



HAL
open science

Comparaison de deux chaînes de traitement InSAR et analyse des résultats

Ouatianan Kone

► **To cite this version:**

Ouatianan Kone. Comparaison de deux chaînes de traitement InSAR et analyse des résultats. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04804010

HAL Id: dumas-04804010

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04804010v1>

Submitted on 26 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.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE D'INGENIEURS GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Ouatianan KONE

Comparaison de deux chaînes de traitement InSAR et analyse des résultats

Soutenu le 03 septembre 2024

JURY

Monsieur Laurent MOREL	Président du jury
Monsieur Thibault COLETTE	Maître de stage
Monsieur Stéphane DURAND	Enseignant référent

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui m'ont accompagnée et soutenue tout au long de ma période de stage et de mon parcours académique. J'ai eu la chance d'être épaulée et encadrée par de merveilleuses personnes, que je souhaite remercier.

Tout d'abord, je voudrais remercier Monsieur Laurent MOREL, mon directeur et professeur de géodésie, pour sa disponibilité et son engagement envers les étudiants. Votre confiance et vos encouragements ont été des sources de motivation constantes tout au long de mes trois années passées à l'ESGT. Merci infiniment.

Mes pensées vont ensuite à l'endroit de mon enseignant référent, Monsieur Stéphane DURAND, pour sa disponibilité et ses recommandations. Vos suggestions m'ont fourni des directives claires et m'ont aidée à surmonter les défis de ce stage.

À Monsieur Thibault COLETTE, Ingénieur Géomètre Topographe Expert, ce fut un immense privilège de vous avoir comme maître de stage, je suis infiniment reconnaissante pour votre encadrement technique et vos conseils avisés tout au long de ce stage.

Mes remerciements vont aussi à tout le personnel administratif ainsi qu'à tous mes enseignants de l'ESGT, qui ont joué un rôle déterminant dans cette aventure académique.

Je suis également reconnaissante envers tous les membres du groupe SOCOTEC Monitoring FRANCE pour leur accueil chaleureux et leur sympathie. Leur collaboration a grandement enrichi mon expérience au sein de l'équipe.

Enfin, je remercie du fond du cœur mes parents et mes amis. Leur encouragement constant, leur confiance en moi, et leur soutien ont été des piliers essentiels dans la réalisation de mes objectifs. Leur présence m'a permis de traverser cette période avec sérénité et détermination.

A chacun d'entre vous, je vous exprime ma gratitude la plus sincère.

Liste des abréviations

APS : Atmospheric Phase Screen (Ecran de phase atmosphérique)

CR : Corner Reflector (Coin réflecteur)

DInSAR : Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (Interférométrie différentielle d'images radar à synthèse d'ouverture)

DEM : Digital Elevation Model (Modèle numérique d'élévation)

ESA : European Space Agency (Agence spatiale européenne)

GCP : Ground Control Point (Point de contrôle au sol)

GNSS : Global Navigation Satellite System (Système global de navigation par satellite)

GPE : Grand Paris Express

GPS : Global Positioning System (Système mondial de positionnement)

InSAR : Interferometric Synthetic Aperture Radar (Interférométrie d'images radar à synthèse d'ouverture)

IWS : Interferometric Wide Swath (Large bande interférométrique)

LOS : Line Of Sight (Ligne de visée)

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MTI : Multi Temporal InSAR (InSAR multi-temporel)

PS : Persistent Scatterer (Réflecteur persistant)

PSI : Persistent Scatterer InSAR

SAR : Synthetic Aperture Radar (Radar à synthèse d'ouverture)

SARPROZ : SAR PROcessing tool by periZ (L'outil de traitement SAR par PeriZ)

SBAS : Small Baseline Subset (Sous-ensemble de bases courtes)

SIG : Système d'Information Géographique

SNAP : Sentinel Application Platform (Plateforme applicative de Sentinel)

StaMPS : Stanford Method for Persistent Scatterers

WGS84 : World Geodetic System 1984 (Système géodésique mondiale 1984)

Table des matières

Remerciements	2
Liste des abréviations	3
Table des matières	4
Introduction	5
I État de l’art : Méthodologies InSAR et PSInSAR	8
I.1 PRINCIPES IN SAR DANS LA SURVEILLANCE DE LA DEFORMATION DU SOL.....	8
I.2 LES METHODES AVANCEES : NOTION DE PSIN SAR POUR ETUDIER L’ETAT DES PONTS	10
I.3 COINS REFLECTEURS.....	12
I.4 PRESENTATION DES OUTILS DE TRAITEMENT	13
I.4.1 STAMPS.....	13
I.4.1.1 SNAP-STAMPS	13
I.4.1.2 LOGICIELS COMPLEMENTAIRES	14
I.4.2 SARPROZ.....	15
II Procédures de traitement mises en place	16
II.1 COINS REFLECTEURS EXPLOITES	16
II.2 SITES D’ETUDE ET INSTRUMENTATIONS DES OUVRAGES.....	17
II.2.1 LE PONT DU WADI LEBAN.....	17
II.2.2 LE PONT DE SEVRES	18
II.2.3 ENSEMBLE DE DONNEES D’IMAGES SAR.....	19
II.3 PROCEDURE PSIN SAR STAMPS.....	20
II.3.1 IDENTIFICATION DES CR SUR LES IMAGES RADAR	20
II.3.2 SELECTION DE L’IMAGE MAITRESSE	23
II.3.3 TRAITEMENT SNAP2STAMPS	24
II.3.3.1 ÉDITION DU FICHER DE CONFIGURATION	24
II.3.3.2 PREPARATION DES IMAGES	24
II.3.3.3 RECALAGE ET GENERATION DES INTERFEROGRAMMES.....	24
II.3.4 TRAITEMENT STAMPS	26
II.4 PROCESSUS DE TRAITEMENT AVEC SARPROZ	30
II.4.1 PREPARATION DES DONNEES	31
II.4.2 TRAITEMENT DE LA ZONE COMPLETE	32
II.4.3 TRAITEMENT D’UNE PETITE SURFACE.....	33
III Analyse des résultats	34
III.1 ANALYSE DES RESULTATS AVEC STAMPS	34
III.1.1 PRESENTATION DES VITESSES LOS.....	34
III.1.2 ÉVALUATION DES PS COMME CR DANS L’ANALYSE DU PONT DU WADI LEBAN.....	35
III.1.3 ÉVALUATION DES PS COMME CR DANS L’ANALYSE DU PONT DE SEVRES.....	36
III.2 COMPARAISON DE SARPROZ ET STAMPS SUR LES DONNEES SENTINEL-1	38
Conclusion	40
Bibliographie	42
Liste des figures	46
Liste des tableaux	47

Introduction

La croissance démographique et le développement des ressources créent une forte demande d'infrastructures civiles : bâtiments, métros, ponts, barrages, aéroports, etc. Les ponts, en particulier, jouent un rôle fondamental dans le développement économique et la qualité de vie des populations, favorisant ainsi la circulation des véhicules et des personnes. Faisant partie d'un environnement parfois complexe, les ponts sont influencés par le passage des tunneliers pour la construction des métros et par divers obstacles urbains. La construction et la maintenance des ponts ne sont pas toujours bien gérées, rendant essentielles des méthodes de surveillance rigoureuses pour éviter les défaillances et détériorations graves.

Aujourd'hui, la détection des défaillances des ponts se fait grâce aux méthodes d'essais dynamiques utilisant divers capteurs suivis sur le long terme. Bien que ces méthodes fournissent des mesures précises, elles sont coûteuses et nécessitent une installation in situ.

Cependant, ces dernières années, plusieurs techniques de télédétection de haute précision ont révolutionné la surveillance des ouvrages d'art, atténuant les limites des capteurs. On retrouve parmi elles, la technologie de l'Interférométrie Radar à Synthèse d'Ouverture (InSAR) apparue comme une solution prometteuse pour surveiller à distance des phénomènes de grande échelle tels que les affaissements, les soulèvements ou les glissements de terrain [Ferretti et al., 2001]. Les avantages de l'InSAR incluent une couverture globale de la Terre, une large densité de points de mesure et une possibilité d'analyse rétrospective des données. L'InSAR utilise également des images radar haute résolution collectées par des satellites pour cartographier les déformations du sol à l'échelle millimétrique, même par mauvais temps et de nuit.

Quoique cette technique soit attrayante, elle est liée à certaines limites d'applicabilité telles que l'installation de coins réflecteurs dans les zones présentant peu de diffuseurs cohérents naturels, la résolution et le nombre de points de mesure dépendant de la longueur d'onde émise par le satellite et le déplacement dans la direction de la ligne de visée (LOS) du satellite.

Dans le cadre du projet du Grand Paris Express (GPE), le plus grand projet d'infrastructure urbaine en Europe, visant à désenclaver la métropole de Paris et ses agglomérations, 68 nouvelles gares et de nombreux nouveaux quartiers seront créés d'ici

2030. Le GPE prévoit la création de 200 km de lignes de métros automatiques, entraînant le creusement de tunnels qui peut provoquer des mouvements de terrain et affecter les infrastructures existantes, notamment les ponts. Il est alors nécessaire de disposer des moyens permettant de maîtriser la gestion des risques, de détecter ces mouvements de terrain, avant, pendant ou après des projets de construction, afin de limiter la perturbation des zones d'activité et de garantir la pérennité des ouvrages.

Depuis des années, le groupe SOCOTEC et sa filiale SOCOTEC Monitoring France, spécialisée dans l'auscultation et le monitoring d'ouvrages d'art, participent à la surveillance des déformations aussi bien en surface (ponts) qu'en sous-sol (tunnels) dans la zone d'influence géotechnique du GPE. La société est responsable du suivi de plusieurs lots du projet du GPE entre autres le lot T3A de la ligne 15 Sud.

Dans ce contexte de surveillance efficace des ponts, le présent travail de fin d'études s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés par le doctorant Abdeljalil NAHLI entre 2018 et 2020. La thématique principale est de comparer deux outils de traitement InSAR, StaMPS et SARPROZ, pour analyser les perturbations dues à l'environnement, notamment les mouvements du pont de Sèvres et d'autres pont si possible.

Les travaux antérieurs de Abdeljalil ont mis en lumière certaines limitations de StaMPS, notamment la difficulté à détecter la localisation des CR installés sur le pont de Sèvres après traitement PSInSAR. En effet, son objectif était de combiner des techniques GNSS et PSInSAR pour une surveillance optimisée des ouvrages d'art.

Mon travail vise à améliorer la chaîne de traitement existante exploitant la méthode PSInSAR de StaMPS par des paramètres appropriés au traitement des ponts à l'aide des images acquises en bande X. Une autre étude réalisée avec le logiciel SARPROZ sera mise en exergue avec des images en bande C afin d'évaluer l'apport de ce logiciel vis-à-vis des problèmes rencontrés par Abdeljalil.

Ce mémoire s'articulera autour de trois chapitres fondamentaux. Dans la section I, après avoir défini les méthodes InSAR et PSInSAR, nous présenterons les fonctionnalités des outils SNAP, StaMPS et SARPROZ et montrerons l'identification des CR sur les images radar.

Dans la section II, nous décrirons notre zone d'étude, détaillerons également les caractéristiques des données utilisées et le processus de traitement du logiciel SARPROZ.

Nous expliquerons les méthodologies adoptées pour la nouvelle chaîne de traitement StaMPS, en soulignant les étapes clés et les propriétés des paramètres utilisés.

Dans la section III, nous présenterons les résultats obtenus, évaluerons la qualité des PS en tant que CR et étudierons l'apport de SARPROZ.

I État de l'art : Méthodologies InSAR et PSInSAR

I.1 Principes InSAR dans la surveillance de la déformation du sol

L'interférométrie des images radar à synthèse d'ouverture (InSAR) est une technique de télédétection qui utilise des images SAR (Synthetic Aperture Radar) pour générer un modèle numérique de terrain (MNT) [Goldstein et al., 1988], etc.

Une image SAR est une collection de nombres complexes organisés en pixels sur la partie étudiée de la surface de la Terre. Chaque nombre complexe comporte un module qui représente l'amplitude du signal et est lié à la capacité du sol à rétrodiffuser l'onde radar. La phase du nombre complexe est liée à la distance entre le capteur radar et la cible réfléchissante dans le pixel.

On se base sur deux images SAR, l'une, appelée image maîtresse et l'autre, esclave, toutes deux acquises à partir de la même position du satellite à des moments différents [Hanssen, 2001]. L'image esclave est recalée sur l'image maîtresse, créant donc un interférogramme, qui constitue le fondement même de la technique InSAR.

Le principe de l'InSAR est basé sur la détermination de la différence de phase entre les deux acquisitions d'images mentionnées dans la Figure 1.

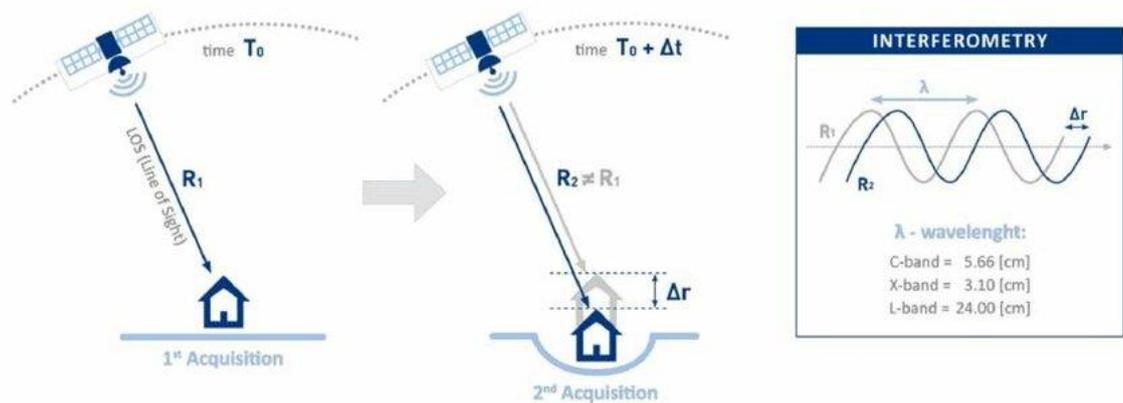


Figure 1 : Mesure de déformation DInSAR [TRE ALTAMIRA]

Dans la Figure 1, on observe deux passages d'un capteur radar pris à deux instants : T_0 et $T_0 + \Delta t$. Ces différents passages donneront deux distances au sol, R_1 et R_2 montrant ainsi le mouvement au sol. La distance R_2 supérieure à R_1 explique par exemple qu'il y a eu un affaissement dans la zone d'acquisition.

La phase entre deux acquisitions radar contient plusieurs composantes, c'est-à-dire la phase topographique φ_{topo} , la phase de déformation φ_{def} entre les deux moments d'acquisition, la phase orbitale φ_{orb} (imprécision des éphémérides orbitales), la différence de délai atmosphérique φ_{atm} et le bruit lié à la décorrélation temporelle φ_{bruit} , comme indiqué dans l'Équation 1:

$$\text{Équation 1 : } \Phi = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{orb}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{bruit}} [2\pi]$$

Chaque composante de la phase dans un interférogramme apporte des informations spécifiques sur la surface de la Terre et sur les conditions de l'acquisition des images :

- La phase topographique φ_{topo} est liée à l'altitude du point imagé par le satellite entre les deux acquisitions [Desvignes et al., 2000]. Cette composante de phase est due à l'inexactitude du DEM de référence [Kampes, 2006].
- La phase de déformation φ_{def} correspond au déplacement de la surface de la Terre mesurée le long de la ligne de visée du satellite entre les deux acquisitions.
- φ_{orb} est la composante de phase due aux erreurs orbitales provenant des imprécisions dans la détermination de la position du satellite au moment des deux acquisitions.
- φ_{atm} est la phase causée par la différence de retard atmosphérique lors de l'acquisition des images. Ce retard provient des variations atmosphériques (troposphère et ionosphère) traversées par les ondes radar.
- Le bruit de phase φ_{bruit} est le bruit de décorrélation. Il est lié aux changements des propriétés de la surface de la Terre entre les deux acquisitions telles que la végétation, l'humidité du sol ou les activités humaines telles que les travaux de construction.

Les méthodes InSAR peuvent être utilisées pour surveiller efficacement les mouvements du sol et les déplacements infimes de structures telles que les barrages, les bâtiments et les ponts [Perissin, 2016]. L'une des différentes méthodes de surveillance des déplacements du sol est l'interférométrie radar différentielle (DInSAR), introduite par [Gabriel et al., 1989]. Cette méthode permet de générer des cartes de déplacement du sol entre deux dates et donc le déplacement moyen sur une période donnée, tout en éliminant

la phase topographique. Par conséquent, le DInSAR permet d'éliminer toutes les composantes de la phase interférométrique mentionnée dans l'Équation 1, pour mesurer seulement la déformation.

Cependant, avec la méthode DInSAR, la qualité de l'interférogramme est largement affectée par les perturbations atmosphériques [Zebker et al., 1988] et les décorrélation temporelles et géométriques qui influencent le bruit de phase [Hanssen, 2001].

La décorrélation entraîne une perte de cohérence entre les deux acquisitions rendant la phase interférométrique non pertinente pour le calcul des déplacements. Les décorrélation sont généralement plus élevées dans les zones non urbaines.

La décorrélation temporelle survient lorsque les surfaces changent entre deux prises de vue, par exemple pour une acquisition sur une très longue période ou à cause des travaux de construction. Avec cette décorrélation, les images sont moins comparables, rendant difficile la détection des petites variations.

Quant à la décorrélation géométrique ou spatiale, elle est liée aux conditions de prises de vues des images, notamment à la variation de l'angle observé pour chaque cellule de résolution (pixels) au cours des deux acquisitions. Les différences dans les pixels rendent difficile l'alignement précis des images, ce qui affecte la qualité de l'analyse.

Les perturbations atmosphériques sont liées aux changements de vapeur d'eau principalement dans la troposphère, entraînent des variations spatio-temporelles de l'indice de réfraction du milieu de propagation des ondes radar. Ces variations induisent un déphasage du signal radar, pouvant représenter plusieurs centimètres de déplacement [Samir, 2021]. Ces perturbations atmosphériques diminuent alors la précision du DInSAR.

Pour résoudre ces deux derniers termes de l'Équation 1 (atmosphère et bruit), des techniques avancées reposant sur le traitement de pile d'images SAR (Multi-Temporal InSAR = MTI) sont utilisées.

I.2 Les méthodes avancées : Notion de PSInSAR pour étudier l'état des ponts

Parmi les techniques MTI, on retrouve l'approche des petites lignes de base ou Small Baseline Subset (SBAS) [Berardino et al., 2002] et l'approche des Réflecteurs Stables ou Permanent Scatterer Interferometry (PSI) [Ferretti et al., 2000].

La première méthode permet de suivre les points de bonne cohérence interférométrique au cours du temps.

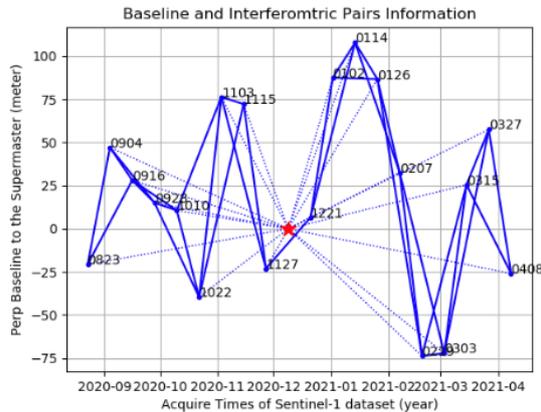


Figure 2 : Distribution des lignes de base temporelles et perpendiculaires de SBAS [Matlab]

La Figure 2 montre la répartition des lignes de bases temporelles et perpendiculaires dans l'approche SBAS. On remarque une connexion entre plusieurs acquisitions à la fois, ce qui explique la particularité de cette méthode à construire un plus grand nombre d'interférogrammes.

La méthode PSInSAR présentée par [Ferretti et al., 1999] est celle qui nous intéresse dans ce mémoire. Elle nécessite également une série d'images SAR (par exemple, une vingtaine) pour localiser des éléments réfléchissants, les PS, qui pourront être suivis sur une longue période. Toutefois, contrairement à la technique SBAS, ici, toutes les autres acquisitions sont liées à une seule image, la référence, comme illustré dans la Figure 3.

Dans la Figure 3, on constate que l'image maitresse sélectionnée est connectée à chaque image esclave, sans tenir compte des limites dans le temps comme dans l'espace. Cette connexion permet de générer des interférogrammes entre l'image maitresse et chaque image esclave.

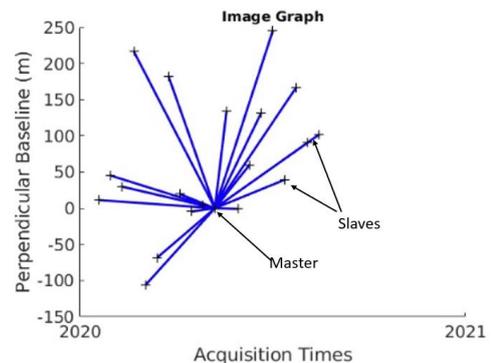


Figure 3 : Distribution des lignes de base temporelles et perpendiculaires de la méthode PSInSAR [Matlab]

Les points PS, appelés réflecteurs stables, sont des éléments du sol de faible étendue (plus petits que le pixel) avec la particularité de renvoyer des signaux d'amplitude et de phase stables dans le temps. Ils peuvent être des éléments naturels comme les coins de bâtiment et les surfaces rocheuses, ou artificiels tels que les coins réflecteurs.

Les principales étapes de traitement de la technique PSInSAR présentées par [Ferretti et al., 1999] sont les suivantes :

- 1) Recalage des images esclaves sur l'image maîtresse et la génération d'un MNT à partir des interférogrammes formés.
- 2) Calcul des interférogrammes différentiels entre l'image maîtresse et chaque image esclave à l'aide d'un modèle numérique d'élévation (DEM) ;
- 3) Estimation préliminaire de la cohérence des pixels présumés les plus cohérents sur une grille grossière. Ces pixels sont appelés candidats à diffuseurs permanents (PSC) ;
- 4) Affinement de l'étape 3. La partie longue des signaux atmosphériques est estimée et retirée, les interférogrammes différentiels sont corrigés, et des PS supplémentaires sont calculés.

La détection des PSC repose sur plusieurs critères dont la dispersion d'amplitude normalisée [Jia et al., 2016], qui nous intéresse dans ce travail. L'insertion de ce critère sera mieux détaillée lors des traitements qui suivront selon chaque outil employé.

I.3 Coins réflecteurs

La position exacte des points de mesure n'est généralement pas connue [Garthwaite, 2017] et dépend fortement des détails de la structure à surveiller. Pour améliorer la précision de la localisation des PS, on privilégie l'implantation de coins réflecteurs ou Corner Reflector (CR) afin d'obtenir une mesure précise du déplacement grâce à leur forte rétrodiffusion et leur stabilité temporelle.

Un CR est construit en assemblant, par exemple, trois plaques en aluminium formant un trièdre, dont la dimension doit être adaptée à la longueur d'onde du radar [Garthwaite, 2017]. L'aluminium est préféré à l'acier car il résiste à la corrosion, bien qu'il soit généralement plus coûteux et plus léger [Garthwaite, 2017].

En principe, un coin réflecteur se caractérise par une réflectivité beaucoup plus élevée que celle des diffuseurs environnants [Ferretti et al, 2007], des valeurs élevées de sa section efficace radar ou Radar Cross Section (RCS) et de son rapport signal sur bruit ou Signal-to-Clutter-Ratio (SCR) [Groot et al., 1994].

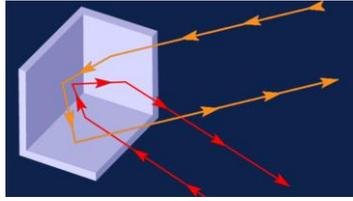


Figure 4 : Réflexion du signal incident par la surface d'un CR trièdre [Université de Arizona]

Le RCS indique la capacité du CR à réfléchir le faisceau incident de manière isotrope (homogène) dans l'espace. L'unité légale du RCS est le mètre carré (m^2), bien que souvent les valeurs soient données en décibels (dB). La valeur du RCS dépend de la forme du réflecteur d'angle (cubique, triangulaire, rectangulaire, etc.) et de la bande d'acquisition des images (bande C, bande X, etc.). Les différentes formules de calcul du RCS selon la forme du coin réflecteur sont détaillées dans [Ferretti et al., 2007].

Le SCR est le rapport entre la RCS du coin réflecteur et la puissance du fond environnant à l'intérieur de la cellule de résolution [Czikhardt et al., 2022].

L'avantage des CR est qu'ils peuvent limiter le problème de la décorrélation temporelle et également minimiser les erreurs dues aux retards atmosphériques en les combinant avec des récepteurs GPS [Zhu et al., 2014].

I.4 Présentation des outils de traitement

I.4.1 StaMPS

I.4.1.1 SNAP-StaMPS

Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) est un logiciel basé sur Matlab destiné à mesurer les déplacements au sol à partir de séries chronologiques d'acquisitions d'images SAR [Hooper et al., 2010]. Développé initialement à l'université de Stanford et mis à jour par la suite à l'université d'Islande, à l'université technologique de Delft et à l'université de Leeds, ce package intègre les méthodes PSInSAR, SBAS et une option pour les combiner.

StaMPS s'utilise après un prétraitement effectué avec un logiciel InSAR tel que SNAP, ISCE, Gamma ou ROI_PAC et DORIS. Dans notre étude, nous avons choisi de réaliser le prétraitement avec SNAP (Sentinel Application Platform), car il reste un outil open source couramment utilisé pour le traitement des données Sentinel [Delgado et al.,

2019] et est compatible avec StaMPS via un flux de travail constitué d'un ensemble de scripts Python nommé « snap2stamps ».

SNAP ou Sentinel Application Platform est une plateforme conçue pour faciliter le traitement et l'analyse des données Sentinel. Bien qu'elle soit principalement une boîte à outils Sentinel, elle prend en charge de nombreux autres capteurs.

Le package snap2stamps permet le traitement de la pile d'images en ligne de commandes sur la base de graphiques au format XML modifiables. Il sert à automatiser le processus de formation des interférogrammes après la définition de certains paramètres dans un fichier de configuration. Parmi ces paramètres, on retrouve :

- Le chemin vers le dossier du projet, des données SAR et des graphes ;
- La définition des coordonnées géographiques de la boîte englobante de la zone d'intérêt ;
- Le chemin et le nom de l'image maîtresse ;
- Les paramètres liés aux ressources de calcul à utiliser.

Cet ensemble de scripts snap2stamps est disponible en open source sur le référentiel GitHub¹ et prépare les données aux formats compatibles avec la chaîne de traitement StaMPS.

I.4.1.2 Logiciels complémentaires

Pour un usage optimal de StaMPS, certains outils sont nécessaires, parmi lesquels figurent « SNAPHU » et « Matlab ».

SNAPHU est un algorithme de flux de réseau utilisé pour le déroulement de phase². Il nécessite des interférogrammes en entrée pour produire des fichiers de phases déroulées, essentiels pour StaMPS.

Quant à Matlab, il nécessite en particulier quatre bibliothèques³ spécifiques pour effectuer des manipulations avancées et des analyses détaillées :

¹ Lien d'accès : <https://github.com/mdelgadoblasco/snap2stamps>

² Guide SNAPHU : <https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>

³ Produits de Matlab : <https://fr.mathworks.com/products.html>

- Parallel Computing Toolbox : permet d'exécuter des calculs complexes à l'aide des processeurs multicœurs.
- Image Processing Toolbox : bibliothèque utilisée pour le traitement, la visualisation et l'analyse des images.
- Signal Processing Toolbox : bibliothèque utilisée pour traiter et analyser des signaux
- Statistics and Machine Learning Toolbox : permet d'analyser et de modéliser les données.

I.4.2 SARPROZ

SARPROZ, ou The SAR PROcessing tool by periZ, est un logiciel puissant spécialisé dans la méthode PSInSAR pour produire des séries temporelles de déformation du sol. Basé sur Matlab, SARPROZ est un logiciel commercial fournissant une interface graphique (GUI) pour faciliter le traitement. Conçu pour traiter une large gamme de données multi-temporelles issues d'un ou de plusieurs capteurs, il a été développé par Daniele Perissin en 2009.

SARPROZ a été testé avec succès pour différentes applications, notamment la surveillance des infrastructures critiques telles que le pont de Hong Kong en 2013 et le pont Morandi à Gênes, en Italie, en 2019. Ces études ont abouti à des cartes de déplacement de l'ordre du millimètre [D. Perissin et al. 2019].

Tous ces logiciels nécessaires à la bonne exécution de nos traitements étaient déjà installés sur le bureau à distance utilisant Linux, à l'exception de SARPROZ et Matlab pour StaMPS que nous avons donc installés.

II Procédures de traitement mises en place

Afin de répondre à nos objectifs, nous avons élaboré des procédures spécifiques permettant d'optimiser les méthodes de traitement.

Pour mieux comprendre et résoudre les problèmes rencontrés par StaMPS concernant l'identification des CR en tant que PS, nous avons analysé le pont de Sèvres, le site principal de notre étude. Toutefois, ce site ne disposant pas de toutes les informations nécessaires à notre objectif, nous avons également opté pour l'analyse d'un second site.

Ces deux sites ont été instrumentés à l'aide des coins réflecteurs comprenant des antennes GNSS intégrées.

II.1 Coins réflecteurs exploités

La forme et les dimensions des coins réflecteurs ont été choisies pour avoir une précision de l'ordre du millimètre sur les mesures PSInSAR. Les antennes GNSS intégrées sur ces réflecteurs ont un excentrement vertical constant [Nahli, 2020].

Ce sont des CR multi-passe 3D qui ont été installés sur nos ouvrages d'études. Le modèle est formé de la fusion de deux CR cubiques de la même taille qui ont en commun un axe vertical et le centre de phase [Nahli et al, 2020]. Un bras a été installé verticalement sur le centre de phase avec une hauteur réglable servant comme support à l'antenne GNSS.

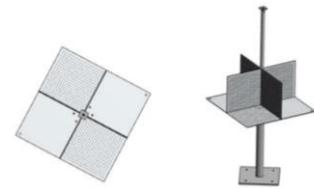


Figure 5 : Modèle de CR multi-passe 3D intégré à antenne GNSS [Nahli et al, 2020]

La taille du réflecteur influence la RCS et le SCR, impactant ainsi la précision des mesures radar. Selon les tests d'Abdeljalil, un CR de 30 cm de côté (longueur des arêtes du cube) dans la bande X présente une RCS de 318 m², permettant ainsi d'atteindre une précision de 0.1 mm. En revanche, réduire la taille à 20 cm diminue la RCS à 63 m², avec une précision de 1 mm. À cet effet, il a testé ces deux modèles de CR afin de valider son choix, et a opté pour des CR de 30 cm en raison notamment des structures des ouvrages à surveiller, de la visibilité sur les images.

II.2 Sites d'étude et instrumentations des ouvrages

II.2.1 Le Pont du Wadi Leban

Le pont du Wadi Leban, à Riyad en Arabie Saoudite, est un pont à haubans mis en service en 1997. Long de 763 mètres, il est composé de deux piles, de culées et de pylônes fabriqués en béton armé. Sa conception et sa construction allient diverses compétences en ingénierie et en arpentage, ainsi que des techniques modernes de passation de marchés et de construction⁴.

Depuis 2014, le pont du Wadi Leban est surveillé par Cementys (ex SOCOTEC Monitoring) avec des capteurs à fibre optique. Cependant, ces mesures étant limitées par l'installation des capteurs et l'absence de référentiel commun, Abdeljalil a proposé dans ses recherches d'utiliser des récepteurs GNSS pour obtenir des mesures 3D et la technique PSInSAR pour des mesures plus denses. Par conséquent, des coins réflecteurs avec des antennes GNSS intégrées ont été installés pour expérimenter la combinaison de ces techniques sur cette structure élancée.

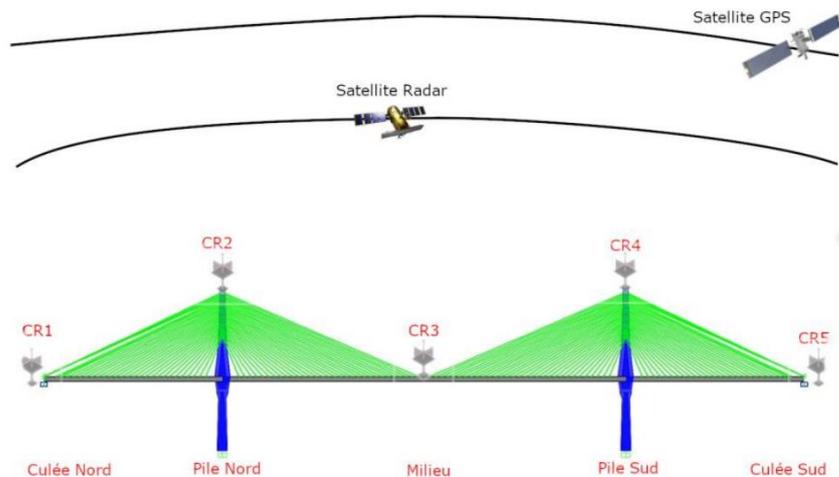


Figure 6 : Emplacement des CR sur le pont du Wadi Leban [Abdeljalil]

La Figure 6 montre les cinq CR avec antennes GNSS intégrées qui ont été installés sur le pont du Wadi Leban. Deux sont situés au niveau des culées Nord et Sud du pont, tandis que les autres CR sont installés en haut des piles et au milieu du pont. Nous

⁴ <https://structurae.net/fr/ouvrages/pont-du-wadi-leban>

disposons des coordonnées géographiques précises dans le système WGS84 des GPS associés aux CR2 et CR4, que nous avons renseignées dans le Tableau 1. Ces coordonnées nous permettront de localiser plus tard les CR sur les images radar et d'évaluer la validation des PS en tant que CR à l'issue du traitement.

Tableau 1 : Coordonnées géographiques des GPS

GPS associé à CR	Latitude (°)	Longitude (°)
GPS2	24.61783	46.58191
GPS4	24.61447	46.58349

II.2.2 Le Pont de Sèvres

Le Pont de Sèvres, mis en service en 1963, est une structure composée de quatre poutres en acier et de dalles en béton armé. Il mesure 150 mètres de long, avec une portée principale de 80 mètres⁵. Traversant la Seine entre Boulogne-Billancourt et Sèvres, dans le département des Hauts-de-Seine, il enjambe deux routes départementales et une ligne de tramway. Le pont de Sèvres est situé dans la zone d'influence géotechnique du tunnel de la ligne 15 du métro parisien. Sur ce tronçon, le tunnelier est passé à 12 m de profondeur en dessous du pont entre les piles du milieu et de l'Est.

Des CR ont également été installés sur ce pont. Bien que nous ne disposions pas des coordonnées GPS précises de ces CR, nous avons pu les localiser approximativement grâce à une image retrouvée dans les recherches d'Abdeljalil, qui matérialise leur emplacement sur le pont. La Figure 7 illustre les cinq CR avec antennes GNSS intégrées ont été installés sur le pont, dans la zone d'influence géotechnique du



Figure 7 : Localisation approximative des CR sur le pont de Sèvres [Abdeljalil]

⁵ <https://structurae.net/fr/ouvrages/pont-de-sevres>

tunnel, dont quatre en amont et en aval des piles, et un sur le tablier.

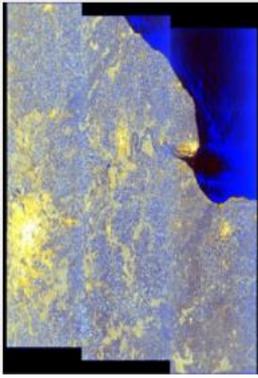
II.2.3 Ensemble de données d'images SAR

Dans cette étude, nous avons utilisé une collection d'images SAR de trois satellites : Sentinel-1 (S1) en bande C géré par l'ESA, TerraSAR-X (TSX) en bande X fourni par le Centre aérospatial allemand (DLR) et COSMO-SkyMed (CSK) en bande X exploité par la mission satellitaire italienne. La bande X a été spécifiquement utilisée en raison de l'installation des CR sur les ouvrages qui en tiennent compte. Notre jeu de données comprend uniquement l'orbite descendante préconisée pour la surveillance des ouvrages tels que les ponts, avec 91 images S1, 20 images TSX et 20 images CSK. Les détails de ces données sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Données SAR utilisées dans ce travail

	Paramètres		
Satellite	Sentinel-1	TerraSAR-X	COSMO-SkyMed
Ouvrage à étudier	Pont de Sèvres	Pont de Sèvres	Pont du Wadi Leban
Mode d'acquisition	IWS (IW1, IW2, IW3)	Stripmap Mode	Stripmap Himage
Résolution spatiale	5 m	3 m	5 m
Option de polarisation	Polarisation Double : VV+VH	Polarisation Simple : HH	Polarisation Simple : HH
Temps de revisite	12 jours	11 jours	16 jours
Période d'acquisition	01/01/2019-10/11/2021	19/01/2020-15/08/2020	24/12/2018-16/11/2019
Nombre d'images	91	20	20

Dans le Tableau 2, nous avons énuméré les caractéristiques des données qui serviront aux traitements PSInSAR dans cette étude. Le mode d'acquisition des images S1 contient 3 fauchées larges interférométriques (IW1, IW2, IW3), celui de TSX, Stripmap, présente une largeur de fauchée de 30 km et Stripmap Himage de CSK offre une largeur de fauchée de 40 km.



La Figure 8 illustre les 3 fauchées de S1, qui sont des bandes de terrain que le satellite observe lors de son passage. Chaque fauchée (swath en anglais) compte 9 rafales (burst en anglais), qui sont des segments d'acquisition au sein de la fauchée.

Les images sont acquises en polarisations double VV + VH et simple HH. La polarisation double signifie que l'onde est d'abord émise et réceptionnée verticalement (VV), puis émise verticalement et réceptionnée horizontalement (VH). D'autre part, la polarisation HH indique que l'onde est à la fois émise et réceptionnée horizontalement.

Figure 8 : Vue complète de la zone d'étude illustrée par

les 3 fauchées S1
[SNAP]

Le temps de revisite d'un satellite est le nombre de jours entre ses deux passages identiques successifs sur la même zone.

Les images S1 ont été téléchargées depuis le site de l'Alaska Satellite Facility⁶ (ASF) et sont disponibles pour un usage public. Quant aux images TSX et CSK, elles ont été commandées par Abdeljalil dans le cadre de son travail de thèse.

II.3 Procédure PSInSAR StaMPS

II.3.1 Identification des CR dans les images radar

Les CR sont distingués par leur luminosité élevée dans les images SAR en raison de leur forte rétrodiffusion. La réponse d'un CR sur une image radar peut s'étendre sur plusieurs pixels en fonction de sa taille et de la résolution de l'image. Idéalement, le retour radar d'un CR, sans bruit, se manifeste sous la forme d'une fonction sinus cardinal en 2D, avec une valeur maximale au centre et des lobes sur les côtés, comme illustré dans la Figure 9.

⁶ <https://search.asf.alaska.edu/#/>

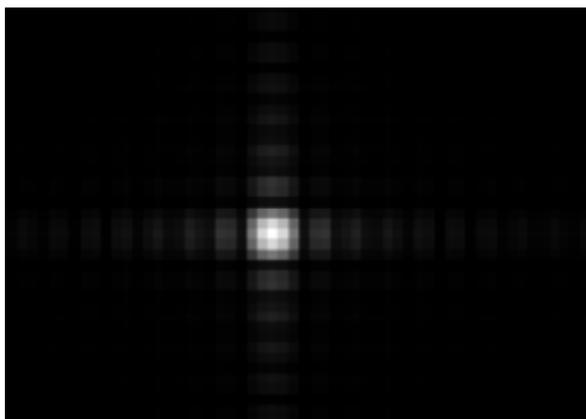


Figure 9 : Réponse d'un CR sans bruit [Groot et al., 1994]

Pour identifier les CR sur les images radar, plusieurs méthodes peuvent être utilisées. Parmi elles, nous avons opté pour la méthode visuelle, qui consiste à repérer la géométrie de la structure à surveiller à travers les pixels et reconnaître ainsi l'emplacement des CR pour évaluer leurs intensités moyennes.

Selon les travaux d'Abdeljalil, les CR ont été installés entre juillet 2019 et mai 2020 sur le Pont du Wadi Leban. Dans notre étude, nous avons comparé l'emplacement du GPS4 sur deux images : l'une acquise en 2018, avant l'installation des CR, et l'autre en août 2019, après leur installation.

Cependant, il n'a pas été possible de valider la présence des CR sur le Pont de Sèvres, car les images disponibles datent uniquement de 2020, après l'installation. Les CR avaient été installés en novembre 2019 sur ce pont.

Sur les images radar, nous avons défini une zone de localisation approximative du CR. En utilisant l'outil « Profil Plot » de SNAP, nous avons tracé le profil de l'intensité maximale des cercles définis dans la Figure 10.

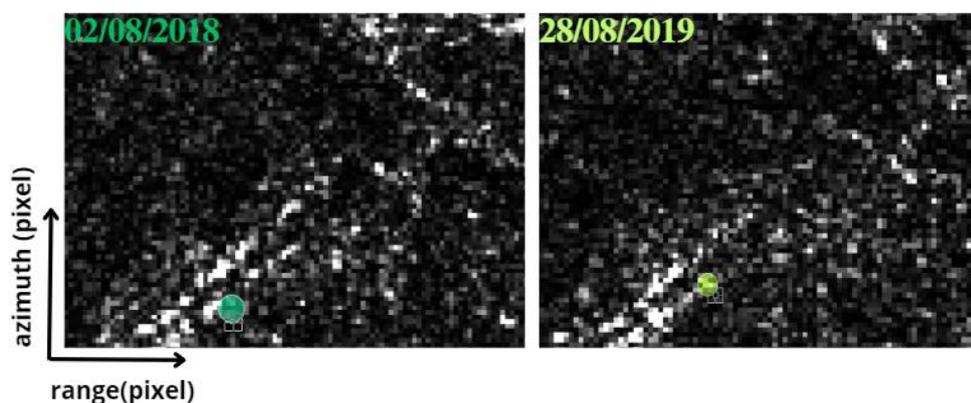


Figure 10 : Recherche du CR intégré au GPS4 [SNAP]

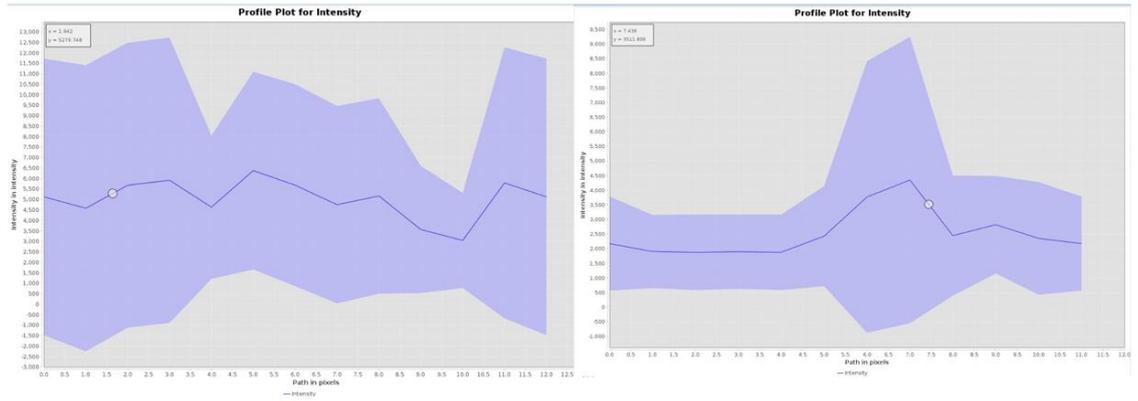


Figure 11 : Tracés des profils d'intensité [SNAP]

Dans les Figure 10 et Figure 11, les résultats montrent une intensité moyenne de 3506.911 pour 2018, soit une amplitude de 59.219, et une intensité de 5066.538 pour 2019, correspondant à une amplitude de 71.179. La différence d'amplitude entre les deux dates est de 11.96.

Pour évaluer la signification de cette différence d'amplitude, nous avons réalisé une comparaison similaire dans la zone approximative du GPS2.

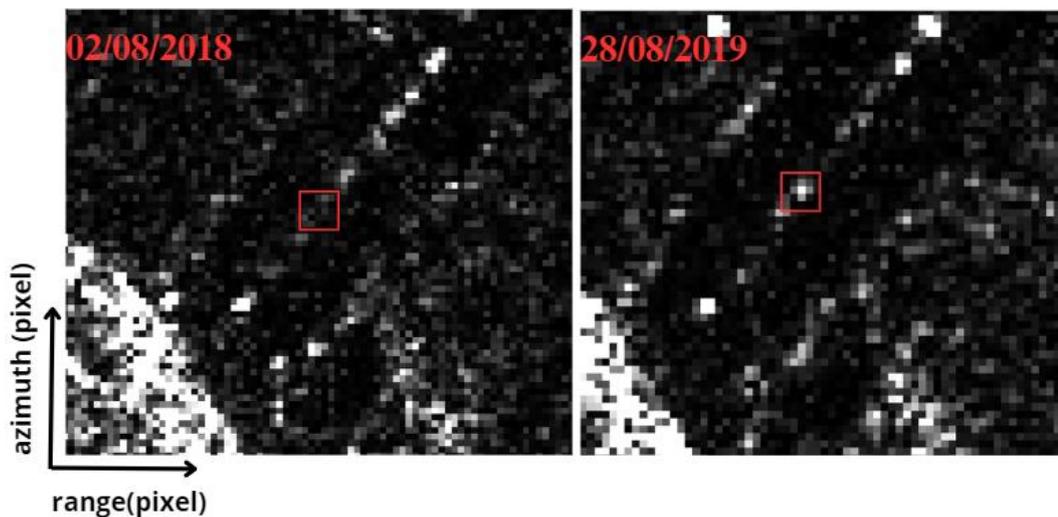


Figure 12 : Recherche du CR intégré au GPS2 [SNAP]

Sur la Figure 12, pour cette zone, les résultats montrent une intensité de 1283.762 en 2018, soit une amplitude de 35.829, et une intensité de 4735.090 en 2019, soit une amplitude de 68.812, correspondant à une différence d'amplitude beaucoup plus élevée de 32.983.

En théorie, les CR devraient produire une forte rétrodiffusion. Cependant, dans le cas du GPS4, la différence d'amplitude de 11.96 entre 2018 et 2019 pourrait ne pas être suffisante pour confirmer avec certitude la présence du CR. Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs, notamment la présence de bruit important dans cette zone qui masque la réponse du CR, et l'absence de particularité visible entre les pixels supposés correspondre aux CR et les pixels naturels vu la présence importante de pixels fortement réfléchissants.

De l'autre côté, dans le cas du GPS2, la différence d'amplitude est plus significative, indiquant une détection plus claire du CR. Cela pourrait suggérer que le pixel sélectionné est probablement le plus susceptible d'être considéré comme un CR.

En conclusion, ces résultats montrent que la validation de la présence d'un CR sur les images radar nécessite non seulement une analyse minutieuse des amplitudes moyennes mais aussi un contexte environnemental dans les caractéristiques des cibles présents lors de l'installation des CR.

Afin d'identifier les CR correctement dans les images radar, une autre approche basée sur la méthode de corrélation spectrale présentée par [Schneider et al, 2006] utilisant le logiciel commercial Gamma peut être employée. De plus, l'utilisation de CoRAL⁷, un outil open source développé par Garthwaite en 2018, permettant d'analyser la réponse des CR dans les images radar peut être une alternative. Toutefois, les scripts de CoRAL sont actuellement disponibles aux données prétraitées avec le logiciel Gamma, il serait donc nécessaire de les adapter pour qu'ils puissent prendre en compte les données aux formats de SNAP.

II.3.2 Sélection de l'image maîtresse

Avant tout prétraitement, il est essentiel de trouver l'image maîtresse. L'image maîtresse est l'image optimale permettant de maximiser la cohérence attendue de la pile interférométrique pour obtenir des résultats précis et fiables. Pour ce faire, le logiciel SNAP choisit automatiquement l'image maîtresse en utilisant sa fonction « InSAR stack Overview » qui sert à minimiser les valeurs de la ligne de base perpendiculaire tout en maximisant la cohérence des images pour obtenir des résultats précis et fiables. Après

⁷ Outil CoRAL : <https://github.com/GeoscienceAustralia/CoRAL?tab=readme-ov-file>

analyse, SNAP a sélectionné l'image du 8 mai 2020 comme image maîtresse pour les données TSX, et l'image du 10 mars 2019 pour les données CSK.

II.3.3 Traitement snap2stamps

II.3.3.1 Édition du fichier de configuration

La chaîne de traitement snap2stamps utilisée est disponible en open source sur GitHub⁸.

Pour notre traitement, nous avons ajusté le fichier de configuration en fonction de nos données, des chemins d'accès, des ressources de notre machine virtuelle et des zones d'étude définies en coordonnées géographiques dans le système de coordonnées WGS84. Pour le Pont de Sèvres avec les données TSX, les coordonnées sont : LONMIN = 2.216413° ; LATMIN = 48.823444° ; LONMAX = 2.236861° ; LATMAX = 48.850434°. Pour le Pont du Wadi Leban avec les données CSK, les coordonnées sont : LONMIN = 46.560° ; LATMIN = 24.587° ; LONMAX = 46.625° ; LATMAX = 24.649°.

II.3.3.2 Préparation des images

A cette étape, l'image maîtresse et les images esclaves de chaque ensemble de données sont extraites, puis sauvegardées dans des dossiers distincts aux formats compatibles avec SNAP. Cette organisation est nécessaire pour le calcul des interférogrammes et assure une bonne préparation des données pour les prochaines étapes du traitement.

II.3.3.3 Recalage et génération des interférogrammes

D'abord, le recalage des images esclaves sur l'image maîtresse est réalisé à l'aide des orbites des produits et du DEM. Nous avons utilisé deux types de DEM : le SRTM 1 seconde HGT avec une résolution spatiale de 5 mètres pour les données CSK, téléchargé automatiquement par SNAP et le RGE ALTI offrant une résolution de 1 mètre pour les images TSX, téléchargé par Abdeljalil pendant ses travaux.

La technique de ce recalage, basée sur la corrélation croisée de SNAP, se déroule en deux étapes : le recalage grossier, qui ajuste les décalages approximatifs entre les

⁸ Lien d'accès : <https://github.com/mdelgadoblasco/snap2stamps>

images et le recalage fin, qui affine ces ajustements en appliquant les coordonnées géographiques définies dans le fichier de configuration. Le recalage produit des images d'intensité, montrées dans la Figure 13, et le processus est détaillé dans la Figure 14, partie A.

Ensuite, les interférogrammes sont générés en utilisant les paires d'images recalées. Le processus est illustré dans la Figure 14 partie B, il consiste à supprimer la phase topographique en utilisant le DEM. Les images de phase obtenues à la fin de ce traitement sont présentées dans la Figure 13.

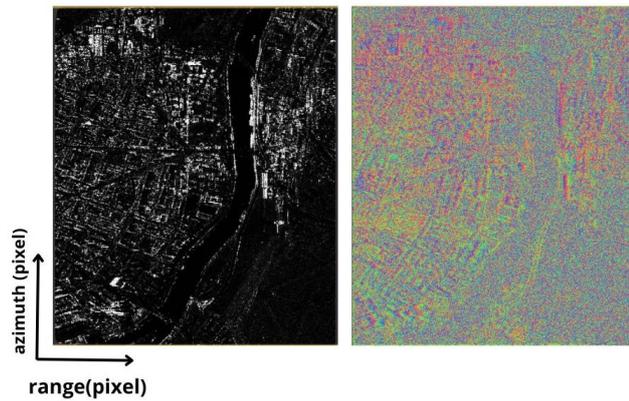


Figure 13 : Image d'intensité à gauche et image de phase à droite [SNAP]

Enfin, les données sont préparées pour le traitement StaMPS en convertissant les résultats en fichiers compatibles enregistrés dans un dossier distinct.

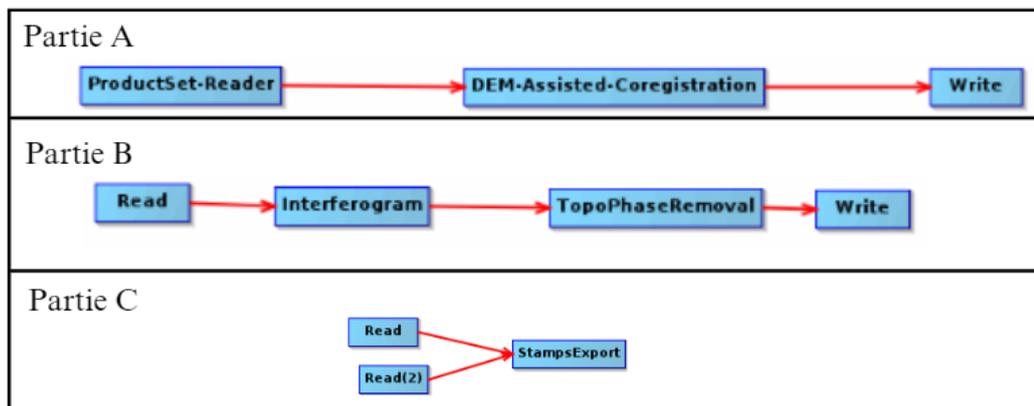


Figure 14 : Graphiques XML du traitement snap2stamps [SNAP]

II.3.4 Traitement StaMPS

Dans cette étape, le script « *mt_prep_snap 1 2 3* » est utilisé pour exporter les données de SNAP vers StaMPS. Il sélectionne les PSC depuis les interférogrammes. Ce script nécessite trois paramètres en entrée :

- 1) La date d'acquisition de l'image maîtresse ;
- 2) Le chemin du dossier de fichiers compatibles pour StaMPS ;
- 3) La valeur du seuil de dispersion de l'amplitude.

Selon la technique de StaMPS, la sélection initiale des PSC est effectuée sur la base de la dispersion d'amplitude normalisée définie par [Ferretti et al., 2001] telle qu'exprimée à l'Équation 2. La dispersion d'amplitude, D_A , est appliquée pour décrire la stabilité d'amplitude et réduire ou augmenter le nombre de pixels dans l'analyse de phase.

$$\text{Équation 2 : } D_A = \sigma_A/m_A$$

Où σ_A est l'écart type de l'amplitude de rétrodiffusion et m_A la moyenne de cette amplitude.

L'étape suivante est le traitement dans Matlab, où nous avons paramétré les options de calcul nécessaires dans un fichier comprenant les huit différentes étapes du traitement StaMPS à savoir :

- 1) Chargement des PS Candidats,
- 2) Calcul de la cohérence temporelle en utilisant un filtre pour estimer le bruit de phase,
- 3) Sélection des PS initiaux,
- 4) Filtrage des PS pour réduire le bruit de nos données,
- 5) Correction de la phase enroulée en tenant compte des erreurs liées au DEM,
- 6) Déroulement de la phase (méthode SNAPHU pour convertir la phase interférométrique en mesures de déplacements), après un filtre de Goldstein,
- 7) Estimation de l'erreur d'angle de vue corrélée spatialement principalement due aux erreurs liées au DEM et estimation simultanée de la phase d'erreur atmosphérique et de la variation de l'orbite,
- 8) Filtrage atmosphérique.

Tableau 3: Descriptifs des paramètres clés du traitement

Etape	Paramètre : Valeur	Description
2) Calcul de cohérence	‘filter_grid_size’ : 20	Taille en pixels de la grille de rééchantillonnage des PSC
	‘filter_weighting’ : ‘P-Square’ ou ‘SNR’	Schéma de pondération des PSC
3) Sélection des PS	select_method : ‘PERCENT’ ou ‘DENSITY’	Méthode de sélection des PS initiaux
	‘percent_rand’ : 20 ‘density_rand’ : 20	Pourcentage maximal de PS acceptables Densité spatiale de faux PS à éliminer
6) Déballage de phase	‘unwrap_grid_size’ : 50	Espacement de la grille de rééchantillonnage
	‘unwrap_time_win’ : 180	Durée (en jours) de la fenêtre temporelle du filtrage de phase
	‘unwrap_gold_n_win’ : 16	Taille de la fenêtre du filtre Goldstein
7) Estimation de l’erreur d’angle de visée	scla_deramp : ‘y’	Estime la rampe de phase des interférogrammes
8) Filtrage atmosphérique	‘scn_time_win’ : 180	Filtrage passe-bas dans le temps
	‘scn_wavelength’ : 50	Filtrage dans l’espace

Le Tableau 3 est fondamental pour notre traitement StaMPS car il présente les valeurs des paramètres à chaque étape. Les étapes du traitement sont pilotées par ces paramètres clés, que nous avons ajustés en vue d’obtenir des PS stables dans le temps qui pourront être positionnés aux emplacements des CR installés sur les ponts. Les détails supplémentaires des paramètres sont disponibles dans le Manuel de StaMPS ⁹.

Dans le processus du traitement StaMPS, nous avons commencé par déterminer une valeur appropriée de l’amplitude de dispersion pour la sélection des PSC. Après plusieurs essais, illustrés dans le Tableau 4, nous avons constaté que la valeur de 0.47 permettait d’être moins stricte dans la sélection des PSC, par conséquent, nous l’avons retenu.

L’étape 1 de StaMPS consiste simplement à charger les PSC, sans impact direct sur les paramètres que nous ajustons. À l’étape 2, pour estimer la composante du bruit de phase dans les interférogrammes, nous avons conservé la taille de pixel de la grille du filtre à 20, comme indiqué dans le Tableau 3. Nous avons comparé les deux schémas de pondération des PSC, ‘P-Square’ et ‘SNR’, et avons choisi ‘SNR’ après avoir observé que celui-ci offrait une meilleure détection des points de mesure dans les interférogrammes. Un algorithme calcule la variation quadratique de la phase résiduelle des PSC selon [Hooper et al, 2007] par un processus itératif en tenant compte du nombre d’interférogrammes et des erreurs de phase liées aux facteurs comme le déplacement du sol et les erreurs d’angle de vue. Après chaque itération (5 dans notre cas), la variation quadratique est recalculée, et le processus s’arrête une fois qu’elle devient inférieure au seuil de 0.005, indiquant que la solution a convergé.

À l’étape 3, pour le critère de sélection des PS initiaux, nous avons comparé les méthodes ‘PERCENT’ et ‘DENSITY’. La méthode ‘PERCENT’ a donc été retenue car elle permet de sélectionner les pixels en limitant leur pourcentage plutôt que leur densité spatiale à éliminer.

À l’étape 4, les PS sélectionnés sont filtrés pour éliminer ceux dus à la contribution du bruit. À l’étape 5, la phase est corrigée des erreurs dues au DEM, et les phases

⁹ https://homepages.see.leeds.ac.uk/~earahoo/stamps/StaMPS_Manual_v4.1b1.pdf

enroulées des PS sélectionnés sont vérifiées, comme indiqué dans la Figure 15. Les paramètres StaMPS des étapes 4 et 5 ont été utilisés par défaut.

À l'étape 6, concernant le déroulement de phase, le paramètre 'unwrap_grid_size' est important. Initialement fixé à 40 m, nous l'avons ajusté à 50 m après avoir constaté que des valeurs plus élevées réduisaient le bruit du signal. Chaque PS suit un filtrage contrôlé par le filtre de Goldstein avant le déroulement, puis est échantillonnée sur la grille d'espacement de 50 m. Lorsque plusieurs PS se retrouvent dans la même cellule de grille, l'algorithme combine leurs valeurs complexes. Les phases déroulées des PS peuvent ainsi être visualisées, comme le montre la Figure 16.

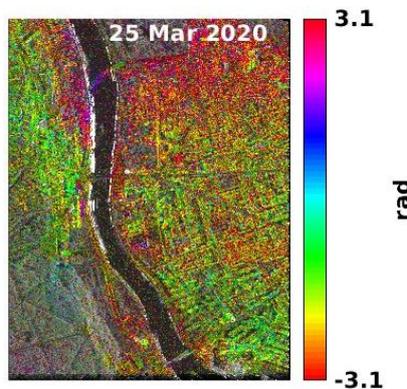


Figure 15 : Image de phase enroulée [Matlab]

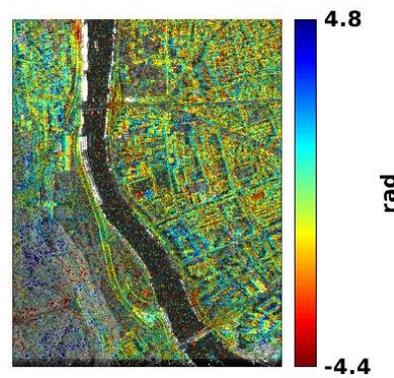


Figure 16 : Image de phase déroulée [Matlab]

Pour l'étape 7, nous avons réglé le paramètre 'scla_deramp' sur 'y' pour éliminer les différentes erreurs spatialement corrélées. Enfin, à l'étape 8, le signal est soumis à un filtrage passe-bas dans le temps et un second filtrage dans l'espace pour éliminer le bruit résiduel.

L'ajustement de ces paramètres énumérés a été effectué progressivement à travers différents tests de traitement illustrés dans le Tableau 4. Dans le prétraitement avec SNAP, nous avons utilisé le DEM SRTM 1 seconde HGT pour le recalage des images des tests 1 à 6, tandis que pour le test 7, nous avons utilisé le DEM RGE ALTI.

Tableau 4 : Paramétrage des différents tests effectués sur le Pont de Sèvres

Test	Valeur de D_A	Paramètres clés	Détection de PS comme CR	Interprétations et/ou Suggestions
1	$D_A = 0.1$	'P-Square' 'Percent_rand' = 1	Faible	Une valeur très basse de D_A empêche la détection de PS
2	$D_A = 0.25$	'P-Square' 'Percent_rand' = 1	Limitée	Insuffisant
3	$D_A = 0.3$	'P-Square' 'Percent_rand' = 1	Partielle	Amélioration de la combinaison des paramètres en augmentant la valeur du D_A
4	$D_A = 0.4$	'SNR' 'Percent_rand' = 1	Légèrement Modérée	Le paramètre 'SNR' améliore les résultats
5	$D_A = 0.59$	'SNR' 'Percent_rand' = 1	Incertaine	D_A très élevé pourrait sélectionner des PSC moins fiables
6	$D_A = 0.43$	'SNR' 'Percent_rand' = 1	Modérée	Configuration améliorée des paramètres
7	$D_A = 0.47$	'SNR' 'Percent_rand' = 20	Relativement modérée	Combinaison relativement idéale pour la localisation des PS comme CR

À la suite des différents tests du Tableau 4, on remarque que le schéma de pondération 'SNR' semble effectivement plus efficace que 'P-Square'. En outre, une valeur élevée de 'percent_rand', notamment de 20%, améliore considérablement la sélection des PS. De plus, une valeur modérée de la dispersion d'amplitude, fixée à 0.47, permet de sélectionner idéalement des PSC tout en excluant les points non stables.

En raison du temps imparti pour ce travail, nous n'avons pas pu effectuer des tests avec les paramètres StaMPS pour le pont élané du Wadi Leban. Bien que ces deux structures à étudier ne présentent pas les mêmes géométrie et orientation, nous avons appliqué les paramètres du test 7 du Pont de Sèvres au traitement du Pont du Wadi Leban.

À la fin de ces étapes de StaMPS, nous avons exporté les déplacements et vitesses LOS des points de mesures d'une zone d'analyse restreinte au format compatible avec une visualisation dans un outil SIG.

II.4 Processus de traitement avec SARPROZ

Cette partie du mémoire consiste à présenter la première chaîne de traitement, SARPROZ, appliquée à notre jeu de données.

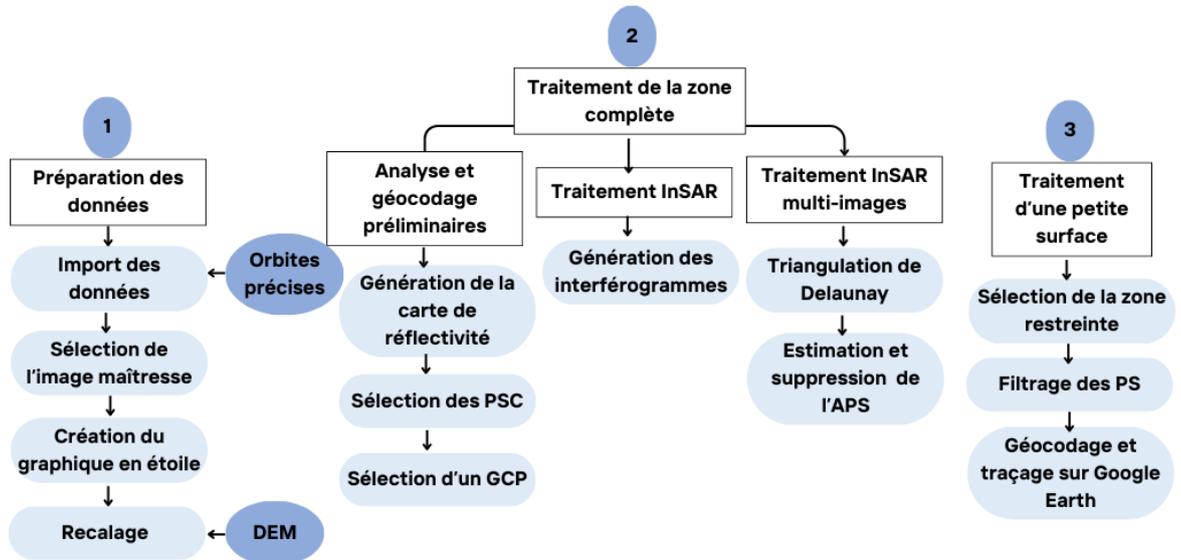


Figure 17 : Flux de travail du traitement

Dans la Figure 17, les trois étapes générales du traitement sont présentées, et elles concernent : la préparation des données, le traitement de la zone complète et le traitement d'une petite surface nous intéressant. Chacune de ces étapes fera l'objet d'une explication détaillée dans la suite.

II.4.1 Préparation des données

Dans cette première étape, après l'importation des données, nous renseignons d'abord nos identifiants pour permettre au logiciel de récupérer automatiquement les données météorologiques¹⁰, les orbites précises¹¹ et le DEM¹² sur les sites concernés. La polarisation VV et la fauchée IW1 qui couvrent notre zone d'étude ont été sélectionnées. Ensuite, l'image maîtresse du 04/09/2020 est extraite avec un ajustement des coordonnées géographiques en WGS84 du point de référence (48.836029° en latitude et 2.239429° en longitude) et du rayon d'étude (7 km). Les images esclaves, couvrant la même zone que l'image maîtresse, sont extraites et un graphique en étoile est tracé pour visualiser les connexions entre elles, comme mentionné dans la Figure 18.

¹⁰ Site d'accès : <https://www.visualcrossing.com/>

¹¹ Site d'accès : <https://dataspace.copernicus.eu/>

¹² Site d'accès : <https://cdsportal.copernicus.eu/en/>

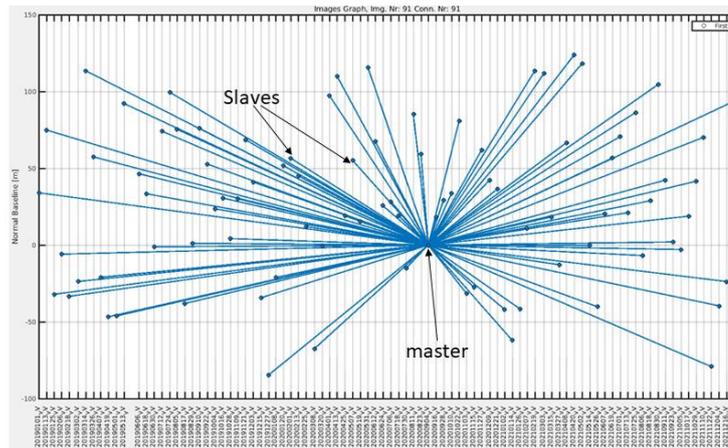


Figure 18 : Connexion entre l'image maîtresse et les images esclaves [SARPROZ]

Enfin, ces images esclaves sont recalées sur l'image maîtresse en utilisant le DEM de COPERNICUS et le mode de corrélation d'amplitude croisée, qui est une combinaison de corrélation croisée avec une transformation rigide pour aligner les paires d'images [Perissin, 2018].

II.4.2 Traitement de la zone complète

Dans cette deuxième étape, la carte de réflectivité qui est la moyenne temporelle de toutes les images, est d'abord extraite. Les PSC sont sélectionnés en fonction du seuil de l'indice de stabilité d'amplitude (ASI), fixé à 0.66 dans notre cas, définit dans l'Équation 3 :

$$\text{Équation 3 : } \text{ASI} = 1 - D_A$$

Avec D_A , la dispersion d'amplitude, expliquée ultérieurement dans la procédure de StaMPS.

Le point de contrôle au sol (GCP) sélectionné a pour caractéristiques : 48.836480° en latitude et 2.239603° en longitude, comme illustrée dans la Figure 19 .

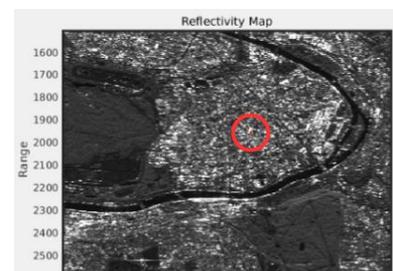


Figure 19 : GCP localisé sur la carte de réflectivité [SARPROZ]

Ensuite, les interférogrammes sont générés en conservant les paramètres par défaut. Suite à la sélection des PSC primaires, c'est-à-dire ceux supérieurs au seuil ASI, un réseau

de référence de toute la zone est formé utilisant l'algorithme de la triangulation de Delaunay [Kampes, 2006]. On utilise certains paramètres comme la tendance linéaire, la hauteur et la dilatation thermique (changement de la température) qui serviront à l'estimation de l'APS. La phase résiduelle de la triangulation est donc utilisée pour supprimer la contribution de l'APS [Perissin, 2018]. Quant aux PSC secondaires, ceux inférieurs au seuil, ils participent à la densification du réseau dans une seconde sélection des PS avec l'inversion des mêmes paramètres de l'estimation de l'APS.

II.4.3 Traitement d'une petite surface

Cette dernière étape sert à traiter une petite zone dont nous souhaitons optimiser la sélection des PS. Après avoir sélectionné la zone restreinte nous intéressant, nous filtrons à nouveau les PS avec les mêmes critères et/ou paramètres utilisés précédemment. Enfin, tous les PS sont géocodés et visualisés sur Google Earth. Dans notre cas, le géocodage peut être défini comme un algorithme qui attribue à chaque pixel de l'image radar une position géographique exploitable dans un système de référence géodésique, le WGS84.

III Analyse des résultats

Dans ce chapitre, nous avons utilisé l'outil QGIS afin de mieux analyser le comportement des PS. Pour faciliter leurs visualisations, nous avons intégré le plugin « InSAR Time Series Analysis » dans QGIS, un outil développé en 2023 par un ancien stagiaire de SOCOTEC Monitoring.

Ce plugin permet de calculer le taux moyen de changement de vitesse suivant la ligne de visée du satellite sur une période définie, ainsi que le déplacement moyen du dernier mois d'acquisition d'images et le déplacement total. Toutefois, j'ai dû adapter le plugin pour qu'il fonctionne selon nos besoins spécifiques de ce travail.

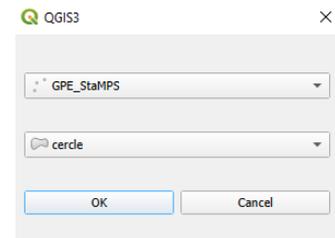


Figure 20 : Interface du plugin [QGIS]

La configuration des fichiers de sortie de StaMPS est déjà compatible avec le plugin, par contre, pour SARPROZ, il est nécessaire de l'adapter. Dans ces fichiers, les champs de chaque point de mesure comprennent :

- Position géographique (longitude (°) - latitude (°) en WGS84),
- Hauteur (m),
- Cohérence,
- Écart-type (pixel),
- Vitesse de déplacement (mm/an),
- Déplacement (mm) à chaque date d'acquisition.

III.1 Analyse des résultats avec StaMPS

Dans cette partie, nous procédons à la validation des PS en tant que CR sur les deux structures étudiées.

III.1.1 Présentation des vitesses LOS

Après le traitement de StaMPS, on obtient toutes les informations des déformations et vitesses de déplacements pour les deux zones d'intérêt. La Figure 21 montre la distribution des vitesses de déplacement en mm/an, l'échelle de mesure en couleur représente les vitesses de déformations mesurées le long de la ligne de visée du satellite

allant du bleu (soulèvement) au rouge (tassement). L'étoile en noir désigne le point de référence.

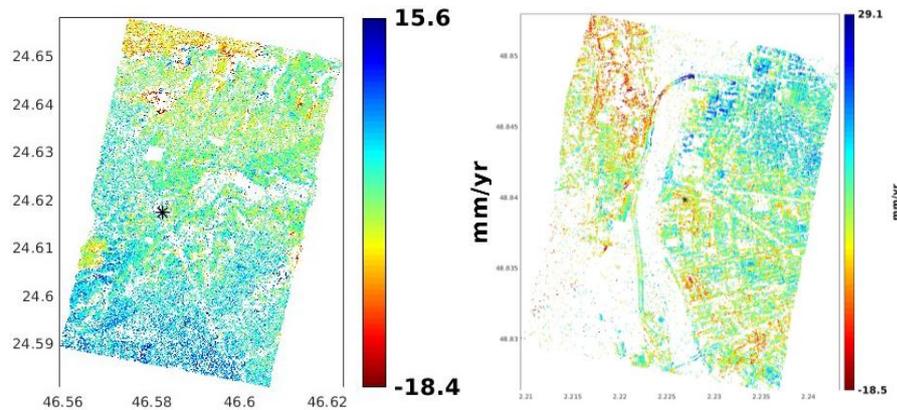


Figure 21 : Vitesses de déplacement dans les zones d'étude, Pont du Wadi Leban (gauche) et Pont de Sèvres (droite) [Matlab]

Dans la Figure 21, nous constatons une stabilité des deux zones d'étude au regard de la prédominance de zones vertes, indiquant peu de mouvement significatif. Malgré cette stabilité, certaines anomalies sont représentées par des zones rouges et bleues. Et autour des points de référence, les zones semblent relativement stables avec peu de variations significatives.

III.1.2 Évaluation des PS comme CR dans l'analyse du Pont du Wadi Leban

Après avoir localisé approximativement les CR intégrés aux GPS2 et GPS4 sur les images radar CSK dans la partie II.3.1, nous allons effectuer une évaluation permettant de valider les PS détectés en tant que CR.

Connaissant les coordonnées géographiques en WGS84 des GPS intégrés, nous les avons chargés sur QGIS et nous avons constaté que les PS ne se superposent pas exactement aux emplacements des CR, comme illustré dans la Figure 22.

Cependant, à travers l'identification du CR2 dans l'image radar, on pourrait affirmer que l'un des PS à proximité de celui-ci le représenterait, or le décalage des PS est aussi visible pour le CR4 qui n'a pas pu être identifié correctement sur l'image radar. Les PS se comportent de la même manière, avec un certain décalage par rapport aux deux réflecteurs.

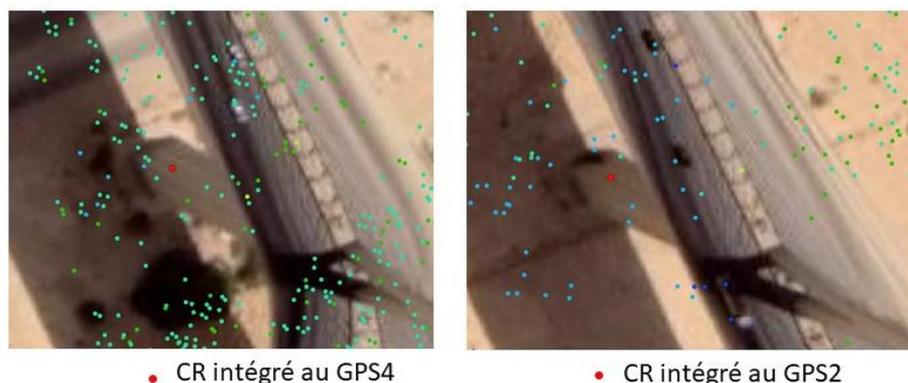


Figure 22 : Évaluation de la correspondance des PS comme CR [QGIS]

Ce décalage observé dans la localisation des PS, comme montré dans la Figure 22, est dû à plusieurs facteurs. Tout d'abord, il résulte d'un manque d'ajustement des paramètres de StaMPS afin de recueillir les valeurs adéquates à cette structure élancée. Par ailleurs, l'orientation et la géométrie de ce pont diffèrent de celles du Pont de Sèvres, dont les paramètres ont été utilisés en raison du temps limité pour ce travail.

Ensuite, on pourrait penser à l'imprécision des données CSK obtenues avec le mode Stripmap HIMAGE, qui a une résolution moyenne de 5 m. Une solution serait d'utiliser des données plus précises, dont celles du mode d'acquisition Spotlight qui offre une résolution de 1 mètre. De plus, l'utilisation d'un DEM personnalisé à la place de celui fourni automatiquement par SNAP pourrait permettre d'améliorer le recalage des images.

Enfin, l'exploitation des données couvrant la période de décembre 2018 à novembre 2019 pourrait également contribuer à ce décalage, car la combinaison des données acquises avant et après l'installation des CR n'est pas recommandée. Il serait préférable de traiter des données couvrant uniquement la période d'installation des CR, c'est-à-dire entre juillet 2019 et mai 2020. Cependant, il n'a pas été possible dans notre cas d'exclure les images acquises avant juillet 2019, puisque cela aurait empêché d'atteindre le minimum de 20 images nécessaires pour appliquer la méthode PSInSAR.

III.1.3 Évaluation des PS comme CR dans l'analyse du Pont de Sèvres

Dans ce paragraphe, nous procédons à la validation des PS issus du traitement avec StaMPS en tant que CR installés sur le pont de Sèvres. Malgré l'absence des positions précises des GPS intégrés aux CR, nous nous baserons sur leurs localisations approximatives, illustrées à la Figure 7. Cette approche nous permettra de vérifier que les

PS peuvent être considérés comme CR et de confirmer la pertinence et la fiabilité de notre chaîne de traitement StaMPS appliqué au pont de Sèvres.

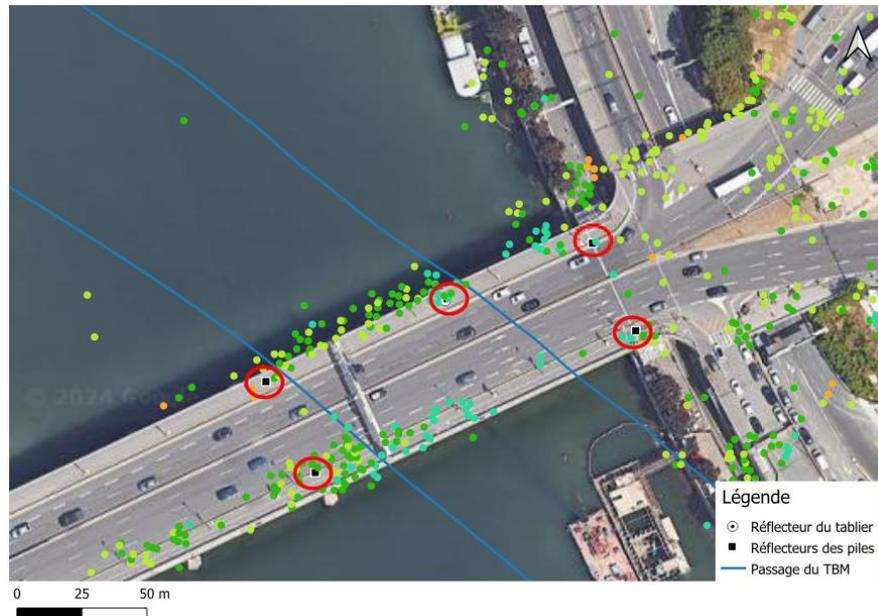


Figure 23 : Répartition des PS dans la zone d'installation des CR [QGIS]

La Figure 23 nous permet d'identifier une correspondance géométrique entre les emplacements approximatifs des CR, encerclés en rouge, et la répartition des PS détectés à l'issue du traitement. À travers cette correspondance, on peut suggérer que les PS superposés aux CR ou identifiés à proximité pourraient effectivement les représenter. Cependant, cette approche ne garantit pas forcément une validation absolue des PS en tant que CR. Notre hypothèse serait encore plus solide si les coordonnées GPS précises des CR étaient connues, d'autant plus qu'en parallèle, le traitement PSInSAR a été correctement réalisé en tenant compte de tous les facteurs essentiels :

- La résolution spatiale de 3 mètres des images en vue d'améliorer la précision de détection des PS comme CR ;
- La prise en compte de l'effet de décorrélation temporelle, avec des images de janvier à août 2020, donc sans changement significatif dans l'environnement pour impacter les résultats ;
- L'utilisation d'un DEM personnalisé avec une résolution de 1 mètre, afin de fournir un meilleur recalage des images, contrairement au DEM fourni automatiquement par SNAP ;

- Les critères appropriés de fabrication des CR pour ce type d'ouvrage.

Néanmoins, la répartition des PS sur le pont de Sèvres permet de souligner que la chaîne de traitement mise en place à partir de nos différents ajustements des paramètres de StaMPS est encourageante. Cependant, leur considération comme CR reste incertaine.

III.2 Comparaison de SARPROZ et StaMPS sur les données Sentinel-1

Dans cette partie, nous avons comparé les résultats obtenus avec SARPROZ et StaMPS sur les données Sentinel-1 pour évaluer leur pertinence dans l'identification des PS.



Figure 24 : Comparaison géométrique des deux outils [QGIS]

Dans la Figure 24, SARPROZ et StaMPS identifient des PS qui sont géométriquement similaires, ce qui explique une certaine cohérence entre les deux outils concernant la localisation des PS. Toutefois, la simple reconnaissance visuelle ne suffit pas pour garantir que les résultats sont équivalents en termes de précision et d'analyse des déformations observées. Pour ce faire, nous avons comparé les séries temporelles des PS détectés dans la zone entourée en rouge dans la Figure 24.

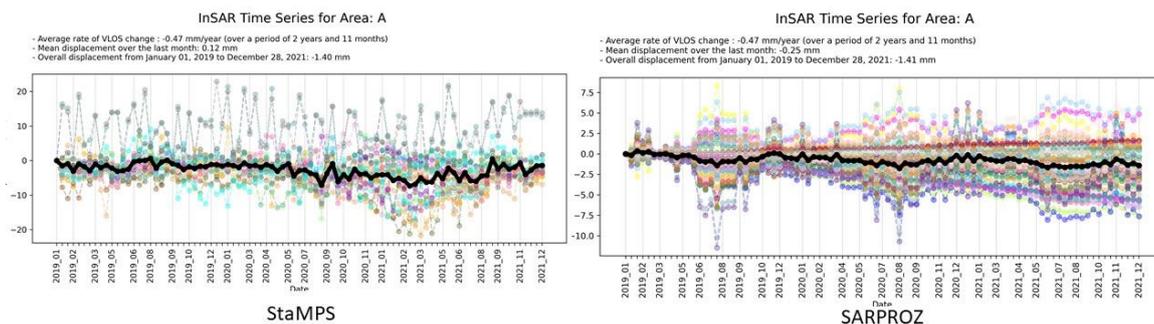


Figure 25 : Séries temporelles des PS détectés sur le pont de Sèvres [Plugin InSAR Time Series Analysis]

Les séries temporelles révèlent des tendances d'affaissement avec un taux de vitesse identique de -0.47 mm/an pour les deux outils. On observe un déplacement global de -1.40 mm avec StaMPS et -1.41 mm avec SARPROZ. Ces mouvements temporels pratiquement similaires expliquent une forte cohérence de ces deux outils et leur pertinence à détecter les déformations structurelles à partir des données Sentinel-1.

Au regard des comparaisons géométriques et temporelles, nous pouvons conclure que le traitement des données TSX avec SARPROZ ou StaMPS devrait fournir des résultats similaires. Par conséquent, il n'est donc pas utile de changer de logiciel afin de détecter les PS comme CR sur le pont de Sèvres.

Conclusion

En conclusion de ce mémoire, nous avons appliqué l'une des techniques avancées de traitement d'images SAR, la méthode PSInSAR, couplée à l'implantation des coins réflecteurs, pour la détection des réflecteurs permanents sur deux infrastructures civiles : le pont de Sèvres et le pont du Wadi Leban.

En utilisant des images acquises en bande X, nous avons identifié les coins réflecteurs installés sur le pont du Wadi Leban, principalement par la méthode visuelle. Toutefois, pour améliorer la fiabilité de l'identification des réflecteurs, l'approche basée sur la méthode de corrélation spectrale et l'outil CoRAL pourraient présenter une alternative intéressante, bien qu'ils utilisent actuellement le logiciel commercial Gamma. Les PS détectés sur ce pont sont relativement décalés par rapport aux positions précises des GPS intégrés aux coins réflecteurs, ce qui émet donc une incertitude quant aux paramètres utilisés pour le traitement StaMPS.

En ce qui concerne le pont de Sèvres, l'identification des CR sur les données en bande X n'a pas été possible en raison de la limitation des données, puisque les images disponibles ont été acquises uniquement après l'installation des CR. Malgré cette contrainte, nous avons mis en place une chaîne de traitement PSInSAR permettant de détecter des PS à proximité des CR ou aux emplacements GPS approximatifs. L'objectif de continuer les travaux réalisés par Abdeljalil, qui était de détecter des PS correspondant aux CR, a été partiellement atteint pour le pont de Sèvres, bien qu'ayant pas les positions précises des GPS intégrés aux CR pour valider concrètement cette démarche. Cet objectif a été valorisé grâce à l'utilisation de la nouvelle chaîne de traitement snap2stamps avec l'idée d'utiliser un DEM personnalisé pour le prétraitement dans SNAP et généralement grâce à l'utilisation des paramètres cohérents de StaMPS. À travers cette chaîne, il a été possible d'identifier des PS aux positions ou à proximité des CR, ce qui est très encourageant pour la surveillance des infrastructures.

De plus, l'exploitation des images en bande C de Sentinel-1 avec le logiciel SARPROZ a montré sa cohérence avec StaMPS dans l'analyse du pont de Sèvres. Les PS détectés ont été localisés aux mêmes endroits du pont par les deux outils, présentant des déplacements et des vitesses similaires, ce qui laisse à comprendre que le traitement des données en bande X de TerraSAR-X avec SARPROZ pourrait aboutir à des résultats similaires à ceux obtenus par StaMPS.

Bien que les résultats du Pont du Wadi Leban nécessitent une validation plus rigoureuse, les conclusions tirées de ce travail montrent que la chaîne de traitement mise en place par la méthode multi temporelle PSInSAR offre une capacité fiable pour détecter les déformations structurelles, comme démontré sur le pont de Sèvres.

Bibliographie

➤ Ouvrages imprimés

Hanssen Ramon F., 2001, Radar interferometry : data interpretation and error analysis. Kluwer Academic, Springer : Dordrecht.

Kampes B.M., 2006. Radar interferometry : persistent scatterer technique. Springer : Dordrecht.

➤ Travaux universitaires

Étienne Nitsche. Mise en place d'une expérience de suivi des déplacements du sol sur des coins réflecteurs par interférométrie d'images radar satellite. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. Ffdumas-03577057. (Consulté le 04 mars 2024).

➤ Articles de périodiques imprimés

A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca, Multibaseline InSAR DEM reconstruction : the wavelet approach. In IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, vol. 37, no. 2, p. 705-715. DOI : 10.1109/36.752187.

A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca, "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, no. 5, pp. 2202-2212, Sept. 2000, doi : 10.1109/36.868878.

A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, no. 1, pp. 8-20, Jan. 2001, doi : 10.1109/36.898661.

A. Ferretti, Monti-Guarnieri A., Prati, C., Rocca, F., Massonnet, D. (2007). InSAR Principles : Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. ESA Publications, TM-19. ISBN 92-9092-233-8.

A. Samir. 2021. Contribution à la modélisation de délais atmosphériques pour l'amélioration des mesures DInSAR multi-passes. Disponible sur < DOI :10.13140/RG.2.2.10192.64003>

Berardino P., Fornaro G. et Lanari R. and Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, vol. 40, no. 11, pp. 2375-2383. DOI : 10.1109/TGRS.2002.803792.

D. Perissin (2016). Interferometric SAR Multitemporal Processing: Techniques and Applications. Ban, Y. (eds) Multitemporal Remote Sensing. Remote Sensing and Digital Image Processing, vol 20. Springer, Cham.

D. Perissin, P. Milillo, G. Giardino, G. Milillo, A. Coletta et C. Terranova. 2019. Pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure : The Morandi Bridge, Genoa, Italy', Remote Sensing, vol. 11, iss. 12, p. 1403. Disponible sur <<https://doi.org/10.3390/rs11121403>>

Delgado Blasco J.M. ; Foumelis M. ; Stewart C. ; Hooper A. Measuring Urban Subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry. Remote Sens. 2019, 11, 129. <https://doi.org/10.3390/rs11020129>.

Gabriel, A. K., R. M. Goldstein, and H. A. Zebker (1989), Mapping small elevation changes over large areas : Differential radar interferometry, J. Geophys. Res., 94(B7), 9183–9191, doi :10.1029/JB094iB07p09183.

Graham, L. “Synthetic interferometer radar for topographic mapping.” (1974). DOI : 10.1109/PROC.1974.9516.

Garthwaite M. C., 2017. On the Design of Radar Corner Reflectors for Deformation Monitoring in Multi Frequency InSAR. Remote sensing, 9.

Goldstein, R.M., Zebker, H.A., & Werner, C.L. (1988). Satellite radar interferometry : Two-dimensional phase unwrapping. Radio Science, 23, 713-720.

Groot J. and Otten M., SAR imaging of corner reflectors larger than the spatial resolution, in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, vol. 32, no. 3, pp. 721-724. DOI : 10.1109/36.297993.

Hooper, A., Segall, P., & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112(B7).

Hooper, A., Spaans, K., Bekaert, D., Cuenca, M. C., Arıkan, M., & Oyen, A. (2010). StaMPS/MTI manual. Delft Institute of Earth Observation and Space Systems Delft University of Technology, Kluiverweg, 1, 2629.

Jia, H. et Liu, L. A technical review on persistent scatterer interferometry. Journal of Modern transportation, 2016, volume 24, p. 153-158. DOI : 10.1007/s40534-016-0108-4.

Michel Desvignes, Serge Langlois, Jean-Marc Constans, Marinette Revenu. Déroulement de phase : application à la correction de distorsions géométriques en IRM. Traitement du Signal, 2000, 17 (4), pp.313-324. hal-00960309.

Milillo, P., Giardino, G., DeJong, M. J., Perissin, D., & Milillo, G. (2018). Multi-temporal InSAR structural damage assessment: The London crossrail case study. Remote Sensing, 10(2), 287.

Nahli A., Simonetto E. Tatin M. et Durand S. ON THE COMBINATION OF PSINSAR AND GNSS TECHNIQUES FOR LONG-TERM BRIDGE MONITORING, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, vol. 43, p. 325–332. DOI : 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-325-2020.

R. Czikhardt, H. van der Marel, F. J. van Leijen and R. F. Hanssen, "Estimating Signal-to-Clutter Ratio of InSAR Corner Reflectors From SAR Time Series," in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 19, pp. 1-5, 2022, Art no. 4012605, doi : 10.1109/LGRS.2021.3070045.

Schneider, R. Z., Papathanassiou, K. P., Hajnsek, I., & Moreira, A. (2006). Polarimetric and interferometric characterization of coherent scatterers in urban areas. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(4), 971-984.

Serco Italia SpA (2020). SNAP2StaMPS : Data preparation for StaMPS PSI processing with SNAP - Mexico City 2020 (version 1.1). Disponible sur <https://eo4society.esa.int/wp-content/uploads/2022/01/HAZA09_SNAP2StaMPS_MexicoCity_Tutorial.pdf>, Consulté le 06 mars 2024.

Zhu, W., Zhang, Q., Ding, X., Zhao, C., Yang, C., Qu, F., & Qu, W. (2014). Landslide monitoring by combining of CR-InSAR and GPS techniques. Advances in space research, 53(3), 430-439. Disponible sur <<https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.003>>

➤ Manuels utilisateur

Manual/TSX2StaMPS Version 2.1. TSX2StaMPS : Data preparation for StaMPS PSI processing of high-resolution TerraSAR-X data with SNAP. Disponible sur GitHub.

SARPROZ Manual. Version du 18 décembre 2023. Software Manual. Disponible sur le site de SARPROZ.

StaMPS/MTI Manual Version 4.1b. Disponible sur le site de l'université de Leeds.

TRAINING KIT – HAZA12. StaMPS : Persistent Scatterer Interferometry Processing Case Study : Mexico City, Nov. 2019 - Nov. 2020. Disponible sur le site de l'ESA.

➤ Sites web

InSAR AT A GLANCE. TRE-Altamira, [en ligne]. Disponible sur <<https://site.tre-altamira.com/insar/>> (consulté en avril 2024).

Matlab Online. Matlab. Disponible sur <<https://matlab.mathworks.com/>> (consulté en mars 2024).

SARPROZ Manual. SARPROZ [en ligne] Disponible sur <<https://www.sarproz.com/software-manual/>> (consulté en mars 2024).

SNAP-StaMPS-Visualizing. GitHub [en ligne] Disponible sur < <https://github.com/gjvanleeuwen/SNAP-StaMPS-Visualizing>> (consulté en mars 2024).

Step Forum. ESA [en ligne] Disponible sur < <https://forum.step.esa.int/> > (consulté en mars 2024).

Tech Blog : Novel Cube-Corner Retro-Reflector Increases Accuracy in Long Distance Measuring. Janvier 2017. TECH LAUNCH ARIZONA. (consulté en août 2024).

➤ Documents de formation

Simonetto. (2019). InSAR-DInSAR, cours et travaux pratiques. École Supérieure des Géomètres et Topographes - ESGT, Le Mans.

Thibault COLETTE. Entretien personnel. Mars 2024.

Liste des figures

Figure 1 : Mesure de déformation DInSAR [TRE ALTAMIRA].....	8
Figure 2 : Distribution des lignes de base temporelles et perpendiculaires de SBAS [Matlab].....	11
Figure 3 : Distribution des lignes de base temporelles et perpendiculaires de la méthode PSInSAR [Matlab].....	11
Figure 4 : Réflexion du signal incident par la surface d'un CR trièdre [Université de Arizona].....	13
Figure 5 : Modèle de CR multi-passe 3D intégré à antenne GNSS [Nahli et al, 2020].....	16
Figure 6 : Emplacement des CR sur le pont du Wadi Leban [Abdeljalil].....	17
Figure 7 : Localisation approximative des CR sur le pont de Sèvres [Abdeljalil].....	18
Figure 8 : Vue complète de la zone d'étude illustrée par les 3 fauchées S1 [SNAP].....	20
Figure 9 : Réponse d'un CR sans bruit [Groot et al., 1994].....	21
Figure 10 : Recherche du CR intégré au GPS4 [SNAP].....	21
Figure 11 : Tracés des profils d'intensité [SNAP].....	22
Figure 12 : Recherche du CR intégré au GPS2 [SNAP].....	22
Figure 13 : Image d'intensité à gauche et image de phase à droite [SNAP].....	25
Figure 14 : Graphiques XML du traitement snap2stamps [SNAP].....	25
Figure 15 : Image de phase enroulée [Matlab].....	29
Figure 16 : Image de phase déroulée [Matlab].....	29
Figure 17 : Flux de travail du traitement.....	31
Figure 18 : Connexion entre l'image maitresse et les images esclaves [SARPROZ].....	32
Figure 19 : GCP localisé sur la carte de réflectivité [SARPROZ].....	32
Figure 20 : Interface du plugin [QGIS].....	34
Figure 21 : Vitesses de déplacement dans les zones d'étude, Pont du Wadi Leban (gauche) et Pont de Sèvres (droite) [Matlab].....	35
Figure 22 : Évaluation de la correspondance des PS comme CR [QGIS].....	36
Figure 23 : Répartition des PS dans la zone d'installation des CR [QGIS].....	37
Figure 24 : Comparaison géométrique des deux outils [QGIS].....	38
Figure 25 : Séries temporelles des PS détectés sur le pont de Sèvres [Plugin InSAR Time Series Analysis].....	39

Liste des tableaux

Tableau 1 : Coordonnées géographiques des GPS.....	18
Tableau 2 : Données SAR utilisées dans ce travail.....	19
Tableau 3: Descriptifs des paramètres clés du traitement.....	27
Tableau 4 : Paramétrage des différents tests effectués sur le Pont de Sèvres	30

Comparaison de deux chaînes de traitement InSAR et analyse des résultats.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Paris 1992

RESUME

L'application de la méthode PSInSAR couplée à l'installation de coins réflecteurs permet de détecter les diffuseurs permanents sur des infrastructures civiles. Cette méthode a été testée sur le Pont de Sèvres et le Pont du Wadi Leban.

En utilisant des images SAR en bande X, les CR installés sur le Pont du Wadi Leban ont été identifiés, bien que des décalages entre les localisations des PS et les positions GPS des CR aient été observés, nécessitant une validation supplémentaire. En outre, l'analyse du Pont de Sèvres, malgré l'indisponibilité de données avant l'installation des CR, a permis de démontrer l'efficacité des paramètres de traitement StaMPS mis en place, avec la détection des PS superposés aux emplacements CR. Par ailleurs, l'utilisation de la bande C a montré la cohérence entre SARPROZ et StaMPS, nous permettant donc d'étendre cette cohérence à la bande X.

Mots clés: Coins réflecteurs, PSInSAR, StaMPS, SARPROZ, bande X, bande C, Surveillance des ponts.

SUMMARY

The application of the PSInSAR method with corner reflector installation makes it possible to detect Persistent scatterer on civils infrastructures. This method was tested on the Pont de Sèvres and Wadi Leban Bridge.

Using X-band SAR images, CRs installed on the Wadi Leban Bridge were identified, although offset between the locations of the PS and the GPS positions of the CRs were observed, requiring further validation. Moreover, the analysis of the Pont de Sèvres, despite the unavailability of data before CRs installation, demonstrated the effectiveness of StaMPS processing parameters implemented, with the detection of PS overlapping the CR locations. Additionally, the utilization of the C-band data demonstrated consistency between SARPROZ and StaMPS, allowing us to extend this coherence to the X-band data.

Key words: Corner reflector, PSInSAR, StaMPS, SARPROZ, X-band, C-band, Bridges Monitoring.