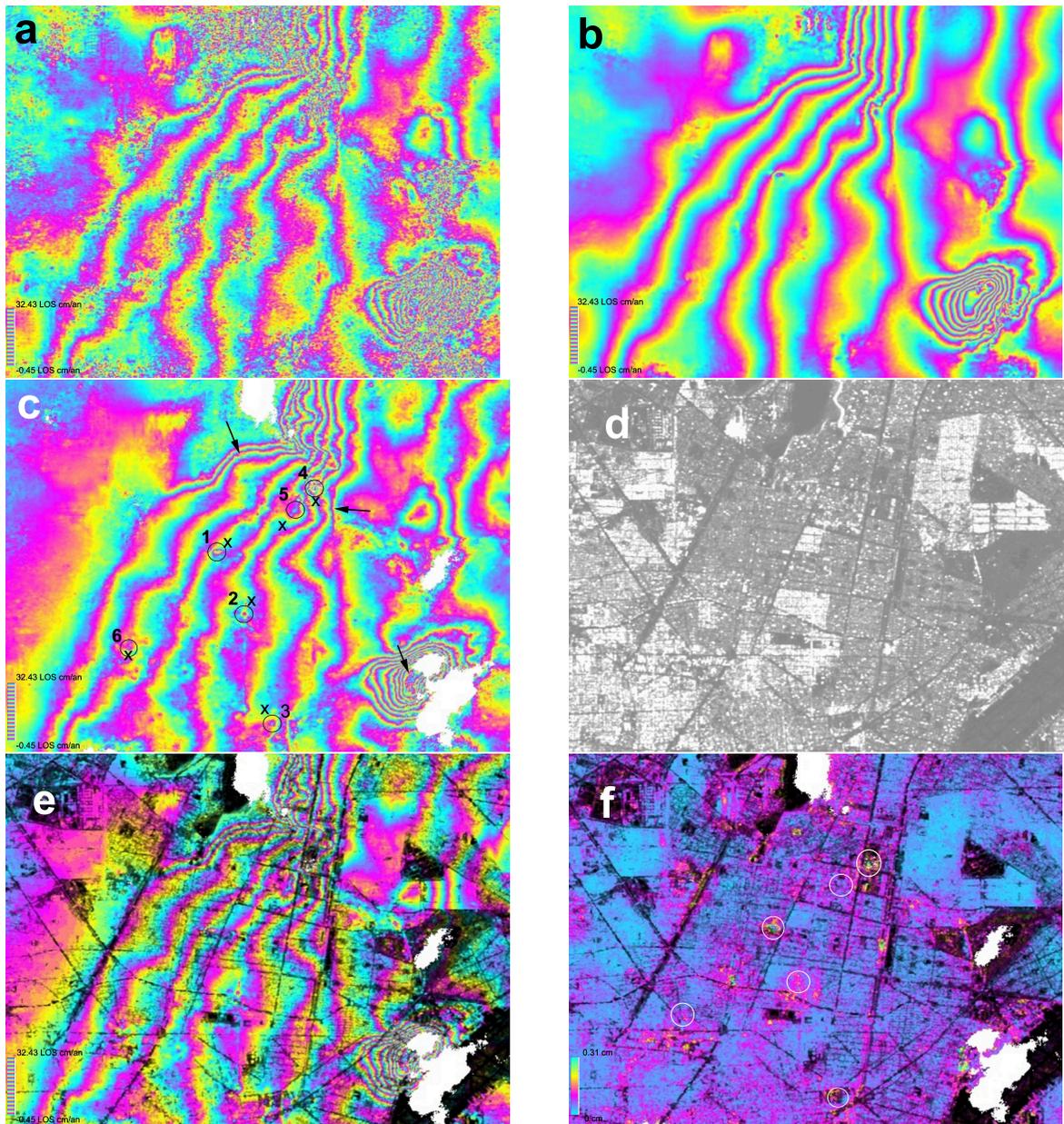


FIG. 4.4 – a) Stack avant filtrage par le filtre adaptatif de ROI\_PAC. b) Stack après filtrage par le filtre adaptatif de ROI\_PAC. c) Carte de vitesse moyenne annuelle,  $\bar{v}$ . d) Image d'amplitude. e) Superposition de  $\bar{v}$  sur l'image d'amplitude. f) Carte d'écart RMS à la fermeture par pixel,  $\phi_{RMS_{pixel}}^l$ , pour le groupe d'interférogrammes nettoyés. Les ronds sur le panneau (c), positionnent les pixels dont les séries temporelles sont analysées en référence aux pixels voisins marqués par des croix. Les flèches marquent les zones de forts gradients de subsidence s'avérant plus fins sur  $\bar{v}$  que sur le stack filtré.

En effet les structures avec les labels 1 et 4 correspondent à des zones avec un fort RMS. Nous avons analysé de plus près ces deux structures en calculant la différence entre les séries temporelles d'un de ses pixels, par rapport à un pixel de référence très proche (identifiés par des croix sur la figure 4.4c). La série temporelle "différentielle" caractérise

donc la petite structure "anormale" par rapport à ce qui l'entoure. Sur les figures 4.5a et 4.5d ces courbes de différence de phase sont montrées. Les droites rouges centrales représentent la régression linéaire appliquée sur les valeurs de phase, les deux autres lignes sont à  $\pm\pi$  radians de la ligne de régression. Les écarts à la ligne de régression, dépassant les lignes à  $\pm\pi$  radians, peuvent représenter l'impact sur la série temporelle de problèmes de déroulement, sur les deux figures. Sur ces deux graphes, on voit deux tendances parallèles séparées par un saut en 2005.5 ou en 2006, saut qui semble donc suspect et marque une erreur probable de déroulement. La pente positive permet de savoir que ces pixels subsident quoiqu'il arrive plus vite que les pixels pris comme référence.

Les structures 2, 3, 5, et 6, sont au contraire choisies dans des zones à faible  $\phi_{RMS_{pixel}}$ . Les pixels choisis dans ces structures subsident moins vite que le pixel pris comme référence (Voir Figures 4.5b, c, e et f). Pour ces pixels, comme la valeur de RMS n'est pas particulièrement importante, il n'existe probablement pas de problème de fermeture associé à des erreurs de déroulement. Cela se confirme sur les courbes de différence de phase, où les valeurs sont très proches de la courbe de régression et très éloignées des courbes à  $\pm\pi$  radians.

Nous concluons que les structures locales du taux de subsidence moyen sont bien déterminées par les données interférométriques avec une très bonne précision, et ne résultent pas d'artefacts dus au traitement (filtrage et aide au déroulement). Dans les zones à fort  $\phi_{RMS_{pixel}}$  ( $> 0.35$  rad), les variations locales de taux de subsidence moyen bien que réelles, sont bruitées par de probables erreurs de déroulement. Sur les zones signalées avec des flèches, il est possible de constater la finesse des forts gradients de déformation, mieux définis spatialement sur la carte de vitesse moyenne que sur le stack. Nous pouvons donc conclure que la qualité de la carte de vitesse moyenne  $\bar{v}$  est meilleure que celle du stack.

### 4.2.3 Zone de référencement

Sur la Figure 4.1b, nous avons montré deux séries temporelles correspondant à deux pixels localisés dans des zones de référence. Pour définir cette zone, tout au début du traitement, nous avons superposé le stack d'interférogrammes au MNT, en soulignant les zones d'altitude plus petite que 2250 mSNM (Figure 4.6a). Ces zones correspondent aussi aux zones des dépôts lacustres sur la vallée de Mexico (Figure 4.6b), où des argiles se compactent suite à la perte d'eau due à la surexploitation de l'aquifère et du fait de leur grand coefficient de compaction, causent la subsidence. Nous avons remarqué que la déformation était concentrée dans la zone d'altitude plus petite que 2250 mSNM, et nous avons donc pris comme référence les zones d'altitudes plus grandes que cette altitude. Cependant, les séries temporelles sur la figure 4.1b montrent des valeurs différentes de zéro, ce qui veut dire que la déformation dans les zones de référence n'est pas nulle. La série 4 localisée sur la montagne de la Sierra Sta. Catarina, montre que les flancs de cette montagne subsident. Par contre, sur la série 5 localisée en dehors de la zone de subsidence principale, il existe un léger soulèvement. C'est le cas de toute la zone localisée autour de la zone de subsidence principale, comme le montre la figure 4.2. Cela pourrait soit représenter un rebond général de la vallée de Mexico dû à la décharge de l'aquifère, soit une légère compaction de l'intégralité de l'aquifère en plus de la forte compaction des sédiments lacustres, étendant la zone de subsidence au delà de l'extension lacustre maximale. Le problème de cette mesure de "soulèvement" est qu'elle est mesurée relativement à l'ensemble de la zone d'altitude supérieure à 2250 mSNM. En tout cas, une meilleure définition des déplacements du champ lointain est nécessaire pour déterminer la déformation absolue dans la zone de transition,

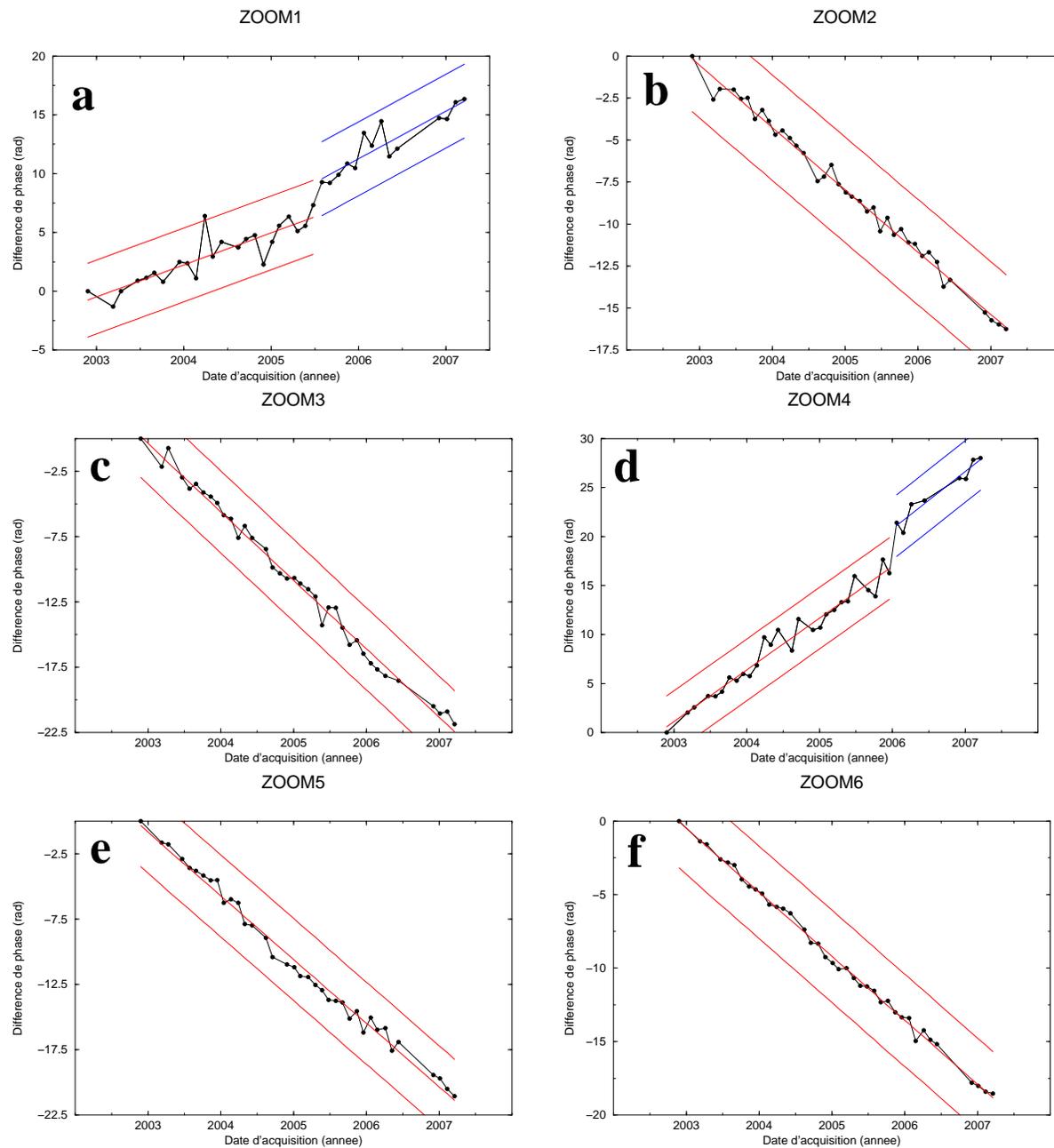


FIG. 4.5 – a)-f) Différence entre les séries temporelles d'un pixel localisé dans une petite structure (1 à 6, localisées sur la figure précédente) et un pixel voisin de référence (identifiés par des croix). Les droites rouge centrales montrent les tendances linéaires et sont encadrées par deux droites à  $\pm\pi$  rad.

entre les sédiments lacustres et les montagnes.

Sur la figure 4.7, la carte de subsidence moyenne annuelle  $\bar{v}$  est superposée au MNT. Les zones claires correspondent aux altitudes plus grandes que 2300 mSNM. Sur cette carte nous avons dessiné quatre profils présentés sur la figure 4.8. Sur ces profils, il est possible de voir la corrélation entre les zones de déformation négative et les zones à altitude plus grande que 2300 mSNM. Sur les figures 4.8d et f, ils est possible d'apprécier des forts

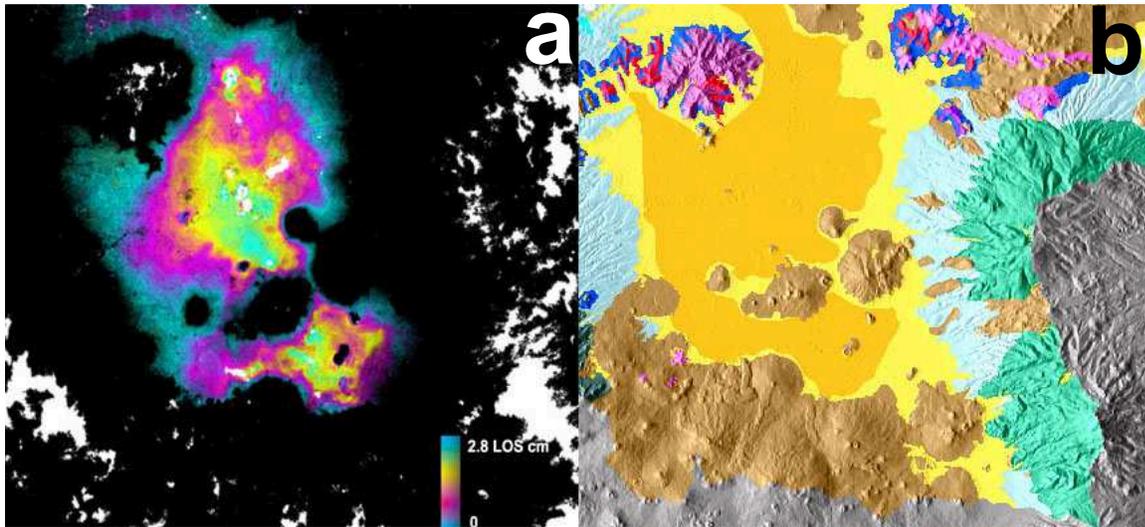


FIG. 4.6 – a) Superposition du stack d'interférogrammes sur le MNT. b) Principales couches hydrogéologiques : dépôts lacustres représentant l'aquitard (orange), dépôts alluviaux représentant l'aquifère (jaune) et montagnes et volcans (marron et autres couleurs).

gradients de déformation placés sur les zones de transition (couleur jaune sur la figure 4.6b).

### 4.3 Accélération ou décélération de la subsidence

#### 4.3.1 Ecart à la linéarité

Bien que la plupart de la déformation dans la ville de Mexico puisse être considérée comme linéaire, nous avons constaté l'existence de résidus quadratiques, faibles mais significatifs, sur certaines séries temporelles comme le montre la figure 4.9.

Pour repérer les zones avec des déplacements non linéaires, nous avons calculé le résidu entre la déformation et son estimation linéaire,

$$res_1 = \sqrt{\frac{1}{M_t} \sum (\phi - \bar{v}(t_k - t_1) - eB_{\perp}^k - c)^2} \quad (4.2)$$

présenté sur la figure 4.10. L'écart quadratique moyen,  $res_1$ , est au maximum de l'ordre de 5 LOS cm, ce qui est faible comparé à la subsidence maximale observée entre la fin de 2002 et le début de 2007, de l'ordre de 150 LOS cm. Il est de l'ordre de 0.1 LOS cm sur la zone "stable" et sur une grande partie de la zone subsidente. Sur cette carte, nous avons sélectionné quelques pixels dans chaque zone à fort résidu, pour lesquels il n'existe pas de liens manquants, afin d'assurer la fiabilité des séries temporelles correspondantes. Les séries sont présentées sur la figure 4.11.

Sur les figures 4.11b-e, les résidus quadratiques représentent soit des décélérations (c'est le cas des figures 4.11b, c et f), soit des accélérations de la subsidence (figures 4.11d et e). Il existe aussi des résidus plus complexes comme ceux qui sont montrés sur la figure 4.11a, où une déformation périodique pluriannuelle peut être devinée. En champ lointain, certaines zones avec un résidu relativement fort semblent plutôt correspondre à du bruit haute fréquence de décorrélation sur la phase (figure 4.11g).

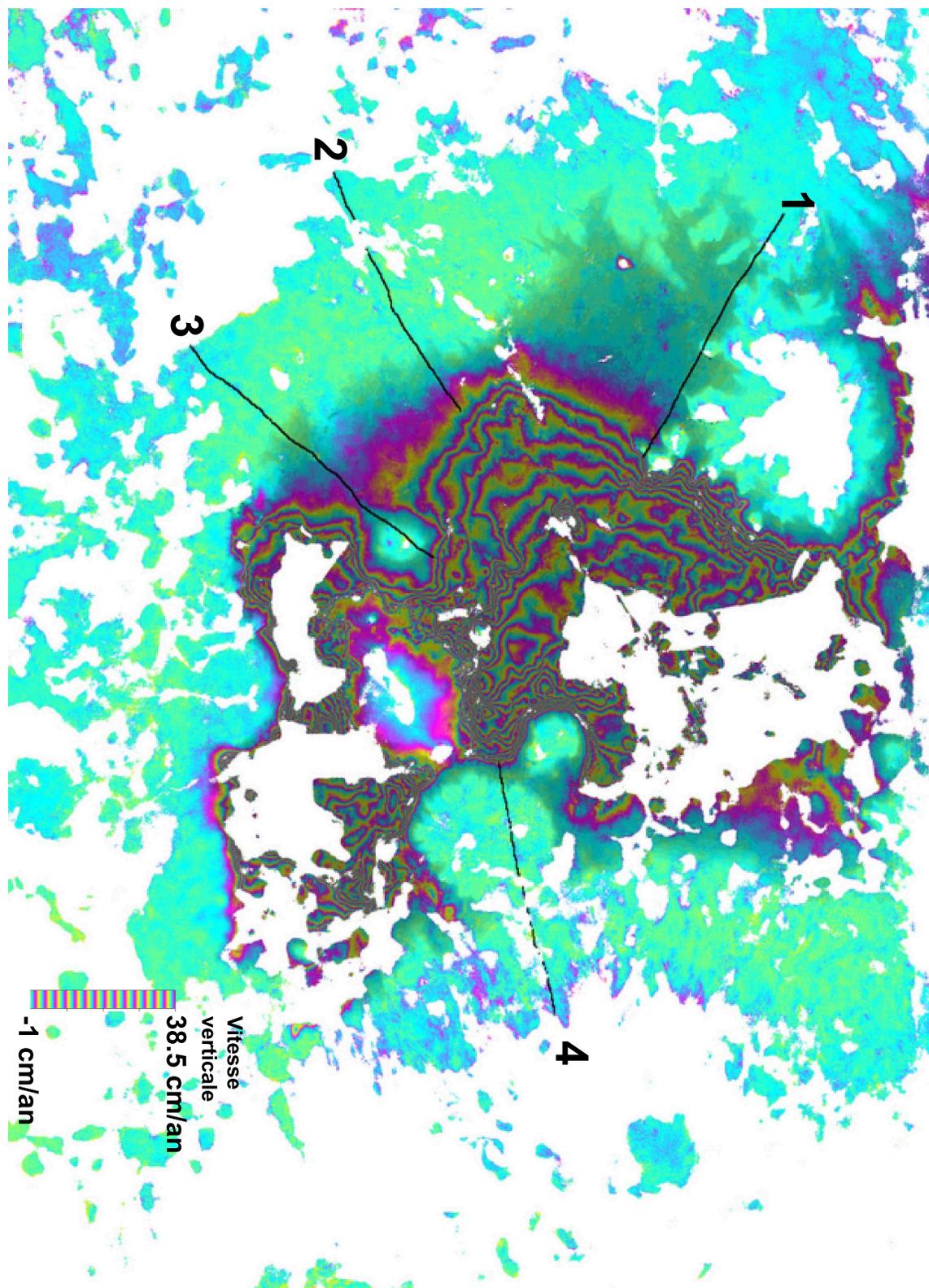


FIG. 4.7 – Carte de subsidence moyenne annuelle,  $\bar{v}$ , superposée au MNT (zone plus sombre : altitude < 2300 mSNM). Les profils 1-4 sont montrés sur la figure 4.8.

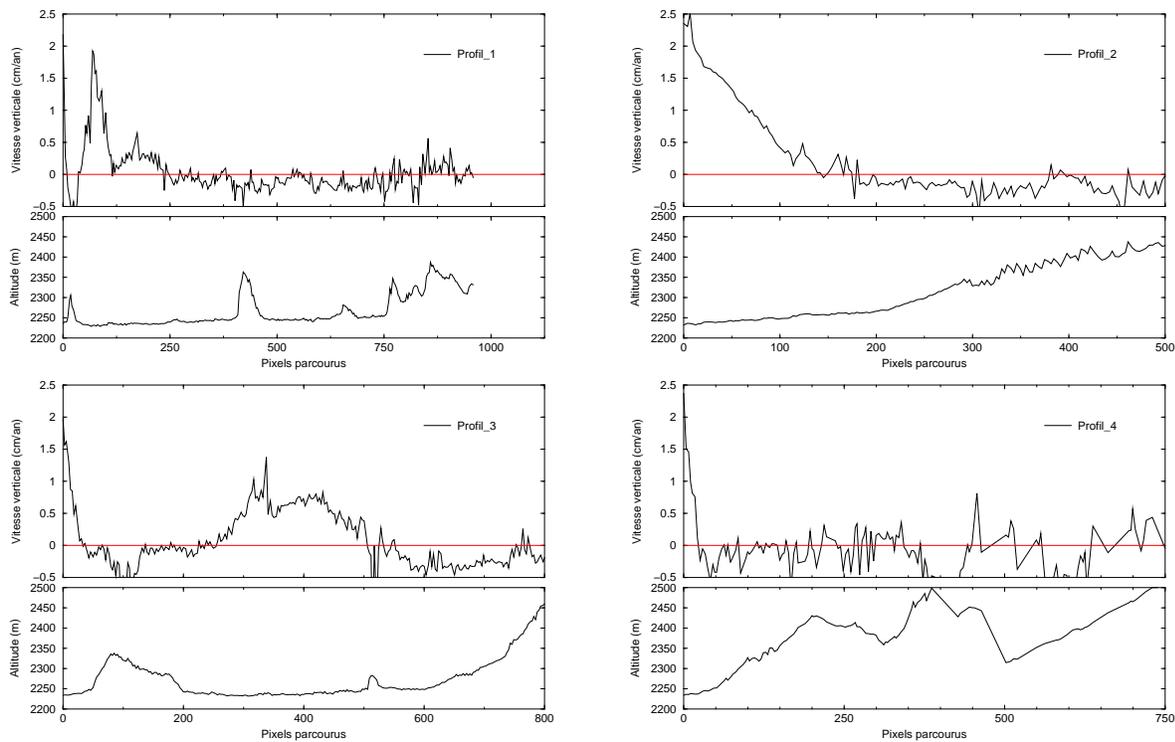


FIG. 4.8 – Profils montrant l'évolution de la vitesse moyenne annuelle,  $\bar{v}$ , (projetée selon la verticale) et l'élévation, pour les profils localisés sur la figure 4.7.

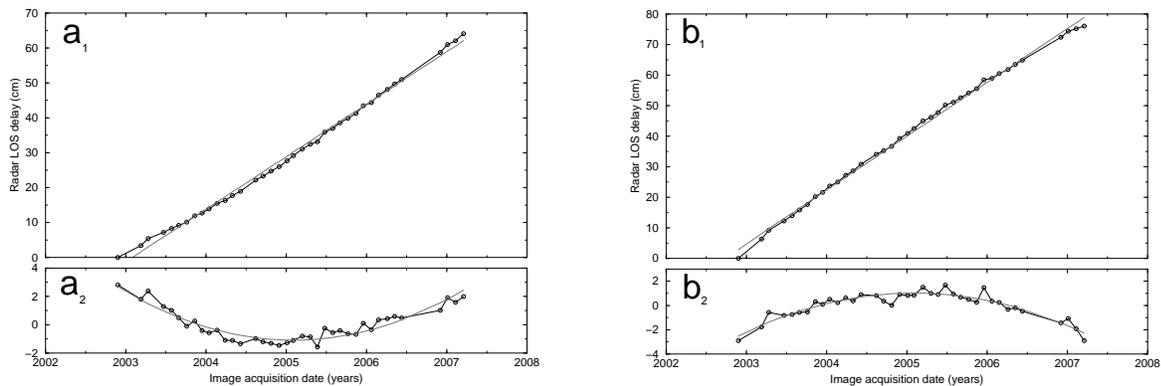


FIG. 4.9 – a) et b) séries temporelles ( $a_1$ ,  $b_1$ ) et résidus ( $a_2$ ,  $b_2$ ) par rapport à une régression linéaire, montrant l'accélération (a) et décélération (b) de la déformation, respectivement. Les résidus sont ajustés par une fonction quadratique.

### 4.3.2 Modélisation

Nous avons ajusté la déformation contenue dans les séries temporelles avec le modèle,

$$\phi_k = a(t_k - t_1) + b(t_k - t_1)^2 + eB_{\perp}^k + c \quad (4.3)$$

Les cartes correspondantes à la vitesse linéaire moyenne annuelle,  $a$ , et à la déformation quadratique moyenne annuelle,  $b$ , sont présentées dans la figure 4.12. Sur  $b$ , les régions présentant une accélération ou une décélération de la subsidence ressortent.

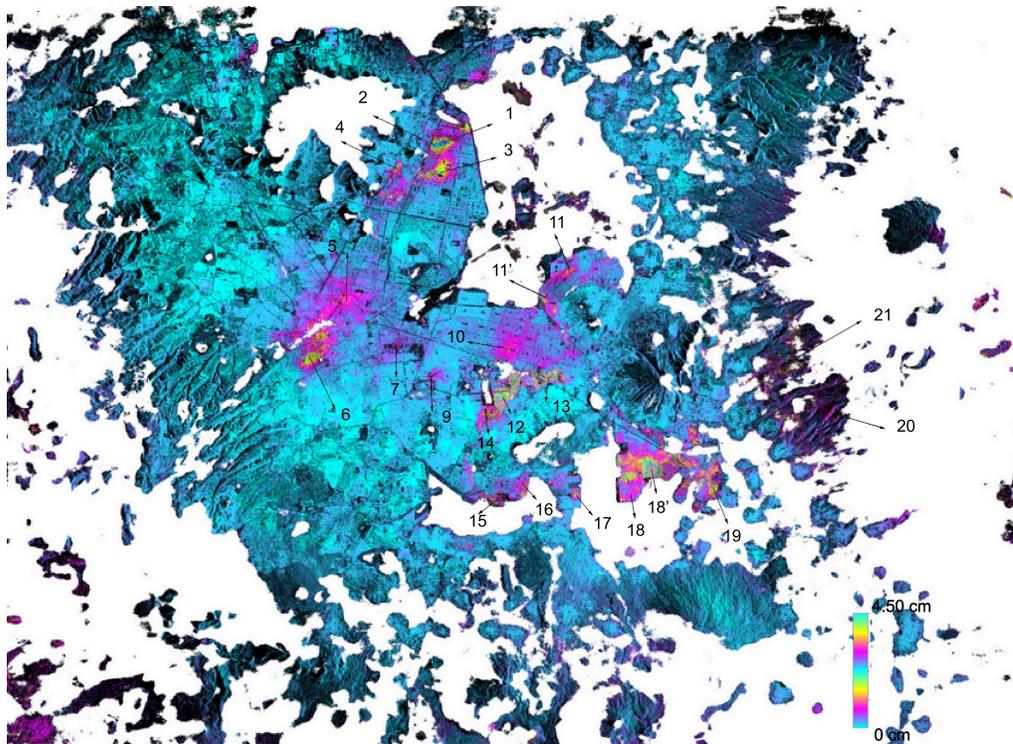


FIG. 4.10 – Carte de  $res_1$ , l'écart des séries temporelles par rapport à la modélisation linéaire en temps (équation 4.1). L'écart est faible presque partout, sauf dans quelques zones montrant une déformation non linéaire significative. Les labels précisent la localisation des séries temporelles montrées sur la figure 4.11. L'échelle est en LOS cm.

### 4.3.3 Précision

A première vue, les cartes de la vitesse linéaire moyenne annuelle,  $a$ , et de la vitesse moyenne annuelle,  $\bar{v}$ , semblent très similaires. Toutefois, de façon générale, l'erreur sur  $a$ ,  $\sigma_a$ , de l'ordre de  $\approx 0.9$  mm/an est plus importante que celle sur  $\bar{v}$ ,  $\sigma_{\bar{v}} = 0.2$  mm/an. Cependant il faut aussi prendre en compte l'effet de la forte covariance existante entre les variables  $t$  et  $t^2$ , qui introduit une corrélation entre l'erreur sur  $a$  et celle sur  $b$ . L'erreur formelle  $\sigma_a$  (à  $b$  connu) est donc sous estimée. Sur la carte de  $\sigma_a$  (Figure 4.13), nous pouvons voir ressortir les zones où la déformation est non linéaire et non quadratique (i.e., fort résidu). De même, sur la carte de l'erreur sur  $b$ ,  $\sigma_b$ , ressortent les zones dont la déformation est non linéaire et non quadratique. Les valeurs les plus petites de  $\sigma_b$  sont à  $0.18$  mm/an<sup>2</sup> avec des valeurs maximales de l'ordre de  $0.9$  mm/an<sup>2</sup>.

## 4.4 Correction de MNT

Le paramètre  $e$  qui pondère la contribution des lignes de base perpendiculaires  $B_{\perp}$  sur les modélisations des équations 4.1 et 4.3, est aussi relié à l'erreur sur le MNT,  $\Delta h$ , à travers l'équation,

$$\Delta h = \left( \frac{\Delta \phi}{\Delta B_{\perp}} \right) \frac{\lambda R \sin \theta}{4\pi} \quad (4.4)$$

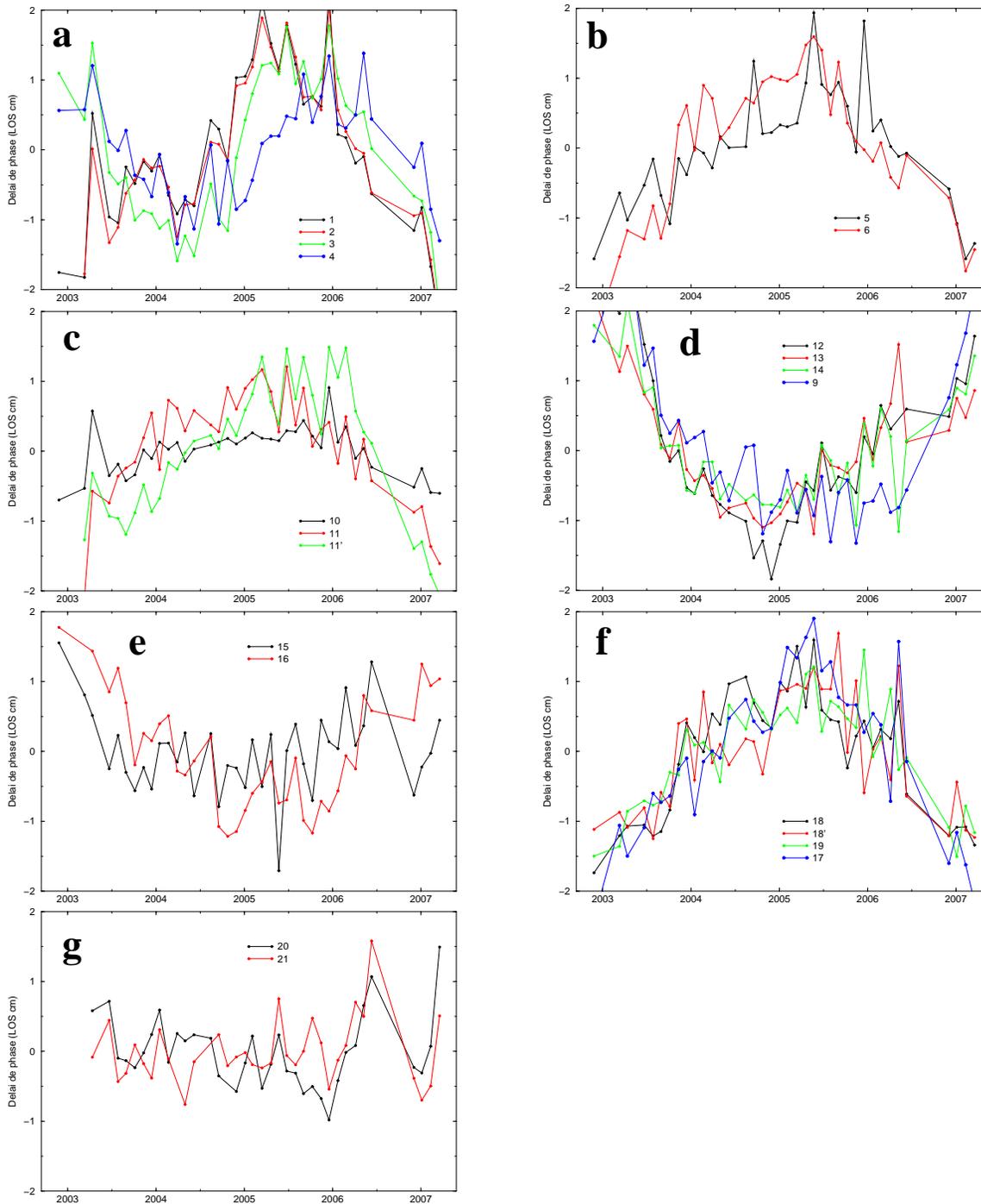


FIG. 4.11 – a) - g) Résidus par rapport à l'ajustement du modèle linéaire (équation 4.1) sur les séries temporelles. Les numéros correspondent aux points localisés sur la figure 4.10.

où,  $(\frac{\Delta\phi}{\Delta B_{\perp}})$  est égal à  $e$ .

Les cartes sur la figure 4.14, présentent la correction de MNT,  $\Delta h$ , issue de la régression faite à travers l'équation 4.3 (figure 4.14a), et l'erreur correspondante (figure 4.14b), de l'ordre de 0.3 m, plus faible que celle issue de la modélisation linéaire du fait de la diminution du résidu non modélisé.

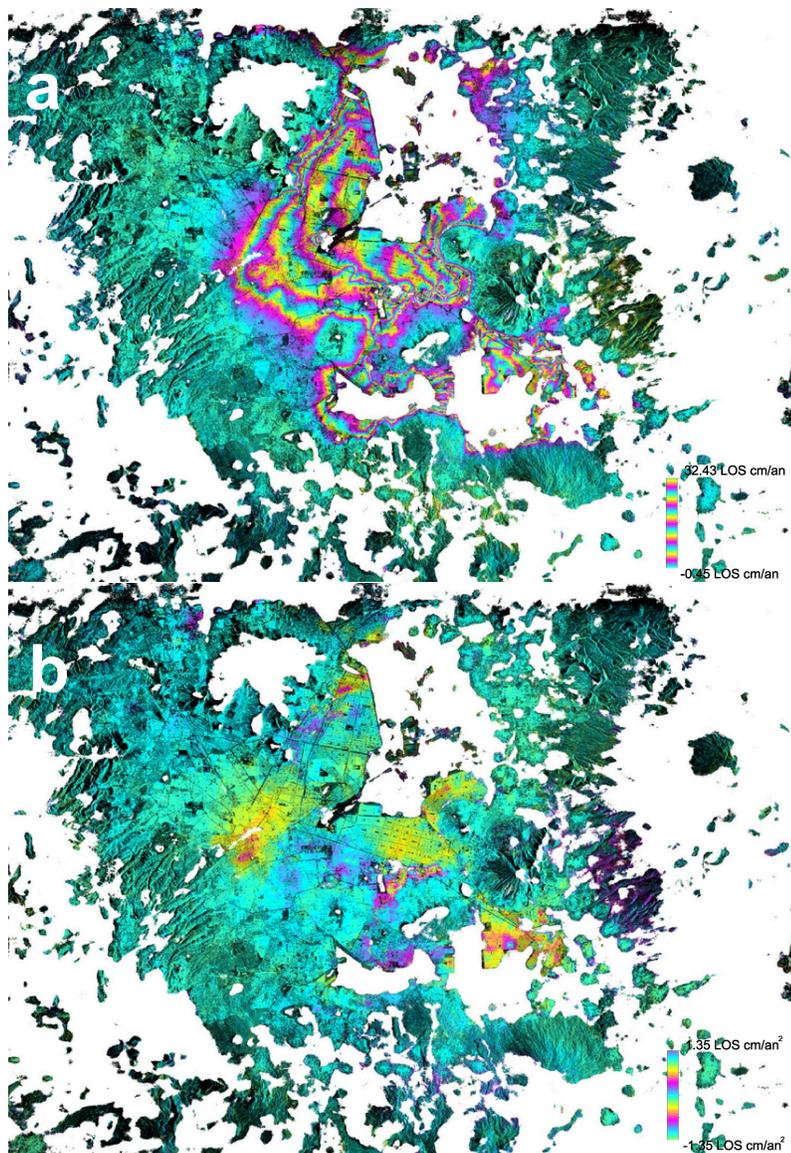


FIG. 4.12 – a) Carte de la vitesse linéaire *a*. b) Carte de la vitesse quadratique *b*, représentant les zones d'accélération et décélération de la déformation.

Sur la figure 4.15, deux zooms sont présentés sur deux zones localisées sur la figure 4.14a. Ils correspondent aux valeurs de  $\Delta h$  sur un volcan (figure 4.15a) et une zone en ville (figure 4.15b). Sur le volcan, la correction de MNT,  $\Delta h$ , superposée à l'amplitude, souligne et suit le réseau orographique marquant les crêtes et les vallées. Ceci provient probablement du fait que le MNT SRTM lisse les petites structures du réseau orographique qui marquent ainsi des contrastes. Pour la ville, nous montrons aussi les images d'amplitude et de  $\Delta h$  tout seul pour faciliter la localisation des structures. Il est possible d'apprécier des petits quadrillages suivant la géométrie des bâtiments, ou bien des traits le long de certaines avenues.

Finalement, nous avons tracé la vitesse moyenne de déformation,  $\bar{v}$ , en fonction de l'altitude du MNT (figure 4.16). Sur la figure 4.16a nous pouvons voir que la plupart de la déformation est concentrée sur les zones d'altitude plus petite que 2250 mSNM. Sur la

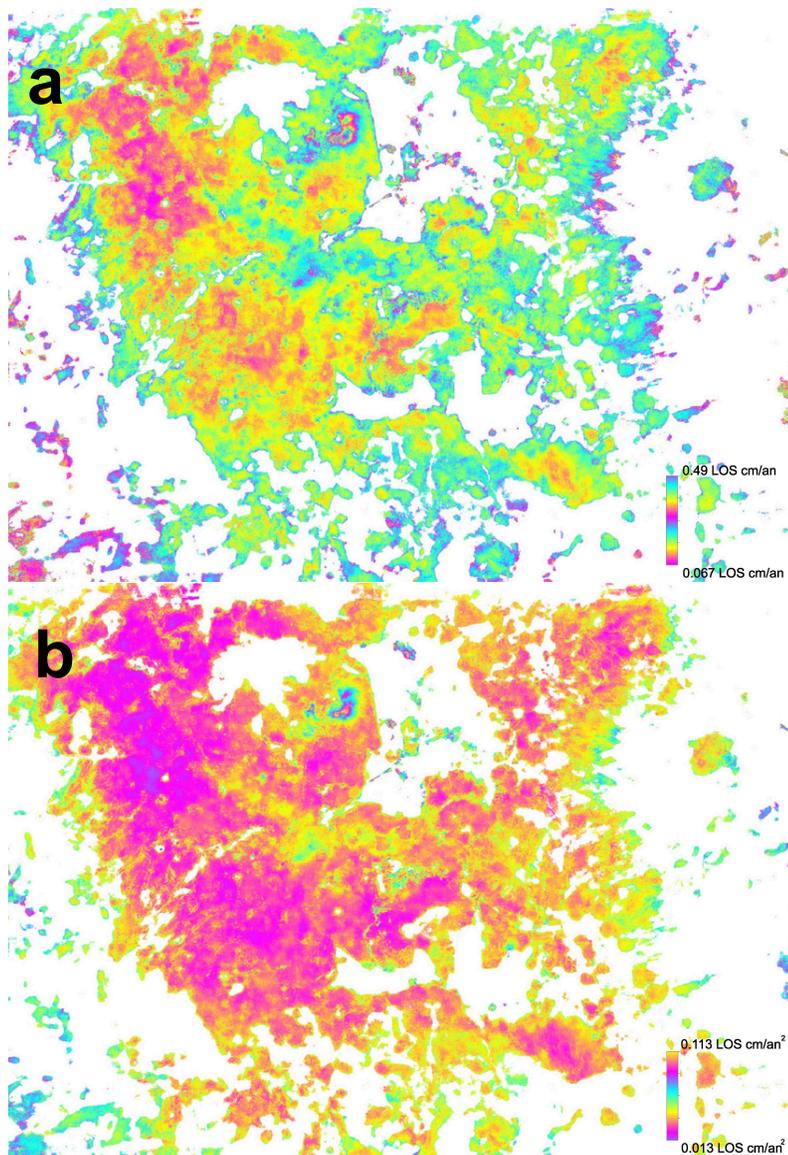


FIG. 4.13 – a) Carte de l'erreur sur l'estimation de la vitesse linéaire, *a*. b) Carte de l'erreur sur l'estimation de la vitesse quadratique, *b*.

figure 4.16b, un zoom sur la figure 4.16a permet de voir qu'il existe une relation négative entre taux de subsidence et altitude de l'ordre de  $-4 \text{ cm/an/m}$ . Si la topographie actuelle de la ville de Mexico est principalement héritée de la subsidence (i.e., que le fond lacustre était plat) alors les 7.5 m de "creux" actuels pourraient représenter la subsidence cumulée depuis le début de la subsidence. L'altitude 2225 m (ou 7.5 m de creux) correspond à un taux moyen de 30 cm/an. A ce taux, il faut 25 ans pour fabriquer ce "creux" sur la ville. Cette durée trop courte, semble indiquer que les taux de subsidence ont dû fortement augmenter depuis 1950.

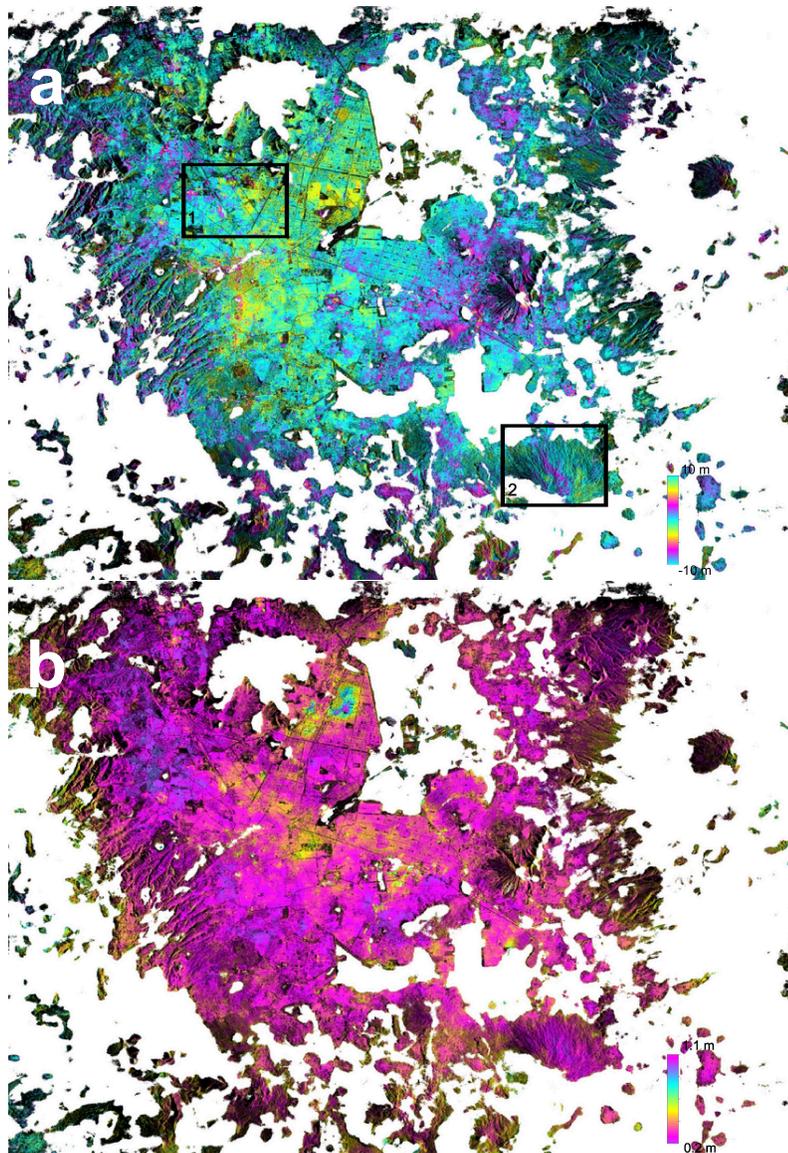


FIG. 4.14 – a) Carte du paramètre  $e$ , transformé en correction de MNT (en m), superposée à une image d'amplitude. Les zones encadrées sont présentées sur la figure suivante. b) Carte de l'erreur sur l'estimation de la correction de MNT (en m).

## 4.5 Recherche d'un signal périodique en temps

### 4.5.1 Calcul des résidus : atmosphère et déformation résiduelle

Pour étudier les écarts au modèle quadratique (équation 4.3), nous avons calculé les résidus par date à partir de :

$$R_k = \phi_k - a(t_k - t_1) - b(t_k - t_1)^2 - eB_{\perp}^k - c \quad (4.5)$$

où  $\phi_k$  est le délai de phase total pour la date  $k$ . Sur la figure 4.17, les résidus de 4 dates sont montrés. Ces résidus correspondent à la fois à la "déformation" qui ne peut pas être modélisée par l'équation 4.3 et à l'APS propre à la date d'acquisition. La figure 4.17a montre un

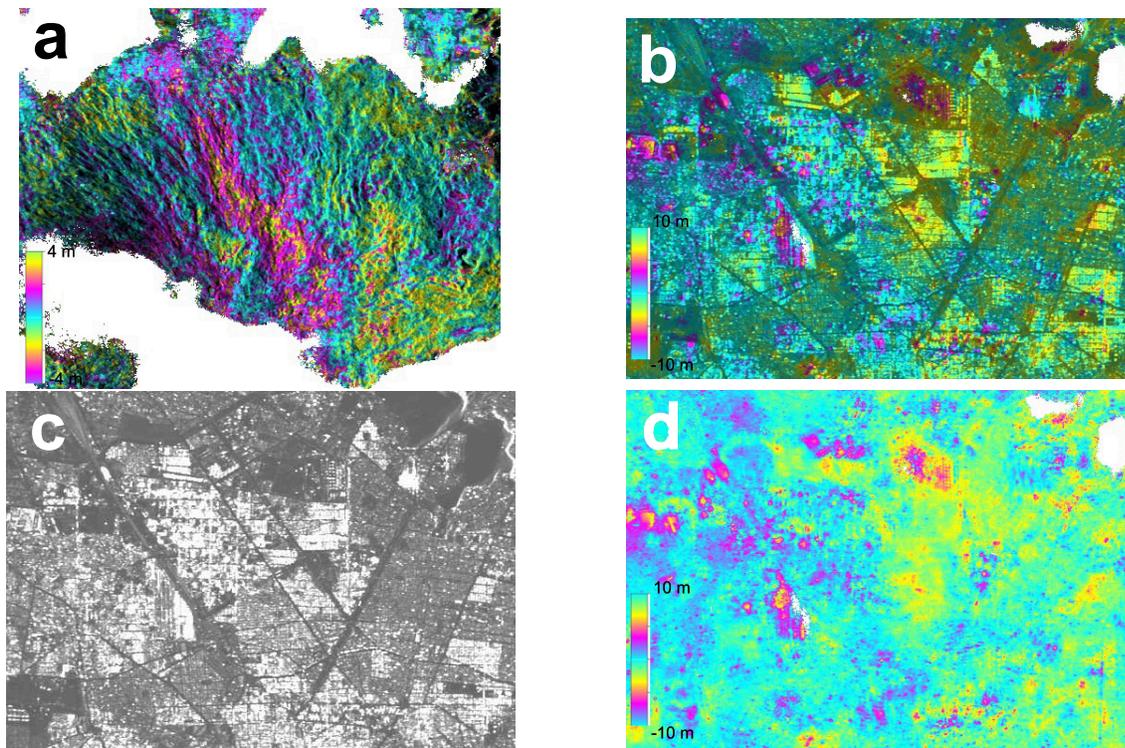


FIG. 4.15 – a) Zoom de la carte de la correction de MNT,  $\Delta h$ , sur un volcan (superposé à l'amplitude). b) Zone de la carte de la correction de MNT,  $\Delta h$ , sur la ville (superposé à l'amplitude). c) Carte d'amplitude sur le zoom de la ville. d) Carte de la correction de MNT sur le zoom de la ville. Voir la localisation figure 4.14a.

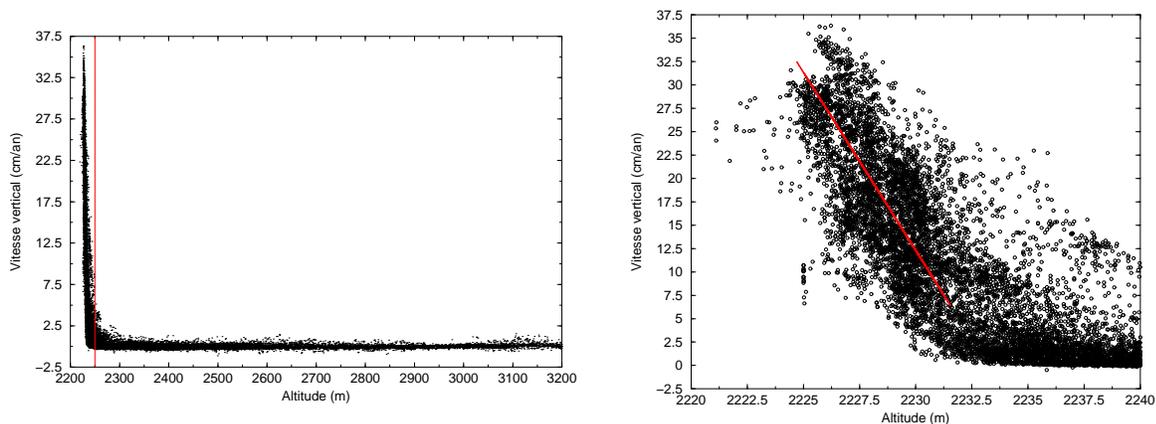


FIG. 4.16 – A gauche : Vitesse moyenne annuelle,  $\bar{v}$ , en fonction de l'altitude du MNT. A droite : Vitesse moyenne annuelle,  $\bar{v}$ , en fonction de l'altitude du MNT, zoom.

résidu faible qui peut être interprété comme une contribution atmosphérique "turbulente" presque nulle sur l'image 2004.12.31. Sur la figure 4.17b, une contribution atmosphérique faible est visible sur l'image 2002.11.22, toutefois, des zones localisées avec un résidu nettement plus important pourraient être le signe d'une déformation jusqu'à présent non modélisée. Les figures 4.17c et d, montrent des contributions atmosphériques importantes sur les images 2005.12.16 et 2003.08.29, respectivement. Ces deux contributions traversent

complètement la zone étudiée de façon diagonale, parfois avec des contributions à grande longueur d'onde et de forte amplitude (figure 4.17c), d'autres fois avec des contributions à plus petite longueur d'onde (figure 4.17d). Dans l'Annexe B, une mosaïque de la totalité des résidus est présentée et témoigne de la variabilité des hétérogénéités troposphériques sur la zone de Mexico en forme et en amplitude.

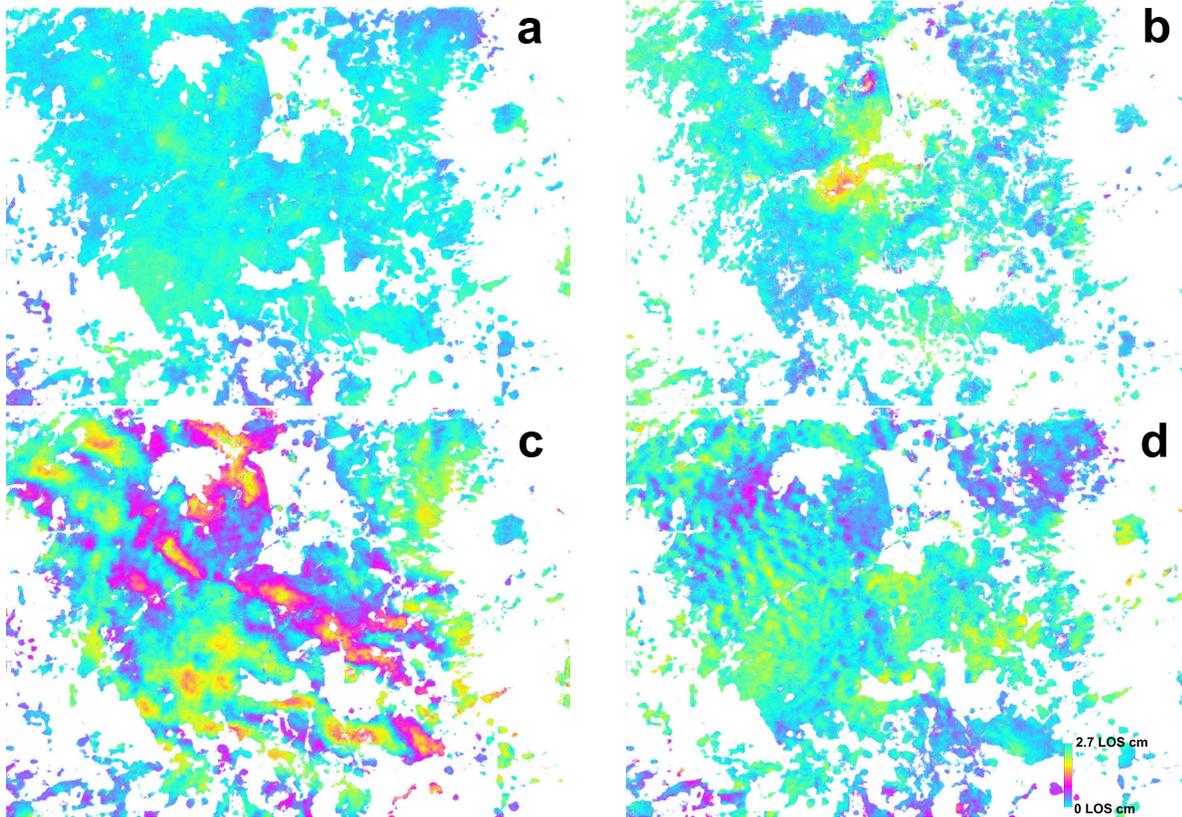


FIG. 4.17 – a)-d) Résidus par date, pour les dates 2004.12.31, 2002.11.22, 2005.12.16 et 2003.08.29, respectivement.

#### 4.5.2 Détermination de la "qualité" de chaque image

A partir des résidus par date,  $R_k$ , nous avons calculé une mesure de la "qualité" pour chaque image  $k$ , i.e., de l'APS de chaque image. Cette mesure consiste à calculer la différence moyenne entre deux valeurs de phase,  $R_k(i)$  et  $R_k(j)$ , correspondantes à deux pixels séparés par une distance,  $d_{ij}$ , de  $n$  pixels, où  $n$  peut aller de 0 à 2000 pixels [Puysegur et al. [2007], Cavalié et al. [2007]] :

$$Qual(n) = \frac{1}{N_{d_{ij}}} \sum_{d_{ij}=n} |R_k(i) - R_k(j)| \quad (4.6)$$

Ceci est fait pour prendre en compte la variabilité des signatures des contributions atmosphériques présentes sur les images (grande et petite longueur d'onde). Les courbes résultantes pour chaque acquisition  $k$  sont présentées sur la figure 4.18a. Sur cette figure, plus les valeurs sont élevées, plus l'APS est importante, moins la qualité de l'image est

bonne. Les lignes en couleur correspondent aux quatre images dont les résidus ont été présentés sur la figure 4.17. La ligne bleue correspond à l'image 2004.12.31 dont le résidu est faible, puis la ligne rouge correspond à l'image 2002.11.22 sur laquelle une possible déformation résiduelle se rajoute à une APS légèrement plus forte. Les images avec des résidus plus importants, contaminées par des contributions atmosphériques fortes, ont une qualité moins bonne, c'est le cas des images 2005.12.16 et 2003.08.29 dont les courbes de qualité, verte et magenta respectivement, sont assez élevées. Sur la figure 4.18b, la "qualité" des images pour une distance de 500 pixels est montrée.

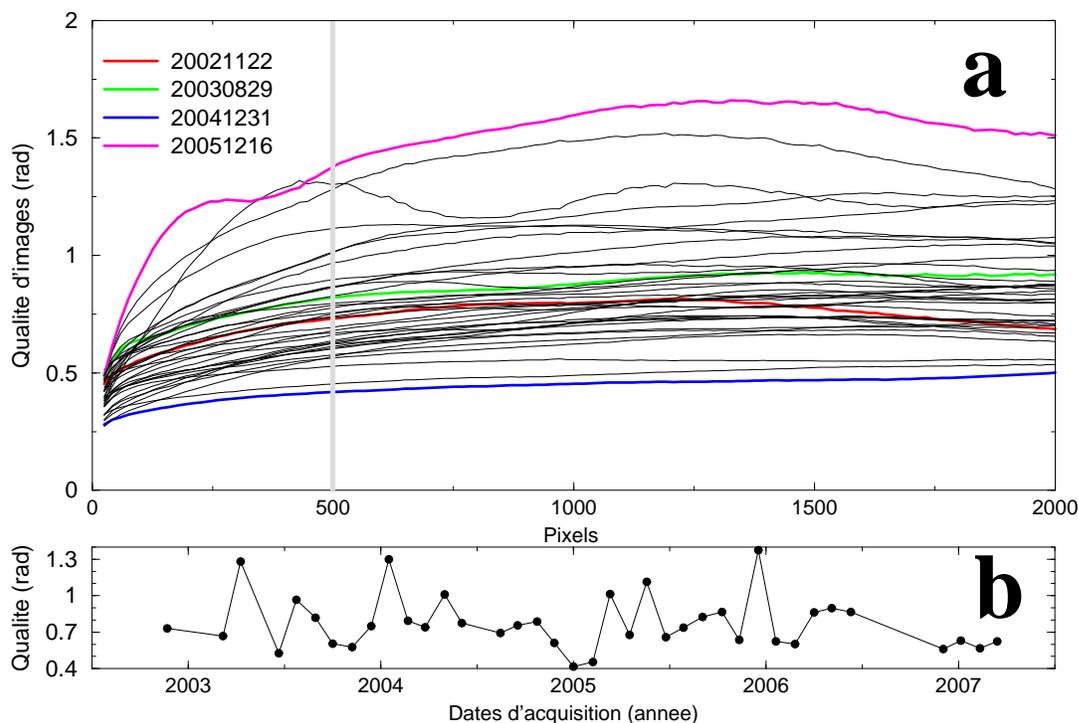


FIG. 4.18 – a) Courbes de la "qualité" associée à chaque image pour une distance croissante de 0 à 2000 pixels (voir équation 4.6). Sur les courbes, plus les valeurs sont élevées moins la qualité de l'image est bonne. b) "Qualité" de chaque image pour une distance de 500 pixels.

### 4.5.3 Écart à l'évolution quadratique en temps

Pour identifier les zones avec des déplacements non modélisés par l'équation 4.3, nous avons calculé le résidu quadratique entre le délai de phase et son estimation donnée par l'équation 4.3,

$$res_2 = \sqrt{\frac{1}{M_l} \sum (\phi_k - a(t_k - t_1) - b(t_k - t_1)^2 - eB_{\perp} - c)^2} \quad (4.7)$$

présenté sur la figure 4.19. Sur cette carte, nous avons aussi sélectionné quelques pixels, pour lesquels il n'existe pas de liens manquants, ce qui assure la fiabilité des séries temporelles correspondantes. Les séries sont présentées sur la figure 4.20. La figure 4.19 a des valeurs plutôt faibles dans l'ensemble, nettement plus faibles que les résidus de l'ajustement linéaire

en temps. Pourtant, au nord vers la zone près de la Sierra de Guadalupe, plus au centre vers l'aéroport et au sud vers Chalco, il existe des écarts assez forts, significatifs devant l'amplitude des résidus atmosphériques. Sur les bords de l'image, en champ lointain, les erreurs de fermeture du système ainsi que le bruit de décorrélation sur la phase, entraînent des valeurs élevées de résidu.

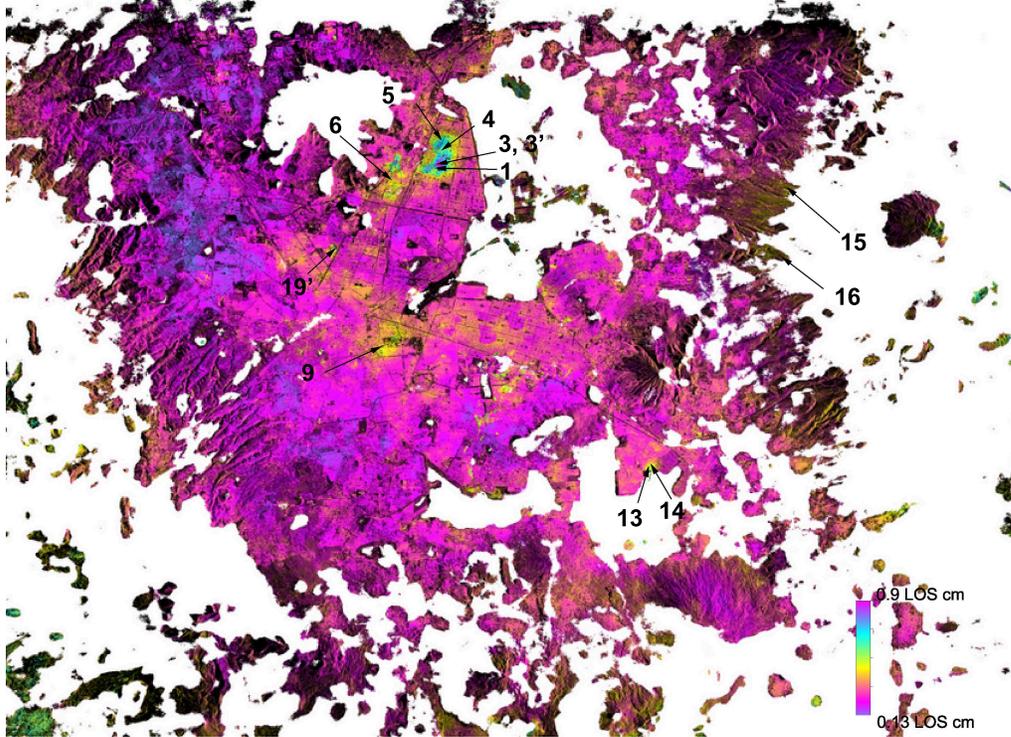


FIG. 4.19 – Carte de  $res_2$ , l'écart des séries temporelles par rapport à la modélisation quadratique en temps (équation 4.3). Les numéros correspondent aux séries temporelles montrées sur la figure 4.20.

Sur la figure 4.20a, un ensemble de 5 jolies courbes ayant un comportement sinusoïdal pluriannuel est présenté. C'est aussi le cas pour les courbes de la figure 4.20b. En bas de chacun des graphes, la "qualité" par image est présentée pour  $n=500$  pixels. Sur les figures 4.20c et 4.20d les courbes sont un peu plus complexes mais présentent clairement un comportement en temps non aléatoire. Finalement sur la figure 4.20e, il est difficile de conclure à première vue, mais il est possible qu'il s'agisse principalement d'un bruit de phase.

#### 4.5.4 Modélisation avec comportement périodique en temps

Nous avons décidé de modéliser les séries temporelles en rajoutant un terme sinusoïdal,

$$\phi = a(t_k - t_1) + b(t_k - t_1)^2 + eB_{\perp} + c + d \cos\left(\frac{2\pi(t_k - t_1)}{T}\right) + f \sin\left(\frac{2\pi(t_k - t_1)}{T}\right) \quad (4.8)$$

où  $T$ ,  $d$  et  $f$  sont ajustés par moindres carrés en fixant,  $1 \text{ an} < T < 3.8 \text{ ans}$ . Ceci permet de reconnaître d'éventuels comportements saisonniers, s'ils dominent la série temporelle, ou pluriannuels. La figure 4.21a, représente l'amplitude,  $A = \sqrt{d^2 + f^2}$ , sur les pixels avec

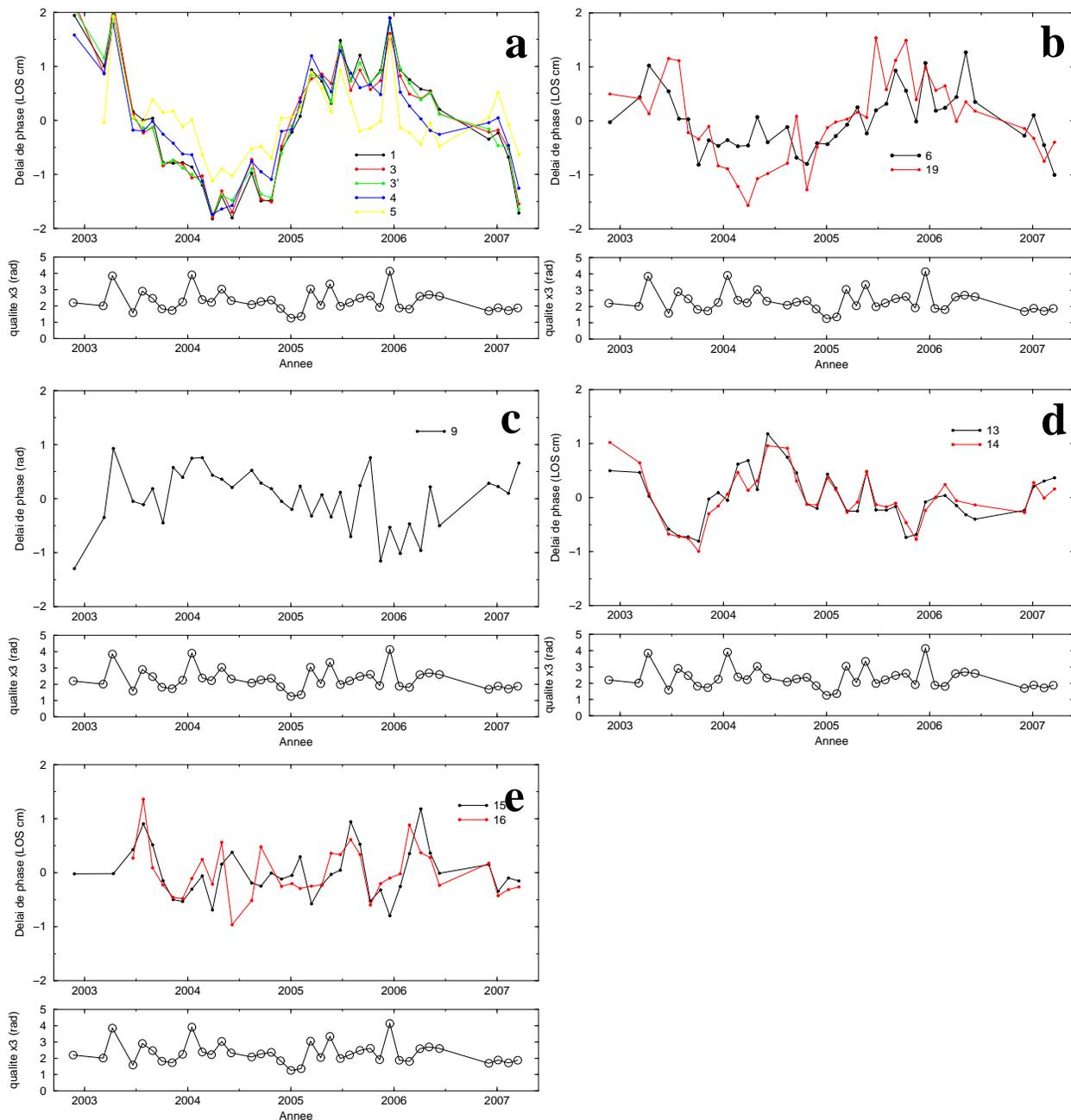


FIG. 4.20 – a) - e) Résidus par rapport à l’ajustement quadratique en temps (équation 4.3) sur les séries temporelles

un RMS  $\phi_{RMS_{pixel}}^l > 0.35$ , pour limiter l’étude sur ceux qui ont une faible probabilité d’avoir des problèmes de déroulement. La période  $T$  est celle qui s’ajuste au mieux pour chaque pixel. Sur cette carte, les zones principales sur le résidu  $res_2$ , de faible extension spatiale, ressortent à nouveau, montrant que les zones à fort résidu peuvent partiellement s’exprimer sous forme d’une sinusoïde en temps. En dehors de ces zones, l’amplitude est très faible : à priori cela signifie que la série temporelle résiduelle ne comporte pas de terme saisonnier sur la majeure partie du bassin de Mexico.



FIG. 4.21 – A gauche : Amplitude de la composante sinusoïdale en temps,  $A$  (équation 4.8). A droite : Carte de  $res_{sin}$ , l'écart des séries temporelles par rapport à l'ajustement par l'équation 4.8.

Les zones avec des déplacements non modélisés à travers l'équation 4.8 sont présentées sur la carte de résidu  $res_{sin}$  (figure 4.21b), où,

$$res_{sin} = \sqrt{\frac{1}{M_l} \sum_k \left[ \phi_k - a(t_k - t_1) - b(t_k - t_1)^2 - eB_{\perp} - c - d \cos\left(\frac{2\pi(t_k - t_1)}{T}\right) - f \sin\left(\frac{2\pi(t_k - t_1)}{T}\right) \right]^2} \quad (4.9)$$

Leur extension est de plus en plus limitée. Les valeurs sur certaines zones du champ lointain ont toujours de valeurs importantes du fait des possibles erreurs de déroulement ( $\phi_{RMS_{pixel}}^l$  élevé).

Pour identifier si l'introduction du terme sinusoïdal améliore significativement l'ajustement de la série temporelle, nous avons calculé le rapport entre les résidus  $res_{sin}$  et  $res_2$ ,

$res_{ratio} = \frac{res_{sin}}{res_2}$ , dont la carte est montrée sur la figure 4.22a. Sur cette carte, les valeurs tendant vers 1 indiquent que le terme sinusoïdal n'est pas significatif, alors que des valeurs de l'ordre de 0.7 à 0.3 montrent une diminution de variance appréciable associée au terme sinusoïdal.

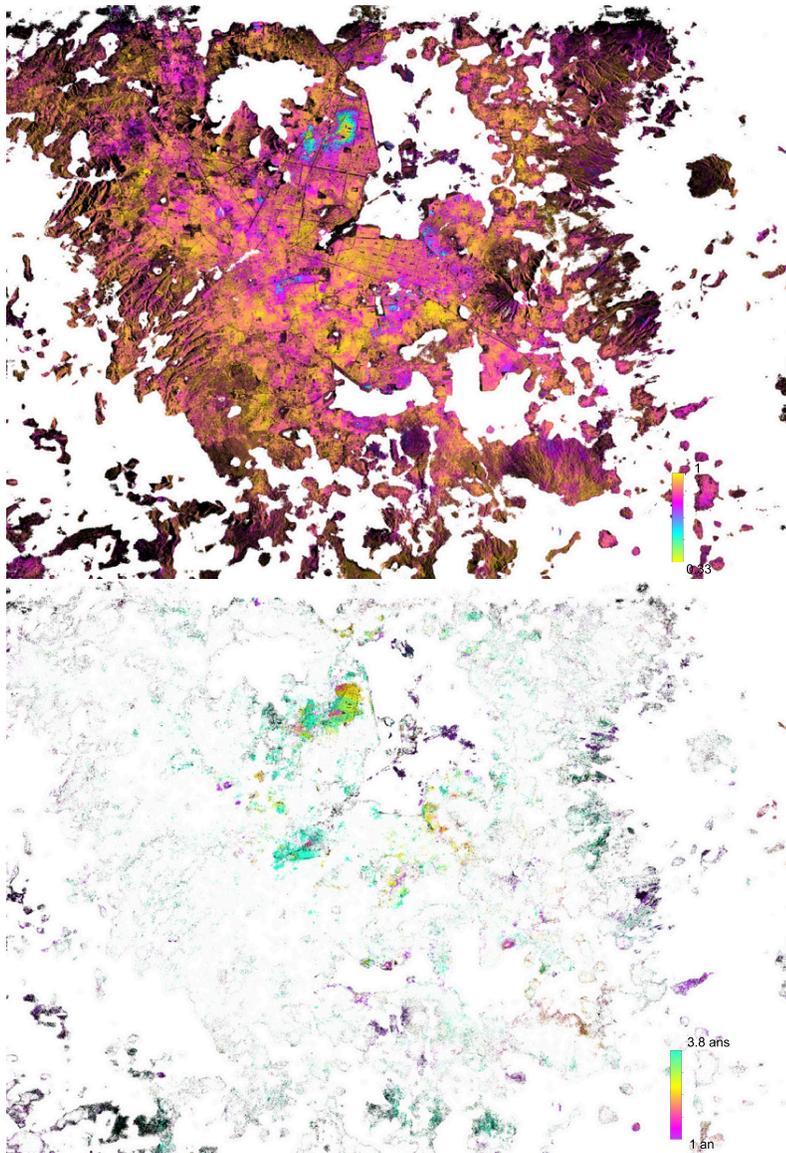


FIG. 4.22 – A gauche : Rapport entre les résidus,  $\frac{res_{sin}}{res_2}$ , avec ( $res_{sin}$ ) ou sans ( $res_2$ ) ajustement avec une sinusoïde en temps. A droite : Meilleure période  $T$  pour chaque pixel.

Finalement, la carte correspondante à la meilleure période  $T$  pour chaque pixel est présentée sur la figure 4.22b. Pour la construire, seules les zones à amplitude  $A$  plus grande que 0.32 LOS cm et  $\phi_{RMS_{pixel}}^l > 0.35$  ont été prises en compte. On peut noter l'absence du terme saisonnier ( $T = 1$  an) dans les zones principales où la déformation n'est pas parfaitement quadratique en temps, où les périodes caractéristiques sont plutôt de 2 à 3.5 ans. Il faudra donc allonger la série temporelle pour mieux caractériser cette déformation interannuelle. Les zones avec un éventuel comportement saisonnier se trouvent plutôt dans des endroits non urbanisés, mais la significativité du terme saisonnier reste à démontrer.

## 4.6 Comparaison de mesures de la subsidence : InSAR, nivellement, GPS

Dans cette section, je rassemble les différentes données de subsidence auxquelles j'ai pu avoir accès.

Les données de nivellement en ma possession comprennent 25 points mesurés par le Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM). Ces 25 points appartiennent à un ensemble beaucoup plus nombreux de points localisés sur la zone métropolitaine de la ville de Mexico, toutefois, en accord avec le SACM, dans un premier temps nous avons seulement eu accès à un premier ensemble de points pour effectuer des comparaisons et "valider" nos mesures. Les 25 points sont repartis sur 5 sites de la zone métropolitaine de la ville de Mexico : Zocalo , Aéroport, Xochimilco, Nezahualcoyotl et Chalco (localisés sur la carte de la figure 4.25). Toutefois nous n'avons fait la comparaison que sur un total de 16 points, le reste se trouvant sur des zones dans lesquelles nous perdons la cohérence et où des mesures InSAR n'ont pas pu être prédites.

Des informations sur les GPS existants dans la ville de Mexico ont été tirés de l'article [Cabral-Cano et al. [2008]]. Comme cela a été dit dans le chapitre 2.5.3.2, il s'agit de quelques stations permanentes. Une d'entre elles, placée dans l'université, UIGF, fonctionne depuis 1997, une autre, UPEC, est placée au centre ville depuis avril 2004, le reste (MRRA, MPAA, et MOCS) sont placées autour de l'aéroport depuis 2005. Un point de campagne GPS, situé sur l'aéroport, AIBJ, a été mesuré 10 fois par sessions de 24 heures chacune, à la fin de la saison de sécheresse (Mai-Juin) entre 1995 et 2001.

### 4.6.0.1 InSAR-nivellement

**Points de nivellement et séries temporelles issues du traitement InSAR** Les données de nivellement sont échantillonnées avec un pas de temps variable (de 2-4 ans), dépendant de l'année où les campagnes de nivellement ont pu être réalisées dans la ville. Pour la période des études InSAR (fin de 2002 à début 2007), deux échantillons de nivellement existent (l'un à la fin de 2002 et l'autre fin 2005). Nous avons comparé la valeur des pentes de déformation pour la période commune (fin 2002 à fin 2005) estimées sur les échantillons de nivellement et les acquisitions InSAR tirées des séries temporelles des pixels correspondants à la localisation des points de nivellement. Les résultats sont concentrés dans le tableau 4.1.

Sur la première colonne de la table, la première lettre des labels des points représentent la zone à laquelle ils appartiennent (i.e. z-zocalo, a-aeroport, x-xochimilco, n-nezahualcoyotl, c-chalco.). Évidemment, les erreurs sur les pentes calculées à partir des données de nivellement sont plus importantes puisque elles sont estimées par 2 mesures seulement, tandis que les pentes calculées à partir des données InSAR sont estimées en utilisant environ 27 acquisitions (fin 2002-fin 2005). Nous pouvons remarquer qu'en général les valeurs sont en très bon accord sauf pour trois points (a9, x15 et n20). De plus les taux de subsidence les plus importants se trouvent sur la zone de Nezahualcoyotl, ce qui est bien en accord avec nos observations.

Les courbes issues des données complètes (de  $\sim 1990$  à 2005) de nivellement sur les 16 points sont présentées sur les figures 4.23 et 4.24. On voit que pour le point a9, la vitesse obtenue par nivellement entre fin 2002 et fin 2005,  $\sim 0.17$  m/an, présente un fort fléchissement par rapport à la tendance générale entre 1984 et 2002 de l'ordre de 0.35 m/an. La mesure InSAR, elle, est de 0.29 m/an. On peut donc penser qu'il y a une erreur de

Point	nivellement	InSAR
z1	-0.1169858	-0.1172804
z2	-0.1146984	-0.1185323
z4	-0.1066694	-0.09601212
z5	-0.07293051	-0.09747577
a7	-0.2650826	-0.2574458
a8	-0.224666	-0.2465796
a9	-0.1745817	-0.2927402
a10	-0.2765765	-0.2760062
x15	-0.1354256	-0.03385449
n16	-0.3198788	-0.3571049
n17	-0.3424748	-0.3397885
n18	-0.3418124	-0.3368419
n19	-0.3153589	-0.3450357
n20	-0.341899	-0.3614820
c21	-0.2913092	-0.2489466
c23	-0.2659905	-0.2536292

TAB. 4.1 – Comparaison des vitesses de subsidence (en m/an) pour la période fin 2002- fin 2005, tirées des données de nivellement et des séries temporelles InSAR.

mesure de nivellement fin 2005 pour ce point. Le point x15 présente lui aussi une évolution atypique avec un point peut être anormal fin 2002. Si ce point est exclu, la vitesse entre fin 2000 et fin 2005 est plutôt faible, en accord avec la mesure InSAR. Par contre le point n20 présente une évolution bien linéaire de la déformation avec le temps, témoignant d'une forte vitesse de subsidence, incompatible avec la mesure InSAR plus faible.

Les courbes rouges montrent la régression linéaire faite sur les mesures. En général le modèle linéaire s'ajuste bien aux données. Les résidus (écarts à la linéarité) sont aussi présentés.

#### Carte de nivellement et carte de la vitesse moyenne issue du traitement InSAR

Sur la figure 4.25(noir et blanc) la carte du taux de subsidence moyen mesuré par nivellement entre 1992 et 2005 est présentée et peut être comparée à la carte de vitesse moyenne dérivée de l'analyse InSAR (figure 4.25(couleur)). La carte de vitesse moyenne présente une frange tous les 4 cm/an pour essayer d'avoir le même nombre de courbes de niveaux que celle du nivellement. Toutefois, les courbes de niveau sur la carte de nivellement apparaissent parfois tous les 2 cm/an parfois tous les 4 cm/an. On constate que les deux cartes se ressemblent beaucoup. Les maximums de subsidence sont placés aux mêmes endroits sur les deux cartes. Les détails des courbes se ressemblent beaucoup aussi. En revanche, il est intéressant de noter que le lien entre les deux principales zones de subsidence (nord-sud) n'est pas fait sur la carte de nivellement.

#### 4.6.0.2 InSAR-GPS

Les localisations (approximatives) des stations GPS se trouvent sur la carte de la figure 4.26. Malheureusement je n'ai pas eu accès aux coordonnées précises, donc le repérage de ces mêmes points sur la carte InSAR est approximatif. Par exemple, le placement des

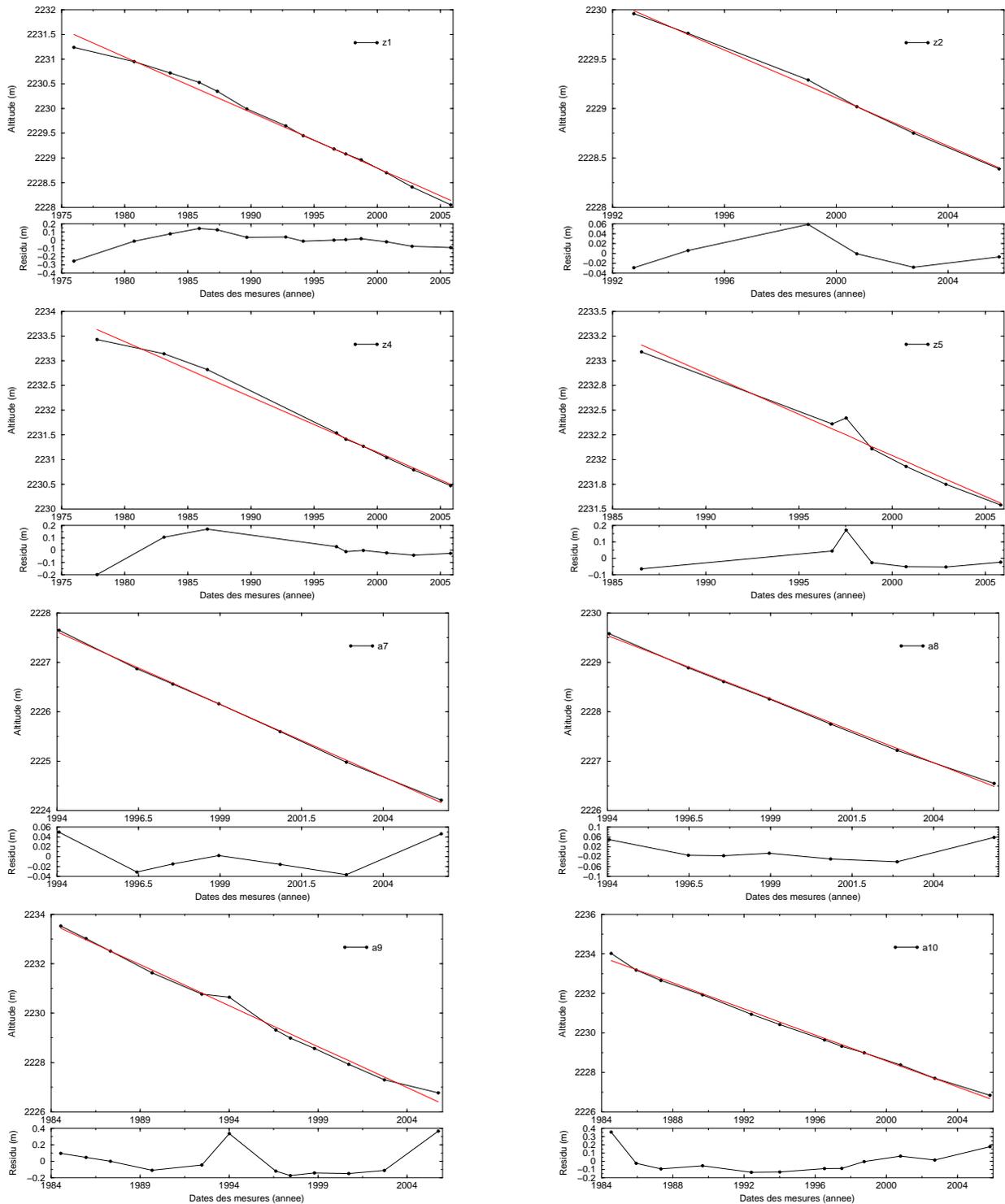


FIG. 4.23 – Groupe 1. Séries temporelles de nivellement pour un ensemble de 16 points repartis dans la zone métropolitaine de la ville de Mexico. Mesures réalisées par le Sistema de Aguas de la Ciudad de Mexico.

3 stations GPS, MOCS, MRRA, et MPPA, a été fixé à la localisation des stations de métro Oceania, Rio de los Remedios et Pantitlan, respectivement, telles que localisées sur

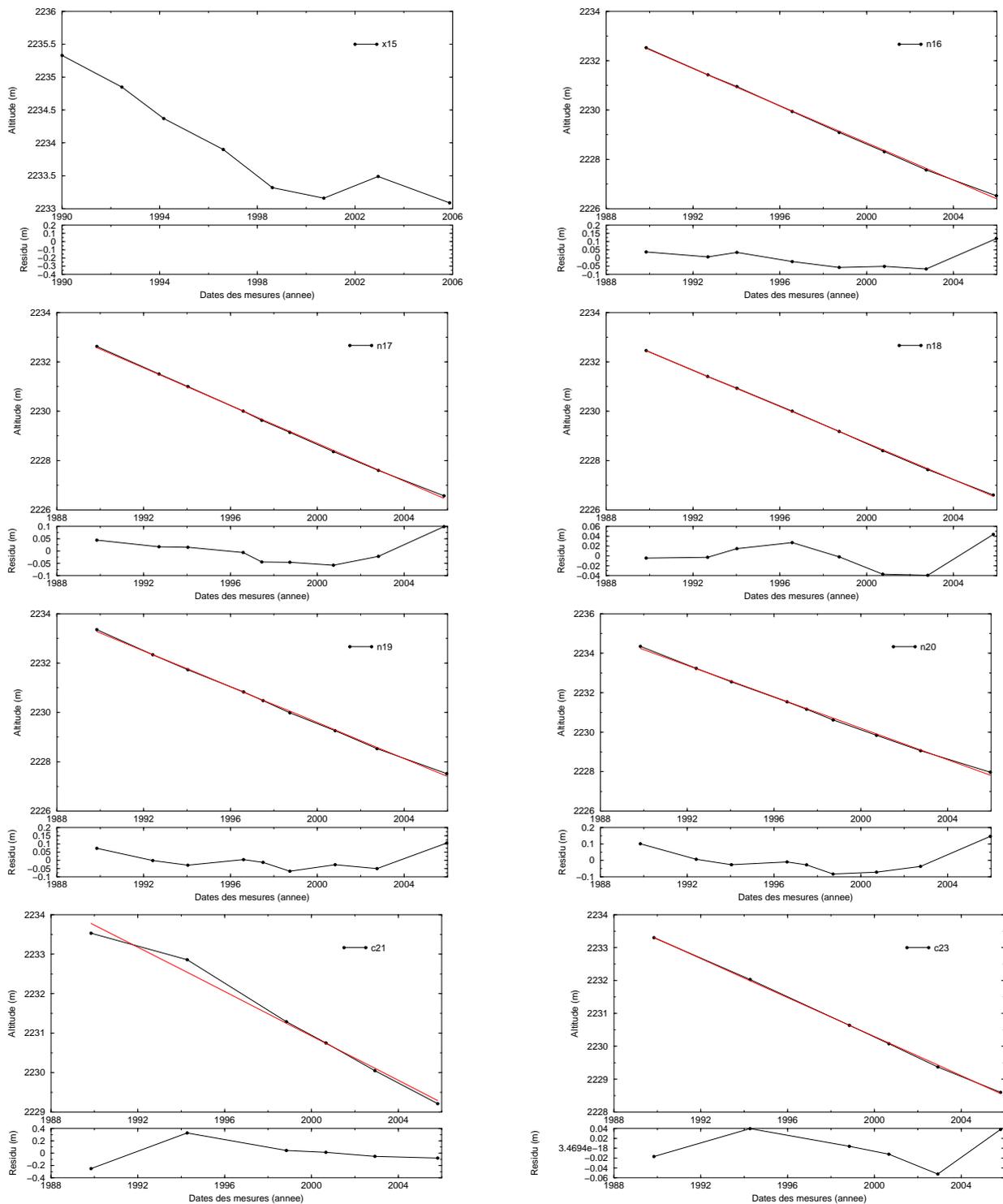


FIG. 4.24 – Groupe 2. Identique Figure 4.23.

Google Earth et repérées sur la carte d'amplitude radar. Les pentes GPS sont estimées sur l'ensemble des échantillons disponibles pour chacun de sites GPS. La pente InSAR est extraite de la carte de vitesse moyenne pour la période fin 2002 - début 2007. Dans la table suivante sont concentrées les valeurs comparatives des pentes GPS-InSAR estimées.

Point	GPS	InSAR
UIGF	-1.17	-0.2
AIBJ	29.1	30
MRRA	25.6	27
MPPA	21.2	23.5
UPEC	8.4	9
MOCS	16.9	22.6

TAB. 4.2 – Valeurs de taux de subsidence (cm/an) enregistrées sur des stations GPS et comparaison avec les mesures InSAR correspondantes. Pentes en cm/an.

En général, nous trouvons un bon accord entre les mesures, sauf sur le point MOCS. Néanmoins, il faut rappeler qu’il s’agit de localisations approximatives des points. Dans le cas de la station MOCS par exemple, elle est installée à côté d’une zone à forts gradients dû à l’existence d’une petite colline. Les valeurs de subsidence varient donc de façon importante d’un pixel à autre.

Les comparaisons GPS-InSAR et Nivellement-InSAR bien qu’encourageantes, en sont encore à un stade préliminaire. La précision estimée pour les séries InSAR sans les liens manquants et sans problème de fermeture est inférieure au mm/an. Il faudrait conduire une comparaison systématique des points de nivellement, tenant compte des possibles erreurs ponctuelles, avec la mesure InSAR, pour estimer l’écart moyen entre les deux mesures.

#### 4.7 Réponse de la compaction de l’aquitard aux variations de niveaux potentiométriques.

Des essais pour modéliser la subsidence de la ville de Mexico en fonction du pompage ont été réalisés par Aguilar-Perez et al. [2006] et Rivera-Bustos [1990] par exemple. Le premier a fait une simulation de l’évolution de la subsidence sur deux points pour estimer les paramètres nécessaires pour d’abord caler un modèle sur des données de nivellement, et puis simuler la subsidence à long terme. Rivera-Bustos [1990] a aussi essayé de simuler la subsidence provoquée par le pompage à partir de la modélisation d’un système aquifère-aquitard quasi-tridimensionnel. Néanmoins il constate le besoin d’une quantité plus importante de données pour pouvoir utiliser de manière opérationnelle son modèle et faire des prédictions fiables. Il insiste sur le besoin d’avoir plus des données concernant l’épaisseur des couches argileuses car le modèle est très sensible à ce paramètre, puis le besoin de données sur la constante de pré-consolidation et des données permettant la connaissance plus précise de la géométrie du système aquifère-aquitard. Ces données ne peuvent pas être générées de manière facile puisque le déploiement d’un réseau significatif des piézomètres de contrôle sur l’extension de la cuvette de Mexico s’avère nécessaire. Quant à la connaissance précise de la géométrie interne du système aquifère-aquitard, e.g., l’existence d’aquifères perchés ou de discontinuités hydrauliques, s’avère comme une tâche impossible à accomplir, vue l’extension de la cuvette et sa composition complexe. Rivera-Bustos [1990] conclut aussi que la subsidence ne peut être reproduite qu’à travers un modèle non linéaire qui prenne en compte la variation de la perméabilité et du coefficient de compressibilité  $\alpha$  dans le temps (avec la compaction). Il mentionne aussi que la subsidence du centre ville va se prolonger encore longtemps même si l’on arrête de pomper aux alentours. Cela permet

d'imaginer que la réponse de la compaction de l'aquitard aux variations potentiométriques dépendant des taux d'extraction n'est pas immédiate et qu'elle se manifeste plutôt après une période de temps correspondant au temps caractéristique de diffusion de la pression de fluide dans les couches argileuses. L'évolution presque parfaitement linéaire de la subsidence dans le temps semble confirmer cette conclusion, car le niveau potentiométrique de la nappe phréatique présente très probablement une composante saisonnière et interannuelle assez marquée, très peu représentée dans la subsidence. Donc, a priori, nous n'espérons pas trouver de corrélations claires entre la subsidence et le taux de pompage au moins à court terme. Cependant, il faut remarquer que l'arrêt du pompage en centre ville dans les années 1950 et 1960 a été suivi, après 1965, d'une forte diminution du taux de subsidence. S'agit-il alors d'une coïncidence ? Est-ce que le niveau potentiométrique a effectivement cessé de décroître à ces dates sous le centre ville ? La perméabilité de l'aquifère permet-elle une homogénéisation rapide des niveaux potentiométriques ?

Pour notre part, il a été impossible de chercher une corrélation puisque nous n'avons pas pu avoir accès à des données de pompage. Toutefois, nous avons essayé de comparer les courbes, issues des données de pompage, présentées par Carrera-Hernández and Gaskin [2007] (1969-2000) avec nos résultats (2002-2007) même si les périodes étudiées ne sont pas les mêmes. La figure 4.26 présente les vitesses moyennes InSAR sur chaque pixel de 20 x 20 m pour la période 2002-2007, calculés à travers l'approche InSAR décrite dans le chapitre précédente et les courbes du niveau potentiométrique pour l'année 2000. Avant de faire des conclusions sur les deux figures, il faut dire que sur leur article Carrera-Hernández and Gaskin [2007] insistent sur le fait que les taux d'extraction pour les puits REPGA ne correspondent pas aux taux réels mais permis, et que l'information sur cet ensemble de puits est incomplète. En analysant les deux figures, on peut constater que les zones de majeure subsidence sur la carte de vitesse (InSAR) ne semblent pas correspondre avec celles de plus fort débit de pompage, plutôt situées en périphérie de la surface subsidente, sauf sur la zone de Chalco. Les "poches" formées par les niveaux potentiométriques ne semblent pas non plus correspondre avec les "poches" de subsidence. Finalement, sur la zone où nous avons trouvé des écarts à la linéarité importantes il existe des puits avec des variations de débit de pompage mais, il se trouve que c'est le cas aussi pour la plupart des puits présentés sur l'article et placés sur des zones différentes.

---



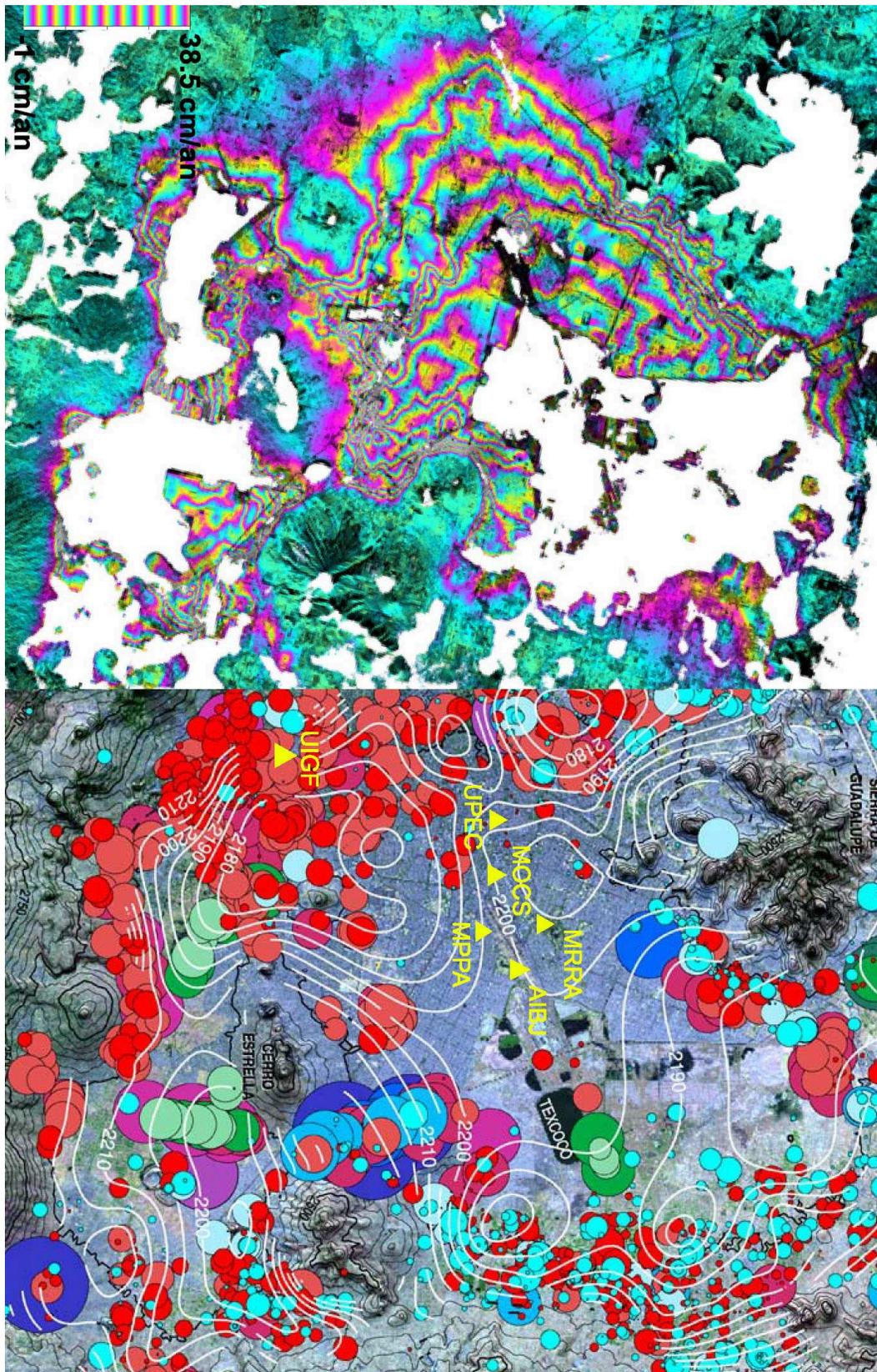


FIG. 4.26 – Carte de vitesse moyenne annuelle InSAR et carte de taux de pompage et courbes de niveau potentiométrique ( figure modifiée d'après Carrera-Hernández and Gas-kin [2007]).



---

# Conclusion

Dans le chapitre 3 j'ai présenté une méthode pour aider le déroulement des interférogrammes, obstacle principal pour analyser la subsidence de la ville de Mexico par InSAR. Le déroulement des interférogrammes sur la ville de Mexico est rendu très délicat par la perte de cohérence, le grand nombre de franges et les forts gradients différentiels existants. Pour cette raison, même si des travaux présentant la subsidence sur la ville de Mexico mesurée par InSAR existaient, jamais des séries temporelles de la déformation n'avaient été montrées. Le principe de la méthode consiste à réduire le nombre de franges à dérouler en ôtant de l'interférogramme original la contribution atmosphérique stratifiée et une première estimation grossière de la subsidence, obtenue en pondérant la somme des 5 meilleurs interférogrammes. La phase résiduelle, contenant moins de franges et des gradients de phase relativement plus lisses, est plus facilement déroulable. L'interférogramme résiduel est déroulé par SNAPHU après avoir appliqué un filtre pass-bas dont l'effet sera restitué plus tard. La méthode décrite dans ce chapitre consiste en trois itérations au cours desquelles j'ai réussi à éliminer proprement les résidus orbitaux et les effets atmosphériques stratifiés sur chacun des interférogrammes utilisés, ce qui n'avait pas été fait sur les interférogrammes de la ville de Mexico auparavant.

J'ai analysé les erreurs de déroulement après chaque itération en vérifiant la fermeture du système interférométrique redondant. Ceci est un outil qui s'avère très utile pour détecter la localisation des erreurs de déroulement et l'interférogramme qu'elles affectent. Néanmoins, cet outil n'est utilisé uniquement que comme diagnostique, indépendant donc de la méthode de déroulement utilisée.

Les méthodes pour aider le déroulement et pour vérifier la consistance du système interférométrique peuvent être appliquées sur d'autres zones d'étude, si la forme spatiale de la déformation étudiée reste relativement stable au cours du temps (avec de possibles fluctuations d'amplitude et de signe). C'est souvent le cas des déformations causées par des variations potentiométriques dans les aquifères ou l'activité minière.

De plus, j'ai présentée une méthode d'inversion utilisant des interférogrammes construits avec des petites lignes de base, différente de la décomposition en valeurs singulières (SVD) "classique", et s'avérant mieux adaptée à la configuration des données interférométriques sur la ville de Mexico. Cette méthode est appliquée sur l'ensemble des pixels mais ne donne des résultats différents de l'inversion SVD que lorsque le système interférométrique inversé présente des liens manquants. Elle est particulièrement utile quand des groupes d'images séparés ne se chevauchent pas le long des axes temporel ou de ligne de base perpendiculaire. Cette situation arrive fréquemment en présence d'une forte décorrélation temporelle et géométrique sur les interférogrammes. La méthode d'inversion peut être appliquée telle quelle à d'autres zones d'étude si la déformation est principalement linéaire en temps, ou bien en utilisant des contraintes spécifiquement adaptées à d'autres types de comportement temporel de la déformation.

---

Les séries temporelles résultantes donnent une mesure de la déformation entre fin 2002 et début 2007, avec 38 pas de temps, sur chaque pixel de 20 x 20 m, dans les zones cohérentes. De plus, une carte du taux de subsidence moyen sur la période de fin 2002 à début 2007 a été construite comme résultat de la régression linéaire appliquée sur la série temporelle de chaque pixel. A cette carte peuvent être associées des cartes qui vont qualifier la qualité de la mesure, à savoir, le nombre d'images et d'interférogrammes utilisés, le nombre de liens manquants, et l'écart moyen à la fermeture du réseau d'interférogrammes.

Ces résultats seront utiles pour le gouvernement de la ville de Mexico qui dépense des sommes importantes pour réaliser tous les 4 ans des mesures de nivellement pour connaître l'évolution de la subsidence, mais surtout pour la population de la ville car les zones de plus forts gradients de subsidence présentent le plus de risques pour le bâti.

A la différence des méthodes PS, nous ne pouvons pas mesurer une déformation ou une erreur de MNT qui seraient ponctuelles ou qui seraient associées à des points cohérents isolés au sein d'une zone à couverture végétale, car nos interférogrammes ont été filtrés par le multilook de 5 en azimuth et par le filtre adaptatif de ROI\_PAC. Pour le faire, les effets du filtre adaptatif nécessiteraient d'être restitués, ce qui est possible, mais augmenterait le bruit de décorrélation sur la phase. Toutefois, malgré les filtres utilisés, nous sommes capables de récupérer des structures non ponctuelles mais à petite échelle comme on peut le constater sur la carte de vitesse moyenne.

Dans le chapitre 4, nous avons réalisé une analyse poussée des séries temporelles, pour constater que :

Premièrement, la subsidence dans la ville de Mexico est extrêmement linéaire avec des écarts à la linéarité très faibles dans la période comprise entre fin 2002 et début 2007. Elle est principalement concentrée dans la zone lacustre du bassin de Mexico où se trouvent les plus forts taux de subsidence. Pourtant il semble que la zone de transition composée par les dépôts alluviaux subside également avec des taux nettement plus modérés. Le besoin d'une meilleure définition des déplacements en champ lointain est nécessaire pour déterminer la déformation absolue autour de la zone de subsidence.

Deuxièmement, la carte de vitesse moyenne, issue de la régression linéaire de la subsidence en fonction du temps, est de bien meilleure qualité que le stack. En effet, cette carte de vitesse moyenne est beaucoup moins bruitée, a une majeure précision et une définition plus fine des gradients de subsidence contenant des détails à petites longueurs d'onde (fiabiles lorsque l'écart à la fermeture,  $\phi_{RMS_{pixel}}$ , est faible) que le stack ne contient pas.

Troisièmement, les écarts à la linéarité, de l'ordre de 5 cm maximum et d'étendue limitée par rapport à l'ensemble de la zone subsidente, peuvent être divisés en écarts quadratiques et périodiques. Les premiers représentent les zones où la déformation s'accélère ou décélère au cours de la période étudiée (2002-2007). Les derniers, représentent un comportement pluriannuel sinusoïdal avec des périodes allant surtout de 2 à 3.5 ans. Les écarts périodiques avec les plus fortes amplitudes sont localisés dans la zone de Ciudad Azteca et alentours. La significativité des termes saisonniers (T=1 an), semblant se trouver dans des zones non urbanisées, reste à être démontrée vu sa faible amplitude et leur faible couverture spatiale. Concernant la comparaison entre les quelques mesures de nivellement et GPS auxquelles on a pu avoir accès et nos mesures de vitesse moyenne sur la période de 2002 à 2005, nous trouvons un bon accord en général.

Enfin, sur le plan interprétatif, il semble que la réponse de la compaction de l'aquitard aux variations potentiométriques dans l'aquifère, dépendante des taux d'extraction d'eau, n'est pas immédiate, mais différée par le temps de diffusion dans un milieu peu perméable.

Néanmoins la question reste ouverte car il faudrait analyser plus en détail la relation entre niveaux potentiométriques et subsidence. Pour cela, il faudrait avoir accès aux niveaux potentiométriques au cours du temps et connaître ses variations saisonnières et interannuelles.

Quant aux perspectives, il existe un bon nombre de pistes à exploiter, entre autres :

Par rapport à la mesure de la subsidence par InSAR, j'envisage :

- la continuation de la série ENVISAT, en profitant des données disponibles pendant la durée de vie de la mission (i.e., jusqu'en 2010-2012). Il s'agira d'incorporer les nouvelles acquisitions aux données actuelles pour produire les séries temporelles correspondantes.
- essayer l'approche mixte PS et petites lignes de base proposée par Hooper [2008] sur les données ENVISAT, et comparer avec nos résultats actuels. Est-ce que nous pourrions ainsi espérer récupérer des mesures de la déformation sur les zones non urbanisées et des mesures ponctuelles à travers cette approche ? Comment cette nouvelle information ponctuelle viendra compléter nos précédents résultats ?
- appliquer la méthode d'aide au déroulement sur la série d'images ERS sur la ville de Mexico couvrant la période 1995-2000. A priori, la distribution spatiale de la déformation n'a pas beaucoup changé entre 1995 et 2007. Cela pourrait être confirmé en regardant l'évolution des cartes de nivellement pour cette période. La carte de vitesse moyenne pourra être utilisée à la place du stack pour représenter la déformation à 35 jours par exemple. J'espère que cela pourra s'avérer utile pour franchir le gap temporel existant (1 an) dans la base de données ERS, en limitant les erreurs de déroulement.
- continuer l'étude de la subsidence sur la ville de Mexico en utilisant les données de la nouvelle mission COSMO-SkyMed. J'ai fait une demande à l'Agence Spatiale Italienne, à travers la soumission d'un projet, pour acquérir des images sur la ville. Les objectifs comprennent en plus le calcul du vecteur 3D (distance, azimuth et en vertical) des déplacements sur la partie sud du bassin de Mexico.
- étendre la comparaison InSAR et données de nivellement à la totalité de la superficie commune mesurée et faire de même avec la totalité de stations GPS existantes sur la ville de Mexico.

Du côté de l'interprétation des résultats j'envisage :

- développer la collaboration avec des spécialistes (hydrogéologues et mécaniciens des sols) des disciplines qui sont liées au problème de la subsidence de la ville de Mexico pour entreprendre la création d'une base de données qui puisse être accessible à travers un système d'information géographique. L'objectif serait de réunir la totalité, ou bien au moins une bonne partie de l'information relative au bassin de Mexico, incluant d'une part ses caractéristiques hydrogéologiques, i.e., principales zones géologiques et hydrologiques (épaisseur des couches argileuses, constantes de compressibilité, teneur en eau, localisation des puits, taux d'extraction des puits, niveaux potentiométriques) et d'autre part la localisation des données de nivellement, la localisation des données GPS, les séries temporelles InSAR, études de sismicité de la zone, etc.
- une observation de la "vérité terrain" pour caractériser à l'aide de la base de données, les propriétés spécifiques (urbanisation, hydrogéologie, etc) des zones de forts gradients, d'accélération ou de décélération de la déformation, et des zones à comportement pluriannuel afin d'avancer dans l'interprétation de la subsidence.



## Annexe A

# Mosaïque d'interférogrammes

Présentation des 71 interférogrammes filtrés par le filtre adaptatif de ROI\_PAC et non déroulés (1 frange=2.8 cm). Les interférogrammes correspondent aux liens entre les acquisitions présentées sur la figure (3.7). Ils sont classés par ligne de base temporelle ( $B_t$ ) croissante et à l'intérieur de chaque groupe par ligne de base perpendiculaire ( $B_\perp$ ) croissante (voir légende sur chaque figure).

---

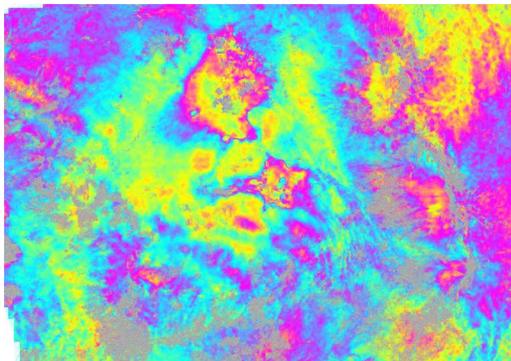
**35 jours**

FIG. A.1 – 2003.11.07-2003.12.12, 24

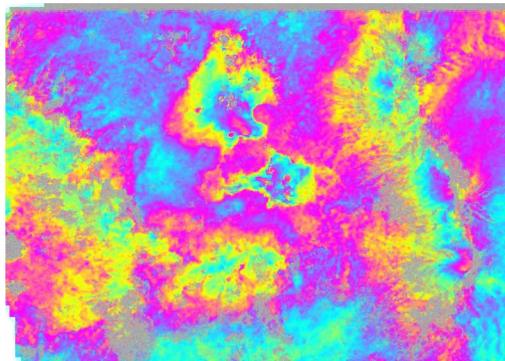


FIG. A.2 – 2004.11.26-2004.12.31, 103

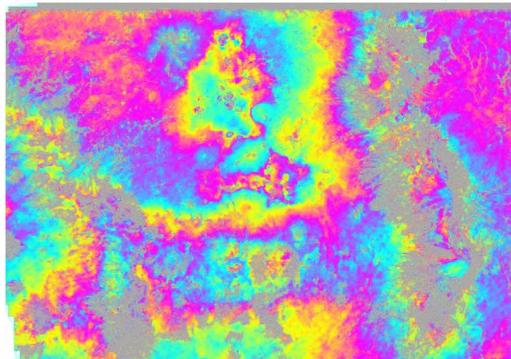


FIG. A.3 – 2004.12.31-2005.02.04, 219

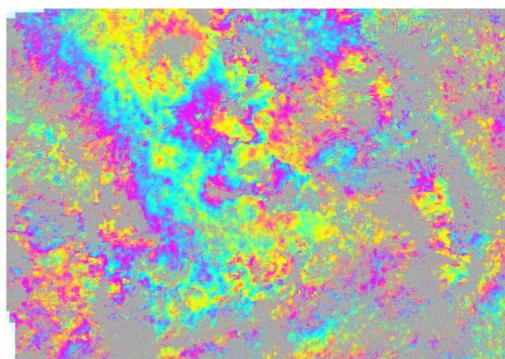


FIG. A.4 – 2003.06.20-2003.07.25, 232

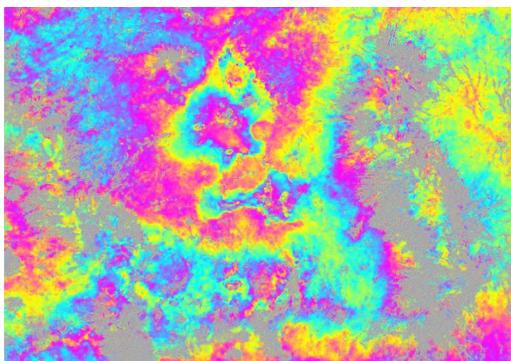


FIG. A.5 – 2007.02.09-2007.03.16, 252

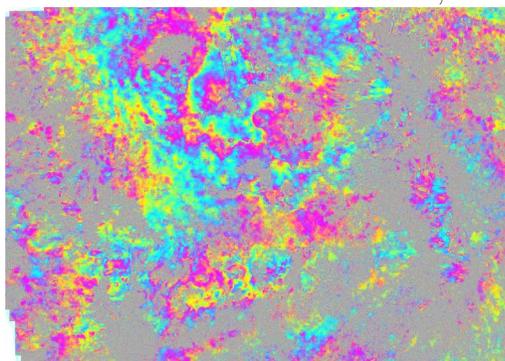


FIG. A.6 – 2003.07.25-2003.08.29, 321

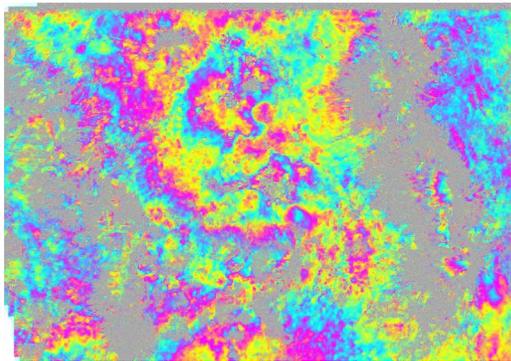


FIG. A.7 – 2005.03.11-2005.04.15, -355

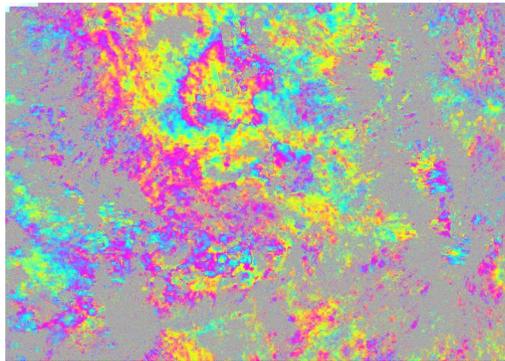


FIG. A.8 – 2005.07.29-2005.09.02, -377

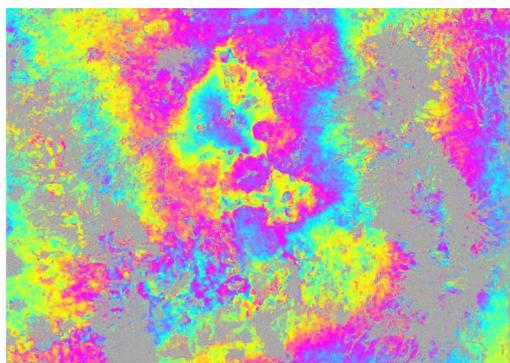


FIG. A.9 – 2007.01.05-2007.02.09, 382

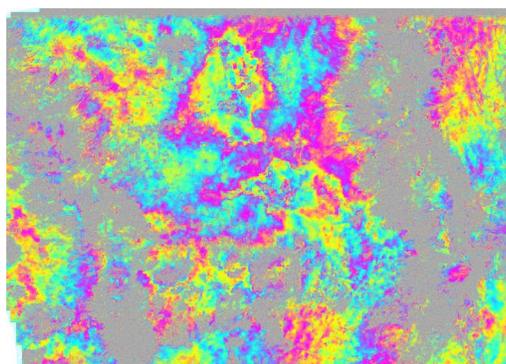


FIG. A.10 – 2005.02.04-2005.03.11, -391

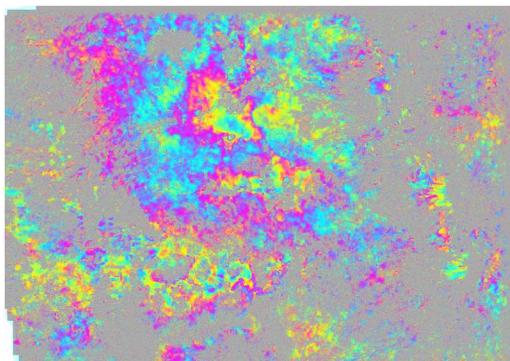


FIG. A.11 – 2005.06.24-2005.07.29, 396

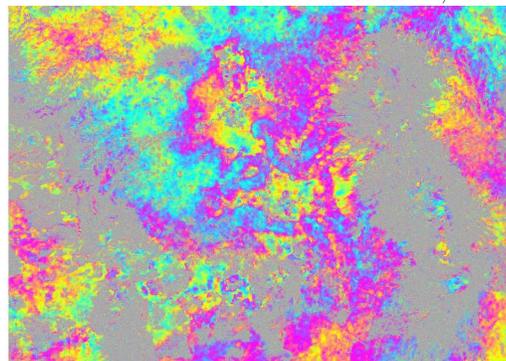


FIG. A.12 – 2006.02.24-2006.03.31, 396

**2 x 35 jours**

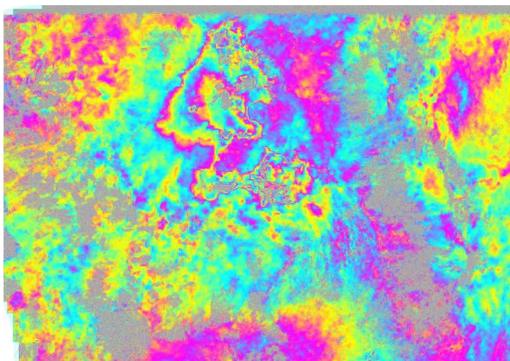


FIG. A.13 – 2003.12.12-2004.02.20, 13

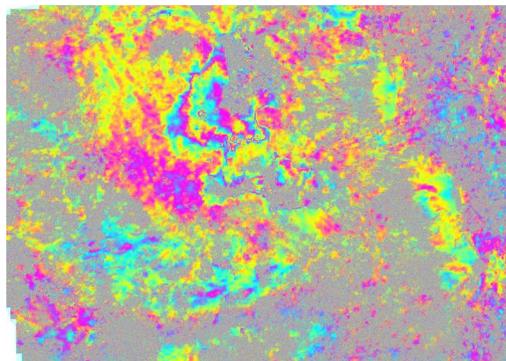


FIG. A.14 – 2005.06.24-2005.09.02, 19

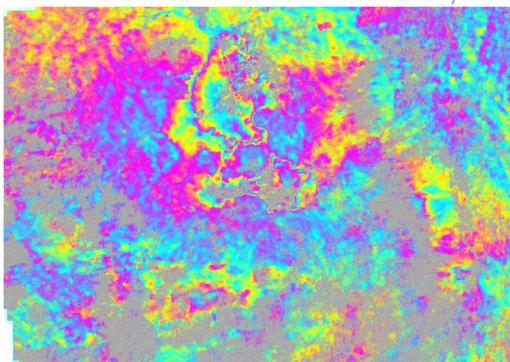


FIG. A.15 – 2005.09.02-2005.11.11, 29

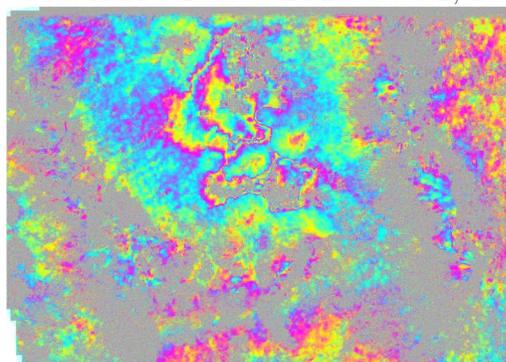


FIG. A.16 – 2005.04.15-2005.06.24, 66

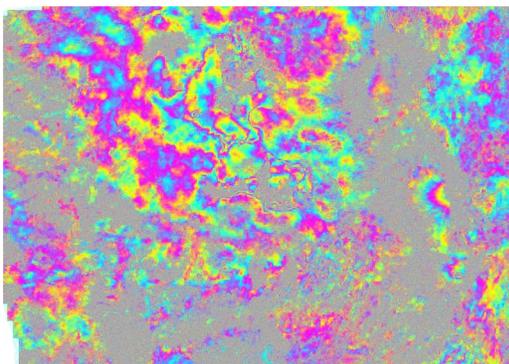


FIG. A.17 – 2005.10.07-2005.12.16, -79

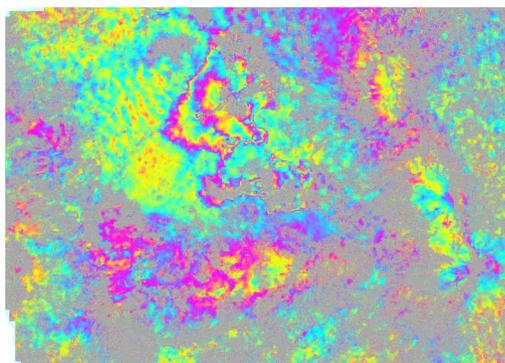


FIG. A.18 – 2003.06.20-2003.08.29, -89

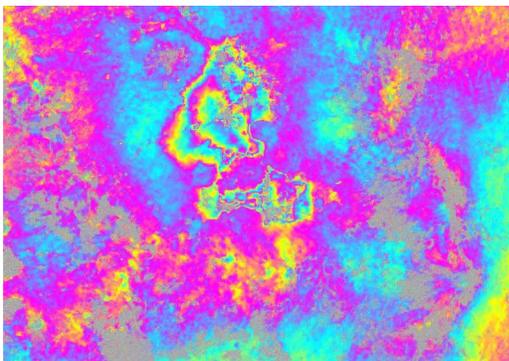


FIG. A.19 – 2006.12.01-2007.02.09, -89

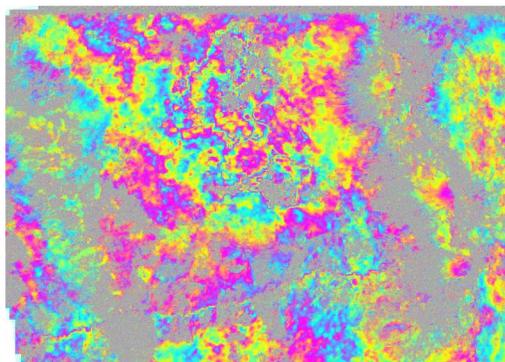


FIG. A.20 – 2005.03.11-2005.05.20, 106

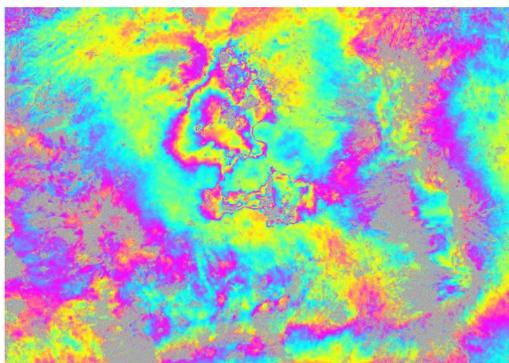


FIG. A.21 – 2007.01.05-2007.03.16, 130

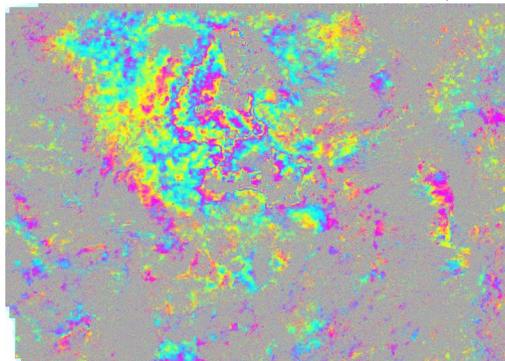


FIG. A.22 – 2005.05.20-2005.07.29, -131

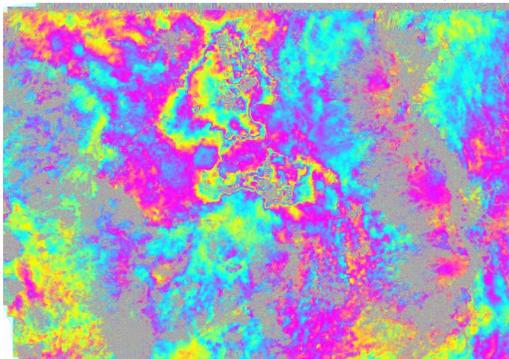


FIG. A.23 – 2004.12.31-2005.03.11, 172

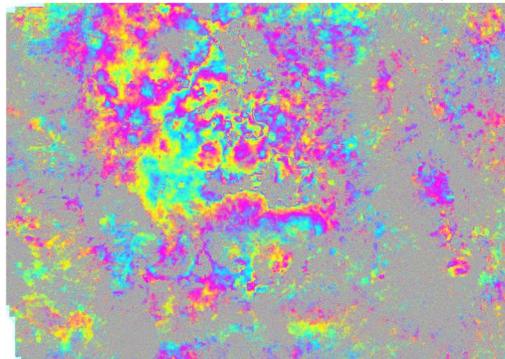


FIG. A.24 – 2003.04.11-2003.06.20, 177

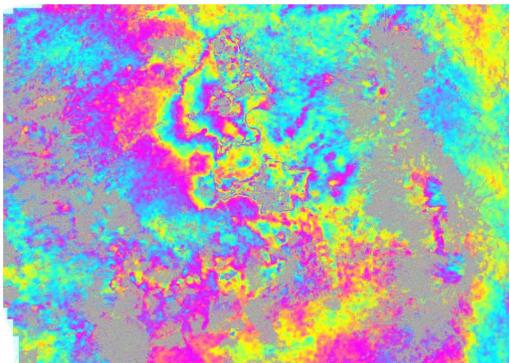


FIG. A.25 – 2006.01.20-2006.03.31, -180

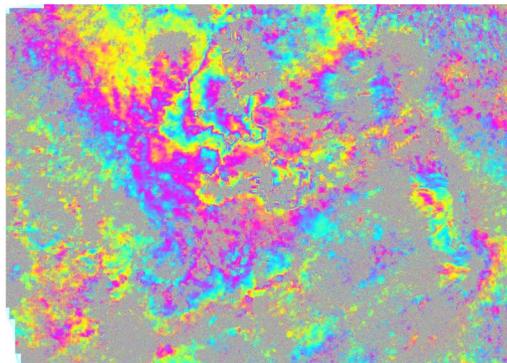


FIG. A.26 – 2003.07.25-2003.10.03, 186

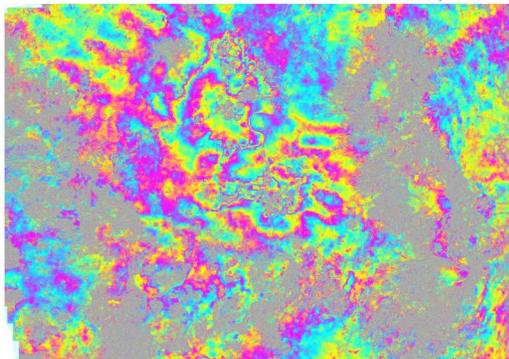


FIG. A.27 – 2005.12.16-2006.02.24, 272

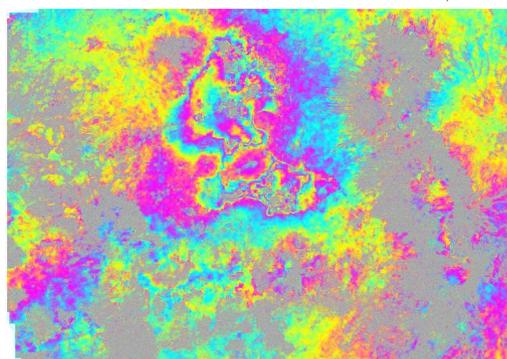


FIG. A.28 – 2004.11.26-2005.02.04, 322

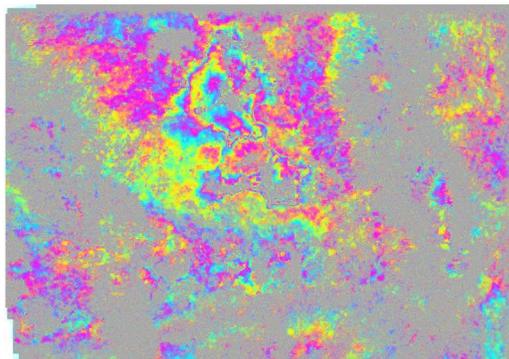


FIG. A.29 – 2004.09.17-2004.11.26, 354

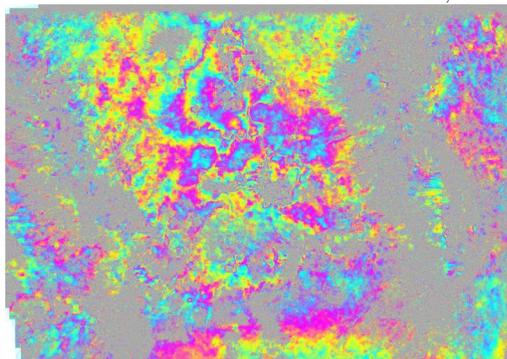


FIG. A.30 – 2004.02.20-2004.04.30, -399

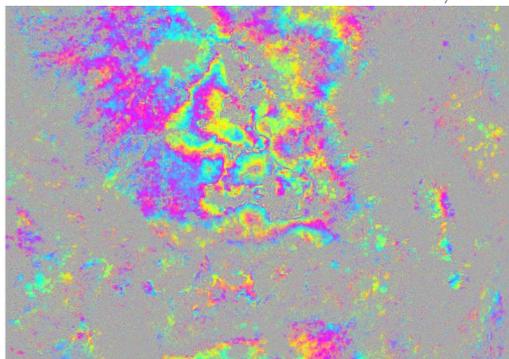


FIG. A.31 – 2004.03.26-2004.06.04, 402

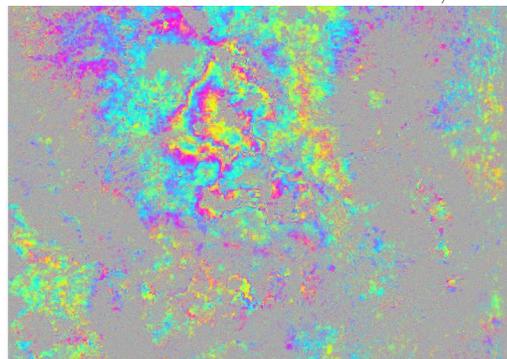


FIG. A.32 – 2003.10.03-2003.12.12, 499

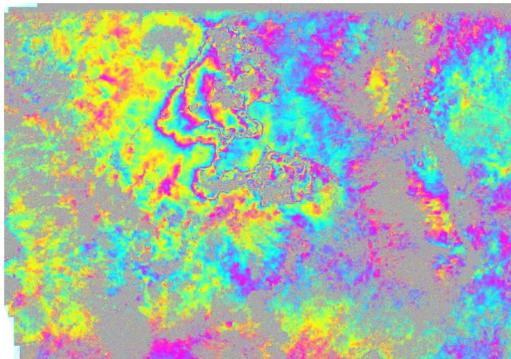
**3 x 35 jours**

FIG. A.33 – 2003.11.07-2004.02.20, 37

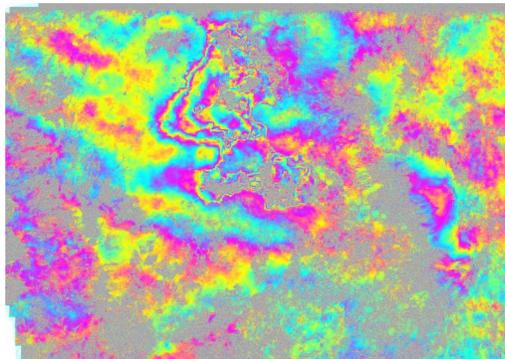


FIG. A.34 – 2003.10.03-2004.01.16, 44

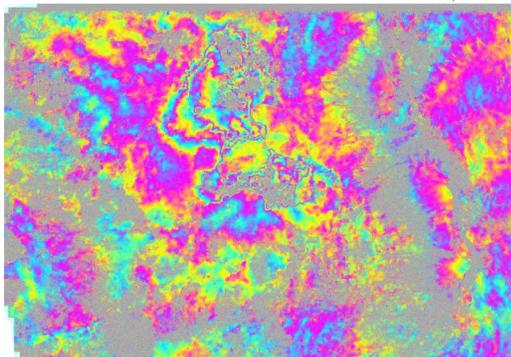


FIG. A.35 – 2004.11.26-2005.03.11, 69

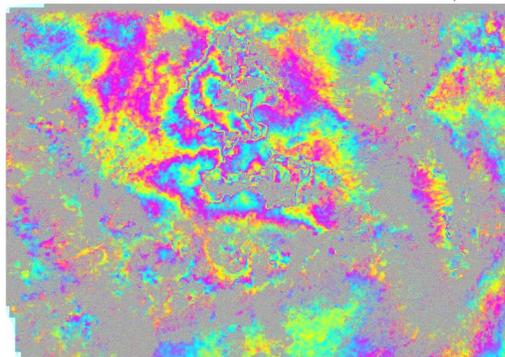


FIG. A.36 – 2004.01.16-2004.04.30, 131

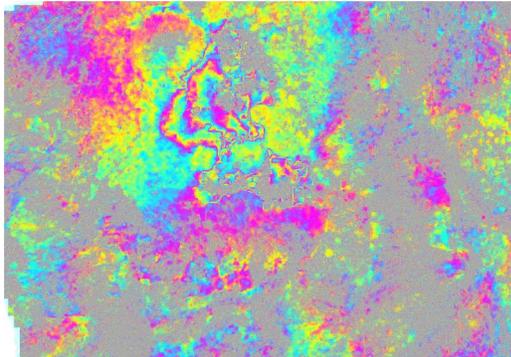


FIG. A.37 – 2006.02.24-2006.06.09, 177

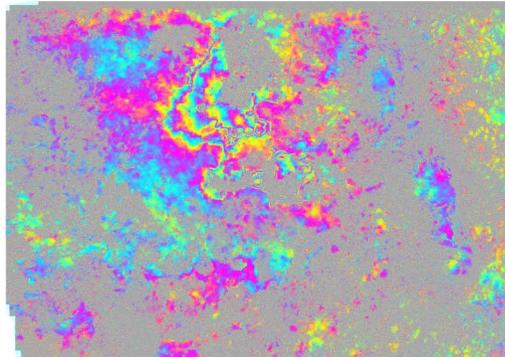


FIG. A.38 – 2004.06.04-2004.09.17, 257

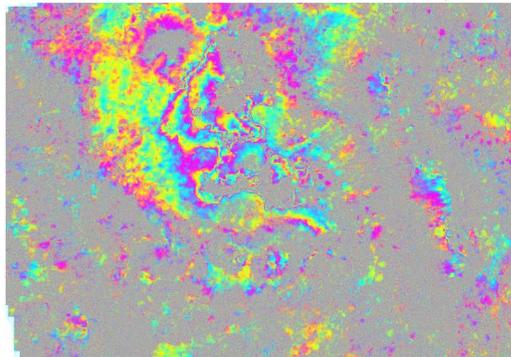


FIG. A.39 – 2004.04.30-2004.08.13, 258

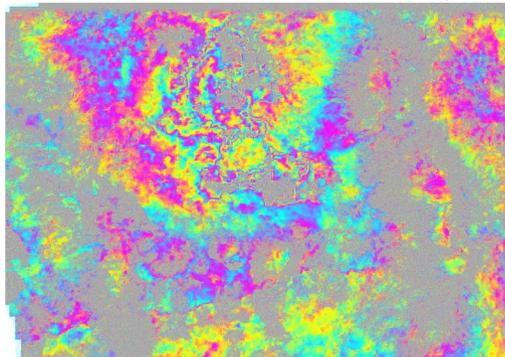


FIG. A.40 – 2005.02.04-2005.05.20, 285

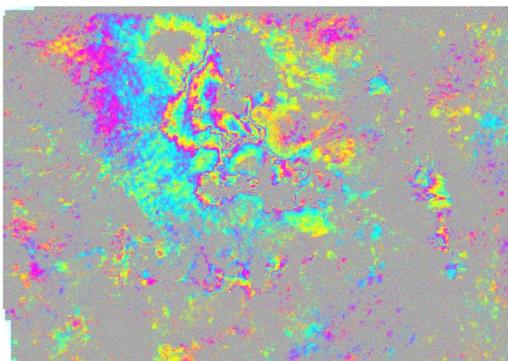


FIG. A.41 – 2005.04.15-2005.07.29, 330

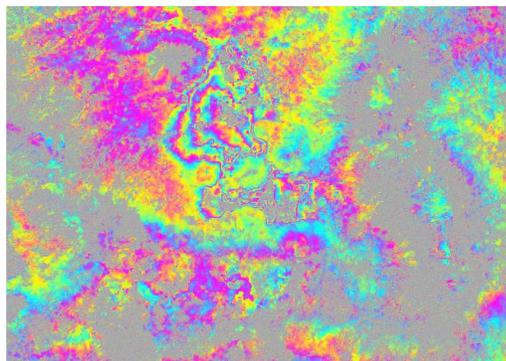


FIG. A.42 – 2006.12.01-2007.03.16, -341

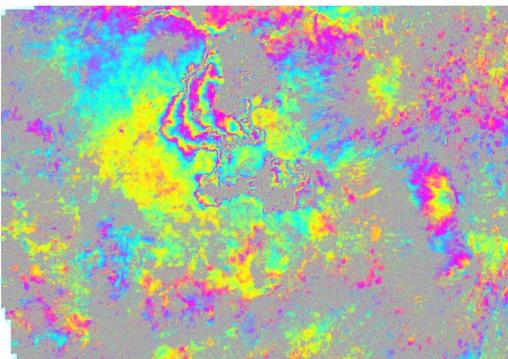
**4 x 35 jours**

FIG. A.43 – 2005.06.24-2005.11.11, 10

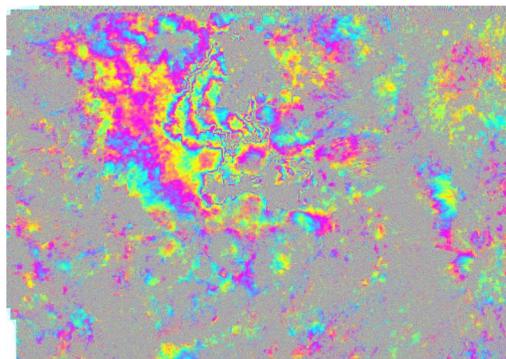


FIG. A.44 – 2005.03.11-2005.07.29, 25

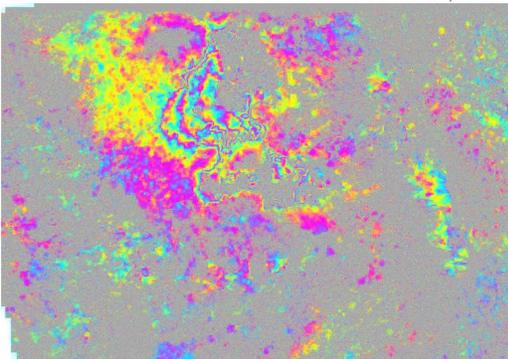


FIG. A.45 – 2005.04.15-2005.09.02, 47

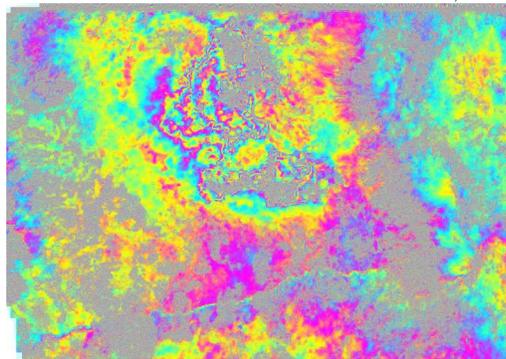


FIG. A.46 – 2004.12.31-2005.05.20, -66

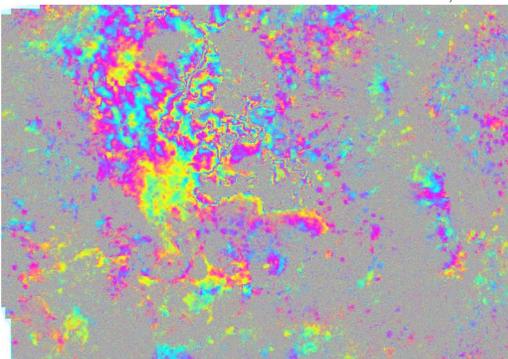


FIG. A.47 – 2003.04.11-2003.08.29, 88

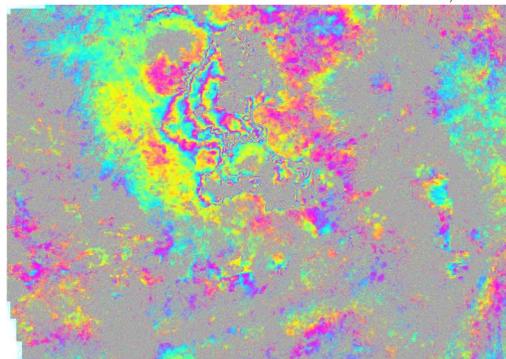


FIG. A.48 – 2005.10.07-2006.02.24, 193

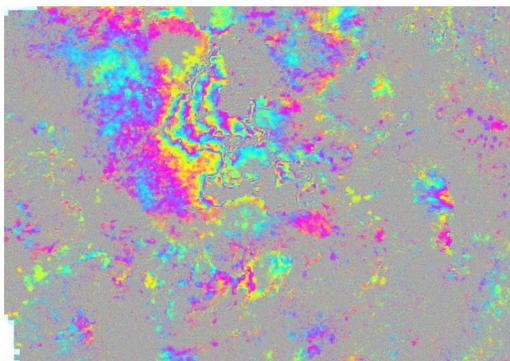


FIG. A.49 – 2004.06.04-2004.10.22, 259

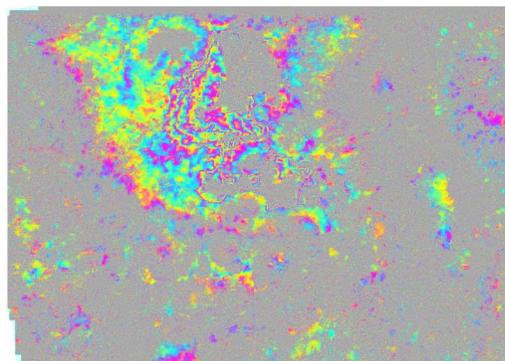


FIG. A.50 – 2005.05.20-2005.10.07, 271

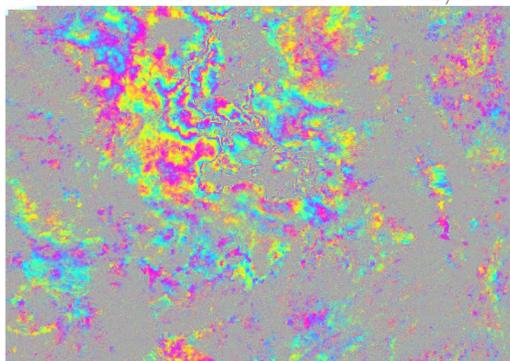


FIG. A.51 – 2005.07.29-2005.12.16, 323

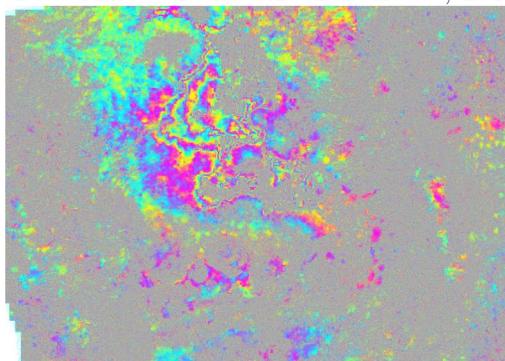


FIG. A.52 – 2003.03.07-2003.07.25, -347

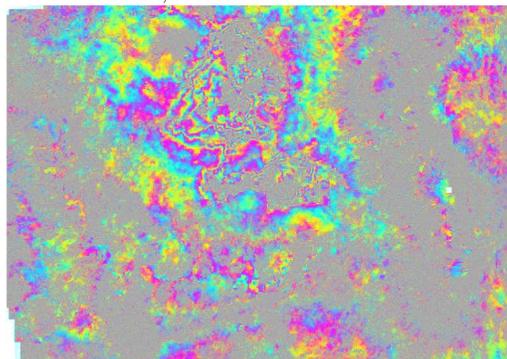


FIG. A.53 – 2002.11.22-2003.04.11, 388

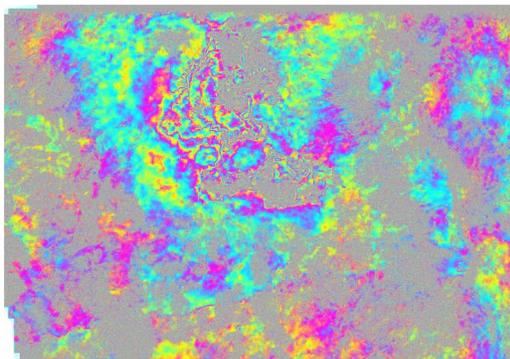
**5 x 35 jours**

FIG. A.54 – 2004.11.26-2005.05.20, 37

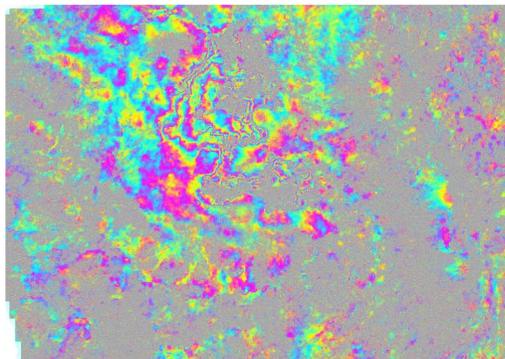


FIG. A.55 – 2005.12.16-2006.06.09, 95

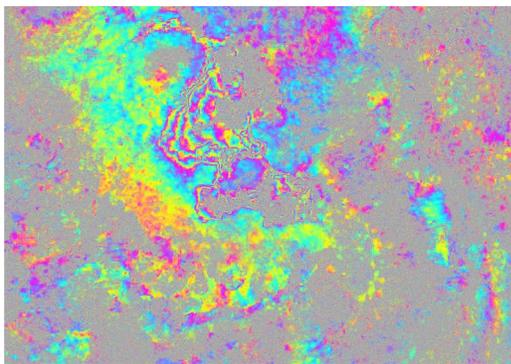


FIG. A.56 – 2006.06.09-2006.12.01, 105

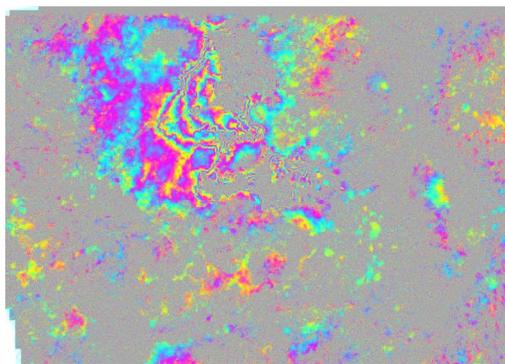


FIG. A.57 – 2004.02.20-2004.08.13, -141

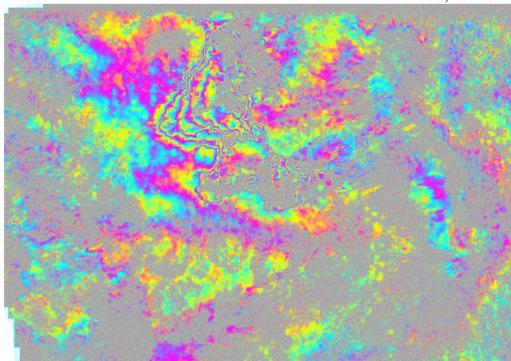


FIG. A.58 – 2003.07.25-2004.01.16, 142

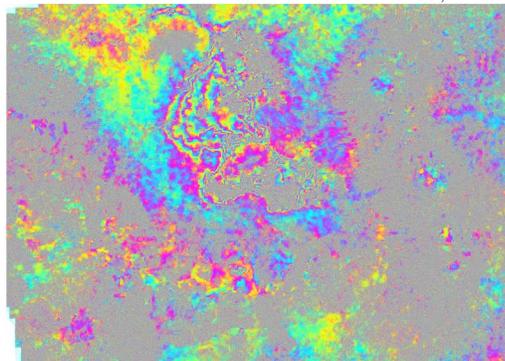


FIG. A.59 – 2005.11.11-2006.05.05, 255

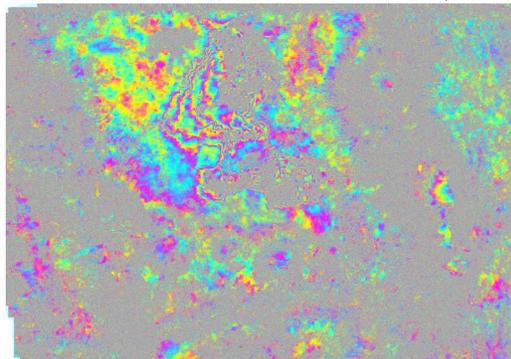


FIG. A.60 – 2004.09.17-2005.03.11, 285

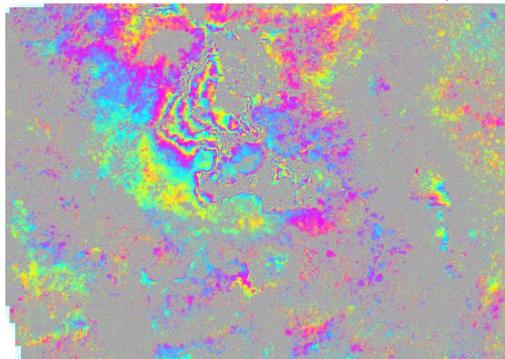


FIG. A.61 – 2004.08.13-2005.02.04, 332

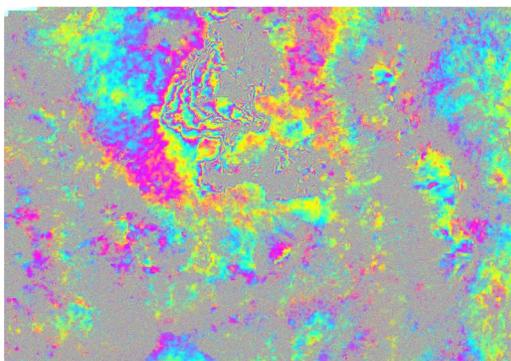
**6 x 35 jours**

FIG. A.62 – 2004.09.17-2005.04.15, 70

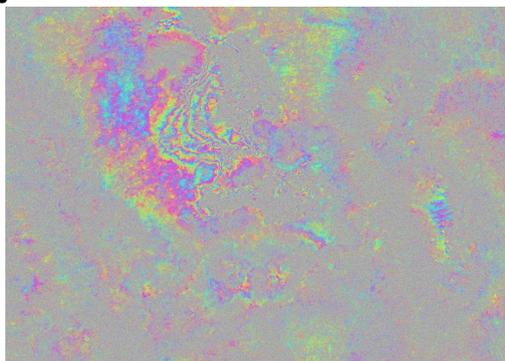


FIG. A.63 – 2003.10.03-2004.04.30, 87

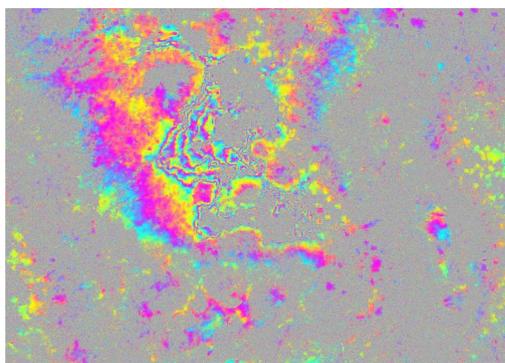
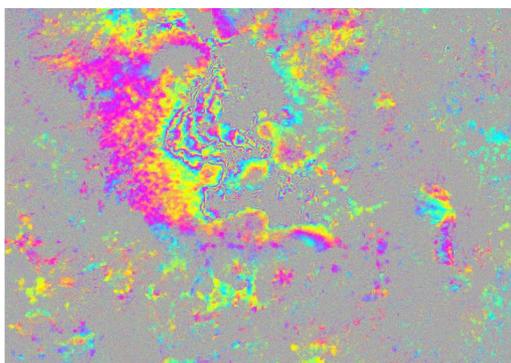


FIG. A.64 – 2004.03.26-2004.10.22, 143

FIG. A.65 – 2003.03.07-2003.10.03, 186

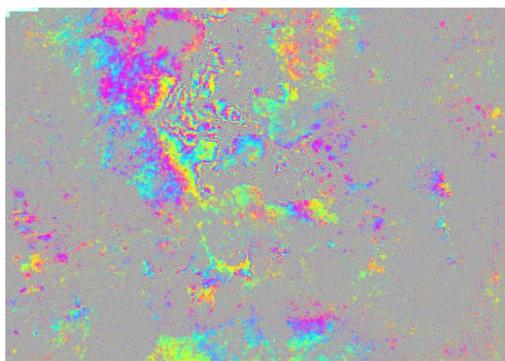
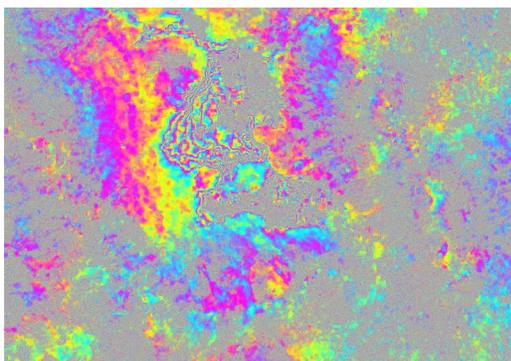
**7 x 35 jours**

FIG. A.66 – 2006.05.05-2007.01.05, 7

FIG. A.67 – 2004.04.30-2004.12.31, 293

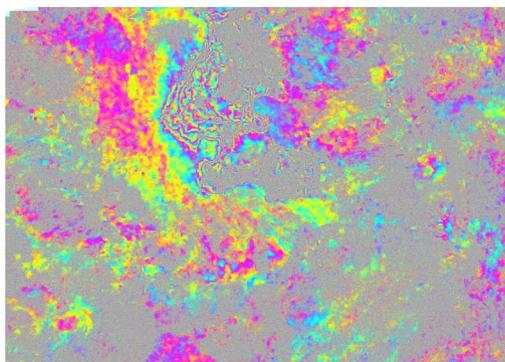
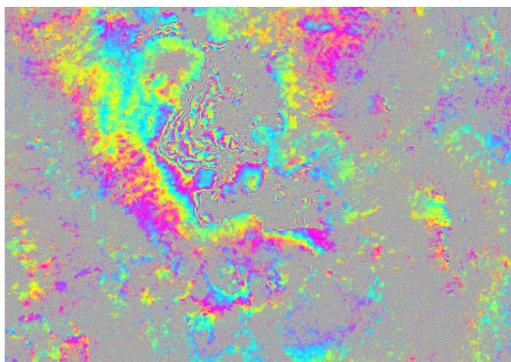
**8 x 35 jours**

FIG. A.68 – 2004.04.30-2005.02.04, 74

FIG. A.69 – 2005.07.29-2006.05.05, 151

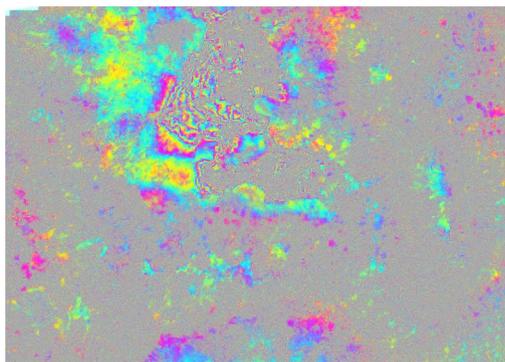
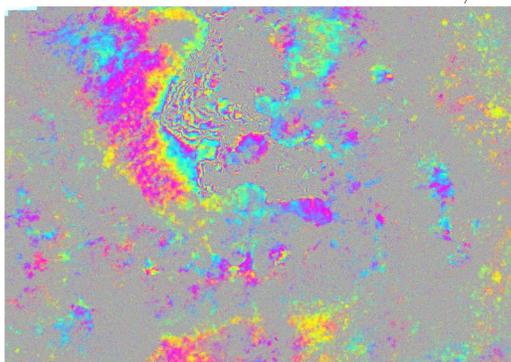
**9 x 35 jours**

FIG. A.70 – 2004.06.04-2005.04.15, 187

FIG. A.71 – 2004.01.16-2004.11.26, 265

## Annexe B

# Mosaïque de résidus par date

Présentation de 38 résidus par date d'acquisition représentant les écarts au modèle quadratique de l'équation (4.3). Ces résidus correspondent à la fois à la "déformation" qui ne peut pas être modélisée par l'équation 4.3 et à l'APS propre à la date d'acquisition.

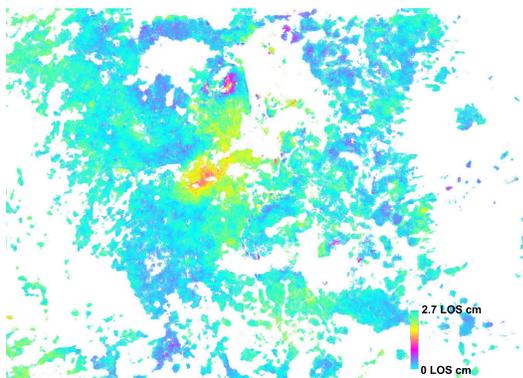


FIG. B.1 – 2003.12.12

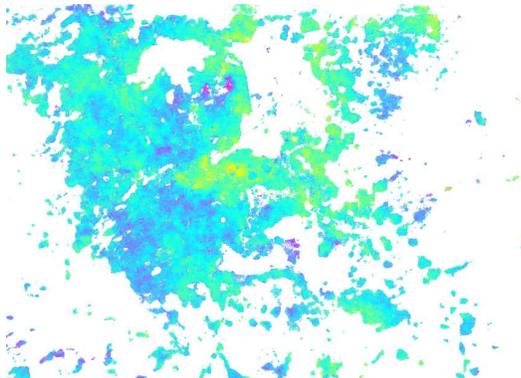


FIG. B.2 – 2003.03.07

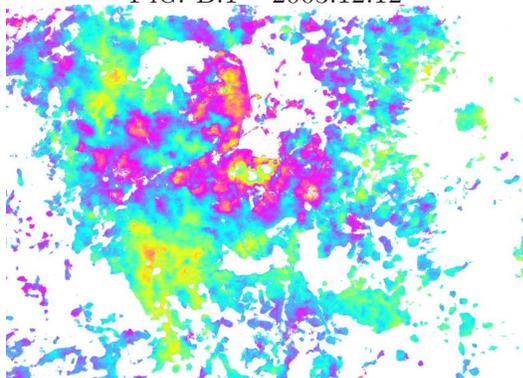


FIG. B.3 – 2003.04.11



FIG. B.4 – 2003.06.20

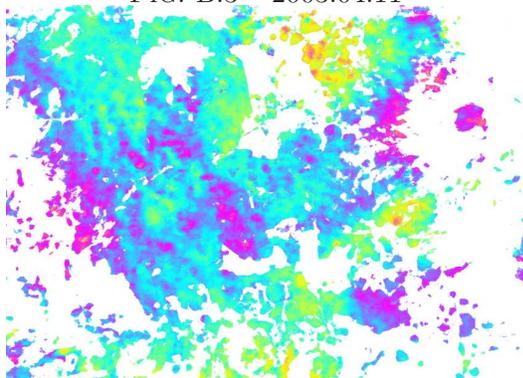


FIG. B.5 – 2003.07.25

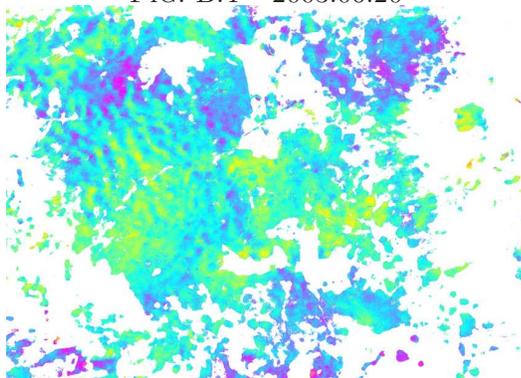


FIG. B.6 – 2003.08.29

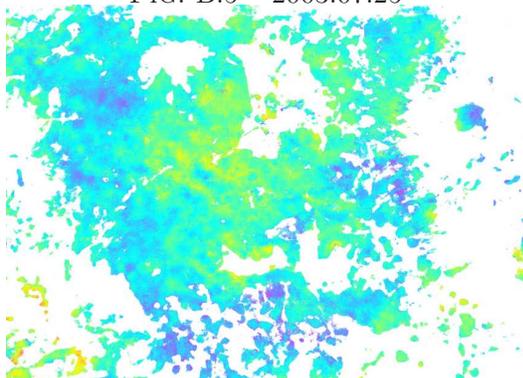


FIG. B.7 – 2003.10.03

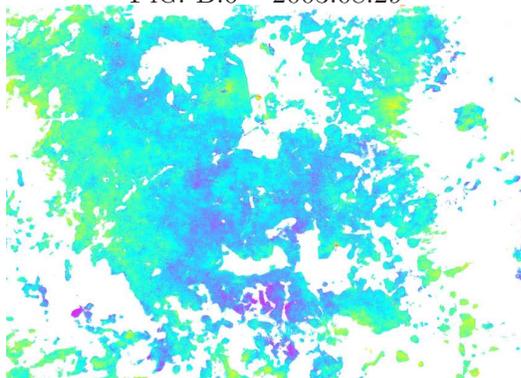


FIG. B.8 – 2003.11.07

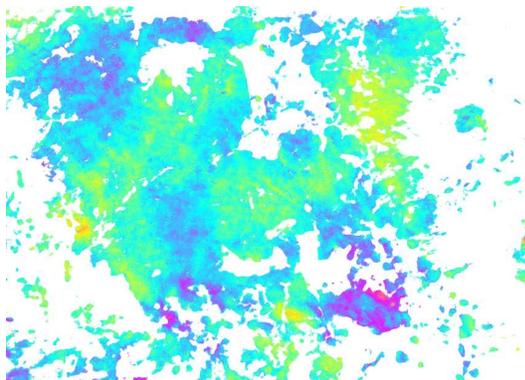


FIG. B.9 – 2003.12.12

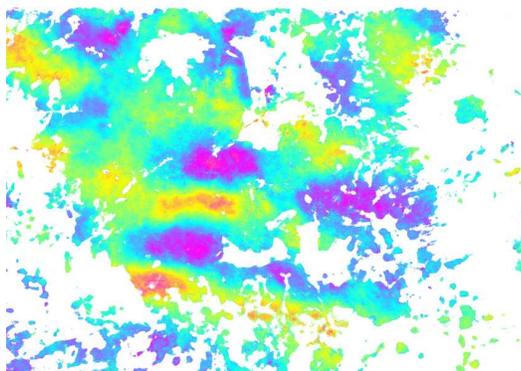


FIG. B.10 – 2004.01.16

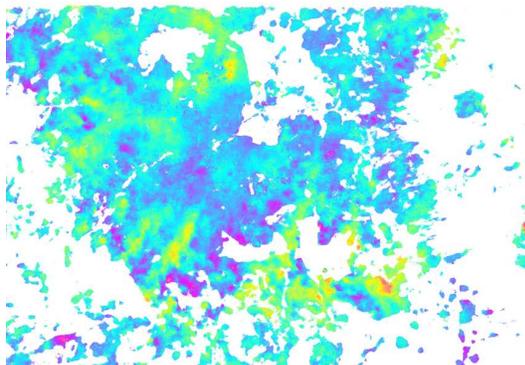


FIG. B.11 – 2004.02.20

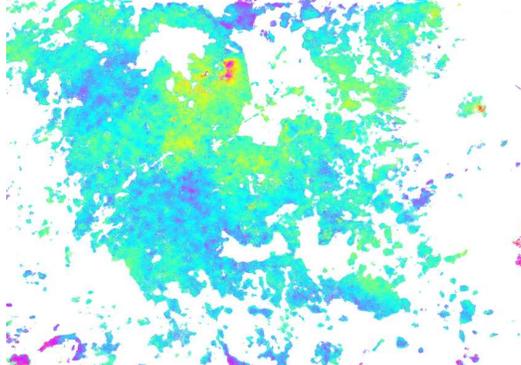


FIG. B.12 – 2004.03.26

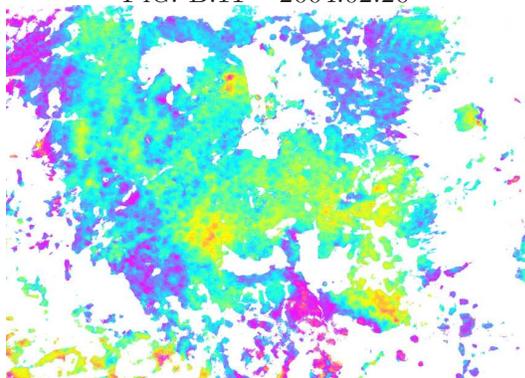


FIG. B.13 – 2004.04.30

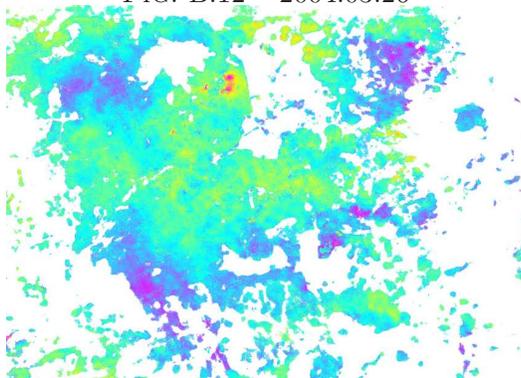


FIG. B.14 – 2004.06.04

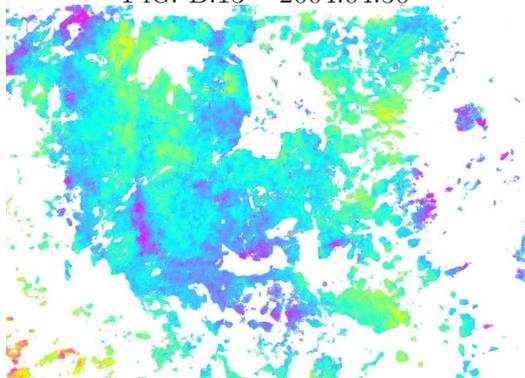


FIG. B.15 – 2004.08.13

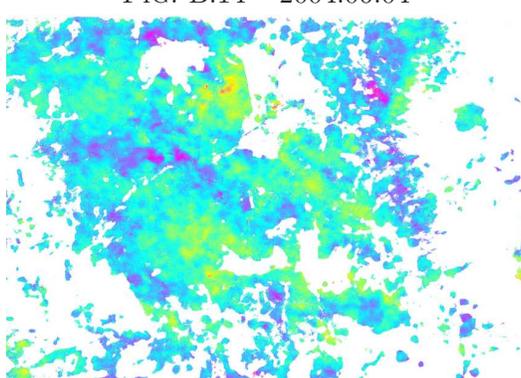


FIG. B.16 – 2004.09.17

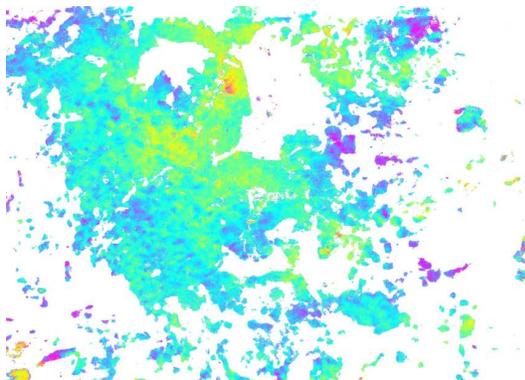


FIG. B.17 – 2004.10.232

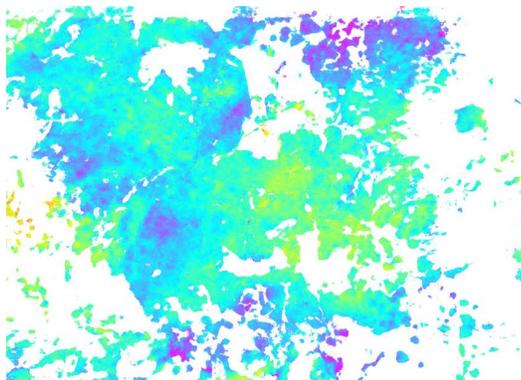


FIG. B.18 – 2004.11.26

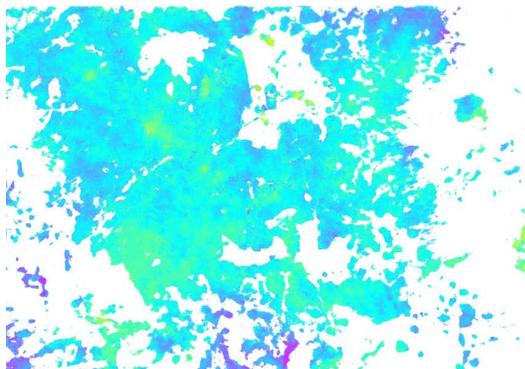


FIG. B.19 – 2004.12.31

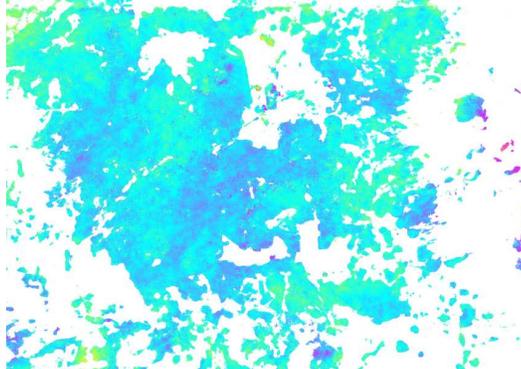


FIG. B.20 – 2005.02.04

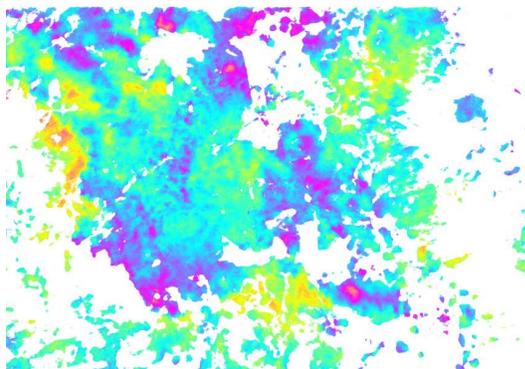


FIG. B.21 – 2005.03.11

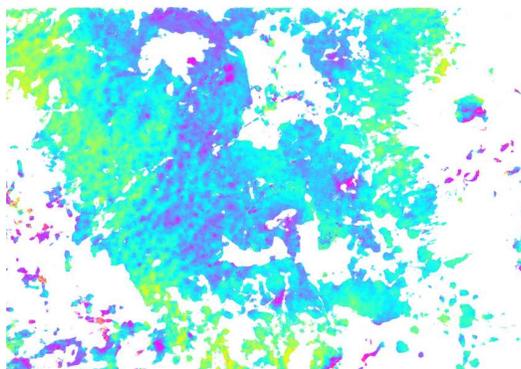


FIG. B.22 – 2005.04.15

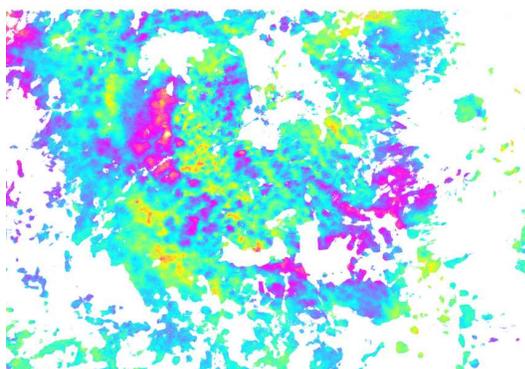


FIG. B.23 – 2005.05.20

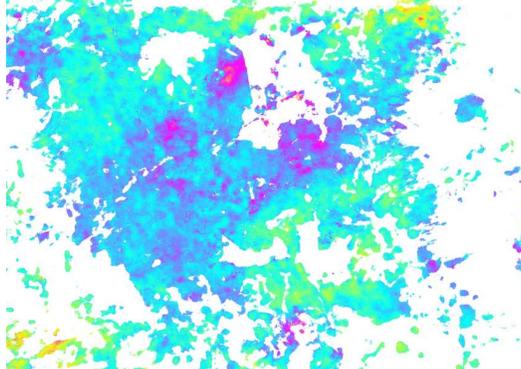


FIG. B.24 – 2005.06.24

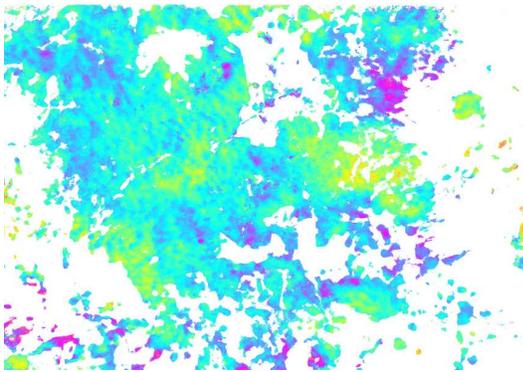


FIG. B.25 – 2005.07.29

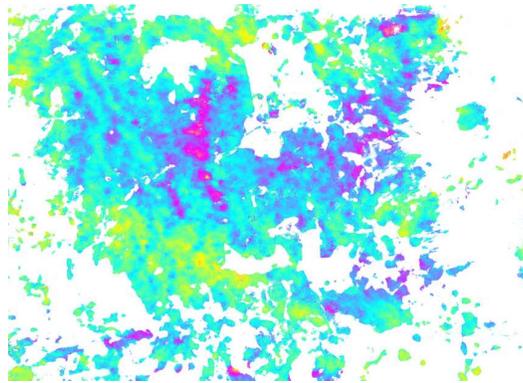


FIG. B.26 – 2005.09.02

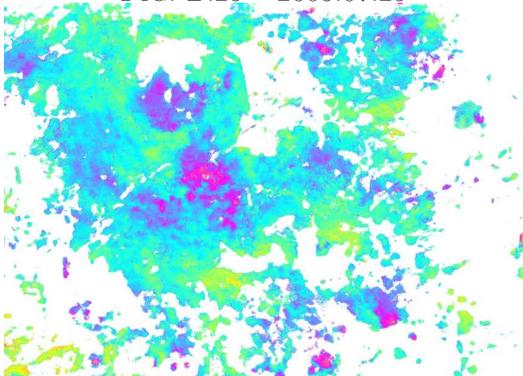


FIG. B.27 – 2005.10.07

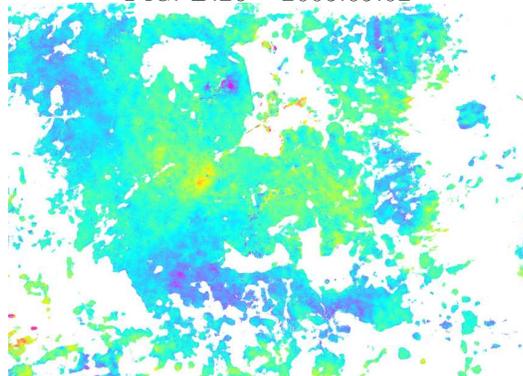


FIG. B.28 – 2005.11.11

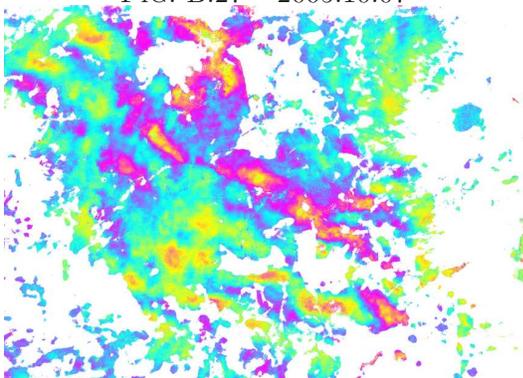


FIG. B.29 – 2005.12.16

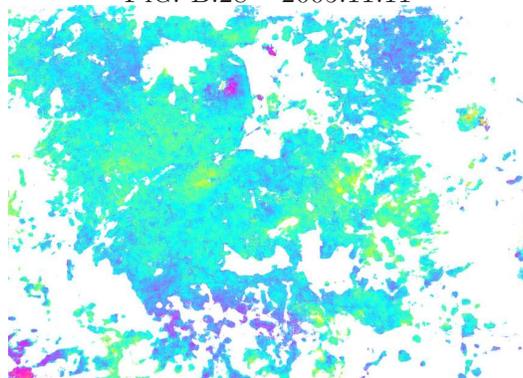


FIG. B.30 – 2006.01.20

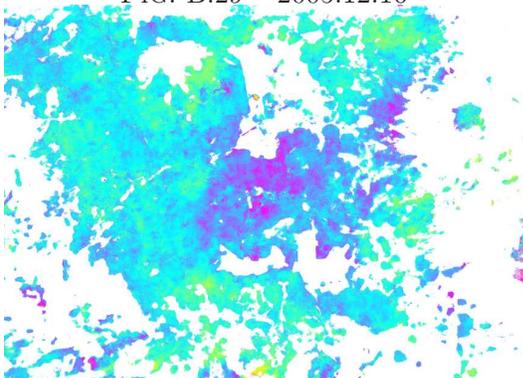


FIG. B.31 – 2006.02.24



FIG. B.32 – 2006.03.31

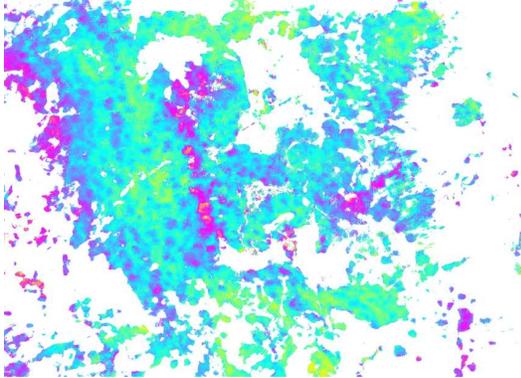


FIG. B.33 – 2006.05.05

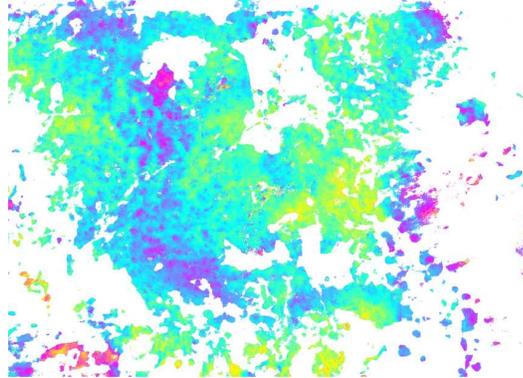


FIG. B.34 – 2006.06.09

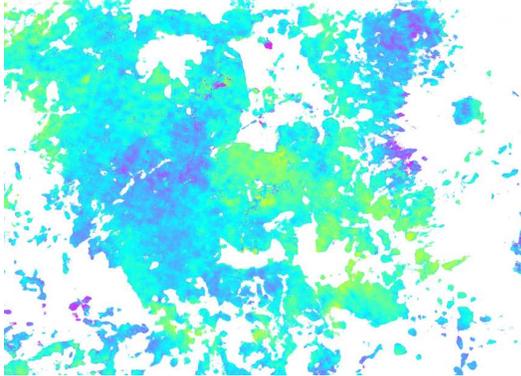


FIG. B.35 – 2006.12.01

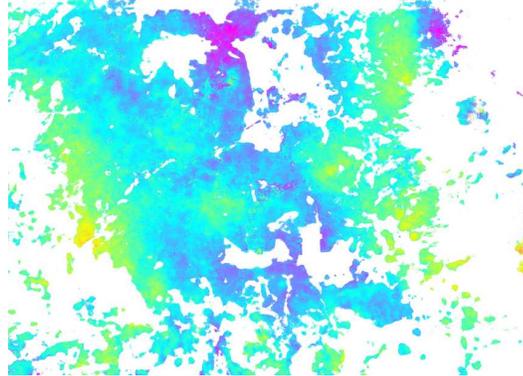


FIG. B.36 – 2007.01.05

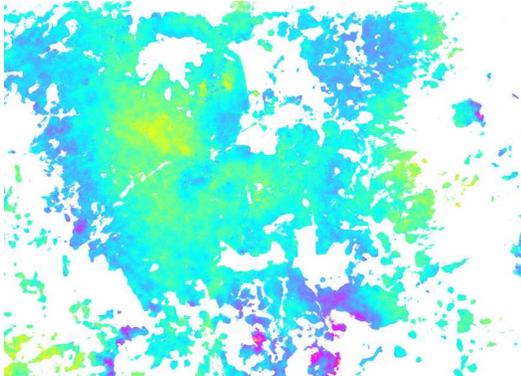


FIG. B.37 – 2007.02.09

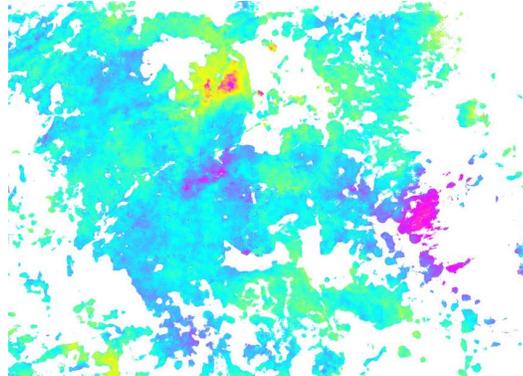


FIG. B.38 – 2007.03.16

---

# Bibliographie

- A. Aguilar-Perez, M. Ortega-Guerrero, J. Lugo-Hubp, and D. Ortiz-Zamora. Análisis numérico acoplado de los desplazamientos verticales y generación de fracturas por extracción de agua subterránea en las proximidades de la ciudad de Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, (20(3)) :247–261, 2006.
- J. Alberro. Génesis de las grietas de tensión en el valle de México. In *Memorias del simposio, El subsuelo de la cuenca del valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo*. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1990.
- J. Alberro, G. Auvinet, and R. Hernández. Asentamientos por secado de la superficie del terreno. Technical report, Informe interno del instituto de ingeniería UNAM, 2000.
- R. Bamler. A comparison of range-doppler and wavenumber domain sar focusing algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (30(4)) :706–713, 1992.
- F. Beauducel, P. Briole, and J. L. Froger. Volcano wide fringe in ers sar interferograms of etna : Deformation or tropospheric effect ? *J. Geophys. Res.*, 105(B7) :16391–16402, 2000.
- P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*, 40 :2375–2383, 2002.
- E. Cabral-Cano, T. H. Dixon, F. Miralles-Whilhelm, O. Sanchez-Zamora, O. D. Molina, and R. E. Carande. Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico city. *Geological Society of America*, 2008.
- C. Carnec, D. Raucoules, E. Ledoux, A. Huré, and A. Rivera. Mapping and modelling of major urban subsidence on Mexico city from radar interferometry. In *Int. Conf., Research and Application on Hydrogeological Disarray in the World, The Fragile Territory*, Rome, 7-10 décembre 2000.
- J. J. Carrera-Hernández and S. J. Gaskin. The Basin of Mexico aquifer system : regional groundwater level dynamics and database development . *Hydrogeology Journal*, 15(8), 2007. doi : 10.1007/s10040-007-0194-9.
- O. Cavalié, M.-P. Doin, C. Lasserre, and P. Briole. Ground motion measurement in the Lake Mead area, Nevada, by differential synthetic aperture radar interferometry time series analysis : Probing the lithosphere rheological structure. *J. Geophys. Res.*, 112 (B3) :B03403, 2007. doi : 10.1029/2006JB004344.
-

- O. Cavalié, C. Lasserre, M.-P. Doin, G. Peltzer, S. Jianbao, X. Xiwei, and Z.-K. Shen. Measurement of interseismic strain across the Haiyuan fault (Gansu, China), by InSAR. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2008. revision.
- F. Chaabane, A. Avallone, F. Tupin, P. Briole, and H. Maitre. A multitemporal method for correction of tropospheric effects in differential sar interferometry : Application to the gulf of corinth earthquake. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (45(6)) :1605–1615, 2007.
- C. W. Chen and H. A. Zebker. Network approaches to twodimensional phase unwrapping : intractability and two new algorithms. *Journal of the Optical Society of America A*, 17, 2000.
- C. Colesanti, A. Ferretti, R. Locatelli, and G. Savio. Multi-platform permanent scatterers analysis : first results. In *Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, 2003. 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on*, 2003.
- M. Costantini. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Trans. GARS*, 36 (3), 1998.
- J. C. Curlander and R. N. McDonough. *Synthetic aperture radar : systems and signal processing*. John Wiley and Sons, Inc, New York, 1991.
- G. W. Davidson and R. Bamler. Multiresolution phase unwrapping for sar interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 37, 1999.
- C. Delacourt, P. Briole, and A. Achache. Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography. Application to Etna. *Geophys. Res. Lett.*, 25 :2849–2852, 1998.
- T. G. Farr and M. Kobrick. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. *Eos Trans. AGU*, 81(48) :583–585, 2000.
- A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*, 39(1) :8–20, 2001.
- A. Ferretti, A. Monti-Guarnieri, C. Prati, F. Rocca, and D. Massonnet, editors. *InSAR Principles : Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA Publications, 2007.
- T. Flynn. Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuities. *J. Opt.Soc.Am.A*, 14, 1997.
- B. Friedlander and J. M. Francos. Model based phase unwrapping of 2-d signals. *IEEE Trans. Signal Process*, 44, 1996.
- A. K. Gabriel, R. M. Goldstein, and H. A. Zebker. Mapping small elevation changes over large areas : Differential radar interferometry. *J. Geophys. Res.*, (94(B7)) :9183–9191, 1989.
- D. Ghiglia and M. Pritt, editors. *Two-Dimensional Phase Unwrapping - Theory, Algorithms, and Software*. John Wiley and Sons, 1998.
- D. Ghiglia and L. Romero. Minimum lp-norm twodimensional phase unwrapping. *Journal of the Optical Society of America A*, 13(10), 1996.
-

- 
- R. Goldstein and C. Werner. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophys. Res. Lett.*, 25(21) :4035–4038, 1998.
- R. Goldstein, H. Zebker, and C. Werner. Satellite radar interferometry - two-dimensional phase unwrapping. *RADIO SCIENCE*, 23(4) :713–720, 1988.
- R. Hanssen, editor. *Radar Interferometry, Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- A. Hooper. A multi-temporal insar method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophys. Res. Lett.*, 2008. doi : 10.1029/2008GL034654.
- A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett.*, 31 :L23611, 2004. doi : 10.1029/2004GL021737.
- B. M. Kampes, editor. *Radar interferometry : persistent scatterer technique*. Springer, 2006.
- J. Kumate and M. Mazari, editors. *Problemas de la Cuenca de México*. El Colegio Nacional, Mexico, 1990.
- Lesser, editor. *Actividades geohidrológicas en el valle de México*. DGCOH, Mexico, D.F., 1984.
- Z. Li, J.-P. Muller, P. Cross, and E. J. Fielding. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction : GPS and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration. *J. Geophys. Res.*, 110(D20) :4651, 2005. doi : 10.1029/2004JB003446.
- Z. Li, P. Cross, P. Albert, J. Fischer, and R. Bennartz. Assessment of the potential of meris near-infrared water vapour products to correct asar interferometric measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 33, 2006a. doi : 10.1029/2005GL025299.
- Z. Li, X. L. Ding, and G. X. Liu. Modeling atmospheric effects on insar with meteorological and continuous gps observations : algorithms and some test results. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66(11), 2006b.
- Z. Li, E. J. Fielding, P. Cross, and J.-P. Muller. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction : GPS topography-dependent turbulence model. *J. Geophys. Res.*, 111 :B02404, 2006c. doi : 10.1029/2005JB003711.
- Z. Li, E. J. Fielding, P. Cross, and J.-P. Muller. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction : Medium Resolution Imaging Spectrometer and Advanced Synthetic Aperture Radar integration. *Geophys. Res. Lett.*, 33, 2006d. doi : 10.1029/2005GL025299.
- R. K. O. Loffeld. Presentation of an improved phase unwrapping algorithm based on kalman filters combined with local slope estimation. In *Proc. FRINGEŠ96*, 1996.
- S. Lyons and D. Sandwell. Fault creep along the southern san andreas from interferometric synthetic aperture radar, permanent scatterers, and stacking. *jgr*, 108(B1), 2003. doi : 10.1029/2002JB001831.
-

- L. Martinez and A. Chacalo, editors. *Los árboles de la ciudad de México*. Universidad Autonoma Metropolitana, 1994.
- D. Massonnet, K. Feigl, M. Rossi, and F. Adragna. Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake. *Nature*, 369(6477) :227–230, 1994.
- S. L. Mouélic, D. Raucoules, C. Carnec, and C. King. A least-squares adjustment of multi-temporal insar data, application to the ground deformation of paris. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 71(2), 2005.
- V. Pinel, A. Hooper, S. D. la Cruz-Reyna, G. Reyes-Davila, and M.-P. Doin. Study of the deformation field of two active mexican stratovolcanoes (popocatepetl and colima volcano) by time series of insar data. In *Proceedings of ESA Fringe 2007 conference*, 2008.
- M. Pritt. Congruence in least-squares phase unwrapping. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1997.
- B. Puysegur, R. Michel, and J.-P. Avouac. Tropospheric phase delay in InSAR estimated from meteorological model and multispectral imagery. *J. Geophys. Res.*, 111(B12) : 7166–7174, 2007.
- D. Remy, S. Bonvalot, P. Briole, and M. Murakami. Accurate measurement of tropospheric effects in volcanic areas from SAR interferometry data : application to Sakurajima volcano (Japan). *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 213 :299–310, 2003.
- A. Rivera-Bustos. *Modèle hydrogéologique quasi-tridimensionnel non-linéaire pour simuler la subsidence dans les systèmes aquifères multicouches - Cas de Mexico*. PhD thesis, ENS Mines de Paris, 1990.
- P. A. Rosen, S. Hensley, G. Peltzer, and M. Simons. Updated repeat orbit interferometry package released. *Eos Trans. AGU*, 85(5) :47, 2004.
- E. Santoyo-Villa, E. Ovando-Shelley, F. Mooser, and E. Leon-Plata, editors. *Síntesis Geotécnica del Valle de México*. TGC Geotecnia e Ingeniería, Mexico, 2005.
- R. Scharroo and P. N. A. M. Visser. Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites. *J. Geophys. Res.*, 103(C4) :8113–8127, 1998.
- D. A. Schmidt and R. Bürgmann. Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *J. Geophys. Res.*, 108(B9) :2416, 2003. doi : 10.1029/2002JB002267.
- U. Spagnolini. 2-d phase unwrapping and instantaneous frequency estimation. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 33(3), 1995.
- G. Strang and K. Borre, editors. *Linear Algebra, Geodesy, and GPS*. Wellesley-Cambridge Press, 1997.
- T. Strozzi and U. Wegmuller. Land subsidence in mexico city mapped by ers differential sar interferometry. In *IEEE Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1999.
-

- 
- T. Strozzi, U. Wegmüller, C. Werner, A. Wiesmann, and V. Spreckels. Jers sar interferometry for land subsidence monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7), 2003.
- T. Strozzi, C. Werner, U. Wegmüller, and A. Wiesmann. Monitoring land subsidence in mexico city with envisat asar interferometry. In *Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium*, 2004.
- S. Usai. A least squares database approach for SAR interferometric data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003.
- S. Usai, C. D. Gaudio, S. Borgstrom, and V. Achilli. Monitoring terrain deformations at phlegrean fields with sar interferometry. In *FRINGE '99, Proceedings*, 1999.
- C. Wadge, P. Webley, I. N. James, R. Bingley, A. Dodson, S. Waugh, T. Veneboer, G. Puglisi, M. Mattia, D. Baker, S. C. Edwards, S. J. Edwards, and P. J. Clarke. Atmospheric models, GPS and InSAR measurement of the tropospheric water vapour field over Mount Etna. *Geophys. Res. Lett.*, 29(19) :1905, 2002. doi : 10.1029/2002GL015159.
- C. Werner, U. Wegmüller, T. Strozzi, and A. Wiesmann. Interferometric point target analysis for deformation mapping. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International*, 2003.
- T. Wright, B. Parsons, and E. Fielding. Measurement of interseismic strain accumulation across the north anatolian fault by satellite radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, 28(10), 2001.
- W. Xu and I. Cumming. A region-growing algorithm for insar phase unwrapping. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1), 1999.
- S.-H. Yun, H. Zebker, P. Segall, A. Hooper, and M. Poland. Interferogram formation in the presence of complex and large deformation. *J. Geophys. Res.*, 34(L12305), 2007.
- H. Zebker, P. Rosen, R. Goldstein, A. Gabriel, and C. Werner. On the derivation of coseismic displacement-fields using differential radar interferometry - the Landers earthquake. *J. Geophys. Res.*, 99(B10) :19617–19634, 1994.
-

