



HAL
open science

Mesure des déformations de surface par interférométrie radar satellitaire

Matthias Jauvin

► **To cite this version:**

Matthias Jauvin. Mesure des déformations de surface par interférométrie radar satellitaire. Sciences de la Terre. Université Grenoble Alpes, 2019. Français. NNT: . tel-04810343

HAL Id: tel-04810343

<https://hal.science/tel-04810343v1>

Submitted on 29 Nov 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **STIC Traitement de l'Information**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Matthias JAUVIN

Thèse dirigée par **Emmanuel TROUVÉ**

codirigée par **Bénédicte FRUNEAU**

et co-encadrée par **Yajing YAN**

préparée au sein du **Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC)**

et de l'**École Doctorale Sciences et Ingénierie des Systèmes, de l'Environnement et des Organisations (SISEO)**

Mesure des déformations de surface par interférométrie radar satellitaire

Application à la surveillance des territoires de montagne et de l'impact de grands chantiers

Thèse soutenue publiquement le **18 Décembre 2019**,
devant le jury composé de :

M. Pierre BRIOLE

Directeur de Recherche CNRS, ENS Paris, Rapporteur

M. Daniel RAUCOULES

Expert Scientifique, BRGM, Rapporteur

Mme Cécile LASSERRE

Directrice de recherche CNRS, ENS Lyon, Examinatrice

M. Emmanuel TROUVÉ

Professeur, Université Savoie Mont Blanc, Co-Directeur de thèse

Mme Bénédicte FRUNEAU

Maître de conférences, Univ. Paris-Est Marne-la-Vallée, Co-Directrice de thèse

Mme Yajing YAN

Maître de conférences, Université Savoie Mont Blanc, Co-Encadrante de thèse



Résumé

Le lancement des satellites radar Sentinel-1A et 1B en avril 2014 et 2016 offre de nouvelles perspectives d'utilisation des images radar à synthèse d'ouverture (SAR), notamment pour le suivi des petits déplacements par interférométrie (InSAR). La stratégie d'acquisition systématique et le libre accès aux données Sentinel permettent d'envisager leur utilisation pour des applications qui étaient jusque-là restreintes par les limites spatiales et temporelles des précédentes générations de satellites radar (couverture limitée, coût important). L'objectif de la thèse est de déterminer les potentiels et limites d'utilisation des images Sentinel-1 et d'adapter les méthodes d'interférométrie radar en fonction des particularités de ces nouvelles données afin de mesurer les déformations de surface dans les contextes de la surveillance des territoires de montagne et du suivi des grands chantiers.

Le suivi des déformations de surface représente un effort important dans la gestion des territoires de montagne, notamment pour améliorer la compréhension des phénomènes géophysiques qui les impactent. Parmi les différentes opportunités offertes par le temps de revisite réduit de la constellation Sentinel-1, le suivi des glaciers et des zones récemment désenglacées soulève un grand intérêt pour la communauté scientifique. Des premiers travaux ont été engagés dans cette thèse sur le cas particulier des glaciers de la vallée de Chamonix. Malgré l'identification de conditions favorables à l'application de l'InSAR, ces résultats ont montré que les limites de l'interférométrie étaient atteintes pour ces objets affectés par une décorrélation rapide. En revanche, le maintien de la cohérence à proximité de ces glaciers, dans le milieu périglaciaire, au cours des périodes dépourvues de neige permet d'envisager un suivi des instabilités. Le suivi de ce milieu potentiellement à risque a été examiné en ayant recours à l'usage de coins réflecteurs et à des méthodes multi-temporelles adaptées. Ces travaux ont permis de définir leur capacité d'utilisation avec les images Sentinel-1 dans un contexte de suivi de déplacements en territoire de montagne.

Les grands travaux tels que la réalisation de tunnel en milieu urbain font l'objet de suivis précis, en particulier lorsque ces derniers sont réalisés dans des zones critiques densément construites. Malgré l'amélioration des techniques employées, certaines interventions géotechniques effectuées au cours de projets comme celui du Grand Paris peuvent engendrer des déformations en surface. Les méthodes traditionnelles d'auscultation terrestre apportent une solution de suivi en temps réel mais souffrent d'une couverture spatiale réduite. Le cofinancement de la thèse par des acteurs de la topographie de précision a offert la possibilité d'appliquer les méthodes d'InSAR à un niveau opérationnel. Les mesures réalisées à partir des données Sentinel-1 ont pu être comparées à des mesures terrestres, permettant d'estimer la précision de la mesure de vitesses de déplacement en milieu urbain. Ces travaux ont permis de valider les possibilités offertes par les données Sentinel-1 pour suivre à grande échelle et de façon régulière des phénomènes transitoires liés aux travaux souterrains.

Mots-clefs : *Téledétection, InSAR, Géodésie, topographie, déformation, zone périglaciaire, grand chantier*

Abstract

The launch of the Sentinel-1A and 1B radar satellites in April 2014 and 2016 offers new perspectives for SAR applications, especially for small deformation monitoring. Systematic acquisition strategy and open access to Sentinel data allow their use for applications that were restricted before by the spatial and temporal limitations of previous generations of radar satellites (limited coverage, high cost). The aim of this thesis is to determine the potential and the limitations of Sentinel-1 data, and to adapt the methods of radar interferometry according to the particularities of these new data, in order to measure ground deformation in the contexts of mountain area and public work monitoring.

The monitoring of surface deformations represents an important effort in the management of mountain territories, in particular to improve the understanding of the geophysical phenomena that impact them. Among the various opportunities offered by the reduced revisit time of the Sentinel-1 constellation, the tracking of glaciers and areas exposed to ice melt is of great interest for the scientific community. Despite the identification of favorable conditions for the application of InSAR, results on small glaciers in the Chamonix Valley showed that the limits of DInSAR methods were reached for these objects affected by rapid decorrelation. On the other hand, the maintenance of the coherence near these glaciers in the periglacial environment during periods free of snow makes it possible to estimate the instabilities. The monitoring of this potentially unstable environment has been investigated with help of corner reflectors (CR) and an adapted multi-temporal method. This work allowed defining the potential of using CR with Sentinel-1 images for the monitoring of mountainous areas.

Major public works such as the construction of tunnels in urban areas require precise monitoring, especially when they are carried out in densely built areas. Despite of the improvement of the construction techniques, some geotechnical operations carried out during the project such as the "Grand Paris" project can generate surface deformations. Traditional topographic monitoring methods provide a real-time monitoring solution but suffer from reduced spatial coverage. The co-funding of this thesis by topographic survey companies offered the possibility to apply the InSAR methods at an operational level. Displacement measurements obtained from Sentinel-1 data have been compared to the topographic measurements, allowing for the estimation of the deformation rate accuracy in urban areas. This work validates the possibilities offered by Sentinel-1 data for large-scale and regular monitoring of surface displacement related to underground works.

Keywords : *Remote sensing, InSAR, Geodesy, topography, deformation, periglacial area, public work*

Abbréviations et notations

Organismes

CIT	Connaissance, Images, Télédétection
CNES	Centre national d'études spatiales
CSMB	Conseil Saoye Mont Blanc
ESA	European Space Agency. Agence Spatiale Européenne
GAMMA	GAMMA Remote Sensing and Consulting AG
LISTIC	Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance

Abbréviations

RESORB	REStituted ORBit
CS	Diffuseur cohérent (Coherent Scatterer)
CR	Coin Réflecteur
ERS	European Remote Sensing
FFT	Fast Fourier Transform
GIE	Groupement d'Intérêt Economique
GMS	Global Monitoring for Environment and Security
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HSL	Hausmann Saint-Lazare
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IPTA	Interferometric Point Target Analysis
LiDAR	LIght Detection And Ranging
LOS	Line Of Sight (Ligne de visée)
MCF	Minimum Cost Flow
MERIS	MEdium Resolution Imaging Spectrometer
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MOE	Maîtrise d'Oeuvre
PS	Permanent Scatterer
RADAR	RAdio Detection And Ranging (détection et télémétrie par radioélectricité)
RME	Rapport Moyenne sur Ecart-type
RMSE	Root Mean Square Error
RSC	Rapport Signal sur Clutter (ou Signal-to-Clutter Ratio)

RTK	Real Time Kinematic
SAR	Synthetic Aperture Radar (Radar à Synthèse d'Ouverture RSO)
SB	Small Baseline
SBAS	Small BAseline Subset
SER	Surface Equivalente Radar (ou Radar Cross Section)
SLC	Single Look Complex
SNR	Signal-to-noise ratio (rapport signal sur bruit)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
ST	Station Totale
STR	Station Totale Robotisée
SVD	Singular Value Decomposition
TEC	Contenu Electronique Total
TOPSAR	Terrain Observation with Progressive Scans SAR
ZIG	Zone d'Influence Géotechnique
SER	Surface Equivalente Rada
SLC	Single Look Complex
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SVD	Singular Value Decomposition
TEC	Contenu Electronique Total
TOPSAR	Terrain Observation with Progressive Scans SAR

Notations

c_o	: cohérence interférométrique
f_{dc}	: moyenne de la fréquence Doppler
D_a	: indice de dispersion d'amplitude
Δt	: décalage temporel relatif
σ	: écart-type
γ	: facteur du lissage
Φ	: phase interférométrique
d_{LOS}	: déplacement en LOS
$\Delta\Phi$: différence de phase
λ	: longueur d'onde du radar
R	: Distance radar-cible
Θ	: angle d'incidence au sol

Glossaire

Glacier rocheux	Mélange de glace et de débris rocheux affecté d'un fluage lent et constant (Haeberli et al., 2006)
Marge proglaciaire	Zone de transition entre le glacier et la région déglacée et envahie par la végétation qui le prolonge vers l'aval (Vivian, 1967).
Moraine	Formation composée de tills, de sédiments fluvioglaciaires (sables, graviers, blocs) ou d'un mélange des deux, résultant de l'accumulation des matériaux érodés par le glacier.
Pergélisol	Couche du sol qui reste à une température inférieure ou égale à 0 °C pendant au moins deux ans.
Périglaciaire	Caractérise les régions avoisinantes des régions recouvertes de glaciers.
Petit Age Glaciaire	Période climatique froide entr 1350 et 1850 caractérisée par des périodes d'avancées puis de maximums successifs des glaciers.
Piézométrie	Mesure de profondeur de la surface d'une nappe phréatique.
Rabattement de nappe	Opérations de pompages qui consistent à abaisser temporairement le niveau d'une nappe phréatique dans le cadre de travaux de génie civil.
Tills	Sédiments glaciaires non triés et laissés en place lors du passage des glaciers

Remerciements

Alors que cette thèse se termine, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué au bon déroulement de ce projet. J'ai eu la chance d'être encadré à la fois par Bénédicte Fruneau, Emmanuel Trouvé et Yajing Yan, qui ont su me conseiller et apporter leur aide quand cela était nécessaire. Un grand merci à eux pour leur disponibilité et leurs conseils toujours précieux. Je tiens également à remercier l'ensemble des membres de mon jury. Je souhaite remercier en particulier Pierre Briole et Daniel Raucoules d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse.

Afin de remercier les personnes qui ont joué un rôle dans la réalisation de ce projet, il me semble intéressant de faire une rapide chronologie de ses origines. En l'occurrence, cela a commencé à EOOST, à Strasbourg, par la découverte d'un nouveau cours, celui sur l'**interférométrie**. Une petite bouffée d'air frais dans le module de géodésie, où les équations gravitationnelles remplissaient nos copies doubles. Puis en surveillant le volcan Popocatepetl au Mexique (merci Franck), lors d'un stage à Clermont-Ferrand... La magie du **radar** Voldorad !

Quelques temps plus tard, me voilà l'ENSG de Nancy à la recherche d'un nouveau stage. Toujours en contact avec les Eostiens, on m'informe (merci Romain) qu'un labo cherche un stagiaire pour travailler sur des images **satellites** Landsat sur les Alpes (merci à Amaury, Antoine et Emmanuel). Deux ans plus tard, alors que j'étais en train de **chercher** de l'or au Sénégal (merci Anne-Sylvie et David), j'ai eu la chance d'être contacté pour me faire part d'une proposition de thèse. Cerise sur le gâteau, la thèse est co-financée par deux entreprises. La boucle est bouclée, tous les éléments étaient réunis pour se lancer dans une thèse en **interférométrie radar satellite**. Emmanuel, un grand merci de m'avoir offert cette opportunité. Je dois également remercier Fabrice Col et Pierre Gusmano, pour avoir cru au potentiel de cette thèse. Le lancement d'une nouvelle activité, en l'occurrence celle d'Aurigami, est un acte audacieux.

Cette thèse s'est déroulée dans un contexte particulier, durant lequel j'ai pu participer au développement d'une nouvelle activité. Ce fut une formidable chance d'avoir en même temps un pied dans le monde de la recherche et l'autre en entreprise. Mais cela ne s'est pas fait sans une certaine gymnastique cérébrale. Durant ces années de thèse, j'ai appris à connaître ces deux mondes, qui ne parlent pas toujours le même langage, mais qui gagneraient mutuellement à augmenter leurs interactions.

Ce projet a aussi été l'occasion de découvrir les encadrements de stage (merci Corentin et Antoine) et de faire mes premiers pas dans le monde managérial. Merci Maureen pour ton écoute et ta volonté d'en apprendre plus sur l'interférométrie. Cela a aussi été l'occasion d'organiser et de participer à de belles missions sur le terrain, certaines en collaboration avec d'autres labos. Merci à Blaise, Flavien, Guilhem, Jean Louis, Michel, Tuan et Xavier pour vos coups de main

sur l'installation des coins réflecteurs et autres mesures GPS. Je garderai un souvenir tout particulier de ces missions en montagne et des déposes en hélicoptère. Et dire qu'on a failli dormir là-haut à côté du glacier à cause de quelques nuages... De ces journées bien chargées entre thèse et entreprise, je garde également en tête les discussions avec ceux qui ont partagé mon bureau pendant un temps. De la vie en Syrie à l'écologie (mais aussi d'autres sujets plus légers), cela a souvent été l'occasion de relativiser sur notre quotidien de doctorant. Merci Hakam, merci Mathilde. Je tiens également à remercier Lamia pour sa bienveillance quotidienne.

Pour terminer, je remercie tous mes amis, d'Annecy à Nancy, de Bordeaux à Strasbourg en passant par Cognac (ça en fait des villes) pour leur soutien sans faille. Je ne peux citer tous les noms tant ils ont été nombreux à me soutenir, mais ils se reconnaîtront dans ces quelques lignes. Je me dois de remercier Anne et Timothée, qui ont été mes soutiens quotidiens, ainsi que Marine et Louis pour leur amitié et leur proximité. Tout comme Alan, toujours présent malgré les kilomètres qui nous séparent. Et bien sûr merci à Johanna qui a réussi à adoucir les rares moments difficiles traversés pendant cette thèse, et qui a su être d'une patience infinie. Enfin merci à mes parents et mon frère qui m'ont suivi dans toutes mes passions et mes projets. Une thèse ne se fait pas tout seul, et si j'en suis là c'est aussi grâce à eux.

À mes parents.

À mon frère.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
Abbréviations et notations	iii
Glossaire	v
Table des matières	xi
Introduction	1
1 Contexte	1
2 Positionnement des travaux	2
3 Plan du manuscrit	3
I Etat de l'art	5
1 Imagerie SAR	6
1.1 Les satellites SAR	6
1.2 Mission COPERNICUS et satellites SENTINEL 1	6
1.3 Données SAR	8
1.3.1 L'image SAR, une donnée complexe	8
1.3.2 Les distorsions géométriques	10
1.3.3 Le speckle	10
1.3.4 Spécificités des données Sentinel 1	11
1.4 Techniques interférométriques différentielles	14
1.4.1 Interférométrie différentielle (D-InSAR)	14
1.4.2 Types de diffuseurs	18
1.4.3 Méthodes Permanent Scatterers (PS)	19
1.4.4 Méthodes Small Baselines (SB)	21
1.4.5 Approche PS multi-références	23
1.5 Détection et localisation des diffuseurs ponctuels	24
1.5.1 Les diffuseurs ponctuels	24
1.5.2 Les méthodes de détection	24
1.5.3 Localisation de diffuseurs ponctuels	27
2 Coins réflecteurs (CR)	28
2.1 Principes	28
2.2 Evaluation de la réponse radar (SER, RSC)	29
2.2.1 La Surface Équivalente Radar	29

2.2.2	Le rapport Signal-à-clutter	30
2.3	Différents formes de CR	31
2.3.1	Trièdre triangulaire	31
2.3.2	Le trièdre rectangulaire	32
2.3.3	Coins réflecteurs perforés	32
2.3.4	Mesure de la SER en chambre anéchoïque	33
3	Les méthodes d'auscultation traditionnelles appliquées aux grands travaux	34
3.1	Le système de positionnement global satellitaire (GNSS)	34
3.2	Les Stations Totales (ST)	34
II Suivi de déformation en zone montagneuse		39
1	Etat de l'art sur le suivi de déformation en territoire de montagnes	40
1.1	Instabilités rencontrées dans les milieux de haute montagne	40
1.2	Méthodes de suivi des instabilités par télédétection	41
1.2.1	Tour d'horizon des méthodes couramment employées	41
1.2.2	Suivi de déformation par PS-InSAR en milieu naturel	42
2	Analyse des réponses de CR dans des images Sentinel-1 en espace libre, milieu rural et zone montagneuse	43
2.1	Mesure de SER en chambre anéchoïque	45
2.1.1	Mesure de la SER maximale	45
2.1.2	Sensibilité aux paramètres d'orientation et d'élévation	47
2.2	Visibilité des CR en zone agricole	48
2.2.1	Identification des CR	49
2.2.2	Estimation du potentiel d'utilisation d'un CR dans une série temporelle	51
2.3	Visibilité des CR en zone montagneuse	53
2.3.1	Présentation du site test Chamonix-Mont-Blanc	53
2.3.2	Identification des pixels contenant les CR	57
2.3.3	Analyse de l'intensité	58
2.3.4	Analyse de la stabilité	61
2.3.5	Estimations des paramètres RSC et SER	63
2.4	Proposition d'une chaîne de traitement PS adaptée au site test	65
2.4.1	Méthode de sélection des données	65
2.4.2	Stratégie multi-temporelle	66
2.4.3	Chaîne de traitement	67
2.4.4	Suivi de l'erreur topographique	71
3	Résultats expérimentaux d'intégration de CR dans une approche PS	73
3.1	Analyse des interférogrammes	73
3.2	Sélection des potentielles cibles ponctuelles	76
3.3	Précision de la correction topographique et de la localisation absolue	77
3.4	Identification des zones instables	79
III Suivi de l'impact des grands chantiers par imagerie satellitaire radar		89
1	Auscultation topographique des travaux souterrains	91
1.1	Travaux souterrains et leurs impacts potentiels en surface	91
1.1.1	Tunnels et autres ouvrages souterrains en milieu urbain	91

1.1.2	Incertitudes du sous-sol et les déformations en surface	91
1.1.3	Risques liés aux rabattements de nappe	92
1.2	Méthodes d'auscultation des travaux souterrains	93
1.3	Interférométrie SAR multi-temporelle en milieu urbain	95
1.3.1	Résultats historiques	95
1.3.2	Apport des données haute résolution	96
1.3.3	Premiers résultats avec Sentinel-1	97
2	Projet du Grand Paris et extension du RER EOLE	98
2.1	Grand Paris Express	98
2.2	Problématiques spécifiques du Grand Paris	98
2.3	Extension du RER EOLE	102
2.3.1	Description du projet	102
2.3.2	Adaptation des méthodes de creusement à la géologie et l'hydro- géologie locale	104
3	Auscultation du Grand Paris à partir des données Sentinel-1	107
3.1	Chaînes de traitement	108
3.1.1	Stratégies mono-référence et multi-références appliquées au suivi de chantier	108
3.1.2	Étapes de pré-traitement	109
3.1.3	Chaîne de traitement multi-références	112
3.1.4	Chaîne de traitement mono-référence	114
3.2	Résultat des traitements PS	115
3.2.1	Analyse de la qualité des résultats	115
3.2.2	Analyse des instabilités sur l'agglomération Parisienne	124
3.3	Impacts des travaux de génie civil de l'entonnement Ouest HSL	130
3.3.1	Détection de mouvements liés au projet EOLE	131
3.3.2	Analyse des déplacements observés sur la zone Haussamnn St- Lazare	131
3.3.3	Comparaison avec les données d'auscultation terrestre	133
Conclusions et perspectives		141
1	Potentiels et limites des données Sentinel-1	141
2	Estimations des incertitudes	142
3	Perspectives	143
Liste des figures		150
Liste des tableaux		152
Annexe A		171
Annexe B		175

Introduction

Sommaire

1	Contexte	1
2	Positionnement des travaux	2
3	Plan du manuscrit	3

I Contexte

La compréhension des mécanismes de déformation de la surface terrestre et la quantification de leurs impacts sur le milieu, qu'ils soient naturels ou non, représentent un enjeu stratégique de premier plan. En effet, de nombreux processus d'origine naturelle ou anthropique sont susceptibles d'engendrer des aléas qu'il est nécessaire de surveiller.

D'une part, les territoires de montagne font partie des milieux naturels soumis à des phénomènes physiques complexes. De nombreuses instabilités y sont rencontrées, qu'il s'agisse de glissements de terrain, de chutes de blocs ou encore d'aléas liés à la présence de glaciers tempérés et de leurs moraines (ex : vidange de lacs glaciaires) ou à la dégradation du pergélisol. Les zones urbaines, soumises à des processus anthropiques, présentent également des enjeux importants. La densification des zones urbaines engendre des contraintes sur la réalisation d'infrastructures qui, de plus en plus, ne peuvent être contournées que par une approche souterraine. La complexité des projets comme celui du Grand Paris et la grande exigence de la part des donneurs d'ordre sur la maîtrise du risque de désordre sur les ouvrages et les infrastructures existantes, nécessitent un suivi précis et régulier des conséquences des travaux réalisés en souterrain.

Les déformations de surface représentent ainsi une information clé pour mieux comprendre le milieu et ses évolutions, que cela soit en zone montagneuse ou sur les grands chantiers. C'est en cela que les images acquises par les radars à synthèse d'ouverture ou SAR (Synthetic Aperture Radar) à bord de satellites apparaissent comme étant une source d'informations particulièrement intéressante. Avec leur large couverture spatiale, les données issues de ces capteurs actifs sont de plus en plus utilisées pour l'observation de la Terre, en particulier pour la détection de changement et la mesure de déformation, avec une part grandissante pour des applications opérationnelles.

Cette thèse intervient dans le contexte de la mission Copernicus, lancée par l'ESA (Agence Spatiale Européenne) et faisant suite au projet GMES (Global Monitoring for Environment and Security). Cette mission a pour but de cartographier et de surveiller les activités terrestres, marines, atmosphériques, les catastrophes naturelles et les conséquences du changement climatique.

Ce programme a vu naître une nouvelle génération de satellites, parmi lesquels les satellites radar Sentinel 1. Débutée avec le lancement de Sentinel-1A en Avril 2014 puis suivie par Sentinel-1B en avril 2016, cette famille de satellites, dont les données sont en accès libre, sera maintenue jusqu'à l'horizon 2027.

Du point de vue scientifique, cette nouvelle constellation apporte une continuité aux missions ERS et ENVISAT, ce qui permet la poursuite de travaux sur la compréhension des phénomènes physiques à l'origine de déformations de surface. De plus, la réduction du temps de revisite permet d'envisager une amélioration des résultats par rapport à ces deux précédentes missions, notamment sur des objets affectés par la décorrélation temporelle. Du point de vue opérationnel, les acquisitions systématiques de cette mission maintenue sur une longue période permettent d'envisager l'utilisation de ces données pour des suivis de projets réalisés sur plusieurs années.

II Positionnement des travaux

Dans ce contexte, le laboratoire LISTIC (Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance) associé à deux co-financeurs, a proposé une thèse sur le suivi de déformation de surface par imagerie satellitaire radar, et plus particulièrement avec les images radar Sentinel 1. Cette thèse a été financée à 50% par une allocation CSMB (Conseil Savoie Mont Blanc) et par les sociétés MIRE S.A.S et Aliter Videre, deux sociétés spécialisées dans la topographie de précision et regroupées sous un Groupement d'Intérêt Economique (GIE) appelé Aurigami.

Les travaux de recherche de cette thèse se sont orientés vers une estimation du potentiel d'utilisation des données Sentinel-1 pour le suivi de déformation en zone de montagne et sur les grands chantiers urbains à partir de chaînes de traitement de séries temporelles d'images SAR. Pour les milieux de montagne, l'un des objets d'étude a été le massif du Mont Blanc et la vallée de Chamonix-Mont Blanc, site test pour des développements méthodologiques en imagerie SAR sur lequel le LISTIC travaille depuis près de 20 ans (projets Glaciorisk 2000-2003, MEGATOR 2004-2007¹, EFIDIR 2008-2012², ...). Pour le suivi de grands chantiers en milieu urbain, la volonté des deux actionnaires était de prolonger leur activité de topographie de précision en y incorporant l'interférométrie radar. Les travaux de cette thèse se sont ainsi enrichis de l'exploitation des données Sentinel-1 dans un contexte opérationnel.

Les problématiques de cette thèse sont donc doubles. Cette thèse tente d'une part d'apporter des éléments de réponse à la question de l'adaptation de l'interférométrie SAR (InSAR) au suivi de déplacements des déformations propres aux territoires de montagne à partir des données radar Sentinel-1. Elle évalue d'autre part les différents aspects qui permettraient de rendre opérationnel le traitement interférométrique des données Sentinel dans le cadre de suivi de grands chantiers. D'un point de vue méthodologique, ces travaux de thèse se sont intéressés à l'utilisation conjointe des résultats issus des traitements de l'interférométrie différentielle (D-InSAR) et de la technique des réflecteurs persistants (PS-InSAR) avec les données traditionnelles de topographie

1. <http://megator.fr>

2. <http://efidir.poletterresolide.fr>

de précision, afin d'améliorer le suivi de l'incertitude et de profiter de la complémentarité spatio-temporelle de ces différents types de données.

III Plan du manuscrit

Cette thèse est divisée en 3 chapitres. Le premier chapitre constitue une synthèse bibliographique. La première section est dédiée à l'imagerie SAR. Elle présente les caractéristiques générales des données SAR et s'intéresse aux spécificités des données Sentinel-1. Cette section résume ensuite les principes de base de l'interférométrie différentielle et des méthodes multi-temporelles, en mettant l'accent sur les techniques de détection et de localisation des diffuseurs ponctuels qui seront utilisées par la suite. La section 2 s'intéresse aux caractéristiques et au fonctionnement des coins réflecteurs (CR). La section 3 présente brièvement deux méthodes d'auscultation topographique terrestre qui seront utilisées dans la suite du manuscrit pour contrôler l'incertitude sur les résultats issus de l'interférométrie.

Le chapitre 2 est consacré au suivi de déformation en zone de montagne en mettant l'accent sur l'utilisation de coins réflecteurs sur et à proximité d'un glacier. Un état de l'art spécifique est présenté sur les instabilités et les méthodes de suivis en zone de montagne dans la section 1. La section 2 présente les expérimentations réalisées à partir d'une série de coins réflecteurs et s'intéresse à leur visibilité dans différentes configurations. La section 3 présente les résultats de l'intégration de coins réflecteurs dans une approche PS dans le but d'estimer les instabilités sur une moraine et les pentes environnantes à proximité du glacier d'Argentière.

Le chapitre 3 est consacré aux mesures de déplacements en milieu urbain et plus précisément dans le cadre de la réalisation de travaux souterrains. La section 1 est un état de l'art spécifique aux travaux souterrains et à leurs méthodes d'auscultation. La section 2 présente le projet Grand Paris et le projet d'extension du RER EOLE, projet sur lequel un suivi par interférométrie radar a été réalisé et comparé aux mesures issues de l'auscultation traditionnelle terrestre. La section 3 présente les résultats de la comparaison entre résultats InSAR et mesures d'auscultation traditionnelle (par nivellement et station totale).

Le manuscrit se termine par une conclusion générale et une présentation des perspectives. Il est complété par deux annexes qui présentent les travaux réalisés sur deux CR installés sur le glacier d'Argentière et par la présentation des résultats d'interférométrie différentielle sur ce même glacier.

Chapitre I

Etat de l'art

Sommaire

1	Imagerie SAR	6
1.1	Les satellites SAR	6
1.2	Mission COPERNICUS et satellites SENTINEL 1	6
1.3	Données SAR	8
1.4	Techniques interférométriques différentielles	14
1.5	Détection et localisation des diffuseurs ponctuels	24
2	Coins réflecteurs (CR)	28
2.1	Principes	28
2.2	Evaluation de la réponse radar (SER, RSC)	29
2.3	Différents formes de CR	31
3	Les méthodes d'auscultation traditionnelles appliquées aux grands travaux	34
3.1	Le système de positionnement global satellitaire (GNSS)	34
3.2	Les Stations Totales (ST)	34

Introduction

L'utilisation de l'interférométrie SAR, ou InSAR, a fortement progressé au cours des vingt dernières années. Depuis le début des années 90, marquées par les premiers résultats spectaculaires de mesure de déformation sismique en 1993 (Massonnet et al., 1993), les méthodes de traitement, les capacités de calculs et de stockage ainsi que la qualité des données n'ont cessé de s'améliorer (Gabriel et al., 1989) (Massonnet and Feigl, 1998). L'InSAR est ainsi devenu un outil puissant pour le suivi des déformations de surface (Trouvé, 1996), (Lopez Quiroz, 2008). Les avancées récentes sur l'utilisation de séries temporelles d'images (Yan, 2011) (Crosetto et al., 2016) ont permis d'atteindre des mesures de vitesse de déformation d'une précision proche du millimètre/an, permettant d'envisager des applications opérationnelles, telles que le suivi de grands chantiers. Certaines limites propres à l'InSAR peuvent pousser à compléter l'information obtenue avec des données issues des techniques topographiques classiques (Zhu et al., 2014) telles que les mesures GNSS, les mesures de nivellement et les stations totales. Ces données peuvent soit être utilisées comme vérité terrain pour évaluer les performances de l'InSAR, soit être utilisées comme informations complémentaires pour contraindre les résultats obtenus par le traitement interférométrique.

I Imagerie SAR

1 Les satellites SAR

Depuis le début des années 90 et le lancement des satellites ERS-1 et 2 par l'Europe et JERS-1 par le Japon (Massonnet and Feigl, 1998), les programmes spatiaux se sont multipliés, permettant aujourd'hui de disposer d'une importante archive de données radar, à la fois en bande L (longueur d'onde ≈ 24 cm), C (≈ 6 cm) ou X (≈ 3 cm) (Massonnet, 2016). Si bien qu'en 2019, nous disposons d'une dizaine de satellites avec des capteurs SAR opérationnels, dont les principaux sont les satellites Sentinel 1a et 1b ainsi que RadarSat-2 et les 3 satellites de la constellation RadarSat, en bande C, TerraSar-X, son jumeau TanDEM-X et la constellation Cosmos-SkyMed en bande X (voir figure I.1).

Ces travaux de thèse se situent à une période charnière dans l'histoire des missions satellitaires SAR. L'amélioration de la résolution des données, plus généralement de leur qualité, la diminution du temps de revisite entre deux acquisitions sur une même zone et l'acquisition systématique des images SAR ont fortement augmenté la disponibilité des données, combinés à l'amélioration significative des méthodes de traitement et à la réduction des temps de calculs, ont permis de passer des analyses historiques de déformation à une utilisation des données SAR pour le suivi (production de résultats en quasi temps réel) des séismes (Dell'Acqua et al., 2011) et des volcans (Spaans and Hooper, 2016), deux gros consommateurs d'images SAR, mais également pour le suivi des glissements de terrains (Zhu et al., 2014), des subsidences urbaines (Qin et al., 2013), et de divers infrastructures ou d'ouvrages d'art (Hongyun et al., 2011), (Anghel, 2015).

2 Mission COPERNICUS et satellites SENTINEL 1

Les travaux présentés dans ce manuscrit sont nés sous l'impulsion d'un nouveau programme mené par l'ESA nommé COPERNICUS. L'ESA a entrepris le développement de cinq séries de missions satellites Sentinel ayant pour objectif de fournir de façon continue des observations de la Terre (Geudtner et al., 2013). Parmi celles-ci, la mission Sentinel-1 est dédiée à l'imagerie SAR avec le grand avantage de fournir des données gratuites et en libre d'accès. Elle a débuté avec le lancement de Sentinel 1A le 3 Avril 2014 (dont les premières données régulières sont disponibles depuis Octobre 2014) et s'est poursuivie avec celui de Sentinel 1B le 25 Avril 2016 (dont les données sont accessibles depuis Septembre de la même année). Cette mission SAR a démontré son potentiel en terme de mesure de déplacements dans différents contextes : en milieu glaciaire (Pablo Sánchez-Gómez and Francisco Navarro, 2017), en milieu urbain (Devanthéry et al., 2018), (Balz et al., 2018), (Monti-Guarnieri et al., 2018) (Wegmüller et al., 2016) ou rural (Prats-Iraola et al., 2016), (Qin et al., 2017). Cette mission, qui devrait être maintenue jusqu'en 2027, est mise en œuvre par une constellation de satellites (actuellement 1A et 1B puis 1c et 1d) embarquant chacun un capteur SAR en bande C (5.405 GHz) assurant la continuité des données des missions ERS et ENVISAT (Grandin, 2015). Chaque satellite est conçu pour une durée de vie opérationnelle de 7 ans [ESA], mais l'ESA envisage de prolonger leur activité jusqu'à 10 ans (disposant de 12 ans de consommables). Les satellites sont placés en orbite quasi polaire à 697 km d'altitude permettant un temps de revisite de 12 jours (6 jours avec

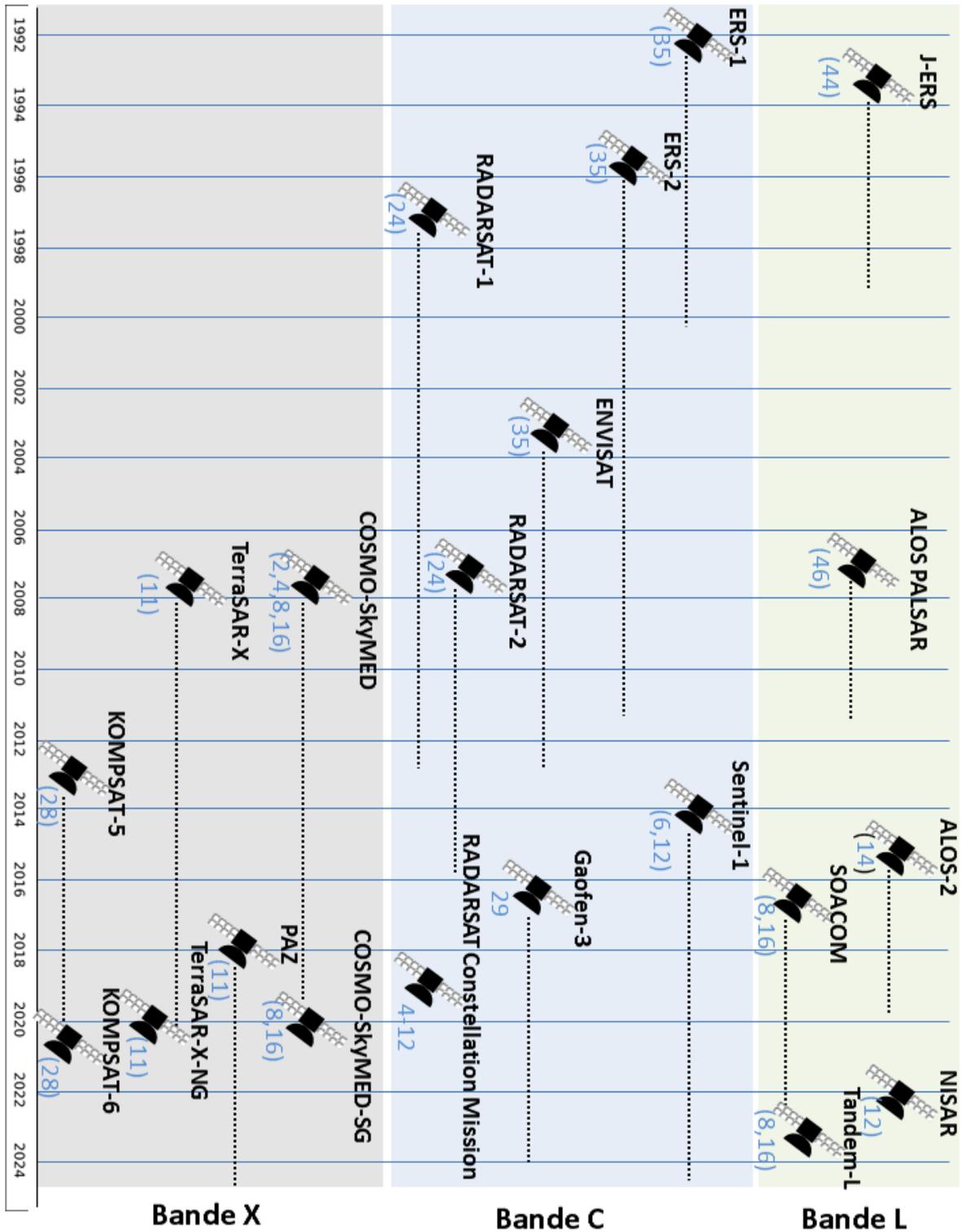


FIGURE I.1 – Historique des missions satellitaires SAR. Entre parenthèses : temps de revisite (complété à partir de (Bovenga et al., 2018)).

la constellation). La mission Sentinel 1 est caractérisée par une faible base (distance entre les orbites d'un couple d'images SAR), ce qui permet de conserver une cohérence interférométrique élevée (cf. section 1.4.1.i) entre les différentes acquisitions (Geudtner et al., 2014). Cela permet d'accéder aux applications InSAR et D-InSAR telles que la surveillance des déformations de surface (Geudtner et al., 2013), (Geudtner et al., 2014), (Sowter et al., 2016a).

3 Données SAR

3.1 L'image SAR, une donnée complexe

L'imagerie SAR est une technique de mesure par télédétection active qui illumine par micro-ondes la surface imagée (Massonnet and Feigl, 1998). Les instruments SAR, dont le fonctionnement repose sur l'utilisation d'antennes à synthèse d'ouverture, sont utilisés à la fois en aéroporté, en spatial et en terrestre. Les satellites Sentinel 1 permettent aujourd'hui d'accéder à des données gratuites régulières (tous les 6 jours sur de nombreuses zones du globe, notamment l'Europe, ou 12 jours) et avec une couverture quasi-globale (Geudtner et al., 2014). L'imagerie SAR est utilisée pour caractériser la surface terrestre émergée d'après l'information obtenue à partir des ondes rétrodiffusées (Trouvé, 1996). Les ondes rétrodiffusées par les objets au sol sont échantillonnées en distance selon le temps de trajet aller-retour, dépendant de la distance radar-objet. L'intensité du signal sera alors fonction des propriétés diélectriques et de la rugosité du sol et des objets rétrodiffusants (Hanssen, 2001). L'antenne est alignée avec la trajectoire du satellite et la visée du radar est latérale afin d'éviter une ambiguïté sur les objets équidistants situés à gauche et à droite de la trajectoire (Massonnet and Feigl, 1998). Un même site peut alors être observé en mode ascendant – le satellite passe de l'hémisphère Sud à l'hémisphère Nord - et en mode descendant - en sens inverse (Yan, 2011). Le principal avantage de ces capteurs actifs est que ce sont des outils tout temps, i.e. le signal n'est pas affecté par la couverture nuageuse, et qu'ils peuvent imager de jour comme de nuit (Massonnet and Feigl, 1998). La résolution naturelle dans la direction azimutale (la direction azimutale correspond à trajectoire du porteur, voir figure I.2) d'un capteur radar placé sur une orbite d'environ 800 km est d'environ 10 km (Massonnet and Feigl, 1998). Afin d'améliorer cette résolution, le principe de la synthèse d'ouverture est d'effectuer une focalisation SAR en appliquant une série de filtres dans le domaine spectral d'abord en range (direction de la ligne de visée du satellite) puis en azimuth (trajectoire du satellite) (Massonnet and Feigl, 1998), (Yan, 2011). Massonnet (Massonnet and Feigl, 1998) définit le traitement de synthèse d'ouverture comme la sommation cohérente entre les différents échos recueillis. On obtient alors à partir de l'image brute une image Single Look Complex (SLC), transformant les nombreux échos d'un diffuseur en un seul objet sur l'image radar (Lopez Quiroz, 2008), (Yan, 2011). La résolution d'une image SAR devient ainsi décimétrique voire métrique (Trouvé, 1996). Un pixel d'une image SLC apporte alors deux informations : l'amplitude (ou la radiométrie), et la phase. L'amplitude caractérise la réflectivité de la surface imagée par l'onde électromagnétique. La phase caractérise l'état vibratoire de l'onde à son retour au capteur. Celle-ci est constituée de deux termes :

$$\Phi = \Phi_{géom} + \Phi_{propre} \quad (\text{I.1})$$

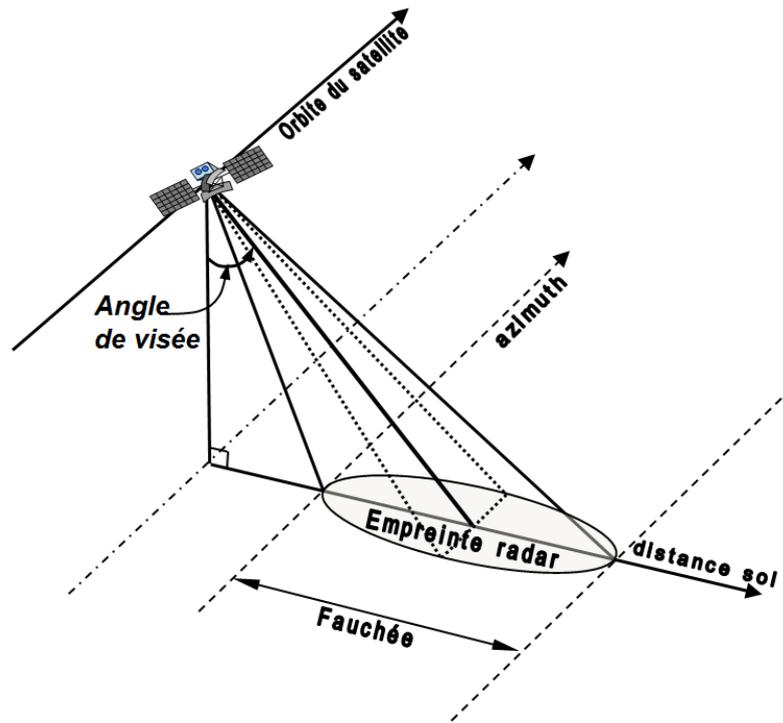


FIGURE I.2 – Configuration géométrique des satellites SAR (Bamler, 1999)

où Φ_{geom} représente la phase géométrique liée au temps de trajet aller-retour de l'onde et Φ_{propre} la phase propre liée à l'interaction de l'onde avec le sol (Massonnet and Feigl, 1998)(Trouvé, 1996). Cette dernière représente la signature de phase du pixel (contribution interne) et correspond à la somme vectorielle des échos de l'ensemble des réponses des réflecteurs situés au sol dans la cellule de résolution. L'intérêt de l'utilisation de la phase vient de son terme géométrique, car il dépend du trajet aller-retour du signal et est donc déterministe si l'atmosphère est constante. On a ainsi :

$$\Phi_{geom} = \frac{4\pi \cdot R}{\lambda} \quad (I.2)$$

où R est la distance radar-objet et λ la longueur d'onde. Par différence de phase de deux images acquises lors de deux passages du satellite dans la même configuration, il est possible d'accéder, dans certaines conditions, à la différence de distance radar-objet en éliminant la contribution interne de chaque pixel et en gardant la contribution géométrique. On parle alors d'interférométrie radar.

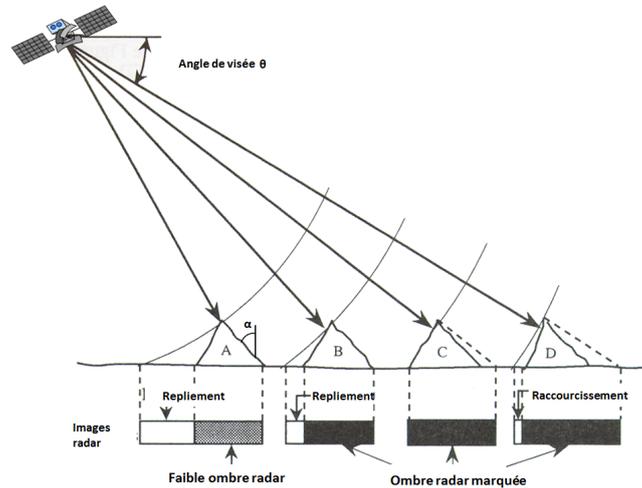


FIGURE I.3 – Distorsions géométriques de l'imagerie SAR (version modifiée (Tempfli et al., 2009))

3.2 Les distorsions géométriques

Imager une scène par une visée latérale n'est pas sans conséquence. En effet, cette visée latérale entraîne des distorsions géométriques du relief inhérentes à l'imagerie SAR. La contribution d'un réflecteur est repérée par sa distance au radar et son temps de passage au plus près du radar par la restitution à Doppler zéro (Massonnet and Feigl, 1998). Autrement dit, l'image est échantillonnée en temps, donc formée en fonction de la distance radiale radar-objet (temps de trajet aller-retour en considérant la vitesse de l'onde comme constante). Il est donc possible que plusieurs objets dans la ligne de visée du satellite soient à même distance du capteur SAR, notamment en milieu de montagne. Cela aboutit à un mélange des contributions dans un même pixel (Massonnet and Feigl, 1998). Les distances entre objets peuvent être alors raccourcies (cas D figure 2) voire s'inverser (cas A et B), on parle alors de repliement. Avec un angle de visée variant le long de la fauchée d'un point proximal (*near range*) à un point distal (*far range*), les distances entre objets dans la géométrie radar sont donc différentes de celles dans la géométrie sol. Une autre limite liée à la visée latérale des capteurs SAR est le phénomène d'ombre. Une zone peut ne pas être illuminée par le faisceau radar à cause d'un obstacle, typiquement un relief important en montagne ou des immeubles en ville, situé entre la cible et le capteur SAR (cas B, C et D de la figure I.3).

3.3 Le speckle

Une autre caractéristique des images SAR est le chatoiement, ou *speckle*, correspondant à la réponse obtenue sur une zone constituée d'une multitude de cibles élémentaires dont aucune des réponses n'est suffisamment élevée pour dominer toutes les autres et imposer sa phase à la cellule de résolution (Massonnet, 2016). Massonnet (Massonnet, 2016) définit ce phénomène ainsi : « le *speckle* caractérise le comportement des cibles étendues en radar. Un paysage homogène (forêt, champ) ne donne pas une image homogène au bruit près, comme en optique, mais un signal aléatoire dont les caractéristiques (moyenne, écart-type...) sont homogènes ». Cela rend l'interprétation de la scène difficile. Une solution est alors de filtrer cette réponse ou d'effectuer

un moyennage spatial ou temporel avec plusieurs images, afin de renforcer les réponses des cibles permanentes et de réduire la variance des réponses aléatoires par sommation effectuée au niveau de l'amplitude où le speckle va se comporter comme un bruit multiplicatif. On notera cependant que ce phénomène n'est pas vraiment « aléatoire » car des images acquises sous le même angle auront le même *speckle* si la surface reste inchangée.

En définitive, une image SAR est bien différente d'une image optique classique et son interprétation est plus difficile. La figure I.4 en fournit une illustration (Trouvé, 2006). Le glacier Mer de Glace et le glacier d'Argentière sont identifiables dans l'image SAR en géométrie radar, mais on remarque clairement les distorsions géométriques. De plus, si on rectifie l'image optique sur l'image SAR et qu'on applique des masques de visibilité (rouge pour l'ombre et vert pour le repliement), on constate que la partie exploitable de l'image SAR du glacier Mer de Glace est assez réduite. Mais la possibilité de mesurer des déplacements faibles et lents, à grande échelle, fait de l'imagerie SAR un outil très puissant.

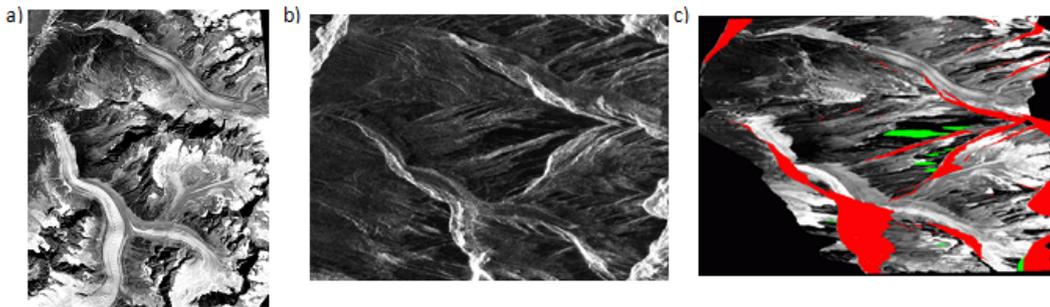


FIGURE I.4 – Comparaison entre image optique (a), image SAR (b) et rectification radar de l'image optique avec masque de visibilité (c) d'après Trouvé, 2006 (Trouvé, 2006)

3.4 Spécificités des données Sentinel 1

La constellation Sentinel-1 offre de nombreux avantages, parmi lesquels on peut citer le temps de revisite réduit (jusqu'à 6 jours), ce qui limite la décorrélation temporelle (voir section 1.4). De plus les données orbitales sont très précises pour ces nouveaux satellites, ce qui permet de réduire les erreurs orbitales. A noter qu'il existe trois catégories de vecteurs orbitaux avec 3 niveaux de précision. La première catégorie correspond aux vecteurs prédits (fichiers ORBPRED), la seconde aux vecteurs restitués, disponibles en quasi-temps réel (fichiers RESORB) et la dernière aux vecteurs précis (fichiers POEORB), disponibles dans les 20 jours après la date d'acquisition (Schubert et al., 2015). Les vecteurs restitués ont une précision d'environ 10cm et les vecteurs précis d'environ 5cm (Fernández et al., 2015) (Peter et al., 2017). Sentinel 1A et 1B sont également caractérisés par des lignes de base très courtes, de l'ordre de la centaine de mètre voire inférieure, ce qui limite aussi l'impact des erreurs de MNT (Rocca, 2007) (Rucci et al., 2012). Ces différentes améliorations favorisent donc une mesure du déplacement précise.

Cette constellation a la particularité d'embarquer un capteur qui prend en charge quatre modes d'imagerie exclusifs, offrant une résolution et une couverture différente : Interferometric Wide swath (IW), Extra Wide swath (EW), StripMap (SM), et Wave (WV) (Geudtner et al., 2013) (voir figure I.5).

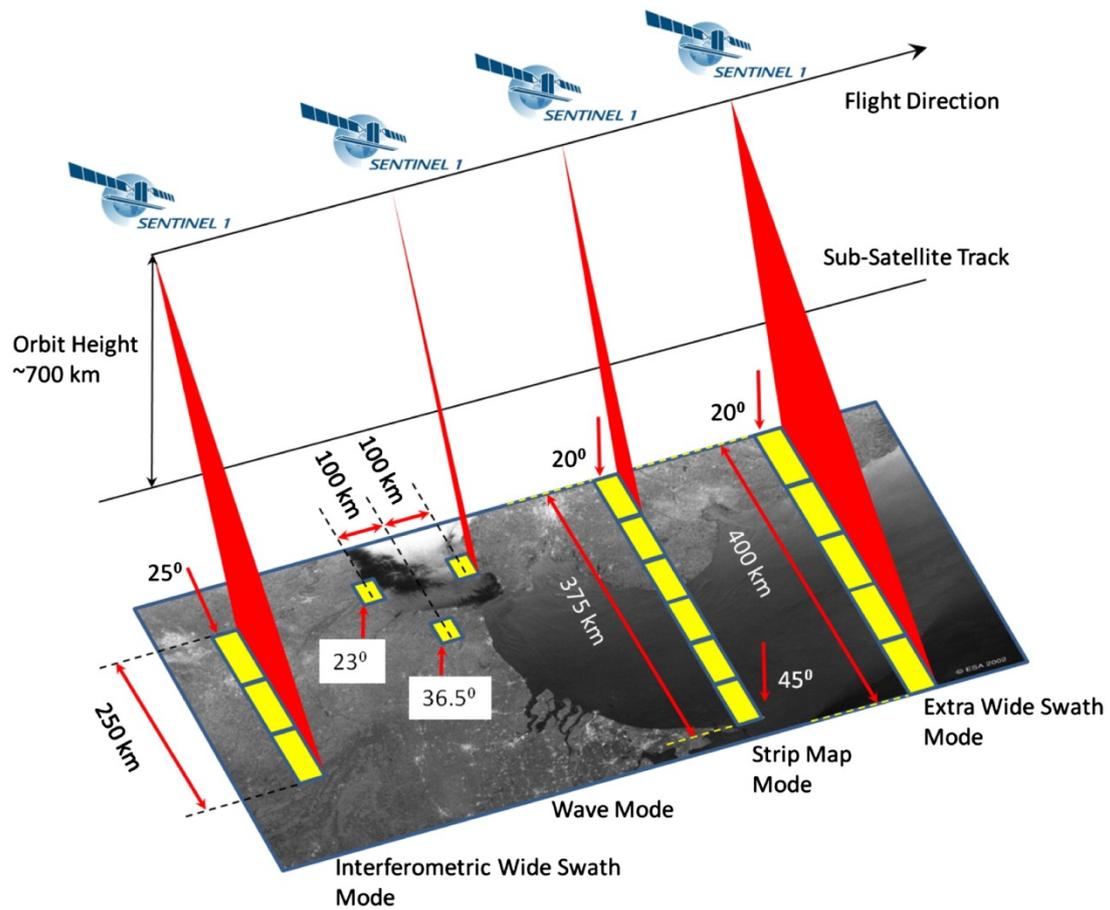


FIGURE I.5 – Modes d'acquisition de Sentinel 1 (source : ESA)

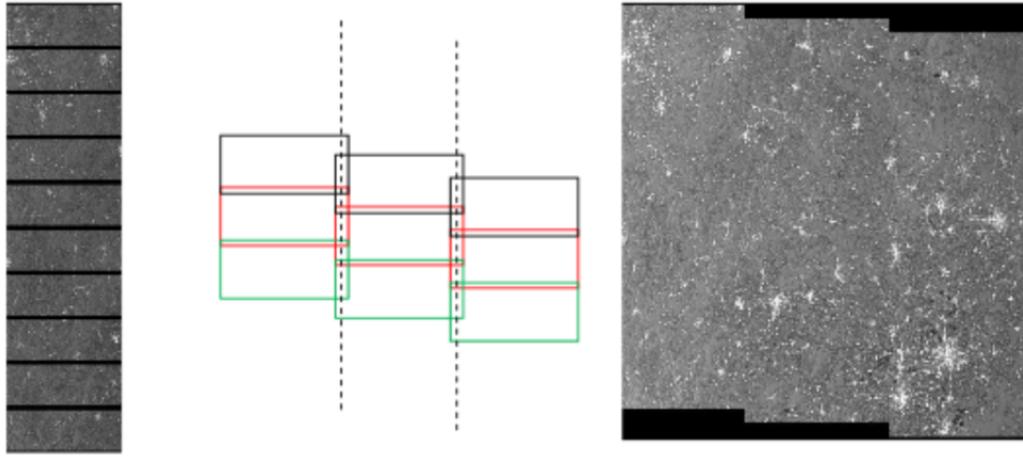


FIGURE I.6 – Arrangement des bursts et swaths constituant une image Sentinel-1 (mode IW) A gauche les 9 bursts d’un swath, au centre la superposition des bursts et swaths, à droite une image SLC dans son intégralité.

Le mode principal d’acquisition est le mode IW, fournissant des images SLC couvrant 250 km en fauchée. La résolution d’un pixel est comprise entre 2,7 m et 3,5 m en range et 22 m en azimuth (ESA). Les 3 fauchées (*swaths*) acquises lors d’une passe sont elles-mêmes composés de 9 *bursts* (voir figure I.6) qui présentent un léger recouvrement en azimuth.

La nouvelle technique de scan progressif de Sentinel-1, appelée TOPSAR est caractérisée par le fait que le faisceau d’antenne d’azimut est dirigé de l’arrière vers l’avant à une vitesse constante. Cela permet d’éliminer presque entièrement l’effet d’échancrures et conduit également à des défauts en azimuth et un rapport signal sur bruit (SNR) le long de l’azimut constant. Toutefois, le compromis est que cela réduit le temps d’observation de la cible, et donc réduit également la résolution spatiale en azimuth (Geudtner et al., 2014).

Le mode d’acquisition implique une contrainte supplémentaire dans le traitement interférométrique, pour lequel le recalage des images doit être réalisé avec une grande précision, sous peine d’avoir des décalages de phase de l’interférogramme (Geudtner et al., 2013). Il faut atteindre un recalage sub-pixélique bien plus exigeant qu’avec des données SAR traditionnelles, à savoir inférieur à $3/100^{\text{ème}}$ de pixel en azimuth (Geudtner et al., 2014). Le décalage de phase induit par une erreur de recalage s’exprime ainsi :

$$\Delta\Phi_{az} = 2.\pi.f_{dc}.\Delta t \quad (\text{I.3})$$

Où f_{dc} représente la moyenne de la fréquence Doppler de la cible et Δt le décalage temporel relatif (erreur de recalage en seconde) entre les deux signaux interférométriques de deux bursts consécutifs. Notons que la fréquence Doppler moyenne varie périodiquement selon la position au sein du burst. Celle-ci est égale à zéro au centre, elle est négative au début de burst et positive à la fin (Scheiber and Moreira, 2000) (De Zan et al., 2014). Afin d’éviter la présence de décalage de phase entre deux bursts successifs, il est nécessaire de recalibrer les images Sentinel 1 avec une précision d’environ 1 cm (soit approximativement 0.001 pixel), ce qui permet d’avoir un décalage de phase inférieur à $\pm 1,5^\circ$ (Prats P., 2014). Les recommandations pour le recalage de données Sentinel 1 sont d’effectuer dans un premier temps un recalage géométrique avec une précision de 0,01 pixel en azimuth, puis de produire les doubles interférogrammes des zones

de recouvrement des bursts consécutifs et enfin d'estimer l'erreur de recalage en azimuth par la méthode de diversité spectrale avancée (Enhanced Spectral Diversity), permettant d'arriver à une précision finale du recalage d'environ 0.001 pixel (De Zan et al., 2014).

Les auteurs de (Grandin, 2015) ont développé une méthode différente basée sur le « deramping », qui consiste en partie à multiplier la phase par une fonction de « dérampement » afin de supprimer le terme quadratique de l'erreur de recalage en azimuth. Bien qu'ayant l'avantage d'être assez simple à mettre en place, cette dernière est moins précise que la méthode de diversité spectrale avancée.

La méthode la plus fiable à ce jour semble être celle basée sur la méthode de diversité spectrale avancée, (Sowter et al., 2016b) (Werner et al., 2003) qui exploite la zone de chevauchement entre deux bursts consécutifs pour estimer le mauvais recalage avec la sensibilité requise.

4 Techniques interférométriques différentielles

4.1 Interférométrie différentielle (D-InSAR)

i Principe

La technique d'interférométrie radar au sens large consiste à comparer les phases de deux images SAR d'une même région, acquises à partir de deux positions légèrement différentes dans l'espace et le temps (Massonnet and Feigl, 1998). Cela consiste essentiellement à soustraire les phases de deux images SAR préalablement recalées, permettant d'obtenir la phase interférométrique, à laquelle sont soustraites les contributions orbitales et topographiques si l'on s'intéresse aux déplacements entre les acquisitions (Massonnet, 2016).

Pour former un interférogramme, il faut réaliser un produit hermitien entre deux images SLC, permettant par la suite de travailler sur la phase de ce produit, la phase interférométrique. Celle-ci peut être exprimée sous la forme suivante :

$$\Phi = \Phi_{def} + \Phi_{topo} + \Phi_{orb} + \Phi_{atm} + \Phi_{bruit} \quad (I.4)$$

Φ_{def} correspond à la composante de déformation, fournissant une information sur le déplacement le long de la lignée de visée du satellite.

Ce calcul est souvent suivi par l'estimation de la cohérence interférométrique définie par l'équation suivante :

$$c_o = \frac{\left| \sum_{m,n} u_1(m,n) \cdot u_2^*(m,n) \right|}{\sqrt{\sum_{m,n} |u_1(m,n)|^2 \sum_{m,n} |u_2(m,n)|^2}} \quad (I.5)$$

où $u_1(m,n)$ et $u_2(m,n)$ correspondent aux valeurs complexes du pixel (m,n) d'une image maîtresse et d'une image esclave. La cohérence interférométrique ainsi définie varie entre 0 et 1, en fonction de l'évolution des mécanismes de rétrodiffusion entre deux passages de satellite. La cohérence est estimée pour chaque pixel d'un interférogramme en utilisant une fenêtre d'estimation correspondant à la fenêtre de moyennage spatiale utilisée pour la construction de l'interférogramme. Cet estimateur peut alors être utilisé comme mesure de fiabilité de la phase interférométrique (Hanssen, 2001).

L'objectif de l'interférométrie différentielle est alors de déterminer la différence de distance cible-captteur d_{LOS} entre deux acquisitions à partir de l'équation suivante :

$$\Phi_{def} = \frac{4\pi d_{LOS}}{\lambda} \quad (\text{I.6})$$

Afin d'accéder à l'information de déplacement, il est donc nécessaire de supprimer préalablement les contributions autres que celles correspondant au déplacement

ii Contributions orbitales et topographiques

Ce travail est initié par le calcul de la phase interférométrique différentielle $\Delta\Phi$. Cette étape consiste à supprimer les composantes orbitales Φ_{orb} et topographiques Φ_{topo} , toutes deux présentes du fait de la position légèrement différente du satellite entre deux passages. La différence de géométrie qui en résulte se traduit par une différence de trajet de l'onde radar qui est à l'origine d'un décalage de phase en range (la composante de Terre Plate ou rampe orbitale) (Jolivet, 2011). La différence de position du satellite entre deux passages induit également une variation d'angle de visée, ajoutant un signal de phase lié à un changement d'élévation (composante topographique) (Bekaert, 2015). En s'appuyant sur la configuration interférométrique présentée dans la figure I.7, la phase interférométrique peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} (B \sin(\theta - \alpha) - \frac{B_{perp}^0}{R \sin(\theta)} H_p - d) + \Phi_{atm} + \Phi_{bruit} \quad (\text{I.7})$$

où les deux premiers termes correspondent à la rampe orbitale et effets topographiques (Cavalié, 2007). Ainsi, des franges sur l'interférogramme peuvent apparaître du fait du décalage des orbites entre deux acquisitions, et plus particulièrement de sa composante perpendiculaire à la visée, dont il est possible de se débarrasser en utilisant les données orbitales précises et un MNT de la zone imagée. Dans la pratique, les informations auxiliaires sur les orbites et sur la topographie n'étant pas exactes, une composante orbitale résiduelle ainsi qu'une composante topographique résiduelle peuvent subsister (Yan, 2011). La phase interférométrique différentielle $\Delta\Phi$ est alors définie par :

$$\Delta\Phi = \Phi_{def} + \Phi_{topores} + \Phi_{orbres} + \Phi_{atm} + \Phi_{bruit} \quad (\text{I.8})$$

où $\Phi_{topores}$ et Φ_{orbres} sont les phases topographiques et orbitales résiduelles. Ces phases résiduelles peuvent être corrigées notamment avec des techniques multi-images permettant d'estimer la dépendance de la phase interférométrique par rapport aux lignes de bases et à la topographie.

iii Perturbations atmosphériques

La phase interférométrique différentielle doit ensuite être corrigée de sa phase atmosphérique Φ_{atm} qui témoigne d'un retard dans la propagation de l'onde causé par l'hétérogénéité de l'atmosphère (Yan, 2011). Des variations de vitesse peuvent avoir lieu dans la troposphère (0-100 km) et/ou dans la partie ionisée de l'atmosphère appelée ionosphère (100-1 000 km) (Gomba, 2016).

Les effets troposphériques, pouvant engendrer des erreurs de mesure de déplacement dépassant la dizaine de centimètres (Hooper et al., 2012) (Bekaert et al., 2015), sont visibles à de

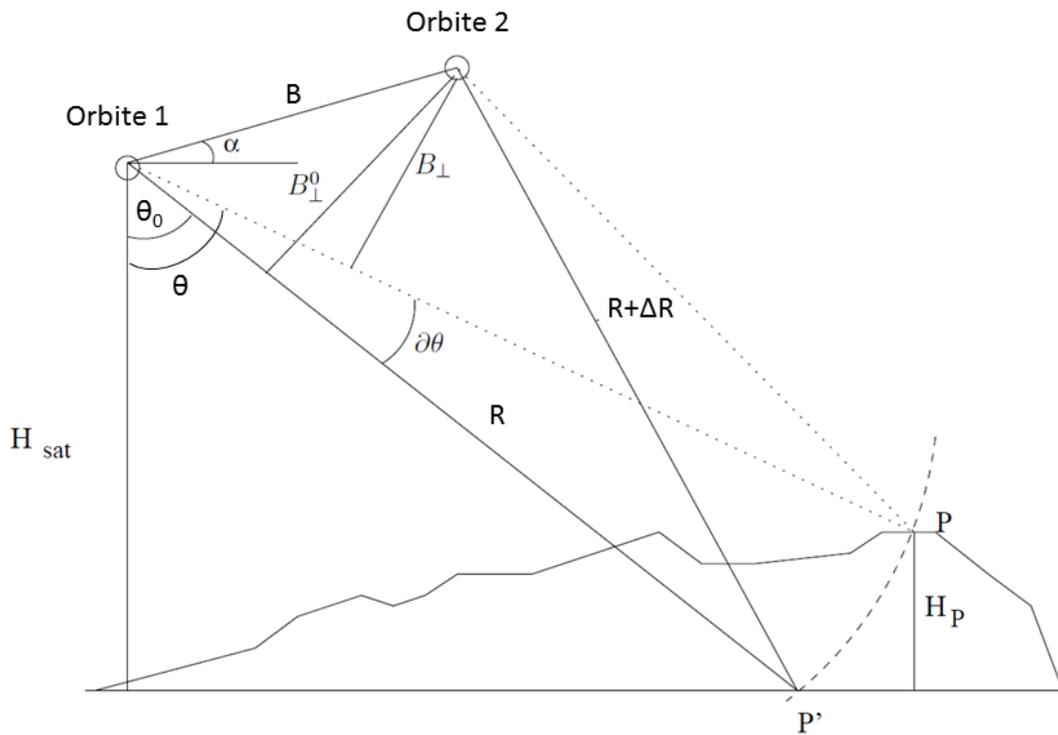


FIGURE I.7 – Configuration interférométrique d'une cible située à la distance R du satellite et d'altitude H_p d'une surface de référence. Les deux orbites sont séparées par une ligne de base B et observent la cible avec deux angles de vue différents. Le point P' situé sur la surface de référence ($H'_p = 0$) et le point P (d'altitude H_p) se situent à la même distance du satellite. Les deux points ne peuvent être distingués à partir d'un seul passage du satellite (à partir de (Cavalié, 2007)).

petites échelles (de plusieurs centaines de mètres à quelques kilomètres) sous l'effet de dynamiques turbulentes et cohérentes de la troposphère, qu'à plus large échelle (plusieurs dizaines de kilomètres) causés une variation latérale de pression, de température et d'humidité relative (Hanssen, 2001).

Les phénomènes turbulents, principalement dans la partie superficielle de la troposphère (0-2 km), peuvent provoquer une hétérogénéité dans la composition atmosphérique et être à l'origine de gradients localisés dans la phase interférométrique. Le terme de phase interférométrique associé à ces artefacts atmosphériques correspond à la phase atmosphérique turbulente (Massonnet and Feigl, 1998). La stratification de l'atmosphère peut être à l'origine d'un retard de phase supplémentaire, on parle alors de phase atmosphérique stratifiée (Hanssen, 2001), phénomène particulièrement présent dans les zones montagneuses.

Les artefacts troposphériques peuvent être estimés à partir de données externes telles que les données GNSS permettant d'estimer le délai zénithal (Williams et al., 1998) (Janssen et al., 2004), les images multispectrales comme les images MODIS (Li et al., 2006a) et MERIS (Li et al., 2006b), ou par assimilation de données météorologiques dans des modèles atmosphériques (Wadge et al., 2002) (Doin et al., 2009). Les artefacts liés aux variations d'épaisseur des couches de l'atmosphère stratifiée peuvent également être estimés en recherchant la relation (linéaire ou autre) entre la phase et la topographie. Lorsque le suivi de déformations se fait à partir d'une pile d'images, il est possible de corriger les artefacts liés à l'atmosphère turbulente à partir d'un filtrage spatio-temporel (Hooper et al., 2004).

Les effets ionosphériques sont, quant à eux, corrélés aux variations de densité d'électrons libres, ou Contenu Electronique Total (TEC), dans l'ionosphère (Gray et al., 2000) (Bekaert, 2015). Ces effets étant proportionnels à la longueur d'onde radar, ils sont plus importants pour les grandes longueurs d'onde (bande L ou P), même si dans une moindre mesure ils affectent également les longueurs d'onde plus courtes (bande C ou X) (Gomba, 2016). Les artefacts ionosphériques peuvent être estimés à l'aide de données externes tels que les données GNSS (Misra and Enge, 2011), des modèles météorologiques ionosphériques (Meyer et al., 2006) ou encore des méthodes basées sur le fractionnement du spectre (Rosen et al., 2010).

iv Sources de bruit

Enfin, la composante liée au bruit Φ_{bruit} est due aux diverses sources de décorrélation parmi lesquelles figurent la décorrélation due au bruit thermique lié au capteur, la décorrélation géométrique (ou décorrélation spatiale) et la décorrélation temporelle (Lopez Quiroz, 2008). La décorrélation géométrique est liée à la différence d'angles d'incidence entre les deux acquisitions. Plus cette différence est grande et plus la décorrélation entre les motifs de speckle est importante (Jong-Sen Lee et al., 1998) (Strozzi et al., 2001), réduisant la cohérence et donc la qualité de l'interférogramme. La décorrélation temporelle est due aux changements physiques des rétrodiffuseurs élémentaires des pixels de type "cible distribuée", dans l'intervalle de temps entre les deux acquisitions (évolution de la couverture végétale, modification de la topographie locale, etc.). Ces diverses sources de décorrélation ont des effets multiplicatifs sur la phase interférométrique

et font obstacle au déroulement de phase (Yan, 2011). Le speckle peut être réduit à partir d'un filtre multi-vues lors de la construction de l'interférogramme (Lee et al., 1994). Il est également possible de limiter la présence de bruit soit avant la construction de l'interférogramme par filtrage des images dans le domaine spectral (Hanssen, 2001), soit après la construction (filtre de Goldstein (Goldstein and Werner, 1998), filtre de Lee (Lee et al., 1994)).

v Déroulement de phase

L'interférométrie différentielle possède ainsi plusieurs limites, notamment les décorrelations temporelle et spatiale ainsi que les artefacts atmosphériques (Crosetto et al., 2016). De plus, la phase interférométrique n'est connue que modulo 2π . En effet, la phase augmente de 2π à chaque fois que l'onde parcourt une distance égale à λ lors du trajet aller-retour entre le radar et la cible.

$$\varphi = \phi + 2k\pi \quad (\text{I.9})$$

Une étape importante pour obtenir une mesure de déformation de la surface imagée consiste donc à retrouver le bon multiple de 2π permettant d'obtenir la phase absolue (Trouvé, 1996) (Yan, 2011). Pour cela, on considère que la phase déroulée est continue et respecte le critère de Nyquist, à savoir que la phase varie de moins de π entre deux pixels voisins (Yan, 2011). Dans le cas contraire, en cas de fort gradient ou décorrelation, cela engendre une non-unicité de la solution et entraîne la propagation des erreurs de déroulement (Ducret, 2013). La réussite de l'étape de déroulement de phase conditionnera la réussite de l'obtention de mesure de déformation par interférométrie différentielle. De nombreux algorithmes ont ainsi été implémentés afin de résoudre ce problème (Yan, 2011), répartis dans trois groupes, les méthodes locales, globales ou mixtes (Ducret, 2013). A noter que les deux méthodes les plus couramment rencontrées sont la méthode de "Branch-cut" (Goldstein et al., 1988) et la méthode de Minimum Cost Flow (MCF) (Chen and Zebker, 2000).

4.2 Types de diffuseurs

Du fait des difficultés rencontrées lors du déroulement de phase et limitations de la méthode D-InSAR, de nombreux développements ont vu le jour depuis les années 2000 et reposent sur l'utilisation des méthodes multi-images. D'abord limitées à la sommation d'interférogrammes indépendants (Fruneau and Sarti, 2000), ces méthodes ont ensuite été enrichies par des algorithmes permettant le suivi de diffuseurs particuliers : les diffuseurs dominants et les diffuseurs distribués (Ducret, 2013). Des diffuseurs dominants désignent des diffuseurs dominants leur cellule de résolution. Ces diffuseurs sont nombreux en milieu urbain et correspondent à des bâtiments ou autres structures artificielles, mais sont également rencontrés en milieu naturel, notamment avec les rochers isolés (Perissin and Ferretti, 2007). De nombreuses méthodes ont été développées pour permettre le suivi de ces diffuseurs particuliers, appelés diffuseurs permanents regroupées au sein des méthodes PS (voir section 1.4.3) et des méthodes dérivées. L'autre type de diffuseurs

suivis par les méthodes multi-images sont les diffuseurs distribués (ou DS). Contrairement aux diffuseurs dominants, les DS présentent un rapport signal sur bruit moyen ou bas et ne peuvent être exploités que s'ils forment un groupe de pixels suffisamment grands, partageant le même mécanisme de diffusions, pour permettre une analyse statistique (Even and Schulz, 2018). Sur le terrain, ces diffuseurs correspondent à des zones de végétation rase et constante ou à un sol nu et sans relief (zone désertique) (Ferretti et al., 2011). Les méthodes permettant le suivi de ces diffuseurs particuliers sont regroupées au sein des méthodes SB (section 1.4.4).

4.3 Méthodes Permanent Scatterers (PS)

Afin de s'affranchir des limites de l'interférométrie différentielle classique, des techniques avancées ont été développées depuis le début des années 2000 en se basant sur l'utilisation d'une pile temporelle d'images SAR. La classe des méthodes PS englobe plusieurs techniques (voir tableau I.1) dont l'origine vient de la méthode des Permanent Scatterers développée par les auteurs de (Ferretti et al., 2000b). Le principe de ces techniques est d'estimer conjointement la vitesse de déformation et l'erreur de MNT, souvent à travers un modèle de déformation linéaire, en se basant uniquement sur les pixels qui ne sont pas ou peu affectés par la décorrélation spatiale et temporelle (Ferretti et al., 2000b), ce qui va permettre de minimiser l'impact de la composante liée au bruit. Un PS est un diffuseur dont la réponse domine une cellule de résolution, ce qui permet d'avoir un rapport signal sur bruit plus important. De ce fait, le traitement est moins influencé par le bruit. Plusieurs approches existent (voir tableau I.1) et diffèrent de par le critère de choix de conservation des pixels, l'utilisation ou non d'un modèle de déformation et la configuration de la ligne de base perpendiculaire.

TABLE I.1 – *Caractéristiques des principales approches PS (d'après (Crosetto et al., 2016))*

Méthode PS	Critère de sélection des PS	Modèle de déformation
Ferretti et al. (2000, 2001)	Dispersion de l'amplitude	Déformations linéaires
Berardino et al. (2002)	Cohérence	Lissage spatial
Werner et al. (2003)	Dispersion de l'amplitude et diversité spectrale	Lissage spatial
Hooper et al. (2004)	Amplitude et phase	Lissage spatial
Kampes et al. (2006)	Dispersion de l'amplitude et RSC	Différents types de modèles de déformations
Ly et al.(2014)	Test d'homogénéité statistique	Déformations linéaires
Devanathéry et al. (2014)	Dispersion de l'amplitude » et « PS Cousin »	Lissage spatial

De façon générale, les principales étapes de méthodes PS peuvent se regrouper en 3 phases. La première correspond à la constitution d'une pile d'images recalées - idéalement une trentaine de scènes et un minimum de 15-20 images en bande C (Crosetto et al., 2016) - en utilisant une seule image de référence pour toutes les paires. La seconde étape consiste à sélectionner une liste de candidats PS. Pour cela, plusieurs approches sont possibles, dont la majorité repose sur l'évaluation de la variabilité temporelle de la rétrodiffusion (voir tableau I.1). Certains auteurs proposent des approches alternatives ou complémentaires, basées sur l'estimation de la stabilité de la phase (Hooper et al., 2004) ou de la corrélation spectrale de la phase (voir section 1.5.2).

La dernière étape correspond à l'estimation de la vitesse de déplacement de PS. A noter qu'au cours de cette étape, la liste des candidats PS peut être corrigée en fonction de la qualité des diffuseurs sélectionnés. Dans la chaîne IPTA développée par les auteurs de (Werner et al., 2003), et utilisée dans le cadre de cette thèse, la qualité des points préliminaires est évaluée en fonction de l'écart-type estimé de la phase interférométrique différentielle à partir du modèle de régression choisi préalablement.

L'un des avantages des méthodes PS est que le déroulement de phase peut être réalisé en 3D, c'est à dire que le déroulement spatial peut prendre en compte l'évolution temporelle d'un même pixel. En conséquence, une information sur le déplacement est a priori nécessaire, à partir de laquelle un modèle de déformation peut être établi. En général, la vitesse de déplacement linéaire moyenne et l'erreur de MNT sont considérées comme les deux principaux paramètres des régressions linéaires réalisées sur la phase non déroulée.

La phase différentielle déroulée Φ_k pour un point d'un interférogramme k peut être exprimée comme suit :

$$\Phi_k = \frac{4.\pi.B_{\perp}^k.h}{\lambda.R.\sin(\theta)} + \frac{4.\pi.T^k.v_{LOS}}{\lambda} + \Phi_{nl}^k + \Phi_{atm}^k + \Phi_{orb}^k + \Phi_{bruit}^k \quad (I.10)$$

où le premier terme correspond à l'erreur de MNT h , le deuxième terme correspond à la vitesse de déplacement linéaire v_{LOS} , Φ_{nl}^k correspond à la contribution non linéaire du déplacement du sol, Φ_{atm}^k est le décalage de phase atmosphérique, Φ_{orb}^k est l'erreur résiduelle de la phase orbitale et Φ_{bruit}^k la phase liée au bruit de décorrélation, qui est supposé être faible sur les PS sélectionnés. La phase de déplacement linéaire est écrite en fonction de la valeur de la base temporelle T^k .

La principale difficulté rencontrée avec les méthodes PS est la capacité à séparer la contribution non linéaire du déplacement Φ_{nl}^k du délai atmosphérique Φ_{atm}^k . Les déformations non linéaires peuvent alors amener à des erreurs de déroulement de phase et à linéariser dans le temps le décalage de phase (Yan, 2011). L'utilisation d'un modèle linéaire de déformation représente donc une éventuelle limite, ce qui peut amener des erreurs dans l'estimation du phénomène de déformation. L'atout de cette thèse est qu'elle est réalisée en collaboration avec des professionnels de la topographie de précision qui disposent de nombreux moyens de mesures sur site. Ainsi les données de topographie classique auront valeur de vérité terrain et pourront renseigner sur la nature linéaire ou non des déformations affectant la zone étudiée.

Les méthodes PS de façon générale fournissent donc des mesures de déplacements ponctuelles, se limitant aux PS sélectionnés. Il faudra faire très attention dans l'interprétation du phénomène de déformation de la zone étudiée, en analysant les résultats au cas par cas (Crosetto et al., 2016), afin d'éviter les problèmes de déroulement spatial. En particulier, il faudra être attentif lors du choix du point de référence qui servira lors du déroulement de phase (Werner et al., 2003). Le fait qu'on observe uniquement la projection de la déformation par rapport à la ligne de visée du satellite (Xing et al., 2013) est un autre fait à prendre en considération. Tout ceci peut amener à utiliser des données de terrain afin de contraindre ou compléter les informations tirées de l'interférométrie différentielle, en technique avancée ou classique. Mais retenons que la méthode PS, qui passe par un filtrage progressif, conduit à une solution plus précise du déplacement des séries temporelles par itérations (Yan et al., 2012).

Un autre problème rencontré correspond aux mesures de déplacements rapides, avec une valeur maximale de la phase de déformation entre deux acquisitions égale à π . La différence de phase maximale entre deux pixels voisins est 2π , ce qui correspond à une frange ($\lambda/2$). Le taux maximum de déformation détectable dépend aussi du temps séparant les deux acquisitions d'un couple images. Le taux de déformation moyen ne doit pas dépasser $\lambda/2N$ où N correspond au nombre de jours séparant les deux acquisitions. (Pour un satellite avec un temps de revisite de M jours, le taux maximal détectable est donc de $\lambda/2M$). Dans le cas de Sentinel, la vitesse moyenne de déplacement maximale mesurable est de 2.3mm/jour (Zhou et al., 2009). On peut considérer que pour les cas étudiés au cours de cette thèse de tels déplacements sont peu probables.

4.4 Méthodes Small Baselines (SB)

En 2002, Berardino et al. (Berardino et al., 2002) ont implémenté une méthode multi-temporelle appelée méthode SBAS (Small Baseline Subset) permettant de suivre l'évolution temporelle de la déformation sur des objets naturels, qui ne sont pas ou peu affectés par la décorrélation spatiale et temporelle grâce à l'utilisation de couples d'images ayant des bases spatiales et temporelles réduites.

Le principe de la méthode SBAS repose sur l'utilisation, pour une pile d'images SAR, de l'intégralité des interférogrammes possibles ayant une ligne de base spatiale et temporelle réduite. La non-sélection de certains interférogrammes peut mener à l'obtention de sous-réseaux ou subsets, non connectés avec la première date de la série temporelle. Diverses stratégies existent alors pour relier ces derniers et estimer l'évolution temporelle de la déformation sur l'ensemble de la période d'observation. Depuis 2002, de nombreux travaux ont permis le développement de méthodes similaires basées sur l'utilisation de courtes lignes de base temporelles et spatiales, couramment regroupées sous le terme SBAS. Pour éviter toute confusion entre le terme générique SBAS et la méthode développée par Berardino et al., cette catégorie de méthode sera désignée dans le manuscrit sous le terme SB (Small Baseline).

Les approches SB permettent de suivre des diffuseurs spécifiques appelés DS (Distributed Scatterers) (Zebker and Villasenor, 1992) (Rocca, 2007) (Hanssen, 2001), qui sont des cibles non ponctuelles contenant une information cohérente seulement sur certaines paires interférométriques (Samiei-Esfahany et al., 2016), ne considérant que les couples ayant une ligne de base temporelle et spatiale réduite (Berardino et al., 2002) (Lanari et al., 2007). Les approches SB permettent ainsi de maximiser la cohérence (Berardino et al., 2002) et d'augmenter la couverture spatiale, en particulier en dehors des zones urbaines (Yan et al., 2012). De plus, la stratégie de sélection des interférogrammes permet une certaine redondance de l'information, où un même événement (ou incrément de phase) est observé dans plusieurs couples interférométriques (Jolivet, 2011). Cette redondance permet de minimiser les erreurs d'estimation sur l'évolution temporelle de la déformation, principalement dues à la décorrélation spatiale et temporelle ainsi qu'à la correction topographique (Werner et al., 2012). En revanche, cela ne permet pas de compenser les effets du délai atmosphérique, pour lequel il est nécessaire de passer par une étape de filtrage spatio-temporel (le délai atmosphérique étant corrélé spatialement et décorrélié temporellement

(Cavalié, 2007)) ou en ajoutant une contrainte pour minimiser les variations de la vitesse de déformation lors de l'étape d'inversion en série temporelle (Jolivet, 2011) (Werner et al., 2012). L'hypothèse qui est alors émise est que les variations hautes fréquences ne correspondent pas à de la déformation mais aux délais atmosphériques (Cavalié, 2007). Il y a alors un avantage à travailler avec de courtes lignes de base temporelles plutôt qu'avec de longues périodes d'observation pour lesquelles peut être difficile de différencier la déformation de l'atmosphère.

Selon la méthode SB employée, les interférogrammes sont soit filtrés par multi-vues (moyenne spatiale des pixels voisins) (Berardino et al., 2002) (Schmidt and Bürgmann, 2003) (Samiei-Esfahany et al., 2016), soit utilisés dans leur résolution native (Lanari et al., 2004) (Hooper, 2008), afin d'analyser des signaux de déformations localisées affectant par exemple des bâtiments isolés ou des structures artificielles (Antonio Pepe and Fabiana Calò, 2017). Ils sont ensuite déroulés spatialement avant d'être convertis en série temporelle mono-référence par une approche de moindres carrés ou par décomposition en valeur Singulière (SVD) (Berardino et al., 2002) (Schmidt and Bürgmann, 2003) (Samiei-Esfahany et al., 2016). Dans le cas de la méthode des moindres carrés, le problème inverse s'applique à la phase alors que dans le cas de la SVD il s'applique au taux de variation de phase (Cavalié, 2007).

La recherche de l'évolution temporelle de déformation à partir d'une série d'interférogrammes est un problème inverse qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$G_p \times m_p = d \quad (\text{I.11})$$

où G_p est à la matrice qui traduit pour un pixel p les relations entre le vecteur d correspondant à la phase observée dans les interférogrammes et m correspondant au vecteur d'incrément de phase ou au vecteur des taux de variation de phase, selon l'approche utilisée, celle des moindres carrés ou celle par SVD.

Dans la méthode implémentée par Baradino (Berardino et al., 2002) et par Werner et al. (Werner et al., 2012), la phase totale de la série temporelle Φ_i à chaque acquisition i peut s'écrire :

$$\Phi = \sum_{j=0}^i v_j \times T_j \quad (\text{I.12})$$

Où $\Phi_0 = 0$, v_i est le taux de variation de phase et T_i est le nombre de jour d'intervalle entre les acquisitions. En plus des temps d'intervalle, la matrice G intègre un terme proportionnel à la dérivée de la phase interférométrique par rapport à la hauteur dans les méthodes implémentées par Schimdt et al. (Schmidt and Bürgmann, 2003) et Werner et al. (Werner et al., 2012), permettant d'estimer simultanément à la résolution du problème inverse une correction topographique. De plus, un facteur de lissage est utilisé pour contraindre les changements rapides de vitesses de phase. Cela se traduit par l'ajout à G d'un ensemble de contraintes pondérées supplémentaires. Cela permet d'une part de réduire les effets atmosphériques, et d'autre part de reconnecter un réseau discontinu d'interférogrammes. La discontinuité entre les sous réseaux peut être interpolée en supposant que le taux de variation de phase est continu entre les sous-réseaux. Si aucun lissage n'est appliqué, le taux de déformation sera égal à 0 dans l'intervalle et entraînera des erreurs dans la déformation totale (Werner et al., 2012).

On différencie également les méthodes SBAS utilisant un modèle de déformation prédéfini (López-Quiroz et al., 2009) (Hetland et al., 2012), de celles ne nécessitant pas d'hypothèse sur l'évolution temporelle de la déformation (Berardino et al., 2002) (Hooper, 2008). Il existe des approches permettant de réaliser l'inversion de la série temporelles multi-références en mono-référence avant le déroulement des interférogrammes (Guarnieri and Tebaldini, 2008). Enfin, certains outils sont aujourd'hui capables de gérer aussi bien les suivis de cibles ponctuelles (PS, voir section 1.4.3) que de cibles distribuées DS. Les traitements PS et DS peuvent ainsi être réalisés de façon séparés (Hooper, 2008), ou de façon conjointe (Ferretti et al., 2001). Les algorithmes développés dans le module IPTA de GAMMA permettent également le suivi de DS et PS à partir d'une série temporelle multi-références.

4.5 Approche PS multi-références

Comme expliqué dans la section 1.4.3, la sélection des candidats PS avec le module IPTA est réalisée en évaluant la variabilité temporelle de la rétrodiffusion et la diversité spectrale de la phase. Ensuite, la qualité des paramètres estimés au cours des traitements et de la phase déroulée est évaluée à partir de l'écart-type de la phase résiduelle de la régression. Cette estimation de la qualité des résultats permet de réduire la liste des candidats PS au fur et à mesure des traitements afin de ne conserver que les pixels les plus susceptibles d'être de vrais PS. Cela peut amener à obtenir une faible densité de points, en particulier en dehors des zones urbaines. Pour remédier à cela, le logiciel GAMMA intègre des outils permettant de travailler sur une pile d'interférogrammes multi-références. La sélection des paires interférométriques est réalisée en ne conservant que les paires ayant une ligne de base temporelle et spatiale réduite. Dans le cas particulier du traitement des données Sentinel-1, le tube orbital étant très réduit (diamètre <200m), le critère principal de sélection sera le critère temporel. La résolution du problème inverse par SVD permettant de convertir la phase déroulée multi-références en série temporelle mono-référence fait appel à la même approche que celle présentée dans la section 1.4.4.

L'intérêt de cette approche multi-références est qu'elle permet de suivre l'évolution de diffuseurs subissant des changements de comportement. Avec une stratégie mono-référence, certains diffuseurs peuvent apparaître décorrelés dans les interférogrammes dont les images esclaves succèdent un tel changement de comportement, conduisant à leur suppression au cours du traitement. En revanche, avec une stratégie multi-références, la décorrelation peut être fortement réduite grâce à la sélection de paires interférométriques de courtes lignes de bases, ce qui limite les effets du changement de comportement des diffuseurs. On obtient des paires interférométriques dont les deux images sont situées avant le changement de comportement, ainsi qu'après le changement. Le diffuseur étant observé dans le même état dans les deux images, ce dernier apparaît cohérent. Avec de très courtes lignes de bases temporelles, il est alors possible de suivre l'évolution de diffuseurs subissant plusieurs changements de comportement. La stratégie multi-références ne permet donc pas de sélectionner plus de points mais elle permet d'en réduire la perte en conservant les points au comportement temporairement ou partiellement cohérent.

5 Détection et localisation des diffuseurs ponctuels

5.1 Les diffuseurs ponctuels

La réussite d'un suivi de déformation à partir de cibles ponctuelles (méthode PS au sens large, CR) dépend, entre autre, de la densité de diffuseurs sélectionnés et de la qualité de ces derniers (signal non bruité par la décorrélation). Or la détection de cibles ponctuelles dans les images radar peut s'avérer critique du fait du speckle (Henry et al., 2003), en particulier en milieu naturel. Un diffuseur ponctuel idéal est une cible dont l'énergie rétrodiffusée est constante en temps et en fréquence, caractérisée par un comportement bien défini en phase et en amplitude (Sanjuan-Ferrer et al., 2015) que l'on peut qualifier de déterministe. En milieu urbain, on rencontre des diffuseurs ayant des caractéristiques proches de ce type de diffuseurs idéaux, avec des comportements ponctuels quasi-déterministes (Schneider et al., 2006b). La détection de cibles ponctuelles est plus complexe en milieu naturel car leur comportement est moins déterministe et nécessite un seuil de détection plus faible (Sanjuan-Ferrer et al., 2010). Cette réduction du seuil peut avoir comme inconvénient de sélectionner des pixels affectés par du speckle. La difficulté de l'étape de sélection de diffuseurs ponctuels en milieu naturel est de trouver le bon compromis entre détecter un nombre suffisant de diffuseurs et limiter le nombre de fausses alarmes (Sanjuan-Ferrer et al., 2010).

Dans une approche PS, les cibles sélectionnées doivent permettre d'obtenir des résultats interprétables en termes de déplacement sur l'ensemble de la période observée. Il existe dans la littérature plusieurs techniques employées pour la sélection de PS. Les trois principales, la méthode de la dispersion d'amplitude, la méthode RSC et la méthode de corrélation spectrale, sont présentées dans les prochaines sections. Les différentes techniques employées pour la sélection de DS (voir section 1.4.4), diffuseurs non ponctuels sensibles à la décorrélation géométrique et temporelle, ne seront pas abordées ici.

5.2 Les méthodes de détection

i L'indice de dispersion d'amplitude

La méthode de dispersion d'amplitude normalisée, développée par les auteurs de (Ferretti et al., 2001) pour sélectionner les diffuseurs ponctuels, se base sur l'analyse de l'amplitude dans les séries temporelles. La sélection des pixels dominés par un diffuseur ponctuel se fait en appliquant un seuil sur l'indice de dispersion d'amplitude D_a défini par l'équation suivante :

$$D_a = \frac{\sigma_a}{\mu_a} \quad (\text{I.13})$$

où σ_a est l'écart-type de l'amplitude et μ_a la moyenne de l'amplitude. La sélection des candidats PS repose sur le principe que les diffuseurs ponctuels ayant un faible indice D_a ont une faible dispersion de phase (Ketelaar, 2009). En milieu urbain, la sélection des candidats PS se fait avec un seuil à 0,25 (Ketelaar, 2009). En milieu non-urbain, l'indice utilisé par Hooper et al. (Hooper et al., 2007) est de 0.4.

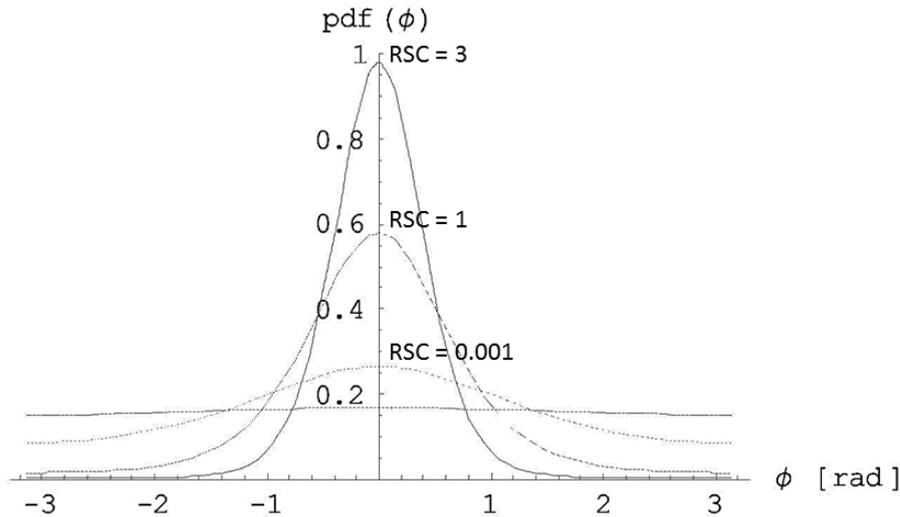


FIGURE I.8 – Fonction de densité de probabilité de phase d’un diffuseur ponctuel pour différentes valeurs de RSC (Adam et al., 2005).

ii La sélection à partir du RSC

Une autre méthode de sélection de diffuseurs ponctuels utilise le rapport Signal à Clutter ou RSC (voir section 2.2.2). Cette approche a été développée pour la détection de coins réflecteurs et la calibration des acquisitions radar (Bird et al., 1993). La sélection de PS à partir du RSC est basée sur l’hypothèse que l’observation d’un diffuseur ponctuel consiste en une réponse déterministe perturbée par du clutter (ou fouillis, bruit provenant de son environnement) décorrélé (section 2.2.2) (Adam et al., 2005) (Ketelaar, 2009).

Si l’on représente la fonction de densité de probabilité de phase pour différents RSC (figure I.8), on remarque que plus le RSC est élevé et plus l’erreur de phase est faible (Adam et al., 2005). Les PS peuvent donc être sélectionnés à partir des diffuseurs ponctuels ayant un RSC élevé.

Il est alors possible de relier le RSC à l’erreur de phase Φ_{err} (Adam et al., 2005) :

$$\Phi_{err} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot RSC}} \quad (I.14)$$

Cette équation repose sur le même modèle de signal que celui utilisé par Ferretti et al. (Ferretti et al., 2001) dans lequel le signal d’une cellule de résolution dominée par un diffuseur ponctuel est constitué d’une réponse déterministe du diffuseur et d’un bruit Gaussien circulaire complexe (Kampes, 2006).

Ferretti et al. (Ferretti et al., 2001) a montré que l’indice de dispersion normalisé D_a pouvait être utilisé comme approximation de l’écart-type de la phase. L’indice de dispersion normalisé D_a peut donc également s’écrire en fonction du RSC (Adam et al., 2005) :

$$D_a = \frac{1}{\sqrt{2 \times RSC}} \quad (I.15)$$

Ainsi les deux méthodes RSC et D_a peuvent être utilisées pour estimer l’écart-type de la

phase, avec des résultats équivalents pour des valeurs élevées de RSC (Kampes, 2006). Cependant Adam et al. a montré que ces deux méthodes d'estimation d'erreur de phase présentent des biais, d'autant plus importants que la valeur de RCS est faible. La comparaison de ces méthodes a montré que la méthode basée sur l'indice D_a était la plus optimiste (biais plus grand) (Kampes, 2006). De plus, Kampes et al. estime que la valeur minimale de RSC pour appliquer ces méthodes d'estimation d'erreur de phase est à 9 dB (Ketelaar et al., 2005).

Les approches de sélection de PS par l'indice D_a et le RSC sont établies sur les mêmes hypothèses. Cependant, la différence principale entre ces deux méthodes est le moyen d'estimer ces deux indicateurs. En pratique, il peut être difficile d'utiliser la méthode RSC lorsque la densité de diffuseurs ponctuels est importante, typiquement en zone urbaine, puisqu'elle nécessite d'estimer le clutter avec une grande flexibilité sur le choix des fenêtres d'estimation, le clutter pouvant être affecté par d'autres diffuseurs ponctuels voisins (Ketelaar, 2009). Ce problème est beaucoup moins fréquent en milieu naturel, le clutter pouvant être estimé à partir d'une réponse moyenne calculée sur plusieurs pixels (section 2.2.2). Alors que l'approche basée sur le RSC est limitée spatialement, celle basée sur l'indice D_a , ne nécessitant pas de fenêtre de sélection, est limitée temporellement. Il est en effet nécessaire de disposer d'au moins 20 images radar pour que celle-ci puisse être appliquée (Ferretti et al., 2001).

iii La corrélation spectrale

Les diffuseurs ponctuels peuvent être identifiés à partir d'une autre catégorie de méthode utilisant la corrélation spectrale (Schneider et al., 2006a). Du fait de la méthode de sélection employée, on appelle ces cibles des diffuseurs cohérents (ou CS pour Coherent Scatterers) (Schneider et al., 2006b), (Schneider et al., 2006a). Cependant le terme PS intègre une notion de temporalité que n'intègre pas le terme CS. Si un diffuseur ponctuel est sélectionné par une technique de corrélation spectrale, ce diffuseur peut être considéré comme un CS, et si les caractéristiques de ce dernier se maintiennent dans le temps, il pourra être considéré comme un PS. L'avantage de la sélection par corrélation spectrale est qu'il est possible d'identifier un réflecteur ponctuel à partir d'une seule image radar (Sanjuan-Ferrer et al., 2015). L'absence de contrainte temporelle peut s'avérer utile en milieu naturel où la variabilité de l'amplitude de réponse radar d'un diffuseur ponctuel peut s'avérer non négligeable.

Au lieu d'estimer la qualité des diffuseurs à partir de plusieurs observations dans le temps, la technique de corrélation spectrale estime le caractère ponctuel des diffuseurs en subdivisant leurs observations en fréquence (Schneider et al., 2006b). Les étapes de la sélection de CS décrites dans (Schneider et al., 2006b) sont les suivantes : le spectre d'origine de la SLC est calculé via une transformation de Fourier rapide FFT avec une fenêtre de Kaiser ou de Hamming. Ensuite, le spectre complet est divisé en N "sous-images" (ou sublooks) puis le coefficient de corrélation normalisé est évalué. Enfin les points avec une corrélation supérieure à une valeur de seuil fixée sont interprétés comme des CS. Selon les méthodes, la corrélation spectrale peut être évaluée uniquement en range (Schneider et al., 2006b) ou en range et en azimuth (Sanjuan-Ferrer et al., 2010). Une détection commune des CS en range et en azimuth permet d'éviter les fausses alarmes sur des observations en milieu naturel (Sanjuan-Ferrer et al., 2010). Plusieurs méthodes dérivées

de la corrélation spectrale ont été développées, telles que la méthode de l'entropie des "sous-images" (Sublook Entropy Approach, SEA) (Schneider et al., 2006b) ou l'approche de la variance de la phase (Phase Variance Approach, PVA) (Schneider and Papathanassiou, 2009).

5.3 Localisation de diffuseurs ponctuels

Un des intérêts de l'utilisation de diffuseurs ponctuels (PS ou CR) lors d'un suivi de déformation est qu'il est possible d'estimer la position 3D absolue de ces diffuseurs sur la scène observée. La position absolue d'un diffuseur ponctuel est obtenue par résolution itérative des équations ellipsoïdale-range-Doppler (Montazeri et al., 2018) pour récupérer les coordonnées cartésiennes 3D de la cible, en utilisant des coordonnées précises d'azimut et de range et la hauteur de diffuseurs. Par coordonnées range et azimut précises on entend la position sub-pixellique du diffuseur. En effet, la localisation du diffuseur dominant dans un pixel radar peut ne pas correspondre au centre de l'emplacement du pixel projeté au sol (Agram, 2010). La recherche de la position sub-pixellique consiste alors à retrouver le centre de phase effectif du diffuseur. Dans le cas d'un diffuseur ponctuel idéal isolé, tel qu'un CR, le centre de phase effectif est le centre de symétrie du CR (Dheenathayalan et al., 2016). Sachant que la signature spatiale 2D (range et azimut) d'un diffuseur ponctuel peut être approchée par des fonctions de sinus cardinal (voir section 2.2.2), il est possible de déterminer la position sub-pixellique par reconstruction d'une fonction sinc à partir d'une transformée de Fourier rapide (FFT) complexe et d'un suréchantionnage afin d'estimer la position du centre de phase effectif du diffuseur (Dheenathayalan et al., 2016). Dans le milieu naturel où les diffuseurs peuvent avoir une géométrie complexe, la position estimée du centre de phase dans un pixel potentiellement affecté par du speckle peut ne pas être exacte. La précision de l'estimation sub-pixellique étant proportionnelle à RSC (Dheenathayalan et al., 2018), l'utilisation d'un seuil sur le RSC permet de réduire les incertitudes de localisation 2D.

L'estimation de la position précise 2D des diffuseurs peut être effectuée à partir d'une seule image radar. Cependant, il est nécessaire d'utiliser une série temporelle d'images pour estimer la hauteur (cross-range) de chaque diffuseur si l'on souhaite connaître leur position absolue. La correction de hauteur de la valeur fournie initialement par le MNT est calculée lors du traitement PS par rapport au point de référence. Les trois coordonnées range, azimut et cross-range sont ensuite utilisées pour résoudre les équations ellipsoïdale-range-Doppler pour obtenir les coordonnées cartésiennes 3D de chaque PS (Montazeri et al., 2018). Cela implique que des erreurs sur l'estimation de correction de hauteur provoquent des erreurs sur l'estimation de la position absolue (Dheenathayalan et al., 2018). Notons que le terme hauteur d'un PS désigne ici son hauteur ellipsoïdale, c'est-à-dire par rapport à un ellipsoïde de référence. Ce terme est à différencier du terme d'altitude (orthométrique), qui correspond à la hauteur au-dessus du géoïde. Sachant que l'écart relatif entre la valeur du MNT au point de référence et la valeur réelle est propagé sur l'ensemble des corrections estimées, l'utilisation comme point de référence d'un CR dont on connaît précisément l'altitude est un bon moyen pour limiter l'incertitude sur l'estimation de la hauteur de chaque PS. D'après (Bovenga et al., 2018), l'incertitude sur l'estimation de la hauteur d'un PS à partir d'une stratégie PS classique (mono-référence) peut s'exprimer ainsi :

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{1}{(N\sigma_{b\perp})^2 - (N\bar{b}_\perp)^2}} \cdot \frac{\lambda R_0 \sin(\theta)}{4\pi} \cdot \sigma_\phi \quad (\text{I.16})$$

où N est le nombre d'images radar, \bar{b}_\perp et σ_{b_\perp} sont les moyennes et écart-types de la distribution des lignes de bases perpendiculaires, λ la longueur d'onde, R_0 la distance range, θ l'angle d'incidence σ_ϕ l'écart-type (ou erreur) de la phase. Or l'erreur de phase est inversement proportionnelle au rapport RSC (section 1.5.2). L'équation 1.5.2.i est valable lorsque le délai atmosphérique a entièrement été corrigé. Dans le cas où il y aurait un signal atmosphérique résiduel, l'équation 1.5.2.i peut être complétée par un terme correspondant à ce signal résiduel (Bovenga et al., 2018) :

$$\sigma_\phi^2 = \frac{1}{2 \times SCR} + \sigma_{atm}^2 \quad (\text{I.17})$$

où σ_{atm} est le signal atmosphérique résiduel. Le délai atmosphérique peut donc être une source d'erreur sur l'estimation de la hauteur des PS, et donc provoquer une erreur sur l'estimation de la position absolue.

Outre les effets du délai atmosphérique (ionosphérique et troposphérique), il existe d'autres sources d'erreurs sur l'estimation de la position absolue 3D telles que la variation de temps azimutale liée aux instruments, les effets de marée terrestre et la tectonique (un repère local est établi à une certaine époque, un décalage lié à la tectonique locale est possible en fonction du temps qui sépare l'époque de référence et l'acquisition radar) (Gernhardt, 2011) (Yang et al., 2016) (Dheenathayalan et al., 2018) (Montazeri et al., 2018). D'après (Dheenathayalan et al., 2016), le délai atmosphérique peut provoquer des erreurs métriques en range, les marées terrestres peuvent avoir un effet centimétrique en azimut et décimétrique en range et la tectonique peut avoir des effets décimétrique en range et azimut.

II Coins réflecteurs (CR)

L'application de l'InSAR pour le suivi de déformation du sol peut s'avérer difficile, notamment par manque de cohérence comme cela peut-être le cas dans certains glissements de terrain ou autres zones montagneuses (Joughin et al., 2010). Sur les glaciers, les chutes de neige et la fonte de la glace et de la neige introduisent des changements rapides de réflectivité du milieu observé. En dehors des glaciers, de nombreuses zones en mouvement telles que les glaciers rocheux, les moraines ou les glissements de terrain plus ou moins profonds, ainsi que les instabilités causées par des débris ou des rochers, peuvent également être des sources de décorrélation temporelle. Dans ces cas, une utilisation appropriée de réflecteurs artificiels appelés coins réflecteurs (CR) peut être utile pour surmonter ces limitations.

1 Principes

Les CR se comportent comme des cibles ponctuelles, fournissant une forte réponse dans les images SAR (Sarabandi and Tsen-Chieh Chiu, 1996), (Garthwaite, 2017). Ce sont des objets caractérisés par une Surface Equivalente Radar élevée (SER) et un fort rapport signal sur bruit (ou SNR pour Signal-to-noise ratio)(Groot and Otten, 1994) (Parker et al., 2017). Lorsqu'ils sont

de taille suffisante, leur réponse domine la cellule de résolution, de sorte que le pic de la réponse ne contienne pratiquement aucune contribution du sol (Groot and Otten, 1994). L'utilisation de CR permet de surmonter le problème de décorrélation temporelle, d'éliminer l'erreur de phase résiduelle de la composante topographique et de minimiser l'erreur due aux retards atmosphériques en combinant CR-InSAR avec GPS (Zhu et al., 2014). Il est ainsi possible d'obtenir en bande C des erreurs de déplacement inférieures à un millimètre avec des CR de 1,5 m ou plus (Garthwaite, 2017). Cependant, plus le CR est grand, plus la prise au vent est importante, ce qui nécessite une installation plus robuste et donc plus chère, en particulier dans les zones montagneuses où le vent peut être très fort. Une autre possibilité est de perforer le CR, à condition que la perforation n'engendre pas une perte de SER trop importante. Les effets théoriques de la perforation sont discutés dans la section 2.3.3.

Étant donné que les CR fournissent une phase interférométrique stable et une estimation précise du déplacement, ils ont été utilisés dans de nombreuses applications, pour la calibration des images SAR (Freeman, 1992) (Doöring et al., 2008), en tant que diffuseurs persistants artificiels (PS) pour augmenter la densité des PS pour la surveillance des glissements de terrain (Ye et al., 2004) (Crosetto et al., 2013) et des subsidences du sol (Qin and Perissin, 2015) ou pour la détection de déformations de surface dues à l'injection de CO_2 (Rohmer et al., 2015). Lors de traitements PS, il est par exemple possible d'avoir recours à des coins réflecteurs à condition que les CR rejoignent le réseau des PS. Un CR peut alors être sélectionné comme point de référence pour la suite du traitement PS. Il est également possible de suivre ces objets par mesures GPS ou nivellement, ce qui peut permettre de valider la chaîne de traitement PS. D'après (Crosetto et al., 2013), il est également possible de maintenir une composante atmosphérique négligeable lorsque le suivi des déformations se fait sur une scène réduite avec une distance entre les CR voisins limitée à quelques centaines de mètres. Cette limitation pouvant être encore plus stricte en cas de fortes pentes, puisque les variations atmosphériques sont souvent plus fortes verticalement que horizontalement en raison de la stratification atmosphérique.

2 Evaluation de la réponse radar (SER, RSC)

2.1 La Surface Équivalente Radar

La Surface Équivalente Radar d'une cible ponctuelle est une mesure de la capacité de cette cible à réfléchir les signaux radar dans la direction du récepteur radar (Gray et al., 1990). Considérant que le radar émet une impulsion permettant d'éclairer une cible ponctuelle par une densité de puissance dP_{inc} , cette cible renvoie au radar une densité de puissance dP^s :

$$dP^s = dP_{inc} * \frac{\sigma}{4.\pi.R^2} \quad (I.18)$$

où σ est la SER et R la distance radar-cible.

Si la cible rayonne de manière isotrope, la SER est égale à la surface apparente S_a , surface vue par le radar (figure I.9.a.). Si la cible rayonne de manière anisotrope, la SER peut alors être soit supérieure si elle rayonne dans la direction de la ligne de visée (figure I.9.b), soit inférieure si elle rayonne dans une direction privilégiée autre que celle de la ligne de visée (figure I.9.c) (Massonnet and Souyris, 2008). La SER d'un CR est donc censée être grande comparée à sa

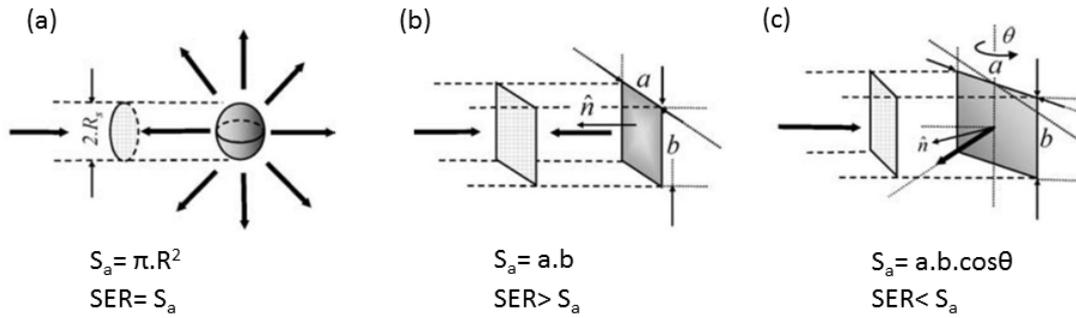


FIGURE I.9 – Comparaison des surfaces SER et des surfaces apparentes dans des situations standards de réponse d'une cible ponctuelle; (a) $SER =$ surface apparente; (b) $SER >$ surface apparente; (c) $SER <$ surface apparente d'après (Massonnet and Souyris, 2008)

taille (Gray et al., 1990) (Polycarpou et al., 1995). Par exemple, pour un CR de 1 m de côté, la SER est de 1289 m^2 en bande C, alors que la sphère équivalente en termes de SER aurait un rayon de 20 m (Massonnet and Souyris, 2008). A l'inverse, une cible naturelle aura plutôt tendance à avoir une SER plus petite que sa taille. Cependant, pour désigner la capacité d'une cible naturelle à réfléchir les signaux radar, on préférera le terme coefficient de rétrodiffusion σ^0 :

$$\sigma^0 \approx 10.\log_{10}(\sigma/S) \quad (\text{I.19})$$

où S est la surface physique de la cible.

Afin de disposer d'une SER suffisante, plusieurs formes de CR ont été proposées dans la littérature (Sarabandi and Tsen-Chieh Chiu, 1996) (Parizzi et al., 2006) (Qin et al., 2013), avec une SER plus ou moins sensible à l'orientation (angles d'azimut et d'élévation). Les formes les plus courantes sont présentées dans la section 2.3.

2.2 Le rapport Signal-à-clutter

L'utilisation d'un CR comme outil de calibration, comme référence ou cible pour le suivi de déformation, nécessite qu'il soit facilement identifiable par rapport au niveau de bruit de fond (appelé clutter ou fouillis). Un moyen d'estimer la visibilité d'un CR est alors de calculer le Rapport Signal à Clutter (RSC), qui caractérise la puissance du signal provenant du CR par rapport à celle de son environnement (Freeman, 1992) :

$$RSC = \frac{\sigma}{\sigma_{clutter}^0 \cdot \rho_a \cdot \rho_g} \quad (\text{I.20})$$

où $\sigma_{clutter}^0$ est le coefficient de rétrodiffusion du clutter, ρ_g la résolution en azimut et ρ_a la résolution en range au sol.

Cependant, pour des cibles ponctuelles à forte rétrodiffusion telles que les CR, le signal peut se distribuer sur une zone en forme de croix centrée sur leur position réelle (Gray et al., 1990) (voir figure I.10). La signature spatiale de telles cibles suit une fonction en sinus cardinal. Cela se traduit par la présence de lobes secondaires dans des cellules de résolution autres que le lobe principal du diffuseur (Ketelaar, 2009). Notons d'ailleurs que l'état de phase des lobes secondaires est le même que celui du lobe principal (Ketelaar, 2009). Il est donc nécessaire de

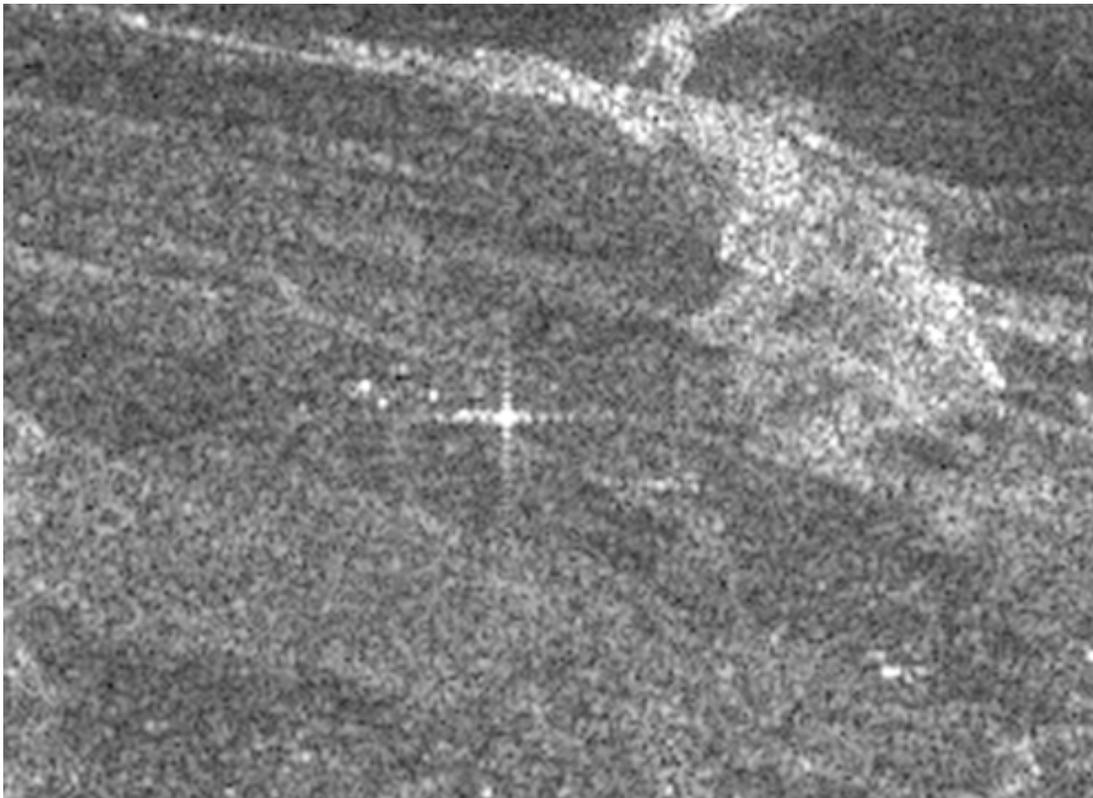


FIGURE I.10 – Exemple d'un diffuseur fort avec des lobes latéraux dans une image d'intensité Sentinel-1, correspondant au bâtiment du centre médical de Praz-Coutant à Passy, Haute Savoie (France)

choisir des pixels en dehors de la croix formée par le CR pour bien estimer le clutter et non un lobe secondaire du CR. En pratique le clutter peut être estimé en moyennant la réponse des pixels entourant le motif du sinus cardinal (Garthwaite, 2017).

3 Différents formes de CR

Plusieurs formes et tailles de coins réflecteurs ont été utilisées dans ces travaux de thèse. Il est possible de connaître leur SER avec les lois de l'optique géométrique. Cette section en présente un résumé.

3.1 Trièdre triangulaire

Le CR conventionnel utilisé pour le calibrage ou en tant que PS est trièdre et constitué de plaques triangulaires rectangles isocèles (Parizzi et al., 2006). La SER maximale d'un tel trièdre est calculée à l'aide des lois d'optique géométrique comme suit :

$$\sigma_{triangle} = \frac{4\pi L^4}{3\lambda^2} \quad (\text{I.21})$$

où L est la longueur des côtés du CR (figure I.11) et λ est la longueur d'onde. Cela suppose que la longueur des côtés du CR L soit grande au regard de la longueur d'onde utilisée. Cependant, la SER observable dans les images radar dépend de la configuration du CR, c'est-à-dire que la SER varie en fonction de son orientation en azimut et en élévation (figure I.11). On peut considérer un CR trièdre comme un objet dont la SER dépend de sa face ouverte. La SER maximale est

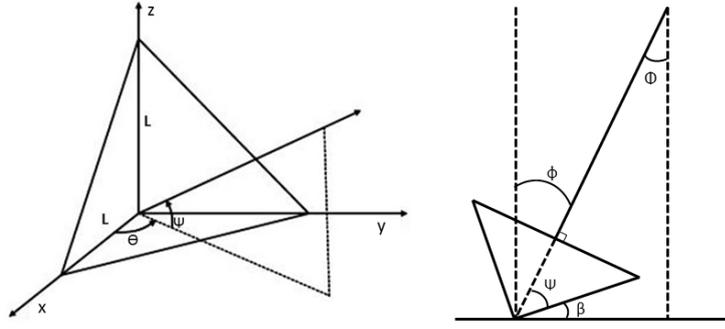


FIGURE I.11 – Géométrie et ajustement d'un CR triangulaire. Ψ représente l'angle d'élévation, θ l'angle d'azimut, Φ l'angle off-nadir, ϕ l'angle d'incidence, β l'angle d'inclinaison et L la longueur du plus petit côté des plaques triangulaires rectangulaires isocèles.

obtenue lorsque le rayonnement radar est normal à la face ouverte du CR. Ainsi, dans le cas où l'angle d'orientation en azimut est de $\theta = 45$ degrés (voir figure I.11), l'onde radar est normale à la face ouverte lorsque l'angle d'élévation Ψ est égal à $\tan^{-1}(\frac{1}{\sqrt{2}})$, soit environ 35,26 degrés avec l'une des plaques latérales (Ruck et al., 1970), (Doerry, 2008).

3.2 Le trièdre rectangulaire

Les CR triangulaires sont intéressants en raison de leur faible sensibilité aux paramètres d'azimut et d'élévation (Groot and Otten, 1994). Cependant, pour la même taille de CR, il existe d'autres formes pouvant fournir une SER plus grande, ce qui est le cas pour les trièdres carrés. Les CR rectangulaires et carrés ont presque les mêmes propriétés de rétrodiffusion, mais les premiers peuvent avoir un SER plus grande en fonction de l'angle d'élévation. En effet, il peut être intéressant de configurer un CR avec un angle d'élévation supérieur au réglage optimal. De cette façon, les interactions avec le sol peuvent être réduites (Doerry and Brock, 2009), mais le réglage ne permet pas d'atteindre la SER maximale. Ceci peut être compensé en allongeant les plaques supérieures. Cela permet de réduire la perte de SER due à des angles d'incidence inférieurs à celui pour lequel le CR est réglé (c'est-à-dire avec un angle d'élévation de 35 degrés). De cette manière, cette géométrie peut être utilisée pour différents capteurs SAR avec différents angles d'incidence, par ex. Sentinel-1 (de 29,1 à 46 degrés) et TerraSAR-X (de 20 à 45 degrés).

La SER théorique pour un CR trièdre carré est donné par :

$$\sigma_{square} = \frac{12\pi L^4}{\lambda^2} \quad (I.22)$$

où L est la longueur des côtés carrés basaux du CR et λ est la longueur d'onde. Ainsi, une SER de 30 dBm² en bande C peut être atteinte avec un CR triangulaire de 930 mm de côté, alors qu'il est possible d'obtenir la même avec un CR carré de seulement 540 mm de côté.

3.3 Coins réflecteurs perforés

Les CR sont conçus pour être installés à l'extérieur sur de longues périodes, pouvant atteindre plusieurs années. Les installations sont alors exposées à des phénomènes météorologiques tels que le vent et les précipitations (pluie et neige). Ces phénomènes peuvent entraîner des instabilités des CR. Une solution pour limiter les effets du vent, qui sont d'autant plus importants que la

taille des CR utilisés est grande, pourrait être d'en réduire leur taille. Cependant, celui nuit à la qualité de la réponse radar et risque de rendre les CR inutilisables, a fortiori pour les données de moyenne résolution telles que les images radar Sentinel-1. Une façon de limiter cette source d'erreur consiste à utiliser des plaques perforées. De cette manière, la force du vent est limitée et les précipitations peuvent facilement s'écouler. De plus, le poids du CR est réduit, ce qui est bénéfique pour les problèmes pratiques.

En bande X, il a été constaté que l'utilisation de plaques perforées avec des trous d'un sixième de la longueur d'onde réduisait la SER d'environ 1 dBm^2 (Algafsh et al., 2016).

3.4 Mesure de la SER en chambre anéchoïque

L'utilisation des lois de l'optique géométrique pour estimer la SER permet de fournir la valeur maximale théorique obtenue avec une construction parfaite, une orientation optimale et sans interaction avec l'environnement. Cependant, la valeur réelle de la SER peut être sensiblement inférieure, en particulier lorsque la construction n'est pas de bonne qualité. Plusieurs facteurs pouvant entraîner une perte de SER par rapport à la valeur théorique sont énumérés dans (Garthwaite, 2017). Par exemple, une perte SER supérieure à 10 dBm^2 peut être observée dans le cas d'une courbure de plaque de 5 mm dans un CR trièdre de $1,0 \text{ m}$ en bande X (Zink and Kietzmann, 1995). La perte de la SER causée par une courbure de plaque étant inversement proportionnelle à la longueur d'onde du radar et à la taille de la cible (Garthwaite, 2017), la perte de SER est supposée être plus faible en bande C. Un autre facteur connu est l'orthogonalité entre les trois plaques. Une déviation par rapport à l'angle droit conduit à une perte de SER, avec une perte plus importante pour un angle aigu que pour un angle obtus (Robertson, 1947). Les effets des variations d'angle sont d'autant plus importants que la taille du CR augmente et que la longueur d'onde du radar diminue (Robertson, 1947).

Avant de mesurer la SER sur le terrain avec de possible interaction avec le sol, il est possible de vérifier la qualité de la construction et la sensibilité de la SER aux réglages azimut / élévation dans des conditions optimales dans un milieu sans échos simulant des conditions d'espace libre appelée chambre anéchoïque. Une chambre anéchoïque est une pièce blindée dont les murs et le plafond ont été recouverts d'absorbants électromagnétiques qui dispersent ou absorbent l'énergie incidente (Chuah, 2003). Ces absorbants sont fabriqués à partir d'un matériau présentant des qualités absorbantes, dit matériau de perte. Une chambre anéchoïque généralement recouverte d'absorbants pyramidaux (absorbants de transition géométriques) constitués d'une matrice de mousse de polyuréthane presque transparente aux ondes électromagnétiques chargée de carbone (le matériau le plus couramment utilisé avec des pertes diélectriques élevées). Les absorbants pyramidaux sont recouverts d'un liant acrylique polymérisé pour fixer les particules de carbone dans les cellules de la mousse (Dun, 2007).

La mesure de la SER du CR peut être réalisée en utilisant une cible référence dont on connaît parfaitement la SER. A l'aide d'une antenne émettrice et d'une antenne réceptrice, il est possible de mesurer les gains obtenus avec la cible référence et le CR et de calculer la SER mesurée du CR SER_m avec l'équation suivante :

$$SER_m = SER_{ref} \cdot 10^{\frac{G_m - G_{ref}}{10}} \quad (\text{I.23})$$

où SER_{ref} est la SER de la cible de référence, G_m est le gain mesuré et G_{ref} le gain obtenu à

partir de la cible référence.

III Les méthodes d'auscultation traditionnelles appliquées aux grands travaux

Les méthodes d'auscultation appliquées aux ouvrages du génie civil peuvent être classées en deux catégories : les méthodes topographiques et les méthodes géotechniques. Les méthodes topographiques comprennent entre autres les méthodes géodésiques terrestres (mesures par nivellement et mesures par stations totales), les méthodes géodésiques satellitaires (mesures par GPS) et les méthodes de photogrammétrie et de lasergrammétrie (scanner laser 3D). Les méthodes géotechniques regroupent les mesures piézométriques, inclinométriques, extensométriques et les mesures de vibrations (Briangon et al., 2016), (Ghorbani et al., 2012).

1 Le système de positionnement global satellitaire (GNSS)

Le positionnement GNSS peut être utilisé pour contrôler les résultats de l'InSAR, pour localiser précisément les coins réflecteurs éventuellement déployés et valider les estimations de position absolues à partir des données radar. Dans ces travaux seuls les réseaux GPS et GLO-NASS ont pu être utilisés, le réseau Européen GALILEO n'étant complètement opérationnel qu'à l'horizon 2020, lorsque que les 30 satellites nécessaires seront fonctionnels [CNES].

Depuis son apparition, l'utilisation des GNSS a grandement été améliorée, avec notamment le développement des méthodes de suivis cinématique en temps réel appelés RTK-GNSS (Real Time Kinematic) rendant l'utilisation des GNSS applicable à l'auscultation des grands chantiers (Quesada-Olmo et al., 2018). En RTK, les signaux GNSS corrigés sont transmis en temps réel d'une base réceptrice située à un emplacement connu vers un ou plusieurs récepteurs mobiles (Unal Kizil et al., 2006). Avec cette méthode il est possible d'obtenir une précision horizontale de 1 cm en compensant les retards atmosphériques, les erreurs orbitales et d'autres variables de la géométrie GPS (M. R. Ehsani et al., 2004). Dans certains cas, il est même possible d'atteindre une précision de 2 mm avec l'utilisation d'algorithmes spécifiques (Quesada-Olmo et al., 2018).

2 Les Stations Totales (ST)

Il existe aujourd'hui un type d'appareil ayant une précision supérieure à celle d'un système RTK-GNSS, les Stations Totales (ST) ou tachéomètres. Les ST sont le résultat de l'intégration d'un théodolite, outil de mesure d'angles dans les plans horizontaux et verticaux et d'un outil de mesure de distance EDM (Electronic Distance Meter), mesurant la distance entre l'instrument et des points d'intérêts. (Artese and Perrelli, 2018). Les ST modernes sont robotisées (STR) et permettent le stockage des mesures réalisées. Les STR peuvent mesurer automatiquement le déplacements de points d'intérêt généralement marqués avec des prismes, qui servent de cibles réfléchissantes, de façon régulière et en 3 dimensions (voir figure I.12). L'utilisation de points de contrôle permet ensuite de transformer la position des cibles en coordonnées absolues dans un système de référence de coordonnées géodésiques prédéfini (Artese and Perrelli, 2018).

L'automatisation des ST a permis de les utiliser dans différents contextes tels que le suivi de déformation lors de la construction de tunnels, l'évaluation de la stabilité de barrages, le suivi de glissements de terrain et de parois rocheuses (Lienhart, 2017).

La précision des mesures réalisées avec une ST dépend de la précision de l'instrument (certains modèles ont des précisions annoncées par le constructeur inférieure au millimètre (Yu et al.,

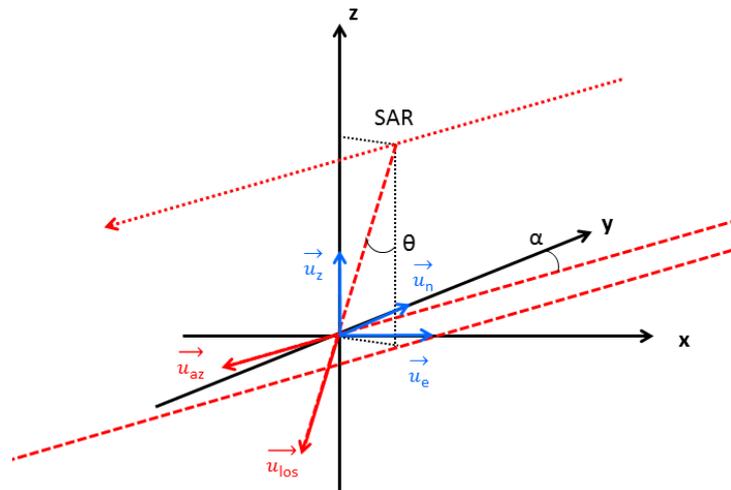


FIGURE I.12 – Configuration de la base orthonormée à 3 dimensions β_{3D} des mesures terrestres et de la base orthonormée à 2 dimensions β_{SAR}^{des} des mesures SAR en trajectoire descendante. Les angles θ et α décrivent respectivement l'angle d'incidence et la direction azimutale (Fallourd et al., 2011).

2017)), du type de réflecteur utilisé (prismatique ou non), de la distance qui sépare la ST des réflecteurs et des conditions sur le site (présence de poussière, fumée d'échappement, etc.) (Klopčič et al., 2008). Il est nécessaire de connaître l'indice de réfraction de l'air, et donc de connaître les paramètres atmosphériques (température, pression et pression de vapeur d'eau) pour optimiser la précision des mesures. L'une des principales limites des stations totales est rencontrée lorsque les points de contrôle utilisés par la ST ne peuvent pas être installés en dehors de la Zone d'Influence Géotechnique (ZIG), zone affectée par l'ouvrage ou l'aménagement de terrain.

Ainsi, les STR permettent de réaliser des mesures de déformation avec une grande précision et une très bonne résolution temporelle (de quelques minutes), mais sur une zone restreinte. À l'inverse, l'InSAR permet d'obtenir des mesures de déformations avec une grande couverture spatiale mais avec une résolution temporelle limitée, ce qui en fait des outils complémentaires. La comparaison des valeurs de déplacement issues des deux méthodes nécessitent cependant de convertir les déplacements dans une projection commune (cf. figure I.12).

Conclusion

Le lancement de la constellation Sentinel-1 assure une continuité des missions ERS et ENVISAT et permet ainsi la poursuite de travaux reposant sur l'utilisation de la bande C. De plus, le temps de revisite réduit (jusqu'à 6 jours), combiné à la stratégie d'acquisition systématique et à l'accès libre aux données, permettent d'envisager l'utilisation des images Sentinel-1 pour des applications jusque-là restreintes par la couverture limitée des précédentes missions ou par le coût important des données haute résolution. Il est donc nécessaire d'estimer les potentiels et les limites de ces nouvelles données pour la mesure de déformation. Ce travail est réalisé dans cette thèse en se concentrant sur l'application de interférométrie radar dans le suivi d'instabilités en territoire de montagne et le suivi d'impact des grands chantiers en milieu urbain.

Cependant, ce nouveau système d'acquisition implique une adaptation des méthodes de traitement de données, en commençant par la nécessité d'un recalage des images plus précis. Le développement des méthodes multi-temporelles interférométriques permet désormais de mieux contrer les limites de l'InSAR, en réduisant notamment les erreurs de déroulement, permettant ainsi d'améliorer la précision sur l'estimation de la vitesse de déplacement. Particulièrement adaptées au milieu urbain, les méthodes PS peuvent néanmoins se heurter en milieu naturel à une faible densité de diffuseurs, causée principalement par la décorrélation temporelle. De plus, l'utilisation d'un modèle de déformation linéaire peut rendre difficile le suivi de déplacements possédant une composante non-linéaire importante. Les méthodes SB, reposant sur l'utilisation de petites bases spatiales et temporelles, représentent une solution intéressante pour réduire la décorrélation spatiale et temporelle. Mais ces approches peuvent souffrir d'erreurs de déroulement, puisqu'elles prennent en compte l'ensemble des pixels de l'image radar. Les approches hybrides, dites PS multi-temporelle, représentent une alternative intéressante à ces méthodes, combinant les avantages de chacune d'elles. Les travaux de cette thèse s'intéressent à l'utilisation de ces approches hybrides, à la fois en milieu de montagne et en milieu urbain.

Afin d'améliorer les résultats des approches PS, il est possible d'utiliser des coins réflecteurs. Ces objets sont utiles en milieu naturel car ils permettent d'augmenter localement la densité de mesures et d'améliorer le maintien de la cohérence. Une partie des travaux de cette thèse consiste à développer un modèle de coin réflecteur spécifiquement adapté aux données Sentinel-1 et aux conditions rencontrées en zone de montagne, notamment aux chutes de neige. Enfin, au regard cette synthèse bibliographique, il semble nécessaire d'effectuer un suivi des incertitudes afin de valider les différents résultats obtenus. Ce travail peut être effectué en tirant parti des mesures précises issues des méthodes traditionnelles d'auscultation terrestre.

Chapitre II

Suivi de déformation en zone montagneuse

Sommaire

1	Etat de l'art sur le suivi de déformation en territoire de montagnes	40
1.1	Instabilités rencontrées dans les milieux de haute montagne	40
1.2	Méthodes de suivi des instabilités par télédétection	41
2	Analyse des réponses de CR dans des images Sentinel-1 en espace libre, milieu rural et zone montagneuse	43
2.1	Mesure de SER en chambre anéchoïque	45
2.2	Visibilité des CR en zone agricole	48
2.3	Visibilité des CR en zone montagneuse	53
2.4	Proposition d'une chaîne de traitement PS adaptée au site test	65
3	Résultats expérimentaux d'intégration de CR dans une approche PS	73
3.1	Analyse des interférogrammes	73
3.2	Sélection des potentielles cibles ponctuelles	76
3.3	Précision de la correction topographique et de la localisation absolue	77
3.4	Identification des zones instables	79

Introduction

Ce chapitre s'attache à présenter l'utilisation des coins réflecteurs dans les régions montagneuses alpines. Une première section est consacrée à un état de l'art spécifique sur les instabilités rencontrées en territoire de montagne et sur les méthodes employées pour leur suivi. Une seconde partie est dédiée à l'utilisation des coins réflecteurs pour les données Sentinel-1. Après avoir présenté les résultats expérimentaux d'estimation de la surface équivalente radar de différents coins réflecteurs obtenues dans une chambre anéchoïque, on s'intéresse à l'évolution de la visibilité des réflecteurs au cours du temps dans des séries temporelles d'images Sentinel-1, d'abord dans un milieu champêtre, puis dans un milieu montagneux. Enfin, une chaîne de traitement IPTA multi-références (section 1.4.5) est proposée pour intégrer les coins réflecteurs à une étude basée sur les diffuseurs cohérents. La dernière section est consacrée à la présentation des résultats obtenus avec la chaîne de traitement et s'intéresse à l'identification des zones instables ainsi qu'à la précision de la localisation des diffuseurs sélectionnés pour réaliser les mesures de vitesse de

déplacement.

Des travaux ont également été menés sur l'utilisation de coins réflecteurs pour le suivi de déplacement des glaciers et sont présentés dans les annexes A et B.

I Etat de l'art sur le suivi de déformation en territoire de montagnes

1 Instabilités rencontrées dans les milieux de haute montagne

Afin de comprendre les évolutions connues par les Alpes dans leur globalité, l'analyse du milieu glaciaire doit être complétée par une analyse du domaine **périglaciaire**. Ce domaine désigne les zones marquées par un climat froid, quelque que soit leur proximité avec les zones glaciaires, et soumises aux alternances de gel et dégel (Gutiérrez, 2005). Plusieurs projets régionaux, nationaux et européens ont vu le jour afin d'aider à la compréhension des phénomènes qui impactent les Alpes Occidentales. Parmi ces projets on peut citer le projet Franco-Italien GlaRiskAlp qui s'est attelé à cartographier, entre 2010 et 2013, les zones englacées lors du **Petit Age Glaciaire** (1350-1850) qui sont aujourd'hui désenglacées. Un des objectifs a été d'identifier les **moraines** et **tills**, marqueurs de la position antérieure des glaciers. Dans la partie aval des glaciers, les moraines frontales indiquent la présence de **marges proglaciaires** (Vivian, 1967), secteurs sensibles aux aléas tels que les vidanges de lac glaciaire, les laves torrentielles ou encore les glissements dans les moraines (Gardent, 2014), ce qui rend leur identification et leur suivi nécessaire.

Outre les marges proglaciaires, le domaine périglaciaire présente de nombreuses zones affectées par les instabilités, des zones telles que les moraines latérales, les **glaciers rocheux** ou les versants rocheux. L'abaissement de la surface des glaciers et leur retrait favorisent la mise à l'affleurement des pentes des moraines. Celles-ci peuvent alors subir des affaissements plus ou moins profonds jusqu'à atteindre un ajustement relatif (Deline et al., 2015). Une fois ajustée au retrait des glaciers, les moraines continues d'être affectées par des phénomènes de ravinement (Curry et al., 2006) voire de rupture complète (Deline et al., 2015). Une attention particulière est également portée sur l'évolution des sols gelés en permanence, appelé **pergélisol** (ou permafrost), dont seule la surface dégèle durant la saison estivale (Einhorn et al., 2016). La dégradation de ce pergélisol, sous l'effet de l'augmentation des températures dans les Alpes, peut générer des aléas liés à des mouvements de relief (glaciers rocheux) ou de débris libérés suite à la déstabilisation des versants rocheux ou à formations superficielles (Deline et al., 2015) (Bodin et al., 2015). Les effondrements de parois rocheuses peuvent avoir de graves conséquences, comme ce fut le cas sur le Piz Cengalo (Suisse) en Aout 2017, où un effondrement rocheux a provoqué d'importantes laves torrentielles provoquant la mort de 8 personnes. Autre objet sensible, les glaciers rocheux correspondent à des masses de débris rocheux mélangés avec de la glace et caractérisés par des vitesses de déplacements allant de quelques centimètres à plusieurs mètres par an (Delaloye et al., 2008), dont l'évolution des températures peut entraîner des déstabilisations plus ou moins importantes. Il est donc nécessaire d'identifier les secteurs impactés par la dégradation du pergélisol, que l'on rencontre dans les Alpes au-dessus de 2600 m d'altitude dans les zones peu exposées au rayonnement solaire telles que les versants en orientation Nord. Cependant la complexité topographique des Alpes et l'évolution rapide des conditions en haute

montagne nécessitent un travail précis pour cartographier le pergélisol, travail qui a été mis en place par exemple par le projet PermaRisk (2016-2019) qui vise à fournir un inventaire et une évaluation des sites potentiellement à risque.

Les formations sédimentaires présentes dans le domaine périglaciaire (éboulis, glaciers rocheux, moraines) sont sujettes à de nombreuses instabilités (Scapozza, 2015) et leur suivi par télédétection présente un véritable intérêt. En effet, la mesure de la déformation du domaine périglaciaire, à savoir les déplacements verticaux et horizontaux à la surface, contribue de manière significative à la modélisation des processus dynamiques, à la compréhension de leurs sensibilités et à la reconnaissance précoce des impacts potentiels sur les systèmes humains et naturels (Kääb, 2002).

2 Méthodes de suivi des instabilités par télédétection

2.1 Tour d'horizon des méthodes couramment employées

Les secteurs soumis aux instabilités dans le domaine périglaciaire, et plus largement dans les secteurs de haute montagne, sont souvent éloignés et difficiles d'accès. De plus, l'extension spatiale des processus affectant ces zones peut s'avérer importante. Face à ces contraintes, les techniques de télédétection fournissent des outils adaptés pour surveiller la dynamique des terrains en haute montagne (Kääb, 2002). Parmi les différentes méthodes utilisées pour le suivi d'instabilité en zone montagneuse, on peut citer le LiDAR (Fischer et al., 2011), le scanner laser (Kenner et al., 2014), l'imagerie optique (Kääb, 2002) ou l'imagerie radar (Rott and Siegel, 1999), (Barboux et al., 2012).

Le LiDAR aéroporté est un outil intéressant pour surveiller les variations topographiques avec une précision atteignant 30 cm sur les terrains relativement plats (Maune, 2007) (Liu et al., 2007) (Aguilar and Mills, 2008). Cependant la précision se dégrade dans les zones de fortes pentes, atteignant les 60 cm dans les pentes de plus de 30 degrés (Takahashi et al., 2005). En considérant la difficulté de réaliser des campagnes de mesure régulières, cet outil semble moins adapté pour la surveillance de zones très sensibles nécessitant des acquisitions régulières.

A contrario, la photogrammétrie ou la corrélation d'images optiques permettent d'obtenir des mesures régulières mais dépendent des conditions climatiques sur le site d'observation (nuages, brouillard) (Kääb, 2002). Lors du projet GlaRiskAlp, une chaîne de traitement semi-automatique pour les images optiques a d'ailleurs été mise en place afin de suivre les modifications géomorphologiques du domaine périglaciaire dans les Alpes Occidentales.

La corrélation d'amplitude à partir d'image radar est également un outil fiable pour le suivi de mouvement en zone montagneuse (Raucoules et al., 2013) mais la précision des mesures dépendant directement de la résolution des images utilisées (1/10 ème à 1/20 ème de pixel (Leprince et al., 2007)). Cette méthode nécessite des données radar haute résolution, ce qui peut représenter un coût important. Contrairement à la corrélation d'amplitude, il est possible de suivre des vitesses lentes de façon précise (1-2 mm/an) avec des données radar de moyenne résolution en utilisant les méthodes PS ou SB présentées dans la section 1.4. L'arrivée de Sentinel-1, avec des acquisitions systématiques, offre de nouvelles possibilités sur le suivi du domaine pé-

riglaciaire. Cependant, les rapides changements de surface rencontrés dans de telles zones sont sources de décorrélation temporelle, ce qui limite grandement les possibilités de succès d'un tel suivi. Pour remédier à cela, il est possible d'intégrer des coins réflecteurs à l'étude interférométrique et de définir une stratégie de sélection des couples interférométriques adaptée au contexte de montagne (approche multi-références, voir section 1.4).

2.2 Suivi de déformation par PS-InSAR en milieu naturel

Les avancées en interférométrie radar sur la précision des mesures de vitesse de déplacement et la possibilité de surveillance périodique grâce aux acquisitions régulières font de cet outil une solution adaptée à l'analyse des déplacements de terrain en zone montagneuse. Cela se traduit par exemple par la prise en considération de cette technique par les autorités, comme en atteste les rapports émis par le Comité de direction Intervention dangers naturels Suisse (Office fédéral de l'environnement), faisant suite notamment à l'événement du Piz Cengalo précédemment, qui planifie une surveillance du massif Alpes Suisse de 2019 à 2023.

On notera que, bien qu'ayant été utilisé avec succès par le passé, le suivi de déformation par méthode PS en territoire de montagne reste peu documenté. Les méthodes PS ont été utilisées par exemple pour estimer des vitesses de déplacement de glissements de terrain à partir de données ERS (Colesanti et al., 2003) où malgré la faible densité de PS obtenue, les résultats furent cohérent avec les mesures de déplacement obtenues par nivellement. D'autres travaux ont permis de suivre les processus de déformations dans le massif des Pyrénées Espagnoles à partir de données ERS et ENVISAT avec une densité moyenne de $21 \text{ PS}/\text{km}^2$ (Herrera et al., 2009). On peut citer également les travaux présentés dans (Bovenga et al., 2006) sur le suivi de glissements de terrain à proximité d'habitations dans la région des montagnes Daunian au Sud de l'Italie. Un projet transfrontalier entre la région du Val d'Aoste (Italie) et la région Rhône-Alpes a d'ailleurs été mené entre 2009 et 2012 sur les risques naturels, projet au cours duquel une approche PS a été utilisée avec succès pour identifier des zones sujettes aux glissements de terrain, notamment à proximité de la commune de Cervino. Une comparaison a également été réalisée par (Barboux et al., 2015) entre des résultats obtenus par une approche PS et par une approche SB à partir de données TerraSAR-X sur des mouvements en zone périglaciaire. Les résultats des deux méthodes ont été validés à l'aide de mesures GPS, montrant une corrélation plus importante avec les résultats PS qu'avec les résultats SB pour des vitesses inférieures à 3,5 cm/an. A noter que l'utilisation de données Sentinel-1 avec un temps de revisite de 6 jours (contre 11 jours pour TerraSAR-X) et une longueur d'onde de l'ordre de 5,6 cm (contre 3,1 cm pour TerraSAR-X) permettrait de suivre des déplacements plus rapides. Le déplacement ne devant pas dépasser $1/4$ de la longueur d'onde entre deux acquisitions, la vitesse maximale pour un glissement de terrain devrait être de 25,9 cm/an pour suivi PS avec TerraSAR-X, contre 85,2 cm/an avec Sentinel-1.

Que ce soit pour la surveillance de glissements de terrain, de moraines ou de glaciers rocheux, l'objectif de l'InSAR est d'être capable de détecter les objets, même de petites tailles, qui sont affectés par des déformations plus ou moins lentes et dont il faut suivre l'évolution au cours du temps. Un bon outil de détection doit être capable de détecter les évolutions de vitesses de déformations sur des intervalles de temps suffisamment court pour pouvoir agir en conséquence. L'intérêt des méthodes PS est qu'elles permettent d'identifier des objets de petites tailles à par-

tir de diffuseurs ponctuelles puisqu'elles sont appliquées sans perte de résolution de la donnée traitée, si tant est que l'on puisse associer les diffuseurs aux objets présents à la surface de la scène observée. De plus, pour qu'un tel outil soit utile dans l'analyse des aléas et la prévention des risques, il faut pour cela être capable de détecter des changements de vitesses annonceurs de ruptures partielles ou totales des objets surveillés. Or récemment, des résultats obtenus avec Sentinel-1 ont montré qu'il était possible d'identifier ces signes précurseurs avec une approche PS (Intrieri et al., 2018).

Les méthodes PS peuvent donc être appliquées dans des contextes de suivi de déformation en territoire de montagne. En haute montagne, l'absence de forêt (marqueur de la limite entre moyenne et haute montagne) et la présence d'une végétation généralement rase, sont des éléments favorisant la détection de PS correspondant à des rochers et des éboulis se comportant comme des diffuseurs ponctuels cohérents. Cependant, les résultats des travaux qui viennent d'être présentés montrent que la densité de PS obtenus peut s'avérer faible. Or la faible densité de PS est un facteur limitant de la précision des résultats obtenus, plus celle-ci est faible et plus le risque d'erreur de déroulement de phase augmente (on augmente le risque d'aliasing, voir section 1.3.4) et plus l'estimation de délais atmosphériques est difficile (Ketelaar, 2009). La distance entre le point de référence et les points mesurés est également un facteur limitant la qualité des résultats des traitements PS. Or les mesures obtenues par les méthodes PS sont relatives au point de référence choisi. Il est donc primordial de le choisir dans une zone stable tout en étant le plus proche possible du secteur étudié. Dans les travaux présentés dans (Bovenga et al., 2006), les auteurs restreignent la superficie des zones suivies et se servent de la proximité de zones construites en contrebas des glissements de terrain pour obtenir des PS supplémentaires. La proximité de zones construites présente un double avantage si elles sont considérées comme stables. En plus de fournir des PS supplémentaires, elles peuvent être utilisées pour sélectionner un point de référence. Mais dans de nombreux cas les zones construites sont éloignées des zones de montagne et a fortiori des zones de haute montagne. Même si la densité de PS peut être augmentée en traitant des données haute résolution (TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed), avec le coût supplémentaire que cela implique, cela ne règle pas le problème de la localisation du point de référence. Il est possible d'avoir recours à des CR, pouvant être utilisés comme point de référence ou comme diffuseurs cohérents supplémentaires pour augmenter localement la densité de PS (Bovenga et al., 2017), (Schlögel et al., 2017). L'utilisation de CR permet de localiser de manière stratégique des points de mesure de déformation, de réduire l'incertitude sur les résultats et de valider les résultats obtenus en couplant les résultats de l'InSAR avec des mesures GPS sur les CR (Crosetto et al., 2016) (Schlögel et al., 2017).

II Analyse des réponses de CR dans des images Sentinel-1 en espace libre, milieu rural et zone montagneuse

Les territoires de montagne et en particulier ceux de haute montagne sont exposés à de nombreuses instabilités (1.1) dont le suivi par interférométrie radar est rendu possible lorsque la décorrélation est limitée. Les études réalisées par le passé ont montré que les méthodes PS peuvent être appliquées à ce type de milieu bien qu'elles souffrent d'une faible densité de points de mesure. L'arrivée de Sentinel-1a et 1b avec une acquisition systématique et un temps de re-

visite court (6 jours) offre de nouvelles opportunités pour le suivi de déformation dans les zones marquées par la décorrélation temporelle.

En milieu naturel, les diffuseurs ponctuels peuvent ne pas être aussi dominants et idéaux que ceux rencontrés en milieu urbain (cf. section 1.5.1). Le problème de la décorrélation spatiale et temporelle rencontrées avec ces diffuseurs ponctuels peut être réduit en ayant recours à des approches PS inspirées des méthodes SB, basées sur l'utilisation de petites lignes de bases temporelles et spatiales (voir section 1.4.5). Il est également possible d'intégrer des coins réflecteurs afin d'ajouter des points de mesure (section 1.2.2) et de limiter les incertitudes sur la position des cibles exposées aux déformations (section 1.5.3).

De précédents travaux ont montré qu'il était possible d'obtenir des erreurs de déplacement inférieures au millimètre avec des coins réflecteurs de 1,5 m ou plus en bande C (Garthwaite, 2017). Cependant, une telle taille de CR peut être un facteur limitant dans des zones difficiles d'accès où les conditions climatiques sont particulièrement hostiles (fort vent, fortes précipitations), nécessitant d'importants moyens pour apporter les CR sur site et pour les fixer solidement. Il semble essentiel de trouver un compromis entre une taille de CR suffisante pour que la réponse radar du CR domine le pixel dans lequel il se trouve (rendant la contribution du sol négligeable) et une installation à faible coût. La perforation des CR peut s'avérer être une autre solution pour réduire le poids des CR et surtout pour réduire l'effet du vent, permettre un drainage rapide des fortes pluies et un nettoyage de la poussière (Algafsh et al., 2016). Les effets de la perforation sur les CR ont été présentés pour la bande X (Parizzi et al., 2006) (Qin et al., 2013), mais peu de recherches ont été effectuées pour la bande C. Et bien que la perforation ait a priori une influence moindre sur la réponse en bande C que sur la réponse en bande X (Garthwaite, 2017) (Garthwaite et al., 2015), une étude de l'impact de la perforation semble nécessaire.

Afin de valider l'intérêt des CR pour un suivi de déformations avec les images Sentinel-1 en zones montagneuses, différents tests ont été réalisés en espace libre (chambre anéchoïque) et en milieu rural présentant un environnement avec une faible réponse radar. Une comparaison est présentée entre les CR de différentes formes, triangulaires et triangulaires rectangulaires. Les SER maximales de 3 CR différents ont été mesurées dans une chambre anéchoïque afin de tester la sensibilité à l'orientation. Enfin, 10 CR ont été utilisés pour plusieurs expériences (voir figure II.1). 5 CR ont été utilisés dans un champ à Choisy (France), 4 de ces CR et 5 autres CR ont été utilisés sur le glacier de l'Argentière et sur les versants environnants de la vallée de Chamonix-Mont-Blanc (France), afin d'évaluer leur visibilité dans des séries temporelles d'images Sentinel-1. La précision de la géolocalisation des CR et l'instabilité des pentes entourant le glacier d'Argentière ont été étudiées par une approche PS multi-références. Les résultats obtenus avec les 2 CR (CR9 et CR10) qui ont été installés sur le glacier d'Argentière sont présentés dans l'annexe A.

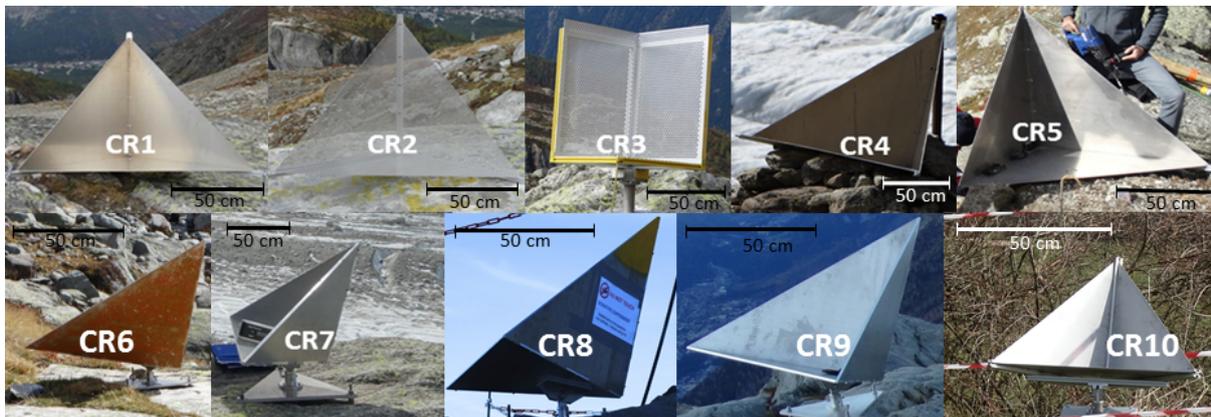


FIGURE II.1 – Illustration des 9 CR triangulaires et d'un CR rectangulaire utilisés lors des différentes expérimentations.

1 Mesure de SER en chambre anéchoïque

Avant d'être testée sur les différents sites, la SER de 3 CR a été mesurée en chambre anéchoïque. Les mesures SER ont été effectuées en bande C avec une fréquence à 5,405 GHz, afin d'estimer la réponse radar qui peut être obtenue avec Sentinel-1. Les mesures de SER ont également été réalisées en bande X, en vue d'une éventuelle utilisation des CR avec des données issues des satellites TerraSAR-X ou Cosmo-SkyMed. Les différents trièdres testés sont les suivants : un CR triangulaire avec $L = 955$ mm (CR1), un CR triangulaire perforé avec $L = 955$ mm (CR2) afin de mesurer l'effet de la perforation et un CR rectangulaire perforé, constitué d'une plaque basale carrée de 500 mm de côté et de deux plaques rectangulaire de 500 mm par 750 mm (CR3).

Les mesures de SER ont été effectuées dans une chambre anéchoïque de la société Lun'tech (Pérols, France), de 20 m de long sur 6 m de large et 3,5 m de haut. Cette chambre peut mesurer la SER de cibles situées à une distance de 1 à 17 mètres des antennes d'émission et de réception pour des fréquences d'utilisation comprises entre 3,5 GHz et 40 GHz. Les estimations ont été réalisées à partir d'une comparaison de gain avec une cible référence circulaire de 18 pouces en suivant le protocole présenté dans la section 2.3.4.

1.1 Mesure de la SER maximale

Les CR ont été positionnés et inclinés de sorte que l'angle d'incidence soit normal par rapport à la face ouverte du CR. Les capteurs radar (émetteur et récepteur) étant horizontaux, le plan passant par les 3 arêtes est vertical pour les CR triangulaires. Cette position correspond à la position avec l'angle d'élévation Ψ égal à 35 degrés et l'angle d'azimut égal à 45 degrés. Les SER maximales mesurées en bande C sont rapportées dans le tableau II.1.

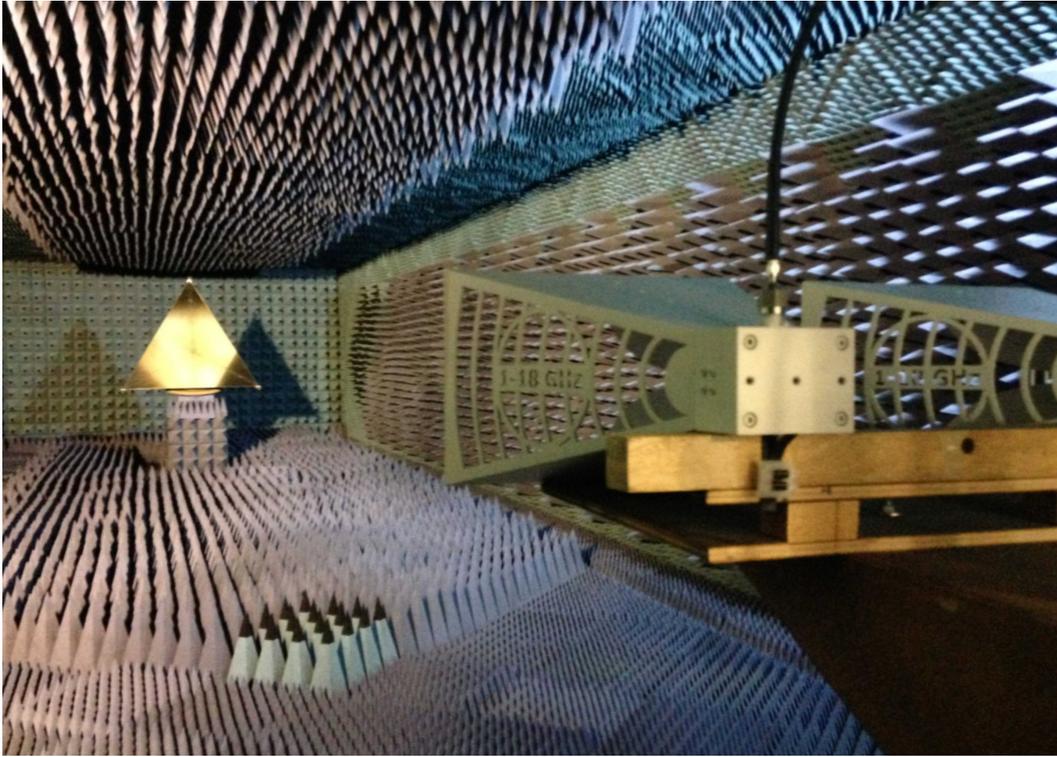


FIGURE II.2 – Dispositif permettant la mesure relative de SER en chambre anéchoïque de CR1

La SER théorique de CR1 est de $30,46 \text{ dBm}^2$ en bande C, alors que le SER obtenue en chambre anéchoïque est de $26,76 \text{ dBm}^2$ (voir tableau II.1). La perte de $3,7 \text{ dBm}^2$ peut avoir plusieurs origines. Les plaques de 2 mm d'épaisseur des CR, démontés pour faciliter le transport, ont pu subir des déformations lors de leur envoi du laboratoire vers le lieu de la chambre anéchoïque. De petites courbures ont ainsi été observées sur la plaque basale du modèle perforé triangulaire (CR2). A noter que les profilés utilisés pour joindre chaque plaque et dont les extrémités dépassent des plaques pour faciliter la fixation des CR peuvent être une autre source possible de perte de SER. Ces résultats soulignent la difficulté de trouver le bon compromis entre une construction à faible coût et une conception efficace. La comparaison des SER entre CR1 et CR2 montre une perte de seulement $0,3 \text{ dBm}^2$ avec les plaques perforées. Comme attendu, la perforation n'induit pas de perte significative. Enfin, CR3 montre également une perte d'environ $2,4 \text{ dBm}^2$ entre la valeur estimée (sous-estimée) et la SER mesurée en bande C. Cependant, aucune déformation de plaques n'a été observée sur ce modèle.

Les valeurs de SER mesurées en chambre anéchoïque ne sont valides que si la condition de champ lointain de Fraunhofer est vérifiée ($R \geq \frac{2d^2}{\lambda}$, où R est la distance entre la cible et l'antenne radar et d la plus grande dimension de la cible) (Guillemot et al., 1997). Dans le cas présent, un disque avec un rayon 18 pouces (environ 46 cm) a été utilisé comme cible de référence, il représente une distance minimale de 13,5 m en bande C. Les mesures ont été effectuées dans une chambre anéchoïque de 20 m de long, la condition de champ lointain de Fraunhofer est donc vérifiée. Pour le CR triangulaire avec un côté de longueur de 955 mm, la plus grande dimension correspond à l'hypoténuse des plaques triangulaires, qui est égale à 135 cm ; la distance minimale est donc de 65 m en bande C. Par conséquent, la différence entre la théorie et la mesure peut s'expliquer en partie par des défauts de construction, comme expliqué ci-dessus, et en partie par le fait que les mesures ont été effectuées dans des conditions où R vaut un tiers de la valeur minimale.

-	Forme	Longueur de côté (mm)	SER_{th}^C (dBm ²)	SER_m^C (dBm ²)	SER_{th}^X (dBm ²)	SER_m^X (dBm ²)
CR1, CR4, CR5	T	955	30.46	26.76	35.59	30.77
CR2	Perf. T	955	30	26.44	35	30.60
CR3	Perf. R	500	26.46	24.02	33.89	26.46
CR 6, CR8	T	700	25.06	-	30.20	-
CR7, CR10	T	450	17.38	-	22.52	-

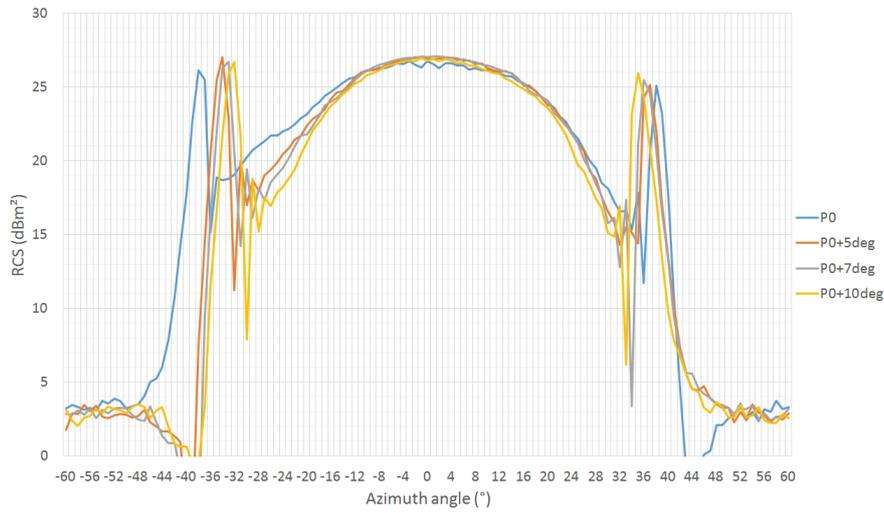
TABLE II.1 – SER théorique SER_{th} et SER mesurée SER_m (dBm²) dans une chambre anéchoïque pour différentes longueurs de côtés et différentes formes de CR en bande C (°) avec $\lambda = 5,6$ cm et en bande X (°) avec $\lambda = 3,1$ cm . T = Triangulaire, R = Rectangulaire, Perf. = Perforé.

1.2 Sensibilité aux paramètres d'orientation et d'élévation

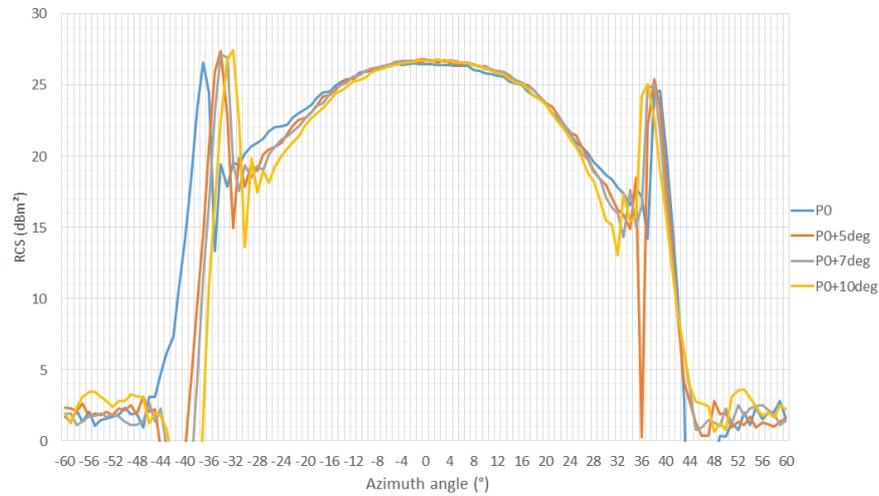
Pour compléter les mesures de SER maximales, la sensibilité des angles de réglage a également été estimée en faisant varier l'angle d'azimut de l'orientation optimale (section 2.1.1) à ± 60 degrés avec un pas de 1 degré. Les opérations ont été répétées avec 4 angles d'élévation différents.

La première série de mesures de CR1, correspondant à la position $P0$ (courbe bleue dans la figure II.3.a) montre une large partie centrale, qui peut être attribuée à un mécanisme de triple rebond entre les trois faces du CR (Knott, 1993). La présence de lobes latéraux de part et d'autre la partie centrale s'explique par un changement de mécanisme de réponse, passant d'une réponse avec triple rebond à simple rebond à partir de la face qui est illuminée. Notons qu'un changement de ± 21 degrés par rapport à la position azimutale optimale n'entraîne qu'une diminution de 3 dBm². Ainsi, nous pouvons confirmer que ce CR triangulaire a une plage utile de ± 21 degrés pour les réglages en azimut.

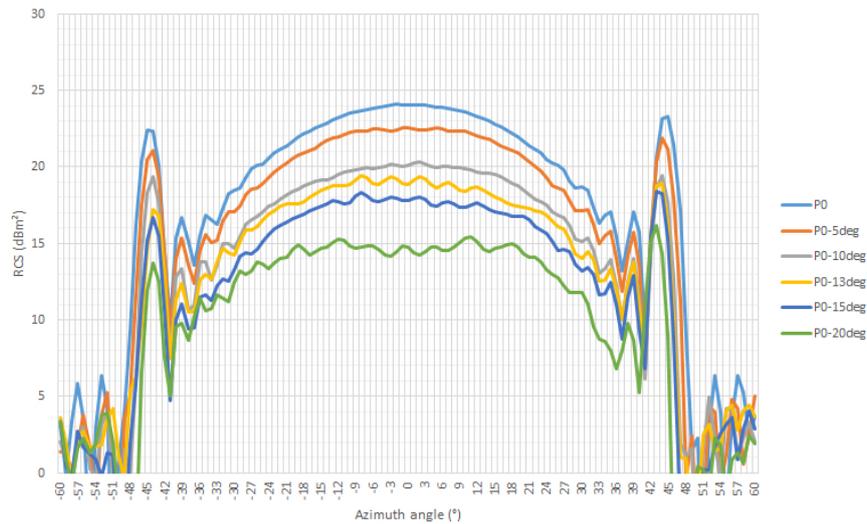
Les séries suivantes (+5, +7 et +10 degrés par rapport à l'angle d'élévation optimal) ne montrent que peu de différence avec la première série et présentent des pics SER similaires. L'observation principale est que lorsque la déviation de l'angle d'élévation augmente, la tolérance en réglage d'azimut diminue. Les mesures avec CR2 (figure II.3 .b) présentent des résultats très similaires, les plages utiles sont proches de celles de CR1. Par conséquent, la présence de perforations ne semble pas affecter la sensibilité de réglage des CR. La figure II.3.c présente les mesures SER obtenues avec CR3, le CR rectangulaire perforé. Avec les réglages d'élévation optimaux, CR3 présente également une plage utile de ± 21 degré. En azimut optimal, une déviation de 10 degrés de l'angle d'élévation induit une perte de 4 dBm² de la SER. Avec un écart de 20 degrés, la perte est d'environ 10 dBm². Le modèle rectangulaire présente ainsi un cône utile très proche du modèle triangulaire pour les variations azimutales et une sensibilité significative aux réglages en élévation.



(a) Mesures de la SER de CR1 dans une chambre anéchoïque.



(b) Mesures de la SER de CR2 dans une chambre anéchoïque.



(c) Mesures de la SER de CR3 dans une chambre anéchoïque.

FIGURE II.3 – Mesures des SER de CR1, CR2 et CR3 en chambre anéchoïque

2 Visibilité des CR en zone agricole

Pour compléter l'analyse des CR et déterminer leur potentiel d'utilisation pour le suivi de déformation à partir de données Sentinel-1, 5 CR ont été installés dans une zone rurale. L'ob-

jectif de cette experimentation est d'étudier la réponse des CR dans un contexte favorable, c'est-à-dire dans un milieu où l'interaction sol/rélecteurs est limitée. Ces conditions peuvent être rencontrées lorsque le niveau de rétrodiffusion est faible. Les CR ont donc été installés dans une prairie herbeuse relativement plane et suffisamment grande pour pouvoir espacer les CR de l'équivalent de plusieurs pixels. La zone d'installation est présentée en figure II.4.

5 CR ont été installés sur le terrain en herbe sur la commune de Choisy (Haute-Savoie), orientés pour une acquisition descendante de Sentinel-1, pendant deux périodes différentes. Un CR triangulaire avec $L = 955$ mm et un autre avec $L = 450$ mm (CR10) ont été observés dans 5 images descendantes de Sentinel-1, à partir de 2016-03-26 au 2016-05-13. En complément, 3 CR (CR1, CR2 et CR3) ont été observés dans 7 images descendantes de Sentinel-1, du 2017-04-20 au 2017-06-07 (figure II.4).

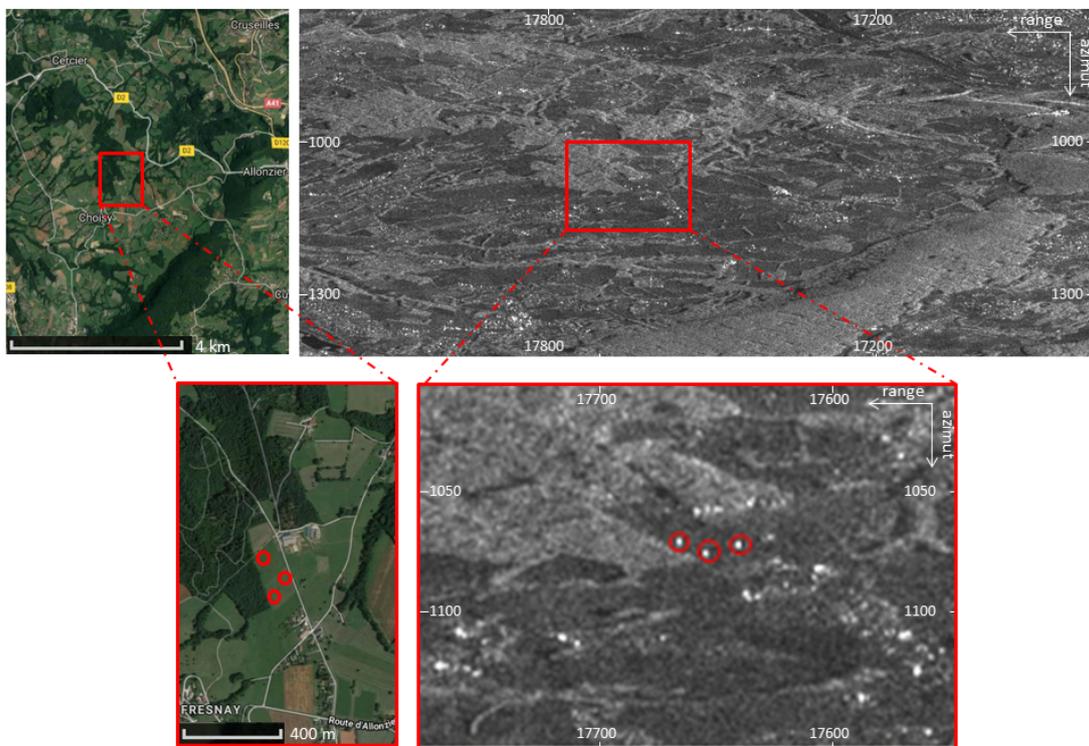


FIGURE II.4 – Localisation du champ utilisé pour les expérimentations à Choisy (Haute-Savoie). Les carrés rouges indiquent la position des CR - CR1, CR2 et CR3. Gauche : Google Map ; droite : Moyenne temporelle de l'intensité de 7 images Sentinel-1 entre 2017-04-20 au 2017-06-07

2.1 Identification des CR

Afin d'analyser la réponse radar des CR il faut identifier des pixels dans lesquels se trouvent les CR. L'approche utilisée pour sélectionner ces pixels vient de la méthode de sélection des réflecteurs cohérents par corrélation spectrale (section 1.5.2). L'avantage principal de cette méthode est qu'elle permet de détecter les CR à partir d'une seule image radar. L'absence de contrainte sur le nombre minimal d'images radar à utiliser s'avère très utile lorsqu'on réalise des expérimentations de courtes durées comme celles-ci.

Dans le cas présent, la sélection des pixels contenant les CR a été réalisée comme suit : le spectre

de l'image radar a été divisé en 16 sous-spectres par filtre passe-bande à partir d'une fenêtre de Kaiser pour chaque pixel correspondant à la zone d'installation des CR. Le signal radar étant en deux dimensions, le filtre passe-bande peut être appliqué dans la dimension range et/ou dans la dimension azimuth. Ainsi, le spectre a été filtré à partir de 4 fenêtres en range et 4 fenêtres en azimuth, permettant d'obtenir 16 filtrages différents. Une transformée de Fourier inverse permet ensuite d'obtenir 16 SLC filtrées.

A partir d'une image radar on obtient donc 16 observables permettant d'identifier les réflecteurs cohérents. Le coefficient de corrélation des 16 SLC filtrées est calculé pour chaque pixel de la zone d'intérêt. Le Rapport Moyenne sur Ecart-type (RME) du signal des 16 SLC filtrées est également calculé pour chaque pixel afin de caractériser la variabilité du signal. En appliquant un seuil restrictif sur le coefficient de corrélation spectrale C et le RME (respectivement 0,6 et 1,7), les pixels correspondant aux positions des CR ont été identifiés pour tous les CR installés au cours des deux expériences sur le terrain, à l'exception du plus petit CR (CR10, $L = 450$ mm).

La procédure a été utilisée sur une acquisition avant l'installation des CR et aucun pixel n'a été sélectionné. Ainsi, connaissant l'emplacement des CR sur le terrain, il est facile de vérifier si les pixels sélectionnés correspondent ou non aux CR. Le pixel contenant CR10 a pu être identifié en utilisant le même seuil de corrélation spectrale mais sans seuil sur le RME. Cependant cela entraîne également la sélection d'autres pixels ne comportant pas de CR. La taille de CR 10 semble trop limitée pour ne pas sélectionner le pixel sans risque de fausse alarme. La figure II.5 montre le résultat obtenu par ce processus d'identification pour CR1 dans une acquisition Sentinel-1 du 26 mars 2016.

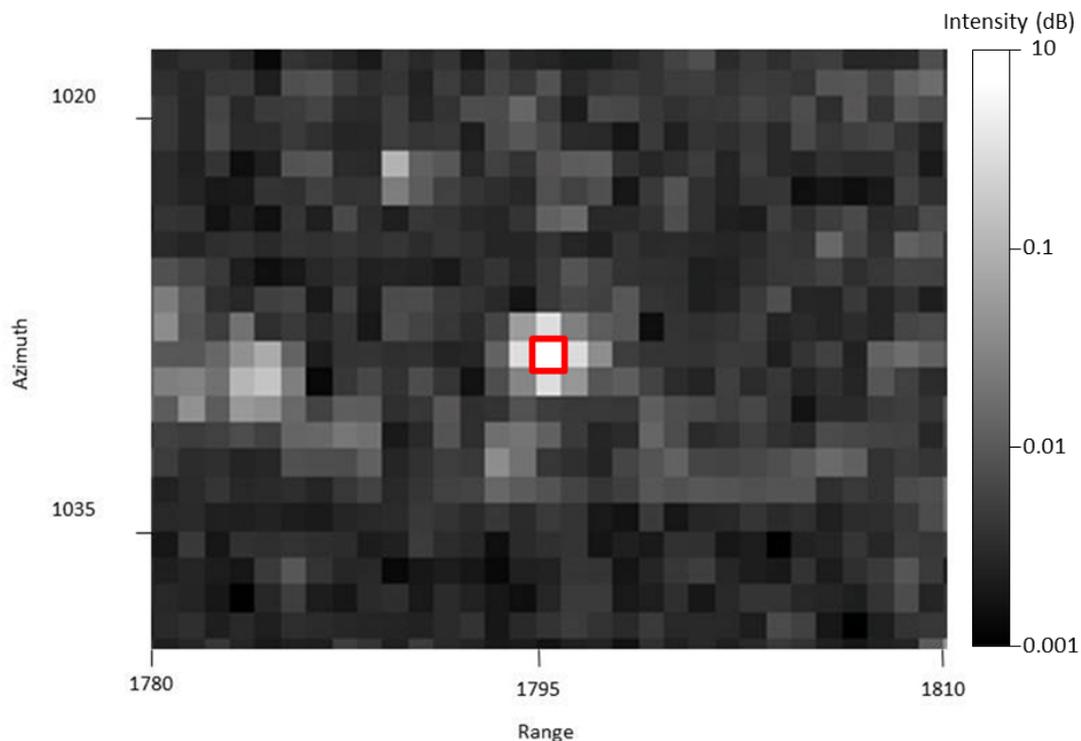


FIGURE II.5 – Sélection du pixel correspondant à CR1 dans une image Sentinel-1 descendante acquise le 26/03/2016

2.2 Estimation du potentiel d'utilisation d'un CR dans une série temporelle

L'estimation de la SER de CR1, CR2 et CR3 dans une chambre anéchoïque correspond au cas idéal où la réponse radar n'est pas perturbée par la contribution de diffuseurs (distribués ou dominants) dans ou à proximité de la cellule de résolution. Dans le cas des données Sentinel-1 où le pixel au sol à une surface de plusieurs dizaines de mètres carrés, le nombre de diffuseurs au sein d'un pixel peut s'avérer important. Il semble intéressant d'estimer la SER obtenue dans différentes conditions de rétrodiffusion pour mieux appréhender ses capacités d'utilisation.

Pour cela, la SER de chaque CR a été calculée avec la méthode proposée dans (Garthwaite, 2017). Dans cette méthode on considère une fenêtre centrée sur le pixel du CR devant encadrer sa signature spatiale (en forme de croix) plus ou moins diffusée. L'énergie totale du CR est alors estimée à partir de la somme des intensités de la fenêtre que l'on divise par celle liée au clutter. Ce dernier est estimé dans la fenêtre à partir des quatre sous-fenêtres diagonales situées à l'extérieur de la croix. La SER est ensuite obtenue en multipliant l'énergie du CR E_{CR} par l'aire A du pixel projeté au sol :

$$SER_{CR} = E_{CR} \cdot A \quad (\text{II.1})$$

avec $A = \frac{\rho_r \cdot \rho_{az}}{\sin(\theta)}$ où ρ_r et ρ_{az} correspondent aux dimensions du pixel en range et en azimuth, et θ l'angle d'incidence.

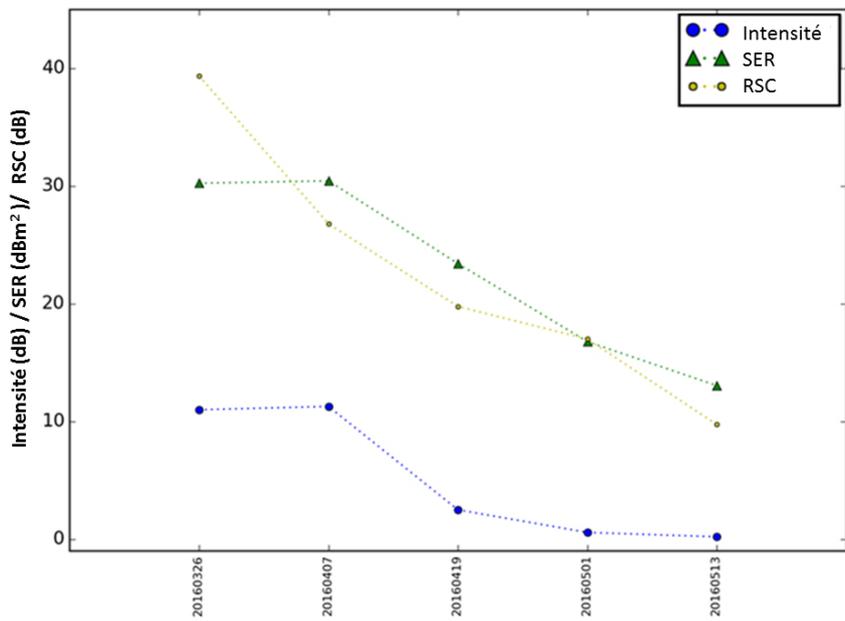
Pour compléter l'analyse de chaque CR et valider leur potentiel d'utilisation pour obtenir une mesure de déplacement précise, une analyse de la stabilité de la réponse radar a été réalisée à partir de deux séries temporelles d'images, en calculant le rapport RSC et l'erreur de phase attendue (Adam et al., 2005) présentée dans la section 1.5.2. L'approche proposée dans cette étude est de calculer le RSC moyen de chaque CR pour évaluer leur capacité à fournir une mesure de déplacement précise. Le RSC des CR a été calculé dans chaque image SAR à partir de la méthode présentée dans (Garthwaite, 2017) en divisant l'énergie estimée du CR par celle du clutter moyen, calculée à partir des quatre fenêtres diagonales précédemment citées. Notons qu'une autre approche est possible pour l'estimation de l'erreur de phase en utilisant l'indice de dispersion d'amplitude (section 1.5.2). Cette seconde approche souffrant d'un plus grand biais, l'estimation de l'erreur de phase par l'approche RSC lui a été préférée.

La figure II.6.a) montre l'évolution temporelle de l'intensité, de la SER et du RSC estimés pour CR1 au cours de la première expérimentation réalisée du 26/03/2016 au 13/05/2016. Les valeurs de SER estimées à partir de la première image du 26/03/2016 sont cohérentes avec les valeurs théoriques présentées dans la section 2.1.1. Ensuite, on observe une décroissance de ces 3 paramètres dans le temps, qui s'explique par une accumulation des eaux de pluies causée par l'obstruction du trou prévu pour l'évacuation de l'eau. Les résultats de l'estimation de la qualité des 3 CR installés en 2017 sont illustrés à la figure II.6.b). Les estimations de la SER de CR1 à partir de la deuxième expérimentation, du 20/04/2017 au 07/06/2017, sont également cohérentes avec les valeurs théoriques pour CR1 et CR3. L'estimation de la SER de CR2 est inférieure aux prévisions. CR2 a une construction fragile avec des plaques perforées de 2 mm. La perte de SER pourrait s'expliquer par des déformations des plaques survenues après les mesures en chambre anéchoïque. L'une des recommandations pour l'utilisation de CR perforés pourrait être de renforcer leur construction. Notons que le RSC de CR2 est faible et inférieur à 9, la

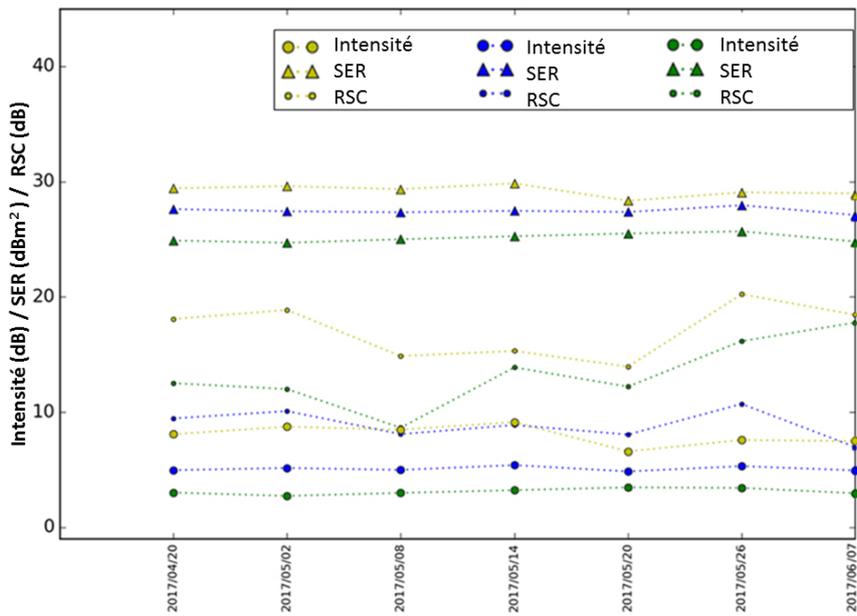
méthode d'estimation de stabilité de phase basée sur l'indice de dispersion d'amplitude n'est donc pas adaptée (Ketelaar et al., 2005). Les moyennes de SER et RSC sont données dans le tableau II.2.

Coins Réflecteurs	SER moyenne	RSC moyen
CR1	29.24	17.11
CR2	27.47	8.89
CR3	25.13	13.32

TABLE II.2 – Moyennes des SER (dBm^2) and RSC (dB) estimées à partir de 7 images Sentinel-1 descendantes acquises du 20/04/2017 au 07/06/2017.



(a) Séries temporelles d'intensité, de la SER et du RSC estimés pour CR1 à partir de 5 images descendantes Sentinel-1, du 26/03/2016 au 13/05/2016.



(b) Séries temporelles pour CR1, CR2 and CR3 à partir de 7 images descendantes Sentinel-1 du 20/04/2017 au 07/06/2017.

FIGURE II.6 – Séries temporelles d'intensité, de SER et de RSC à partir d'images Sentinel-1

3 Visibilité des CR en zone montagneuse

3.1 Présentation du site test Chamonix-Mont-Blanc

Les expérimentations initiées dans une zone à faible niveau de rétrodiffusion ont été complétées par une expérimentation en zone montagneuse sur le site test de Chamonix-Mont-Blanc. En plus d'être étudié pour ses glaciers, le massif du Mont-Blanc est étudié pour évaluer les risques inhérents aux processus périglaciaires et à la dégradation du pergélisol (section 1.1). Ces processus géomorphologiques complexes conduisent à des instabilités de pente susceptibles de générer des risques pour les territoires de montagne (Deline et al., 2012) (Ravel et al., 2014)

(Magnin et al., 2017).

Afin de tester la visibilité des CR et éventuellement de les utiliser pour un suivi de déformation, le site d'installation devait répondre à plusieurs critères : le site devait présenter des formations potentiellement instables (éboulis, glaciers rocheux ou moraines), il ne devait pas être trop fréquenté pour éviter toute dégradation ou dérèglement (problème rencontré sur un autre site d'expérimentation) et ne devait pas présenter un risque trop important pour les opérateurs lors de l'installation et différentes interventions réalisées sur les CR.

Lors du projet GlaRiskAlp, une cartographie des moraines et tills a été réalisée, ce qui permet de sélectionner des zones potentielles d'installation. Parmi ces zones intéressantes figure celle située à proximité de la chute de séracs de Lognan. Cette zone de 6 km^2 est découpée en deux parties (entourées en rouge dans la figure II.7), des deux côtés du glacier d'Argentière. Le côté Ouest fait partie de la station de ski des Grands Montets et est composé de moraines des glaciers de Rognons et d'Argentière ainsi que des pentes rocheuses (figure II.8 et figure II.9). On notera la présence d'une structure particulière nommée la faille de l'Angle ([2] de la figure II.9). Le secteur au contact de cette faille apparaît très fracturé (zone de cisaillement) et pourrait être affecté par des déformations. Des instabilités ont d'ailleurs déjà été observées par le passé à proximité de cette faille au niveau de l'Aiguille des Grands Montets (Ravel, 2010) à proximité de la zone test. Le côté Est est composé d'une moraine latérale dans sa partie inférieure et de pentes rocheuses et de tills dans sa partie supérieure, alimentées en partie par des produits détritiques venants des glaciers du Passons et d'Adams Reilly (figure 2.9 et figure II.10). Cette zone de test est donc susceptible d'être affectée par des déformations.

Deux appareils photos sont déjà installés sur le site, surplombant la partie Est et dédiés à la surveillance du glacier d'Argentière (5 acquisitions automatiques par jour). Ces appareils offrent la possibilité de relier les conditions météorologiques locales (conditions d'enneigement en particulier) aux variations de signal observées sur les réponses des CR. Notons que les pentes de la partie Ouest ont principalement des orientations de Nord/Nord-Ouest à Nord/Nord-Est tandis que les pentes de la partie Est sont majoritairement orientées Sud/Sud-Ouest à Sud/Sud-Est. La partie Ouest est donc moins exposée au rayonnement solaire mais la majorité du site étant situé sous 2600 m, cela exclut la présence de pergélisol (section 1.1).

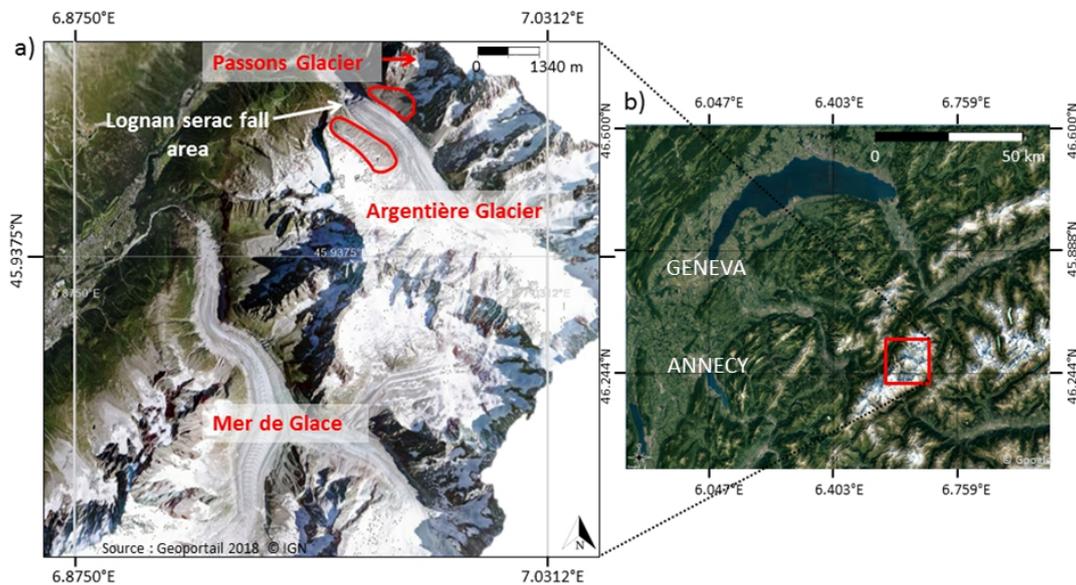


FIGURE II.7 – (a) Glaciers d'Argentière and Mer de Glace. (b) Carte de la localisation du site test de Chamonix-Mont-Blanc



FIGURE II.8 – Cartographie des tills et moraines obtenue lors du projet GlaRiskAlp. Les zones potentiellement sensibles aux déformations ont été numérotées et décrites dans les figures II.9 et II.10.



FIGURE II.9 – Secteurs sensibles de la partie Ouest du site test. [1] Moraine du glacier des Rognons, [2] Faille de l'angle [3] Moraine de névé.

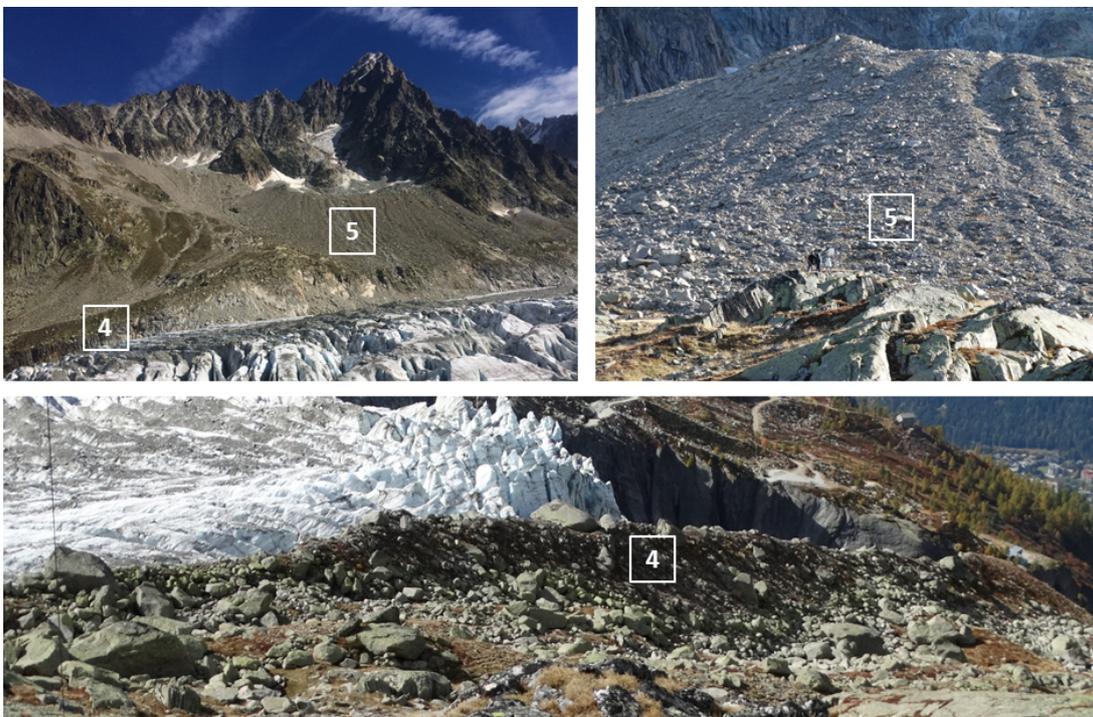


FIGURE II.10 – Secteurs sensibles de la partie Est du site test. [4] Moraine latérale, [5] Tills

Afin de répondre au critère de faible fréquentation du site, les coins réflecteurs ont été installés uniquement sur la partie Est du site test. Au total, 7 CR ont été étudiés (voir figure II.11),

5 CR (CR1, CR2, CR3, CR4 et CR5) ont été installés au cours de l'étude, complétant une précédente expérimentation réalisée avec CR6 et CR7. L'analyse préliminaire de la réponse radar de la zone dans des images Sentinel-1 ascendantes et descendantes a montré que les acquisitions ascendantes souffraient de layover (ou repliement, section 1.3.2) à cause du relief environnant. Tous les CR ont donc été réglés pour des acquisitions descendantes.

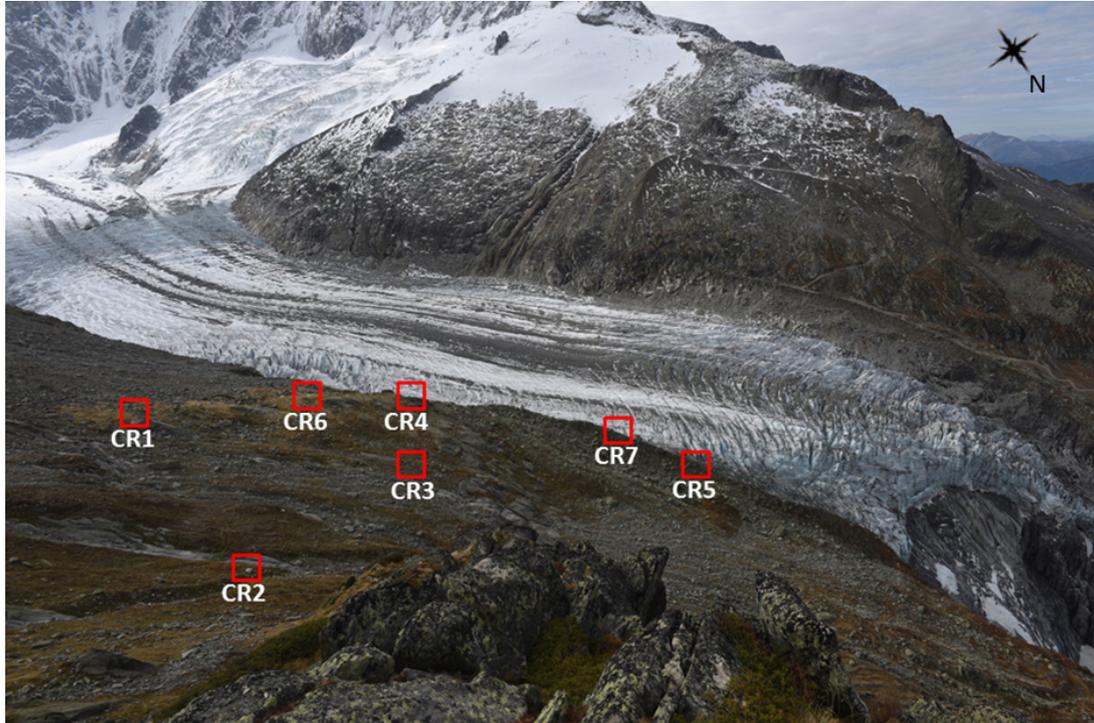


FIGURE II.11 – Photographie du 29/09/2017 provenant d'un des deux appareils installés sur le site (Latitude : 45.97170570, longitude : 6.97575317, altitude : 2611.78). Les cercles rouges indiquent la position des CR.

3.2 Identification des pixels contenant les CR

L'installation des CR sur le site de test a été effectuée en plusieurs étapes. En octobre 2016, CR4 et CR5 ont été installés alors que CR6 et CR7, déjà installés, ont été réorientés pour les données Sentinel-1, dans la même orientation que les autres CR. De nouvelles missions ont ensuite été menées, en juillet pour l'installation de CR1 et en septembre 2017 pour les installations de CR2 et CR3. Dans cette étude, nous avons travaillé avec plusieurs séries temporelles couvrant différentes périodes allant de 10 semaines à plus d'un an afin d'estimer la visibilité de chaque CR. Les pixels contenant des CR ont été sélectionnés avec la même méthode que celle présentée dans la section 2.2.1. Tous les CR ont été identifiés avec succès, à l'exception du plus petit CR (CR7), comme ce fut le cas avec le CR de même dimension CR10 dans la section 2.2.1. Cette expérimentation avec CR7 et la précédente avec CR10 montrent qu'un CR triangulaire avec une longueur de côté de 450 mm semble être trop petit pour être détecté dans les images Sentinel-1 sans fausse détection autour. Les résultats de la sélection de pixels avec une image Sentinel-1 sont illustrés à la figure II.12.

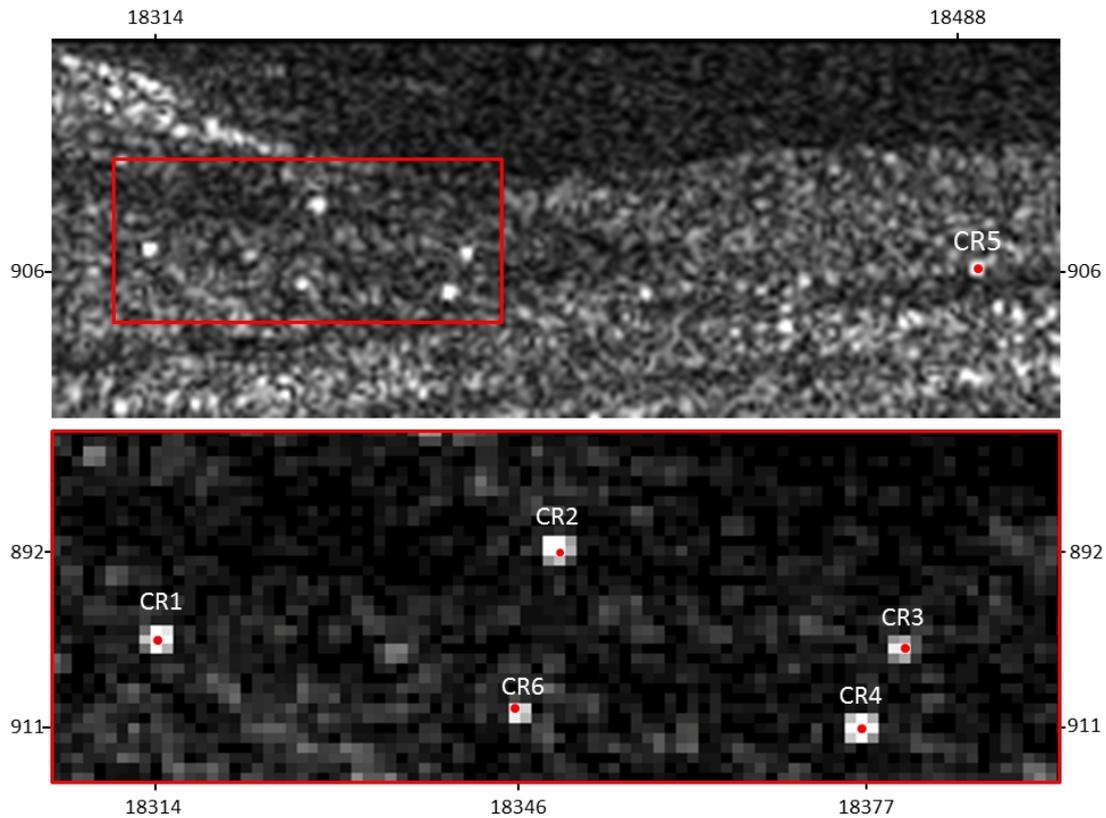


FIGURE II.12 – Intensité d’une image Sentinel-1 (30/09/2017) en géométrie radar, centrée sur 6 CR installée sur le site test de Chamoni-Mont-Blanc. Points rouge : pixels sélectionnés.
 Rectangle rouge : zoom sur les 5 CR les plus proches.

3.3 Analyse de l’intensité

La période la plus difficile pour la surveillance des instabilités dans les zones montagneuses étant la saison hivernale en raison des chutes de neige, un accent a été mis sur l’analyse de la période couvrant l’hiver 2017-2018, lorsque le réseau de CR fut au complet, permettant de comparer les réponses radar obtenues avec plusieurs formes et tailles de CR, avec ou sans perforation.

Une analyse d’intensité des pixels sélectionnés a été réalisée entre fin septembre 2017 et début mai 2018 (voir la figure II.13). L’observation des premières acquisitions en septembre et octobre permet de vérifier la réponse maximale de chaque CR avant le début de l’hiver. Il apparaît que le pixel correspondant à CR4 a la plus forte intensité alors que les pixels correspondant à CR3 et CR6 ont les intensités les plus faibles, en rapport avec leur taille. Il y a plusieurs explications au fait que la réponse de CR4 domine celles de CR1, CR2 (celle de CR5 est très proche sur la première image du 30/09/2017). D’une part CR1 a été installé avec un décalage par rapport à la position azimutale optimale de 12 degrés à cause de contraintes de réglage liées au relief sur le terrain. D’autre part, des déformations sur les plaques constituant CR2 ont été observées et discutées dans la section 2.2.2.

La diminution drastique d’intensité visible sur l’image du 24/10/2017 (voir la figure II.13) s’explique par des chutes de neige pendant une période où les températures à proximité du sol furent supérieures à 0°C. Ainsi, l’affaiblissement de la réponse radar de chaque CR, y compris celles des modèles perforés, peut être expliqué par la présence de neige humide, c’est-à-dire ayant

une forte quantité d'eau à l'état liquide. Après une période de fonte observée sur les photographies, un événement similaire a été identifié à partir des photographies du 11/11/2017. Cela affecte fortement CR1, CR2, CR3 et CR4. L'intensité de réponse de CR5 est réduite de moitié et la réponse de CR6 (faible) ne semble pas être affectée. Cependant, les intensités des réponses radar de CR1 et CR3 retrouvent leurs niveaux initiaux 6 jours plus tard. Il en est de même pour l'intensité de CR4 12 jours plus tard - le 23/11/2017 - alors que dans le même temps l'intensité observée sur CR5 décroît. Cette différence d'évolution illustre les hétérogénéités du manteau neigeux et son évolution locale sous les effets de plusieurs paramètres (vent, relief, exposition au soleil, etc.). L'analyse des photographies montre une faible réduction du manteau neigeux qui se caractérise dans les photographies par l'apparition de nombreux rochers auparavant recouverts de neige (voir figure II.15). Le comportement de CR5 pourrait s'expliquer par une humidification du manteau neigeux suffisamment importante pour ne pas permettre au signal radar de traverser l'épaisseur de neige recouvrant le CR. A l'inverse, l'augmentation des intensités de réponse radar observées sur CR1 et CR3 pourrait être due à une fonte (quasi) totale de la neige.

Passé le 23/11/2017, plusieurs épisodes neigeux se sont succédés, entraînant la diminution de la réponse radar de l'ensemble des CR. On notera que l'intensité sur CR3, le trièdre rectangulaire perforé, est celle qui se maintient (relativement) le plus longtemps et ce jusqu'au 23/12/2017, voir figure II.13. Une analyse des photographies entre le 29/12/2017 et le 04/04/2018 a confirmé que le manteau neigeux recouvrait l'ensemble du site d'expérimentation sur cette période. A titre d'exemple, le 22/04/2018, l'épaisseur du manteau neigeux a été mesurée à 249 cm (source : meteo-ciel.com) dans la station de ski de Chamonix (Lognan, 1970 m d'altitude) située à environ 2 km du site d'installation des CR mais à une altitude inférieure de 300 m (les CR sont installés entre 2320 et 2435 m d'altitude). Il faut souligner le caractère exceptionnel de l'hiver 2017/2018 en termes de précipitation, avec par exemple des précipitations quatre fois supérieures à la normale en cours du mois de Janvier (Météo France). Cela se traduit par des accumulations de neige importantes, notamment dans les orientations Nord 2.3.1 où il est possible de trouver de grandes quantités de neige tard dans la saison. L'absence de réponse radar de CR2, CR3 et CR6 jusqu'au 04/05/2018 pourrait être due à la présence d'une importante couverture neige, comme on peut le constater sur la figure II.15, qui est plus ou moins complexe (composée de plusieurs strates, de neige humide), ou à une possible dégradation des CR (avalanche, déformations sous l'effet du poids du manteau neigeux).

L'analyse des intensités observées sur les CR pendant l'hiver 2017/2018 a été complétée par une analyse durant la période estivale, jusqu'à la fin du mois de septembre 2018 (voir la figure II.14). A la fin du mois de juin, CR2 et CR3 sont toujours invisibles. Une inspection sur le terrain a permis de confirmer que CR2 et CR3 ont été endommagés durant l'hiver. En analysant l'ensemble des photographies prises quotidiennement, des traces de coulées de neige ont pu être observées à plusieurs reprises à proximité de CR2, CR qui a été le plus endommagé. Une avalanche pourrait être à l'origine de la destruction de ce dernier. Les dégâts observés sur CR3 sont moindres, ce qui peut s'expliquer par une construction plus solide que celle de CR2 et par une probable origine différente des dégâts (effet du poids du manteau neigeux). Concernant CR6, l'intensité de sa réponse radar retrouve son niveau initial, à la faveur de la fonte des neiges.

En considérant les 2 CR endommagés (CR2 et CR3) et CR7 dont la taille est trop petite, il reste 4 CR utilisables pour réaliser un suivi des instabilités du site à partir d'une approche

PS entre l'été 2017 et l'été 2018. L'étude la plus longue possible peut commencer le 27/07/2017 après l'installation du CR1 (figure II.14) jusqu'à la fin de l'été 2018 avant les premières chutes de neige. Notons que de faibles chutes de neige sont encore possibles en période estivale, comme celles observées le 12/09/2017 et le 26/08/2018 (figure II.14) et confirmées par les photographies prises à partir des deux appareils de surveillance.

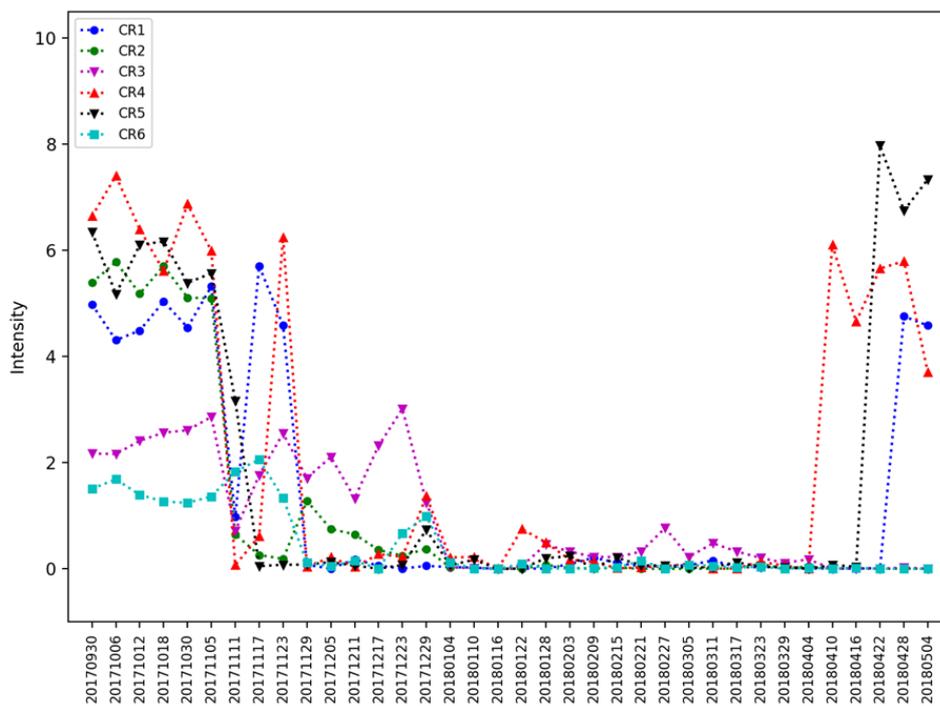


FIGURE II.13 – Série temporelle de l'intensité d'images SAR durant l'hiver 2017-2018 sur 6 CR installés sur et à proximité de la moraine latérale du glacier d'Argentière.

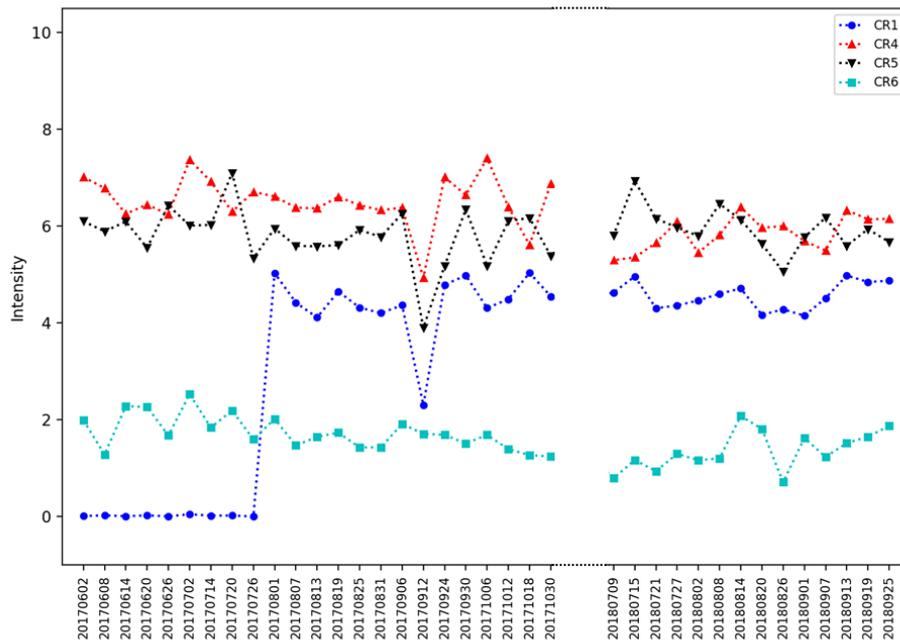


FIGURE II.14 – Série temporelle de l'intensité d'images SAR en période estivale en 2017 et 2018 sur 4 CR installés sur et à proximité de la moraine latérale du glacier d'Argentière.

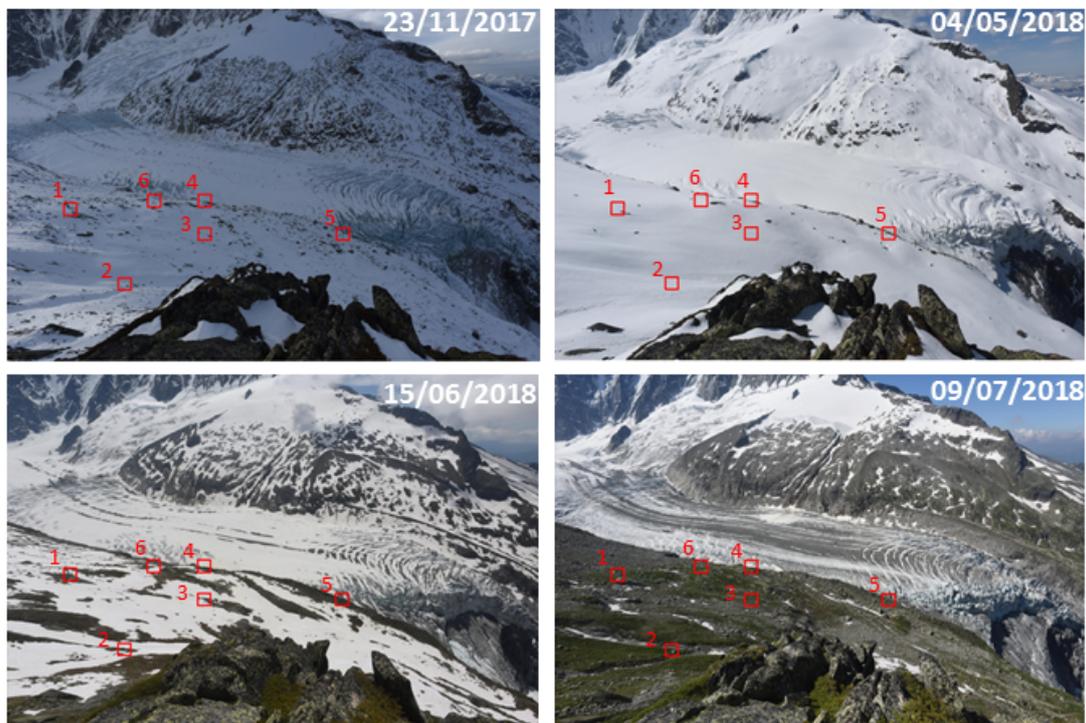


FIGURE II.15 – Photographies acquises par l'appareil de surveillance le plus en amont du glacier d'Argentière. Les carrés rouges indiquent la position des CR.

3.4 Analyse de la stabilité

L'un des objectifs de cette étude est de définir le potentiel des CR pour la surveillance des instabilités en territoire de montagne à partir de données Sentinel-1. Une stratégie de surveillance

de cet environnement complexe peut être d'intégrer les CR à une étude PS, et notamment d'utiliser l'un d'entre eux comme point de référence (section 1.5.3).

Dans une telle approche, le point de référence choisi doit être stable en termes de déplacement. Or sans connaissance a priori de la zone étudiée, ce choix peut s'avérer difficile. Dans le cas présent où les 6 CR relativement proches les uns des autres, avec une distance maximale de 428 m (distance séparant CR1 et CR5), et en considérant que les variations de phase atmosphérique sont négligeables sur des distances inférieures à 500 m (Bähr, 2013), la stabilité de la phase des CR est un bon indicateur de la stabilité en termes de déplacement.

Sachant qu'il existe une relation statistique entre la stabilité d'amplitude et la stabilité de phase (Hooper et al., 2007), une analyse de la stabilité de l'amplitude des pixels contenant les CR semble être une approche adaptée pour choisir le point de référence. Pour caractériser la stabilité de l'amplitude S_a de réponse des CR (Bovenga et al., 2014), nous avons utilisé le rapport entre la moyenne et l'écart type de l'amplitude, équivalent à l'inverse de l'indice de dispersion d'amplitude normalisé D_a (1.5.2).

Dans cette étude, nous avons estimé un indice de stabilité S_i à partir de l'intensité plutôt que de l'amplitude. Cet indice de stabilité a été calculé sur plusieurs séries temporelles d'images Sentinel-1 dont les résultats sont présentés dans le tableau II.3 variabilité d'intensité élevée provoquée par les chutes de neige, visibles sur la figure II.16. Cependant, l'indice de stabilité est élevé si l'on considère les sous-séries temporelles pendant une période sans chute de neige (23 images, 15/05/2017 - 06/09/2017). Une analyse équivalente a été effectuée sur une série temporelle hors période hivernal (37 images, 01/08/2017 - 30/10/2017 et 09/07/2018 - 25/09/2018) avec les CR perforés, CR2 et CR3. Malheureusement, ils ont été endommagés par une avalanche durant l'hiver, ce qui explique leur très faible indice de stabilité. Considérant que CR4 a été installé sur un affleurement rocheux en dehors des zones susceptibles d'être instables (voir figure II.10) et selon l'analyse de l'indice de stabilité, CR4 peut être considéré comme le meilleur choix pour être le point de référence.

Coins	10/10/2016	15/05/2017	01/08/2017-30/10/2017	30/09/2017	09/07/2018
Réflecteurs	30/09/2017	06/09/2017	09/07/2018-25/09/2018	30/10/2017	25/09/2018
CR1	X	X	8.86	16.35	16.56
CR2	X	X	0.47	20.16	0.85
CR3	X	X	0.49	12.60	0.95
CR4	1.76	25.35	11.09	11.19	16.79
CR5	1.45	7.18	10.66	12.54	13.95
CR6	2.89	4.89	4.34	8.66	3.44

TABLE II.3 – Indice de stabilité de l'intensité de 6 CR entre le 10/10/2016 et le 25/09/2018.

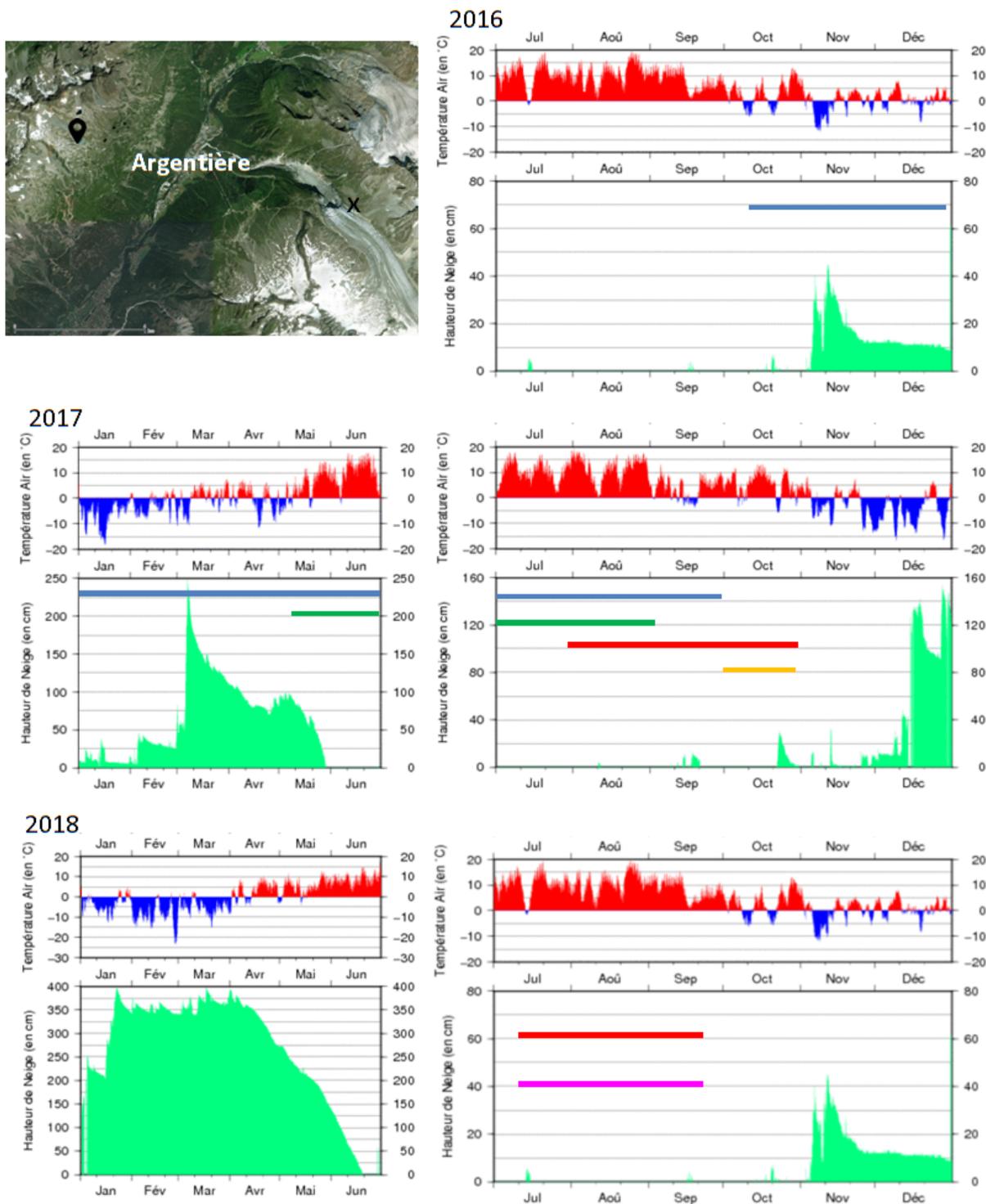


FIGURE II.16 – Températures et enneigement relevés par la station de Météo France (indiqué par un repère bleu sur la carte) dans le massif des Aiguilles Rouges. La croix bleue indique le site d’installation des coins réflecteurs. Les traits de couleurs indiquent les différentes périodes présentées dans le tableau II.3. Trait bleu : 10/10/2016 - 30/09/2017; trait vert : 15/05/2017-30/09/2017; trait rouge : 01/08/2017-30/10/2017 et 09/07/2018-25/09/2018; trait orange : 30/09/2017-30/10/2017; trait magenta : 09/07/2018-25/09/2018.

3.5 Estimations des paramètres RSC et SER

L’analyse de stabilité a été complétée par une estimation du bruit de phase basée sur le rapport RSC. Le tableau II.4 présente l’erreur de phase attendue avec le rapport RSC estimé de

la même manière que dans la section 2.2.2. La SER est également présentée dans le tableau II.4 afin de mieux appréhender les éventuelles différences des RCS estimées lors de cette expérimentation et de la précédente en zone rurale. Il est important de savoir que les éventuelles variations de RCS sont dues à une modification de la SER du CR (déformation des plaques, angles de réglage non optimaux, etc.) ou au clutter. Le site d'installation étant différent et d'apparence moins homogène (présence de pierres et de rochers de différentes tailles, une couverture végétale rase et disparate), on peut raisonnablement s'attendre à des estimations différentes du clutter moyen d'un CR à l'autre.

L'estimation de la SER de CR1 est inférieure à l'estimation précédente. Or CR1 a été réglé avec un décalage de 12 degrés en azimut par rapport à l'orientation optimale (section 2.3.3), ce qui peut expliquer la perte de SER. Le SER de CR2 est supérieur de 1 dB à celle obtenue précédemment. Avant l'installation, nous avons essayé de redresser une de ses plaques présentant une courbure. Cela peut expliquer le gain de SER. La valeur de la SER estimée de CR3 est de 1,6 dB inférieure à l'estimation précédente. D'après les résultats de la chambre anéchoïque, cela pourrait être dû à un décalage d'environ 5 degrés en élévation, ou d'environ 15 degrés en azimut. La première hypothèse est la plus probable puisque nous avons rencontré à plusieurs reprises des problèmes lors de l'initialisation de l'inclinomètre numérique utilisé pour les réglages. La faible différence (inférieure à 0.8 dBm^2) des SER estimées des 4 CR de même taille (CR1, CR2, CR4 et CR5) est cohérente. En conclusion, les estimations de SER sont proches de celles mesurées en zone rurale. Les variations de RCS peuvent donc être mises en lien avec des niveaux de clutter différents. Par exemple, CR1 et CR4 ont des SER très proches, 0.18 dBm^2 d'écart, mais une différence de SCR d'environ 4.5 dBm . Si l'on analyse leur site d'installation, on remarque que CR1 est installé dans une zone avec de la végétation rase et divers rochers apparents alors que CR4 est installé sur un affleurement rocheux dépourvu de végétation. Les diffuseurs présents à proximité des CR étant de nature différente, il en est de même pour leur contribution dans l'énergie du clutter.

Bien que CR4 ait le rapport RSC le plus faible, l'erreur de phase estimée est faible (0,20 rad) et ne remet pas en cause le choix d'utiliser ce CR comme point de référence. De plus, un RSC supérieur à 12 dB est un indicateur montant que la réponse radar du CR domine celle des diffuseurs présents dans le clutter. Ce pic d'intensité par rapport aux autres réponses de diffuseurs est illustré dans la figure II.17. Il est intéressant de voir que malgré une taille inférieure à celles de CR1 et CR4 et une domination moins nette de son intensité (figure II.17), CR6 a un RCS supérieur à celui de CR4. Cela peut s'expliquer par la présence d'un pic d'intensité visible sur la figure II.17 (potentiellement causé par un rocher) dans un des pixels utilisés pour estimer le clutter moyen. Le tableau II.4 montre que tous les autres CR ont une erreur de phase estimée inférieure à 0.19 rad. Dans le cas de l'application d'un suivi par D-InSAR, l'erreur de déplacement dans la ligne de visée peut être calculée comme suit :

$$d_{err} = \frac{\phi_{err} \cdot \lambda}{4 \cdot \pi} \quad (\text{II.2})$$

Appliqué aux données Sentinel-1, un suivi par D-InSAR avec un CR ayant une erreur de phase de 0.19 rad permet d'obtenir une erreur de déplacement dans la ligne de visée inférieure au millimètre (environ 0.8 mm). Ainsi, d'après les estimations de RSC et d'erreurs de phase correspondantes, tous les CR peuvent être utilisés pour la mesure de déplacement avec une erreur

raisonnable.

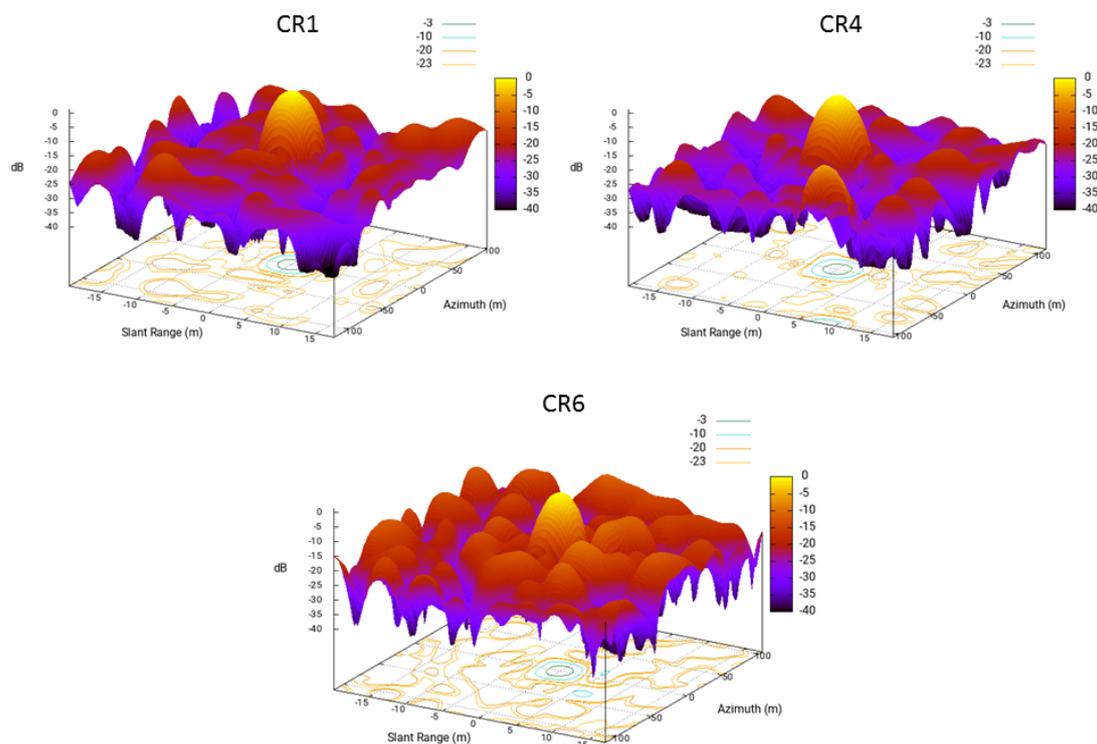


FIGURE II.17 – Intensité relative de diffuseurs à proximité de CR1, CR4 et CR6 (image Sentinel-1 du 30/09/2017)

Coins Réflecteurs	SER	RSC	Erreur de phase
CR1	28.00	17.16	0.17
CR2	28.47	14.15	0.19
CR3	23.50	13.36	0.19
CR4	28.18	12.69	0.2
CR5	28.72	17.21	0.17
CR6	22.47	13.73	0.19

TABLE II.4 – SER (dBm^2), RSC (dB) et erreur de phase (rad) estimés à partir de l'image Sentinel-1 du 30/09/2017.

4 Proposition d'une chaîne de traitement PS adaptée au site test

4.1 Méthode de sélection des données

D'après les résultats précédents, une analyse de la stabilité du site test semble réalisable. La plus longue étude possible avec le nombre maximal de CR couvre 420 jours, du 01/08/2017 au 25/09/2018 (voir section 2.3.4). La stratégie proposée doit permettre de conserver le maximum de réflecteurs ponctuels ayant une réponse radar la moins bruitée possible. Cela peut être réalisé en conservant uniquement les images radar acquises hors des périodes de chutes de neige, dans le but de minimiser la décorrélation temporelle due aux changements de surface. Du fait d'un enneigement exceptionnel (section 2.3.3), la zone d'étude a longtemps été recouverte par la neige,

bien après les dernières chutes de neige de l'hiver, comme on peut le voir sur la photographie du 15/06/2018 de la figure II.15. L'ensoleillement et les températures positives des jours suivants cette photographie ont permis une fonte suffisante pour ne plus avoir que quelques névés visibles sur la photographie du 09/07/2018 (figure II.15). Les acquisitions entre le 30/10/2017 et 09/07/2018 n'ont donc pas été sélectionnées. Avec une telle approche et en supprimant l'acquisition du 12/09/2017 du fait des chutes de neige (section 2.3.4), 27 images descendantes de Sentinel-1 ont été utilisées.

4.2 Stratégie multi-temporelle

L'application d'une approche PS multi-références (section 1.4.5) a été proposée en intégrant l'utilisation de coins réflecteurs. D'après les résultats d'analyse de stabilité de la réponse des 4 CR disponibles sur la période 2017/2018, le CR4 semble être un bon choix de point de référence, tandis que les 3 autres offrent la possibilité de réaliser des mesures précises d'après les estimations d'erreur de phase. L'analyse de déformation proposée est basée sur l'utilisation du module IPTA (Werner et al., 2003) de l'outil GAMMA.

L'utilisation d'une approche multi-références doit permettre de réduire les problèmes de décorrélation rencontrés dans les milieux naturels, qui plus est dans des terrains de haute montagne où les changements de surface sont nombreux et potentiellement rapides (section 1.1). La stratégie proposée consiste à minimiser les composantes de phase de déformation et de bruit en choisissant des paires d'images avec des intervalles de temps réduits et en incluant des observations redondantes (Werner et al., 2012), ce qui a pour effet de rendre les régressions plus robustes. Avec une telle approche il est également plus aisé de différencier le signal de déformation du signal atmosphérique (voir section 1.4.4). L'approche proposée est de sélectionner dans un premier temps toutes les paires avec des lignes de base temporelles inférieures ou égales à 18 jours. Appliquée aux données Sentinel-1 acquises tous les 6 jours, cette approche fournit les paires suivantes : *date 1 – date 2*, *date 1 – date 3*, *date 1 – date 4*, *date 2 – date 3*, *date 2 – date 4*, *date 2 – date 5*, etc. Sans autre contrainte sur la ligne de base perpendiculaire, cela représente 68 couples interférométriques.

Les composantes de phase orbitale et topographique peuvent elles aussi être réduites afin de faciliter l'estimation de la composante de déplacement. Pour cela, il a été choisi d'utiliser les fichiers orbitaux les plus précis possible, à savoir les fichiers POEORB (voir section 1.3.4). Dans un tel milieu où les diffuseurs peuvent présenter une géométrie complexe (section 1.5.3), seules les lignes de base perpendiculaires inférieures à 100 mètres ont été conservées. De plus, un des objectifs de cette étude étant de réduire les incertitudes sur les estimations de hauteur des PS, les lignes de base inférieure à 20 m n'ont pas été considérées, pour les raisons expliquées dans la section 3.3. Cela permet de disposer d'un total de 35 paires d'images. Enfin, le site présente une grande variété de reliefs, avec un dénivelé d'environ 1300 m entre le point le plus haut et le point le plus bas, où 50% des pentes sont comprises entre 30 et 50 degrés. Afin de réduire la composante topographique résiduelle de la phase interférométrique, l'approche proposée se base sur l'utilisation d'un MNT précis, à savoir le MNT de résolution spatiale de 5 m fourni par l'IGN. A noter que ce MNT a été ré-échantillonné sur les zones montagneuses, la résolution native est donc plus grossière mais reste meilleure que celle obtenue avec le MNT SRTM couramment

utilisé pour les traitements InSAR.

4.3 Chaîne de traitement

i Sélection des cibles ponctuelles

La première étape de la chaîne de traitement correspond à la sélection des potentielles cibles ponctuelles, cibles désignées grossièrement sous le terme PS. Il a été montré précédemment dans la section 1.5 que les méthodes de dispersion d'amplitude et de corrélation spectrale peuvent être toutes les deux appliquées aux suivis en milieu naturel. La difficulté étant de choisir les seuils optimaux permettant de sélectionner le maximum de diffuseurs possibles, dont les pixels correspondant ne sont pas ou peu affectés par du speckle. L'approche proposée consiste à joindre les listes de pixels sélectionnés par ces deux méthodes afin de disposer la densité la plus importante possible. Une première liste sera obtenue à partir du critère de stabilité de l'amplitude tandis qu'une deuxième sera obtenue en imposant un seuil sur la moyenne temporelle du coefficient de corrélation spectrale calculé pour chaque pixel de la zone étudiée afin de prendre en compte la variabilité temporelle au sein de la série temporelle. Le site d'étude étant fortement soumis à la décorrélation, il a été choisi de ne pas considérer les diffuseurs type DS afin de limiter le plus possible la présence de bruit dans les résultats.

Le premier critère de validation de cette méthode de sélection de diffuseurs est la détection des 4 coins réflecteurs dont on connaît la visibilité sur la période observée. Le second critère de validation utilise la connaissance du site test en comparant les densités relatives de points obtenus par secteurs (secteurs glaciaires, végétalisées, affleurements rocheux, etc.) par rapport à celles auxquelles on peut s'attendre. D'après les résultats obtenus avec TerraSAR-X sur un glacier (Sanjuan-Ferrer et al., 2010) et sachant que les données Sentinel-1 ont une résolution inférieure, on peut s'attendre à une faible densité de points sur le glacier d'Argentière. Connaissant les zones dans lesquelles se trouvent préférentiellement les débris charriés par ce dernier, il est également possible de relier les pixels sélectionnés à la présence de ces objets à la surface du glacier (zones grises de la figure II.11). Comparés aux secteurs glaciaires, on s'attend à obtenir des densités de points plus importantes au niveau des secteurs bien imagés (sans zone d'ombre) dont la surface est dominée par des débris et bloc rocheux avec peu de végétation.

La validation proposée est qualitative, ce qui peut entraîner la sélection de fausses alarmes. Cependant, les traitements PS sous Gamma se font par réduction progressive du nombre de cibles potentielles à partir de l'estimation de l'écart-type de la phase (section 1.4.3), la présence limitée de fausses alarmes n'est donc pas préjudiciable. Si la sélection présente un trop grand nombre de fausses alarmes, alors la qualité des résultats s'effondrera et ne permettra pas de conserver une densité de points suffisante pour analyser l'ensemble du site test. Il en sera de même si la densité de points sélectionnés est trop faible. Ce sont donc les étapes en aval de la chaîne de traitement qui permettront de valider définitivement les choix de sélection des cibles ponctuelles potentielles.

ii Séparation des différentes composantes de phase

L'objectif des étapes succédant la sélection des cibles ponctuelles est de séparer le terme qui correspond à la composante de phase de déformation des autres termes de l'équation 1.4.1.i, dans le but d'estimer les vitesses de déformations qui affectent la zone étudiée. Pour se faire, des régressions sont réalisées pour estimer les dépendances temporelles et les dépendances sur la ligne de base perpendiculaire de la phase interférométrique. Dans l'approche proposée, au lieu de réaliser une régression 2D, on réalise 2 régressions 1D, d'abord en fonction du temps, ensuite en fonction de la ligne de base perpendiculaire. Ces régressions successives permettent d'estimer les corrections de hauteurs des PS, les vitesses de déformations linéaires et les phases résiduelles (phase atmosphériques, résidu orbital, bruit). En l'absence de connaissance a priori des déformations rencontrées, une alternative pour valider les résultats peut être de réaliser un suivi des erreurs d'estimations des autres composantes du signal. Dans l'approche proposée, un accent particulier est porté au suivi d'erreur d'estimation du signal topographique et est présenté dans la section 2.4.4.

Le délai atmosphérique étant une des sources d'erreurs possibles sur l'estimation de la correction de hauteur, il est proposé de réaliser une première estimation approximative de la composante atmosphérique avant d'estimer la composante topographique. La composante topographique est alors supprimée du signal interférométrique en estimant la correction de hauteur H des cibles sélectionnées et en simulant la phase liée à cette correction. Ensuite, le terme de phase issue de l'estimation grossière de la composante atmosphérique est réintégré au signal interférométrique corrigé avant de réaliser une nouvelle estimation. Les composantes de l'atmosphère stratifié et turbulent sont alors estimées en ne considérant que les zones dépourvues de déformations rapides. Quant à la composante de phase orbitale, supposée limitée du fait des très petites bases spatiales et de l'utilisation des vecteurs orbitaux très précis, celle-ci se retrouve dans les phases résiduelles des différentes régressions réalisées. La série temporelle de phase est calculée par décomposition en valeurs singulières (SVD) pour convertir la phase déroulée de la pile multi-références en série temporelle mono-référence (voir les sections 1.4.4 et 1.4.5). Lors de l'inversion, l'algorithme utilisé dans le module IPTA permet d'estimer conjointement la série temporelle de la phase de déformation et une correction de la hauteur (section 1.4.4), en ajoutant dans la matrice relationnelle entre les interférogrammes et les dates d'acquisition une colonne supplémentaire correspondant aux dérivées de la phase observée par rapport à la hauteur, proportionnelles à la ligne de base perpendiculaire (Werner et al., 2012).

iii Discontinuité dans le réseau d'interférogrammes

Le choix d'une ligne de base temporelle maximale de 18 jours réduit fortement le bruit de phase et facilite la distinction entre la composante de phase atmosphérique (identifiable par des taux de variations de phase rapide) et la composante de phase de déformation (supposée faible sur des temps d'observation réduits). Cependant, cela provoque une discontinuité dans le réseau d'interférogrammes, se traduisant par trois périodes d'observation non connectées (voir figure II.18). L'algorithme utilisé dans une approche SB ou PS multi-références sous GAMMA

permet de relier des sous-réseaux d'interférogrammes en utilisant un facteur de lissage γ (voir section 1.4.4).

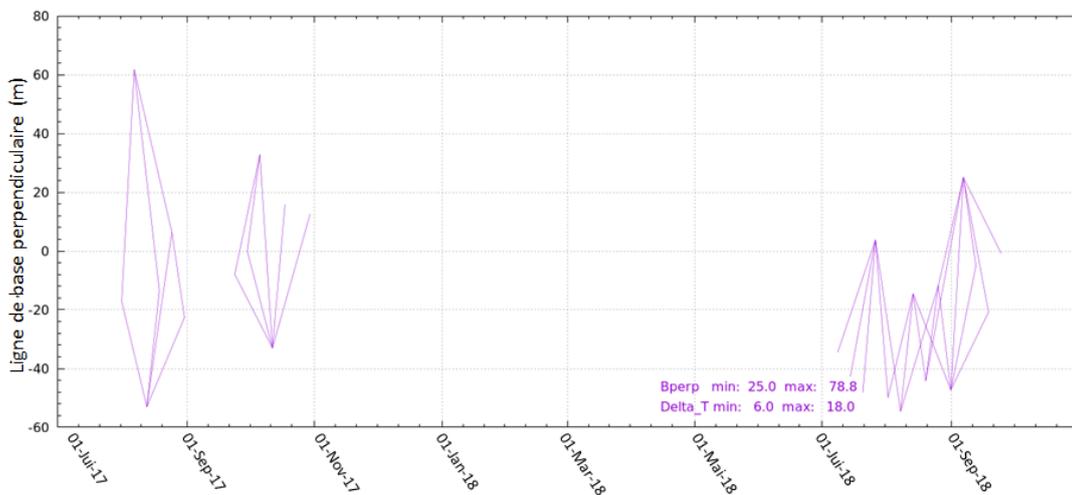


FIGURE II.18 – Représentation des lignes de base spatiales (perpendiculaires) et temporelles réparties en trois sous-réseaux d'interférogrammes..

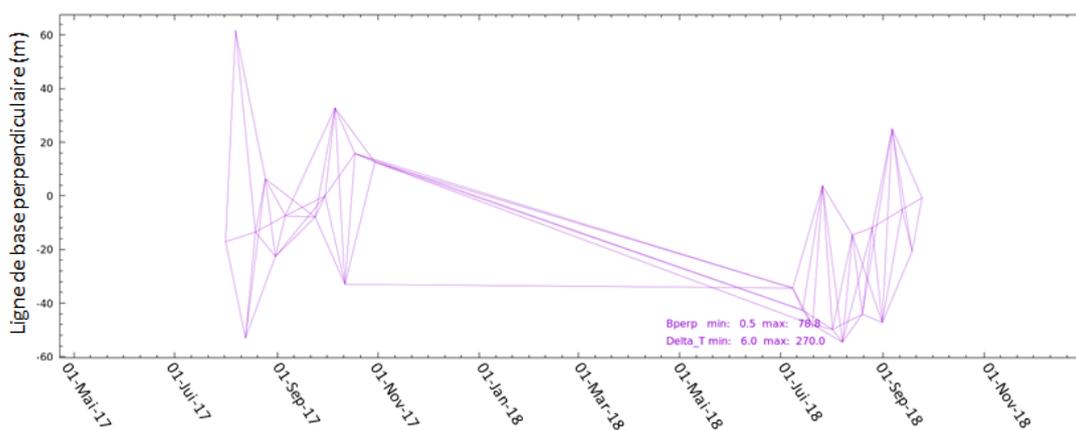


FIGURE II.19 – Représentation des lignes de base spatiales (perpendiculaires) et temporelles réparties d'un réseau continu d'interférogrammes..

L'hypothèse faite pour appliquer un facteur de lissage est que les déformations n'évoluent pas de façon discontinue pendant l'intervalle de temps non connecté. Or cette hypothèse n'est pas nécessairement réaliste en zone montagneuse où des déplacements importants peuvent être rencontrés lors des périodes les plus chaudes de l'année (Ravel et al., 2014). De plus, les mécanismes de déformation rencontrés en zone périglaciaire étant complexes, il est difficile d'émettre des hypothèses précises sans connaissance a priori de mouvements rencontrés. Dans le cas où les déformations que l'on pourrait rencontrer sur le site test sont dues à un phénomène de déstabilisations des sols sous l'effet de l'augmentation de la température, on peut émettre l'hypothèse que les éventuelles vitesses de déplacement de ces secteurs instables sont moindres en période hivernale qu'en période estivale. Or l'intervalle non connecté correspondant à la période où les sols du site d'étude sont recouverts par une couverture neigeuse. Une première hypothèse peut être de minimiser les déplacements lors de cette période sans appliquer de facteur de lissage. Cela correspond à la partie de la chaîne de traitement encadrée en noir sur la figure II.20. Il est

également possible que les instabilités rencontrées sur le site test ne soient pas directement liées à l'évolution de la température. Le raccordement de la série temporelle de déplacement entre les deux sous-réseaux peut être réalisé en considérant les vitesses de déplacement comme étant continues. Une autre hypothèse est qu'il existe bel et bien des déformations non négligeables pendant la période sans observation et que les déformations évoluent de façon discontinue. Pour cela, une troisième approche a été testée pour estimer les déplacements en considérant les interférogrammes reliant les 3 dernières acquisitions du sous-réseau de 2017 aux 3 premières acquisitions du sous-réseau de 2018. Ces interférogrammes supplémentaires de 252 à 270 jours d'intervalles ayant un niveau de bruit plus élevé, il a été choisi de ne pas imposer de contraintes sur la ligne base minimale afin de profiter d'une meilleure redondance de l'information et ainsi de minimiser les erreurs d'estimation sur l'évolution temporelle de la déformation dues à la décorrélation (voir section 1.4.4). Cela permet de disposer de 74 interférogrammes au total. A condition que l'estimation de la correction topographique à partir des 35 interférogrammes non bruité soit validée, cette dernière peut être utilisée pour corriger la phase interférométrique du nouveau réseau d'interférogrammes. Cela correspond à la partie de la chaîne de traitement encadrée en rouge sur la figure II.20.

iv Description de la chaîne de traitement

Dans la figure II.20, le terme Φ_{diff} correspond à la phase interférométrique différentielle, Φ_{unw} à la phase déroulée de la pile multi-références, $\Phi_{unw_{corr}}$ à la phase déroulée corrigée et $\Phi_{unw_{mono}}$ à la phase déroulée mono-référence. Φ_{res} décrit la phase résiduelle issue de la régression appliquée à la phase interférométrique, $\Phi_{atm_{i-j}}$ correspond à l'estimation initiale de composante de phase atmosphérique à l'itération j et $\Phi_{atm_{i-tot}}$ à la somme des itérations, H la correction de hauteur et ΦH la phase simulée de H . Le terme "hauteur absolue" Hps_{ABS} désigne la hauteur d'un PS obtenue à partir du MNT Hps , à laquelle est ajoutée la correction H estimée lors du traitement PS ($Hps = Hmnt + H$) et qui ensuite est corrigée de l'écart existant Δh_{ref} entre la hauteur du PS de référence (CR4) et sa hauteur réelle mesurée à partir de mesures terrestres. De même, le terme "hauteur absolue corrigée" Hps_{ABS}^{corr} désigne la hauteur absolue d'un PS dont les effets de l'atmosphérique stratifié ont été compensés ($Hps_{ABS}^{corr} = Hps_{ABS} + H_{corr}$) par régression linéaire pondérée dont les résultats sont présentés dans la section 3.3. Enfin V_{phase} est utilisée pour décrire la vitesse de phase estimée en *radians/an*. Les régressions effectuées pour rechercher les dépendances en temps et ligne de base perpendiculaire de la phase interférométrique et estimer les corrections de hauteur, les vitesses de déformations ainsi que les phases résiduelles, se basent sur l'utilisation de modèle 1D ou 2D. Les modèles présentés ici sont uniquement 1D. Ainsi les termes $\delta_t[i]$ et $b_{perp}[i]$ des modèles utilisés décrivent l'intervalle de temps et la ligne de base perpendiculaire du couple i .

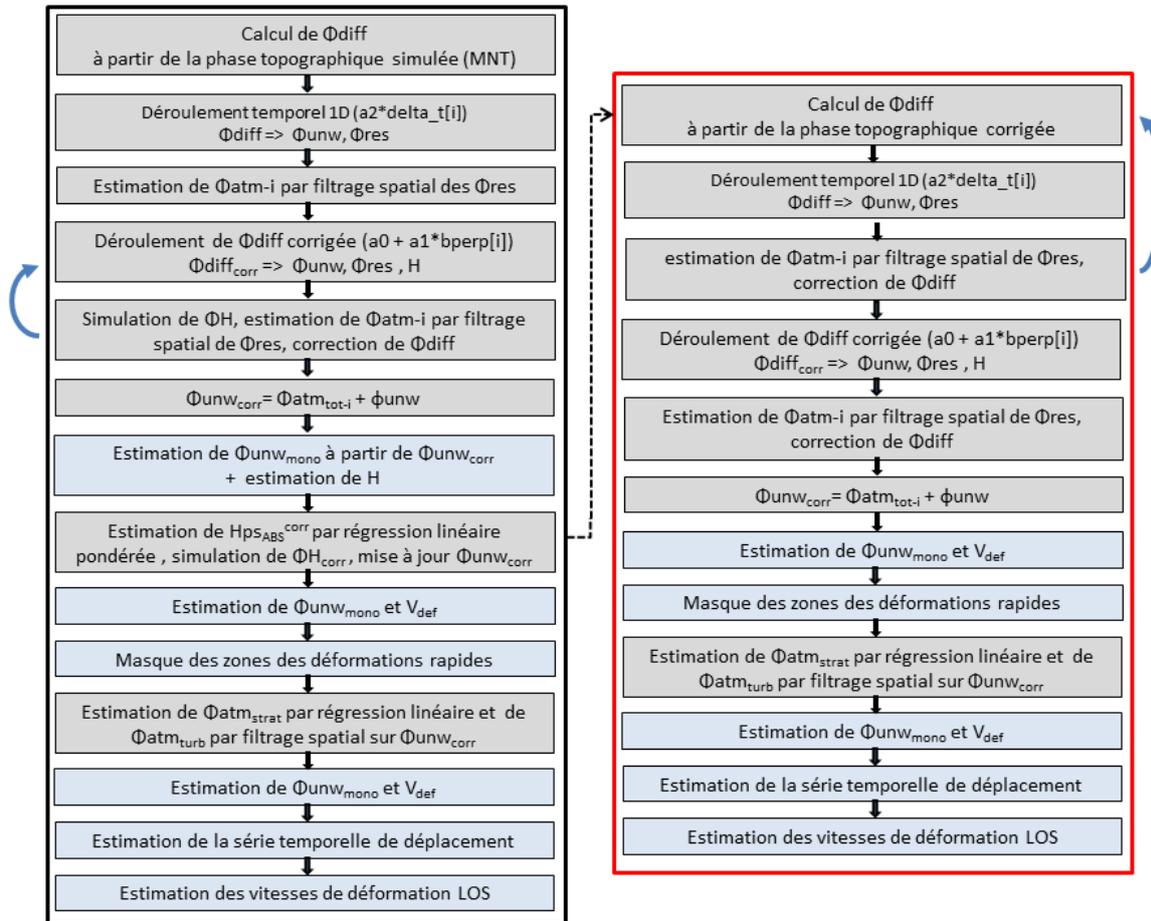


FIGURE II.20 – Chaîne de traitement IPTA proposée pour le suivi des instabilités du site test d’Argentière. La flèche bleue indique que le processus est effectué de manière itérative. Les cases grisées décrivent les étapes réalisés sur une pile multi-références et les cases bleutées celles réalisées sur une pile mono-référence. Encadré rouge : traitements réalisés sur la pile de 35 interférogrammes. Encadré noir : traitements réalisés sur la pile de 74 interférogrammes.

4.4 Suivi de l’erreur topographique

Dans ce suivi d’instabilités, une attention particulière est portée à la correction de hauteur des PS. Les hauteurs "estimées corrigées" des PS liées aux CR sont comparées à des mesures terrestres précises. Les mesures terrestres sont obtenues à partir d’une station totale et d’un réseau de 4 GPS servant de points de contrôle au terme de 12 heures d’acquisition. Un GPS a été utilisé comme base de référence locale en contrebas dans la vallée et trois autres ont servi de points de contrôle pour la station totale (voir figure II.21), afin de mesurer les positions relatives des CR par rapport au réseau GPS. Cependant, en raison d’une différence d’altitude importante (jusqu’à 1100 m) entre le GPS servant de référence locale dans la vallée et les 3 autres GPS installés sur le site d’expérimentation, la précision de l’estimation de la hauteur des CR est estimée entre 10 et 20 cm. Les hauteurs des autres PS (les PS naturels) sont comparées aux hauteurs d’un MNT LiDAR¹ qui a été acquis en juin 2015 avec une résolution de 2 m. Sachant que la pente moyenne du site test est de 31 degrés, l’erreur moyenne attendue est inférieure à 60cm

1. Le MNT LiDAR du Glacier d’Argentière a été acquis dans le cadre du projet European Facility for Airborne Research Transnational Access (EUFAR TA, EU FP7 Integrating Activity) – project ISOTHERM (Ice, Snow vegetation HypERSpectral Measurements) dirigé par Antoine Rabatel (Univ. Grenoble Alpes, I.G.E.)

(section 1.2.1). En considérant que même avec un MNT sans erreur, les hauteurs initialement extraites de chaque PS ne peuvent pas être exactes, puisque elles résultent d'une interpolation d'une grille régulière (MNT) vers une grille irrégulière (carte de hauteur) en géométrie radar avec une moyenne spatiale, avec la même fenêtre que celle utilisée lors de l'étape de recalage de la pile d'image SAR. Donc, en tenant compte du fait que les hauteurs initiales proviennent d'un MNT au pas de 5 m, mais suréchantillonné dans les zones montagneuses à partir d'une résolution plus grossière, et que ces hauteurs ont subi une interpolation pour être converties en géométrie radar, on peut raisonnablement considérer le MNT LiDAR comme une vérité terrain. Sachant que les CR ont une SER élevée (Parker et al., 2017), on s'attend à ce que l'estimation de la hauteur soit meilleure sur les CR que sur les autres PS ayant une SER inférieure (équation 1.5.3).

Afin de comparer la hauteur du PS obtenue à la suite du traitement et celle du MNT LiDAR, il est nécessaire d'extraire la valeur de ce dernier à partir de la position du PS. Or une erreur d'estimation de hauteur entraîne une erreur d'estimation de la position du PS, ce qui conditionne la valeur extraite du MNT LiDAR. Ainsi, la valeur de la différence entre la hauteur PS et la hauteur LiDAR ne représente pas exactement l'erreur de hauteur du PS. Il est alors intéressant de compléter l'analyse de l'erreur de topographique par une réflexion sur l'erreur de positionnement absolue. Puisque la position 3D des CR a été mesurée précisément, il est possible d'analyser l'erreur de positionnement absolue et de dissocier erreur de hauteur et erreur de position. Pour les autres PS, seules les hauteurs des PS dont la position sub-pixellique a pu être estimée, ont été comparées aux valeurs du MNT LiDAR. Enfin, pour limiter les erreurs de positionnement, toutes les données (résultat PS, MNT LiDAR, mesures GPS/station totales) ont été comparées dans un même système de référence, le système Lambert 93. L'uniformisation des systèmes et les conversions altitude/hauteur ellipsoïdale ont été effectuées à partir du logiciel Circé de l'IGN.

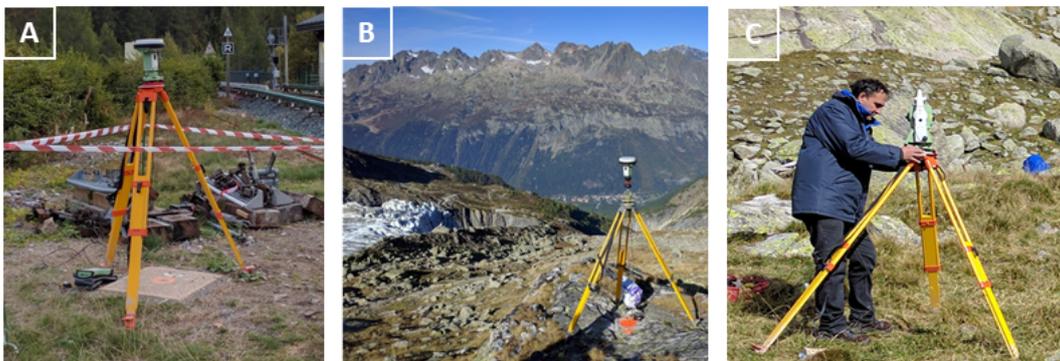


FIGURE II.21 – Système permettant d'estimer précisément la position (latitude, longitude, altitude) des coins réflecteurs à partir d'une base GPS, de trois GPS différentiel et d'une station totale. A) Base GPS installée à proximité de la voie ferrée au niveau de la commune de Montroc sur le point du réseau RENAG. B) Un des 3 GPS différentiels équipés d'une batterie externe pour effectuer des mesures pendant 12 heures. C) Réglage de la station totale permettant de mesurer les positions relatives des CR aux points de contrôle.

III Résultats expérimentaux d'intégration de CR dans une approche PS

Dans cette section, les résultats obtenus à partir de la chaîne de traitement proposée dans la section 2.4 sont présentés et analysés. Les listes de cibles potentielles sélectionnées à partir des méthodes de dispersion d'amplitude et de corrélation spectrale sont comparées. Un suivi de l'erreur sur l'estimation de la hauteur des PS (CR et PS naturels) et un suivi de l'erreur de positionnement absolu des CR sont également présentés. Enfin les zones d'instabilités sont répertoriées et analysées au regard des caractéristiques du site test.

1 Analyse des interférogrammes

Une première approche pour estimer la stabilité de la surface d'un site, avant d'estimer les vitesses de déplacement des cibles ponctuelles sélectionnées, peut-être d'analyser les interférogrammes différentielles sur la période d'observation souhaitée. Cette analyse qualitative peut être intéressante lorsqu'on ne dispose pas d'information a priori sur la présence ou non de déformation. Il est possible d'identifier des franges interférométriques qui, selon leur localisation et leur forme, peuvent renseigner sur l'origine des variations de phase entre deux acquisitions radar (délai atmosphérique, phase résiduelle topographique ou orbitale, composante de phase de déplacement). Ainsi la répétition d'un motif particulier dans une même zone peut être assimilée, selon certaines conditions, à un signal de déformation. Cette interprétation peut être délicate dans les zones de fortes pentes, où les franges peuvent être aussi bien dues à une erreur de MNT qu'à des mouvements gravitaires. En associant cette analyse de franges à celle de la cohérence, il est possible d'établir un premier constat sur la stabilité relative de la scène observée et sur la présence plus ou moins importante des perturbations du signal interférométrique (décorrélation, délai atmosphérique, etc.). Cela peut permettre d'adapter la chaîne de traitement aux spécificités du lieu étudié et d'avoir un regard critique sur les résultats obtenus en fin de chaîne de traitement.

Dans le cas du site d'Argentière, l'ensemble des interférogrammes différentiels des couples présentés dans la section 2.4.2 a été analysé en masquant les secteurs affectés par une forte décorrélation (voir figure II.22) à partir d'un seuil sur la cohérence fixé à 0,8. Cette analyse a été complétée par l'étude d'interférogrammes choisis arbitrairement, tel que le couple 01/08/2017-25/09/2018 (voir figure II.22.b) qui couvre l'ensemble de l'étude et le couple 30/08/2015-30/09/2017 (voir figure II.22.c) qui couvrent les deux années précédant l'étude PS. L'analyse des interférogrammes a été faite en agrandissant l'échelle d'observation, passant de 6 km^2 (surface de la zone d'étude) à 60 km^2 . Cela permet de couvrir une plus grande variété d'altitudes (de la vallée aux hautes altitudes) et de surfaces et de mieux appréhender les échelles des motifs de franges.

L'analyse comparative des figures II.22.a) et b) montre que les parties masquées (cohérence inférieure à 0,8) correspondent majoritairement aux glaciers et aux zones boisées. La présence de franges interférométriques semble liée à la variation d'altitude, ce qui tend à mettre en évidence la présence d'un délai atmosphérique dans la phase interférométrique ou des erreurs de MNT. Hormis la zone encerclée en rouge dans le secteur Est et dans les parties basses en bord de glacier dans le secteur Ouest, la cohérence est supérieure à 0,8 sur l'ensemble de la zone d'étude de 6 km^2 . A priori, il n'y a pas eu d'événements susceptibles d'engendrer une forte décorrélation aux cours des 420 jours (éboulements, glissements de terrain, etc.). Pour l'interférogramme à deux ans (figure II.22.c), la différence de phase entre ces deux acquisitions apparaît relativement

stable (peu de variation à cette échelle d'observation) et la cohérence se maintient sur le site d'étude malgré une ligne de base temporelle supérieure à deux ans. Un motif de frange semble se distinguer à proximité des secteurs 2 et 3 de la figure II.9. La phase interférométrique du couple à 30 jours (figure II.22.d) présente un motif de frange au niveau du secteur encerclé en rouge, où la cohérence est supérieure à 0,8 sur cet intervalle de temps. La cohérence est supérieure à 0,8 au-dessus de 2000-2100m, correspondant à la limite entre la forêt et la végétation rase (pelouse alpine). On note également que la cohérence est inférieure à 0,8 sur certaines parties de la moraine du glacier des Rognons. L'analyse de l'interférogramme à 6 jours (figure II.22.e) montre une forte cohérence sur l'ensemble du site test, où celle-ci est maintenue au-dessus de 0,8 jusqu'à 1800-2000 m d'altitude, et une phase interférométrique relativement constante sur la partie Est de la zone d'étude. Enfin, le même motif observé sur la partie Ouest dans c) et d) apparaît sur l'intervalle à 270 jours (figure II.22.f) couvrant l'intégralité de la saison hivernale 2017/2018. Le secteur précédemment identifié ne présente pas une cohérence supérieure à 0,8.

Le maintien de la cohérence au-dessus du seuil de 0,8 pendant un intervalle de 6 jours et non pendant un intervalle de 270 jours dans le secteur précédemment identifié de la partie Est confirme l'intérêt d'utiliser des lignes de bases temporelles réduites sur ce site d'étude. De plus, la perte de cohérence observée sur la moraine du glacier des Rognons) à 30 jours insiste à utiliser des intervalles encore plus courts pour être en mesure de conserver le maximum de diffuseurs lors du traitement PS. Ce haut niveau de cohérence est un nouvel indicateur montrant le potentiel de faisabilité d'un suivi PS sur un tel site. Le deuxième enseignement de cette analyse est que les instabilités sur le site d'étude semblent limitées, au regard de l'absence de cycle complet de franges interférométriques, ce qui montre que les éventuelles déformations ne dépassent pas les 2,8 cm ($\lambda/2$) sur les périodes analysées.

Enfin, l'analyse de l'ensemble des interférogrammes sélectionnés pour l'étude PS montre une importante variabilité de formes et d'échelles de motifs dans les 60 km^2 de la scène observée. De nombreux motifs semblent être associés aux délais atmosphériques, parfois reliés à l'altitude (atmosphère stratifiée dominante) parfois plus disparates (atmosphère turbulente dominante). L'approche classique qui consiste à filtrer l'atmosphère avec un filtre passe-haut spatial et passe-bas temporel ne peut pas être suffisante pour supprimer l'intégralité des délais atmosphériques du signal interférométrique (Darvishi et al., 2018). Une régression linéaire par rapport à l'altitude est donc utilisée pour supprimer les effets de l'atmosphère stratifié (voir section 2.4.3). A noter qu'aucune donnée externe (MODIS, MERIS, ERA, etc...) n'a été utilisée pour modéliser la phase atmosphérique turbulente. En revanche, la phase interférométrique étant relativement stable spatialement à proximité des coins réflecteurs (corrélation spatiale importante), mais instable temporellement (corrélation temporelle faible, voir figures II.22. b à f)), les CR peuvent être utilisés pour valider le filtrage et la régression linéaire effectués pour atténuer le délai atmosphérique.

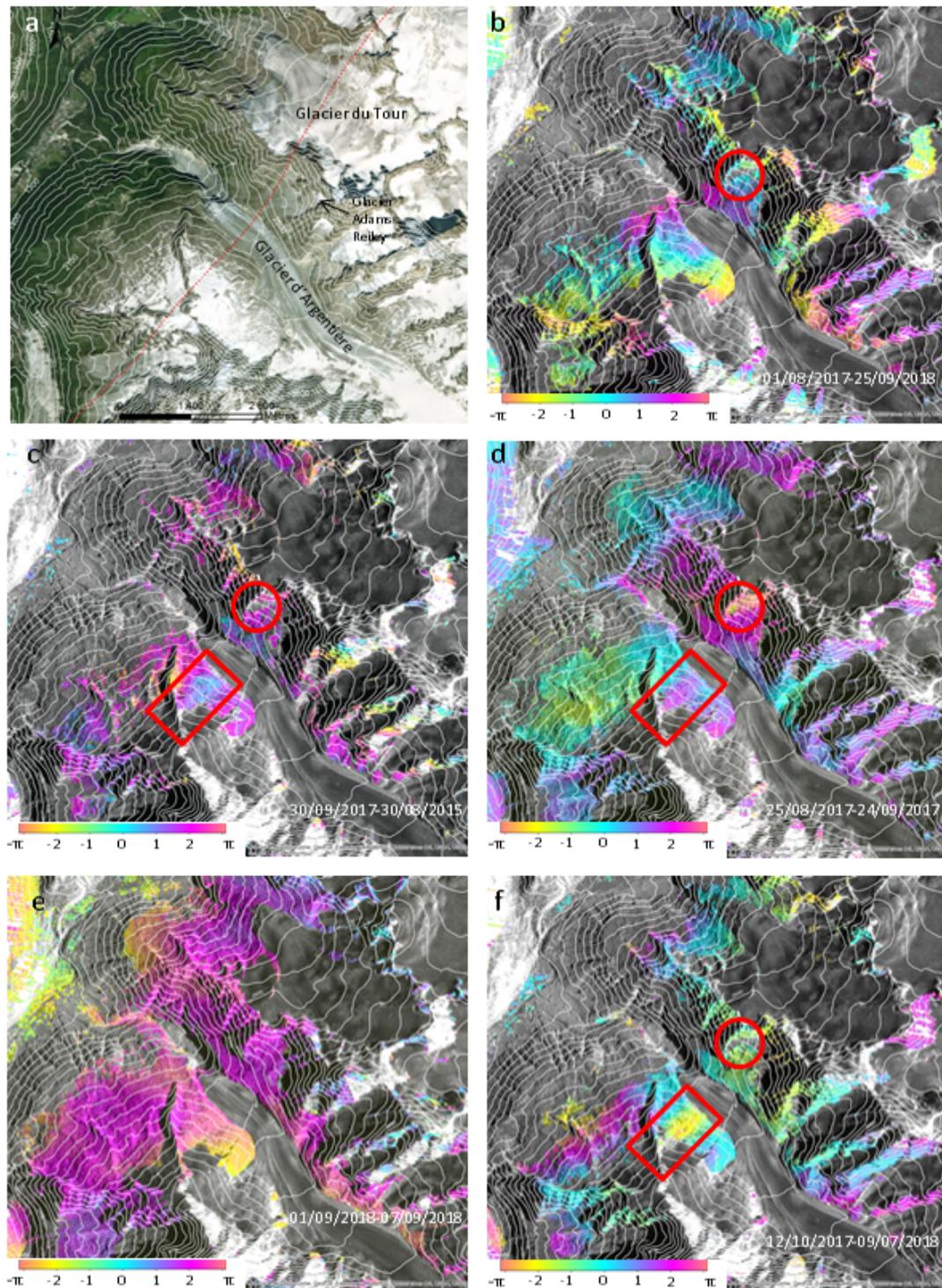


FIGURE II.22 – Analyse des interférogrammes Sentinel-1 centrés sur la zone d'étude. a) Image optique WorldView-3 (résolution 31 cm) acquise le 02/07/2015. Le tracé rouge indique la localisation de la faille de l'Angle. Les lignes blanches représentent les courbes de niveau obtenues à partir d'un MNT de 5 m de résolution. b) Interférogramme différentiel à 420 jours du couple 01/08/2017-25/09/2018. c) Interférogramme différentiel à 763 jours du couple 30/09/2017-30/08/2015. d) Interférogramme différentiel à 30 jours du couple 25/08/2017-24/09/2017. e) Interférogramme différentiel à 6 jours du couple 01/09/2018-07/09/2018. f) Interférogramme différentiel à 270 jours du couple 12/10/2017-09/07/2018.

2 Sélection des potentielles cibles ponctuelles

Plusieurs essais de sélection de cibles ponctuelles ont été réalisés à partir de différents seuils sur l'indice de dispersion d'amplitude et sur le coefficient de corrélation spectrale (section 2.4.3), dont certains résultats caractéristiques sont présentés dans la figure II.23. La liste des cibles potentielles doit permettre de réaliser un suivi de déformation à la fois sur les parties Est et Ouest du site test. Le risque avec un tel objectif est qu'il n'ait pas de cibles sélectionnées entre les deux zones séparées par le glacier d'Argentière (figure II.8), ce qui aurait pour effet d'augmenter le risque d'erreur de déroulement de phase. C'est par exemple ce qui est observé sur la sélection A obtenue avec un indice de dispersion d'amplitude fixé à 0.4 (voir figure II.15.A). Avec un tel seuil, seulement 523 pixels sont sélectionnés, parmi lesquels ne figure pas le pixel correspondant à CR1. Les 4 CR n'étant pas tous sélectionnés, le premier critère de validation défini dans la section 2.4.3 n'est pas respecté.

Il est nécessaire de choisir un seuil moins restrictif, au risque de sélectionner des pixels affectés par du speckle. Avec un seuil à 0.67, 14702 cibles potentielles sont sélectionnées dans la liste B, comprenant l'ensemble des CR disponibles (voir figure II.15.B). Cela permet également de sélectionner quelques cibles sur le glacier d'Argentière et en aval de la chute de séracs (figure II.7) où le socle rocheux apparaît directement à l'affleurement, permettant ainsi de connecter les parties Est et Ouest du site test. Les secteurs sans pixel ou avec très peu de pixels sélectionnés correspondent aux zones d'ombre et aux zones glaciaires. On remarque que la densité de candidats PS est plus importante dans le secteur Ouest, ce qui s'explique par une meilleure visibilité radar (orientation des pentes par rapport à la ligne de visée) mais aussi par le fait que la végétation est plus présente dans le secteur Est que dans le secteur Ouest.

Les tests ont été complétés par l'utilisation de différents seuils sur le coefficient de corrélation C et sur le rapport RME de la méthode de corrélation spectrale. Il a ainsi été possible de détecter 8893 diffuseurs cohérents dans la liste C avec un seuil sur C égal à 0.35 et sur le RME égal à 0.5 (figure II.15.C). Les paramètres utilisés pour ce test permettent de sélectionner tous les pixels correspondant aux CR mais avec une baisse de 40% sur le nombre total de pixel sélectionnés. Lorsque cette liste est utilisée dans les étapes suivantes de la chaîne de traitement, les pixels sélectionnés dans la partie Ouest ne sont pas conservés. La distance trop importante entre les différents pixels entraînent une augmentation de l'écart-type des résultats des différentes régressions, ce qui conduit à leur suppression.

Afin de disposer d'une densité de cibles suffisantes pour les premières étapes du traitement, les deux listes B et C ont été unies, permettant de sélectionner 18479 cibles potentielles (voir figure II.15.D). En comparant le nombre de cibles candidates des listes B et C, il est possible de dire que le seuil utilisé sur l'indice de dispersion de la liste B est moins restrictif que celui utilisé pour la liste C. Malgré cela, 3777 pixels ont été sélectionnés dans la liste C et ne l'ont pas été dans la liste B. Bien qu'ayant une stabilité d'amplitude de réponse radar moindre, ces pixels peuvent potentiellement être dominés par la réponse d'une cible ponctuelle et permettre de réaliser avec succès un suivi de déplacement (section 1.5.2). A noter que l'intersection des deux listes B et C se traduit par la sélection de 5116 cibles (voir figure II.15.E) et l'utilisation de cette liste mène à résultat comparable à celui obtenu avec la liste C. La suite des traitements est réalisée à partir de la liste D.

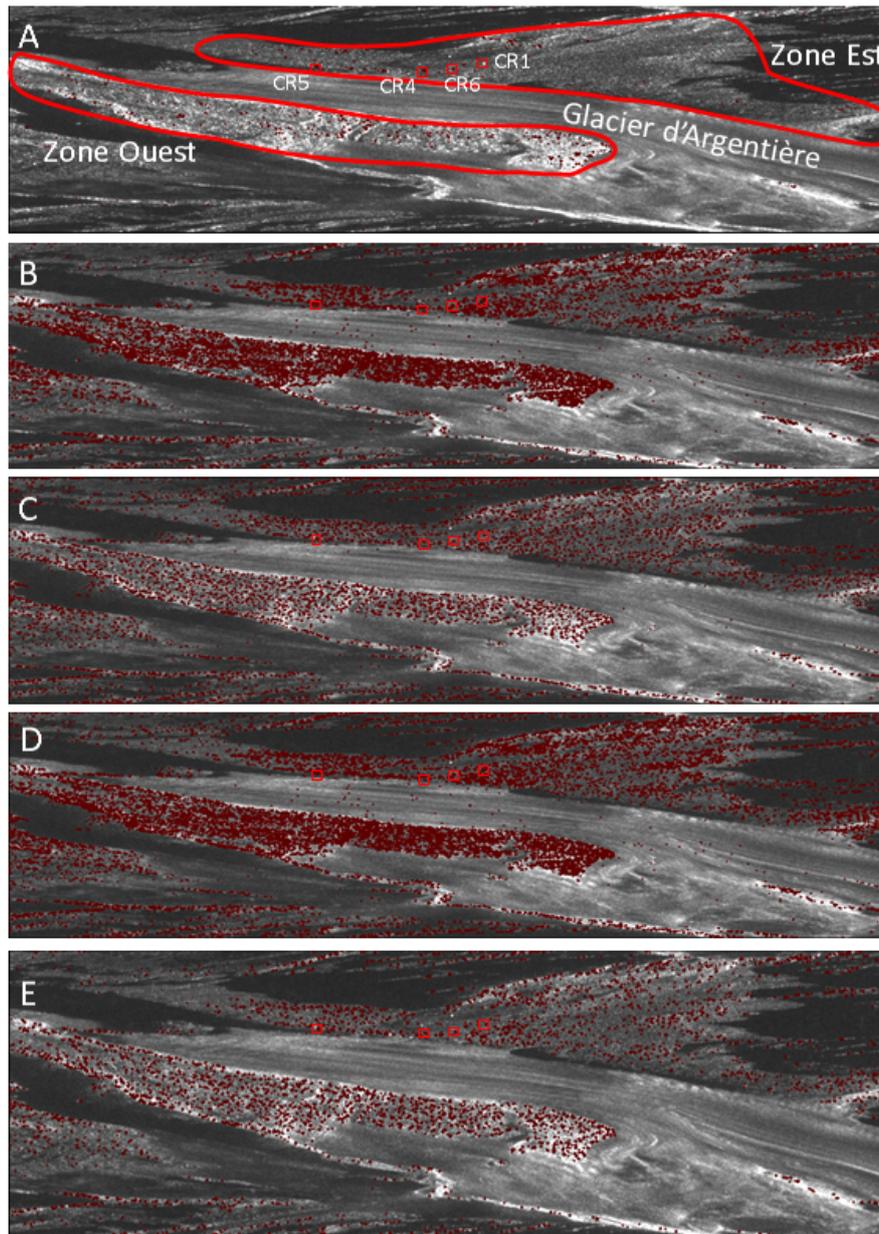


FIGURE II.23 – Résultat des différentes méthodes de sélection des potentielles cibles ponctuelles. Les points rouges correspondant aux pixels sélectionnés et les carrés rouges au 4 CR utilisables sur la période suivie. Les zones Est et Ouest du site test sont entourées en rouge. A) Résultat de la sélection par la méthode de la dispersion d'amplitude ($D_a = 0.4$). B) Résultat de la sélection par la méthode de la dispersion d'amplitude ($D_a = 0.67$). C) Résultat de la sélection par la méthode de la corrélation spectrale ($C = 0.35$ et $RME = 0.5$). D) Cibles présentes dans l'union des listes B et C. E) Cibles présentes dans l'intersection dans les listes B et C.

3 Précision de la correction topographique et de la localisation absolue

Suite à l'étape de sélection des cibles ponctuelles potentielles, la composante de phase du délai atmosphérique a été estimée, suivi par la composante de phase topographique résiduelle (voir figure II.20). Avec cette approche (appelée approche séquentielle dans le tableau II.5),

l'erreur moyenne de correction topographique est de 8,5 m avec un écart-type de 12,3 m. En comparaison, un test a été effectué en estimant simultanément les composantes de la phase atmosphérique et topographique résiduelle (appelée approche simultanée dans le tableau II.5), donnant des résultats avec une erreur moyenne de -19,5 m et un écart-type de 24,3 m. Cela traduit les effets du délai atmosphérique résiduel sur l'estimation de la correction de hauteur décrit dans l'équation 1.5.3.

Hormis les effets atmosphériques, l'équation 1.5.3 montre que l'erreur de correction de hauteur dépend aussi de la distribution des lignes de base utilisées. Bien que cette équation soit une estimation de l'erreur sur H dans une approche mono-référence, il semble intéressant de comparer les erreurs attendues pour une stratégie mono-référence avec celles obtenues pour une stratégie multi-références. Dans le cas présent, l'écart-type de la distribution des lignes de base est de 28,3 m en mono-référence alors qu'il est de 37,0 m en multi-références, en considérant l'ensemble des paires ayant une base spatiale perpendiculaire inférieure à 100 m, comme présenté dans la section 2.4.2. Après avoir testé plusieurs seuils sur la sélection de la ligne de base minimale et maximale, il apparaît que la moyenne et l'écart-type peuvent être maximisés à 43,99 et 48,3 m si les paires ayant une ligne de base inférieure à 20 m ne sont pas prises en compte. On passe alors de 62 à 35 paires d'images réparties sur 26 dates différentes (l'image de 06/09/2017 n'étant pas sélectionnée parmi les différentes paires). Si l'on s'en tient à l'équation 1.5.3, la stratégie multi-références et la sélection de paires utilisée dans cette étude sont supposées améliorer la précision de la correction de hauteur des PS.

Malgré le choix de la stratégie multi-références et une estimation initiale de la composante atmosphérique avant la composante topographique, on remarque qu'il existe une corrélation entre la valeur de l'estimation de la correction de hauteur d'un PS et la différence de hauteur entre le PS et le point de référence (voir figure II.24.a). Il existe aussi une corrélation entre la correction de hauteur d'un PS et la distance le séparant du point de référence, mais cette relation est moins marquée (figure II.25.a). Cette deuxième relation semble dérivée de la première puisque le CR de référence a été installé dans une partie basse du site test et dans une position relativement centrale, ce qui implique que plus on s'éloigne du point de référence et plus la différence de hauteur peut être importante. La relation linéaire entre différence de hauteur et estimation de la correction est calculée à partir d'une régression linéaire pondérée par un facteur d'incertitude *inc* relatif à la pente locale. Plus la pente est importante et plus l'impact d'une erreur de positionnement sur l'extraction des hauteurs du MNT d'origine est important. De même, plus la pente est importante et plus les incertitudes sur les valeurs d'un MNT (SRTM ou LiDAR) sont importantes. L'objectif étant de corriger les erreurs dues aux délais atmosphériques et non les erreurs de MNT et de positionnement, le facteur de pondération est défini ainsi :

$$inc = 1 - \frac{s}{100} \quad (\text{II.3})$$

L'analyse des erreurs de hauteur absolue des CR avant compensation des effets atmosphériques a montré que l'erreur moyenne quadratique est de 0,15 m (tableau II.5) sur CR1, CR5 et CR6. Or, d'après (Costantini et al., 2017), la précision de l'altitude PS de Sentinel-1 est d'environ 5 m. Ces résultats montrent que la précision peut être largement améliorée avec une approche spécifique sur des CR. L'estimation de la correction de hauteur ayant été réalisée avec

Étape du traitement	Différence de hauteur $Mean \pm \sigma$ (m)	Erreur moyenne quadratique sur les PS (m)	Erreur moyenne quadratique sur les CR (m)
Première itération (estimation atmosphère/hauteur simultanée)	-19.5 ± 24.3	31.1	11.01
Première itération (Approche séquentielle)	8.5 ± 12.3	14.98	2.58
Estimation finale (Approche séquentielle)	-3.0 ± 14.55	14.85	0.15

TABLE II.5 – Analyse des erreurs d'estimations de hauteur

succès sur la zone d'installation des CR, il a été choisi de n'appliquer la compensation des effets troposphériques qu'aux PS situés à une distance supérieure à 300 m et avec une différence de hauteur avec le CR de référence de plus de 100 m, pour ne pas dégrader les résultats. En reprenant les équations présentées dans la figure II.20, on a :

$$H_{ps_{ABS}}^{corr} = H_{mnt} + \Delta h_{ref} + H_c \quad (\text{II.4})$$

où H_{corr} est la correction de hauteur après suppression des erreurs troposphériques.

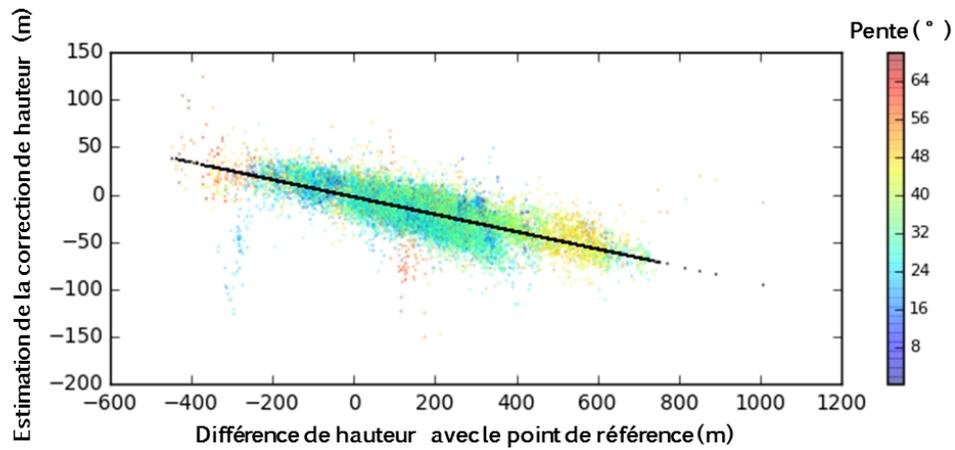
Les résultats de la correction de hauteur après suppression des erreurs troposphériques sont présentés dans les figures II.24.b et II.25.b. La correction moyenne obtenue est maintenant de -2,7 m ce qui semble plus raisonnable au regard de la précision du MNT d'origine. Deux zones présentent des corrections supérieures à 50 m, identifiées par des cercles bleus sur les figures II.24.b et II.25.b. Ces deux zones correspondent à des zones de falaises, l'une à proximité du refuge de Lognan à environ 1000 m du point de référence dans un secteur où les pentes sont relativement faibles, et l'autre dans un secteur à environ 1400 m du point de référence où les pentes sont supérieures à 50 degrés, appelée l'arête du Petit Belvédère. Hormis ces deux zones de falaises, les corrections apportées semblent acceptables. Afin de valider ces résultats, les hauteurs des PS dont la position sub-pixellique a pu être estimée sont comparées à celles du MNT LiDAR, donnant une erreur moyenne de -3.0 m (tableau II.5). La différence moyenne entre les hauteurs finales des PS et les hauteurs LiDAR a été réduite avec succès.

La précision de la position absolue a également été étudiée en calculant la différence avec les mesures GPS et terrestres (station totale), donnant une erreur moyenne quadratique de 0,83 m en 2D (distance horizontale) et de 0,84 m en 3D. En comparaison, (Dheenathayalan et al., 2018) a obtenu avec 44 images ENVISAT et deux CR 1 m, après une correction précise des différentes sources d'erreurs de localisation (décalage bistatique, retard de la phase atmosphérique, effets de marée terrestre, dérive du point de référence, etc.), une erreur moyenne quadratique de 0.42 m en 3D. Ainsi, avec moins d'images et sans correction complète des sources d'erreurs de localisation, les étapes du traitement semblent avoir été réalisées avec succès.

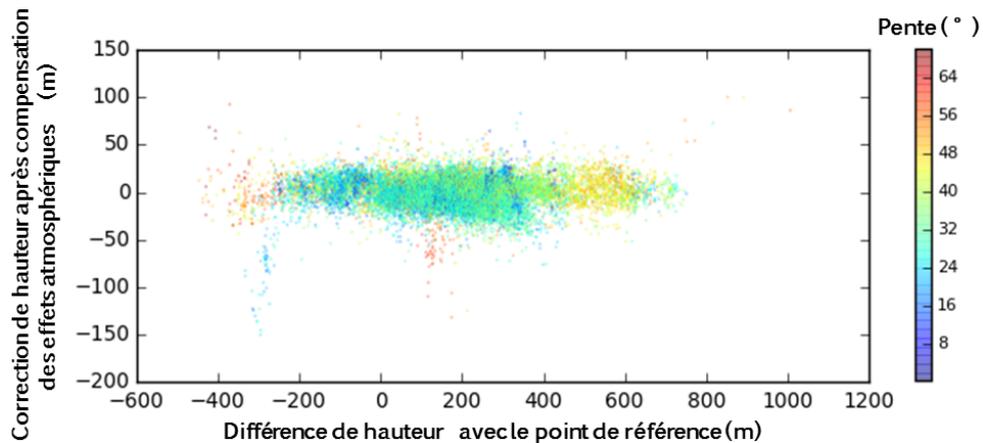
4 Identification des zones instables

i Comparaison des résultats issus des 2 séries d'interférogrammes

A partir des différentes hypothèses émises dans la section 2.4.3, plusieurs estimations de vitesses de phase ont été réalisées lors de l'étape d'inversion en série temporelle à partir des

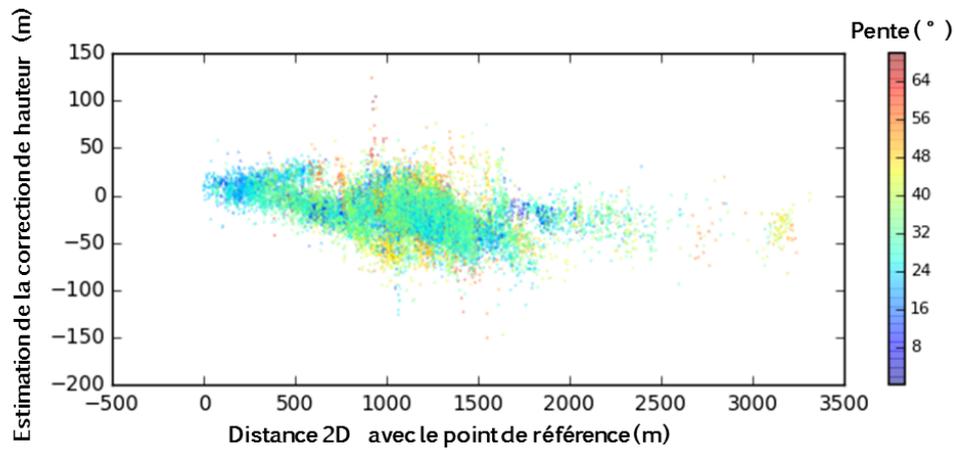


(a) Estimation de la correction de hauteur H en fonction de la différence de hauteur avec le point de référence avant compensation des effets atmosphériques

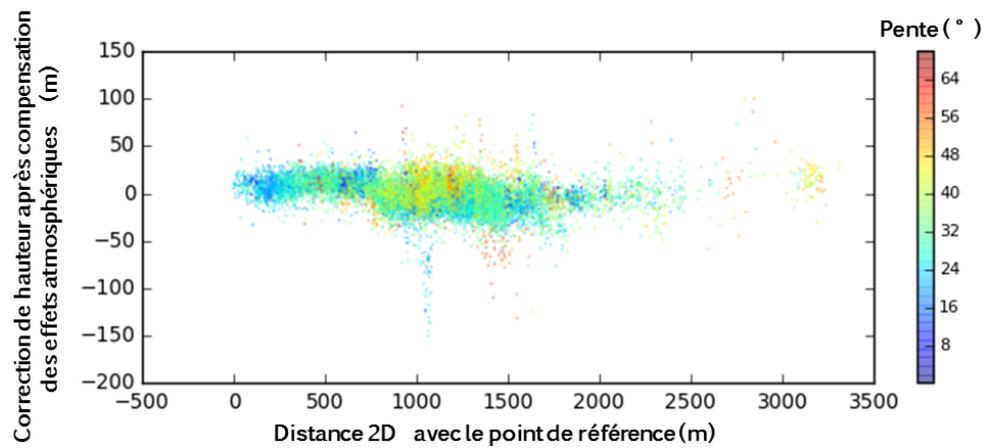


(b) Estimation de la correction de hauteur H en fonction de la différence de hauteur avec le point de référence après compensation des effets atmosphériques

FIGURE II.24 – Comparaison des corrections de hauteurs en fonction de la différence d'altitude et en fonction de la distance $2D$ avec le point de référence, avant et après compensation des effets atmosphériques



(a) Estimation de la correction de hauteur H en fonction de la distance avec la référence avant compensation des effets atmosphériques



(b) Estimation de la correction de hauteur H en fonction de la distance avec la référence après compensation des effets atmosphériques

FIGURE II.25 – Comparaison des corrections de hauteurs en fonction de la différence d'altitude et en fonction de la distance 2D avec le point de référence, avant et après compensation des effets atmosphériques

deux séries d'interférogrammes ($N = 35$ et $N = 74$) en faisant varier le facteur de lissage γ . Les principaux résultats de ces estimations sont présentés dans la figure II.26. Les différents tests réalisés montrent que l'utilisation de différents facteurs de lissage sur la série déconnectée ($N = 35$) modifie considérablement les estimations de vitesses, mettant en évidence le caractère non-linéaire de l'évolution de la phase. Les différences significatives entre les figures II.26.a, II.26.c et II.26.e peuvent s'expliquer par l'existence de déformations non linéaires et/ou par la présence de résidus de phase non liés au signal de déformation dans la phase déroulée corrigée (délai atmosphérique, résidus de phase orbital et topographiques). Les figures II.26.a et II.26.c mettent en évidence une zone où les vitesses des diffuseurs semblent homogènes, correspondant au secteur identifié dans les interférogrammes dans la section 3.1. Cette tendance apparaît également dans les résultats obtenus à partir de la série connectée ($N = 74$) dans les figures II.26.b, II.26.d et II.26.f. Les vitesses semblent peu affectées par l'évolution du facteur de lissage, ce qui tend à montrer une meilleure robustesse des résultats avec cette série. Cette approche a également permis d'estimer des vitesses pour les diffuseurs présents dans la partie Est du site d'étude dans laquelle un motif de frange avait été identifié dans la section 3.1, zone dans laquelle une forte décorrélation est rencontrée lorsque les intervalles de temps entre deux acquisitions dépassent 30 jours. Les vitesses estimées sur ce secteur à la suite de l'inversion sont d'ailleurs les plus élevées de l'ensemble du site test.

ii Validation des résultats

La validation des résultats de l'inversion en série temporelle est réalisée par une analyse des vitesses associées aux coins réflecteurs. Afin de faciliter l'interprétation, la vitesse de phase (rad./an) a été convertie en vitesse de déplacement (mm/an) en appliquant la simplification suivante : une variation de la phase (dépourvue de contribution autre que celle de la déformation) de 2π rad. correspond à un déplacement dans la ligne de visée égal à $2,8$ cm ($\lambda/2$). Ainsi une variation d'un radian correspond à un déplacement de $4,3$ mm. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau II.6. Les CR triangulaires CR1 et CR5 d'1 m de côté présentent des vitesses faibles (vitesse maximale équivalente à environ 4 mm/an) alors que le CR6 de taille plus modeste présente une vitesse de phase sensiblement supérieure (de 8 mm/an à $1,5$ cm/an selon le facteur de lissage utilisé). A noter que lors d'une visite d'inspection sur le terrain réalisée en Octobre 2018, un dérèglement des paramètres d'installation initiaux a été observé sur CR6 (environ $+5$ degrés vers l'Est et $+8$ degrés en élévation). Le CR6 étant fixé dans la roche dans une zone qui apparaît stable (les diffuseurs voisins présentent des vitesses de phase proches de 0), ce dérèglement pourrait être attribué à un pivotement de l'articulation entre le socle et le CR, se traduisant par un déplacement du centre de phase du CR. D'après les résultats présentés dans la figure II.26, les CR sont installés dans une zone stable, y compris la moraine latérale sur laquelle se trouve CR5. A partir de cette observation, CR1 et CR5 peuvent être utilisés pour estimer l'erreur sur l'estimation des vitesses de phases, principalement causée par l'atmosphère. Cette estimation est valable pour la partie Est située à proximité des CR mais semblent difficilement exploitable pour la partie Ouest, située sur la rive opposée du glacier d'Argentière. Cela nécessiterait l'installation d'autres CR. Le secteur étant situé sur le domaine skiable des Grands Montets, la forte fréquentation par des skieurs l'hiver et des promeneurs l'été nécessite de prendre des précautions particulières. Au regard des résultats présentés dans

le tableau II.6, un facteur de lissage de 0 ou 10 semble minimiser l'erreur de déplacement. En complément, l'analyse des figures II.26.b - d - f montre que plus la valeur du facteur γ est élevée et plus les diffuseurs situés entre le secteur 1 et le secteur 2 de la figure II.9 présentent des vitesses importantes. Cette analyse permet de confirmer le choix de n'appliquer aucun facteur de lissage.

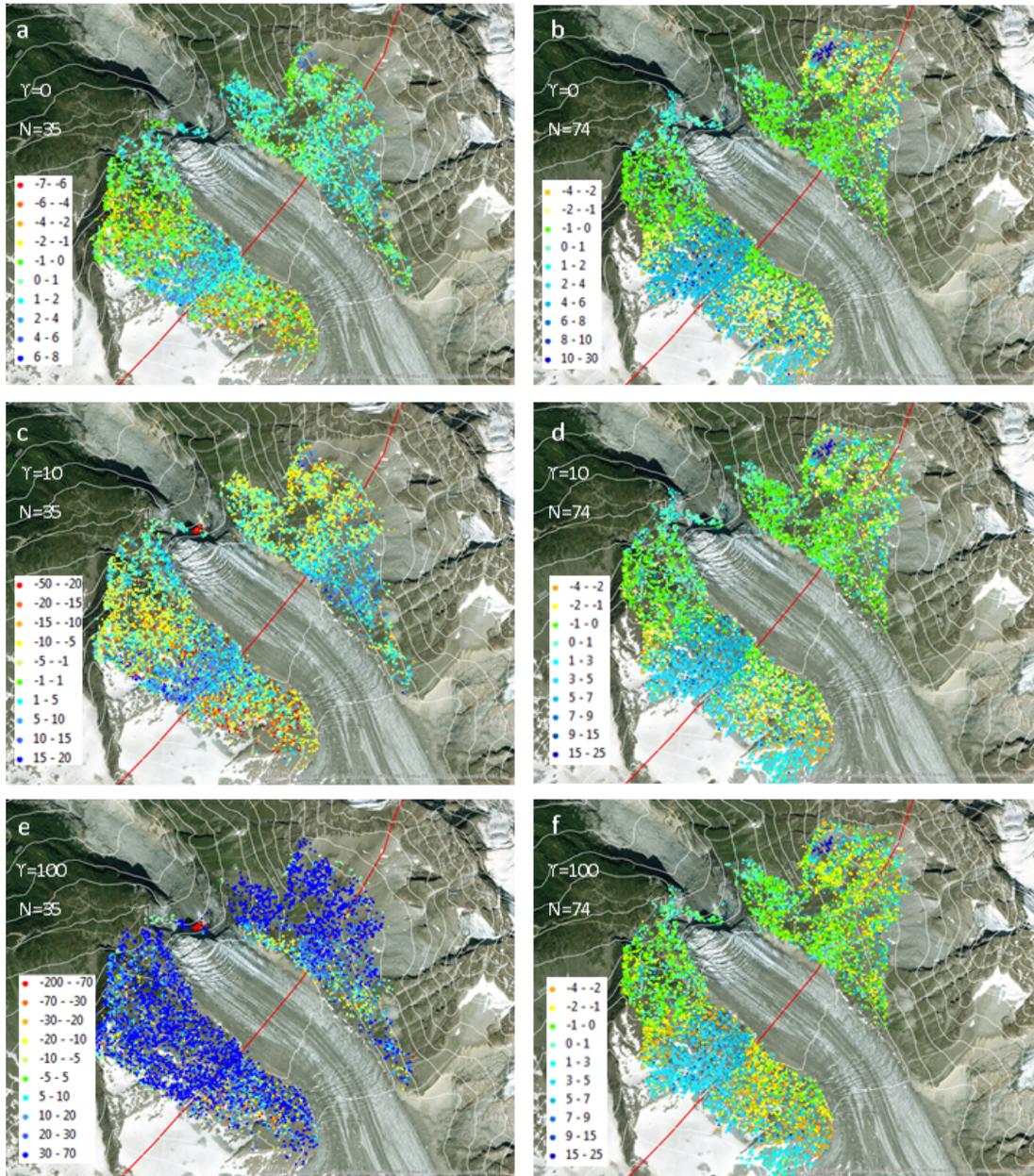


FIGURE II.26 – Vitesses (rad/an) après inversion par SVD obtenues avec différents facteur de lissage ($\gamma = 0, 10, 100$) à partir des séries de 35 et 74 interférogrammes.

iii Estimation des vitesses moyennes linéaires

Les vitesses moyennes linéaires de déformation estimées à partir de la série temporelle issue de la série des 74 interférogrammes sont présentées dans la figure II.27. La vitesse de 11665 diffuseurs

CR	$\gamma = 0$	$\gamma = 0$	$\gamma = 10$	$\gamma = 10$	$\gamma = 100$	$\gamma = 100$
	V_{phase} (rad/an)	V_{def} (mm/an)	V_{phase} (rad/an)	V_{def} (mm/an)	V_{phase} (rad/an)	V_{def} (mm/an)
CR1	-0,75	-3,2	-0,85	-3,7	-1,05	-0,75
CR5	-0,31	-1,3	-0,20	-0,86	-0,42	-0,31
CR6	1,76	7,6	2,4	10,3	3,44	1,76

TABLE II.6 – Vitesses V_{phase} (rad/an) estimées lors de l'étape d'inversion en série temporelle correspondant aux réflecteurs CR1, CR5 et CR6, converties en vitesses de déformation V_{def} (mm/an)

cohérents a ainsi pu être estimée, mettant en évidence 3 zones présentant des instabilités : le secteur 1 de la figure II.9 avec une vitesse moyenne d'environ -1 cm/an, le secteur 2 de la figure II.9 avec une vitesse moyenne d'environ -2 cm/an et un troisième secteur situé dans la partie Est vers 2700-2800 m d'altitude, correspondant à la zone identifiée dans la section 3.1 dont la cohérence passe sous le seuil de 0,8 pour les interférogrammes à plus de 30 jours. La trentaine de diffuseurs conservés sur ce secteur présente des vitesses atteignant les -10 cm/an. Ces estimations de vitesses relativement élevées sont en adéquation avec la perte rapide de cohérence. A noter que certains diffuseurs situés au-dessus de 2600 m dans le secteur 5 de la figure II.10 présentent des vitesses dépassant -1 cm/an. Cependant on n'observe pas de mouvement d'ensemble du secteur. Les estimations de vitesses de déformation confirment la stabilisation de la moraine latérale du glacier d'Argentière située dans la partie Est du secteur d'étude (secteur 4 de la figure II.10). Cette stabilisation a été documentée dans le rapport de Prévention des Risques naturels prévisibles (source : haute-savoie.gouv.fr) et justifiée par une végétalisation de la surface externe de la moraine. Ce secteur n'est donc pas soumis à un aléa fort. En revanche, les secteurs instables comme celui identifié dans la partie Est peuvent être sujets à des phénomènes de ravinements et de chutes de pierres. Une surveillance par une approche conjointe PS et CR pourrait s'avérer utile dans une zone où la fréquentation est importante.

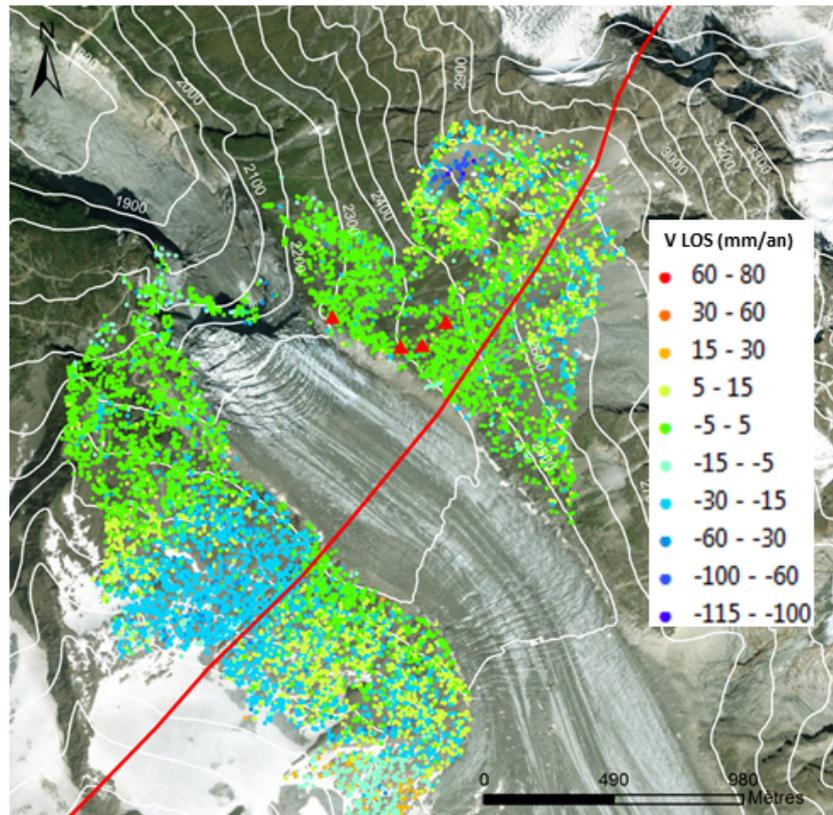


FIGURE II.27 – Vitesses moyennes linéaires de déplacement LOS à partir des séries de 74 interférogrammes.

Conclusion

Dans ce chapitre, les avantages de l'utilisation de CR avec les données Sentinel-1 ont été présentés dans le contexte du suivi d'instabilité dans le domaine périglaciaire. Les SER de 3 modèles différents de CR ont été mesurés dans une chambre anéchoïque, permettant ainsi de mieux appréhender leur sensibilité face aux réglages en azimuth et en élévation. Les travaux ont été poursuivis en étudiant la visibilité et la performance de 10 CR dans 3 sites différents, un pré en herbe, un glacier (voir annexe A), et ses pentes environnantes dans une région montagneuse. Les expériences ont permis de lier leur visibilité aux conditions météorologiques et d'estimer les instabilités de certaines pentes.

Les mesures de SER dans la chambre anéchoïque montrent que les CR rectangulaires peuvent être recommandés pour une surveillance de petits déplacements, où les déplacements du sol ne perturbent pas leurs angles d'élévation. Dans la mesure où cette forme optimise la SER, elle pourrait être utile dans des zones de rétrodiffusion assez fortes avec des restrictions sur le choix de la taille du CR, comme cela peut être le cas dans les zones urbaines. Cette optimisation de la taille apporte également un avantage dans les zones soumises à des conditions climatiques difficiles, comme cela peut être le cas en territoire de montagne. En revanche, s'il n'y a pas de contrainte sur le choix de la taille du CR, la stabilité des CR triangulaires présente un grand intérêt pour tout type de suivi de déplacement.

L'analyse des séries temporelles sur les CR a montré que les chutes de neige diminuent considérablement l'indice de stabilité. Cela a mené à travailler sur une sous-série temporelle de 27 images Sentinel-1 sans chute de neige. Le rapport RSC et l'erreur de phase, inférieure à 0,19 rad, ont été calculés pour chaque CR de chaque image SAR, ce qui a permis d'envisager la mise en place d'un suivi PS.

Les approches PS classiques sont applicables dans des contextes de suivi de déformation en territoire de montagne mais souffrent généralement d'une faible densité de PS. Le maintien d'une cohérence interférométrique élevée sur des intervalles de temps réduits dans les secteurs de haute montagne soumis à des fortes instabilités nous a mené à mettre en place une chaîne de traitement à partir d'une approche hybride PS-SBAS dit l'approche PS multi-références. Cette approche a permis d'estimer les instabilités des pentes environnantes du glacier d'Argentièrè tout en conservant une densité importante de diffuseurs cohérents (proche de 2000 CS km^2).

La présence de CR pour les tests de visibilité et de stabilité en été a permis d'utiliser un CR stable comme point de référence. L'approche proposée a permis d'obtenir une estimation de la hauteur des CR avec une erreur moyenne quadratique de 0,15 m. La précision de la hauteur sur les autres diffuseurs a également été analysée. Malgré le nombre limité d'images disponibles en

raison de la présence de neige, la différence de hauteur moyenne entre les mesures LiDAR et les mesures InSAR est d'environ 3,0 m. De plus, cette approche a permis d'identifier plusieurs zones instables, correspondant à la moraine du glacier des Rognons, à une zone fracturée au niveau d'un contact géologique et une zone instable au niveau d'un pierrier. Cette étude a montré que la principale source d'erreur était liée aux délais atmosphériques, pouvant induire des erreurs dans l'estimation de la correction topographique ainsi que dans la mesure de déplacement. Dans un tel contexte, une étude conjointe CR et PSI présente un vrai intérêt. Les CR permettent à la fois de réduire la décorrélation, d'améliorer le positionnement absolu de l'ensemble des diffuseurs et peuvent être utilisés comme points de contrôle. L'ajout de CR supplémentaires, notamment dans la partie Ouest du site test, en les répartissant sur un large éventail d'altitudes permettrait de contrôler les estimations de hauteurs (sans avoir recours à des données LiDAR) et de limiter les incertitudes liées aux délais atmosphériques.

Les traitements effectués et les résultats obtenus dans ce chapitre ont été publiés dans (Jauvin et al., 2017) à la conférence MDIS en 2017, dans (Jauvin et al., 2018b) à la conférence EUSAR en 2018 et dans (Jauvin et al., 2019) dans la revue Remote Sensing en 2019.

Chapitre III

Suivi de l'impact des grands chantiers par imagerie satellitaire radar

Sommaire

1	Auscultation topographique des travaux souterrains	91
1.1	Travaux souterrains et leurs impacts potentiels en surface	91
1.2	Méthodes d'auscultation des travaux souterrains	93
1.3	Interférométrie SAR multi-temporelle en milieu urbain	95
2	Projet du Grand Paris et extension du RER EOLE	98
2.1	Grand Paris Express	98
2.2	Problématiques spécifiques du Grand Paris	98
2.3	Extension du RER EOLE	102
3	Auscultation du Grand Paris à partir des données Sentinel-1	107
3.1	Chaînes de traitement	108
3.2	Résultat des traitements PS	115
3.3	Impacts des travaux de génie civil de l'entonnement Ouest HSL	130

Introduction

Les travaux présentés dans ce manuscrit se situent dans un contexte particulier, qui a vu le lancement de la constellation Sentinel-1, et qui a vu l'utilisation de l'InSAR désormais considéré comme opérationnelle, devenir de plus en plus régulière, notamment dans le domaine du génie civil. Cette technique de surveillance répond à un besoin actuel de suivi complet des opérations réalisées en surface ou en souterrain et de mesurer leurs éventuels impacts sur le bâti environnant. Les travaux souterrains de grande ampleur ont connu un essor important en Europe lors des dix dernières années avec le lancement de projets tels que le Crossrail à Londres et le projet du Grand Paris. La croissance démographique et l'urbanisation rapide des territoires du monde entier poussent de nombreuses métropoles à développer leurs réseaux de tunnels urbains (Ghorbani et al., 2012).

Or les travaux de génie civil associés à de tels projets sont souvent réalisés dans des zones critiques densément construites. Ces projets sont devenus possibles grâce aux avancées récentes

des technologies des tunnels permettant de réduire les aléas liés à leur construction (Ghorbani et al., 2012). Il reste cependant nécessaire de suivre précisément l'évolution des ouvrages et de leur environnement non seulement au cours de la phase de travaux et dans les premiers mois de leur exploitation mais aussi avant les travaux. Les méthodes de monitoring traditionnelles telles que les stations totales robotisées (STR) (section 3.2) permettent de suivre en temps réel ces évolutions avec une très grande précision. Cependant leur coût et les problématiques liées à leur installation et leur maintenance rendent leur usage parfois difficile, notamment pour le suivi d'opérations potentiellement impactantes à grande échelle. C'est le cas par exemple des **rabattements de nappe** (voir section 1.1.3), dont les effets en surface peuvent être visibles à l'échelle d'un quartier.

Le recours à l'InSAR présente alors un intérêt grâce aux avancées des techniques multi-temporelles, à la réduction des temps de calcul et à l'apport des données haute résolution. Dans ce contexte, se pose la question du rôle que peut jouer l'exploitation de données issues de la constellation Sentinel-1 dans le suivi des grands chantiers. Ces données en libre-service et leur acquisition systématique à 6 jours sur l'ensemble de l'Europe permettent d'aborder différemment la problématique de suivi de déformation de surface. En effet, les traitements de données haute résolution telles que les données TerraSAR-X ou Cosmo Sky-Med par des méthodes multi-temporelles ont montré leur efficacité dans des contextes urbains (section 1.3.2). Mais le coût important de ces données peut être prohibitif pour certains projets, pour lesquels les méthodes conventionnelles leur seront alors préférées, car elles bénéficient d'une plus grande confiance de la part de certains décideurs et maîtres d'œuvre. Enfin, dans le cas où la méthode InSAR serait tout de même retenue, le prix des images peut amener à n'utiliser qu'un faible nombre d'images pour réaliser le traitement, ce qui tend à réduire la précision des estimations réalisées.

Dans un premier temps, nous présenterons les problématiques d'instabilités liées à la réalisation de travaux souterrains. Nous nous intéresserons aux méthodes d'auscultation existantes pour mieux contrôler les impacts en surface, soit par des approches traditionnelles, soit par InSAR. Dans un second temps, nous présenterons le contexte dans lequel ces travaux ont été réalisés en introduisant le projet Grand Paris et le projet EOLE, ainsi que les problématiques de déformation que l'on peut y rencontrer. Enfin, ce chapitre présentera le potentiel des données Sentinel-1 pour le suivi de grands chantiers en s'appuyant sur l'exemple de travaux réalisés sur la ville de Paris. Nous étudierons en quoi elles peuvent être un complément aux données haute résolution et aux méthodes traditionnelles, et discuterons de la précision qui peut être atteinte lorsque le nombre d'images disponibles n'est plus une limite.

Notons que les résultats présentés dans ce chapitre sont issus principalement des traitements réalisés dans un contexte opérationnel à partir du jeu de données 3 (voir tableau III.1), et incrémentés au fur et à mesure de l'avancement des travaux sur le chantier Haussmann Saint-Lazare (HSL, voir section 2.3.1). Le traitement des autres jeux de données ayant été réalisé, ponctuellement, à titre de comparaison.

I Auscultation topographique des travaux souterrains

L'auscultation tient une place importante dans la réalisation et le suivi de grands projets du génie civil, tant lors de la phase de construction pour vérifier le bon déroulement des travaux, qu'au cours de la phase d'exploitation, pour juger de la viabilité des installations et estimer les éventuelles maintenances à effectuer. Parmi les projets contemporains, la réalisation de tunnels urbains représente un enjeu stratégique important. En effet, avec l'expansion rapide de l'urbanisation, la construction d'importants réseaux de métro s'est avérée être un moyen très efficace pour décongestionner le trafic urbain (Kim and Lee, 2003) (Ghorbani et al., 2012) (Ye et al., 2012). Cependant, ces projets de plus en plus complexes (Crossrail de Londres, Grand Paris Express, etc.) sont réalisés à l'aplomb de zones très urbanisées sensibles aux déformations, ce qui implique une surveillance poussée dès de leur phase de conception (Eclaircy-Caudrin, 2012). Cette section présentera succinctement les enjeux et les problématiques rencontrés dans l'auscultation topographique des tunnels, qui tiennent une place grandissante dans le génie civil.

1 Travaux souterrains et leurs impacts potentiels en surface

1.1 Tunnels et autres ouvrages souterrains en milieu urbain

Il semble nécessaire de faire une distinction entre les tunnels en milieu urbain de ceux réalisés en zone montagneuse, qui ont des objectifs et des problématiques différents. Dans le cas de tunnels urbains, l'un des enjeux principaux est de réduire le plus possible l'impact des travaux en surface et sur le bâti environnant. En montagne, des déformations considérables du sol sont délibérément autorisées (et souvent provoquées) afin de réduire les charges «géostatiques» initialement très importantes (Maghsoudi and Kalantari, 2014). Seul le cas des tunnels en milieu urbain sera traité dans cette section.

Les projets souterrains sont généralement construits dans des matériaux soumis à des processus géologiques et anthropiques complexes (Lundman, 2011) créant ainsi des conditions de sol incertaines et variables. Cette problématique vient notamment de la nécessité de creuser les tunnels urbains à faible profondeur afin de limiter le prix et la complexité de leurs voies d'accès tout en atteignant des sols de qualité acceptable (Gilleron, 2016).

Ce type de grands chantiers peut être réalisé de deux façons, soit à l'aide d'un tunnelier, soit à partir de méthodes dites conventionnelles. Les tunneliers sont utilisés pour des projets linéaires de grande ampleur, du fait de leur coût important. Les méthodes conventionnelles sont employées pour des projets plus restreints, non circulaires ou à fort rayon de courbures. Parmi ces derniers, on peut citer la réalisation d'ouvrages annexes ou les gares souterraines (Gilleron, 2016). Le creusement conventionnel correspond à la réalisation d'un processus cyclique comprenant les étapes d'excavation et la mise en place des premiers éléments de soutènement (AITES, 2009). Ces étapes ne seront pas plus détaillées dans le manuscrit.

1.2 Incertitudes du sous-sol et les déformations en surface

La construction d'ouvrages du génie civil tels que des tunnels doit faire face à de nombreuses inconnues, causées par la variabilité naturelle des propriétés physiques et mécaniques

des matériaux rencontrés et la connaissance toujours imparfaite du sous-sol (Ghorbani et al., 2012) (CETU, 2006). Les interactions complexes entre le sol et l'ouvrage rendent donc nécessaire la réalisation de modélisations numériques bidimensionnelles ou tridimensionnelles pour la conception d'un tel ouvrage (Eclaircy-Caudrin, 2012). Cela nécessite des reconnaissances et des investigations poussées afin de définir les conditions géologiques, hydrogéologiques et géotechniques prévisibles pour le creusement (CETU, 2016).

Cependant, les incertitudes liées à la géologie ne peuvent pas être supprimées, et ce malgré la réalisation de forages, du fait des possibles variations importantes du sol rencontrées d'un forage à l'autre et de la présence de phénomènes inattendus tels que des cavités (Eclaircy-Caudrin, 2012). De plus, il existe une incertitude sur les propriétés mécaniques des sols. Ces dernières sont estimées à partir d'essais en laboratoire et d'essais in-situ. Cependant, ces estimations restant très localisées, il est difficile d'estimer précisément les caractéristiques de l'ensemble du massif géologique dans lequel les travaux vont être réalisés (Eclaircy-Caudrin, 2012). Enfin, certains projets nécessitent la réalisation de traitements du sol afin de le renforcer pour mener à bien le creusement. La construction de tunnels peut, par exemple, s'effectuer dans des roches non consolidées et sous la nappe phréatique, ce qui peut entraîner des affaissements (Epting et al., 2008). Mais les propriétés du sol après traitement restent incertaines puisqu'elles dépendent de l'adéquation de la méthode aux conditions locales et de la quantité de traitement apportée (Eclaircy-Caudrin, 2012). En définitive, ces incertitudes obligent le géotechnicien à estimer la probabilité d'apparition des aléas ainsi que leur éventuelle intensité en prenant en compte la géologie et l'hydrogéologie du sous-sol et les méthodes employées (Gilleron, 2016).

Après avoir identifié les possibles aléas et leur probabilité d'apparition, il est nécessaire de définir les enjeux rencontrés sur le site. Il faut alors définir la Zone d'Influence Géotechnique (ou ZIG) et lister les bâtis concernés par le creusement du tunnel. Leur vulnérabilité est alors estimée, à laquelle seront associés l'acceptabilité des dommages et le coût de réparation, selon le type de bâti concerné (résidence, patrimoine historique) (Gilleron, 2016). Une fois le risque estimé, il est possible de le réduire en adaptant au mieux les méthodes employées aux conditions rencontrées. Le risque est ensuite géré en surveillant la réalisation de l'ouvrage.

En France, la surveillance du chantier est assurée par le maître d'œuvre, qui agit pour le compte du maître d'ouvrage (ou donneur d'ordre). Il pourra alors faire appel à des entreprises afin qu'elles réalisent des mesures d'auscultations en souterrain et en surface afin de contrôler le bon déroulement des travaux. La maîtrise d'œuvre (MOE) sera alors en mesure de fournir une analyse complète du déroulement des travaux (CETU, 2016).

1.3 Risques liés aux rabattements de nappe

Les principaux risques de déformation en surface sont rencontrés lors de la phase de creusement. Cependant, il peut s'avérer nécessaire d'abaisser le niveau de la nappe phréatique localement avant le creusement du tunnel lorsque ce dernier est situé sous le niveau de la nappe. Cette opération de pompage des eaux souterraines peut alors entraîner des tassements importants à même de causer des dégâts sur les ouvrages et bâtiments avoisinants (Qi and Gao, 2011) (Zhang et al., 2018). Lors de cette opération, la baisse du niveau d'eau entraîne une diminution de la pression de l'eau dans les pores ayant pour effet d'augmenter la contrainte effective

(Chen and Xiang, 2006). Un tassement peut alors se produire s'il existe des sols compressibles à proximité (Powers, 1991). Il est donc important d'identifier de telles conditions lors de la phase de planification, afin de pouvoir mettre en place des procédures pour contrôler tout dommage et de contrôler précisément le niveau des eaux souterraines au cours de la phase de pompage. L'intensité des dommages causés par des tassements excessifs dépendra de l'épaisseur et des caractéristiques de consolidation de la couche compressible affectée par le rabattement, de la durée du pompage et de la profondeur à laquelle la nappe est abaissée et enfin des fondations des structures dans la zone touchée et du type de construction rencontrée (Powers, 1991).

Bien que les effets en surface des rabattements de nappe soient modélisés numériquement et que des protocoles soient mis en place pour les réduire, une auscultation du chantier reste obligatoire (Chen and Xiang, 2006) du fait de l'existence d'incertitudes sur la géologie et sur les propriétés mécaniques des sols comme évoqué précédemment et sur les conséquences que peuvent avoir les modifications de la circulation d'eau causée par le pompage (Powers, 1991). Qu'il s'agisse de la phase de rabattement de nappe ou de la phase de creusement, l'instrumentation de tels projets est donc indispensable, à la fois pour l'étude du site, la vérification de la conception et la sécurité de la structure (Maghsoudi and Kalantari, 2014). L'auscultation doit alors être planifiée avant le début des travaux. Cette phase de planification doit permettre de définir les paramètres à mesurer, la localisation des mesures et ainsi que leur fréquence (Eclaircy-Caudrin, 2012) (Gilleron, 2016).

2 Méthodes d'auscultation des travaux souterrains

Pour faire face aux forts enjeux environnementaux, financiers et de sécurité, les projets souterrains s'accompagnent d'une auscultation topographique et géotechnique qui est généralement mise en œuvre sur 3 périodes, à savoir avant, pendant et après la réalisation des travaux (Maghsoudi and Kalantari, 2014). L'auscultation d'ouvrages souterrains doit permettre de maîtriser les risques et d'optimiser les procédés de construction. Pour ce faire, des méthodes topographiques et des méthodes géotechniques peuvent être mises en place. Les premières correspondent aux mesures géodésiques faites à partir de stations totales robotisées (STR) et aux mesures de nivellement précises, dites méthodes conventionnelles. D'autres méthodes géodésiques telles que les mesures satellitaires (GPS et InSAR) et les méthodes photogramétriques et lasergrammétriques (scanner laser 3D) peuvent également être employées (Ghorbani et al., 2012) (Briançon et al., 2016). Les secondes correspondent principalement aux mesures piézométriques, inclinométriques, extensométriques ainsi qu'aux mesures de vibrations.

Parmi les techniques d'auscultation présentées ci-dessus, il est nécessaire d'identifier celles permettant de mesurer les déformations afin d'identifier leurs limites et d'estimer l'intérêt que pourrait avoir l'exploitation des données Sentinel-1 par InSAR pour le suivi de travaux souterrains. Les déformations peuvent être surveillées à partir des mesures topographiques (par stations totales principalement), à partir de mesures de convergence en souterrain (par triangulation avec prismes optiques, par jauge de déformation ou par inclinomètres et extensomètres) et enfin à partir de la mesure de l'évolution des fissures (Eclaircy-Caudrin, 2012). La comparaison entre méthode InSAR et méthodes conventionnelles doit donc être faite à partir des mesures topographiques.

Lors de la réalisation d'un projet souterrain, les mesures de déformations sont réalisées à la fois en surface et sur les parois du tunnel. Des mesures de déplacement et de contraintes sont également réalisées dans le massif à l'aide de forages (Eclaircy-Caudrin, 2012) mais ne seront pas plus développées dans cette section. Notons que ces mesures doivent être complétées par des mesures de pressions interstitielles dans la ZIG à l'aide de piézomètres ou de capteurs de pression interstitielle (Briançon et al., 2016). Un suivi hydrogéologique est également réalisé afin de surveiller l'évolution des débits d'eau à l'intérieur du tunnel et de détecter d'éventuelles venues d'eau (Eclaircy-Caudrin, 2012). En site urbain, ces mesures sont complétées par des mesures concernant la gêne occasionnée par les travaux : mesures de vibrations et de bruits (Briançon et al., 2016).

L'arrivée des STR a révolutionné l'auscultation des travaux en général, offrant la possibilité de surveiller en permanence la dynamique structurelle des ouvrages et des avoisinants en surface (Yu et al., 2017). Cela permet de mesurer les déformations en temps réel et avec une fréquence d'acquisition ajustable, et avec une précision qui peut atteindre 1 mm lorsque la distance entre la cible et la STR est inférieure à 100 m (Eclaircy-Caudrin, 2012) Luo et al. (2016). Les STR permettent de mesurer aussi bien les déplacements de la structure souterraine (Klopčič et al., 2008) que les éventuels mouvements du bâti. La réponse aux déformations du sous-sol pouvant différer d'un bâtiment à un autre - du fait de faiblesses dans les fondations entraînant des pertes de résistance et de stabilité - le suivi du bâti est primordiale. Notons également qu'au moment des travaux, les bâtiments ont déjà accumulé des déformations pouvant dépasser de manière significative le niveau admissible, les rendant plus vulnérables face aux déformations provoquées par les travaux (Bryn et al., 2017). Un des inconvénients des mesures par STR est qu'elles nécessitent l'installation de prismes sur lesquelles la mesure optique est réalisée. En surface, ces prismes sont généralement installés en hauteur sur les murs des bâtiments et doivent être visibles depuis la zone d'installation de la STR. L'urbanisation du secteur instrumenté restreint considérablement la visibilité d'une rue à l'autre, ce qui oblige souvent à utiliser plusieurs STR pour réaliser l'auscultation et augmente le coût du suivi de chantier. Les mesures par STR sont établies à partir de points de contrôle situés dans une zone supposée stable (voir section 3.2). Or la définition de la ZIG étant soumise à des incertitudes (voir section 1.1.2), les points de contrôle peuvent être eux-mêmes situés dans une zone de déformation (da Silva et al., 2018). Cette situation peut notamment être rencontrée en cas de rabattement de nappe (voir section 1.1.3). D'une part la cuvette de déformation peut s'avérer plus importante que prévue (incertitudes géologiques et géotechniques) et d'autre part les contraintes sur la visibilité des prismes et le nombre de STR à utiliser peuvent être trop importantes pour permettre l'auscultation de l'ensemble de la zone impactée par le rabattement. La solution est alors de réaliser des mesures de nivellement manuellement afin de sortir de la cuvette de déformation pour corriger les erreurs dues aux déplacements des points de contrôle. En définitive, les STR offrent une résolution temporelle inégalable mais souffrent d'une résolution spatiale limitée, qui peut s'avérer critique dans certaines conditions. En cela, l'InSAR apparaît comme un outil complémentaire pour réaliser le suivi en surface des conséquences de travaux souterrains.

3 Interférométrie SAR multi-temporelle en milieu urbain

3.1 Résultats historiques

Les données issues de la première génération de satellites radar (ERS-1 & 2, Radarsat-1, etc.) ont permis de valider le potentiel de l'InSAR pour réaliser des suivis de déformation en milieu urbain et de développer les premières méthodes de suivi multi-temporelles (Engdahl and Hyypä, 2000) (Ferretti et al., 2000a) (Takeuchi and Yamada, 2002) (Tao Li et al., 2004). Sur la ville de Paris, plusieurs études ont permis d'identifier les déformations liées aux travaux de construction de la gare Hassmann St Lazare du RER E (nommé EOLE) entre 1995 et 1997 (Fruneau and Sarti, 2000) (Le Mouélic et al., 2002) (Fruneau et al., 2004) (Le Mouélic et al., 2005).

Au départ, une des principales difficultés, résultant d'un nombre restreint d'images disponibles, a été de pouvoir séparer le signal atmosphérique du signal de déplacement. Pour résoudre ce problème, une méthode basée sur un calcul de corrélation entre 2 interférogrammes sans date commune a été proposée dans (Fruneau and Sarti, 2000). La méthode a été appliquée sur un jeu de 10 interférogrammes ERS et a permis de détecter les effets des travaux souterrains et notamment l'extension spatiale de la déformation, mais sans pouvoir définir le début et la fin de la phase de déformation. Cette limite a été surmontée par la suite grâce à un nombre plus important d'images ERS-1 & 2 en sélectionnant les couples de bases perpendiculaires faibles. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence plusieurs périodes de déformation, reliées aux différentes phases de construction, et coïncidant avec les variations du niveau de la nappe phréatique mesurées à partir de piézomètres ainsi qu'avec les mesures de nivellement réalisées dans le secteur impacté par les travaux. Des cartes de la subsidence totale et de la remontée des terrains ont été établies (Fruneau et al., 2005).

Outre l'utilisation de petites bases spatiales, une inversion par une approche des moindres carrés combinée à un filtrage temporel a également été appliquée avec succès sur le suivi de déformation sur l'ensemble de l'agglomération parisienne (Le Mouélic et al., 2005). Cela a permis de mettre en évidence des déplacements lents jusqu'à 1mm/an, tels que ceux rencontrés au niveau de la Butte Montmartre liés à la présence d'anciennes carrières de gypse. Plusieurs études PS ont été menées, en utilisant un jeu important d'images ERS-1 & 2 et Envisat (Magalhaes, 2010). Elles ont mis en évidence plusieurs zones de déformation sur Paris, et ont permis de mesurer notamment les déplacements affectant le Grand Palais. Par ailleurs, il ressort de ces études la difficulté à suivre les mouvements non linéaires (temps de revisite de 35 jours entre les acquisitions, peu de données disponibles).

Une approche possible pour suivre sur une longue période des déplacements non-linéaires à partir d'une méthode PS (dont le calcul intègre un modèle linéaire) est de diviser la période d'observation en plusieurs sous-périodes (Raucoules et al., 2007) (Magalhaes, 2010). Cette approche a été appliquée à l'étude du risque de mouvements de terrain à Paris en particulier sur HSL et a montré une forte corrélation des mesures InSAR avec les profils temporels de nivellement (Magalhaes, 2010). Bien que plusieurs méthodes aient permis de remédier de façon plus ou moins complète aux limitations rencontrées avec les données de première génération (délai

atmosphérique, mouvements non linéaires), leur disponibilité et leur résolution restent un frein à une utilisation opérationnelle de l'InSAR. De plus, la qualité de ces données n'est pas toujours assurée, avec par exemple des problèmes de gyroscope rencontrés sur certaines images ERS2 à partir de février 2000, réduisant la continuité des mesures PS (Kaveh, 2010).

3.2 Apport des données haute résolution

L'arrivée des données de seconde génération (Cosmo-SkyMed, Radarsat-2, Terra-SAR-X, TanDEM-X, etc.) a permis de franchir un cap dans le développement des méthodes de traitement et de disposer d'outils plus adaptés à un usage opérationnel. Les principales évolutions entre la première et la seconde génération sont la réduction du temps de revisite (4 jours pour la constellation Cosmo-SkyMed, 11 jours pour TerraSAR-X,) et à la possibilité d'acquisition en haute résolution.

En passant d'une résolution de 5 m x 20 m en bande C à une résolution de 3 m x 3 m (en bande C pour RadarSAT-2), jusqu'à 1 m x 1 m (en bande X pour Cosmo-SkyMed et TerraSAR-X), les capteurs SAR apportent de meilleures performances à la fois en terme de précision de localisation et en terme de sensibilité au déplacement (Prati et al., 2010). Le passage de la bande C en moyenne résolution à la bande X en haute résolution conduit à une augmentation par 20 de la densité de PS en zone urbaine (Perissin et al., 2012) de telle sorte que plusieurs PS peuvent être détectés sur un même bâtiment. Il est alors possible de suivre individuellement l'évolution des bâtiments (Prati et al., 2010) (Bakon et al., 2014), telle que l'apparition de tassements différentiels susceptibles d'occasionner des désordres sur les structures, et ce avec une précision pluri-millimétrique (Liu et al., 2014) voire infra-millimétrique (Quin and Loreaux, 2013). Grâce aux nouvelles stratégies d'acquisition et aux adaptations des méthodes multi-temporelles, les mouvements saisonniers et non linéaires sont mieux appréhendés (Bakon et al., 2014) et il devient possible en particulier de séparer le régime de déformation principal de la dilatation thermique qui affecte les bâtiments verticaux (Gernhardt and Bamler, 2012). L'ensemble de ces améliorations ouvre ainsi la porte aux suivis de structures du génie civil (ponts, barrages) et la surveillance de grands projets urbains tels que la construction de tunnels.

A titre d'exemple, une étude réalisée à partir de données Cosmo-SkyMed acquises entre 2008 et 2010 a permis de mesurer la subsidence engendrée par les travaux d'excavation lors de la construction de tunnels à Shanghai (Perissin et al., 2012). Des tassements et surrections causés par la construction d'un tunnel à Düsseldorf en Allemagne ont également été mis en évidence à partir d'une étude PS menée avec des données TerraSAR-X et confirmés par des mesures de nivellements (Liu et al., 2014). L'un des intérêts d'utiliser des données de seconde génération pour le suivi de travaux souterrains est que cela doit permettre d'identifier des déformations à l'échelle d'un bâtiment et donc de détecter les conséquences d'éventuels incidents géotechniques qui pourraient avoir lieu pendant la durée des travaux. Cela a été vérifié par exemple dans une étude PS réalisée en Sicile à partir de données Cosmo-SkyMed dans laquelle des déformations linéaires et non-linéaires causées par l'avancement du tunnelier et par une entrée d'eau survenue lors du creusement ont pu être mesurées (Barla et al., 2016). Parmi les autres projets souterrains ayant été suivis par InSAR, on peut citer le projet Crossrail de Londres (Robles et al., 2016)

(Giardina et al., 2018) dont les résultats se sont avérés corrélés avec les mesures d'auscultation in-situ (nivellement et stations totales), les séries temporelles de déplacements montrant des tendances de déformations similaires (Robles et al., 2016).

Ces différentes études ont montré que les données haute résolution permettent de réaliser un suivi précis de l'avancement des travaux et d'estimer le tassement réel, à l'échelle du bâtiment, résultant de l'interaction sol-structure (Giardina et al., 2018). Il serait toutefois intéressant de compléter les comparaisons qualitatives déjà réalisées entre mesures satellitaires et mesures in-situ par des analyses quantitatives, dans le but de mieux appréhender les différences de sensibilités à la déformation pour ces deux catégories de mesures.

3.3 Premiers résultats avec Sentinel-1

Malgré les avancées qu'a connu l'InSAR depuis l'arrivée des données haute résolution, la problématique de séparation du signal atmosphérique du signal de déformation reste un sujet d'actualité dans la recherche scientifique. Outre l'amélioration constante des méthodes de traitement, c'est la disponibilité même des données qui peut aider à répondre à cette problématique. Dans les études citées précédemment, on s'aperçoit que les séries temporelles d'images radar ne sont que très rarement constituées de la totalité des acquisitions permises par les temps de revisite réduit de différents satellites. Les séries temporelles sont généralement constituées avec une cyclicité d'environ une image par mois (Giardina et al., 2018) à 3 images tous les deux mois (Perissin et al., 2012) (Robles et al., 2016). Ces études ne profitent pas du plein potentiel d'acquisition, du fait des stratégies d'acquisition non systématique des images radar et de leur prix.

Le lancement des deux satellites Sentinel-1A et 1B a marqué l'apparition d'une nouvelle génération de satellites, caractérisée par une politique d'acquisition systématique et par la libre distribution des données. La contrainte économique relâchée, cette nouvelle constellation offre la possibilité de construire des séries temporelles plus denses, avec un pas de 6 jours sur l'ensemble de l'Europe, 12 jours ailleurs (Geudtner et al., 2014). En revanche, cette répétitivité s'est faite au prix d'une moins bonne résolution spatiale.

Des premiers travaux ont déjà montré le potentiel d'utilisation de ces données pour le suivi de chantiers, et ce, malgré leur résolution moyenne. Il a ainsi été possible de détecter les déformations liées aux rabattements de nappe nécessaires lors des travaux du projet Crossrail de Londres entre 2015 et 2017 (Bonì et al., 2018) ainsi que celles liées aux travaux du Grand Paris, identifiées à partir d'une approche PS réalisée sur des données acquises entre 2016 et 2018 (Nahli et al., 2019). Les résultats de cette dernière étude ont été comparés à des mesures réalisées à partir de STR, montrant qu'une approche PS classique permet de détecter la subsidence visible sur les mesures sur prismes mais sans être capable de retrouver clairement les différentes tendances identifiées dans les séries temporelles in-situ. Cela pourrait s'expliquer par une nécessité de densifier la série temporelle (cette étude n'utilise qu'une image environ tous les 16 jours et non tous les 6 jours) et d'améliorer la méthode de traitement des mouvements non-linéaires. En effet, l'intérêt d'augmenter l'échantillonnage temporel, est que les comportements non linéaires peuvent être mieux modélisés, et ce malgré l'utilisation de modèles linéaires.

Dans l'optique de déterminer la méthode de traitement la plus adaptée au contexte du suivi de grands chantiers, une comparaison a été réalisée entre les résultats d'une approche PS classique et ceux d'une approche multi-références (voir section 1.4.5) en utilisant l'ensemble des données disponibles, afin d'analyser les éventuelles différences dans la prise en compte des phénomènes transitoires susceptibles d'être rencontrés au cours de travaux souterrains (voir section 3). Afin de valider les résultats, une comparaison à la fois qualitative et quantitative avec les mesures in-situ présente un grand intérêt puisque peu réalisée jusqu'à présent.

II Projet du Grand Paris et extension du RER EOLE

1 Grand Paris Express

Le Projet Grand Paris, lancé en 2007, a pour objectif de créer un réseau de transports publics permettant de relier les grands pôles économiques de l'Île de France tout en améliorant le développement local de l'agglomération parisienne à partir d'un métro automatique, appelé le Grand Paris Express (Chabardes, 2015). Ce projet implique la création de quatre nouvelles lignes de métro automatiques et deux extensions d'une ligne existante (Nahli et al., 2019), pour un total de 205 km de voies supplémentaires (dont 168 excavées par tunnelier) et 68 nouvelles gares (voir figure III.1) (Cousin et al., 2019), ce qui fait de lui le plus grand projet souterrain actuellement en Europe (Koudogbo et al., 2008). Plusieurs tunneliers vont ainsi opérer dans le sous-sol Parisien à un niveau encore jamais connu jusqu'ici, jusqu'à une vingtaine en même temps. Le premier tunnelier est entré en action pour l'extension de la ligne 14 en Novembre 2015 et le premier tunnelier pour le Grand Paris Express, a quant à lui creusé les premiers mètres en Avril 2018 (ligne 15). La fin des travaux est envisagée à l'horizon 2030. Pour l'ensemble des travaux du projet, la maîtrise d'ouvrage a été attribuée à la Société Grand Paris (SGP), à l'exception de la ligne 14 Nord, qui est sous la maîtrise d'ouvrage de la RATP et du Syndicat des transports d'Île-de-France (STIF), et du prolongement de la Ligne 14 Sud, dont la maîtrise d'ouvrage a été déléguée à la RATP (SGP, 2017).

2 Problématiques spécifiques du Grand Paris

Un tel projet doit faire face à deux problématiques principales, à savoir l'intégration des futures lignes en prenant en compte les infrastructures existantes (fondations, parkings, sous-sols d'immeubles, etc.) et la gestion du risque géologique et géotechnique (Fluteaux, 2013).

Bien que la géologie parisienne ait été largement étudiée (Mégny, 1980) (Brunet and Le Pichon, 1982) (Briaux, 2015), la nature hétérogène de certains horizons géologiques rend les caractéristiques géotechniques variables (voir section 1.1.2). De plus, certaines caractéristiques géologiques et hydrogéologiques rencontrées dans le bassin Parisien sont susceptibles d'engendrer un risque de désordres sur les ouvrages et les environnements pendant et après l'exécution des travaux souterrains. Parmi les principaux risques rencontrés, on peut citer le risque de déformations causées par le phénomène de retrait-gonflement d'argile (Fluteaux, 2013). Des horizons argileux sont rencontrés à plusieurs reprises sur le tracé du Grand Paris (Antoinet, 2019) (voir figure III.2) et doivent être pris en compte dans le dimensionnement et la gestion de l'étanchéité des ouvrages et lors de la réalisation des terrassements (Fluteaux, 2013).

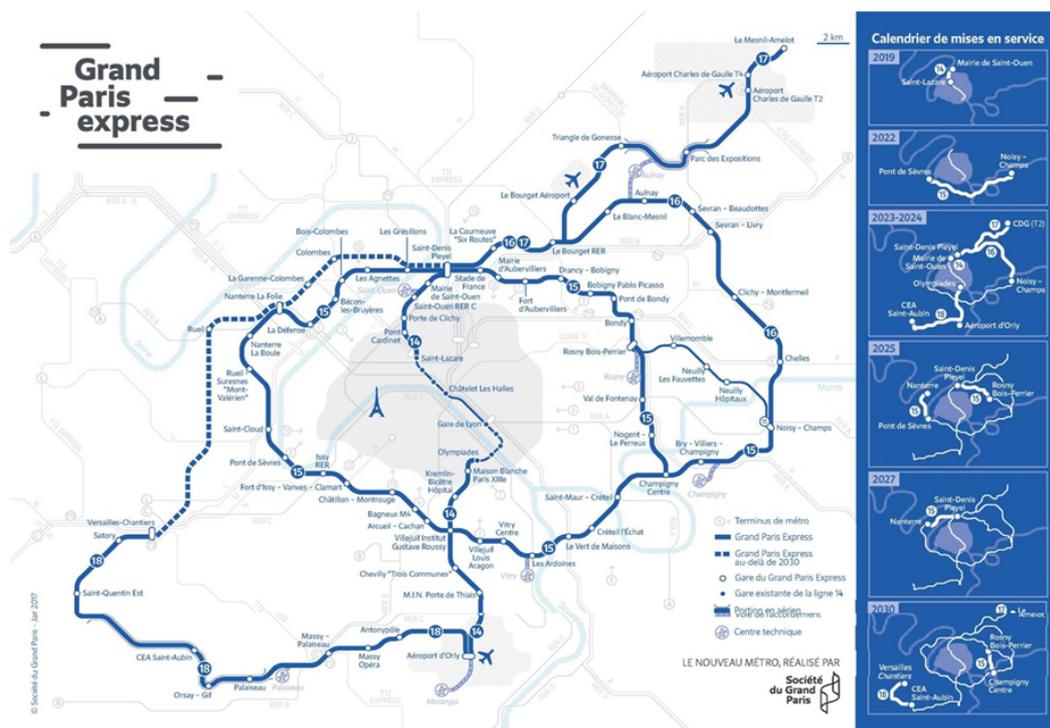


FIGURE III.1 – Schéma général du projet Grand Paris Express et son calendrier prévisionnel. Le projet comprend une voie de contournement de Paris (ligne 15) et des lignes reliant les quartiers en développement (lignes 16, 17 et 18), complétées par le prolongement de la ligne 14) (SGP, 2015).

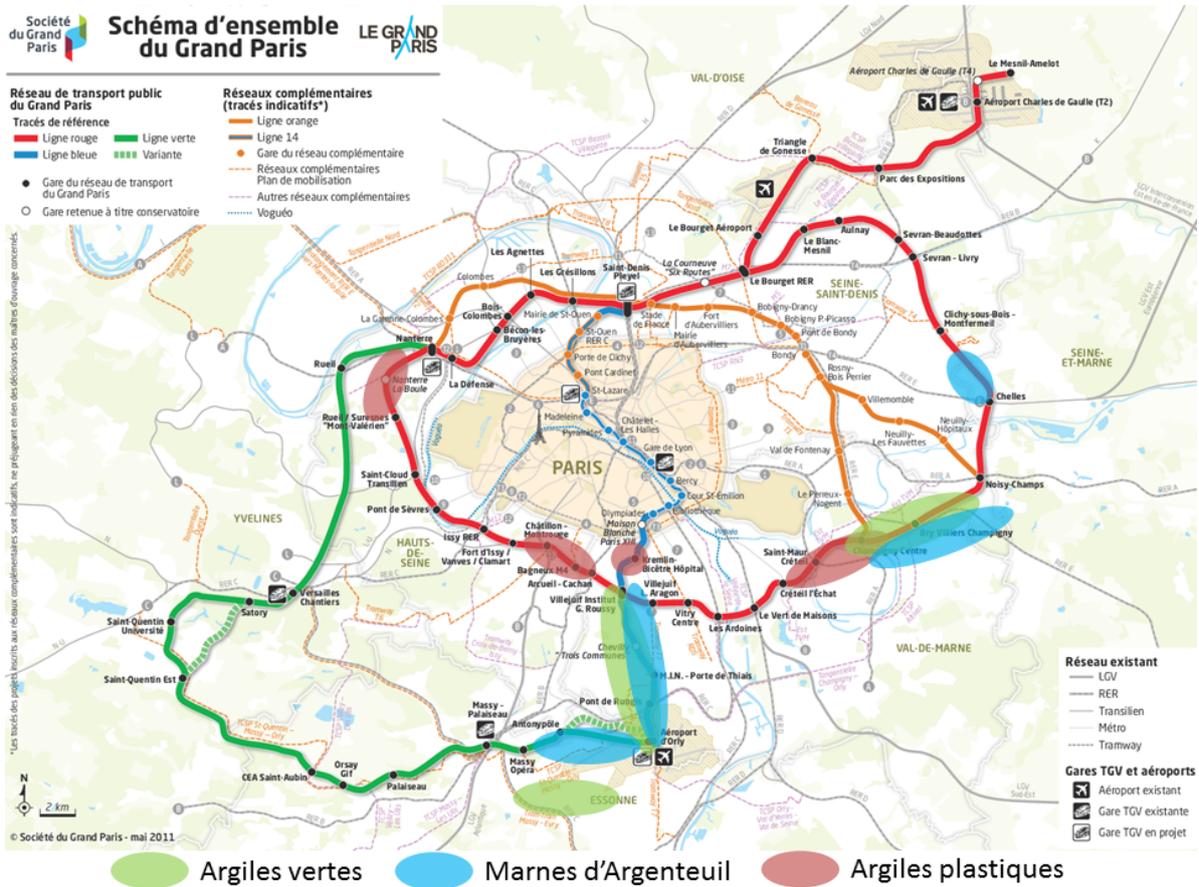


FIGURE III.2 – Localisation des secteurs argileux sur le tracé du Grand Paris Express (source : Société Grand Paris et (Antoinet, 2019)).

Les Sables de Fontainebleau hors nappe peuvent également poser problème (instabilité lors du passage du tunnelier, propagation des vibrations, augmentation de volume sous contraintes de cisaillement) (Fluteaux, 2013). Cet horizon est rencontré sur le tracé de la ligne 18 dans le secteur Massy – Saclay (voir figure III.3) et nécessite une attention particulière.

Il est également nécessaire de prendre en considération les risques liés à la dissolution de gypse qui peut avoir lieu en cas de circulation d'eau non saturée en sulfate (Magalhaes, 2010) et être responsable de déformations en surface comme celles identifiées sur les pentes de la Butte Montmartre (voir section 1.3.1). Ce risque est notamment présent dans le secteur Nord Est de la ligne 15 (voir figure III.3). Dans le cas de la Butte Montmartre, le gypse a été exploité, ce qui contribue à créer des phénomènes d'instabilités (Fluteaux, 2013) (Magalhaes, 2010). De manière générale, l'ensemble des exploitations de matériaux peuvent être à l'origine de déformation en surface, soit du fait de la présence de carrières souterraines non/mal remblayées, soit par la dégradation des caractéristiques mécaniques des terrains de couverture. Ces zones sensibles peuvent alors être affectées par la réalisation de travaux et nécessitent un suivi particulier.

En définitive, la géologie particulière du bassin Parisien nécessite une adaptation du tracé, des investigations géotechniques et un suivi constant lors de la réalisation des travaux (Balan, 2013).

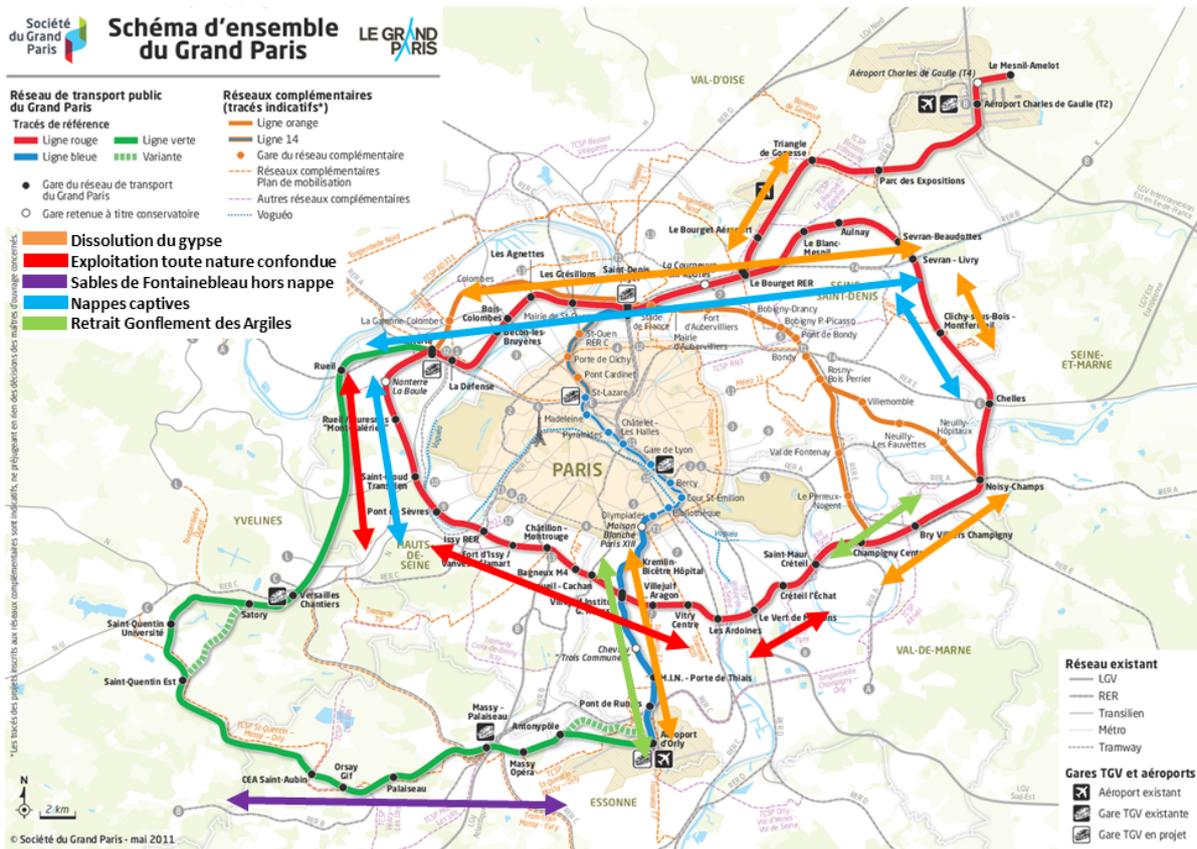


FIGURE III.3 – Localisation des principaux aléas géologiques (modifiée à partir de (Fluteaux, 2013))

Lorsque le tracé ne peut être détourné des secteurs sensibles, des traitements pour améliorer les propriétés mécaniques peuvent être opérés (voir section 1.1.2), mais sans certitude sur leurs effets. Il est également possible que les méthodes employées pour renforcer les sols telles que les injections (ciment, silice, résine, etc.) puissent être à l'origine de déformations en surface (Nahli et al., 2019).

Malgré la réalisation d'études préliminaires et l'adaptation des méthodes en fonction de la géologie locale, les travaux du Grand Paris, comme tout autre projet souterrain (voir section 1.1.2), sont sujets à de nombreuses incertitudes (Balan, 2013). Des auscultations topographiques et géotechniques sont donc nécessaires (voir section 1.2). De plus, la présence de déformations d'origines géologiques sur le tracé du projet peut rendre nécessaire la réalisation d'une auscultation préalable avant les travaux. Ces suivis sont réalisés soit par méthodes traditionnelles, qui sont souvent limitées à quelques mois, débutant à partir de la date d'attribution des marchés, soit par des méthodes satellitaires. La possibilité de revenir plusieurs années en arrière grâce aux archives de données offre ainsi l'opportunité d'établir un historique complet des déformations et d'être capable de distinguer les effets des travaux souterrains des déformations naturelles.

Une étude historique et un suivi mensuel couvrant le tracé du Grand Paris Express ont d'ailleurs été réalisés pour le maître d'ouvrage, la Société Grand Paris, dont les premiers résultats ont été

présentés dans Koudogbo et al. (Koudogbo et al., 2008). Cependant ces résultats ne sont pas transmis aux maîtres d'œuvre opérant sur les différents chantiers du Grand Paris. C'est pourquoi des suivis interférométriques ont été intégrés à plusieurs marchés d'auscultation, en fonction des ouvrages à réaliser et de leurs potentiels impacts en surface. C'est ainsi qu'AURIGAMI s'est vu confier depuis mars 2017 le suivi interférométrique du chantier de l'entonnement Ouest HSL-EOLE pour le groupement Alliance. Les spécificités rencontrées sur ce chantier sont présentées dans la section suivante.

3 Extension du RER EOLE

3.1 Description du projet

Parmi les différents travaux prévus dans le projet Grand Paris figure l'extension du RER E (EOLE). Le prolongement du RER E à l'Ouest correspond à un réaménagement de la ligne existante entre Mantes-la-Jolie et Nanterre, sur une longueur de 47 kilomètres, ainsi qu'à la création d'un nouveau tunnel d'environ 8 km entre La Défense et Haussmann Saint-Lazare (Binet, 2018). Ce projet nécessite la création de 2 gares souterraines (Porte Maillot et La Défense-CNIT) et d'une gare extérieure (Nanterre La Folie) (Verdaguer and Mallie, 2009) (Binet, 2018) (voir figure III.4). Un ouvrage souterrain de transition appelé entonnement (voir figure III.5) va également être construit pour assurer le raccordement entre la gare Haussmann-Saint-Lazare et le futur tunnel (SNCF, 2015). C'est dans le cadre de la réalisation des travaux de génie civil de cet entonnement qu'un suivi interférométrique sur la période Mars 2016/Mars 2017 a été réalisé, suivi d'une mise à jour régulière, d'abord mensuelle jusqu'au début des travaux souterrains puis bimensuelle.

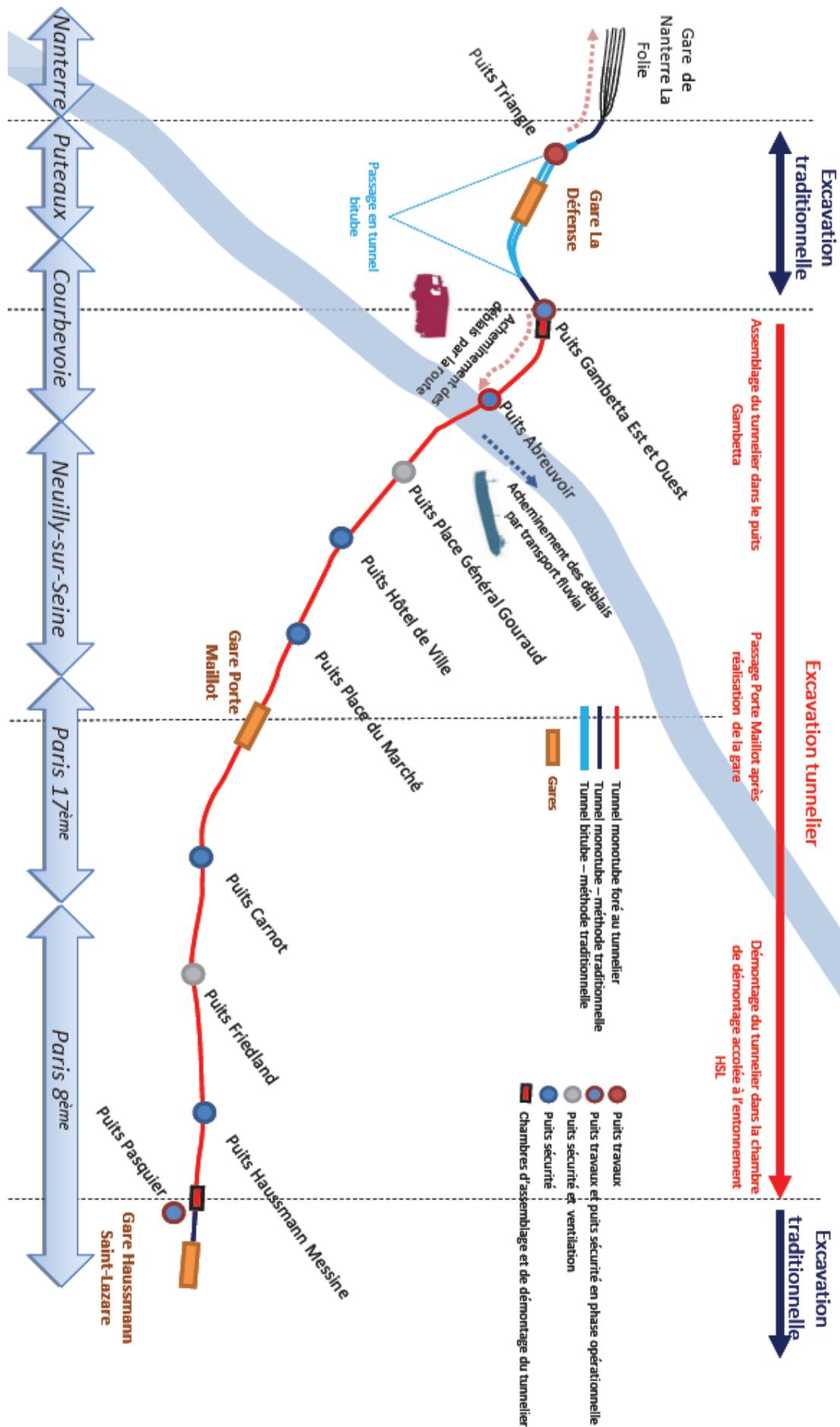


FIGURE III.4 – Schéma synthétique des ouvrages souterrains du projet EOLE (Source : SYSTRA)

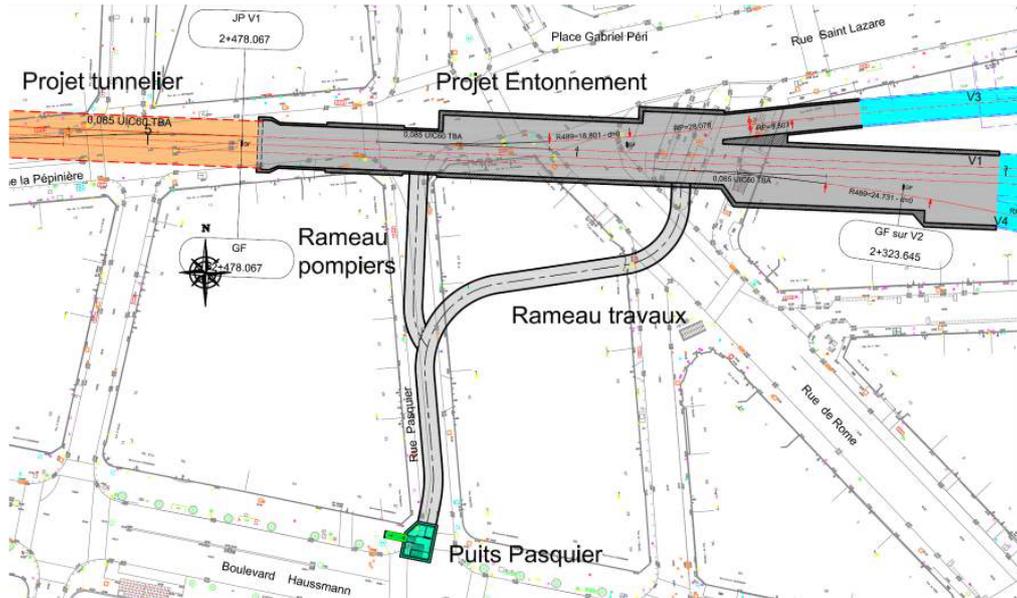


FIGURE III.5 – Schéma de l'entonnement Ouest Haussmann-Saint-Lazare et de ses puits de travaux, le puits Pasquier (Source : SED)

3.2 Adaptation des méthodes de creusement à la géologie et l'hydrogéologie locale

Parmi les différentes formations rencontrées sur le tracé de l'extension du RER E, certaines d'entre elles peuvent représenter un risque pour les ouvrages et le bâti environnant (voir section 2.2). On peut citer les Argiles Plastiques de l'Ypresien (responsables de phénomènes de retrait-gonflement), les Sables de Cuises (avec une présence possible de nappes captives) et les niveaux gypseux des Marnes et Caillasses du Lutécien (présentant un risque de dissolution) (SNCF, 2015) (voir section 2.2).

L'entonnement Ouest d'HSL et les gares souterraines de Porte Maillot et CNIT-La Défense sont situés dans les Calcaires Grossiers du Lutécien et dans les Sables de Cuise de l'Yprésien (SNCF, 2014), horizons dans lesquels se trouvent deux nappes d'eau souterraine (SNCF, 2015). La présence d'une nappe située au-dessus de ces futurs ouvrages creusés en méthode traditionnelle implique un rabattement de nappe sur ces trois sites par pompage sur une période de 4 à 5 ans (SNCF, 2015) (Binet, 2018) (SNCF, 2014). Le reste du tracé peut être excavé par un tunnelier, permettant ainsi de limiter les incidences du projet sur la **piézométrie** et les risques de tassements et de dissolution du gypse (SNCF, 2015).

Afin d'estimer le risque de tassement, des modélisations sont effectuées préalablement aux travaux. Dans le cas de l'extension du RER E, l'incidence maximale des rabattements sur la piézométrie est estimée en considérant tous les pompages simultanément (SNCF, 2014). Les ra-

battements de nappes de l'entonnement d'HSL, de la gare Porte Maillot et de la gare CNIT-La Défense vont influencer la piézométrie sur environ 8 km au Nord Est de Paris (SNCF, 2015), avec un abaissement maximal à proximité immédiate des ouvrages de prélèvements (10 à 20 m) pour atteindre environ 0.5 m à la limite Nord de Paris, au Sud de Saint-Denis (voir figure III.6 et III.7). Les effets seront limités à l'Ouest et au Sud du fait de la présence de la Seine, jouant un rôle de barrière (SNCF, 2015).

Les estimations de tassements réalisées lors de la phase d'étude d'impact des travaux montrent des tassements maximums d'ordre centimétrique (SNCF, 2014) (SNCF, 2015) et des tassements différentiels inférieurs à 1mm/m (SNCF, 2014), ce qui est inférieur aux seuils assurant la pérennité des ouvrages de surface (SNCF, 2015). Outre les effets immédiats de tassement dus aux variations de la piézométrie, d'autres phénomènes indirects peuvent être responsables de déformations en surface.

Bien que les formations argileuses soient sensibles aux variations des nappes liées aux rabattements, la profondeur des formations d'Argiles Plastiques est suffisante pour que cela n'affecte pas le bâti (SNCF, 2015). En revanche, ces variations de niveaux de nappes sont susceptibles d'entraîner une dissolution du gypse, par réactivation ou amplification du phénomène. Ainsi le risque principal de dissolution du gypse lié au projet EOLE vient des circulations potentiellement accrues, causées par le rabattement de nappe (SNCF, 2014). L'étude d'impact réalisée en 2011 par SNCF Réseau puis actualisée en 2014 (SNCF, 2014) a montré que les zones présentant un risque de dissolution de gypse lié aux pompages de rabattement correspondent au secteur des Batignolles et au secteur du cimetière de Montmartre (voir figure III.8 et figure III.9). L'étude d'impact réalisée par la SNCF a montré que les formations sus-jacentes, les Marnes et Marnes du gypse (e7a), les Calcaires de St Ouen (e6d) et les Sables de Beauchamp(e6a) (voir figure III.8), sont des formations présentant du gypse. Leurs eaux sont donc a priori chargées en sulfate (SNCF, 2014). Sachant que les vitesses de circulation attendues sont réduites, on s'attend à ce que le risque de dissolution soit limité.

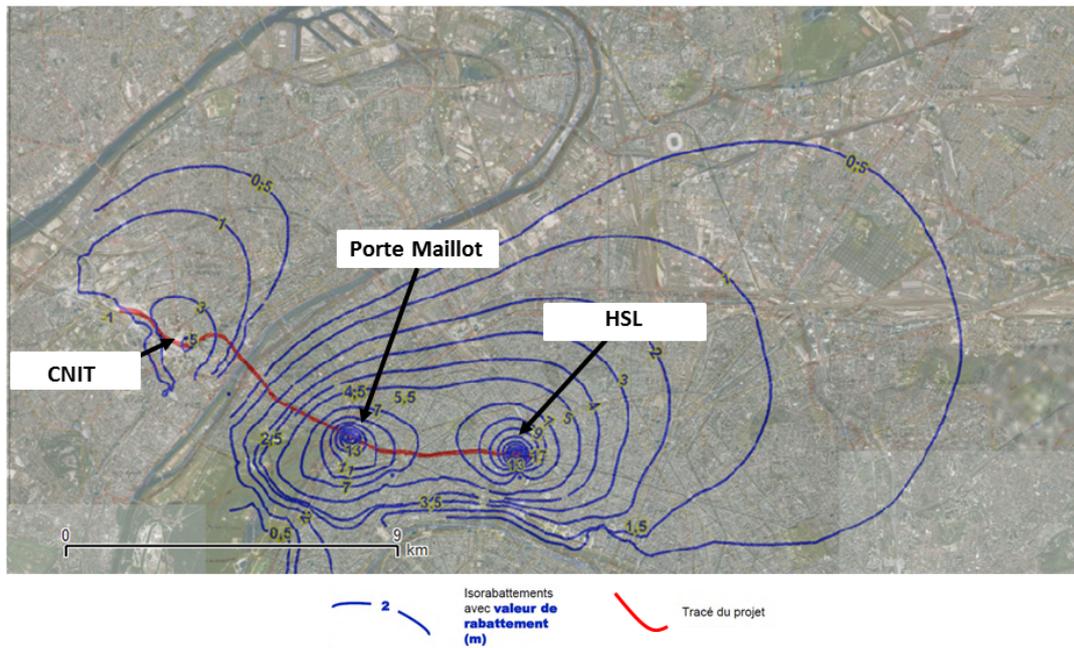


FIGURE III.6 – Carte d'isorabattement (estimation) dans la nappe des Sables du Cuisien liées aux pompages de rabattement de nappe pour la construction des ouvrages de l'entonnement de Haussmann-Saint-Lazare et des gares CNIT - La Défense et de Porte Maillot (version modifiée d'après (SNCF, 2014)).

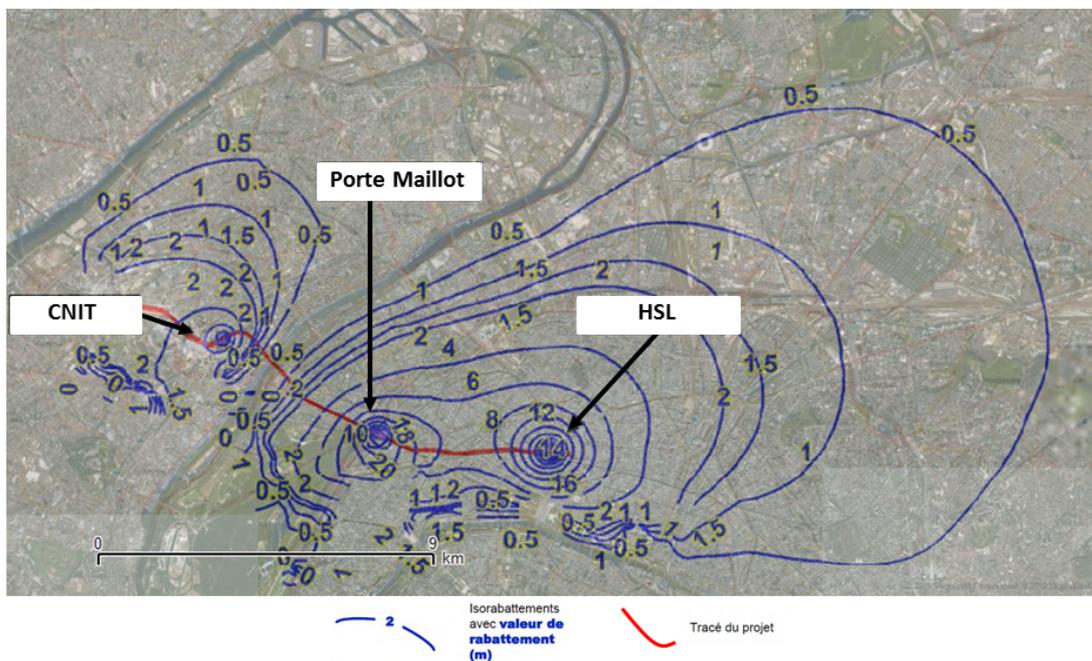


FIGURE III.7 – Carte d'isorabattement (estimation) dans la nappe des Calcaires Grossiers du Lutétien liées aux pompages de rabattement de nappe pour la construction des ouvrages de l'entonnement de Haussmann-Saint-Lazare et des gares CNIT - La Défense et Porte Maillot (version modifiée d'après (SNCF, 2014)).

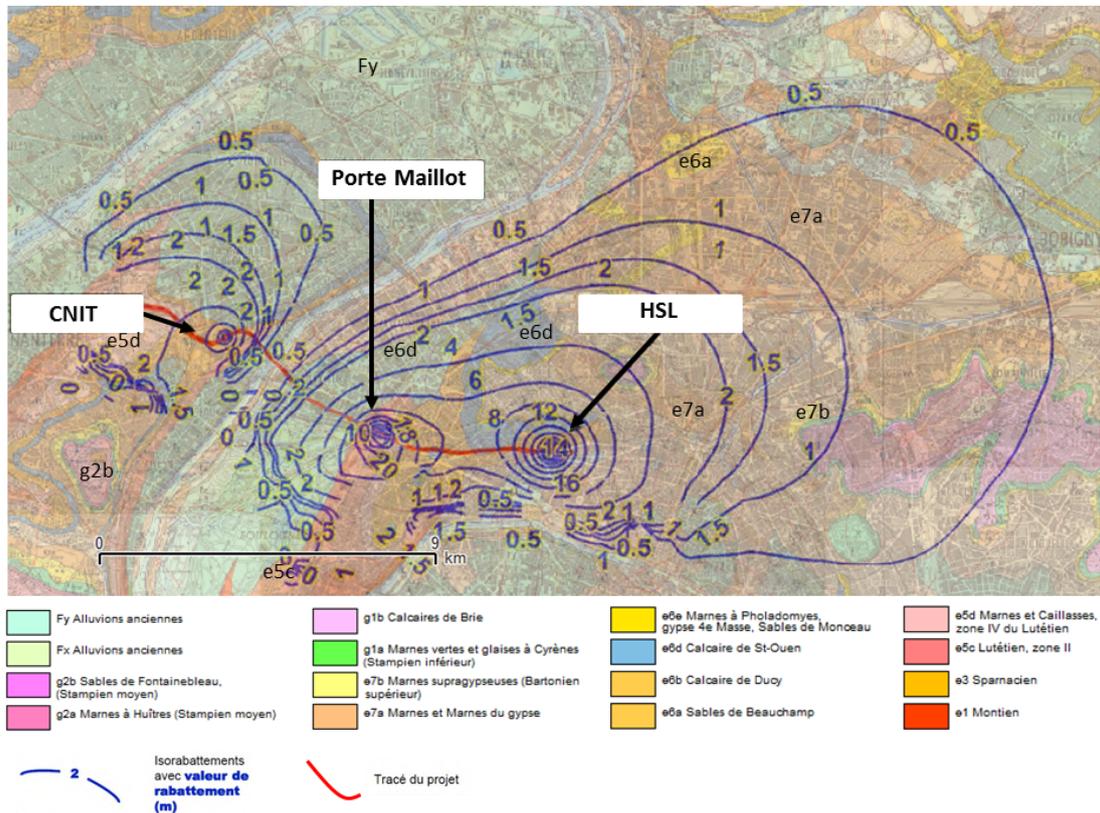


FIGURE III.8 – Extrait de la carte géologique de Paris (source BRGM) et isopièzes de rabattement dans la nappe des Calcaires Grossiers (version modifiée de (SNCF, 2014))

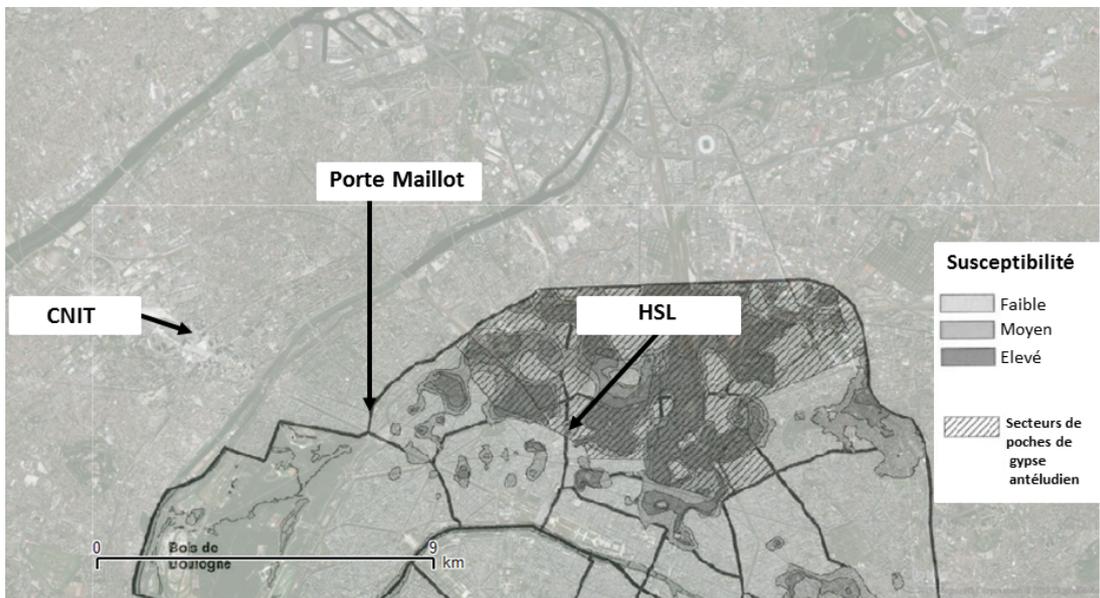


FIGURE III.9 – Carte de susceptibilité aux mouvements de terrain liés à la dissolution de gypse et plan de prévention du risque (source : (Magalhaes, 2010))

III Auscultation du Grand Paris à partir des données Sentinel-1

Cette section est consacrée au traitement des données Sentinel-1 à partir de différentes chaînes de traitement PS (mono-référence et multi-références) et a pour objectif de montrer le potentiel d'utilisation de ces données pour le suivi de grands chantiers, comme ceux opérés

dans le cadre du Grand Paris. Une première partie présente les trois chaînes de traitement mises en place qui reposent sur des hypothèses de déformations différentes. Pour démontrer le potentiel des données Sentinel-1, une seconde partie est consacrée à l'analyse de la qualité des résultats obtenus avec ces différentes chaînes de traitement. Une troisième partie présente les résultats obtenus sur le suivi du projet EOLE et plus particulièrement sur le suivi de l'entonnement HSL. Les mesures de déformation obtenues avec les différentes chaînes de traitement sur ce chantier sont présentées et sont comparées aux mesures issues de l'auscultation topographique terrestre réalisées par la société MIRE.

1 Chaînes de traitement

1.1 Stratégies mono-référence et multi-références appliquées au suivi de chantier

Dans le chapitre II, les résultats obtenus avec les données Sentinel-1 ont montré que l'utilisation d'une méthode multi-références en milieu périglaciaire permettait de maintenir une densité de diffuseurs cohérents suffisante pour estimer les instabilités des pentes environnantes, notamment grâce à l'utilisation de couples d'images présentant de petites bases temporelles. En milieu urbain, le maintien de la cohérence temporelle étant bien plus important qu'en zone de montagne, l'intérêt d'une approche multi-références semble moins évident. Cependant, les études présentées dans la section 1.3.1 ont montré que les approches PS classiques appliquées aux données de moyenne résolution souffrent de plusieurs limitations, principalement liées à la présence de délais atmosphériques ainsi qu'à l'utilisation de modèles de déformation linéaires gérant mal les mouvements non-linéaires. Le recours à une approche hybride PS-SBAS telle que l'approche multi-références IPTA pourrait offrir une alternative de traitement intéressante, en tirant à la fois profit des avantages des méthodes PS et de ceux des méthodes SBAS. Les éventuels avantages que peuvent apporter l'utilisation de bases temporelles très courtes ainsi que les stratégies employées pour estimer le délai atmosphérique avant ou après l'étape d'inversion en série temporelle par SVD sont discutés dans la section 3.1.

De plus, l'utilisation d'une approche multi-références dans un suivi de chantier permet de s'affranchir du choix de l'image maîtresse utilisée pour constituer les couples interférométriques. Or ce choix n'est pas anodin puisqu'il conditionne les écarts temporels des différents couples interférométriques. Dans une approche PS classique, les paires interférométriques sont construites à partir d'une unique image maîtresse, généralement choisie au centre de la pile d'images radar. Or pour le suivi de l'entonnement Ouest HSL, il a été demandé de réaliser un suivi historique d'un an, complété par des mises à jour régulières (mensuelles puis bimensuelles) pour suivre l'avancement des travaux pendant 4 ans, soit une période totale d'observation de 5 ans. Si l'on considère une approche PS classique, deux possibilités existent concernant le choix de l'image maîtresse lors des différentes mises à jour. La première consiste à conserver la même image maîtresse que celle choisie pour l'étude historique. La seconde consiste à changer d'image maîtresse, de façon plus ou moins régulière. Dans le premier cas, en prenant l'exemple du chantier sur HSL, l'asymétrie du réseau d'interférogrammes augmente au fur et à mesure des mises à jour, menant à l'obtention de couples d'images avec des intervalles de temps supérieurs à 4 ans. D'une part, les interférogrammes qui en résultent sont plus bruités que ceux obtenus avec une image maîtresse choisie au centre de la pile, d'autre part les déformations cumulées observées sont plus importantes, ce qui augmente le risque d'erreur de déroulement.

Dans la seconde situation, à chaque changement d'image maîtresse, les couples formés sont différents de ceux obtenus lors de la mise à jour précédente. En théorie, sur une même période d'observation et avec les mêmes images radar, les estimations de déplacement sont supposées être identiques en première approximation. En réalité, les séries temporelles de déplacement obtenues peuvent différer, du fait de la précision de la mesure obtenue et de la présence de différents artefacts (voir section 1.4). Or pour des suivis de chantier tels que ceux réalisés sur le projet EOLE lors des rabattements de nappe, l'un des objectifs est de détecter d'éventuels changements de tendance de déformation. Ces changements peuvent être causés par des phénomènes autres que la compaction/décompaction des sols directement provoqués par les changements de la **piézométrie**, tels que des phénomènes de dissolution de gypse (voir section 2.3). Il est plus aisé de détecter des changements de tendance si les mises à jour consistent à ajouter des incréments aux séries temporelles plutôt que de les modifier dans leur intégralité, même si ces modifications sont minimales. Les changements dans les séries temporelles causés par le changement d'image maîtresse, dans une approche mono-référence, pourraient rendre la lecture des résultats plus difficile, notamment pour des non-initiés, ce qui n'est pas le cas pour dans une approche multi-références.

En définitive, il semble y avoir plusieurs avantages à utiliser une approche multi-références pour des suivis urbains tels que celui réalisé pour le chantier de l'entonnement Ouest HSL. Il a donc été choisi de suivre le chantier par une approche multi-références, dont la chaîne de traitement est présentée dans la section 3.1.3. Deux versions de cette chaîne y sont présentées avec différentes propositions de filtrages. Afin de réaliser une comparaison entre une approche PS classique et une approche PS multi-références, une chaîne mono-référence a également été proposée et est présentée dans la section 3.1.4.

1.2 Étapes de pré-traitement

Pour des études en milieu urbain comme celles réalisées dans le cadre du projet Grand Paris, il est possible d'utiliser l'ensemble des données disponibles, soit une image tous les 6 jours pour Sentinel-1. En effet, dans un tel contexte, on ne rencontre pas de conditions responsables d'une décorrélation temporelle généralisée, comme cela peut être le cas avec des chutes de neige en zone de montagne (voir chapitre II).

En revanche, il peut arriver qu'une image ne soit pas disponible suite à un problème d'acquisition ponctuel. Cela a été le cas par exemple le 24 Mai 2019 à cause d'une anomalie rencontrée sur le capteur SAR. Il est possible d'en être tenu informé en consultant les informations mises en lignes par l'ESA. Jusqu'à présent, les problèmes d'acquisition se sont avérés extrêmement rares. A noter qu'un des avantages à travailler avec une constellation de deux satellites au lieu d'un seul est que si un problème est rencontré avec l'un d'eux, il est toujours possible d'utiliser les données du second satellite. En revanche, il est plus fréquent que les données ne soient pas en ligne dans le délai habituel de quelques heures après leur acquisition, suite à des maintenances effectuées sur le service de base de données.

Les résultats présentés dans les sections suivantes ont été obtenus à partir de 4 jeux de données

Jeux de données	Géométrie d'acquisition	Nombre de bursts	Début	Fin	Nombre d'images	MNT	Données orbitales
1	Ascendante	2	28/09/2016	27/04/2018	95	IGN 5 m	standard
2	Descendante	1	27/02/2015	12/03/2017	60	SRTM 30 m	standard
3	Descendante	1	05/03/2016	30/06/2019	169	SRTM 30 m	standard
4	Descendante	2	25/09/2016	26/11/2018	131	IGN 5 m	RESORB

TABLE III.1 – Tableau récapitulatif des jeux de données utilisées

Sentinel-1, pour un total de 95 images ascendantes (orbite relative 59) et 227 images descendantes (orbite relative 8, voir figure III.10). L'ensemble des jeux de données utilisés est présenté dans le tableau III.1. Les jeux de données 2 et 3, constitués d'images descendantes formées par un seul burst couvrent la partie de Paris située au Nord de la Seine (voir figure III.11). L'intérêt d'utiliser un seul burst est que cela réduit le temps de calcul et la place de stockage prise par chaque mise à jour réalisée pour le suivi du chantier HSL (environ 60 Go avec un burst). Un jeu de données complémentaire a été produit à partir de deux bursts afin de réaliser une analyse des instabilités sur l'intégralité de l'agglomération Parisienne. A noter que le MNT utilisé pour recalibrer les jeux de données 1 et 4 correspond à un MNT de 5 m de résolution, semblable à celui utilisé dans le chapitre II fourni par l'IGN et couvrant les départements 75-77-78-92-93-94-95. Les jeux de données 2 et 3 sont quant à eux traités avec un MNT SRTM 30 m. Contrairement aux autres jeux de données, le jeu 4 n'utilise pas les fichiers orbitaux d'origine mais les fichiers orbitaux restitués, les fichiers RESORB (voir section 1.3.4). Dans le cadre du suivi du chantier HSL, l'objectif est de traiter les mises à jour le plus rapidement possible. Le choix a donc été fait de ne pas attendre que des données orbitales plus précises soient téléchargeables. Le traitement du jeu de données 4 avec des données orbitales plus précises offre l'opportunité d'estimer le gain de précision sur les résultats par rapport à des données moins précises mais disponibles dans un délai plus court.

i Sélection des cibles cohérentes

Les cibles cohérentes ont été sélectionnées avec la même stratégie que celle présentée dans la section 3.2, à savoir par union des listes de diffuseurs sélectionnés à partir des méthodes de dispersion d'amplitude et de corrélation spectrale, et en utilisant des seuils comparables. La sélection a été validée lorsque les seuils utilisés fournissent une densité au-delà de laquelle un nombre importants de diffuseurs situés dans les zones végétalisées se retrouvent, à tort, sélectionnés. Ainsi, les diffuseurs ont été sélectionnés avec un seuil sur le coefficient de corrélation spectrale C égal à 0.3 et sur le rapport Moyenne sur Ecart-type RME égal à 0.5 avec la méthode de corrélation spectrale. De même, la sélection à partir de la méthode de dispersion d'amplitude a été réalisée en appliquant un seuil sur l'indice de dispersion D_a de 0.6. A noter que les mêmes seuils ont été utilisés pour chaque mise à jour. Les résultats de la sélection des cibles cohérentes sont présentés dans la section 3.2.1.

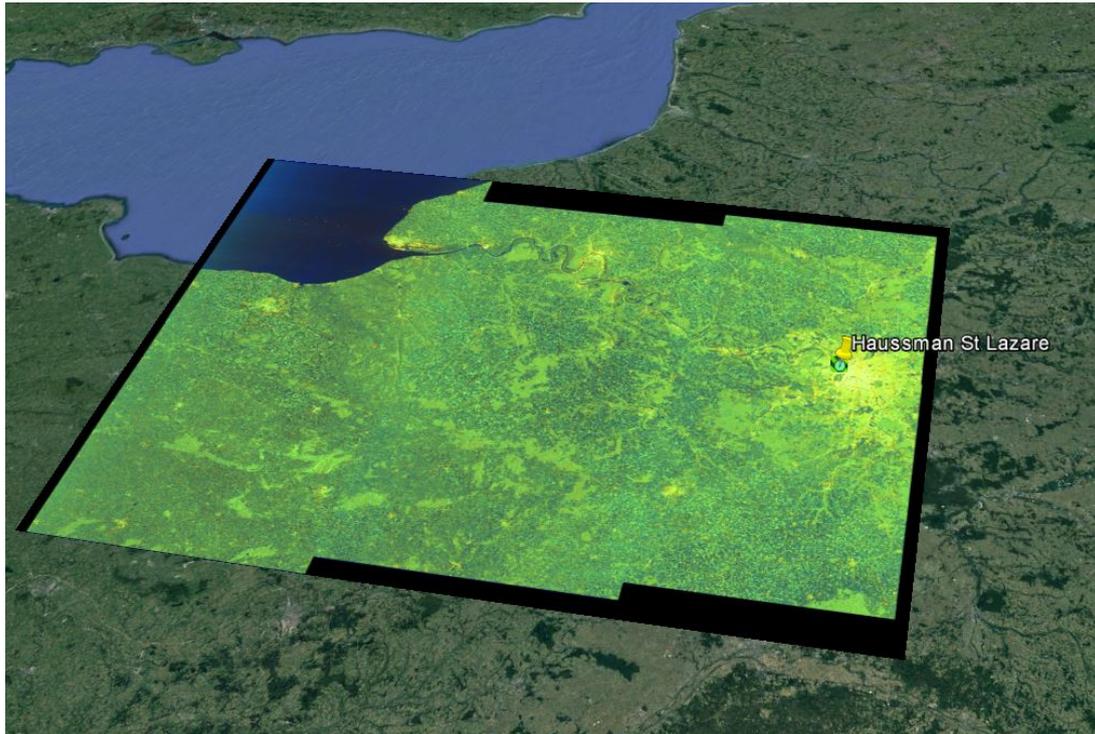


FIGURE III.10 – Emprise des images Sentinel 1 de l'orbite relative 8 acquises en trajectoire descendante (05/03/2016). Les images acquises sur cette orbite relative couvrent l'intégralité de l'agglomération Parisienne et la quasi majorité du projet Grand Paris



FIGURE III.11 – Moyenne temporelle des intensités de la pile descendante construite à partir d'un seul burst (05/03/2016-30/06/2019). L'image ortho-rectifiée montre qu'un seul burst permet de surveiller la partie située au Nord de la Seine ainsi que les méandres de la Seine à l'Ouest, soit l'intégralité du tracé du projet EOLE.

1.3 Chaîne de traitement multi-références

La chaîne de traitement multi-références IPTA (voir section 1.4.5) présentée dans la figure III.12 est une adaptation de celle présentée dans la section 1.4.5. Dans cette figure, Φ_{diff} correspond à la phase interférométrique différentielle, Φ_{unw} à la phase déroulée de la pile multi-références, $\Phi_{unw_{corr}}$ à la phase interférométrique déroulée après suppression de la composante topographique résiduelle et $\Phi_{unw_{monocorrigée}}$ à la phase déroulée mono-référence après suppression de la composante atmosphérique. Φ_{res} décrit la phase résiduelle issue de la régression appliquée à la phase interférométrique. $\Phi_{res_{SVD}}$ correspond à la phase résiduelle issue de l'inversion en série temporelle par SVD. Φ_{atm_i} correspond à l'estimation initiale de composante de phase atmosphérique et $\Phi_{atm_{i-tot}}$ à la somme des itérations. H représente la correction de hauteur et ΦH la phase simulée de H . Enfin V_{phase} est utilisée pour décrire la vitesse de phase estimée en *radians/an*. Cette vitesse est estimée à partir d'une régression linéaire sur les séries temporelles. Les étapes clés précédant l'estimation de la vitesse de formation LOS sont présentées ci-dessous.

Cette nouvelle chaîne reprend la même stratégie basée sur l'utilisation de couples d'images petites bases temporelles et comprenant une étape d'inversion en série temporelle par SVD. Cependant, le contexte n'étant pas le même, certaines étapes peuvent s'avérer inutiles ou nécessitent d'être modifiées. En effet, le relief rencontré le long du tracé du Grand Paris correspond à celui d'un bassin sédimentaire, c'est-à-dire qu'il est limité au regard du relief d'un milieu périglaciaire. Les étapes de correction de la phase atmosphérique dépendante du relief ne sont donc pas nécessaires.

Dans cette étude, seuls les interférogrammes dont la base temporelle est inférieure ou égale à 18 jours sont utilisés. Les mouvements attendus étant lents (de quelques millimètres par an d'après les études d'impacts réalisées en amont des travaux), on peut considérer la contribution de la composante de déformation comme minime dans le signal interférométrique. Il est alors possible de réaliser, pour chaque candidats PS d'un interférogramme i , une régression uniquement en fonction de la base spatiale à partir d'un modèle de phase du type $a_0 + a_1 B_{perp}[i]$, sans prendre en compte l'évolution temporelle de la phase. Cette étape permet ainsi de séparer la composante de phase topographique des autres composantes. À noter qu'en cas d'apparition de déplacements rapides (plusieurs centimètres par mois), les écart-types des résidus de phase des diffuseurs seraient élevés. Il est donc important de contrôler la valeur des résidus après chaque régression. De plus, la chaîne de traitement intègre la création de masques prenant en compte les valeurs de ces écart-types. La suppression soudaine et localisée d'un groupe de diffuseurs au cours des mises à jour serait ainsi facilement identifiable par comparaison avec les mises à jour précédentes. Il serait alors nécessaire de choisir un modèle de phase prenant en compte la dépendance temporelle (modèle du type $a_0 + a_1 B_{perp}[i] + a_2 \Delta T[i]$).

À la suite de la suppression de la composante topographique, le signal interférométrique doit encore être corrigé de la composante atmosphérique. Or, le délai atmosphérique est considéré spatialement comme un signal à basse fréquence en raison de sa longueur de corrélation d'environ 1 km (Hanssen et al., 1998). En revanche, sa contribution dans le temps pour un pixel donné est considérée comme du bruit blanc (Mora et al., 2003). Comparativement, les mouvements linéaires présentent une fenêtre de corrélation plus étroite dans l'espace et ont un comportement passe-bas dans le temps (Mora et al., 2003). Ainsi, lorsqu'on traite des séries temporelles, il est

possible d'éliminer le délai atmosphérique en combinant un filtrage spatiale passe-haut et un filtrage temporel passe-bas. Dans la chaîne mono-référence (voir section III.13), cette étape de filtrage spatio-temporel est appliquée sur les résidus de phase issus des régressions 2D. Cependant, lorsqu'on traite des séries multi-références, on ne peut pas appliquer directement de filtrage temporel. Plusieurs approches sont alors possibles pour estimer la composante atmosphérique. La chaîne de traitement IPTA permet d'estimer le délai atmosphérique soit avant l'inversion en séries temporelles par filtrage spatial (option A de la figure III.12), soit après l'inversion par filtrage spatio-temporel (option B). Ces approches seront respectivement appelées approche A et approche B.

Dans l'approche A, il est possible qu'une partie du signal de déplacement soit supprimée, la distance de corrélation étant variable selon les phénomènes rencontrés (Raucoules et al., 2007). Une solution est de masquer les zones de déformations rapides. Cela peut être réalisé à partir d'une première inversion au cours de laquelle la vitesse de phase (notée V_{phase} dans la figure III.12) est estimée. L'avantage de l'approche A est qu'il n'y a pas de filtrage temporel, ce qui permet de travailler avec des jeux de données réduits. L'inconvénient est que les déformations lentes et spatialement homogènes peuvent être supprimées du signal de déplacement. Dans le cas des rabattements de nappe, il est possible que les déformations les plus lentes soient sous-estimées. Afin de vérifier cette hypothèse, l'approche B a également été utilisée, dans laquelle un filtrage temporel est effectué avec un filtrage spatial passe-haut (fenêtre de corrélation de 1 km x 1 km) suivi d'une régression linéaire avec une fenêtre temporelle de 365 jours. La phase filtrée est alors soustraite à la phase initiale et le résultat de cette opération est ensuite filtré spatialement afin de fournir une estimation du délai atmosphérique.

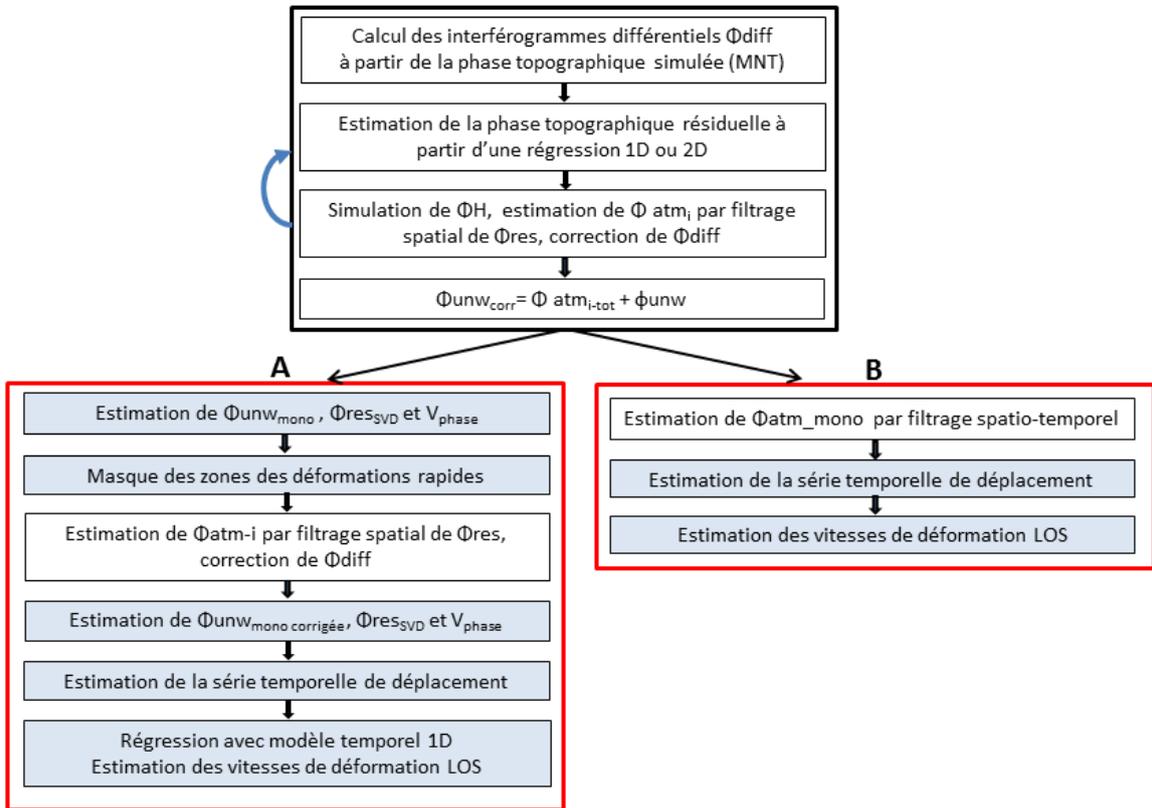


FIGURE III.12 – Chaînes de traitement IPTA multi-références A et B simplifiées, proposées pour le suivi des travaux du Grand Paris. Les cases blanches décrivent les étapes réalisées sur une série multi-références, les cases bleutées celles réalisées sur une série temporelle mono-référence et la flèche bleue indique que le processus est effectué de manière itérative. L'encadré noir correspond aux opérations communes des chaînes A et B et les encadrés rouges les opérations propres à chacune des chaînes.

1.4 Chaîne de traitement mono-référence

Afin de comparer les résultats issus d'une approche multi-références avec ceux obtenus par une approche PS plus classique, une chaîne de traitement mono-référence a également été développée. Ses principales étapes sont résumées dans la figure III.13. Dans cette figure, Φ_{diff} correspond à la phase interférométrique différentielle, Φ_{res} décrit la phase résiduelle issue de la régression appliquée à la phase interférométrique. Φ_{atm} correspond à l'estimation de la composante atmosphérique, H à la correction de hauteur et Φ_H la phase simulée de H . Les régressions effectuées pour rechercher les dépendances spatiale et temporelle de la phase interférométrique permettant d'estimer les corrections de hauteur et les vitesses de déformation se basent sur l'utilisation de régression 2D (régression spatiale et temporelle) avec un modèle de phase du type $a_0 + a_1 B_{perp}[i] + a_2 \Delta T[i]$.

Dans cette approche, l'estimation de la composante atmosphérique est réalisée en filtrant spatialement et temporellement les résidus issus des régressions 2D. Dans cette approche, les régressions linéaires sont réalisées en fonction de l'intervalle temporel et de la ligne de base perpendiculaire. Ainsi, à chaque régression, les résidus de phases incluent la phase orbitale résiduelle, le délai atmosphérique, la composante non-linéaire de déplacement et le bruit. En utilisant un filtrage

progressif par itération, cela permet d'obtenir une estimation de la série chronologique des déplacements plus précise (Yan et al., 2012). Les filtres spatio-temporels appliqués aux résidus de phase correspondent à ceux utilisés dans la chaîne multi-références.

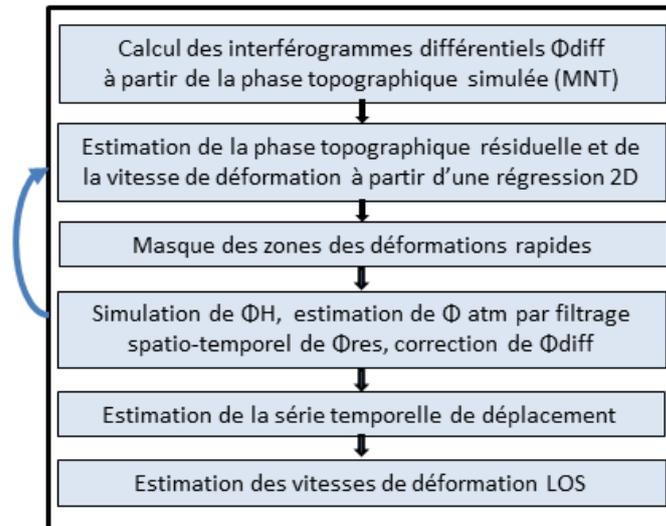


FIGURE III.13 – Chaîne de traitement mono-référence IPTA simplifiée proposée pour le suivi des travaux du Grand Paris. La flèche bleue indique que le processus est effectué de manière itérative.

2 Résultat des traitements PS

2.1 Analyse de la qualité des résultats

Avant de présenter les mesures de déplacement obtenues avec les différents jeux de données Sentinel-1, il convient de s'intéresser à la qualité du déroulement de phase et des paramètres estimés au cours des traitements PS. Dans le chapitre II, le contrôle de qualité s'est concentré sur la correction topographique et la localisation des diffuseurs cohérents à partir d'indicateurs tels que l'écart-type de la distribution des lignes de base spatiale (section 3.3) et sur une vérification à l'aide de données LiDAR. Dans cette partie, nous disposons d'informations sur les vitesses de déplacements grâce aux études antérieures (voir section 1.3.1) et grâce aux mesures d'auscultation terrestre réalisées sur le chantier HSL. Le contrôle de qualité est donc axé sur la précision de la mesure de déplacement et sur son évolution en fonction du nombre d'images radar et des données externes utilisées. La comparaison entre les mesures InSAR et les mesures in-situ est présentée dans la section 3.3.3.

i Densité de diffuseurs cohérents

La densité de diffuseurs cohérents (CS) sélectionnés est un des facteurs impactant la qualité des résultats d'un traitement PS, en particulier sa capacité à dérouler la phase interférométrique correctement. Ainsi, l'analyse des densités initiales fournit une bonne indication sur le potentiel de réalisation d'un suivi PS. Et ce bien que la liste initiale de PS sélectionnés soit susceptible d'évoluer au cours du processus de traitement IPTA (par suppression des diffuseurs dont les

écart-types de la phase résiduelle des régressions sont trop élevés, voir section 1.4.5).

Les densités obtenues à partir des 2 méthodes et par union des 2 listes sont présentées dans la figure III.14. Cette figure présente l'évolution de la densité de diffuseurs sélectionnés au fur et à mesure de l'ajout d'images, par incrément de 20 images (équivalent à 4 mois d'observation pour une acquisition tous les 6 jours). A noter que la sélection n'a pas été réalisée sur la totalité de l'image radar mais sur une zone d'environ 450 km^2 centrée sur le Nord de la ville de Paris (voir figure III.15). La densité totale varie d'environ 1800 à $1500 \text{ CS}/\text{km}^2$ (voir figure III.14) en passant de 20 images avec 7 mois d'observation à 160 images avec 3 ans et trois mois d'observation. Les densités obtenues avec les deux méthodes de sélection (figure III.14) présentent des évolutions similaires, hormis pour le passage de 20 à 40 images. La densité décroît sur cet incrément avec la méthode de corrélation spectrale alors qu'elle augmente avec la méthode de dispersion d'amplitude, confirmant que cette dernière est moins adaptée aux périodes d'observation réduites, ici inférieure à un an (voir section 1.5.2).

Une autre sélection de diffuseurs cohérents a été effectuée sur une période de 3 ans et 3 mois mais en n'utilisant qu'une image par mois, soit 39 au lieu de 160, l'objectif étant d'examiner la variation du nombre de diffuseurs. Si la baisse de densité est bien due à l'évolution des réponses des diffuseurs au cours du temps, on s'attend à observer une diminution comparable avec les deux séries de données correspondant à une période égale. Les résultats sont présentés dans le tableau III.2 et comparés aux densités obtenues avec 20 images (figure III.14) sur une période de 8 mois, allant de mars 2016 à Novembre 2016 (à noter que les images Sentinel-1B ne sont disponibles que depuis Octobre 2016).

Comparativement à la période plus courte, on observe bien une baisse de densité des CS pour les 2 jeux de données de 39 et 160 images, s'expliquant par une modification partielle ou totale de la réponse de ces diffuseurs au cours du temps. Les évolutions de surface peuvent être nombreuses en zone urbaine (allant de simples échafaudages masquant temporairement la réponse des murs aux travaux de terrassements sur des secteurs en construction). On notera par ailleurs que la perte est plus importante sur la série de 160 images. Cela peut s'expliquer par le fait que les seuils de sélection sont appliqués sur des indicateurs calculés à partir de moyennes (coefficient de corrélation spectrale C , rapport Moyenne sur Écart-type RME et dispersion d'amplitude D_a). Plus les diffuseurs sont observés dans des situations défavorables (variation de l'intensité, perte de cohérence spectrale) et plus la moyenne des indicateurs sera faible.

En définitive, les densités de CS obtenues à partir des listes initiales sont supérieures à $1500 \text{ CS}/\text{km}^2$ sur une zone de sélection comprenant plusieurs secteurs boisés (Bois de Boulogne, Parc Georges-Valbon, etc.), ce qui peut être considéré comme une densité élevée pour des données radar de moyennes résolution (Raucoules et al., 2007). De plus, la densité obtenue après traitement est supérieure à $1800 \text{ CS}/\text{km}^2$ ($1827 \text{ CS}/\text{km}^2$ avec 169 images) sur une zone d'environ 100 km^2 (encadré rouge, figure III.15). La densité obtenue sur Paris intramuros dépasse les $2000 \text{ CS}/\text{km}^2$ avec le jeu de données 4 et atteint même les $4000 \text{ CS}/\text{km}^2$ dans un rayon de 2 km centré sur le chantier HSL avec les 169 images du jeu de données 3.

Nombre d'images	Sélection par corrélation spectrale	Sélection par dispersion d'amplitude	Union des sélections
39 (1/mois)	-10.4%	-15.5%	-11.9%
160 (1 tous les 6 jours)	-12.7%	-16.3%	-14.5%

TABLE III.2 – Estimation de la perte de densité de CS (%) par rapport aux densités obtenues avec 20 images (8 mois). Comparaison entre les densités obtenues avec une couverture temporelle de 3 ans et 3 mois à partir de 39 et 160 images.

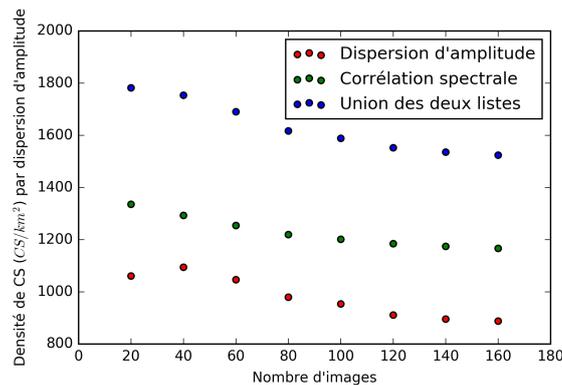


FIGURE III.14 – Densité de diffuseurs cohérents sélectionnés par la méthode de dispersion d'amplitude, par la méthode de corrélation spectrale et par union des deux méthodes

ii Analyse des résidus et des écart-types de phase

La qualité du déroulement de phase et des paramètres estimés dépend de la réussite des différentes opérations réalisées en amont au cours de la chaîne de traitement, en particulier la régression linéaire. Une façon de contrôler la qualité du traitement PS est donc d'évaluer le résultat de ces opérations à partir d'indicateurs comme l'écart-type de la phase résiduelle, c'est-à-dire la variabilité par rapport à la moyenne. Au cours de chaque traitement, la phase résiduelle a été contrôlée visuellement (vérification de l'absence de saut de phase indiquant une erreur de déroulement, rampes, perte importante de CS, etc.).

L'inspection de la phase résiduelle permet notamment de détecter des problèmes et de vérifier si la régression linéaire s'est bien passée, validant le choix des paramètres. Un exemple de motif de rampe orbitale observée sur un interférogramme différentiel est présenté dans la figure III.15. La figure III.15.A présente l'interférogramme 23/04/2017-11/05/2017 provenant du jeu de données 3 et la figure III.15.D présente l'interférogramme construit avec les mêmes dates d'acquisition mais provenant du jeu de données 4. Ce dernier utilisant des données orbitales plus précises, la suppression des 2 franges prouve l'origine orbitale de celles observées sur la figure III.15.A. Notons qu'une variation de la phase interférométrique de 0 à 3 radians d'Est en Ouest est visible sur l'interférogramme de la figure III.15.D. Or les données orbitales utilisées ne correspondant pas aux données les plus précises (voir section 1.3.4), la présence de petites erreurs orbitales est encore possible. La figure III.15.B correspond à la phase résiduelle à l'issue de la première étape

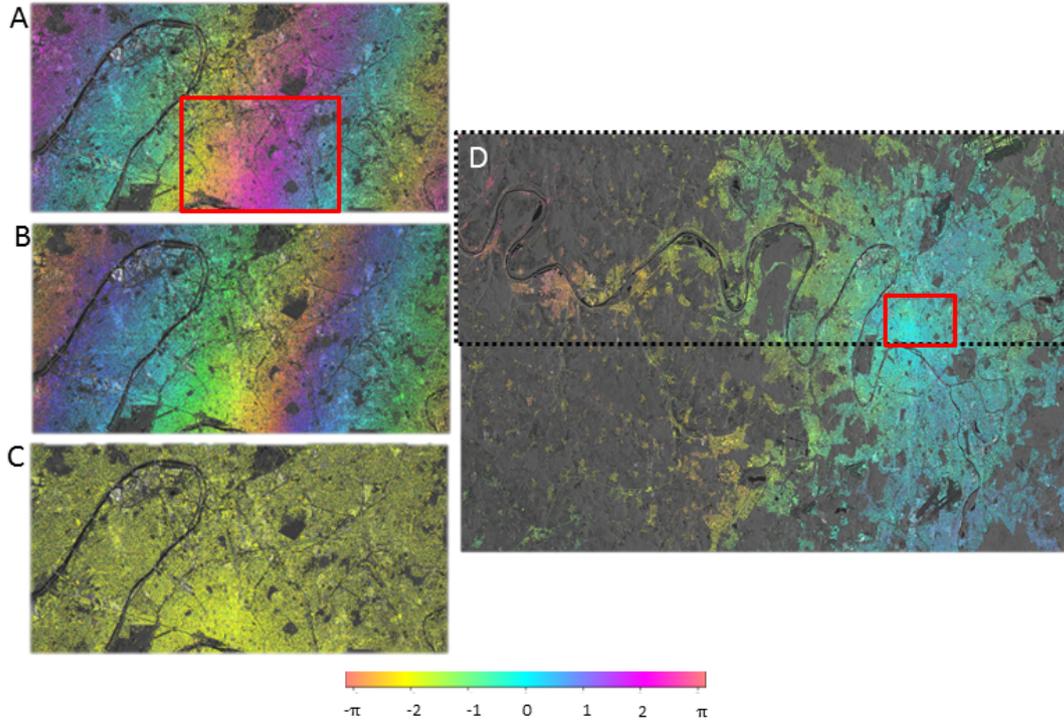


FIGURE III.15 – Interférogramme 23/04/2017 - 11/05/2017, phase résiduelle et phase corrigée (délai atmosphérique, erreurs orbitales et topographiques résiduelles) après la première étape de régression de la chaîne multi-références A. A) Interférogramme (jeu de données 3), B) phase résiduelle correspondante (jeu de données 3). C) phase interférométrique corrigée (jeu de données 3). D) Interférogramme du jeu de données 4. Les données sont présentées dans leur géométrie d'origine mais sont retournées, pour avoir l'Est et l'Ouest orientés correctement. Les rectangles noirs correspondent à l'emprise d'un burst. L'encadré rouge correspond à la zone utilisée pour la construction des histogrammes de la phase résiduelle.

de régression de la chaîne multi-références A avec un modèle de phase spatial (proportionnel à la ligne de base spatiale perpendiculaire). Cette figure montre que la phase orbitale se retrouve dans la phase résiduelle. Enfin, la figure III.15.C montre une phase interférométrique relativement constante, preuve que la phase orbitale résiduelle a bien été supprimée.

La phase résiduelle est ensuite vérifiée plus précisément en estimant son écart-type σ tel que :

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{i,j} - \bar{x}_i)^2}{n}} \quad (\text{III.1})$$

où σ_i est l'écart-type de la phase résiduelle pour le diffuseur i , $x_{i,j}$ est la valeur de la phase résiduelle du diffuseur i du couple interférométrique j , et \bar{x}_i la valeur moyenne de la phase résiduelle du diffuseur i sur l'ensemble des n couples interférométriques.

Il est en effet nécessaire de surveiller la valeur des écart-types pour contrôler la qualité des résultats. Une valeur élevée pouvant être due à une erreur de déroulement ou à la présence de déformations non-linéaires. (Yan et al., 2012) ont montré qu'un seuil de 1.1 rad. sur l'écart-type

des régressions linéaires réalisées sur données synthétiques permettait de retrouver les vitesses linéaires simulées avec une précession d'1mm/an. Cette étude a également montré que les résultats obtenus sur les zones présentant des déformations non-linéaires présentaient un écart-type supérieur à ce seuil.

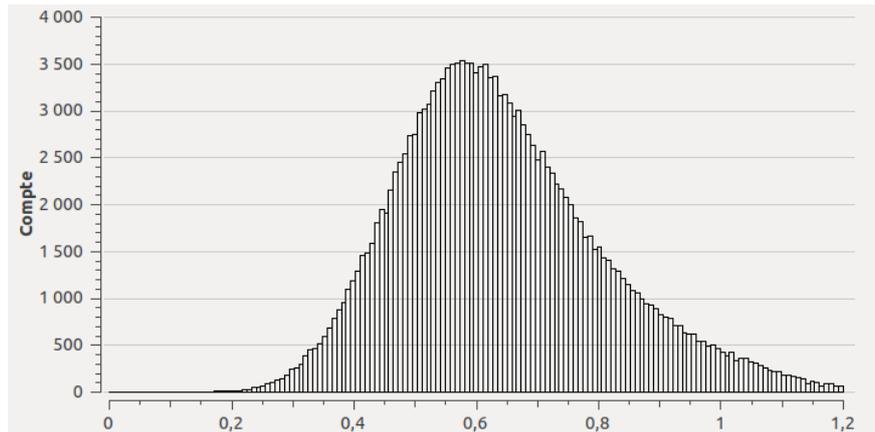
Afin d'assurer la qualité des traitements tout en essayant de conserver les composantes de déplacements non-linéaires, il a été choisi d'appliquer un seuil de 1.2 rad. sur l'écart-type des résidus de régression. L'objectif est de supprimer au fur et à mesure de l'avancement des traitements les diffuseurs ayant un écart-type trop élevé et qui pourraient dégrader le résultat final. En plus de fixer un seuil, une analyse des écart-types obtenus à chaque étape du traitement PS est réalisée. Deux exemples d'histogrammes des écart-types de régression de la chaîne multi-références A appliquée aux jeux de données 3 et 4 sont présentés dans la figure III.16. L'histogramme du jeu de données 3 correspond aux résultats de la mise à jour couvrant la période 05/03/2016 - 26/11/2018. Dans un cas, les données orbitales utilisées sont précises (jeu de données 4). Dans l'autre, la zone d'étude est restreinte (jeu de données 3), ce qui limite le risque d'erreur. L'analyse des deux histogrammes peut fournir une indication sur la qualité de ces deux traitements différents. Afin de pouvoir comparer ces deux résultats, les histogrammes ont été construits à partir des diffuseurs d'une même zone (encadré rouge de la figure III.15). Tout d'abord, la densité de CS conservés après traitement varie peu sur la zone commune, elle est de $1839 \text{ CS}/\text{km}^2$ avec le jeu 3 et de 1828 avec le jeu 4. De plus, les histogrammes sont similaires (voir figure III.16) avec une valeur moyenne faible, validant la qualité du traitement dans les deux cas ($\bar{\sigma} = 0.64$ rad. avec le jeu de donnée 3, $\bar{\sigma} = 0.67$ rad. avec le jeu de donnée 4).

L'analyse de l'écart-type des résidus est également réalisée sur les résidus de phase issus de l'étape d'inversion en série temporelle, en commençant par une analyse visuelle afin de détecter d'éventuels événements localisés. Si l'on reprend les exemples précédents, la valeur moyenne $\bar{\sigma}$ pour cette étape est de 0.62 rad. avec le jeu de données 3 et de 0.60 rad. avec le jeu de donnée 4. Ces faibles valeurs tendent à valider la réussite de l'opération, et ceux malgré l'utilisation de données orbitales d'origines fournies avec les images (jeu de données 3).

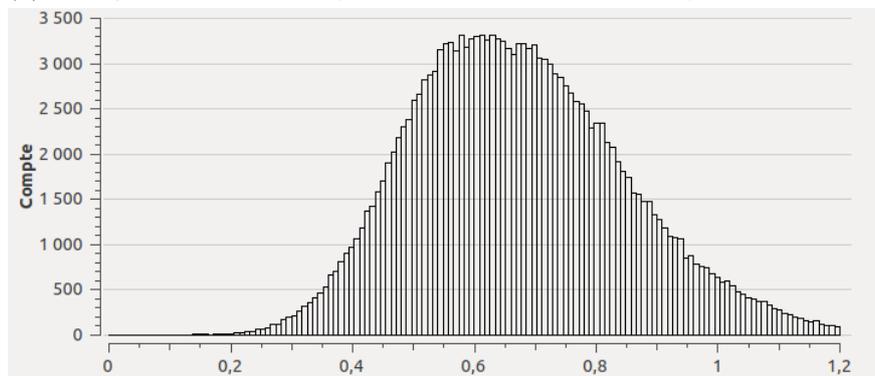
En complément, l'écart-type de la correction topographique a été estimé. L'écart-type de la correction topographique est de 7.6 m avec le jeu de données 3 et de 4.3 m avec le jeu de données 4. Les effets de l'utilisation d'un MNT haute résolution et des données orbitales RESORB sont donc bien visibles.

iii Évolution des résidus au cours des mises à jour

La réalisation de mises à jour régulières offre la possibilité de suivre l'évolution de la qualité de traitement en fonction du nombre d'images utilisées et de la période d'observation. La figure III.17 présente l'évolution de la moyenne des écart-types des résidus issus de la première régression, au fur et à mesure de l'ajout des images dans le jeu de données 3. Contrairement à la section précédente, la moyenne est cette fois-ci calculée sur l'ensemble des diffuseurs sé-



(a) Histogramme des écart-types de la phase résiduelle du jeu de données 3



(b) Histogramme des écart-types de la phase résiduelle du jeu de données 4

FIGURE III.16 – Histogrammes des écart-types de la phase résiduelle de la première régression pour chaque PS de l'interférogramme 23/04/2017 - 11/05/2017 appliquée aux jeux de données 3 (1 burst) et 4 (2 bursts).

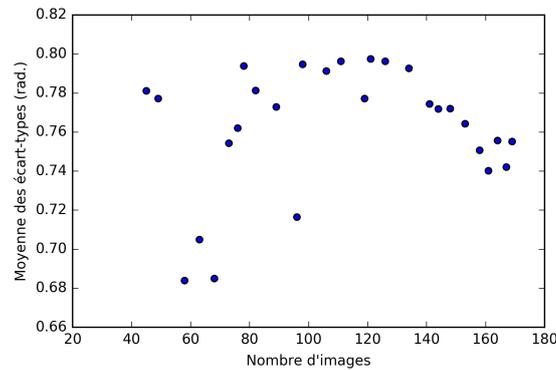


FIGURE III.17 – Evolution de la moyenne des écart-types des résidus en fonction du nombre d'images utilisées. Les résidus correspondent aux résultats issus de la première régression de la chaîne multi-références A appliquée au jeu de données 3.

lectionnés (couvrant une zone d'environ 450 km^2). En évaluant la qualité de la régression sur une plus grande zone, on s'attend à ce que la moyenne des écart-types augmente, du fait de l'augmentation de la distance entre les diffuseurs et le point de référence. Cela se vérifie sur la mise à jour constituée de 136 images, où la moyenne passe de 0.64 (zone d'intérêt de 100 km^2) à environ 0.79 rad (zone de 450 km^2 , voir figure III.17). De manière générale, on attend une meilleure estimation de la vitesse de déplacement lorsque l'on dispose de plus d'images. Les résultats présentés dans la figure III.17 ne montrent pas de lien direct entre le nombre d'image et la qualité de la première régression, bien que les traitements appliqués soient identiques à chaque mise à jour. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la régression effectuée n'est pas temporelle mais uniquement spatiale. On notera toutefois que l'écart-type moyen est compris entre 0.68 et 0.80 rad. et que les valeurs les plus élevées ne sont pas obtenues avec le nombre minimum d'images, ni le maximum.

Une analyse comparable a été réalisée avec les résidus issus de l'étape d'inversion en série temporelle et dont les résultats sont présentés dans la figure III.18. Les résidus correspondent à la différence de phase entre la phase estimée lors de l'inversion et la phase interférométrique. Ainsi, l'écart-type des résidus reflète la capacité à reconstruire correctement la série temporelle. Les très faibles valeurs obtenues, lorsque l'inversion est réalisée après filtrage du délai atmosphérique (en bleu sur la figure III.18) tendent à montrer que l'inversion est réalisée avec succès. En revanche, ce paramètre ne semble pas sensible au nombre d'images utilisées.

L'écart-type moyen a également été estimé à partir des résultats issus de l'approche B, mais uniquement avec 169 images. Lorsque l'inversion est réalisée sur des phases interférométriques sans correction atmosphérique (en vert et en orange sur la figure III.18), l'écart-type moyen $\bar{\sigma}$ est plus élevé. Or l'inversion permet d'éliminer les sources de perturbations telles que les erreurs orbitales, topographique et la décorrélation interférométrique (Werner et al., 2012) mais ne permet pas de corriger les effets de la phase atmosphérique, puisqu'il n'est pas possible de différencier les déformation aléatoires du délai atmosphérique. La présence de ce type d'erreurs (orbitales, topographique, décorrélation) dans la phase avant inversion pourrait expliquer l'obtention d'un écart-type plus élevé.

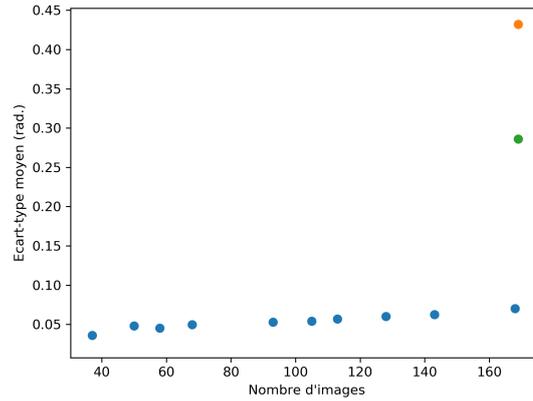


FIGURE III.18 – Evolution de la moyenne des écart-types des résidus en fonction du nombre d'images utilisées. Les résidus correspondent aux résultats issus de l'inversion en série temporelle par SVD de la chaîne multi-références A appliquée au jeu de données 3. En bleu : les résultats obtenus lorsque l'estimation de délai atmosphérique est réalisée avant l'inversion (approche A), en vert : après l'inversion (approche B) avec 169 images, en orange après l'inversion (approche B) avec un facteur de lissage $\gamma = 10$ (voir section 1.4.4, avec 169 images).

Enfin la différence entre l'écart-type moyen avec facteur de lissage (en orange) et sans (en vert) est un résultat attendu. Le facteur de lissage est une approche possible pour réduire le délai atmosphérique en contraignant les changements rapide de vitesses de phase (voir section 1.4.4), ce qui a aussi pour effet de réduire la composante non-linéaire du déplacement. Il est normal que les résidus de phase soient plus importants lorsque la phase estimée est corrigée. Cependant, la comparaison de ces 3 résultats ne permet pas de privilégier une approche en particulier. Cela pourra être fait en comparant les différents résultats aux mesures d'auscultation terrestre (section 3.3.3).

iv Estimation de la précision sur la vitesse de déplacement

La dernière étape du traitement PS à partir des chaînes multi-références et mono-référence correspond à l'estimation de la vitesse moyenne linéaire de déplacement dans la ligne de visée du satellite. Le contrôle de qualité des traitements peut alors être complété en estimant la précision de l'estimation des vitesses moyennes linéaires. Sachant que la précision d'une variable stochastique peut être estimée à partir de la dispersion de cette variable autour de sa valeur moyenne (Ketelaar, 2009), la précision du paramètre vitesse peut être estimée à partir de son écart-type. La figure III.19 présente l'évolution de cet écart-type en fonction du nombre d'images et de la méthode utilisée sur la zone d'intérêt d'environ 100km^2 .

Lorsque les vitesses sont calculées à partir des chaînes de traitement A et B, l'écart-type varie entre 2 mm/an avec 37 images et 1.4 mm/an avec 169 images. La comparaison des résultats obtenus avec 4 traitements différents (voir figure III.19) montre que la précision d'estimation de la vitesse linéaire est très peu impactée. Les écart-types varient peu entre les approches dans lesquelles le filtrage de la phase atmosphérique est réalisée avant l'inversion (filtrage spatial,

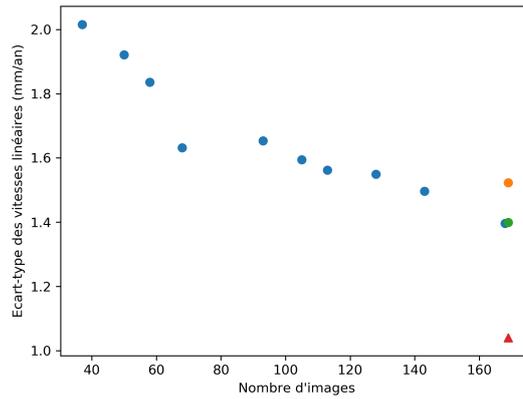


FIGURE III.19 – Evolution de l'écart-type des vitesses moyenne linéaires en fonction du nombre d'images utilisées. En bleu : les résultats obtenus avec la chaîne multi-références A. En vert : les résultats obtenus avec la chaîne multi-références B sans facteur de lissage (voir section 1.4.4). En orange : avec la chaîne multi-références B et un facteur de lissage $\gamma = 10$. En rouge : les résultats obtenus avec la chaîne de traitement mono-référence. Rouge, vert et orange : uniquement avec 169 images.

chaîne multi-références A) ou après l'inversion (filtrage spatio-temporel, chaîne multi-références B) et sans appliquer de facteur de lissage. En revanche, l'écart-type des vitesses estimées par l'approche mono-référence est plus faible, d'environ 1 mm/an avec 169 images. Un écart-type plus faible peut signifier deux choses : le traitement a permis de mieux supprimer le bruit et les artéfacts du signal de déplacement et/ou la partie non-linéaire du signal de déplacement est partiellement éliminée par rapport aux résultats des approches multi-références.

Cependant, pour estimer correctement la précision, l'estimation de l'écart-type devrait être réalisée sur une zone où le mouvement est supposé identique. Il est donc possible d'approximer la précision en considérant uniquement les diffuseurs présents dans la ZIG (cf. figure III.25), correspondant à une surface d'environ 0.024 km^2 . Or l'écart-type des vitesses estimées à partir de 169 images varie très peu entre les 4 traitements. Sa valeur est de 2.2 mm/an avec les résultats des traitements mono-référence et multi-références B, et de 2.3 mm/an avec le résultat des traitements multi-références A. Ainsi, les différences entre les 4 traitements ne semblent pas avoir un impact important sur la qualité des résultats. A noter que cette estimation de précision est une approximation, puisque les mouvements rencontrés au sein de la ZIG, et liés au rabattement de nappe, peuvent varier malgré la superficie restreinte de la zone.

v Analyse de la cohérence temporelle

Une façon d'analyser les différences entre les approches multi-références et mono-référence sur la gestion de la composante non-linéaire du déplacement est d'estimer la cohérence temporelle qui diminue quand on s'écarte du modèle linéaire. Elle a ainsi été estimée sur les résultats issus des 3 chaînes de traitement à partir des résidus issus de la régression temporelle permettant d'estimer les vitesses moyennes linéaires. Les résultats de cette estimation ont été comparés, notamment en s'appuyant sur l'analyse de la zone pour laquelle on a eu une information a priori

de l'existence de déplacements non-linéaires, à savoir le chantier HSL dont on connaît les déplacements de surface grâce aux mesures d'auscultation topographique terrestre.

Dans le module IPTA, la cohérence temporelle peut être estimée à partir de l'équation suivante :

$$coherence = \frac{1}{n} \times \sum_{j=1}^n \exp(-i * (\Phi_j - \Phi_{model_j})) \quad (III.2)$$

où Φ_j est la phase mesurée du diffuseur ponctuel i et Φ_{model} la valeur de la phase modélisée (modèle linéaire) et n correspond au nombre d'interférogrammes.

Le caractère non-linéaire d'une série temporelle peut ainsi être estimé à partir de la cohérence temporelle de la phase. La cohérence temporelle présentée dans le tableau III.3 et la figure III.20 correspond à celle de la phase avant régression temporelle et qui contient la partie non-linéaire du déplacement et les éventuels artéfacts résiduels de traitement (délai atmosphérique, erreur orbitale, bruit). Dans une situation où les déplacements présents ont un comportement non-linéaire, une cohérence temporelle élevée indiquerait que les filtrages effectués au cours du traitement ont extrait la composante non-linéaire du signal de déplacement et l'ont intégré à la composante atmosphérique. Ainsi, une connaissance a priori de la nature des déformations est un atout majeur pour distinguer la présence d'artéfacts de celle d'un signal de déplacements non linéaires.

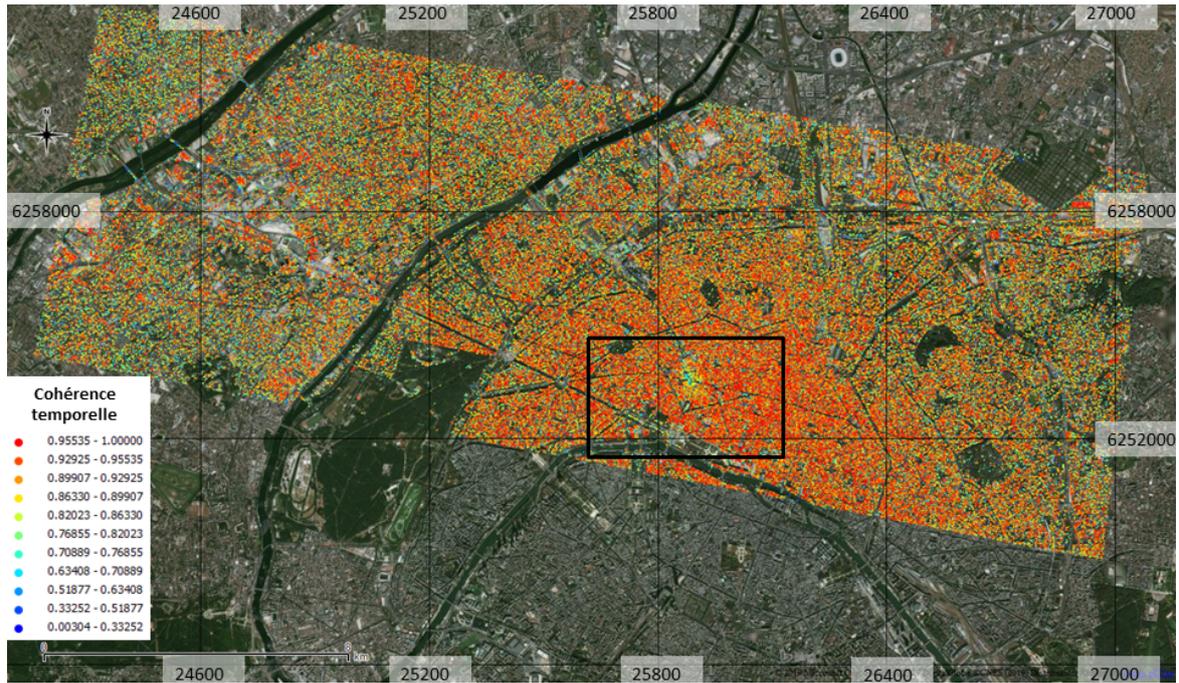
Les valeurs moyennes élevées obtenues avec 3 traitements différents (entre 0.89 et 0.90) et présentées dans le tableau III.3 montrent que les artéfacts atmosphériques et orbitaux, non corrélés temporellement, ont bien été supprimés du signal de déplacement. La figure III.20 montre également que la cohérence est plus faible sur les périphéries de l'image radar. Cela traduit la baisse sensible de qualité du traitement lorsqu'on s'éloigne du point de référence (choisi au centre de l'image). Le tableau III.3 montre que les phases des 3 approches ont des cohérences temporelles moyennes très proches. Cependant, si on s'intéresse à la moyenne sur le chantier HSL, on s'aperçoit que l'approche multi-temporelle avec filtrage temporel (chaîne B) correspond à la cohérence temporelle la plus faible, alors que l'approche mono-référence correspond à la cohérence la plus forte. Sur l'image III.20, on remarque que la cohérence temporelle est élevée à proximité du chantier (supérieure à 0.8) et qu'à l'aplomb de l'ouvrage la cohérence est plus faible. Cette zone de plus faible cohérence temporelle (certains CS ont une cohérence proche de 0.6) correspond au secteur où le niveau piézométrique a le plus baissé et où les mouvements sont les plus importants, comme en atteste les mesures obtenues par l'auscultation terrestre. Cela tend à valider l'hypothèse selon laquelle l'approche multi-références avec filtrage spatial (chaîne A) permet de mieux suivre la composante non-linéaire du déplacement. La comparaison entre mesures d'auscultation terrestre et mesures InSAR présentée dans la section 3.3.3 devrait permettre de valider définitivement cette hypothèse.

2.2 Analyse des instabilités sur l'agglomération Parisienne

L'analyse de la variation de densité des diffuseurs cohérents, des résidus et de la cohérence temporelle qui a permis d'estimer la qualité des résultats obtenus avec les différentes approches, peut être complétée par une comparaison entre les instabilités identifiées et celles observées par

chaîne de traitement	Nombre de CS conservés	Cohérence temporelle moyenne	Cohérence temporelle moyenne sur HSL
multi-références A	289227	0.896	0.809
multi-références B	301618	0.899	0.812
Mono-référence	314144	0.891	0.841

TABLE III.3 – Estimation de la cohérence moyenne et de la cohérence moyenne sur la Zone d’Influence Géotechnique (voir figure III.26) du chantier HSL.



(a) Cohérence temporelle de la phase résiduelle sur le tracé EOLE



(b) Cohérence temporelle de la phase résiduelle sur le chantier HSL

FIGURE III.20 – Carte de la cohérence temporelle estimée sur la phase avant régression temporelle (chaîne multi-références A). Système de projection : WGS84 Pseudo Mercator.

le passé sur l'agglomération Parisienne.

Le résultat des estimations des vitesses moyennes linéaires de déplacement à partir de la chaîne multi-références A (filtrage spatial) appliquée aux images Sentinel-1 acquises entre 2015 et 2017 (jeu de données 2, voir tableau III.1) est présenté dans la figure III.21. On peut identifier 4 zones d'instabilités (numérotées de 1 à 4 dans la figure III.21). Les déplacements sont présents sur la Butte Montmartre (zone 1) et les buttes de Bonne-Nouvelle (zone 2) et Saint-Martin (zone 3) ont déjà été identifiés par le passé (voir section 1.3.1).

En comparant les cartes de vitesses entre 1992 et 2008 calculées avec les données ERS et ENVISAT (Magalhaes, 2010) avec la carte des vitesses obtenues avec Sentinel-1 entre 2015 et 2017, on remarque que la différence entre les pentes de la Butte Montmartre et les quartiers environnants était plus marquée avec les données de première génération. Cela peut s'expliquer par le choix de la méthode mais surtout par le fait que la période d'observation est beaucoup plus grande dans le premier cas (14 ans) que dans le second (2 ans). Or pour des déplacements uniformes, la précision d'estimation de leur vitesse est d'autant plus grande que la période d'observation est importante. Le même constat ressort de la comparaison réalisée avec la carte des vitesses moyennes entre 2003 et 2008 calculées avec les données ENVISAT. On remarque cependant que les résultats obtenus avec 2 ans de données Sentinel-1 apparaissent moins bruités que ceux obtenus avec 5 ans de données ENVISAT.

L'analyse des vitesses de déformation a également permis d'identifier une zone d'instabilité qui coïncide avec le tracé du tunnelier utilisé pour l'extension de la ligne 14 et qui a creusé entre Septembre 2015 et Mai 2016. Ce résultat conforte le choix de l'approche multi-références pour identifier les instabilités transitoires provoquées par des travaux souterrains. Les effets du passage du tunnelier ne sont d'ailleurs plus visibles sur la carte des vitesses moyennes linéaires estimées sur la période Mars 2016 - Novembre 2018 (jeu de données 4) correspondant à la figure III.22. On observe cependant des vitesses supérieures à -4 mm/an au niveau du quartier des Batignolles. Ce quartier est le lieu d'un important projet d'aménagement urbain, réalisé sur d'anciennes friches SNCF. Les travaux de terrassements et la construction de nouveaux bâtiments au cours de la période d'observation sont à l'origine de la faible densité de CS observée sur ce secteur. Les effets des rabattements de nappe sur le chantier HSL sont d'ailleurs visibles sur cette carte de vitesses de déformation, tout comme les effets des travaux effectués pour la création de la nouvelle gare Porte Maillot. Ces déformations seront abordées plus en détail dans la section 3.3.

Les vitesses de déplacement ont également été estimées sur le jeu de données 1 (trajectoire ascendante) à partir des chaînes de traitement multi-références A et mono-référence. Au total, les vitesses de déformation ont été calculées sur l'agglomération Parisienne à partir des deux chaînes de traitement et dans les deux géométries d'acquisition, ascendante et descendante. Une comparaison de ces différents résultats est présentée dans le tableau III.4 et la figure III.23 en s'intéressant aux différentes vitesses calculées sur les pentes Ouest et Sud sud-Ouest de la Butte Montmartre, correspondant aux orientations analysées dans les études historiques présentées dans la section 1.3.1.

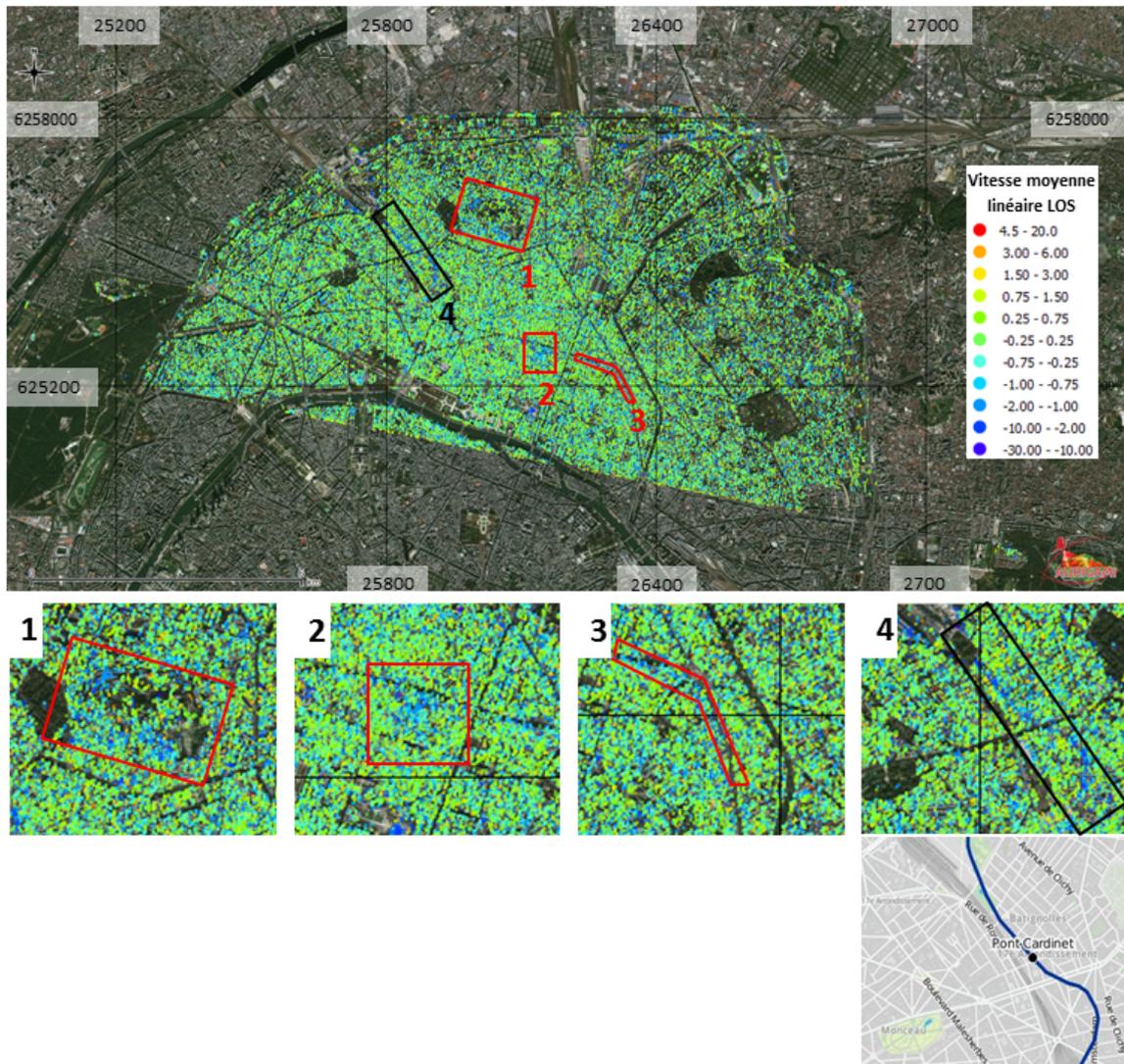


FIGURE III.21 – Carte des vitesses moyennes linéaires de déplacement dans la ligne de visée du satellite calculées avec l'approche multi-références A appliquée aux données Sentinel-1 entre le 27/02/2015 et le 12/03/2017(jeu de données 2, trajectoire descendante). Système de projection : WGS84 Pseudo Mercator. L'encadré 1 correspond à la Butte Montmartre. L'encadré 2 correspond à la butte Bonne-Nouvelle et l'encadré 3 au Boulevard Saint-Martin (butte Saint-Martin) et Boulevard du Temple. Enfin, l'encadré 4 correspond à une zone d'instabilités située entre la gare St-Lazare et le quartier des Batignolles et qui coïncide avec le passage du tunnelier utilisé pour le prolongement de la ligne 14, dont le tracé est présenté en dessous (source RATP).

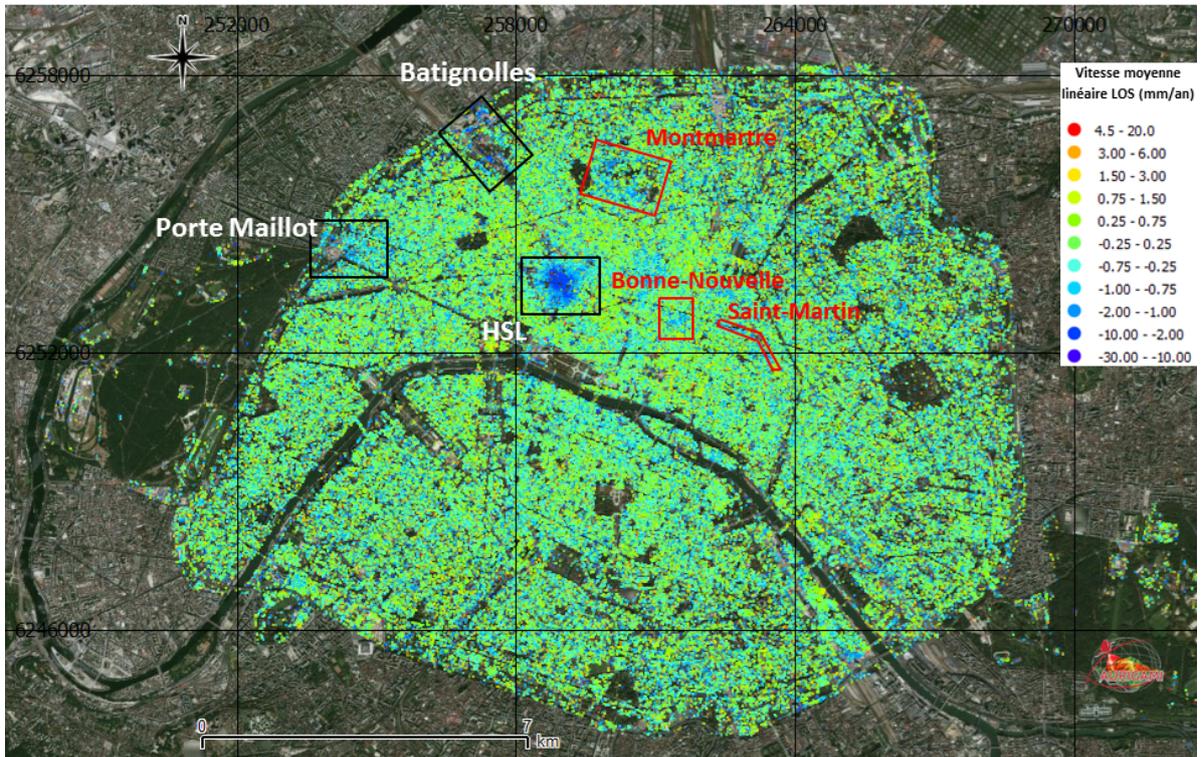


FIGURE III.22 – Carte des vitesses moyennes linéaires de déplacement dans la ligne de visée du satellite calculées avec l'approche multi-références A appliquée aux données Sentinel-1 entre le 28/09/2016 et le 27/04/2018 (jeu de données 4, trajectoire descendante). Système de projection : WGS84 Pseudo Mercator. Les encadrés rouges indiquent les zones de faibles déformations correspondant aux buttes de Montmartre, Bonne-Nouvelle et Saint-Martin. Les encadrés noirs correspondent à des zones impactées par des projets d'aménagement urbain (projet Clichy-Batignolles) et par des travaux souterrains (Projet EOLE, Porte Maillot et HSL).

D'après les études historiques, les mouvements rencontrés dans ces orientations sont complexes et possèdent une composante verticale ainsi qu'une composante dans la direction de la pente. L'angle d'incidence et l'angle de la direction azimutale ont donc une influence sur la valeur du déplacement mesuré. Il est donc nécessaire de distinguer les résultats issus du mode d'acquisition ascendant de ceux du mode descendant. Ainsi, la moyenne des vitesses LOS calculées sur ces pentes varie de 0.82 mm/an (chaîne multi-références A) à 1.2 mm/an (chaîne mono-référence) en mode ascendant, et de 0.8 mm/an (chaîne multi-références A) à 1.1 mm/an (chaîne multi-références B et mono-référence) en mode descendant. Les différences entre les différents résultats sont très faibles mais témoignent cependant d'une relation entre la valeur de moyenne des vitesses linéaires et la méthode de filtrage utilisée pour estimer le délai atmosphérique, et cela indépendamment du choix de la trajectoire d'acquisition. La moyenne la plus faible est obtenue avec la chaîne multi-références A (filtrage spatial). Or, comme expliqué dans la section 3.1.3, les déplacements lents et uniformes peuvent être sous-estimés avec cette approche.

La relation entre vitesses maximales et choix de la méthode est en revanche moins évidente. Il semblerait que la valeur de la vitesse maximale dépende plus de la géométrie d'acquisition que du choix de la chaîne de traitement. Ainsi la vitesse la plus élevée (-11 mm/an) est mesurée avec les données acquises en géométrie ascendante. Le diffuseur concerné n'étant pas visible dans la trajectoire descendante, cela explique le fait que la valeur de la vitesse maximale diffère d'une géométrie à l'autre.

L'objectif de l'analyse des instabilités observées sur cette butte étant de vérifier si les données Sentinel-1 et les traitements appliqués permettent de calculer des vitesses comparables à celles obtenues dans les précédentes études (-3 à -6 mm/an, (Fruneau et al., 2004) (Magalhaes, 2010)), le tableau III.4 a été complété par une identification des CS ayant une vitesse dans cet intervalle de vitesses. Cela montre que les CS concernés représentent 8 à 9% des CS des pentes Ouest et Sud sud-Ouest en trajectoire ascendante, contre 3 à 4% en trajectoire descendante. Cependant, l'analyse de la carte des vitesses de la figure III.23 ne permet pas de mettre en évidence une tendance plus nette de déformation d'une trajectoire à l'autre. Pour des déformations aussi lentes, il semble qu'il faille une période d'observation plus grande (ici elle couvre moins de 2 ans en trajectoire ascendante) afin d'être en mesure de poursuivre la comparaison entre les déplacements observés sur les pentes de la butte entre trajectoire ascendante et descendante.

Géométrie d'acquisition	Chaîne de traitement	Vitesse moyenne LOS (mm/an)	Vitesse maximale LOS (mm/an)	Nombre de CS avec $-6 < v_{los} < -3mm/an$
Ascendante	mono-référence	-1.2	-11.4	69/796
Ascendante	multi-références A	-0.82	-11.0	64/792
Descendante	mono-référence	-1.1	-4	9/581
Descendante	multi-références A	-0.8	-10.4	19/588
Descendante	multi-références B	-1.1	-8.6	25 /578

TABLE III.4 – Estimation des vitesses linéaires moyennes de déformation sur les pentes Ouest et Sud sud-ouest de la Butte Montmartre en fonction de la chaîne de traitement utilisée et de la géométrie d'acquisition des données traitées.

En définitive, l'analyse des résultats des traitements PS montre que la qualité de ces der-

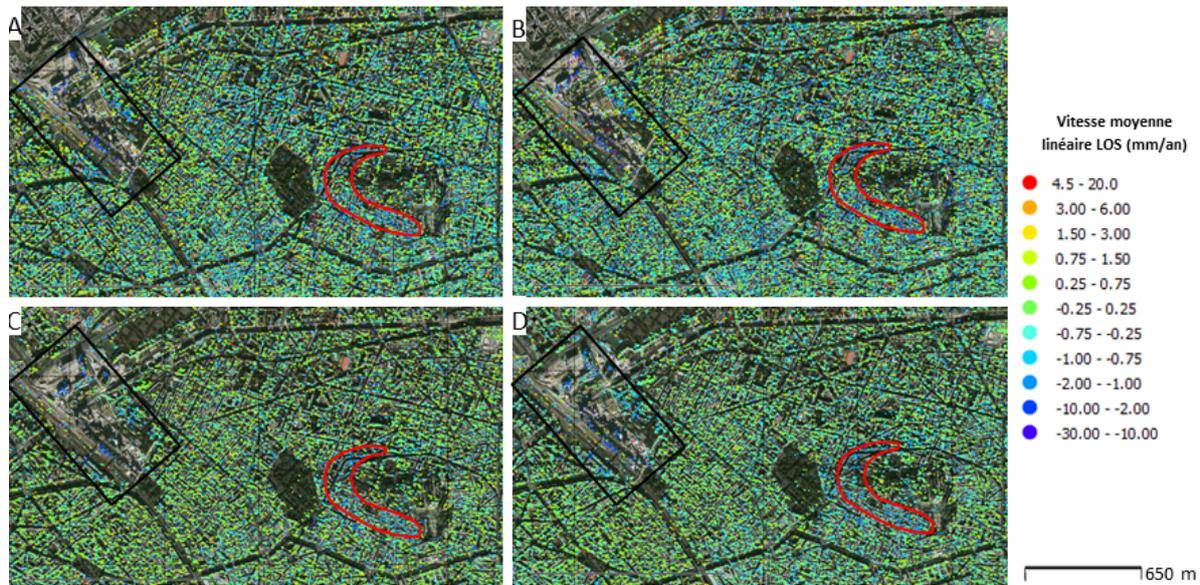


FIGURE III.23 – Carte des vitesses linéaires moyennes de déformation calculées à partir des jeux de données 1 et 3 sur les pentes Ouest et Sud sud-ouest de la Butte Montmartre. A) Géométrie ascendante (jeux de données 1), chaîne multi-références A. B) Géométrie ascendante (jeux de données 1), chaîne mono-référence. C) Géométrie descendante (jeux de données 3), chaîne multi-références A. D) Géométrie descendante (jeux de données 3), chaîne mono-référence

niers dépend principalement du temps d'observation et du nombre d'images radar utilisées, mais également du choix de la stratégie utilisée. La capacité à détecter des mouvements lents et uniformes ou au contraire des mouvements localisés et transitoires va dépendre du choix de l'approche mono-référence ou multi-références et en particulier de la méthode employée pour estimer le délai atmosphérique (filtrage spatial avant l'inversion en série temporelle ou filtrage spatio-temporel). La densité élevée des diffuseurs cohérents conservés sur Paris intramuros (supérieure à $2000 \text{ CS}/\text{km}^2$, voir section 3.2.1.i), les faibles valeurs des écart-types issus des résidus de régression (voir section 3.2.1.ii), les précisions sur les estimations de vitesses moyennes linéaires atteignant à 1 et 1.5 mm/an selon l'approche utilisée (voir section 3.2.1.iii), sont autant de critères de qualité permettant de valider les chaînes de traitement proposées. De plus la capacité à détecter des mouvements faibles tels que ceux rencontrés sur les buttes de Montmartre, Bonne-Nouvelle et Saint Martin, ainsi que ceux coïncidant avec le tracé d'un tunnelier (voir section 3.2.2) montre que les données Sentinel-1 peuvent être utilisées dans un cadre opérationnel tel que le suivi des travaux du projet Grand Paris.

3 Impacts des travaux de génie civil de l'entonnement Ouest HSL

Les résultats précédents ont permis de confirmer le potentiel d'utilisation des données Sentinel-1 pour le suivi opérationnel d'instabilités en zone urbaine. Il reste alors à montrer quelles instabilités sont rencontrées sur le projet Grand Paris et avec quelle précision, au regard des méthodes traditionnelles d'auscultation, il est possible de les mesurer. Afin d'y répondre, la section 3.3.1 présente succinctement les vitesses de déformations calculées entre 2016 et 2019 sur l'ensemble du projet EOLE. La section 3.3.2 apporte une analyse des déformations mesurées sur HSL en

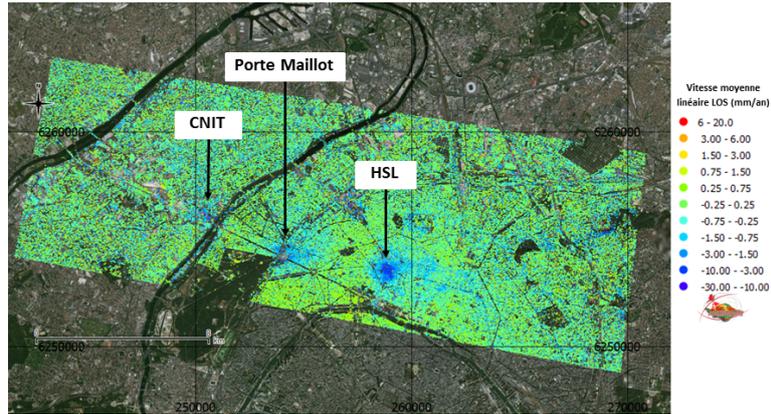
intégrant les données piézométriques. Enfin, la section 3.3.3 présente une étude comparative entre mesures InSAR, mesures avec stations totales et mesures de nivellement.

3.1 Détection de mouvements liés au projet EOLE

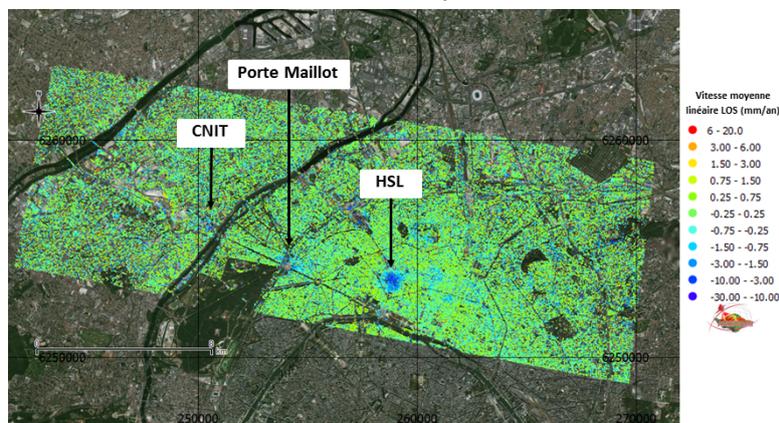
Dans le cadre du projet EOLE, les opérations les plus susceptibles de provoquer des déplacements significatifs en surface sont les rabattements de nappe et les éventuels phénomènes de dissolution de gypse qui en découleraient (voir section 2.3). L'analyse des vitesses de déformation calculées entre Mars 2016 et Juin 2019 (figure III.24) permet d'identifier les premiers effets des opérations de pompage, qui ont débuté en 2018 pour les chantiers de l'entonnement Ouest HSL et des gares Porte Maillot et CNIT-La Défense. La zone de déformation - appelée cuvette de déformation - la plus marquée correspond aux rabattements réalisés sur le chantier HSL et présente des vitesses moyennes de déformation dans la ligne de visée allant de -1 à -11 mm/an. La comparaison des résultats issus des différentes chaînes de traitement montre que la vitesse maximale de cuvette de déformation sur HSL varie peu d'une approche à une autre. La vitesse maximale de déformation est estimée à -10.3 mm/an avec la chaîne de traitement multi-références B, 11.5 mm/an avec la chaîne mono-référence et -11.6 mm/an avec la chaîne multi-références A. En revanche, les limites de la cuvette de déformation varient en fonction de l'approche utilisée. Cette variation concerne l'étendue des mouvements les plus lents ayant des vitesses estimées entre -0.75 mm/an et -1.5 mm/an. Dans cette gamme de vitesses, le signal de déplacement peut être extrait lors du filtrage atmosphérique réalisé dans la chaîne de traitement multi-références A. C'est ce qui explique que la cuvette de déformation apparait plus réduite qu'avec les deux autres approches. A l'inverse, c'est avec cette approche que la vitesse la plus élevée est mesurée. Notons que la dissymétrie apparente de la cuvette de déformation (cf. figure III.24), avec des vitesses plus élevées à l'Est de la gare HSL qu'à l'Ouest, est similaire à celle détectée par InSAR lors des travaux réalisés entre 1995 et 1997 (Fruneau et al., 2004) (Le Mouélic et al., 2005). Si l'on compare ces cartes aux cartes théoriques d'isorabattement (voir figure III.6 et figure III.7), on s'aperçoit que la correspondance entre niveau piézométrique théorique et vitesses de déformation n'est pas direct. Cela semble traduire le fait que les terrains rencontrés sur un même chantier n'ont pas tous les mêmes propriétés de compaction.

3.2 Analyse des déplacements observés sur la zone Haussamnn St-Lazare

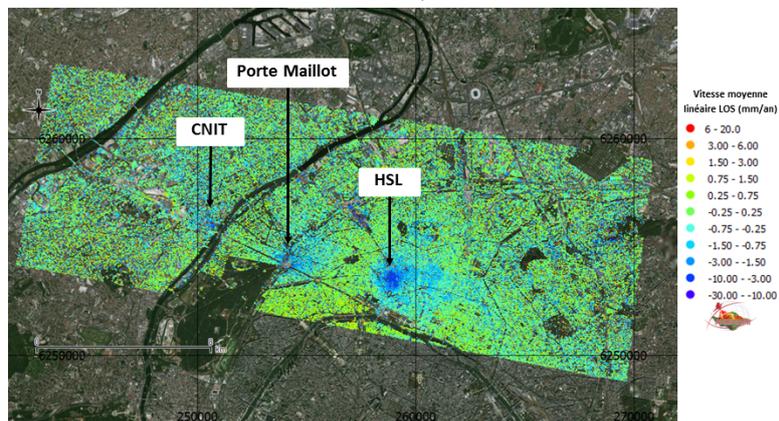
La comparaison des mesures piézométriques et les séries temporelles de déplacements (figure III.25) mesurés avec la chaîne de traitement multi-références A montre une véritable corrélation entre ces deux mesures. L'analyse des séries temporelles de déplacement montre que les déplacements observés à la surface de l'entonnement Ouest HSL apparaissent dès mi-Mars 2018, c'est-à-dire lorsque les rabattements débutent sur le chantier. En 2 mois, le niveau piézométrique local passe de 20 m à un niveau allant de 5 m à 0 m (voir figure III.25). Le niveau piézométrique le plus bas est atteint au début du mois de Juin alors que les déplacements cumulés maximaux sont atteints à la fin du mois. Ce décalage traduit le fait que la compaction des sols n'est pas un phénomène instantané mais progressif. On remarque également qu'au cours de la période fin Juin - début Décembre 2018, le niveau piézométrique remonte de plus de 5 m, ce qui se traduit dans les séries temporelles de déplacements par un changement de tendance de déformation, avec des déplacements positifs (déplacements vers le capteur) de plus ou moins 5 mm entre mi-Juillet et fin Décembre 2018. Cette comparaison entre séries temporelles de déplacement et niveaux piézométriques a également été réalisée sur les résultats issus des traitements avec les



(a) Carte des vitesses linéaires moyennes de déformation calculées à partir de la chaîne mono-référence.



(b) Carte des vitesses linéaires moyennes de déformation calculées à partir de la chaîne multi-références A.



(c) Carte des vitesses linéaires moyennes de déformation calculées à partir de la chaîne multi-références B.

FIGURE III.24 – Cartes des vitesses linéaires moyennes de déformation calculées entre Mars 2016 et Juin 2019 à partir des données Sentinel-1 descendantes. La zone couvre le tracé du projet EOLE et les 3 ouvrages souterrains réalisés par méthode traditionnelle et avec rabattement des nappes phréatiques du Lutécien et du Cuisien. Système de projection : WGS84 pseudo-mercator.

chaînes mono-référence et multi-références B. Les mêmes tendances sont observées, mais avec des valeurs de déplacements sensiblement différentes. Une comparaison entre mesures InSAR et mesures issues de l'auscultation terrestre a donc été réalisée afin de connaître quelle chaîne de traitement est la plus adaptée pour les mouvements rencontrés sur ce chantier.

3.3 Comparaison avec les données d'auscultation terrestre

Les mesures de déplacement InSAR ont été comparés aux mesures réalisées par nivellement et par STR sur les prismes (voir figure III.26). L'analyse comparative entre mesures InSAR et mesures d'auscultation traditionnelle a été réalisée à partir de 70 points de nivellement et les 141 prismes (voir figure III.26).

i Projection des déplacements dans une base commune

Dans le cas des mesures de nivellement, le déplacement est mesuré dans une seule direction (déplacements verticaux). En faisant l'hypothèse que les déplacements rencontrés sont purement verticaux, il est possible de convertir les déplacements mesurés dans la ligne de visée en déplacement verticaux. Cela revient à multiplier le déplacement LOS par le cosinus de l'angle d'incidence. Dans le cas des mesures sur prismes par STR, les déplacements sont mesurés dans 3 directions. Dans ce cas, il est possible de convertir ces déplacements 3D définis dans la base orthonormée à 3 dimensions $\beta_{3D} = (0, \vec{u}_e, \vec{u}_n, \vec{u}_z)$ (voir figure I.12) en déplacements dans la ligne de visée par simple produit scalaire du déplacement en 3D avec le vecteur unitaire \vec{u}_{los} donné par ses 3 composantes dans la base β_{3D} (Fallourd et al., 2011). Les déplacements mesurés en 3D \vec{D}_{3D}^{grad} et en 1D \vec{D}_{SAR}^{des} peuvent alors s'écrire sous la forme :

$$\vec{D}_{3D}^{grad} = \begin{bmatrix} D_e \\ D_n \\ D_z \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

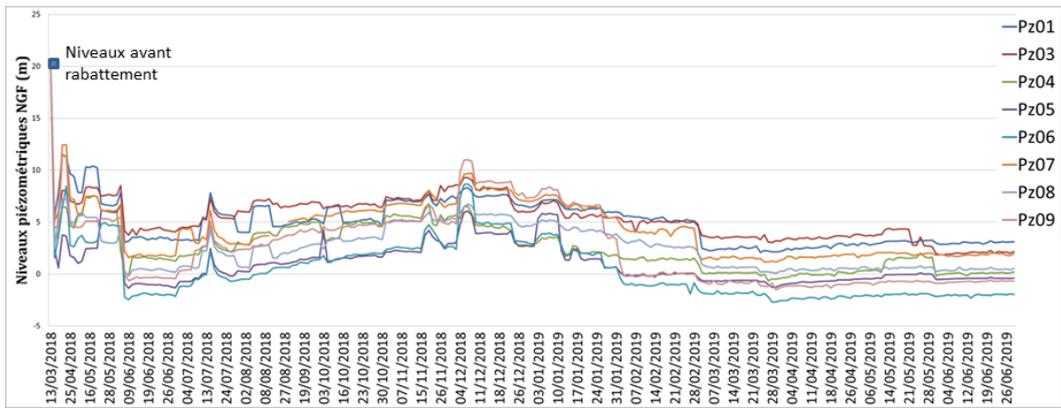
où D_e, D_n et D_z sont les composantes de déplacements Est/Ouest, Nord/Sud et verticaux. En s'appuyant sur l'équation précédente et la figure I.12, les coordonnées du vecteur LOS \vec{u}_{los}^{des} des mesures SAR descendantes peuvent être écrites dans la base 3D β_{3D} telles que :

$$\vec{u}_{los}^{des} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta)\cos(\alpha) \\ \sin(\theta)\sin(\alpha) \\ -\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

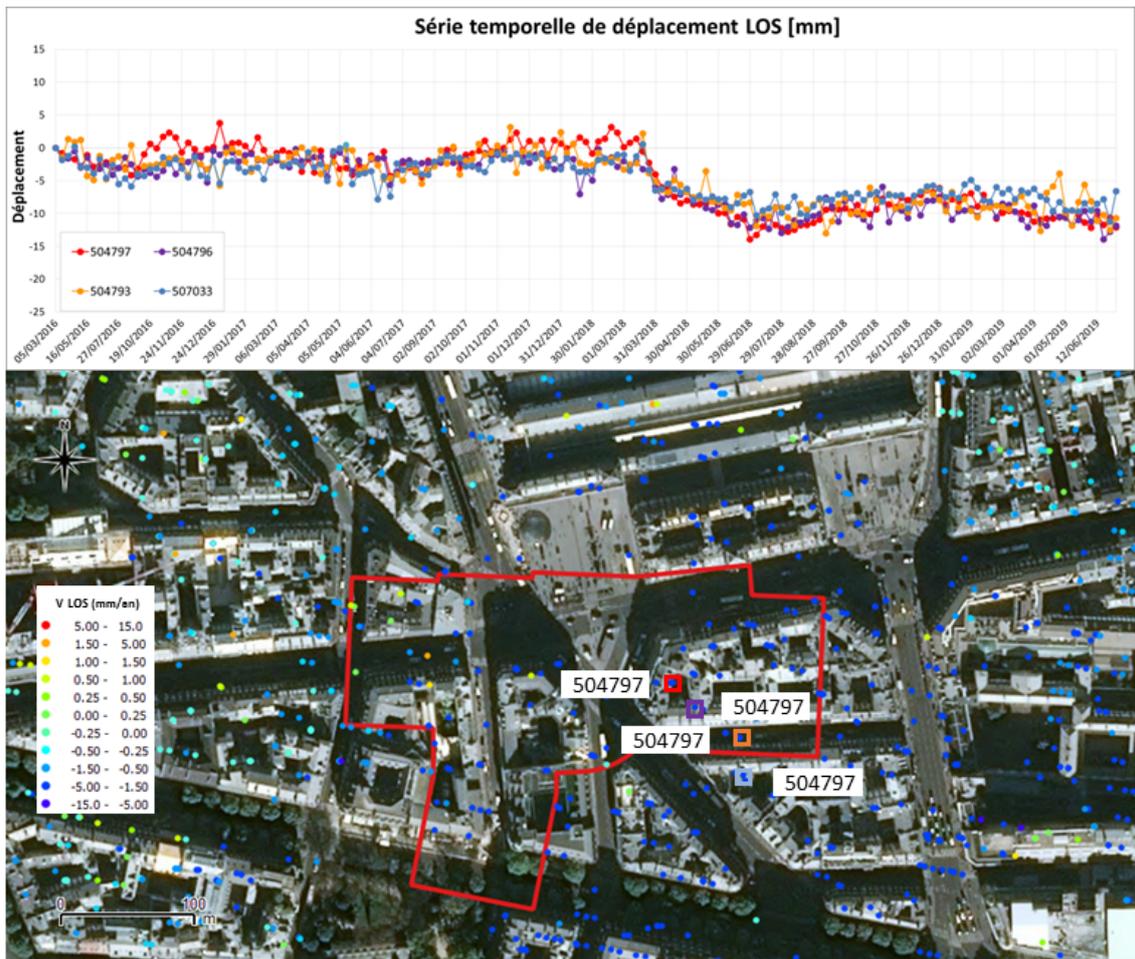
où θ et α sont les angles d'incidence et de la direction azimutale.

Dans la convention utilisée, les déplacements en direction du capteur sont signés positivement, ce qui implique que les déplacements 3D peuvent être convertis en déplacements LOS à partir de l'équation suivante :

$$d_{los}^{des} = (\sin(\theta)\cos(\alpha) \times D_e - \sin(\theta)\sin(\alpha) \times D_n + \cos(\theta) \times D_z) \quad (\text{III.5})$$



(a) Evolution des niveaux piézométriques au cours de la phase de rabattement de nappe. Les mesures sont effectuées à partir de 8 piézomètres (Pz), dont la localisation est présentée dans la figure III.26



(b) Séries temporelles de déplacement dans la ligne de visée du satellite de 4 diffuseurs cohérents et carte des vitesses moyennes linéaire de déplacement centrée sur la ZIG (encadré rouge). Les résultats correspondent au traitement du jeu de données 3 par la chaîne de traitement multi-références A.

FIGURE III.25 – Evolution de la piézométrie et estimation de ses effets en surface.

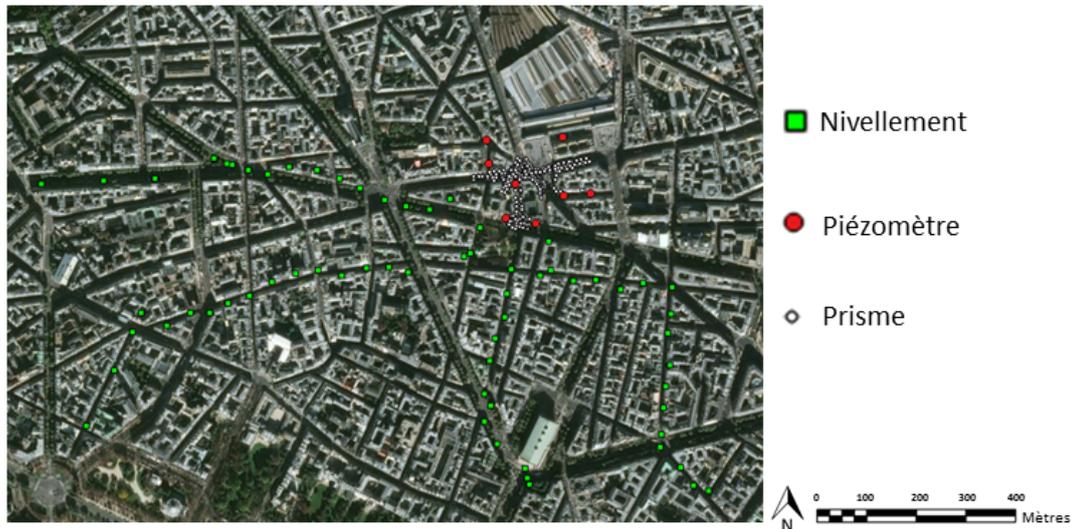


FIGURE III.26 – Localisation des piézomètres, des prismes et points de nivellement sur HSL.

ii Comparaison avec le nivellement

Les mesures de nivellement ont été réalisées au cours de deux campagnes effectuées en 2018, une fois entre Mars et Avril et une autre courant Juin, ce qui a permis d’obtenir une estimation du déplacement pour chaque point de nivellement, sur un intervalle de temps de 49, 77 ou 80 jours. Le déplacement moyen ainsi mesuré est d’environ -1.9 mm, avec un écart-type de 2 mm.

Une sélection des CS les plus proches, situés dans un rayon de 20 m, a été réalisée pour chaque point de nivellement. Les mesures de déplacement par nivellement ont été comparées aux mesures InSAR correspondantes (situés à moins de 20 m) en sélectionnant l’intervalle de temps qui coïncide le mieux entre les relevés terrestres et les acquisitions SAR. Au total, la différence de déplacement ($\Delta D = D_{H-insar} - D_{nivellement}$) a été calculée pour chacun des 372 couples de données satellitaires/terrestres. La moyenne des ΔD ainsi que l’erreur quadratique moyenne de la régression linéaire $RMSE$ ont été calculés pour les résultats issus des 4 traitements différents et sont présentés dans le tableau III.5.

La moyenne des ΔD la plus faible est obtenue est de 0.6 mm, et est obtenue avec la chaîne de traitement multi-références A. À l’inverse, la moyenne la plus élevée est de 1.6 mm et a été obtenue avec la chaîne de traitement mono-référence. La valeur positive de cette moyenne montre que les déplacements mesurés par InSAR semblent être sous-estimés avec l’approche mono-référence. Notons que la $RMSE$ la plus faible (tableau III.5) est obtenue avec le traitement multi-références B utilisant un facteur de lissage $\gamma = 10$. Comme on peut le voir dans la figure III.27, la série temporelle correspondante est beaucoup plus lisse, ce qui explique cette $RMSE$ plus faible. Donc, au regard de la précision des mesures et des faibles déplacements concernés, il serait nécessaire de disposer de plus de mesures, sur un intervalle de temps plus important, dans des secteurs avec des déplacements plus marqués, pour être en mesure de valider complètement cette observation.

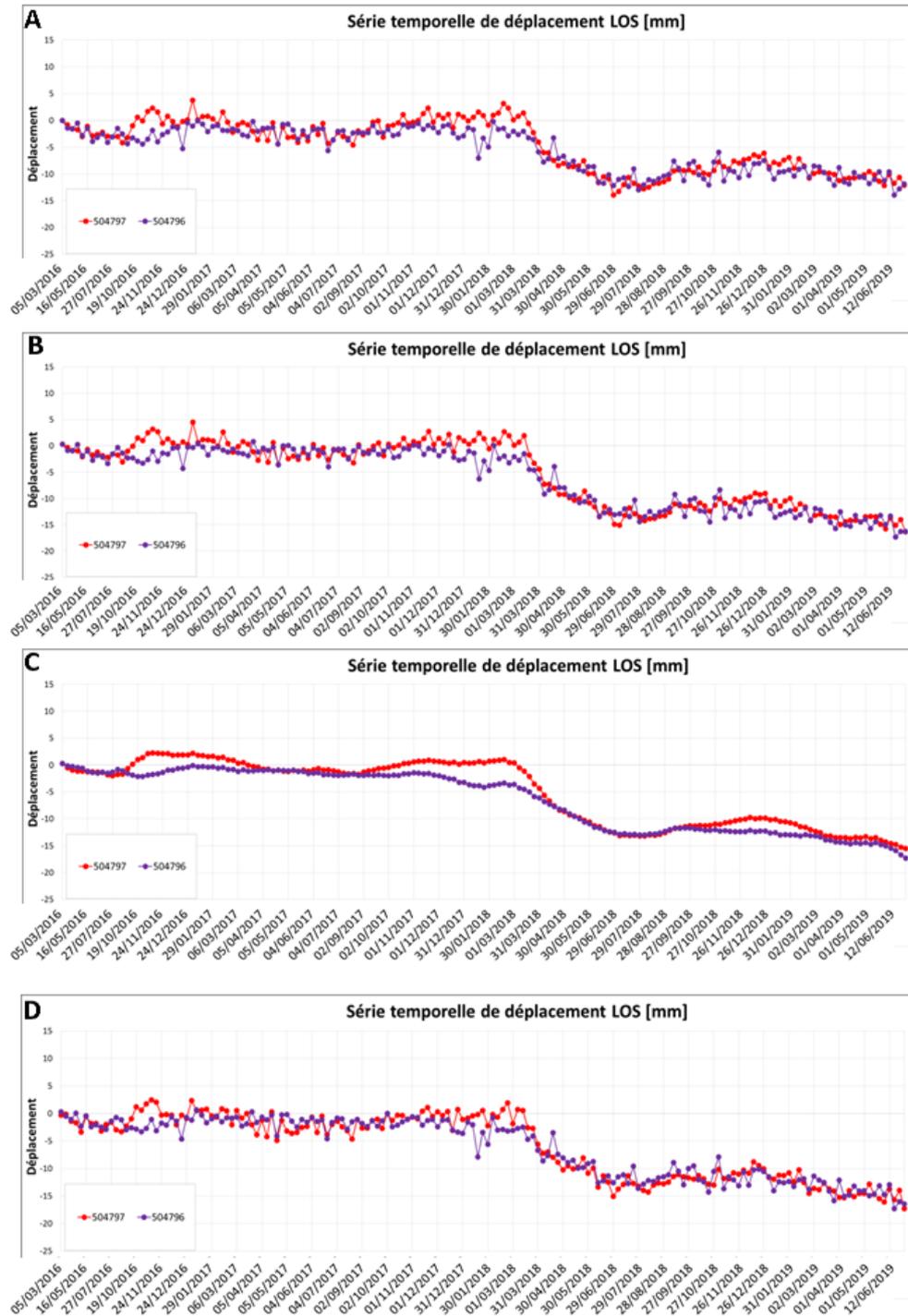


FIGURE III.27 – Séries temporelles de déplacements de 2 CS estimées à partir des 4 traitements différents. A : chaîne multi-références A. B : chaîne multi-références B. C : chaîne multi-références B avec un facteur de lissage $\gamma = 10$. D : chaîne mono-référence.

chaîne de traitement	ΔD moyen (mm)	$RMSE$ (mm)
mono-référence	1.6	3.8
multi-références A	0.6	3.4
multi-références B	0.9	3.5
multi-références B $\gamma = 10$	1.4	2.8

TABLE III.5 – Estimation de la moyenne et de l'écart-type de la différence entre mesures satellitaire et mesures terrestres (nivellement) en fonction de la chaîne de traitement utilisée.

iii Comparaison avec les mesures STR

Ce travail a été effectué entre comparant les mesures InSAR avec les mesures sur prismes réalisées en moyenne toutes les deux heures. Cependant, la comparaison entre mesures InSAR et mesures de déplacements des STR sur les 141 prismes situés à la surface du chantier HSL présente plusieurs difficultés. La première est que les prismes n'ont pas été tous mesurés sur la même durée. En effet, le réseau des STR et des prismes a été déployé progressivement à la surface du chantier, entre Octobre 2017 et Octobre 2018. La seconde est que certaines séries temporelles de déplacement sont soit incomplètes (obstacle temporaire entre la station et le prisme), soit discontinues (correction de la dérive d'une STR). Une analyse de l'ensemble des séries temporelles de déplacement est donc nécessaire.

Il a donc été choisi de sélectionner les prismes en fonction de la disponibilité de leurs mesures sur 3 intervalles de temps. L'intervalle 1 (05/03/2016-01/03/2018) correspond à la période avant le rabattement de nappe avec des travaux préparatoires entre 2017 et Mars 2018. L'intervalle 2 (31/03/2018-29/06/2018) correspond à la première phase de rabattement de nappe (voir figure III.25). L'intervalle 3 (26/12/2018-30/06/2019) correspond à la phase durant laquelle on observe une nouvelle baisse du niveau piézométrique, suivi d'une relative stabilisation (voir figure III.25).

Le protocole de sélection et de calcul des vitesses LOS des prismes pour chaque intervalle est le suivant :

- Conversion des déplacements 3D de la base de données des STR en déplacements LOS (voir section 3.3.3.i) ;
- Sélection des prismes dont les données sur l'intervalle étudié sont disponibles
- Estimation des vitesses LOS des prismes
- Sélection des CS localisés dans un rayon de 20 m autour de chaque prisme
- Calcul de la vitesse moyenne de chaque prisme sur les 3 intervalles de temps
- Calcul des vitesses moyennes locales V_{mean}^{LOS} pour chaque intervalle pour les prismes et les CS. La zone couverte par les prismes étant restreinte (<2 ha) et les prismes étant très rapprochés les uns des autres, il a été décidé de comparer les vitesses par intervalle avec une approche spatiale plutôt qu'une approche individuelle prisme par prisme, comme cela a été fait avec les points de nivellement dont l'espacement entre chacun des points est plus important.

Le calcul des vitesses moyennes de chaque prisme et chaque CS a permis de réaliser une première comparaison dans laquelle la différence de vitesse entre la vitesse InSAR et vitesses terrestre a été calculée pour chaque couple CS/prisme dont la distance est inférieure à 20 m. La moyenne de cette différence et l'erreur quadratique moyenne sont présentées dans le tableau III.6. Pour l'intervalle 1, la différence moyenne la plus faible est obtenue avec la chaîne mono-référence et la RMSE la plus faible avec la chaîne multi-références A. Pour l'intervalle 2, la moyenne et la RMSE de la différence de vitesse les plus faibles sont obtenues avec la chaîne multi-références A. Enfin, sur l'intervalle 3, la moyenne la plus faible est obtenue avec l'approche A et la RMSE la plus faible avec la chaîne mono-référence B ($\gamma = 0$).

Traitement	intervalle 1		intervalle 2		intervalle 3	
	ΔV	$RMSE$	ΔV	$RMSE$	ΔV	$RMSE$
Mono-référence	-0.16	3.3	3.4	11.2	-2.7	6.8
multi-références A	-0.18	2.3	-0.6	9.7	-1.64	6.6
multi-références B	0.3	3.5	1.7	10.94	-2.2	6.4
multi-références B $\gamma = 10$	-0.4	3.6	1.2	10.38	-1.3	9.4

TABLE III.6 – Estimation de la moyenne et de l'erreur quadratique moyenne de la différence entre les vitesses InSAR et vitesses terrestres STR (mm/an) en fonction de la chaîne de traitement utilisée.

Pour faciliter l'interprétation de ces résultats, une seconde comparaison a été réalisée en comparant les vitesses moyennes locales calculées selon le protocole décrit précédemment. Les résultats sont présentés dans le tableau III.7. Sur l'intervalle 1, les vitesses locales InSAR sont très proches de la celle obtenue avec les prismes, avec une différence minimale de 0.5 mm/an (multi-références A). Notons qu'en théorie, la précision des mesures sur prisme est inférieure au millimètre. En réalité, du fait de la configuration du chantier et des possibles perturbations (visée du prisme perturbée par un obstacle, poussières sur le prisme, émission de gaz par les véhicules, etc.), la précision des mesures de déplacement attendue est de 1 à 2 mm. En réalisant l'analyse sur les vitesses au lieu des déplacements, on peut raisonnablement estimer que la précision sur la vitesse est meilleure que 2 mm/an. Ainsi, la vitesse locale de -1 mm/an pourrait correspondre à une réelle tendance de déformation coïncidant avec la réalisation des travaux préliminaires aux rabattements de nappe. Sur l'intervalle 2, qui correspond à la période où les vitesses de déplacements sont les plus importantes, les différences vont de 0.7 mm/an (multi-références A) à 3 mm/an (mono-référence). Enfin, sur l'intervalle 3, les différences vont de 1.3 mm/an (multi-références B avec $\gamma = 10$) à 2.2 mm/an (multi-références A).

Sur l'intervalle 1 et 2, les vitesses les plus proches des mesures terrestres sont celles calculées avec la chaîne multi-références A. Les vitesses de déplacement locales sur l'intervalle 1 sont très faibles, que ce soit pour les mesures sur prismes ou les mesures InSAR, et sont dans la limite de précision des méthodes. En revanche, les vitesses sur l'intervalle 2 sont plus importantes, la comparaison entre les différentes méthodes de mesures est donc plus significative. On remarque

que la chaîne multi-références A permet d'obtenir une nouvelle fois la vitesse moyenne locale la plus proche de celle obtenue avec les mesures sur prismes. Et plus généralement, la différence de vitesses entre InSAR et auscultation terrestre est plus faible avec les approches multi-références que l'approche mono-référence. La répétition de cette analyse pourrait permettre de valider l'hypothèse que les déplacements non-linéaires (mais linéaires par morceau) sont mieux pris en compte avec une approche multi-références.

Sur l'intervalle 3, les vitesses locales InSAR sont d'environ -3 mm/an. La différence avec la vitesse locale des prismes (entre 1.3 et 2.2 mm/an) est supérieure à celles des autres intervalles. Les vitesses étant plus faibles, on pourrait s'attendre à un écart inférieur à celui obtenu sur l'intervalle 2, ce qui n'est pas le cas. Le fait que les vitesses InSAR soient plus élevées que la vitesse locale des prismes pourraient s'expliquer par l'existence d'une déformation lente affectant l'intégralité du chantier. Ce mouvement général affecterait alors également les points de contrôle des stations totales, ce qui expliquerait que les effets de ce phénomène ne soient pas visibles dans les mesures sur prisme. Une nouvelle campagne de nivellement pourrait permettre de vérifier cette hypothèse.

Type de mesures	V_{mean}^{LOS} intervalle 1 (mm/an)	V_{mean}^{LOS} intervalle 2 (mm/an)	V_{mean}^{LOS} intervalle 3 (mm/an)
Prismes	-0.4	-11.9	-1.4
PS : mono-référence	-1.4	-9.0	-3.6
PS : multi-références A	0.1	-11.3	-3.6
PS : multi-références B	-1.2	-10.8	-3.2
PS : multi-références B $\gamma = 10$	-1.8	-10.9	-2.7

TABLE III.7 – Estimation de la moyenne locale des vitesses linéaires de déformation sur 3 intervalles de temps à partir des mesures terrestres (STR) et des mesures satellitaires avec différentes chaînes de traitement.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les mesures de déformations issues d'un traitement interférométrique exploitant les données Sentinel-1 sur Paris et plus précisément sur le chantier HSL. L'analyse des instabilités à partir de différents jeux de données a montré qu'il était possible de détecter les déformations provoquées par le passage d'un tunnelier ou de suivre précisément les effets d'un rabattement de nappe. L'utilisation des données Sentinel-1 est tout à fait pertinente pour suivre l'impact des travaux souterrains tels que la construction d'un tunnel ou celle d'un ouvrage nécessitant un rabattement de nappe comme pour l'entonnement Ouest HSL du projet EOLE. Il est aujourd'hui possible de suivre l'évolution des déformations au fur et à mesure de l'avancement des travaux avec un coût inférieur à celui des données de seconde génération. Cependant, la résolution des données Sentinel-1 ne permet pas un suivi à l'échelle du

bâtiment qui ne peut être réalisé qu'avec les données de haute résolution. En définitive, la qualité des données Sentinel-1 combinée à la périodicité de 6 jours sur l'Europe est adaptée aux suivis précis et réguliers de l'impact en surface d'un projet d'envergure comme celui du Grand Paris.

Outre les limites propres à chaque donnée, il est également nécessaire de considérer l'influence du choix des méthodes, et des hypothèses sur lesquelles elles reposent, sur les résultats des traitements. Ce questionnement a été appliqué dans ce chapitre aux choix de l'approche PS (mono-référence et multi-références) et au choix de la méthode utilisée pour séparer la composante du signal de déplacement non-linéaire de celle du délai atmosphérique. En milieu urbain, l'intérêt d'utiliser une approche PS multi-références peut sembler moins évident que pour un suivi réalisé en zone de montagne. Or, il s'avère que l'approche PS multi-références permet de gérer plus facilement les mises à jour et leur interprétation. L'analyse des séries temporelles de déplacements et des vitesses de déformation issues des 2 approches a montré que les différences de résultats sont faibles.

Lors d'un rabattement nappe, la comparaison avec des mesures d'auscultation traditionnelle a montré que la différence moyenne minimale entre les déplacements mesurés par nivellement et ceux mesurés par InSAR est de 0.6 mm avec l'approche multi-références. Cette analyse a également montré que la différence minimale de vitesses entre l'InSAR et les mesures sur prisme est de 0.6 mm/an (0.7 mm/an pour la moyenne locale) lorsque l'on s'intéresse aux déformations au centre de la cuvette de déformation (sur un intervalle de temps d'environ 3 mois) au moment où l'impact des pompages est le plus marqué.

Cela confirme que les données Sentinel-1 permettent de suivre l'impact des grands chantiers et que l'InSAR peut être utilisée comme méthode complémentaire aux mesures d'auscultation traditionnelle, voire en remplacement des mesures de nivellement direct qui permettent de définir les limites d'une cuvette de déformation lors d'un rabattement de nappe et de corriger si besoin le choix des points de référence des stations totales.

Conclusions et perspectives

Sommaire

1	Potentiels et limites des données Sentinel-1	141
2	Estimations des incertitudes	142
3	Perspectives	143

I Potentiels et limites des données Sentinel-1

L'interférométrie radar satellitaire exploitant les données Sentinel-1 qui offrent un temps de revisite réduit et une stratégie d'acquisition systématique, représente un formidable outil pour le suivi d'instabilités dans des milieux potentiellement à risque, que ce soit pour la gestion des territoires de montagne ou le suivi d'instabilités en milieu urbain, grâce à sa capacité à fournir des mesures de déplacement précises de façon globale et régulière.

Les travaux réalisés dans cette thèse ont montré que le recours à des méthodes hybrides PS/SB, dites approches PS multi-références, permet de maintenir une densité de diffuseurs cohérents suffisante pour réaliser un suivi d'instabilité en milieu périglaciaire. En complément, le développement d'un modèle de coin réflecteur adapté aux acquisitions Sentinel 1 et aux conditions climatiques rencontrées en zone de montagne a montré le potentiel intéressant de l'intégration des réponses radar de coins réflecteurs aux méthodes InSAR multi-temporelles. Le déploiement sur le terrain de plusieurs coins réflecteurs et l'utilisation d'une approche PS multi-références ont ainsi permis d'identifier plusieurs zones instables sur les moraines sur le site d'Argentière à proximité de Chamonix. Les coins réflecteurs ont également pu être utilisés pour estimer la vitesse d'écoulement à la surface du glacier d'Argentière lorsque la visibilité de ces derniers l'a permis. Les vitesses de déplacement obtenues sont cohérentes avec les mesures GNSS réalisées dans des études contemporaines aux travaux de cette thèse.

En revanche, les données Sentinel-1 n'ont pas atteint une fréquence d'acquisition suffisante pour surmonter les limites de perte de cohérence pour le suivi par interférométrie différentielle du déplacement de glaciers tempérés aux latitudes du Massif du Mont Blanc. Nos travaux réalisés sur le glacier d'Argentière ont montré que, malgré la présence de franges interférométriques lorsque les conditions anticycloniques sont favorables, différentes zones du glacier affichent une très faible cohérence induisant des erreurs importantes lors du déroulement de phase. Le temps de revisite de 6 jours semble être trop long pour ces petits glaciers tempérés de la vallée de Chamonix. Nous avons cependant montré qu'il était possible de corriger les profils de vitesses le long du glacier à partir de mesures ponctuelles telles que les mesures GNSS ou le suivi de la position de coins réflecteurs.

En milieu urbain, nos travaux montrent qu'il est possible d'utiliser les images radar Sentinel-1 pour le suivi de grands chantiers, malgré leur résolution moyenne. Les effets de travaux souterrains, correspondant au passage d'un tunnelier et aux opérations de rabattement de nappe ont pu être détectés. Les changements de tendance de déformation, coïncidant avec les variations du niveau des nappes phréatiques, ont pu être datés et quantifiés. L'échantillonnage temporel élevé offre ainsi l'opportunité de suivre des déformations transitoires, ce qui était jusque-là difficile avec les précédentes missions en bande C. L'application de méthodes PS a permis de suivre l'évolution de la zone de déformation provoquée par les pompages, grâce à l'intégration de nouvelles acquisitions radar au fur et à mesure de l'avancement des travaux, ce qui est rendu possible par la semi-automatisation de la chaîne de traitement. Le recours aux méthodes PS multi-références ne semblent pas ici présenter un avantage par rapport aux méthodes PS classiques du point de vue de la conservation du nombre des diffuseurs sélectionnés. Les estimations de vitesses moyennes linéaires diffèrent peu entre les deux types d'approches. On notera toutefois que des différences sur la prise en compte des mouvements non-linéaires semblent apparaître. La comparaison avec les mesures issues de l'auscultation terrestre traditionnelle tend à privilégier les méthodes multi-références. Ces travaux de comparaison devront néanmoins être poursuivis pour vérifier cette observation.

Les travaux de cette thèse se sont effectués en parallèle du lancement du GIE Aurigami. Un effort important a été réalisé pour promouvoir cette nouvelle société, et l'utilisation de l'InSAR dans le domaine du génie civil. Cela a été l'occasion de réaliser de nombreuses études de faisabilité, sur divers endroits en France et à l'étranger. Cela montre l'intérêt grandissant des différents acteurs publics et privés pour l'utilisation de cette méthode, dont Sentinel-1 participe à la démocratisation.

II Estimations des incertitudes

Dans de nombreuses études, les incertitudes ne sont pas soigneusement traitées, voire ne sont pas prises en considération. Un des objectifs de ces travaux a été d'estimer les incertitudes en termes de déplacement, de hauteur et de géolocalisation dans les résultats issus des données Sentinel-1, dans deux contextes spécifiques que sont le suivi d'instabilités en montagne et le suivi des impacts d'un chantier souterrain. L'estimation de ces différentes incertitudes a pu être réalisée en fonction de la disponibilité de données considérées comme vérité terrain. Ainsi, la quantification des incertitudes sur la mesure de déplacement a été réalisée en estimant l'erreur de phase sur certains coins réflecteurs, révélant une erreur inférieure à 0,19 radian sur l'ensemble des réflecteurs étudiés. Ces résultats ont permis d'envisager la mise en place d'un suivi PS intégrant un réseau de coins réflecteurs. De même, les mesures de vitesse de déplacement réalisées par différentes approches PS ont été comparées avec des mesures d'auscultation traditionnelle en surface d'un chantier souterrain. La comparaison la plus significative a été réalisée à partir de mesures de déplacement issues de stations totales. Les mesures de déplacement issues des méthodes terrestres, d'abord projetées dans la ligne de visée des satellites Sentinel-1, ont ensuite été utilisées pour calculer les vitesses de déformation pour différentes phases de travaux et comparées aux mesures InSAR. Une différence de 0.6 mm/an a été obtenue lorsqu'on compare les vitesses issues d'une approche multi-références et celles issues des stations totales, au moment où l'impact des pompages est le plus marqué.

Le suivi d'incertitude sur les hauteurs, mené à partir d'une approche PS multi-temporelle en zone de montagne et de données LiDAR, montre une différence moyenne entre les mesures LiDAR et les mesures InSAR d'environ 3,0 m. Cette analyse a également été réalisée sur les 3 réflecteurs artificiels, en comparant les résultats d'estimation de hauteur par une méthode PS (dont le point de référence est un autre réflecteur) et les résultats obtenus à partir d'une station totale et de mesures GPS. L'erreur quadratique moyenne obtenue est de 0,15 m. Enfin, l'incertitude en géolocalisation a été étudiée en calculant la différence entre la position absolue de 3 coins réflecteurs estimée à partir des données Sentinel-1 et la position estimée par méthode terrestre (station totale et GPS). Dans ce contexte, l'erreur quadratique moyenne est de 0,83 m en 2D (distance horizontale) et de 0,84 m en 3D.

III Perspectives

D'un point de vue applicatif, certains travaux engagés au cours de cette thèse présentent un intérêt indéniable à être poursuivis. Les expérimentations réalisées sur Argentière tendent à montrer qu'une analyse sur une période supérieure à deux étés permettrait de réduire l'incertitude sur l'estimation des instabilités. Cette étude devrait également s'accompagner du déploiement et du maintien en état de coins réflecteurs sur toute la période d'observation. Une analyse de la réponse radar de coins réflecteurs a été initiée en période estivale et hivernale. Cette analyse pourrait être complétée par un travail sur l'estimation de la profondeur de pénétration des ondes radar en fonction de l'évolution des conditions météorologiques en corrélant les résultats avec le métamorphisme de la neige fourni par exemple un modèle tel que le modèle Crocus. De même, les expérimentations menées à partir de réflecteurs artificiels et des données LiDAR pourraient être poursuivies en milieu urbain afin de caractériser les erreurs de positionnement des PS dans un milieu à forte cohérence mais où la cellule de résolution peut être dominée par de multiples échos du fait de la résolution moyenne des données Sentinel-1.

D'un point de vue méthodologique, des travaux sur le suivi de diffuseurs distribués (DS) par une approche PS multi-références ont été initiés (même s'ils ne sont pas présentés dans ce manuscrit) et nécessitent d'être poursuivis. En particulier, un développement méthodologique sur le processus de sélection de ces diffuseurs sur des critères statistiques pourrait être réalisé. L'intégration au fur et à mesure des nouvelles acquisitions dans les traitements multi-temporels, en ayant éventuellement recours à un processus de sélection automatique des données en fonction de la présence de neige, semble être une piste intéressante à explorer. Enfin, il faudra sans doute prochainement avoir recours à des techniques de d'apprentissage profond (deep learnig). Les premiers travaux sur la réduction du speckle (Lattari et al., 2019) ou sur l'analyse de séries temporelles de déplacement estimées par des méthodes multi-temporelles montrent des résultats intéressants (Wang et al., 2019). L'analyse et la prédiction de tendance de déplacement par deep learnig pourraient représenter un formidable outil notamment dans l'analyse du risque en montagne ou dans l'analyse du comportement de certains ouvrages d'art ou d'infrastructures en milieu urbain. Cependant, la méthode n'en est encore qu'à ces balbutiements et nécessite de nombreux développements avant qu'elle puisse être utilisée de façon opérationnelle dans le suivi régulier d'un chantier ou d'un ouvrage.

Table des figures

I.1	Historique des missions satellitaires SAR. Entre parenthèses : temps de revisite (complété à partir de (Bovenga et al., 2018)).	7
I.2	Configuration géométrique des satellites SAR (Bamler, 1999)	9
I.3	Distorsions géométriques de l'imagerie SAR (version modifiée (Tempfli et al., 2009))	10
I.4	Comparaison entre image optique (a), image SAR (b) et rectification radar de l'image optique avec masque de visibilité (c) d'après Trouvé, 2006 (Trouvé, 2006)	11
I.5	Modes d'acquisition de Sentinel 1 (source : ESA)	12
I.6	Arrangement des bursts et swaths constituant une image Sentinel-1 (mode IW) A gauche les 9 bursts d'un swath, au centre la superposition des bursts et swaths, à droite une image SLC dans son intégralité.	13
I.7	Configuration interférométrique d'une cible située à la distance R du satellite et d'altitude H_p d'une surface de référence. Les deux orbites sont séparées par une ligne de base B et observent la cible avec deux angles de vue différents. 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 être distingués à partir d'un seul passage du satellite (à partir de (Cavalié, 2007)).	16
I.8	Fonction de densité de probabilité de phase d'un diffuseur ponctuel pour différentes valeurs de RSC (Adam et al., 2005).	25
I.9	Comparaison des surfaces SER et des surfaces apparentes dans des situations standards de réponse d'une cible ponctuelle; (a) SER = surface apparente; (b) SER > surface apparente; (c) SER < surface apparente d'après (Massonnet and Souyris, 2008)	30
I.10	Exemple d'un diffuseur fort avec des lobes latéraux dans une image d'intensité Sentinel-1, correspondant au bâtiment du centre médical de Praz-Coutant à Passy, Haute Savoie (France)	31
I.11	Géométrie et ajustement d'un CR triangulaire. Ψ représente l'angle d'élévation, θ l'angle d'azimut, Φ l'angle off-nadir, ϕ l'angle d'incidence, β l'angle d'inclinaison et L la longueur du plus petit côté des plaques triangulaires rectangles isocèles.	32
I.12	Configuration de la base orthonormée à 3 dimensions β_{3D} des mesures terrestres et de la base orthonormée à 2 dimensions β_{SAR}^{des} des mesures SAR en trajectoire descendante. Les angles θ et α décrivent respectivement l'angle d'incidence et la direction azimutale (Fallourd et al., 2011).	35
II.1	Illustration des 9 CR triangulaires et d'un CR rectangulaire utilisés lors des différentes expérimentations.	45
II.2	Dispositif permettant la mesure relative de SER en chambre anéchoïque de CR1	46
II.3	Mesures des SER de CR1, CR2 et CR3 en chambre anéchoïque	48

II.4	Localisation du champ utilisé pour les expérimentations à Choisy (Haute-Savoie). Les carrés rouges indiquent la position des CR - CR1, CR2 et CR3. Gauche : Google Map; droite : Moyenne temporelle de l'intensité de 7 images Sentinel-1 entre 2017-04-20 au 2017-06-07	49
II.5	Sélection du pixel correspondant à CR1 dans une image Sentinel-1 descendante acquise le 26/03/2016	50
II.6	Séries temporelles d'intensité, de SER et de RSC à partir d'images Sentinel-1 . .	53
II.7	(a) Glaciers d'Argentière and Mer de Glace. (b) Carte de la localisation du site test de Chamonix-Mont-Blanc	55
II.8	Cartographie des tills et moraines obtenue lors du projet GlaRiskAlp. Les zones potentiellement sensibles aux déformations ont été numérotées et décrites dans les figures II.9 et II.10.	55
II.9	Secteurs sensibles de la partie Ouest du site test. [1] Moraine du glacier des Rognons, [2] Faille de l'angle [3] Moraine de névé.	56
II.10	Secteurs sensibles de la partie Est du site test. [4] Moraine latérale, [5] Tills . . .	56
II.11	Photographie du 29/09/2017 provenant d'un des deux appareils installés sur le site (Latitude : 45.97170570, longitude : 6.97575317, altitude : 2611.78). Les cercles rouges indiquent la position des CR.	57
II.12	Intensité d'une image Sentinel-1 (30/09/2017) en géométrie radar, centrée sur 6 CR installée sur le site test de Chamonix-Mont-Blanc. Points rouge : pixels sélectionnés. Rectangle rouge : zoom sur les 5 CR les plus proches.	58
II.13	Série temporelle de l'intensité d'images SAR durant l'hiver 2017-2018 sur 6 CR installés sur et à proximité de la moraine latérale du glacier d'Argentière.	60
II.14	Série temporelle de l'intensité d'images SAR en période estivale en 2017 et 2018 sur 4 CR installés sur et à proximité de la moraine latérale du glacier d'Argentière.	61
II.15	Photographies acquises par l'appareil de surveillance le plus en amont du glacier d'Argentière. Les carrés rouges indiquent la position des CR.	61
II.16	Températures et enneigement relevés par la station de Météo France (indiqué par un repère bleu sur la carte) dans le massif des Aiguilles Rouges. La croix bleue indique le site d'installation des coins réflecteurs. Les traits de couleurs indiquent les différentes périodes présentées dans le tableau II.3. Trait bleu : 10/10/2016 - 30/09/2017; trait vert : 15/05/2017-30/09/2017; trait rouge : 01/08/2017-30/10/2017 et 09/07/2018-25/09/2018; trait orange : 30/09/2017-30/10/2017; trait magenta : 09/07/2018-25/09/2018.	63
II.17	Intensité relative de diffuseurs à proximité de CR1, CR4 et CR6 (image Sentinel-1 du 30/09/2017)	65
II.18	Représentation des lignes de base spatiales (perpendiculaires) et temporelles réparties en trois sous-réseaux d'interférogrammes.. . . .	69
II.19	Représentation des lignes de base spatiales (perpendiculaires) et temporelles réparties d'un réseau continu d'interférogrammes.. . . .	69
II.20	Chaîne de traitement IPTA proposée pour le suivi des instabilités du site test d'Argentière. La flèche bleue indique que le processus est effectué de manière itérative. Les cases grisées décrivent les étapes réalisés sur une pile multi-références et les cases bleutées celles réalisées sur une pile mono-référence. Encadré rouge : traitements réalisés sur la pile de 35 interférogrammes. Encadré noir : traitements réalisés sur la pile de 74 interférogrammes.	71

II.21	Système permettant d'estimer précisément la position (latitude, longitude, altitude) des coins réflecteurs à partir d'une base GPS, de trois GPS différentiel et d'une station totale. A) Base GPS installée à proximité de la voie ferrée au niveau de la commune de Montroc sur le point du réseau RENAG. B) Un des 3 GPS différentiels équipés d'une batterie externe pour effectuer des mesures pendant 12 heures. C) Réglage de la station totale permettant de mesurer les positions relatives des CR aux points de contrôle.	72
II.22	Analyse des interférogrammes Sentinel-1 centrés sur la zone d'étude. a) Image optique WorldView-3 (résolution 31 cm) acquise le 02/07/2015. Le tracé rouge indique la localisation de la faille de l'Angle. Les lignes blanches représentent les courbes de niveau obtenues à partir d'un MNT de 5 m de résolution. b) Interférogramme différentiel à 420 jours du couple 01/08/2017-25/09/2018. c) Interférogramme différentiel à 763 jours du couple 30/09/2017-30/08/2015. d) Interférogramme différentiel à 30 jours du couple 25/08/2017-24/09/2017. e) Interférogramme différentiel à 6 jours du couple 01/09/2018-07/09/2018. f) Interférogramme différentiel à 270 jours du couple 12/10/2017-09/07/2018.	75
II.23	Résultat des différentes méthodes de sélection des potentielles cibles ponctuelles. Les points rouges correspondant aux pixels sélectionnés et les carrés rouges au 4 CR utilisables sur la période suivie. Les zones Est et Ouest du site test sont entourées en rouge. A) Résultat de la sélection par la méthode de la dispersion d'amplitude ($D_a = 0.4$). B) Résultat de la sélection par la méthode de la dispersion d'amplitude ($D_a = 0.67$). C) Résultat de la sélection par la méthode de la corrélation spectrale ($C = 0.35$ et $RME = 0.5$). D) Cibles présentes dans l'union des listes B et C. E) Cibles présentes dans l'intersection dans les listes B et C.	77
II.24	Comparaison des corrections de hauteurs en fonction de la différence d'altitude et en fonction de la distance 2D avec le point de référence, avant et après compensation des effets atmosphériques	80
II.25	Comparaison des corrections de hauteurs en fonction de la différence d'altitude et en fonction de la distance 2D avec le point de référence, avant et après compensation des effets atmosphériques	81
II.26	Vitesses (rad/an) après inversion par SVD obtenues avec différents facteurs de lissage ($\gamma = 0, 10, 100$) à partir des séries de 35 et 74 interférogrammes.	83
II.27	Vitesses moyennes linéaires de déplacement LOS à partir des séries de 74 interférogrammes.	85
III.1	Schéma général du projet Grand Paris Express et son calendrier prévisionnel. Le projet comprend une voie de contournement de Paris (ligne 15) et des lignes reliant les quartiers en développement (lignes 16, 17 et 18), complétées par le prolongement de la ligne 14) (SGP, 2015).	99
III.2	Localisation des secteurs argileux sur le tracé du Grand Paris Express (source : Société Grand Paris et (Antoinet, 2019)).	100
III.3	Localisation des principaux aléas géologiques (modifiée à partir de (Fluteaux, 2013))	101
III.4	Schéma synthétique des ouvrages souterrains du projet EOLE (Source : SYSTRA)	103
III.5	Schéma de l'entonnement Ouest Haussmann-Saint-Lazare et de son puits de travaux, le puits Pasquier (Source : SED)	104

III.6	Carte d'isorabattement(estimation) dans la nappe des Sables du Cuisien liées aux pompages de rabattement de nappe pour la construction des ouvrages de l'entonnement de Haussmann-Saint-Lazare et des gares CNIT - La Défense et de Porte Maillot (version modifiée d'après (SNCF, 2014)).	106
III.7	Carte d'isorabattement (estimation) dans la nappe des Calcaires Grossiers du Lutétien liées aux pompages de rabattement de nappe pour la construction des ouvrages de l'entonnement de Haussmann-Saint-Lazare et des gares CNIT - La Défense et Porte Maillot (version modifiée d'après (SNCF, 2014)).	106
III.8	Extrait de la carte géologique de Paris (source BRGM) et isopièzes de rabattement dans la nappe des Calcaires Grossiers (version modifiée de (SNCF, 2014))	107
III.9	Carte de susceptibilité aux mouvements de terrain liés à la dissolution de gypse et plan de prévention du risque (source : (Magalhaes, 2010))	107
III.10	Emprise des images Sentinel 1 de l'orbite relative 8 acquises en trajectoire descendante (05/03/2016). Les images acquises sur cette orbite relative couvrent l'intégralité de l'agglomération Parisienne et la quasi majorité du projet Grand Paris	111
III.11	Moyenne temporelle des intensités de la pile descendante construite à partir d'un seul burst (05/03/2016-30/06/2019). L'image ortho-rectifiée montre qu'un seul burst permet de surveiller la partie située au Nord de la Seine ainsi que les méandres de la Seine à l'Ouest, soit l'intégralité du tracé du projet EOLE.	111
III.12	Chaînes de traitement IPTA multi-références A et B simplifiées, proposées pour le suivi des travaux du Grand Paris. Les cases blanches décrivent les étapes réalisées sur une série multi-références, les cases bleutées celles réalisées sur une série temporelle mono-référence et la flèche bleue indique que le processus est effectué de manière itérative. L'encadré noir correspond aux opérations communes des chaînes A et B et les encadrés rouges les opérations propres à chacune des chaînes.	114
III.13	Chaîne de traitement mono-référence IPTA simplifiée proposée pour le suivi des travaux du Grand Paris. La flèche bleue indique que le processus est effectué de manière itérative.	115
III.14	Densité de diffuseurs cohérents sélectionnés par la méthode de dispersion d'amplitude, par la méthode de corrélation spectrale et par union des deux méthodes	117
III.15	Interférogramme 23/04/2017 - 11/05/2017, phase résiduelle et phase corrigée (délai atmosphérique, erreurs orbitales et topographiques résiduelles) après la première étape de régression de la chaîne multi-références A. A) Interférogramme (jeu de données 3), B) phase résiduelle correspondante (jeu de données 3). C) phase interférométrique corrigée (jeu de données 3). D) Interférogramme du jeu de données 4. Les données sont présentées dans leur géométrie d'origine mais sont retournées, pour avoir l'Est et l'Ouest orientés correctement. Les rectangles noirs correspondent à l'emprise d'un burst. L'encadré rouge correspond à la zone utilisée pour la construction des histogrammes de la phase résiduelle.	118
III.16	Histogrammes des écart-types de la phase résiduelle de la première régression pour chaque PS de l'interférogramme 23/04/2017 - 11/05/2017 appliquée aux jeux de données 3 (1 burst) et 4 (2 bursts).	120
III.17	Evolution de la moyenne des écart-types des résidus en fonction du nombre d'images utilisées. Les résidus correspondent aux résultats issus de la première régression de la chaîne multi-références A appliquée au jeu de données 3.	121

III.18	Evolution de la moyenne des écart-types des résidus en fonction du nombre d'images utilisées. Les résidus correspondent aux résultats issus de l'inversion en série temporelle par SVD de la chaîne multi-références A appliquée au jeu de données 3. En bleu : les résultats obtenus lorsque l'estimation de délai atmosphérique est réalisée avant l'inversion (approche A), en vert : après l'inversion (approche B) avec 169 images, en orange après l'inversion (approche B) avec un facteur de lissage $\gamma = 10$ (voir section 1.4.4, avec 169 images).	122
III.19	Evolution de l'écart-type des vitesses moyenne linéaires en fonction du nombre d'images utilisées. En bleu : les résultats obtenus avec la chaîne multi-références A. En vert : les résultats obtenus avec la chaîne multi-références B sans facteur de lissage (voir section 1.4.4). En orange : avec la chaîne multi-références B et un facteur de lissage $\gamma = 10$. En rouge : les résultats obtenus avec la chaîne de traitement mono-référence. Rouge, vert et orange : uniquement avec 169 images.	123
III.20	Carte de la cohérence temporelle estimée sur la phase avant régression temporelle (chaîne multi-références A). Système de projection : WGS84 Pseudo Mercator. .	125
III.21	Carte des vitesses moyennes linéaires de déplacement dans la ligne de visée du satellite calculées avec l'approche multi-références A appliquée aux données Sentinel-1 entre le 27/02/2015 et le 12/03/2017(jeu de données 2, trajectoire descendante). Système de projection : WGS84 Pseudo Mercator. L'encadré 1 correspond à la Butte Montmartre. L'encadré 2 correspond à la butte Bonne-Nouvelle et l'encadré 3 au Boulevard Saint-Martin (butte Saint-Martin) et Boulevard du Temple. Enfin, l'encadré 4 correspond à une zone d'instabilités située entre la gare St-Lazare et le quartier des Batignolles et qui coïncide avec le passage du tunnelier utilisé pour le prolongement de la ligne 14, dont le tracé est présenté en dessous (source RATP).	127
III.22	Carte des vitesses moyennes linéaires de déplacement dans la ligne de visée du satellite calculées avec l'approche multi-références A appliquée aux données Sentinel-1 entre le 28/09/2016 et le 27/04/2018 (jeu de données 4, trajectoire descendante). Système de projection : WGS84 Pseudo Mercator. Les encadrés rouges indiquent les zones de faibles déformations correspondant aux buttes de Montmartre, Bonne-Nouvelle et Saint-Martin. Les encadrés noirs correspondent à des zones impactées par des projets d'aménagement urbain (projet Clichy-Batignolles) et par des travaux souterrains (Projet EOLE, Porte Maillot et HSL).	128
III.23	Carte des vitesses linéaires moyennes de déformation calculées à partir des jeux de données 1 et 3 sur les pentes Ouest et Sud sud-ouest de la Butte Montmartre. A) Géométrie ascendante (jeux de données 1), chaîne multi-références A . B)Géométrie ascendante (jeux de données 1), chaîne mono-référence. C) Géométrie descendante (jeux de données 3), chaîne multi-références A. D) Géométrie descendante (jeux de données 3), chaîne mono-référence	130
III.24	Cartes des vitesses linéaires moyennes de déformation calculées entre Mars 2016 et Juin 2019 à partir des données Sentinel-1 descendantes. La zone couvre le tracé du projet EOLE et les 3 ouvrages souterrains réalisés par méthode traditionnelle et avec rabattement des nappes phréatiques du Lutécien et du Cuisien. Système de projection : WGS84 pseudo-mercator.	132
III.25	Evolution de la piézométrie et estimation de ses effets en surface.	134
III.26	Localisation des piézomètres, des prismes et points de nivellement sur HSL. . . .	135

III.27	Séries temporelles de déplacements de 2 CS estimées à partir des 4 traitements différents. A : chaîne multi-références A. B : chaîne multi-références B. C : chaîne multi-références B avec un facteur de lissage $\gamma = 10$. D : chaîne mono-référence.	136
28	Vecteurs de déplacement basés sur une estimation de localisation absolue de CR8 (ascendant) et CR9 (décroissant). Les flèches de couleur indiquent l'orientation et la norme du déplacement (les vitesses sont indiquées en noir (cm/jour)). L'origine des flèches de couleur indique la position du CR à la fin de chaque intervalle de temps analysé (4 pour CR8, 6 pour CR9). La direction supposée de l'écoulement du glacier (direction de la pente principale) est indiquée par des flèches en pointillés noirs. Source de l'image de fond : geoportail.gouv.fr	173

Liste des tableaux

I.1	Caractéristiques des principales approches PS (d’après (Crosetto et al., 2016)) . . .	19
II.1	SER théorique SER_{th} et SER mesurée SER_m (dBm^2) dans une chambre anéchoïque pour différentes longueurs de côtés et différentes formes de CR en bande C (c) avec $\lambda = 5,6$ cm et en bande X (x) avec $\lambda = 3,1$ cm . T = Triangulaire, R = Rectangulaire, Perf. = Perforé.	47
II.2	Moyennes des SER (dBm^2) and RSC (dB) estimées à partir de 7 images Sentinel-1 descendantes acquises du 20/04/2017 au 07/06/2017.	52
II.3	Indice de stabilité de l’intensité de 6 CR entre le 10/10/2016 et le 25/09/2018. . .	62
II.4	SER (dBm^2), RSC (dB) et erreur de phase (rad) estimés à partir de l’image Sentinel-1 du 30/09/2017.	65
II.5	Analyse des erreurs d’estimations de hauteur	79
II.6	Vitesses V_{phase} (rad/an) estimées lors de l’étape d’inversion en série temporelle correspondant aux réflecteurs CR1, CR5 et CR6, converties en vitesses de déformation V_{def} (mm/an)	84
III.1	Tableau récapitulatif des jeux de données utilisées	110
III.2	Estimation de la perte de densité de CS (%) par rapport aux densités obtenues avec 20 images (8 mois). Comparaison entre les densités obtenues avec une couverture temporelle de 3 ans et 3 mois à partir de 39 et 160 images.	117
III.3	Estimation de la cohérence moyenne et de la cohérence moyenne sur la Zone d’Influence Géotechnique (voir figure III.26) du chantier HSL.	125
III.4	Estimation des vitesses linéaires moyennes de déformation sur les pentes Ouest et Sud sud-ouest de la Butte Montmartre en fonction de la chaîne de traitement utilisée et de la géométrie d’acquisition des données traitées.	129
III.5	Estimation de la moyenne et de l’écart-type de la différence entre mesures satellitaire et mesures terrestres (nivellement) en fonction de la chaîne de traitement utilisée.	137
III.6	Estimation de la moyenne et de l’erreur quadratique moyenne de la différence entre les vitesses InSAR et vitesses terrestres STR (mm/an) en fonction de la chaîne de traitement utilisée.	138
III.7	Estimation de la moyenne locale des vitesses linéaires de déformation sur 3 intervalles de temps à partir des mesures terrestres (STR) et des mesures satellitaires avec différentes chaînes de traitement.	139
8	Données Sentinel-1 Ascendante : vitesse de CR8 et orientation du déplacement comparée à la direction de plus grande pente.	172

- 9 Données Sentinel-1 Descendante : vitesse de CR9 et orientation du déplacement comparée à la direction de plus grande pente. 172

Bibliographie

- Adam, N., Kampes, B., and Eineder, M. (2005). Development of a Scientific Permanent Scatterer System : Modifications for Mixed ERS/Envisat Time Series. In *Envisat & ERS Symposium*, volume 572.
- Agram, P. (2010). *Persistent scatterer interferometry in natural terrain*. PhD thesis, Stanford University.
- Aguilar, F. J. and Mills, J. P. (2008). Accuracy assessment of lidar-derived digital elevation models. *The Photogrammetric Record*, 23(122) :148–169.
- AITES (2009). General report on conventional tunnelling method. Technical report, Association Internationale des Tunnels et de l'Espace Souterrain, Lausanne. OCLC : 716831961.
- Algafsh, A., Inggs, M., and Mishra, A. K. (2016). The effect of perforating the corner reflector on maximum radar cross section. In *Proceedings of 2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Abu Dhabi, United Arab Emirates*, pages 1–4. IEEE.
- Anghel, A. (2015). *High-resolution time-frequency SAR signal processing for large infrastructure monitoring*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes.
- Antoinet, E. (2019). Grands projets d'infrastructures en région parisienne : Grand Paris Express et autres. Technical report, ANTEA.
- Antonio Pepe and Fabiana Calò (2017). A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements. *Applied Sciences*, 7(12) :1264.
- Artese, S. and Perrelli, M. (2018). Monitoring a Landslide with High Accuracy by Total Station : A DTM-Based Model to Correct for the Atmospheric Effects. *Geosciences*, 8(2) :46.
- Bakon, M., Perissin, D., Lazecky, M., and Papco, J. (2014). Infrastructure Non-linear Deformation Monitoring Via Satellite Radar Interferometry. *Procedia Technology*, 16 :294–300.
- Balan, A. (2013). Le sous-sol parisien : carrières, métros et projets du Grand-Paris. Technical report, Société Grand Paris.
- Balz, T., Washaya, P., and Jendryke, M. (2018). Urban change monitoring using globally available sentinel-1 imagery. In *2018 International Workshop on Big Geospatial Data and Data Science (BGDDS)*, pages 1–4.
- Bamler, R. (1999). The srtm mission : A world-wide 30 m resolution dem from sar interferometry in 11 days. In *Photogrammetrische Woche, Universitaet Stuttgart*, pages 145–154.

- Barboux, C., Delaloye, R., Strozzi, T., Collet, C., and Raetzo, H. (2012). TSX INSAR Assessment For Slope Instabilities Monitoring In Alpine Periglacial Environment (Western Swiss Alps, Switzerland). In *Fringe 2011*, volume 697 of *ESA Special Publication*, page 16.
- Barboux, C., Strozzi, T., Delaloye, R., Wegmüller, U., and Collet, C. (2015). Mapping slope movements in Alpine environments using TerraSAR-X interferometric methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 109 :178–192.
- Barla, G., Tamburini, A., Del Conte, S., and Giannico, C. (2016). InSAR monitoring of tunnel induced ground movements. *Geomechanics and Tunnelling*, 9(1) :15–22.
- Bekaert, D., Walters, R., Wright, T., Hooper, A., and Parker, D. (2015). Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*, 170 :40–47.
- Bekaert, D. P. S. (2015). *Interferometric Synthetic Aperture Radar for slow slip applications*. PhD thesis, University of Leeds.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., and Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11) :2375–2383.
- Binet, P. (2018). Les infrastructures du grand paris et eole. Technical report, SNCF RESEAU.
- Bird, P., Keyle, G., and Kenward, D. (1993). Calibration of ers-1 sar. In Attema, E., editor, *CEOS SAR Calibration Workshop*, Noordwijk, The Netherlands.
- Bodin, X., Schoeneich, P., Deline, P., Ravanel, L., Magnin, F., Krysiński, J.-M., and Echelard, T. (2015). Le permafrost de montagne et les processus géomorphologiques associés : évolutions récentes dans les Alpes françaises. *Revue de géographie alpine*, 103–2(103-2).
- Bonì, R., Bosino, A., Meisina, C., Novellino, A., Bateson, L., and McCormack, H. (2018). A Methodology to Detect and Characterize Uplift Phenomena in Urban Areas Using Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, 10(4) :607.
- Bovenga, F., Belmonte, A., Refice, A., Pasquariello, G., Nutricato, R., Nitti, D. O., and Chiaradia, M. T. (2018). Performance analysis of satellite missions for multi-temporal sar interferometry. *Sensors*, 18(5).
- Bovenga, F., Chiaradia, M., Nutricato, R., Refice, A., and Wasowski, J. (2006). Application of psi technique to slope instability detection in the daunia mountains, italy. In *Proceedings of Fringe 2005*, page 32.
- Bovenga, F., Pasquariello, G., Pellicani, R., Refice, A., and Spilotro, G. (2017). Landslide monitoring for risk mitigation by using corner reflector and satellite sar interferometry : The large landslide of carlantino (italy). *CATENA*, 151 :49 – 62.
- Bovenga, F., Refice, A., Pasquariello, G., Nitti, D. O., and Nutricato, R. (2014). Corner reflectors and multi-temporal SAR interferometry for landslide monitoring. In Notarnicola, C., Paloscia, S., and Pierdicca, N., editors, *Proc. SPIE 9243, SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XIV, 92430I (21 October 2014)*, page 92430I.
- Briaais, J. (2015). *The Cenozoic of the Paris basin : a high resolution sedimentary record of lithospheric deformation in low subsidence context*. Theses, Université Rennes 1.

- Briançon, L., Cazaudumec, B., and Pincent, B. (2016). Auscultation géotechnique. *Techniques de l'ingénieur Géotechnique*, TIB238DUO(ref. article : c229). fre.
- Brunet, M. and Le Pichon, X. (1982). Subsidence of the paris basin. In *JGR Solid Earth*, volume 87, Issue B10, pages 8547–8560.
- Bryn, M., Afonin, D., and Bogomolova, N. (2017). Geodetic Monitoring of Deformation of Building Surrounding an Underground Construction. *Procedia Engineering*, 189 :386–392.
- Bähr, H. (2013). Orbital Effects in Spaceborne Synthetic Aperture Radar Interferometry. *KIT Scientific Publishing*.
- Cavalié, O. (2007). *Mesures InSAR et modélisation de faibles déformations d'origine anthropique (lac Mead, USA) ou tectonique (faille de Haiyuan, Chine)*. Theses, Université Paris Sud - Paris XI.
- CETU (2006). Guide d'application du fascicule 69 du cctg travaux en souterrain. Technical report, Centre d'Etudes des Tunnels.
- CETU (2016). Mission de maîtrise d'oeuvre en travaux souterrains. Technical report, Centre d'Etudes des Tunnels, Bron, France.
- Chabardes, M. (2015). Dossier d'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique - ligne 15 est. Technical report, Société du Grand Paris.
- Chen, C. W. and Zebker, H. A. (2000). Network approaches to two-dimensional phase unwrapping : intractability and two new algorithms. *J. Opt. Soc. Am. A*, 17(3) :401–414.
- Chen, S. and Xiang, Y. (2006). A procedure for theoretical estimation of dewatering-induced pile settlement. *Computers and Geotechnics*, 33(4-5) :278–282.
- Chuah, B.-K. C. H.-T. (2003). Modeling of RF absorber for application in the design of anechoic chamber. *Progress In Electromagnetics Research*, 43 :273–285.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. (2003). Monitoring landslides and tectonic motions with the permanent scatterers technique. *Engineering Geology*, 68 :3–14.
- Costantini, M., Malvarosa, F., Minati, F., Trillo, F., and Vecchioli, F. (2017). Complementarity of high-resolution COSMO-SkyMed and medium-resolution Sentinel-1 SAR interferometry : Quantitative analysis of real target displacement and 3d positioning measurement precision, and potential operational scenarios. In *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pages 4602–4605, Fort Worth, TX. IEEE.
- Cousin, B., Rotta Loria, A. F., Bourget, A., Rognon, F., and Laloui, L. (2019). Energy performance and economic feasibility of energy segmental linings for subway tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 91 :102997.
- Crosetto, M., Gili, J. A., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Corominas, J., and Serral, D. (2013). Interferometric SAR monitoring of the Vallcebre landslide (Spain) using corner reflectors. *Natural Hazards and Earth System Science*, 13(4) :923–933.

- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N., and Crippa, B. (2016). Persistent Scatterer Interferometry : A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115 :78–89.
- Curry, A. M., Cleasby, V., and Zukowskyj, P. (2006). Paraglacial response of steep, sediment-mantled slopes to post-‘Little Ice Age’ glacier recession in the central Swiss Alps. *Journal of Quaternary Science*, 21(3) :211–225.
- da Silva, I., Ibañez, W., and Poleszuk, G. (2018). Experience of using total station and gns technologies for tall building construction monitoring. In Rodrigues, H., Elnashai, A., and Calvi, G. M., editors, *Facing the Challenges in Structural Engineering*, pages 471–486. Springer International Publishing.
- Darvishi, M., Schlögel, R., Kofler, C., Cuzzo, G., Rutzinger, M., Zieher, T., Toschi, I., Remondino, F., Mejia-Aguilar, A., Thiebes, B., and Bruzzone, L. (2018). Sentinel-1 and ground-based sensors for continuous monitoring of the corvara landslide (south tyrol, italy). *Remote Sensing*, 10(11).
- De Zan, F., Prats-Iraola, P., Scheiber, R., and Rucci, A. (2014). Interferometry with tops : coregistration and azimuth shifts. In *European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, pages 949–952.
- Delaloye, R., Perruchoud, E., Bodin, X., Avian, M., Hausmann, H., Kellerer-Pirklbauer, A., Kaufmann, V., Mihajlovic, D., Lambiel, C., Ikeda, A., Roer, I., Krainer, K., Käab, A., Staub, B., and Thibert, E. (2008). Recent interannual variations of rock glacier creep in the European Alps.
- Deline, P., Gardent, M., Magnin, F., and Ravel, L. (2012). Morphodynamics of the Mont Blanc massif (European Alps) in a changing cryosphere. In *9th EGU General Assembly*, Vienne, Austria.
- Deline, P., Gruber, S., Delaloye, R., Fischer, L., Geertsema, M., Giardino, M., Hasler, A., Kirkbride, M., Krautblatter, M., Magnin, F., McColl, S., Ravel, L., and Schoeneich, P. (2015). Ice Loss and Slope Stability in High-Mountain Regions. In *Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters*, pages 521–561. Elsevier.
- Dell’Acqua, F., Bignami, C., Chini, M., Lisini, G., Polli, D. A., and Stramondo, S. (2011). Earthquake Damages Rapid Mapping by Satellite Remote Sensing Data : L’Aquila April 6th, 2009 Event. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(4) :935–943.
- Devanthery, N., Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., and Crippa, B. (2018). Deformation monitoring using persistent scatterer interferometry and sentinel-1 data in urban areas. In *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 6103–6106.
- Dheenathayalan, P., Small, D., and Hanssen, R. F. (2018). 3-D Positioning and Target Association for Medium-Resolution SAR Sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(11) :6841–6853.

- Dheenathayalan, P., Small, D., Schubert, A., and Hanssen, R. F. (2016). High-precision positioning of radar scatterers. *Journal of Geodesy*, 90(5) :403–422.
- Doerry, A. W. (2008). Reflectors for SAR performance testing. Technical report, Sandia.
- Doerry, A. W. and Brock, B. C. (2009). Radar cross section of triangular trihedral reflector with extended bottom plate. Technical report, Sandia.
- Doin, M.-P., Lasserre, C., Peltzer, G., Cavalié, O., and Doubre, C. (2009). Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry : Validation with global atmospheric models. *Journal of Applied Geophysics*, 69 :35–50.
- Doöring, B., Schrank, D., Schwerdt, M., and Bauer, R. (2008). Absolute radiometric calibration of terrasar-x - approach and ground targets. In VDE, editor, *Proceedings of German Microwave Conference, Hamburg-Harburg, Germany*, pages 1 – 4.
- Ducret, G. (2013). *Deformation measurement by SAR interferometry : methodological developments and applications to the Chilean subduction*. Theses, Institut de Physique du Globe de Paris ; Ecole Normale Supérieure ; Sorbonne Paris Cité.
- Dun, G. (2007). *Modélisation et optimisation de chambres anechoïques pour applications CEM*. PhD thesis, TELECOM Bretagne.
- Eclaircy-Caudrin, S. (2012). *Mise au point d'une méthodologie permettant l'adaptation du creusement et du soutènement en travaux souterrains fondée sur l'auscultation et l'analyse numérique en temps réel*. PhD thesis, LGCIE, Géotechnique, INSA Lyon.
- Einhorn, B., Tamburini, A., Morin, S., Eckert, N., Richard, D., Bodin, X., Schoeneich, P., and Obled, C. (2016). Le changement climatique en Rhône-Alpes. Impact sur les risques naturels. *Unpublished*.
- Engdahl, M. and Hyyppä, J. (2000). Temporal averaging of multitemporal ERS-1/2 Tandem INSAR data. In *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet : The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120)*, volume 5, pages 2224–2226, Honolulu, HI, USA. IEEE.
- Epting, J., Huggenberger, P., and Rauber, M. (2008). Integrated methods and scenario development for urban groundwater management and protection during tunnel road construction : a case study of urban hydrogeology in the city of basel. *Hydrogeology Journal*, 16(3) :575–591.
- Even, M. and Schulz, K. (2018). InSAR Deformation Analysis with Distributed Scatterers : A Review Complemented by New Advances. *Remote Sensing*, 10(5) :744.
- Fallourd, R., Harant, O., Trouve, E., Nicolas, J.-M., Gay, M., Walpersdorf, A., Mugnier, J.-L., Serafini, J., Rosu, D., Bombrun, L., Vasile, G., Cotte, N., Vernier, F., Tupin, F., Moreau, L., and Bolon, P. (2011). Monitoring Temperate Glacier Displacement by Multi-Temporal TerraSAR-X Images and Continuous GPS Measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(2) :372–386.
- Fernández, J., Escobar, D., Peter, H., Féménias, P., and Ug, P. (2015). Copernicus pod service operations - orbital accuracy of sentinel-1a and sentinel-2a. In *Proceedings of 25th International Symposium on Space Flight Dynamics*, page 14.

- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., and Rucci, A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks : Squeesar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9) :3460–3470.
- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. (2000a). Analysis of Permanent Scatterers in SAR interferometry. In *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet : The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120)*, volume 2, pages 761–763, Honolulu, HI, USA. IEEE.
- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. (2000b). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential sar interferometry. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 38 :2202 – 2212.
- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1) :8–20.
- Fischer, L., Eisenbeiss, H., Kääb, A., Huggel, C., and Haerberli, W. (2011). Monitoring topographic changes in a periglacial high-mountain face using high-resolution DTMs, Monte Rosa East Face, Italian Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 22(2) :140–152.
- Fluteaux, V. (2013). Problématique des nouvelles lignes de métro souterraines pour le projet grand paris. Technical report, Société Grand Paris.
- Freeman, A. (1992). SAR calibration : an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(6) :1107–1121.
- Fruneau, B., Deffontaines, B., Rudant, J.-P., and Le Parmentier, A.-M. (2005). Monitoring vertical deformation due to water pumping in the city of Paris (France) with differential interferometry. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(13) :1173–1183.
- Fruneau, B., Deffontaines, B., Rudant, J.-P., Le Parmentier, A.-M., Colesanti, C., Le Mouelic, S., Carnec, C., and Ferretti, A. (2004). Conventional and PS Differential SAR Interferometry for Monitoring Vertical Deformation due to Water Pumping : The Hausmann-St-Lazare Case Example (Paris, France). In *FRINGE 2003 Workshop*, volume 550 of *ESA Special Publication*, page 23.
- Fruneau, B. and Sarti, F. (2000). Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry : Isolation of deformation from atmospheric artifacts using correlation. *Geophysical Research Letters*, 27(24) :3981–3984.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., and Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas : Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94(B7) :9183.
- Gardent, M. (2014). *Glacier inventory and retreat of French Alpine glaciers since the end of Little Ice Age*. Theses, Université de Grenoble.
- Garnier, R. (2017). Suivi des variations du glissement du glacier d’Argentière par GPS haute fréquence. Master’s thesis, Institut des sciences de la terre (ISTerre), 1381 rue de la Piscine, 38610 Gières.

- Garthwaite, M. (2017). On the Design of Radar Corner Reflectors for Deformation Monitoring in Multi-Frequency InSAR. *Remote Sensing*, 9(7) :648.
- Garthwaite, M. C., Lawrie, S., Dawson, J., and Thankappan, M. (2015). Corner Reflectors as the Tie Between InSAR and GNSS Measurements : Case Study of Resource Extraction in Australia. In *FRINGE 2015*, volume 731.
- Gernhardt, S. (2011). *High precision 3D localization and motion analysis of persistent scatterers using meter-resolution radar satellite data*. PhD thesis, Technische Universität München.
- Gernhardt, S. and Bamler, R. (2012). Deformation monitoring of single buildings using meter-resolution SAR data in PSI. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 73 :68–79.
- Geudtner, D., Torres, R., Snoeij, P., Bibby, D., and Rommen, B. (2014). EUSAR 2014; 10th european conference on synthetic aperture radar; proceedings of : date 3-5 june 2014. In *European Conference on Synthetic Aperture Radar and Institute of Electrical and Electronics Engineers*. VDE-Verlag.
- Geudtner, D., Torres, R., Snoeij, P., Ostergaard, A., and Navas-Traver, I. (2013). Sentinel-1 mission capabilities and SAR system calibration. In *Radar Conference (RADAR), 2013 IEEE*, pages 1–4. IEEE.
- Ghorbani, M., Sharifzadeh, M., Yasrobi, S., and Daiyan, M. (2012). Geotechnical, structural and geodetic measurements for conventional tunnelling hazards in urban areas – The case of Niayesh road tunnel project. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 31 :1–8.
- Giardina, G., Milillo, P., DeJong, M. J., Perissin, D., and Milillo, G. (2018). Evaluation of InSAR monitoring data for post-tunnelling settlement damage assessment. *Structural Control and Health Monitoring*, page e2285.
- Gilleron, N. (2016). *Méthode de prévision des tassements provoqués par le creusement des tunnels urbains et influence des présoutènements*. PhD thesis, Université Paris-Est.
- Goldstein, R. M. and Werner, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25(21) :4035–4038.
- Goldstein, R. M., Zebker, H. A., and Werner, C. L. (1988). Satellite radar interferometry : Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23(4) :713–720.
- Gomba, G. (2016). *Estimation and Compensation of Ionospheric Propagation Delay in Synthetic Aperture Radar (SAR) Signals*. Dissertation, Technische Universität München, München.
- Grandin, R. (2015). Interferometric processing of slc sentinel-1 tops data. In *ESA Fringe workshop, ESA Special Publication, SP, vol. 731*.
- Gray, A., Vachon, P., Livingstone, C., and Lukowski, T. (1990). Synthetic aperture radar calibration using reference reflectors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(3) :374–383.
- Gray, A. L., Mattar, K. E., and Sofko, G. (2000). Influence of ionospheric electron density fluctuations on satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 27(10) :1451–1454.

- Groot, J. and Otten, M. (1994). SAR imaging of corner reflectors larger than the spatial resolution. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 32(3) :721–724.
- Guarnieri, A. M. and Tebaldini, S. (2008). On the exploitation of target statistics for sar interferometry applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(11) :3436–3443.
- Guillemot, T., Pottier, E., Saillard, J., Levrel, J., and Lebreton, E. (1997). Determining the far-field RCS from the response to a cylindrical wavefront. *Aerospace Science and Technology*, 1(3) :215–223.
- Gutiérrez, M. (2005). Chapter 7 The periglacial environment. In *Developments in Earth Surface Processes*, volume 8, pages 145–170. Elsevier.
- Haeberli, W., Hallet, B., Arenson, L., Elconin, R., Humlum, O., Kääh, A., Kaufmann, V., Ladanyi, B., Matsuoka, N., Springman, S., and Mühlh, D. V. (2006). Permafrost creep and rock glacier dynamics. *Permafrost and Periglacial Processes*, 17(3) :189–214.
- Hanssen, R., Lehner, S., and Weinreich, I. (1998). Atmospheric heterogeneities from ers-tandem sar interferometry and sea surface images. In *Proceedings of CEOS SAR Workshop, ESTEC*, page 7.
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry : data interpretation and error analysis*. Number 2 in Remote sensing and digital image processing. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Henry, C., Souyris, J., and Marthon, P. (2003). Target detection and analysis based on spectral analysis of a SAR image :a simulation approach. In *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477)*, volume 3, pages 2005–2007, Toulouse, France. IEEE.
- Herrera, G., Davalillo, J. C., Mulas, J., Cooksley, G., Monserrat, O., and Pancioli, V. (2009). Mapping and monitoring geomorphological processes in mountainous areas using PSI data : Central Pyrenees case study. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(5) :1587–1598.
- Hetland, E., Muse, P., Simons, M., Lin, Y., Agram, P., and J. Dicaprio, C. (2012). Multiscale insar time series (mints) analysis of surface deformation. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 117 :2404–.
- Hongyun, S., Songlin, Y., and Guang, L. (2011). The Application of InSAR in the Deformation Monitoring for Road Engineering - A Case Study : Dujiangyan, China. In *2011 Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, volume 2, pages 732–734. IEEE.
- Hooper, A. (2008). A multi-temporal insar method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16).
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., and Arıkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514 :1–13.
- Hooper, A., Segall, P., and Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research*, 112(B7).

- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., and Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using insar persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23).
- Intrieri, E., Raspini, F., Fumagalli, A., Lu, P., Del Conte, S., Farina, P., Allievi, J., Ferretti, A., and Casagli, N. (2018). The maoxian landslide as seen from space : detecting precursors of failure with sentinel-1 data. *Landslides*, 15(1) :123–133.
- Janssen, V., Ge, L., and Rizos, C. (2004). Tropospheric corrections to sar interferometry from gps observations. *GPS Solutions*, 8(3) :140–151.
- Jauvin, M., Yan, Y., Trouvé, E., and Fruneau, B. (2017). Combined use of Sentinel-1 A/B interferometry and corner reflectors for glacier and surrounding moraines monitoring in the Chamonix Valley (France). In Formater, editor, *MDIS 2017*. Poster.
- Jauvin, M., Yan, Y., Trouvé, E., and Fruneau, B. (2018a). Potential and limits of Sentinel-1 data for small Alpine glaciers monitoring. In *Proceedings of IGARSS 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia*, pages 5165–5168. Poster.
- Jauvin, M., Yan, Y., Trouvé, E., Fruneau, B., Gay, M., and Girard, B. (2018b). Use of corner reflectors with Sentinel-1 SAR images for glacier and moraine monitoring. In e.V. ; ITG, V., editor, *Proceedings of EUSAR 2018 - 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, page 6. Poster.
- Jauvin, M., Yan, Y., Trouvé, E., Fruneau, B., Gay, M., and Girard, B. (2019). Integration of corner reflectors for the monitoring of mountain glacier areas with sentinel-1 time series. *Remote Sensing*, 11(8).
- Jolivet, R. (2011). *Interseismic deformation along the Haiyuan fault, China : InSAR study of the spatial and temporal fluctuations*. Theses, Université de Grenoble.
- Jong-Sen Lee, Papathanassiou, K., Ainsworth, T., Grunes, M., and Reigber, A. (1998). A new technique for noise filtering of SAR interferometric phase images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5) :1456–1465.
- Joughin, I., Smith, B. E., and Abdalati, W. (2010). Glaciological advances made with interferometric synthetic aperture radar. *Journal of Glaciology*, 56(200) :1026–1042.
- Kampes, B. M. (2006). *Radar interferometry : persistent scatterer technique*. Number v. 12 in Remote sensing and digital image processing. Springer, Dordrecht, the Netherlands. OCLC : ocm71238108.
- Kaveh, H. (2010). *Contribution of radar remote sensing (DINSAR and PSI) to the study of the drought effect on the topographic surface. Application to The East of the Île-de-France region. : application to the East of the Île-de-France region*. Theses, Université Paris-Est.
- Kenner, R., Bühler, Y., Delaloye, R., Ginzler, C., and Phillips, M. (2014). Monitoring of high alpine mass movements combining laser scanning with digital airborne photogrammetry. *Geomorphology*, 206 :492–504.
- Ketelaar, G., Marinkovic, P., and Hanssen, R. (2005). Validation of Point Scatterer Phase Statistics in Multi-Pass INSAR. In *Envisat & ERS Symposium*, volume 572.

- Ketelaar, V. B. H. (2009). *Satellite radar interferometry : subsidence monitoring techniques*. Number 14 in Remote sensing and digital image processing. Springer Science + Business Media, New York, USA. OCLC : ocn297148349.
- Kim, Y.-Y. and Lee, K.-K. (2003). Disturbance of groundwater table by subway construction in the seoul area, korea. *Geosciences Journal*, 7(1) :37.
- Klopčič, J., Ambrožič, T., Marjetič, A., Bogatin, S., Pulko, B., and Logar, J. (2008). Use of Automatic Target Recognition System for the Displacement Measurements in a Small Diameter Tunnel Ahead of the Face of the Motorway Tunnel During Excavation. *Sensors*, 8(12) :8139–8155.
- Knott, E. F. (1993). *Radar cross section measurements*. VanNostrand Reinhold, New York, NY. OCLC : 246866736.
- Koudogbo, F., Urdiroz, A., Robles, J. G., Chapron, G., Lebon, G., Fluteaux, V., and Priol, G. (2008). Radar interferometry as an innovative solution for monitoring the construction of the Grand Paris Express metro network – First results. In *World Tunnel Congress 2018*, page 12.
- Kääb, A. (2002). Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air- and spaceborne optical data : examples using digital aerial imagery and ASTER data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57(1-2) :39–52.
- Lanari, R., Casu, F., F., M., M., Z., G., B., P., Manunta, M., M., Pepe, A., and A. (2007). An overview of the small baseline subset algorithm : a dinsar technique for surface deformation analysis. *PURE AND APPLIED GEOPHYSICS*, 164 :637–661.
- Lanari, R., Lundgren, P., Manzo, M., and Casu, F. (2004). Satellite radar interferometry time series analysis of surface deformation for los angeles, california. *Geophysical Research Letters*, 31(23).
- Lattari, F., Gonzalez Leon, B., Asaro, F., Rucci, A., Prati, C., and Matteucci, M. (2019). Deep learning for sar image despeckling. *Remote Sensing*, 11(13) :1532.
- Le Mouélic, S., Raucoules, D., Carnec, C., and King, C. (2005). A Least Squares Adjustment of Multi-temporal InSAR Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(2) :197–204.
- Le Mouélic, S., Raucoules, D., Carnec, C., King, C., and Adragna, F. (2002). A ground uplift in the city of Paris (France) detected by satellite radar interferometry : GROUND UPLIFT IN PARIS DETECTED BY INSAR. *Geophysical Research Letters*, 29(17) :34–1–34–4.
- Lee, J.-S., Miller, A. R., and Hoppel, K. W. (1994). Statistics of phase difference and product magnitude of multi-look processed gaussian signals. *Waves in Random Media*, 4(3) :307–319.
- Leprieux, S., Barbot, S., Ayoub, F., and Avouac, J.-P. (2007). Automatic and Precise Orthorectification, Coregistration, and Subpixel Correlation of Satellite Images, Application to Ground Deformation Measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6) :1529–1558.
- Li, Z., Fielding, E. J., Cross, P., and Muller, J.-P. (2006a). Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction : Gps topography-dependent turbulence model. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 111(B2).

- Li, Z., Muller, J.-P., Cross, P., Albert, P., Fischer, J., and Bennartz, R. (2006b). Assessment of the potential of meris near-infrared water vapour products to correct asar interferometric measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 27.
- Lienhart, W. (2017). Geotechnical monitoring using total stations and laser scanners : critical aspects and solutions. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(3) :315–324.
- Liu, D., Sowter, A., and Niemeier, W. (2014). Process-related deformation monitoring by psi using high resolution space-based sar data : a case study in düsseldorf, germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2 :4813–4830.
- Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J., and Chandra, S. (2007). LiDAR-Derived High Quality Ground Control Information and DEM for Image Orthorectification. *GeoInformatica*, 11(1) :37–53.
- Lopez Quiroz, P. (2008). *Séries temporelles de la subsidence de la ville de Mexico obtenues par interférométrie radar*. PhD thesis, TELECOM ParisTech.
- López-Quiroz, P., Doin, M.-P., Tupin, F., Briole, P., and Nicolas, J.-M. (2009). Time series analysis of mexico city subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1) :1 – 15. Advances in SAR Interferometry from the 2007 Fringe Workshop.
- Lundman, P. (2011). *Cost management for underground infrastructure projects a case study on cost increase and its causes*. PhD thesis, Lulea University of Technology. OCLC : 1026826091.
- Luo, Y., Chen, J., Xi, W., Zhao, P., Qiao, X., Deng, X., and Liu, Q. (2016). Analysis of tunnel displacement accuracy with total station. *Measurement*, 83 :29–37.
- M. R. Ehsani, S. K. Upadhyaya, and M. L. Mattson (2004). SEED LOCATION MAPPING USING RTK GPS. *Transactions of the ASAE*, 47(3) :909–914.
- Magalhaes, S. (2010). *L'interférométrie radar (DInSAR et PSI) appliquée à l'étude du risque mouvement de terrain à Paris*. Theses, Université Paris-Est.
- Maghsoudi, A. and Kalantari, B. (2014). Monitoring Instrumentation in Underground Structures. *Open Journal of Civil Engineering*, 04(02) :135–146.
- Magnin, F., Josnin, J.-Y., Ravelin, L., Pergaud, J., Pohl, B., and Deline, P. (2017). Modelling rock wall permafrost degradation in the Mont Blanc massif from the LIA to the end of the 21st century. *The Cryosphere*, 11(4) :1813–1834. 22 pages.
- Massonnet, D. (2016). Interférométrie radar. *Techniques de l'ingénieur Applications radars*, base documentaire : TIB592DUO.(ref. article : te6704). fre.
- Massonnet, D. and Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4) :441–500.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., and Rabaute, T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364(6433) :138–142.
- Massonnet, D. and Souyris, J.-C. (2008). *Imaging with synthetic aperture radar*. Engineering sciences Electrical engineering. EPFL Press, Lausanne, 1. ed edition. OCLC : 610703388.

- Maune, D. F., editor (2007). *Digital elevation model technologies and applications : the DEM users manual*. ASPRS, Bethesda, Md, 2. ed edition. OCLC : 729995606.
- Mégnién, C. (1980). *Synthèse géologique du bassin de Paris*, volume 102. BRGM.
- Meyer, F., Bamler, R., Jakowski, N., and Fritz, T. (2006). The Potential of Low-Frequency SAR Systems for Mapping Ionospheric TEC Distributions. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3 :560–564.
- Misra, P. and Enge, P. (2011). *Global positioning system : signals, measurements, and performance*. Ganga-Jamuna Pr, Lincoln, Mass, rev. 2. ed., 2. printing rev. and updated edition. OCLC : 844940072.
- Montazeri, S., Rodriguez Gonzalez, F., and Zhu, X. X. (2018). Geocoding error correction for insar point clouds. *Remote Sensing*, 10(10).
- Monti-Guarnieri, A., Brovelli, M. A., d’Alessandro, M. M., Manzoni, M., Molinari, M. E., and Oxoli, D. (2018). Coherence change detection for sentinel-1 sar : Methods and applications. In *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 64–67.
- Mora, O., Mallorqui, J., and Broquetas, A. (2003). Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric sar images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(10) :2243–2253.
- Nahli, A., Simonetto, E., Tatin, M., Durand, S., and Morel, L. (2019). Monitoring ground deformation using Sentinel-1 PSInSAR and RTS measurements in the context of the Grand Paris Express project. In *Proceedings of 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 15-17 May 2019, Athens, Greece*, page 6.
- Pablo Sánchez-Gómez and Francisco Navarro (2017). Glacier Surface Velocity Retrieval Using D-InSAR and Offset Tracking Techniques Applied to Ascending and Descending Passes of Sentinel-1 Data for Southern Ellesmere Ice Caps, Canadian Arctic. *Remote Sensing*, 9(5) :442.
- Parizzi, A., Perissin, D., Prati, C., and Rocca, F. (2006). Artificial Scatterers for SAR Interferometry. In *Proceedings of the 2005 Dragon Symposium (SP-611), Santorini, Greece*, volume 46, page 27.
- Parker, A. L., Featherstone, W. E., Penna, N. T., Filmer, M. S., and Garthwaite, M. C. (2017). Practical Considerations before Installing Ground-Based Geodetic Infrastructure for Integrated InSAR and cGNSS Monitoring of Vertical Land Motion. *Sensors*, 17(8) :1753.
- Perissin, D. and Ferretti, A. (2007). Urban-Target Recognition by Means of Repeated Spaceborne SAR Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(12) :4043–4058.
- Perissin, D., Wang, Z., and Lin, H. (2012). Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 73 :58–67.
- Peter, H., Jäggi, A., Fernández, J., Escobar, D., Ayuga, F., Arnold, D., Wermuth, M., Hackel, S., Otten, M., Simons, W., Visser, P., Hugentobler, U., and Féménias, P. (2017). Sentinel-1a – First precise orbit determination results. *Advances in Space Research*, 60(5) :879–892.

- Polycarpou, A. C., Balanis, C. A., and Tirkas, P. A. (1995). Radar Cross Section of Trihedral Corner Reflectors : Theory and Experiment. *Electromagnetics*, 15(5) :457–484.
- Ponton, F., Walpersdorf, A., Gay, M., Trouvé, E., Mugnier, J.-L., Fallourd, R., Cotte, N., Ott, L., and Serafini, J. (2012). GPS and TerraSARX time series measure temperate glacier flow in the Mont Blanc massif (France) : the Argentière glacier test site. In *European Geosciences Union General Assembly 2012 (EGU 2012)*, volume 14, pages EGU2012–9525, Vienne, Austria.
- Powers, P. (1991). *Dewatering and Groundwater Control*, pages 236–248. Springer US, Boston, MA.
- Prati, C., Ferretti, A., and Perissin, D. (2010). Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations. *Journal of Geodynamics*, 49(3-4) :161–170.
- Prats-Iraola, P., Nannini, M., Yague-Martinez, N., Scheiber, R., Minati, F., Vecchioli, F., Costantini, M., Borgstrom, S., De Martino, P., Siniscalchi, V., Walter, T., Nikkhoo, M., Fomelis, M., and Desnos, Y. (2016). Sentinel-1 tops interferometric time series results and validation. In *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pages 3894–3897.
- Prats P., Scheiber R., D. Z. F. (2014). Interferometric tops chain description. In *SEOM INSA-RAP • INSARAP Workshop*.
- Qi, T. and Gao, B. (2011). Strata consolidation subsidence induced by metro tunneling in saturated soft clay strata. *Journal of Modern Transportation*, 19(1) :35–41.
- Qin, Y. and Perissin, D. (2015). Monitoring Ground Subsidence in Hong Kong via Spaceborne Radar : Experiments and Validation. *Remote Sensing*, 7(8) :10715–10736.
- Qin, Y., Perissin, D., and Lei, L. (2013). The Design and Experiments on Corner Reflectors for Urban Ground Deformation Monitoring in Hong Kong. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2013 :1–8.
- Qin, Y., Perissin, D., and Milillo, P. (2017). A new era of insar applications with sentinel-1 : A case study of severe ground subsidence in california central valley. In *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pages 953–956.
- Quesada-Olmo, N., Jimenez-Martinez, M., and Farjas-Abadia, M. (2018). Real-time high-rise building monitoring system using global navigation satellite system technology. *Measurement*, 123 :115–124.
- Quin, G. and Loreaux, P. (2013). Submillimeter accuracy of multipass corner reflector monitoring by ps technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3) :1775–1783.
- Raucoules, D., Colesanti, C., and Carnec, C. (2007). Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence. *Comptes Rendus Geoscience*, 339(5) :289–302.
- Raucoules, D., de Michele, M., Malet, J.-P., and Ulrich, P. (2013). Time-variable 3d ground displacements from high-resolution synthetic aperture radar (SAR). application to La Valette landslide (South French Alps). *Remote Sensing of Environment*, 139 :198–204.

- Ravanel, L. (2010). *Caractérisation, facteurs et dynamiques des écroulements rocheux dans les parois à permafrost du massif du Mont Blanc*. PhD thesis, Université Savoie Mont-Blanc.
- Ravanel, L., Deline, P., Lambiel, C., and Duvillard, P. (2014). Stability Monitoring of High Alpine Infrastructure by Terrestrial Laser Scanning. In Lollino, G., Manconi, A., Clague, J., Sha, W., and Chiarle, M., editors, *IAEG 12th Congress, Climate Change and Engineering Geology*, pages p297–p300, Torino, Italy.
- Robertson, S. D. (1947). Targets for Microwave Radar Navigation. *Bell System Technical Journal*, 26(4) :852–869.
- Robles, J. G., Black, M., and Gomar, B. S. (2016). *Correlation Study Between In-Situ Auscultation and Satellite Interferometry for the Assessment of Nonlinear Ground Motion on Crossrail London*, pages 399–415. Ice Virtual Library.
- Rocca, F. (2007). Modeling Interferogram Stacks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(10) :3289–3299.
- Rocca, F. (2007). Modeling interferogram stacks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(10) :3289–3299.
- Rohmer, J., Loschetter, A., Raucoules, D., de Michele, M., Raffard, D., and Le Gallo, Y. (2015). Revealing the surface deformation induced by deep CO₂ injection in vegetated/agricultural areas : The combination of corner-reflectors, reservoir simulations and spatio-temporal statistics. *Engineering Geology*, 197 :188–197.
- Rosen, P. A., Hensley, S., and Chen, C. (2010). Measurement and mitigation of the ionosphere in l-band interferometric sar data. In *2010 IEEE Radar Conference*, pages 1459–1463.
- Rott, H. and Siegel, A. (1999). Analysis of mass movements in alpine terrain by means of SAR interferometry. In *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No.99CH36293)*, volume 4, pages 1933–1936, Hamburg, Germany. IEEE.
- Rucci, A., Ferretti, A., Monti Guarnieri, A., and Rocca, F. (2012). Sentinel 1 SAR interferometry applications : The outlook for sub millimeter measurements. *Remote Sensing of Environment*, 120 :156–163.
- Ruck, G. T., Barrick, D. E., Stuart, W. D., and Krichbaum, C. K. (1970). *Radar Cross Section Handbook. Volumes 1 & 2*. Plenum Press, New York.
- Samiei-Esfahany, S., Martins, J. E., van Leijen, F. J., and Hanssen, R. F. (2016). Phase estimation for distributed scatterers in insar stacks using integer least squares estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54 :5671–5687.
- Sanjuan-Ferrer, M. J., Hajnsek, I., and Papathanassiou, K. P. (2010). Coherent Scatterers Detection in Glacier Environments by means of TerraSAR-X Images. In *EUSAR 2010 ; 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar ; Proceedings of : date 7-10 June 2010*, page 4.
- Sanjuan-Ferrer, M. J., Hajnsek, I., Papathanassiou, K. P., and Moreira, A. (2015). A New Detection Algorithm for Coherent Scatterers in SAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(11) :6293–6307.

- Sarabandi, K. and Tsen-Chieh Chiu (1996). Optimum corner reflectors for calibration of imaging radars. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 44(10) :1348–1361.
- Scapozza, C. (2015). Evolution des glaciers et du pergélisol depuis le dernier maximum glaciaire dans la région du mont Gelé-Mont Fort (Alpes Valaisannes, Suisse) : chronologie, modalités de la dernière déglaciation et datations des âges. *Quaternaire*, 26/2 :141–173.
- Scheiber, R. and Moreira, A. (2000). Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5) :2179–2191.
- Schlögel, R., Thiebes, B., Mulas, M., Cuzzo, G., Notarnicola, C., Schneiderbauer, S., Crespi, M., Mazzoni, A., Mair, V., and Corsini, A. (2017). Multi-Temporal X-Band Radar Interferometry Using Corner Reflectors : Application and Validation at the Corvara Landslide (Dolomites, Italy). *Remote Sensing*, 9(7) :739.
- Schmidt, D. A. and Bürgmann, R. (2003). Time-dependent land uplift and subsidence in the santa clara valley, california, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 108 :2416.
- Schneider, R., Papathanassiou, K., Hajnsek, I., and Moreira, A. (2006a). Characterisation of Coherent Scatterers in Urban Areas by Means of Angular Diversity. In *2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, pages 3782–3785, Denver, CO, USA. IEEE.
- Schneider, R., Papathanassiou, K., Hajnsek, I., and Moreira, A. (2006b). Polarimetric and interferometric characterization of coherent scatterers in urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(4) :971–984.
- Schneider, R. Z. and Papathanassiou, K. (2009). Estimation and correction of ionospheric induced phase errors in SAR images using Coherent Scatterers. In *2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages IV–165–IV–168, Cape Town. IEEE.
- Schubert, A., Miranda, N., Geudtner, D., and Small, D. (2017). Sentinel-1a/b combined product geolocation accuracy. *Remote Sensing*, 9(6).
- Schubert, A., Small, D., Miranda, N., Geudtner, D., and Meier, E. (2015). Sentinel-1a Product Geolocation Accuracy : Commissioning Phase Results. *Remote Sensing*, 7(7) :9431–9449.
- SGP (2015). Dossier de demande d’autorisation. Technical report, Société du Grand Paris.
- SGP (2017). Schéma de gestion et de valorisation des déblais. Technical report, Société Grand Paris.
- SNCF (2014). Eole - prolongement du rer e à l’ouest. Technical report, SNCF Réseau.
- SNCF (2015). Eole - prolongement du rer e à l’ouest - tronçon haussmann-saint-lazarre / nanterre. Technical report, SNCF Réseau.
- Sowter, A., Bin Che Amat, M., Cigna, F., Marsh, S., Athab, A., and Alshammari, L. (2016a). Mexico City land subsidence in 2014–2015 with Sentinel-1 IW TOPS : Results using the Intermittent SBAS (ISBAS) technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52 :230–242.

- Sowter, A., Bin Che Amat, M., Cigna, F., Marsh, S., Athab, A., and Alshammari, L. (2016b). Mexico City land subsidence in 2014–2015 with Sentinel-1 IW TOPS : Results using the Intermittent SBAS (ISBAS) technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52 :230–242.
- Spaans, K. and Hooper, A. (2016). InSAR processing for volcano monitoring and other near-real time applications : INSAR PROCESSING FOR VOLCANO MONITORING. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 121(4) :2947–2960.
- Strozzi, T., Wegmüller, U., Tosi, L., Bitelli, G., and Spreckels, V. (2001). Land subsidence monitoring with differential sar interferometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67 :1261–1270.
- Takahashi, T., Yamamoto, K., Senda, Y., and Tsuzuku, M. (2005). Estimating individual tree heights of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations in mountainous areas using small-footprint airborne LiDAR. *Journal of Forest Research*, 10(2) :135–142.
- Takeuchi, S. and Yamada, S. (2002). Comparison of InSAR capability for land subsidence detection between C-band and L-band SAR. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, volume 4, pages 2379–2381, Toronto, Ont., Canada. IEEE.
- Tao Li, Jingnan Liu, Mingsheng Liao, Shaojun Kuang, and Xu Lu (2004). Monitoring city subsidence by D-InSAR in Tianjin area. In *IEEE International IEEE International IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004*, volume 5, pages 3333–3336, Anchorage, AK, USA. IEEE.
- Tempfli, K., Huurneman, G., Bakker, W., Janssen, L., Feringa, W., Gieske, A., Grabmaier, K., Hecker, C., Horn, J., Kerle, N., Meer, F., Parodi, G., Pohl, C., Reeves, C., Ruitenbeek, F., Schetselaar, E., Weir, M., Westinga, E., and Woldai, T. (2009). *Principles of remote sensing : an introductory textbook.*, pages 56–85. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
- Trouvé, E. (1996). *Imagerie interférentielle en radar à ouverture synthétique*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications.
- Trouvé, E. (2006). *Filtrage, extraction et fusion d'informations en imagerie radar multi-composantes*. Habilitation à diriger des recherches en sciences et technologies de l'information, LISTIC. 174 pages.
- Unal Kizil, Ercan Simsek, and Erkan Yaslioglu (2006). Performance and Accuracy Comparisons of GPS and Total Station in Land Surveying. In *2006 Portland, Oregon, July 9-12, 2006*. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Verdaguer, A. and Mallie, L. (2009). Eole - prolongement du rer e à l'ouest. Technical report, Systra.
- Vivian, R. (1967). Morphologie des marges pro-glaciaires : Sur quelques aspects caractéristiques de l'écoulement des eaux et de ses effets morphologiques dans les marges pro-glaciaires alpines. *Revue de Géographie Alpine*, 55(2) :267–289.

- Wadge, G., Webley, P. W., James, I. N., Bingley, R., Dodson, A., Waugh, S., Veneboer, T., Puglisi, G., Mattia, M., Baker, D., Edwards, S. C., Edwards, S. J., and Clarke, P. J. (2002). Atmospheric models, gps and insar measurements of the tropospheric water vapour field over mount etna. *Geophysical Research Letters*, 29(19) :11–1–11–4.
- Wang, Y., Guo, Y., Hu, S., Li, Y., Wang, J., Liu, X., and Wang, L. (2019). Ground Deformation Analysis Using InSAR and Backpropagation Prediction with Influencing Factors in Erhai Region, China. *Sustainability*, 11(10) :2853.
- Wegmüller, U., Werner, C., Wiesmann, A., Strozzi, T., Kourkouli, P., and Frey, O. (2016). Time-series analysis of sentinel-1 interferometric wide swath data : Techniques and challenges. In *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pages 3898–3901.
- Werner, C., Wegmüller, U., Strozzi, T., and Wiesmann, A. (2003). Interferometric point target analysis for deformation mapping. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International*, volume 7, pages 4362–4364. IEEE.
- Werner, C. L., Wegmüller, U., and Strozzi, T. (2012). Deformation Time-Series of the Lost-Hills Oil Field using a Multi-Baseline Interferometric SAR Inversion Algorithm with Finite Difference Smoothing Constraints. *AGU Fall Meeting Abstracts*, pages G43A–0910.
- Williams, S., Bock, Y., and Fang, P. (1998). Integrated satellite interferometry : Tropospheric noise, gps estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 103(B11) :27051–27067.
- Xing, X.-m., Zhu, J.-j., Wang, Y.-z., and Yang, Y.-f. (2013). Time series ground subsidence inversion in mining area based on CRInSAR and PSInSAR integration. *Journal of Central South University*, 20(9) :2498–2509.
- Yan, Y. (2011). *Fusion de mesures de déplacement issues d'imagerie SAR : application aux modélisations séismo-volcaniques*. PhD thesis, LISTIC - Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance.
- Yan, Y., Doin, M.-P., Lopez-Quiroz, P., Tupin, F., Fruneau, B., Pinel, V., and Trouve, E. (2012). Mexico City Subsidence Measured by InSAR Time Series : Joint Analysis Using PS and SBAS Approaches. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(4) :1312–1326.
- Yang, M., Dheenathayalan, P., Chang, L., Wang, J., Lindenbergh, R., Liao, M., and Hanssen, R. (2016). High-precision 3d geolocation of persistent scatterers with one single-epoch gcp and lidar dsm data. In Ouwehand, L., editor, *Proceedings of Living Planet Symposium 2016*, volume SP-740 of *European Space Agency (ESA-SP)*, pages 398–398, Netherlands. European Space Agency.
- Ye, X., Kaufmann, H., and Guo, X. (2004). Landslide Monitoring in the Three Gorges Area Using D-INSAR and Corner Reflectors. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(10) :1167–1172.
- Ye, X. W., Ran, L., Yi, T. H., and Dong, X. B. (2012). Intelligent Risk Assessment for Dewatering of Metro-Tunnel Deep Excavations. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012 :1–13.

- Yu, J., Zhu, P., Xu, B., and Meng, X. (2017). Experimental assessment of high sampling-rate robotic total station for monitoring bridge dynamic responses. *Measurement*, 104 :60–69.
- Zebker, H. A. and Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5) :950–959.
- Zhang, W., Wang, W., Zhou, D., Zhang, R., Goh, A., and Hou, Z. (2018). Influence of groundwater drawdown on excavation responses – A case history in Bukit Timah granitic residual soils. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(5) :856–864.
- Zhou, X., Chang, N.-B., and Li, S. (2009). Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research. *Sensors*, 9(3) :1876–1912.
- Zhu, W., Zhang, Q., Ding, X., Zhao, C., Yang, C., Qu, F., and Qu, W. (2014). Landslide monitoring by combining of CR-InSAR and GPS techniques. *Advances in Space Research*, 53(3) :430–439.
- Zink, M. and Kietzmann, H. (1995). *Next Generation SAR - External Calibration*. DLR.

Annexe A

Cette annexe présente les travaux réalisés sur les deux coins réflecteurs (CR) installés en collaboration avec GIPSA-lab sur le glacier d'Argentière.

Deux CR triangulaires, CR8 et CR9 (voir tableau II.1), ont été installés sur le glacier d'Argentière pour suivre la vitesse d'écoulement à la surface du glacier. Leur rôle est d'améliorer l'estimation de la vitesse de déplacement par corrélation d'amplitude (non traitée ici), et de fournir un point de contrôle pour le suivi du glacier par InSAR. La position absolue des 2 CR a été estimée entre Octobre 2017 et Juillet 2018, lorsque leur visibilité le permettait. La vitesse de déplacement a ensuite été estimée en calculant la distance parcourue entre chaque intervalle de temps séparant une estimation de leur position.

Pour se faire, la visibilité du CR orienté ascendant (CR8) et du CR orienté descendant (CR9) a été analysée. Une sélection de pixels a été appliquée pour distinguer la réponse CR de celles de diffuseurs tels que des rochers ou d'autres produits détritiques (méthode présentée dans la section 2.2.1). A noter qu'en raison de la résolution assez faible en azimuth (voir 1.3.4), la détermination de la position précise des CR sur la glace peut être difficile dans cette orientation.

La position des CR a été analysée grâce à leurs caractéristiques de cibles ponctuelles dans chaque acquisition radar. En appliquant un seuil de 0,67 à la corrélation spectrale et de 1,5 au RME, seuls deux pixels ont été sélectionnés correspondant aux CR. Afin d'améliorer l'estimation de la position, une localisation sub-pixel a été effectuée en recherchant le pic maximal de réponse de chaque CR. Le pic est déterminé en suréchantillonnant les données après avoir effectué une transformée de Fourier rapide (FFT) complexe. Ensuite, un interpolateur Lanczos permet de trouver la position du pic correspondant au centre de phase effectif du CR. Enfin, les positions sub-pixelliques ont été orthorectifiées avec un MNT de 5 m de résolution.

La position des CR a été estimée avec succès dans 6 images descendantes Sentinel-1, acquises entre le 30-09-2017 et le 15-07-2018 et dans 4 images ascendantes de Sentinel-1, acquises entre le 01-10-2017 et le 24-11-2017. Ensuite, le déplacement horizontal du CR dans le temps a été calculé sur la base de positions successives dans différentes acquisitions. Pour convertir le déplacement 2D en déplacement 3D, il faut estimer les hauteurs successives. Ces hauteurs auraient pu être obtenues en utilisant des valeurs de MNT. Cependant, cela aurait pu introduire une incertitude liée à l'estimation de la localisation et à des erreurs de MNT. Ainsi, une pente locale a été estimée et utilisée pour convertir la mesure 2D en estimation en déplacement 3D. La direction de déplacement a été calculée et comparée à la direction locale du mouvement du glacier, correspondant à la direction de la pente principale estimée à partir du MNT.

Les résultats sont présentés dans les tableaux 8 et 9 et dans la figure 28. Les CR8 et CR9 ont été visibles depuis leur installation le 29-09-2017 et environ deux mois après, jusqu'aux premières chutes de neige significatives survenues après le 24-11-2017. Suite à la fonte de la neige qui le recouvrait, le CR9 a pu être identifié à nouveau dans deux images en juillet 2018. Ensuite, la visibilité a été perdue. Cela pourrait être expliquée par un changement d'orientation du CR provoqué par la fonte de la glace sous l'effet de l'élévation des températures.

Dates	Intervalle (j)	Vitesse (cm/j)	Orientation	Différence avec la direction d'écoulement
01-10-2017/ 19-10-2017	18	19.0	294.7°E	-9.7°
01-10-2017/ 2017-10-25	24	13.6	315.1°E	-30.1°
01-10-2017/ 2017-11-24	54	13.4	292°E	-7.0°
19-10-2017/ 2017-11-24	36	11.9	289.9°	-4.9°

TABLE 8 – Données Sentinel-1 Ascendante : vitesse de CR8 et orientation du déplacement comparée à la direction de plus grande pente.

Dates	Intervalle (j)	Vitesse (cm/j)	Orientation	Différence avec la direction d'écoulement
30-09-2017/ 06-10-2017	6	12.3	316.2°E	-31.8°
30-09-2017/ 16-10-2017	18	14.1	311.9°E	-26.9°
30-09-2017/ 30-10-2017	30	12.0	293.4°E	-8.4°
30-09-2017/ 17-11-2017	48	12.8	309.0°E	-24.0°
30-09-2017/ 09-07-2018	282	11.7	294.4°E	9.4°
17-11-2017/ 15-07-2018	240	11.5	293.2°	-8.2°

TABLE 9 – Données Sentinel-1 Descendante : vitesse de CR9 et orientation du déplacement comparée à la direction de plus grande pente.

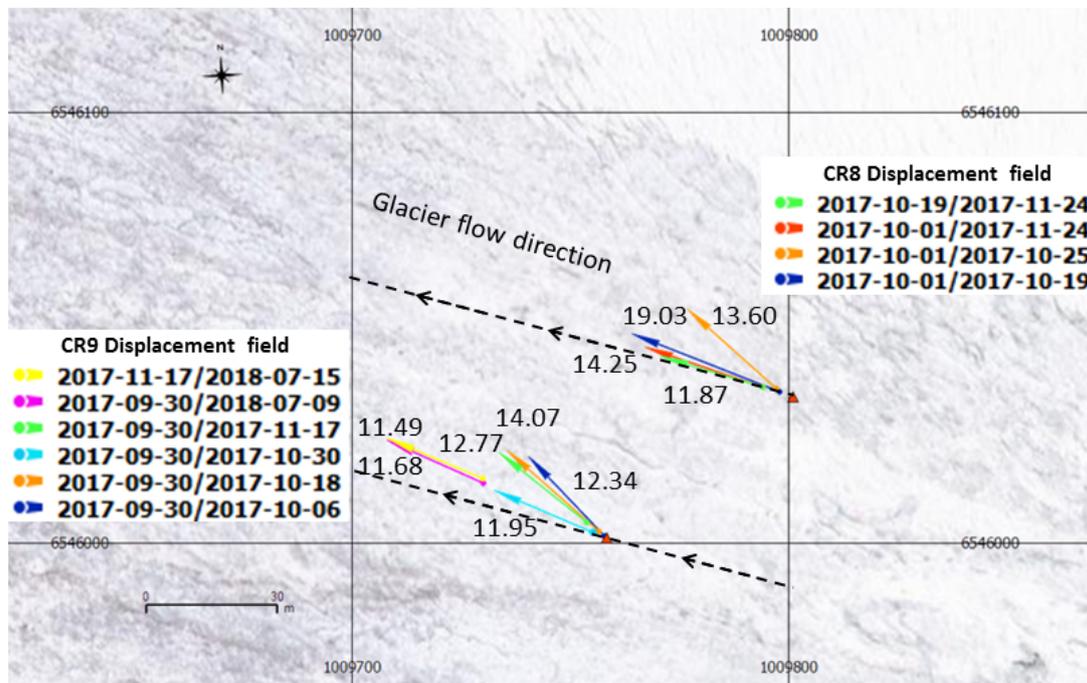


FIGURE 28 – Vecteurs de déplacement basés sur une estimation de localisation absolue de CR8 (ascendant) et CR9 (décroissant). Les flèches de couleur indiquent l'orientation et la norme du déplacement (les vitesses sont indiquées en noir (cm/jour)). L'origine des flèches de couleur indique la position du CR à la fin de chaque intervalle de temps analysé (4 pour CR8, 6 pour CR9). La direction supposée de l'écoulement du glacier (direction de la pente principale) est indiquée par des flèches en pointillés noirs. Source de l'image de fond :

geoportail.gouv.fr.

Nous avons estimé les vitesses 3D à partir de la position absolue et comparé les résultats à ceux d'études précédentes. L'objectif de cette approche était de valider le potentiel des CR pour la surveillance d'écoulement en surface des glaciers sans information externe, à l'exception d'un MNT.

Les auteurs de (Schubert et al., 2017) ont étudié la précision de la géolocalisation de Sentinel-1 à l'aide d'expériences menées sur 194 images avec des CR triangulaires de 1 à 1,5 m. L'étude a montré que l'erreur moyenne en range était de 0,15 m et de 1,44 m en azimuth. Elle a également mis en évidence un décalage en azimuth qui varie en fonction du swath utilisé, estimé à 4,30 m pour le swath IW1, 2,2 m pour IW2 et 0,12 m pour IW3. Étant donné que CR8, orienté pour une trajectoire ascendante, se situe dans le swath IW2 et que CR9, orienté pour un trajet descendant, se situe dans le swath IW3, nous pouvons nous attendre à une meilleure précision sur la position absolue de CR9 par rapport à celle de CR8. Pour la trajectoire descendante, la direction en azimuth du satellite est de 9°E et la direction range est de 279°E. Comme la direction principale de l'écoulement du glacier est d'environ 285°E, le déplacement en range est la principale composante du déplacement. Pour le trajectoire ascendante, la direction en azimuth est 351°E et la direction en range est 81°E. Ainsi, une partie importante du déplacement est représentée par la composante azimuth. Nous pouvons donc raisonnablement nous attendre à des résultats plus précis avec CR9 qu'avec CR8, d'autant plus que les positions successives de CR9 ont été estimées sur l'intervalle de temps plus long, ce qui réduit l'incertitude sur l'estimation de la vitesse.

Les estimations de vitesses présentées dans les tableaux 8 et 9 sont proches de la vitesse moyenne mesurée entre 2007 à 2010 de (13,3 cm/jour) par une station GPS à environ 2770 m a.s.l. sur le glacier d'Argentière, à proximité de CR8 et CR9 (Ponton et al., 2012). Une nouvelle étude réalisée en 2016 et basée sur la même station GPS a révélé des vitesses similaires, avec des vitesses moyennes comprises entre 11 et 16 cm/jour, en fonction de la saison (Garnier, 2017). La vitesse moyenne était d'environ 12 cm/jour de mars à juin et d'environ 11 cm/jour de septembre à décembre. Ces résultats ont été utilisés comme vérité terrain pour dériver l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de la vitesse de CR8 et CR9. On obtient ainsi une RMSE de 4,4 cm/jour pour CR8 et de 1,6 cm/jour pour CR9. Ces résultats sont plus proches des vitesses de CR9 que celles de CR8, confirmant ainsi l'hypothèse d'une estimation plus précise en trajectoire descendante qu'en trajectoire ascendante. L'écart maximal est obtenu sur un court intervalle avec CR8 (01-10-2017 / 19-10-2017). Les écarts les plus faibles sont obtenues avec CR9 (30-09-2017 / 09-07-2018 et 17-11-2017 / 15-07-2018), correspondant aux intervalles de temps les plus longs.

Ainsi, l'utilisation de coins réflecteurs avec les données Sentinel-1 semble être un bon outil pour la surveillance des glaciers. Cependant, étant donné les conditions rencontrées sur un glacier, avec les instabilités des CR dues aux changements de surface pendant les périodes chaudes et aux fortes chutes de neige en hiver, il reste difficile d'obtenir une surveillance de l'écoulement des glaciers à long terme. Les vitesses estimées peuvent être utilisées comme point de contrôle des résultats obtenus par approche D-InSAR. Elles peuvent également être utilisées comme point de calage pour retrouver le bon multiple de 2π au cours du déroulement de phase, dont la méthode est présentée dans l'annexe B.

Annexe B

Cette annexe présente les résultats D-InSAR obtenus sur la glacier d'Argentière qui ont été présentés et publiés dans la conférence IGARSS 2018 (Jauvin et al., 2018a).

POTENTIAL AND LIMITS OF SENTINEL-1 DATA FOR SMALL ALPINE GLACIERS MONITORING

Matthias Jauvin^{1}, Yajing Yan¹, Emmanuel Trouvé¹, Bénédicte Fruneau²*

¹Université Savoie Mont Blanc, LISTIC, F-74000 Annecy, France

²Université Paris-Est, LaSTIG, IGN-UPEM, F-77420 Marne-la-Vallée, France

ABSTRACT

In this paper, we present new results of the use of Sentinel-1 data to monitor Alpine glacier displacement by SAR differential interferometry (D-InSAR) in Chamonix-Mont-Blanc Valley. Two time series of Sentinel-1 A/B images acquired from October 2016 to early April 2017 (including 31 ascending and 25 descending acquisitions) are used to form 6-day interferograms and to evaluate their potential for displacement measurements over small fast moving Alpine glaciers. Results show that, even at low latitudes as in the French Alps, fringe patterns can be observed over the glaciers during the cold season with favorable anti-cyclonic meteorological conditions. Different processing steps to derive final displacement fields are presented and discussed and the results are compared with ERS-Tandem results obtained on the same glaciers in winter 1996.

Index Terms— D-InSAR, Sentinel-1, displacement measurement, Alpine Glaciers

1. INTRODUCTION

Synthetic Aperture Radar (SAR) remote sensing represents an efficient tool to monitor the evolution of the glaciers dynamics. Compared to sparse terrestrial ground measurements, spaceborne SAR images offer the opportunity of regular acquisitions which can cover large areas together with high spatial (a few meters or even less) and temporal (a few days) resolutions. The assessment of the surface velocity and ice fluxes provides crucial information for estimating the ice volume and studying its variation in response to climate change [1]. Different methodologies have been developed to estimate the ice surface velocity, which provide dense displacement maps at relatively low cost. Two main techniques can be used to derive surface displacement fields from repeat pass SAR images: offset tracking based on the amplitude information and SAR differential interferometry (D-InSAR) based on the phase information.

D-InSAR can measure surface displacement in the line of sight (LOS) direction with a high accuracy, on the order

of the radar wavelength. Over glaciers, snow falls, the melting of ice and snow and high shear gradients introduce rapid changes in the scene reflectivity. This leads to coherence loss and phase ambiguity which hinder the application of D-InSAR. Moreover, the steep topography and the small size of the glaciers also limit the application of D-InSAR [2]. Therefore, D-InSAR can be applied to slow moving glaciers or using scenes acquired with very short revisit time. For the latter, according to [3], the revisit time should not exceed 3 days. Therefore, only the ERS-1 ice phase (3-day orbital cycle) and the ERS-1 and ERS-2 1-day Tandem Mission have been used successfully for glacier monitoring in the French Alps before the launching of Sentinel-1 A/B satellites [3].

Since the arrival of Sentinel-1 A/B images every 6 days over Europe, interferometric fringes have been observed over the glaciers in Chamonix-Mont-Blanc Valley in winter, given anticyclonic conditions (no precipitations between two acquisitions). Fringe patterns are similar to those observed previously with ERS data. Therefore, Sentinel-1 A/B images offer potentially a new opportunity to measure Alpine glacier surface displacements.

In this study, we present new results obtained from Sentinel-1 images acquired in winter 2016-2017. We then discuss both the potential and limits of Sentinel-1 A/B data in displacement measurement over Alpine glaciers by comparison with ERS data.

2. STUDY AREA

The Mont Blanc Massif, in North French Alps, has seen the emergence of glaciology as science from the 18th century [4]. Nowadays, some glaciers of the Mont Blanc massif, e.g. Argentière glacier, are regularly monitored by both in situ and remote sensing measurements, since they are considered as indicators of the local effects of global climate change [5].

In this study, we mainly focus on two glaciers: Mer de Glace and Argentière glaciers. Mer de Glace (45°55'N, 6°55'E) is the largest glacier in the French Alps. It covers an area of 30.4 km² (not including the former tributary Talèfre Glacier) and spans the elevation range from 4205 m to 1531 m above the sea level (a.s.l) [4]. Argentière glacier (45°57'N, 6°58'E) covers an area of 19 km² with an elevation

*matthias.jauvin@univ-smb.fr

range from 3150 m to 1600 m a.s.l.. Its terminal tongue is now separated from the upper part of the glacier at around 1900 m. The large range of altitudes and the moderate surface flow velocities (from 0 to 1m/day) of these two glaciers make the application of D-InSAR challenging. But the monitoring of these glaciers is of interest to obtain surface velocity fields during the winter season, which are complementary to annual or summer measurements derived from optical images.

3. GLACIER FLOW MONITORING

In this section, we first present in detail the Sentinel-1 datasets used to monitor the glacier displacement. Then we present the D-InSAR processing steps to get the glacier displacement in LOS direction and the retrieval of the 3-D displacement from the LOS displacement.

3.1. Sentinel-1 datasets

Sentinel-1 acquisitions are in C band (wavelength of 5.6 cm) and in IW mode, providing Single Look Complex (SLC) images covering 250 km in range. The pixel size in radar geometry is 2.3 m in range and 14.1 m in azimuth, which amounts approximately to a resolution of 5 m by 20 m in ground geometry with an incident angle of 36° in ascending pass (ESA). In comparison, ERS pixel size in radar geometry is about 8 m in range and 4 m in azimuth. With an incidence angle of 23° , it gives a ground resolution of around 20 m after complex multi-looking (1:5). Sentinel-1 A/B acquisitions are characterized by very short baselines, on the order of one hundred meters or even less, which reduces significantly the coherence loss due to spatial decorrelation and the impact of the digital elevation model (DEM) errors on displacement estimation compared to other satellites.

Two time series of Sentinel-1 A/B images acquired from October 2016 to early April 2017 (including 31 ascending and 25 descending passes) are used. In this paper, we only present results obtained with 3 ascending pairs acquired at 05:22 PM and 1 descending pair acquired at 05:35 AM (Table 1) of sufficient coherence level. The perpendicular baselines of the used datasets vary from 2 m (2016-11-29/2016-12-05) to 132 m (2017-01-16/2017-01-22), which corresponds to an altitude of ambiguity around 5730 m and 87 m respectively. As a result, even with the largest perpendicular baseline, the altitude of ambiguity is large. DEM errors due to ice ablation between the DEM acquisition and the SAR image acquisition should not induce large errors in velocity estimation.

Dates	Orbit	Perpendicular baseline (m)	Height of ambiguity (m)
2016-11-29/2016-12-05	Asc	-131.9	86,9
2016-12-29/2017-01-04	Asc	-76.2	150,4
2017-01-16/2017-01-22	Asc	2.2	5730
2016-12-28/2017-01-03	Desc	-84.8	228,8

Table 1. Selected datasets of good quality for displacement measurement over the Mer de glace and Argentière glaciers.

3.2. Displacement measurement by D-InSAR

Interferogram generation: First, interferograms have been generated using the GAMMA software. Orbital and topographic phases have been corrected by auxiliary orbit information associated with the SLC images and a DEM (5 m spacing), provided by the French institute IGN. Differential interferograms have been spatially filtered to avoid algorithm errors during the phase unwrapping.

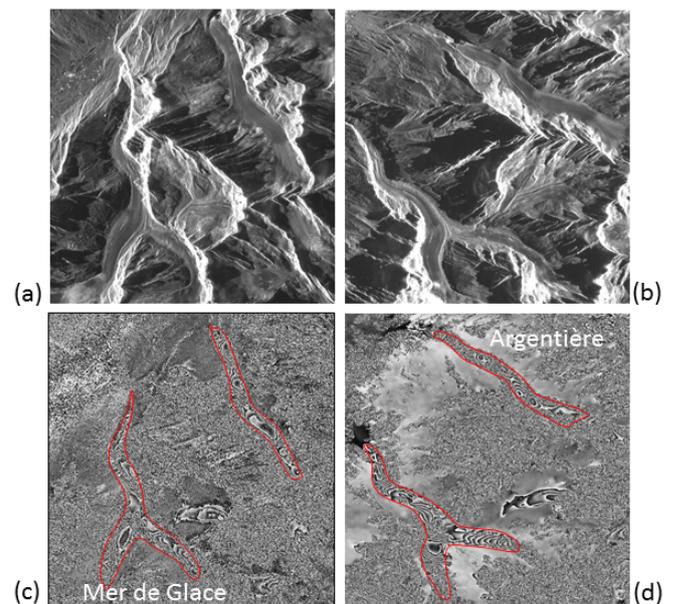


Figure 2. Mean amplitude images and examples of filtered S1A-S1B differential interferograms over the Argentière and Mer de Glace glaciers. (a) Ascending mean amplitude. (b) Descending mean amplitude. (c) Ascending differential interferograms, 2016-12-29/2017-01-04. (d) Descending differential interferograms, 2016-12-22/28.

Figure 2 shows two filtered differential interferograms in ascending and descending path respectively. Fringe patterns are observed on both Argentière Glacier and Mer de Glace. In the processed dataset, 11 ascending interferograms show similar fringe patterns which are also similar to those observed in ERS-1/2 interferograms. Nevertheless, fringe patterns are more different in descending path [6]. It can be explained by a LOS direction less suitable due to the local topography

(inducing shadow and layover) for descending paths. In the following, we will present the ascending results.

Coherence analysis: To investigate the potential of Sentinel-1 interferometry, an analysis of the interferometric coherence depending on the altitude is performed on the Argentière glacier (Figure 3). The highest coherence is about 0.55 in the 2016-12-29/2017-01-04 pair, except in the highest part of the glacier (3000-3200 m). Overall, the coherence is smaller in the lower parts (2200-2400 m) due to snow changes (related to higher temperatures) and in the upper parts probably due to volume decorrelation with the C-band penetration in dry snow in the accumulation areas as observed in [7]. For almost all pairs, the best coherence is observed between 2600 m and 3000 m, where there are the fewest crevasses and seracs. The pair in January with the smallest perpendicular baseline, has a limited coherence. This weak coherence may be mainly due to snow precipitations before the acquisition.

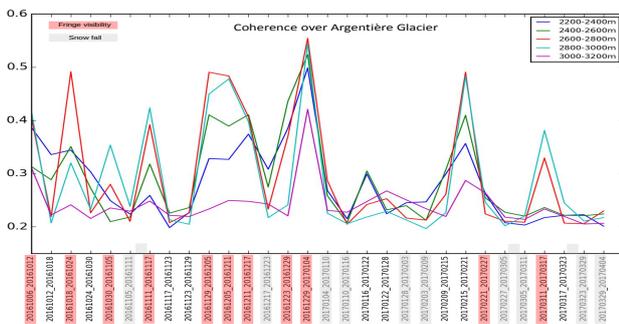


Figure 3. Coherence of ascending pairs at different altitudes.

Further detailed analysis on the Argentière glacier reveals 5 areas with low coherence susceptible to hinder the phase unwrapping over the whole glacier (Figure 4, left). The use of a 5-m DEM has shown that the low coherence areas correspond to the steepest parts of the glacier (Figure 4).

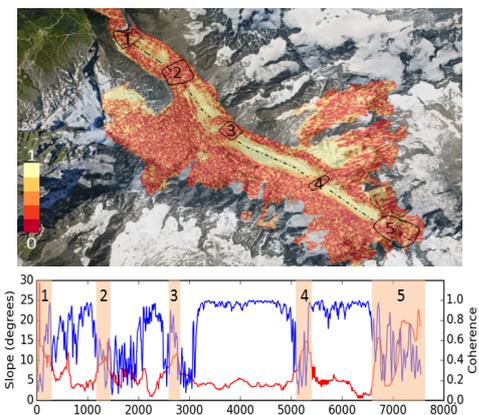


Figure 4. Top: Coherence map of the Argentière glacier (20161229-20170104) and localization of 5 steep relief areas with crevasses. Bottom: Slope (red) and coherence (blue) along a longitudinal profile

Phase unwrapping: Since the interferometric phase is modulo 2π , an important step to obtain an absolute measure of displacement consists in finding the correct integer (k) of multiple of 2π , namely phase unwrapping. It is a difficult task (even challenging in case of coherence loss and strong deformation gradient) and conditions the success of the application of D-InSAR. A large number of phase unwrapping methods exist in the literature. In this study, the Minimum Cost Flow (MCF) [2] method is used. The success of phase unwrapping can be verified by subtracting the wrapped phase from the unwrapped phase (Figure 5). With a correct phase unwrapping, the result should present only the incremental evolution, equivalent to the correct integer of multiple of 2π . The fluctuation in the results obtained over the Argentière glacier indicates that errors are present in the unwrapped phase in some areas, especially between 1000 m and 3000 m, as well as beyond 6600 m along the profile. Indeed, the presence of crevasses is often linked to steep topography, where surface changes are significant. It seems that 6-day interval is too large to conserve a good coherence over these areas, leading to large phase unwrapping errors.

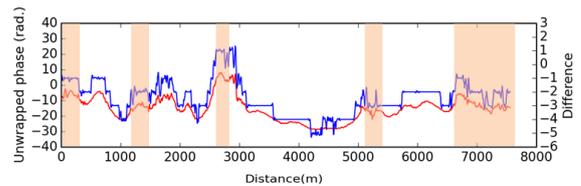


Figure 5. Unwrapped phase (blue) and difference between the unwrapped phase and the wrapped phase (red) along the profile shown in Figure 4.

Atmospheric correction: The atmospheric correction is performed after the phase unwrapping. One of the methods consists of a linear regression between the unwrapped phase and the topography in areas without phase unwrapping error. In case of small glaciers, this step can be omitted.

Velocity estimation: After the atmospheric correction, the interferometric phase only includes the displacement. However, note that the phase unwrapping step results in an unknown offset on the unwrapped phase. To fix this constant, one solution is to find a stable area over the glacier where the displacement is assumed to be zero. This has been done over Mer de Glace. Unfortunately, this cannot be done on the Argentière glacier due to the quite steep slope. Therefore, we used in-situ GPS measurement situated over Argentière Glacier in 2007 at 2720 m a.s.l. to fix the constant offset of the unwrapped phase and derive absolute measurements. The mean glacier displacement rate provided by GPS measurements during 5 winters between 2007 and 2012 is around 13 cm/day [8]. Then, the constant offset is 34π . In the same part of the glacier, displacement rate estimated between October 2017 and April 2018 by means of a corner reflector

(M. Gay, Pers. Comm., results still under processing) reaches 18 cm/day, corresponding to a constant offset of 46π .

3-D velocity retrieval: Due to low coherence over Argentière and Mer de Glace glaciers in descending path, the velocity field can only be measured through its projection on the LOS of ascending acquisitions. Nevertheless, it is possible to estimate the 3D-surface displacement with two assumptions: a flow parallel to the glacier surface and a flow in the direction of maximum averaged downhill slope. Thus, the absolute value of the displacement along the movement direction of the glacier is given by:

$$D_{3D} = \frac{D_{LOS}}{E_{LOS} \cdot \vec{E}_m} \quad (1)$$

where D_{LOS} is the displacement measured along the LOS, E_{LOS} the vector representing the satellite LOS and \vec{E}_m the main slope direction.

To validate the results obtained with Sentinel-1 data, we have made longitudinal profiles along Argentière Glacier and Mer de Glace, following the profiles used to present ERS results in winter 1996 (March 10-11 1996) [6].

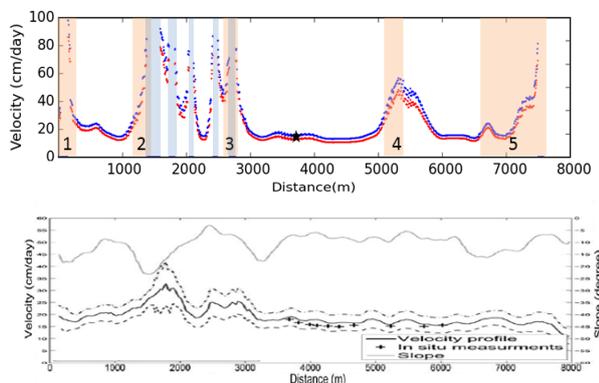


Figure 6. Top: 3-D velocity along the profile shown in Figure 4 over the Argentière Glacier. Red dots: constant offset correction of 34π , blue dots: constant offset correction of 46π ; black star:

In-situ measurement; blue zoning corresponds to areas where the ascending acquisition geometry is not sensitive to the displacement.

Bottom: 3-D velocity obtained with ERS data [6].

The 3D-velocity along the Argentière Glacier, is similar to the ERS results, e.g. the presence of a "stable" area between 3000 and 5000 m and the fastest area between 1000 m and 3000 m (equivalent to 5000 m and 7000 m in (Figure 6) [6]). This confirms the potential of Sentinel-1 data for glacier monitoring. Note that the Sentinel-1 velocity profile presents discontinuities and some of these discontinuities match slope breaks (Figure 4). Therefore, it will be more relevant to fix the constant offset locally inside each connected areas.

4. CONCLUSION

In this paper, we present the first D-InSAR results obtained from time series of Sentinel-1 A/B images acquired from October 2016 to early April 2017 to measure the displacement over Alpine glaciers of the Chamonix-Mont-Blanc Valley. Ascending acquisitions are preferred to monitor Argentière and Mer de Glace glaciers. A coherence analysis, combined to fringe visibility in 11 ascending pairs, has confirmed the potential of Sentinel-1 data to monitor glaciers surface displacement in Alpine context. Fringes patterns and surface velocity evolution along a longitudinal profile show similarities with ERS results in winter 1996. However, it requires additional work to better adjust unwrapping offsets estimated from other in situ or remote sensing measurements. Besides its medium resolution, the main limitation of Sentinel-1 data for glacier monitoring seems to be its revisit time. The arrival of Sentinel-1C could bring a great improvement for glacier monitoring by means of D-InSAR if it can be operated with the two previous Sentinel-1 satellites to offer a shorter revisit time.

5. REFERENCES

- [1] L. D. Euillades, P. A. Euillades, N. C. Riveros, M. H. Masiokas, L. Ruiz, P. Pitte, S. Elefante, F. Casu, and S. Balbarani, "Detection of glaciers displacement time-series using sar," *Remote Sensing of Environment*, vol. 184, no. Supplement C, pp. 188 – 198, 2016.
- [2] E. Berthier, H. Vadon, D. Baratoux, Y. Arnaud, C. Vincent, K.L. Feigl, F. Reñy, and B. Legrèsy, "Surface motion of mountain glaciers derived from satellite optical imagery," *Remote Sensing of Environment*, vol. 95, no. 1, pp. 14 – 28, 2005.
- [3] T. Strozzi, A. Luckman, T. Murray, U. Wegmuller, and C. L. Werner, "Glacier motion estimation using sar offset-tracking procedures," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 11, pp. 2384–2391, Nov 2002.
- [4] M. Le Roy, K. Nicolussi, P. Deline, L. Astrade, J.-L. Edouard, C. Miramont, and F. Arnaud, "Calendar-dated glacier variations in the western european alps during the neoglacial: the mer de glace record, mont blanc massif," *Quaternary Science Reviews*, vol. 108, no. Supplement C, pp. 1 – 22, 2015.
- [5] L. Benoit, A. Dehecq, H.-T. Pham, F. Vernier, E. Trouvé, L. Moreau, O. Martin, C. Thom, M. Pierrot-Deseilligny, and P. Briole, "Multi-method monitoring of Glacier d'Argentière dynamics," *Annals of Glaciology*, vol. 56, no. 70, pp. 118–128, 2015.
- [6] E. Trouve, G. Vasile, M. Gay, L. Bombrun, P. Grussenmeyer, T. Landes, J.-M. Nicolas, P. Bolon, I. Pettillot, A. Julea, L. Valet, J. Chanutot, and M. Koehl, "Combining Airborne Photographs and Spaceborne SAR Data to Monitor Temperate Glaciers: Potentials and Limits," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 4, pp. 905–924, Apr. 2007.
- [7] A. Dehecq, R. Millan, E. Berthier, N. Gourmelen, E. Trouve, and V. Vionnet, "Elevation Changes Inferred From TanDEM-X Data Over the Mont-Blanc Area: Impact of the X-Band Interferometric Bias," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, no. 8, pp. 3870–3882, Aug. 2016.
- [8] F. Ponton, *Mesure de la variabilité des déplacements 3D de glaciers alpins par GNSS et imagerie radar*, Theses, Université de Grenoble, Nov. 2013.

Résumé :

Le lancement des satellites radar Sentinel-1A et 1B en avril 2014 et 2016 offre de nouvelles perspectives d'utilisation des images radar à synthèse d'ouverture (SAR), notamment pour le suivi des petits déplacements par interférométrie (InSAR). La stratégie d'acquisition systématique et le libre accès aux données Sentinel permettent d'envisager leur utilisation pour des applications qui étaient jusque-là restreintes par les limites spatiales et temporelles des précédentes générations de satellites radar (couverture limitée, coût important). L'objectif de la thèse est de déterminer les potentiels et limites d'utilisation des images Sentinel-1 et d'adapter les méthodes d'interférométrie radar en fonction des particularités de ces nouvelles données afin de mesurer les déformations de surface dans les contextes de la surveillance des territoires de montagne et du suivi des grands chantiers.

Le suivi des déformations de surface représente un effort important dans la gestion des territoires de montagne, notamment pour améliorer la compréhension des phénomènes géophysiques qui les impactent. Parmi les différentes opportunités offertes par le temps de revisite réduit de la constellation Sentinel-1, le suivi des glaciers et des zones récemment désenglacées soulève un grand intérêt pour la communauté scientifique. Des premiers travaux ont été engagés dans cette thèse sur le cas particulier des glaciers de la vallée de Chamonix. Malgré l'identification de conditions favorables à l'application de l'InSAR, ces résultats ont montré que les limites de l'interférométrie étaient atteintes pour ces objets affectés par une décorrelation rapide. En revanche, le maintien de la cohérence à proximité de ces glaciers, dans le milieu périglaciaire, au cours des périodes dépourvues de neige permet d'envisager un suivi des instabilités. Le suivi de ce milieu potentiellement à risque a été examiné en ayant recours à l'usage de coins réflecteurs et à des méthodes multi-temporelles adaptées. Ces travaux ont permis de définir leur capacité d'utilisation avec les images Sentinel-1 dans un contexte de suivi de déplacements en territoire de montagne.

Les grands travaux tels que la réalisation de tunnel en milieu urbain font l'objet de suivis précis, en particulier lorsque ces derniers sont réalisés dans des zones critiques densément construites. Malgré l'amélioration des techniques employées, certaines interventions géotechniques effectuées au cours de projets comme celui du Grand Paris peuvent engendrer des déformations en surface. Les méthodes traditionnelles d'auscultation terrestre apportent une solution de suivi en temps réel mais souffrent d'une couverture spatiale réduite. Le cofinancement de la thèse par des acteurs de la topographie de précision a offert la possibilité d'appliquer les méthodes d'InSAR à un niveau opérationnel. Les mesures réalisées à partir des données Sentinel-1 ont pu être comparées à des mesures terrestres, permettant d'estimer la précision de la mesure de vitesses de déplacement en milieu urbain. Ces travaux ont permis de valider les possibilités offertes par les données Sentinel-1 pour suivre à grande échelle et de façon régulière des phénomènes transitoires liés aux travaux souterrains.

Mots-clefs :

Téledétection, InSAR, Géodésie, topographie, déformation, zone périglaciaire, grand chantier

Abstract :

The launch of the Sentinel-1A and 1B radar satellites in April 2014 and 2016 offers new perspectives for SAR applications, especially for small deformation monitoring. Systematic acquisition strategy and open access to Sentinel data allow their use for applications that were restricted before by the spatial and temporal limitations of previous generations of radar satellites (limited coverage, high cost). The aim of this thesis is to determine the potential and the limitations of Sentinel-1 data, and to adapt the methods of radar interferometry according to the particularities of these new data, in order to measure ground deformation in the contexts of mountain area and public work monitoring.

The monitoring of surface deformations represents an important effort in the management of mountain territories, in particular to improve the understanding of the geophysical phenomena that impact them. Among the various opportunities offered by the reduced revisit time of the Sentinel-1 constellation, the tracking of glaciers and areas exposed to ice melt is of great interest for the scientific community. Despite the identification of favorable conditions for the application of InSAR, results on small glaciers in the Chamonix Valley showed that the limits of DInSAR methods were reached for these objects affected by rapid decorrelation. On the other hand, the maintenance of the coherence near these glaciers in the periglacial environment during periods free of snow makes it possible to estimate the instabilities. The monitoring of this potentially unstable environment has been investigated with help of corner reflectors (CR) and an adapted multi-temporal method. This work allowed defining the potential of using CR with Sentinel-1 images for the monitoring of mountainous areas.

Major public works such as the construction of tunnels in urban areas require precise monitoring, especially when they are carried out in densely built areas. Despite of the improvement of the construction techniques, some geotechnical operations carried out during the project such as the "Grand Paris" project can generate surface deformations. Traditional topographic monitoring methods provide a real-time monitoring solution but suffer from reduced spatial coverage. The co-funding of this thesis by topographic survey companies offered the possibility to apply the InSAR methods at an operational level. Displacement measurements obtained from Sentinel-1 data have been compared to the topographic measurements, allowing for the estimation of the deformation rate accuracy in urban areas. This work validates the possibilities offered by Sentinel-1 data for large-scale and regular monitoring of surface displacement related to underground works.

Keywords

Remote sensing, InSAR, Geodesy, topography, deformation, periglacial area, public works