



HAL
open science

Mesure des déformations du sol par interférométrie radar : application à la sismotectonique de l'Iran

Marine Hubert-Brierre

► **To cite this version:**

Marine Hubert-Brierre. Mesure des déformations du sol par interférométrie radar : application à la sismotectonique de l'Iran. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2013. dumas-00941552

HAL Id: dumas-00941552

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00941552>

Submitted on 4 Feb 2014

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
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

Spécialité : Géomètre Topographe

par

Marine HUBERT-BRIERRE

Mesure des Déformations du Sol par Interférométrie Radar :

Application à la Sismotectonique de l'Iran.

Soutenu le 28 Juin 2013

JURY

PRESIDENTE : Mme Joëlle NICOLAS-DUROY

MEMBRES : M Rémi MICHEL - Maître de stage
M Laurent POLIDORI - Professeur référent
M Olivier BOUSQUET
M José CALI
M Mathieu SAVIGNAC

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers mon maître de stage, Rémi MICHEL, ingénieur chercheur en télédétection à l'ISTeP, pour m'avoir proposé ce sujet de TFE passionnant, pour sa grande disponibilité et sa gentillesse. Ces 5 mois au sein du laboratoire sont passés à une vitesse fulgurante et ce en grande partie grâce à lui. Je le remercie aussi de m'avoir fait découvrir et partager ses connaissances en InSAR.

Je remercie mon professeur référent, Laurent POLIDORI, directeur de l'ESGT, pour ses conseils concernant la rédaction de mon mémoire ainsi que de m'avoir donné goût à la télédétection.

Un grand merci à Raphaël GRANDIN, professeur chercheur à l'IPGP pour son aide à l'installation du logiciel interférométrique ROI_PAC et pour ses précieux conseils en InSAR.

Je remercie Bertrand MEYER et Michel SEBRIER, chercheurs en géologie à l'ISTeP, d'avoir suivi mon travail de recherche et pour m'avoir orienter dans l'analyse de mes résultats.

Je tiens à remercier toute l'équipe des stagiaires M2 au sein du laboratoire pour la bonne ambiance collective.

Enfin, une pensée particulière pour ma promotion ESGT 2013 ainsi que la promotion MF 2013 pour tous ces bons moments passés au Mans et au sein de l'école durant ces 3 dernières années.

Abréviations et Acronymes

ASAR: Advanced Synthetic Aperture Radar

DInSAR : Differential SAR Interferometry

ENVISAT : ENVironment SATellite

ESA : European Space Agency

ERS : European Remote-Sensing Satellite

GPS : Global Positioning System

InSAR : Interferometric Synthetic Aperture Radar

ISTeP : Institut des Sciences de la Terre de Paris

MERIS : Medium Resolution Imaging Spectrometer

MNT : Modèle Numérique de Terrain

RSO : Radar à Synthèse d'Ouverture (SAR en anglais)

SAR : Synthetic Aperture Radar

SRTM : Shuttle Radar Topography Mission

Formats ROI_PAC (Repeat Orbit Interferometry Package) :

- RAW : Format image brute
- SLC : Single Look Complex

Glossaire

Baseline : Distance équivalente séparant les satellites lors de l'acquisition d'un même point. Source d'un effet de type stéréoscopique.

Cohérence : En imagerie radar, valeur comprise entre 0 (décorrélation totale) et 1 (signaux parfaitement corrélés) décrivant les changements de rugosité équivalente du pixel (évolution de la figure dite de « speckle »). Meilleure est la cohérence plus faible est le bruit sur l'interférogramme (hors bruit corrélé, tel que le bruit atmosphérique).

Co-sismique, inter-sismique : Relatif respectivement aux déformations ayant lieu durant le séisme (essentiellement une discontinuité sur les failles) et entre les séismes (failles bloquées ou glissement sans propagation d'onde sismique).

Failles (décrochante, inverse, normale) : Zones planes sur lesquelles ont lieu les séismes et où ce produisent des glissements.

Frame : Numéro correspondant à l'emprise au sol de l'image satellite.

Interférogramme : Image utilisée en interférométrie qui représente la différence de phase de deux images radars.

Track : Projection de l'orbite du satellite sur la surface de la Terre, elle est définie par un numéro.

Table des matières

Remerciements	3
Abréviations et Acronymes	4
Glossaire.....	5
Table des matières.....	6
Introduction.....	8
Partie I : Contexte de l'étude.....	10
I.1 Présentation du laboratoire d'accueil.....	10
I.2 Évolution de l'environnement et déformation de la Terre.....	10
I.2.1 Exemples de déformations environnementales et terrestres.....	10
I.2.2 Gestion des risques.....	11
I.3 Déformations tectoniques.....	12
I.3.1 Contexte tectonique mondial	12
I.3.2 Contexte tectonique de l'Iran	13
I.3.3 Profil de vitesse de déformation de faille recherché.....	13
I.3.3 Zone d'étude.....	14
Partie II : Méthodes de mesures des déformations de la Terre.....	16
II.1 Introduction aux différentes méthodes	16
II.1.1 Le système GNSS.....	16
II.1.2 VLBI : Interférométrie à très longue base	16
II.1.3 Le système DORIS.....	17
II.2 La télédétection spatiale.....	17
II.2.1 Imagerie radar à synthèse d'ouverture.....	17
II.2.1.1 Introduction.....	17
II.2.1.2 Principe.....	17
II.2.1.3 Caractéristiques.....	18
II.2.2 Présentation des différents capteurs	20
II.2.2.1 ERS.....	20
II.2.2.2 ENVISAT.....	20
II.2.3 Application à l'interférométrie radar	21
II.2.3.1 Introduction.....	21
II.2.3.2 Principe de l'interférométrie différentielle radar	21
II.2.3.3 Composante orbitale.....	23
II.2.3.4 Composante topographique.....	23
II.2.3.5 Composante atmosphérique.....	24
II.2.3.6 Déroulement des franges.....	24
II.2.3.7 Domaines d'application de l'interférométrie radar.....	24
Partie III : Traitement des données.....	26
III.1 Acquisition des images radar.....	26
III.1.1 Démarche d'acquisition.....	26
III.1.2 Données utilisées.....	26
III.1.3 Explications.....	29
III.1.3.1 Critères.....	29

III.1.3.2 Répartitions spatiales et temporelles.....	29
III.2 Processus de Traitement sous ROI_PAC.....	30
III.2.1 Acquisition des images brutes.....	31
III.2.2 De la donnée brute à l'interférogramme déroulé et géocodé.....	31
III.3 Correction du délai atmosphérique.....	35
III.3.1 Compensation tropostatique.....	35
III.3.2 Correction du délai « turbulent ».....	36
III.4 Tracé des profils.....	37
III.5 Synoptique de la procédure de traitement.....	38
Partie IV : Résultats et Analyse.....	39
IV.1 Interférogrammes différentiels calculés, Analyse préliminaire.....	39
IV.2 Les Profils Tectoniques, Mesure et Modèle.....	41
IV.2.1 Profil grande échelle 60°25' E.....	41
IV.2.2 Profils des failles.....	42
IV.2.4 Modélisation.....	45
IV.3 Estimation des déformations, Résultats tectoniques.....	46
IV.4 Discussion.....	47
Conclusion.....	49
Résumé.....	51
Bibliographie	55
Table des figures.....	58
Table des tableaux.....	59
Table des annexes.....	60

Introduction

Depuis quelques années, avec l'arrivée des nouvelles technologies, de nouvelles facettes du métier de géomètre sont apparues. Il s'agit de la Télédétection et des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), deux techniques qui se complètent. La télédétection spatiale et aéroportée permet de collecter des informations, souvent des images, de la surface de la Terre et de les traiter par la suite. Les SIG sont utilisés pour la gestion de ces données aériennes et spatiales et permettent de produire des cartes numériques. Ce mémoire aborde la télédétection spatiale et plus particulièrement les mesures de la déformation des sols. Les outils associés sont aujourd'hui utilisés dans de nombreux domaines notamment en aménagement du territoire, surveillance de l'environnement ou encore pour les Sciences de la Terre.

L'interférométrie d'images radar (InSAR) est une technique de télédétection spatiale développée à la fin des années 1980 par le JPL (Jet Propulsion Laboratory) aux Etats-Unis. Elle permet la production de Modèles Numériques de Terrain (MNT) et également la mesure des déformations des surfaces [Massonnet et al., 1988]. La mission SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) en 2000, a permis de produire un MNT d'une couverture mondiale de 80%, avec une résolution de 30 et 90 m et avec une précision altimétrique de 10 à 20 m [Polidori, 2007]. C'est un des résultats opérationnels majeur de l'InSAR. L'objectif de l'interférométrie radar différentielle (DInSAR) est de comparer deux images radars à synthèse d'ouverture (RSO) acquises à deux moments différents sur une même zone. Cette méthode géodésique est très utilisée dans le cas de l'analyse des déformations du sol et donc pour le suivi des événements géologiques, comme les séismes, l'écoulement des glaciers, les mouvements gravitaires et les risques naturels. En effet, elle permet dans certaines circonstances, de mesurer des mouvements de la croûte terrestre avec une précision de quelques millimètres seulement.

La Terre est en constante évolution, les déformations géologiques visibles à grande échelle en témoignent (chaînes de montagnes, tremblements de terre). Certaines zones du globe présentent une activité tectonique plus marquée que d'autres, l'Iran en fait partie. Ce pays est le lieu de nombreux séismes dévastateurs [Le Dortz, 2010]. Le dernier séisme important date du 17 Avril 2013 (magnitude M_w de 7.8 sur l'échelle de Richter). Ce phénomène naturel s'explique par la situation du pays à la convergence de deux plaques continentales, la plaque Arabe et la plaque Eurasienne. La technique DInSAR permet d'analyser des mouvements co-sismiques sur une échelle de temps restreinte ainsi que des déplacements inter-sismiques sur une dizaine d'année. Ces derniers sont mal contraints dans l'Est de l'Iran.

L'objectif de ce travail de fin d'étude consiste à déterminer la cinématique des failles de cette zone à partir d'images radars acquises par les satellites ERS et ENVISAT entre 1996 et 2010. L'Est

de l'Iran est une région qui se prête particulièrement bien à l'utilisation de l'interférométrie radar. En effet, les conditions climatiques arides conduisent à une très faible vitesse d'érosion des sols et donc du changement de la rugosité de la surface à l'échelle de la longueur d'onde du radar. On montre alors que le bruit sur les interférogrammes est faible. Par ailleurs, l'archive se compose d'images acquises sur une période exceptionnelle d'une dizaine d'années ce qui est favorable à l'estimation des faibles vitesses de déformations tectoniques et du besoin en précision, de l'ordre de quelques millimètre par an.

Enfin, des vitesses de déplacement déduites d'un réseau GPS [Vernant et al, 2004] sont par ailleurs disponibles sur notre zone d'étude. Il s'agit ici de confronter les mesures InSAR et GPS.

Ce TFE s'articule en 4 parties. Après avoir exposé le contexte d'étude, nous aborderons les techniques géodésiques pour la mesure des déformations de la Terre en traitant plus en détail l'interférométrie radar. La troisième partie portera à la fois sur les méthodes d'acquisition des données ainsi que sur les procédures de traitement suivies sur les logiciels suivants : ROI_PAC et ENVI/IDL. Nous exposerons les résultats obtenus dans une quatrième partie puis dresserons une analyse scientifique de ces derniers.

Partie I : Contexte de l'étude

I.1 Présentation du laboratoire d'accueil

Mon stage de fin d'étude s'est déroulé au sein de l'ISTeP (Institut des Sciences de la Terre de Paris). L'ISTeP a été créé en 2009 et dépend de l'UPMC (Université Pierre et Marie Curie) et du CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique).

Il s'articule autour de 6 équipes de recherche¹ :

- Biominéralisations et environnements sédimentaires
- Évolution et modélisation des bassins sédimentaires
- Lithosphère, processus profonds
- Magmas, minéraux matériaux
- Pétro-géochimie, volcanologie
- **Systèmes fracturés, Sismotectonique**

C'est au sein de cette dernière équipe que j'ai réalisé mon travail de fin d'étude pendant 5 mois de février à juin 2013. Son activité de recherche concerne l'analyse des déformations de la croûte terrestre. Ces analyses sont réalisées selon diverses méthodes : télédétection, analyse structurale, géomorphologie, paléosismologie, sismologie, GPS, InSAR, cinématique et modélisation numérique. L'objectif de mon stage est d'appliquer la télédétection aux mesures des faibles déformations du sol.

I.2 Évolution de l'environnement et déformation de la Terre

I.2.1 Exemples de déformations environnementales et terrestres

L'avènement de la géodésie et de la télédétection spatiale a permis d'améliorer sensiblement l'observation de notre planète ainsi que les mesures de déformation de l'environnement terrestre. Ces techniques sont aujourd'hui utilisées dans des domaines variés. Elles seront expliquées dans la partie II de ce mémoire.

Les applications de ces techniques d'observation sont diverses :

- Milieux naturels : occupation des sols et évolution, gestion des forêts, agriculture, etc...
- Sciences de la Terre : sismologie, glaciologie, volcanologie, etc...

¹ Ces informations sont extraites du site internet de l'ISTeP.

- Risques naturels : tempêtes, inondations, mouvements gravitaires, etc...

I.2.2 Gestion des risques

Les déformations tectoniques peuvent avoir des impacts très importants sur la population. On se souvient particulièrement du tremblement de terre de Haïti le 12 Janvier 2010 ou encore de celui de Sumatra du 26 Décembre 2004 aux conséquences dévastatrices.

Afin d'intervenir au mieux suite à une catastrophe naturelle (tremblement de terre, inondation, feux de forêts, etc.), la Charte Internationale « Espaces et Catastrophes Majeures » a été créée en Juillet 1999 par l'agence spatiale Européenne (ESA) et l'agence spatiale française (CNES). D'autres agences spatiales sont devenues membres depuis 2000 ce qui permet de mettre à disposition de la charte un grand nombre de satellites. Le but de cette charte est de fournir une cartographie de la zone d'impact permettant de contribuer à l'organisation des opérations de secours.

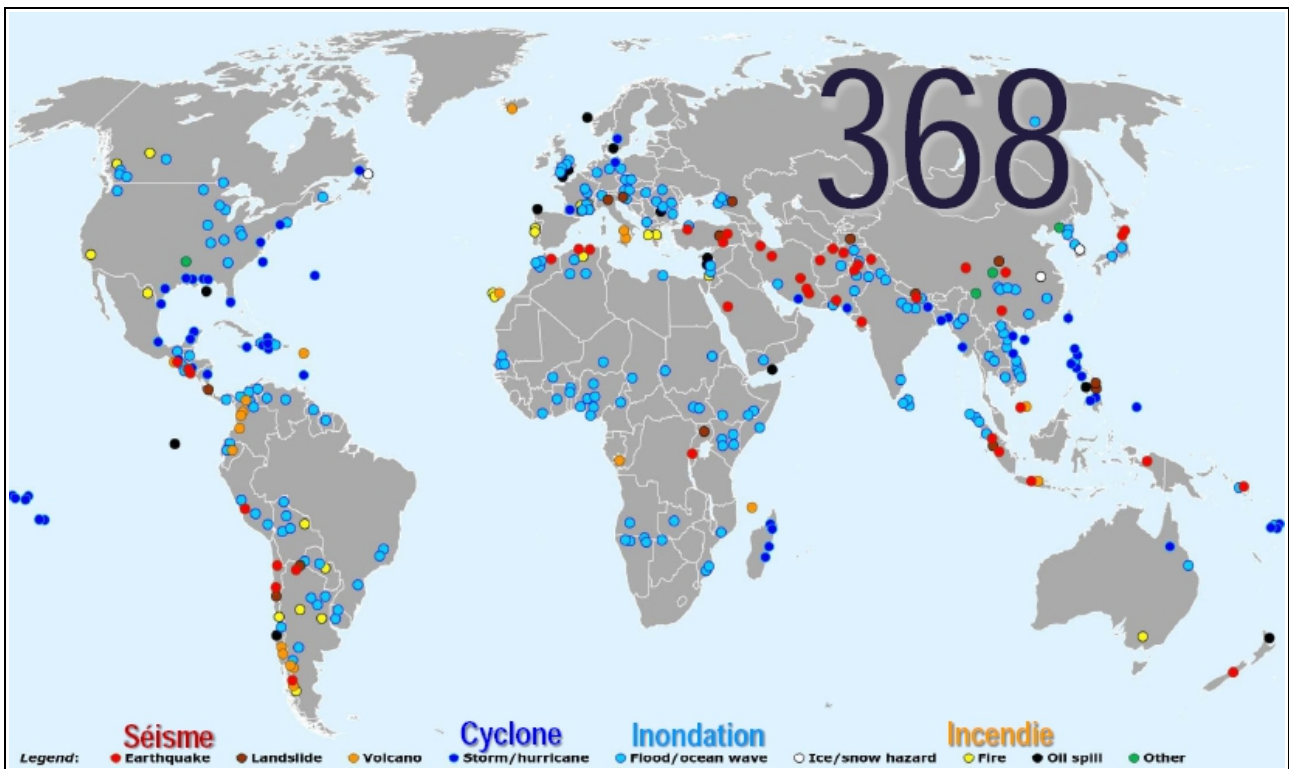


Figure 1. Les 368 applications de la Charte Internationale dans le monde entre 2000 et 2013. Les zones d'applications sont répertoriées selon le type de catastrophe naturelle. En Iran, la charte a été activée 5 fois pour cause de séisme. Les inondations constituent le désastre le plus fréquent. (Source : Cours de A. Cazenave, collège de France, 2013)

I.3 Déformations tectoniques

I.3.1 Contexte tectonique mondial

La théorie de la « dérive des continents est introduite » en 1912 par Wegener, on parle aujourd'hui de tectonique des plaques. L'écorce terrestre est constituée de plusieurs plaques qui « dérivent » à la surface de la terre. Ce phénomène géologique est dû au mouvement de convection du manteau terrestre. Les zones frontalières entre deux plaques sont des zones d'étirement ou de compression, elles sont sujettes à des activités tectoniques (séismes, volcanisme, chaînes de montagne...).

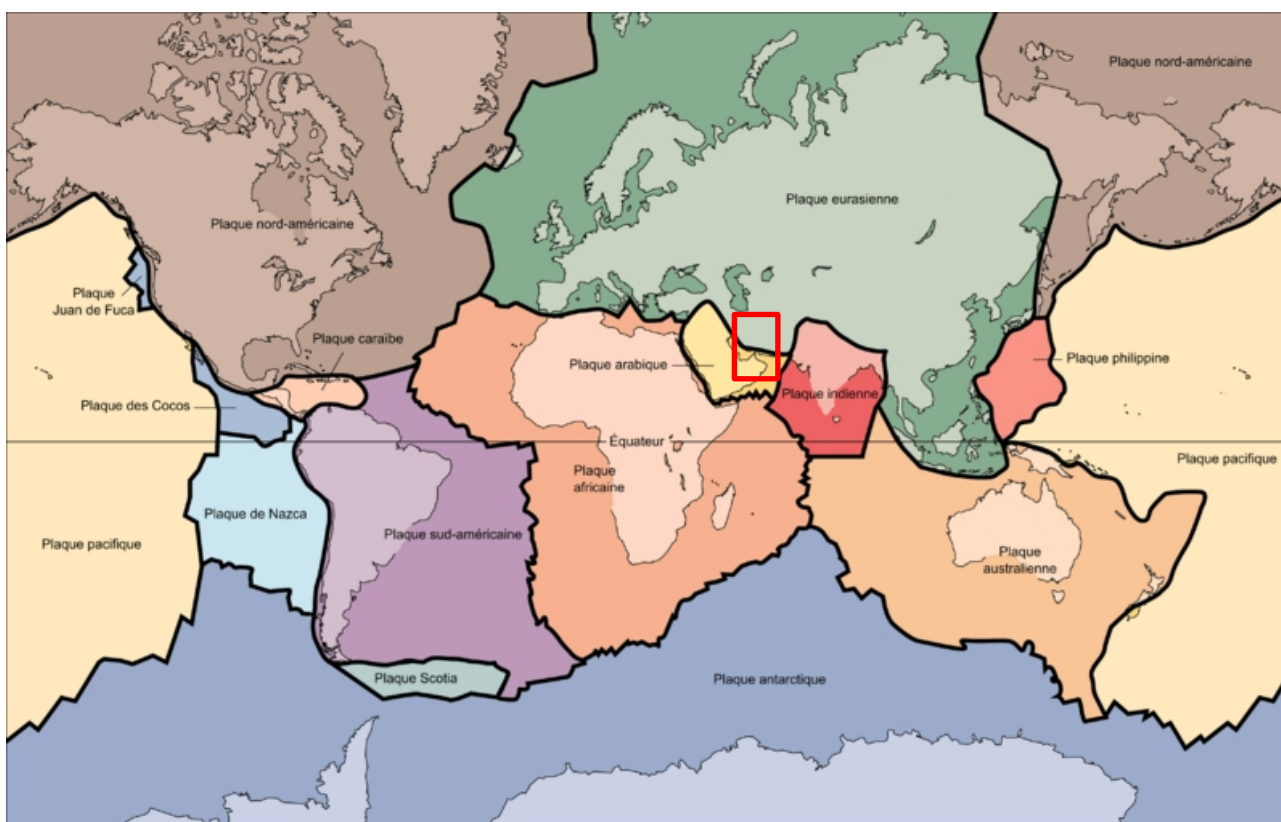


Figure 2. Carte des différentes plaques tectoniques. L'encadré rouge représente la situation de notre zone d'étude : la plaque jaune est la plaque Arabique et la plaque verte la plaque Eurasienne. (Source : *affinitiz.net*)

Avant l'arrivée des techniques géodésiques (géodésie et télédétection spatiale), seules les observations géologiques permettaient de mesurer les déplacements des plaques continentales. Deux types de déformations tectoniques sont mesurables; les déformations co-sismiques (séismes) et les déformations inter-sismiques.

Dans le cas de notre étude, l'objectif consiste à mesurer des déformations inter-sismiques de l'Est de l'Iran sur une période d'une dizaine d'années (de Avril 1996 à Juillet 2010).

I.3.2 Contexte tectonique de l'Iran

L'Iran est une région du monde caractérisée par des formations montagneuses remarquables. Celles-ci résultent d'une situation à la convergence entre la plaque Eurasienne et la plaque Arabe (Figure 2). Le mouvement entre les deux plaques est d'environ 26 mm/an [Sella et al, 2002]. Des mesures géodésiques issues d'un réseau de 27 GPS donnent des informations sur le champ de déplacement actuel de l'Iran (plaque Eurasienne). Elles indiquent que celui-ci diffère à travers le pays [Vernant et al., 2004].

La tectonique active de l'Iran se caractérise par un décrochement dextre entre l'Iran Central (à l'Ouest) et le bloc Afghan (à l'Est) avec comme zone frontalière le désert du Lut [Walker et al., 2004]. Selon les observations du réseau GPS, la vitesse de déplacement d'un bloc par rapport à l'autre est de 16 mm/an [Vernant et al., 2004].

On distingue deux zones de failles majeures :

- La première se situe à l'Ouest du Lut et appartient au bloc central de l'Iran. La cinématique de ces failles est relativement faible (~ 2.5 mm/an).
- La deuxième zone borde le désert du Lut à l'Est et appartient au bloc Afghan. La cinématique de ces failles de l'Est est peu connue en comparaison à celle du bloc Central.

Afin d'être en accord avec les 16mm/an annoncés par le réseau GPS (Figure 4), la cinématique des failles de l'Est du désert du Lut doit avoisiner les 13.5 mm/an. Cependant, une campagne de mesure des vitesses de glissement de certaines de ces failles par méthode géologique [Le Dortz., et al 2007] indique que celles-ci sont relativement faibles ($\sim 3.75-10$ mm/an).

C'est ainsi un objectif de cette étude d'analyser l'apport de l'interférométrie d'images radar pour l'estimation des vitesses de déformations à l'Est du désert du Lut.

I.3.3 Profil de vitesse de déformation de faille recherché

Afin d'analyser les vitesses de glissement des failles du bloc Afghan, nous allons être amenés à tracer des profils en travers de celles-ci. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, la déformation ne résulte pas du glissement de la faille elle-même. En effet lors de déformations inter-sismiques, la faille est bloquée. Ce sont les deux blocs qui l'entourent qui se déforment de façon élastique [Le Dortz, 2010]. La vitesse de glissement augmente à mesure que l'on s'éloigne de la faille, elle est représentée par un profil qui suit une loi arctangente (Figure 3).

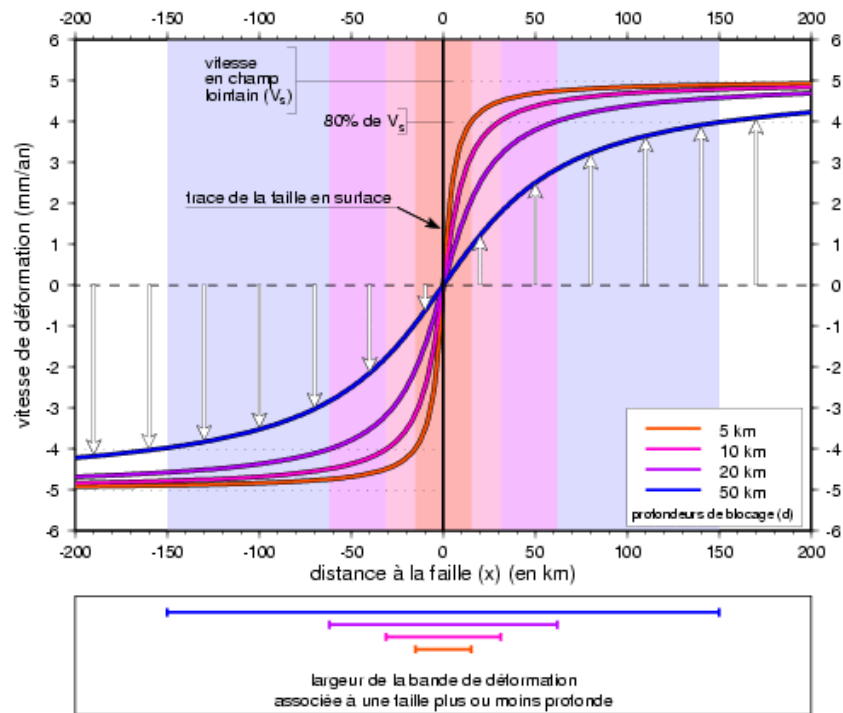
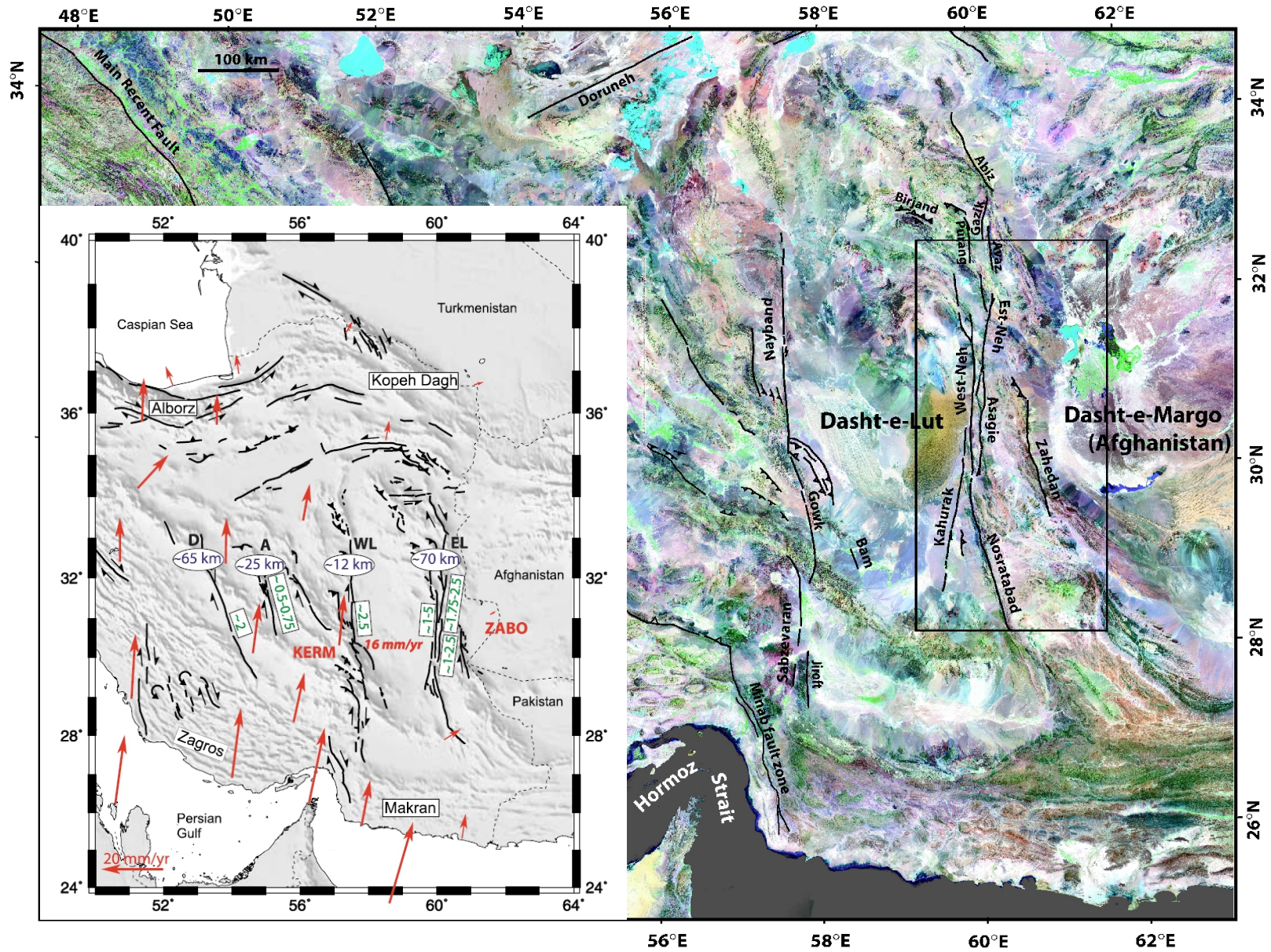


Figure 3. Profils de la vitesse de déformation en période inter-sismique. La vitesse de glissement dépend de la distance par rapport à la faille et de sa profondeur de blocage. Les profils suivent une loi arctangente. (Source : *geologie.ens.fr*)

I.3.3 Zone d'étude

Notre zone d'étude correspond à la seconde zone de faille qui borde la partie Est du désert du Lut. Elle se situe approximativement entre 28°N–33°N et 59°E–61°E (Figure 4). Ce sous-chapitre est illustré par une carte extraite d'un article scientifique [Le Dortz., et al 2007].

Figure 4. Carte de la tectonique de l'Iran. La zone d'étude est définie par le rectangle noir, elle correspond à la zone de failles située à l'Est du désert du Lut. La carte située à gauche représente le champ de déplacement de l'Iran (flèches rouges) issue du réseau GPS [Vernant et al., 2004]. Ce réseau indique une vitesse de décrochement dextre d'environ 16 mm/an entre l'Ouest et l'Est du désert du Lut (WL et EL). Les vitesses des failles mesurées par des méthodes géologiques sont indiquées en vert [Le Dortz., et al 2007]. Celles-ci sont faibles (quelques millimètres par an) et la somme des vitesses de WL et EL est différente des 16mm/an annoncés.



Partie II : Méthodes de mesures des déformations de la Terre

II.1 Introduction aux différentes méthodes

Cette introduction s'appuie sur le cours de géodésie de Laurent Morel d'ES2 (ESGT) ainsi que sur le cours d'Anny Cazenave « Déformations de la Terre mesurées depuis l'espace » (collège de France).

II.1.1 Le système GNSS

Le système de positionnement par satellite, a été mis en place par l'armée américaine au début des années 70. Il est aujourd'hui constitué de plusieurs systèmes mondiaux. Le plus connu et développé est le système américain GPS, vient ensuite le système russe GLONASS puis GALILEO, système européen mis en application depuis quelques années seulement. Son principe consiste à localiser précisément un point sur le terrain par analyse de signaux entre un récepteur terrestre et plusieurs satellites.

Le GNSS est utilisé pour des travaux d'aménagement de précision centimétrique mais aussi pour des missions scientifiques de géodésie (mise en place de systèmes de références) et de géophysique (sismologie...).

Il est à noter ici que des réseaux à grandes bases géométriques et continus temporellement sont exploités en tectonique sur certaines zones d'intérêt (Californie, Japon, Taiwan, etc.), ce qui permet d'estimer les vitesses de déformation avec une précision typique de quelques millimètres par an.

II.1.2 VLBI : Interférométrie à très longue base

Le VLBI est un réseau d'une trentaine de radiotélescopes distants de plusieurs milliers de kilomètres répartis sur la surface du globe. Cette technique de géodésie spatiale consiste à mesurer de manière simultanée le signal périodique émis par un quasar (astre). Le décalage de phase entre les signaux reçus à deux stations peut être mesuré avec une précision sub-centimétrique. Le premier mouvement tectonique a été mesuré dans les années 80, c'est la première technique spatiale à mesurer ce type de déformation. VLBI permet aussi de déterminer la rotation de la Terre dans l'espace.

II.1.3 Le système DORIS

DORIS exploite la mesure de l'effet Doppler entre un émetteur au niveau d'une balise au sol et un récepteur embarqué dans un satellite. L'effet Doppler correspond à une variation de fréquence entre une fréquence émise et reçue. Cette variation dépend de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Elle permet de détecter des déformations terrestres (volcaniques, tectoniques, etc...). La principale application du système DORIS reste cependant l'orbitographie. Cette technique a été mise en place dans le début des années 90. Une cinquantaine de stations permanentes sont installées de façon homogènes à la surface du globe.

Les différents systèmes décrits ci-dessus offrent des séries de mesures temporelles denses mais sur un point en particulier. Depuis quelques années, l'interférométrie radar vient compléter ces techniques géodésiques car elle permet de mesurer des déformations terrestres sur une zone de 100 km sur 100 km.

II.2 La télédétection spatiale

Ce chapitre s'appuie sur les cours de télédétection et d'imagerie de Rémi Michel (UPMC) et Elisabeth Simonetto (ESGT).

II.2.1 Imagerie radar à synthèse d'ouverture

II.2.1.1 Introduction

Les premières données radars sont apparues au début du XX^e siècle pour le positionnement des navires. En 1951 [Elachi et al., 2006], le SLAR (side looking airborne radar ou radar à ouverture réelle) voit le jour pour des utilisations scientifiques et cartographiques. L'imagerie radar à synthèse d'ouverture ou imagerie RSO, (SAR en anglais) fait suite à cette technique. De part un traitement (la focalisation), les images SAR possèdent une meilleure résolution spatiale que les images radar issues du SLAR. De nombreuses missions ont contribué à l'essor de l'imagerie RSO. Le premier lancement a eu lieu en 1978, il s'agit de la mission satellite SEASAT (USA).

II.2.1.2 Principe

L'imagerie RSO est un système radar qui consiste à :

- Émettre une impulsion micro-onde par une antenne d'un satellite ou d'un avion vers une cible,
- Réceptionner par l'antenne les échos rétrodiffusés,
- Enregistrer l'intensité de l'impulsion de retour (on parle de détection), cela permet de déduire les propriétés physiques de la cible.

- Mesurer le temps de vol aller-retour de l'impulsion. On en déduit la distance antenne/cible :

$$D = \frac{c * t}{2} \quad \text{avec } c : \text{vitesse de la lumière dans le vide} = 2,9979 * 10^8 \text{ m/s.}$$

Le radar est typiquement à visée latérale afin d'éviter la confusion entre échos très distants qui correspondraient un même temps de vol des impulsions (Figure 5). L'avantage du système RSO est qu'il fonctionne aussi bien de jour comme de nuit quelques soient les conditions météorologiques.

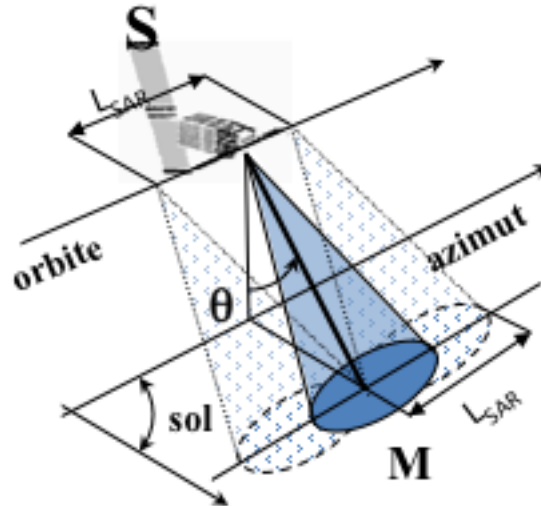


Figure 5. Schéma représentant la prise de vue d'une image SAR. L'angle de visée θ est l'angle entre la normale au sol passant par l'antenne et la direction de visée. Les colonnes de l'image constituent l'axe des distances antenne/cibles et les lignes l'axe azimutale. (Source : Cours de R. Michel, UPMC, 2013)

La donnée brute radar est issue d'un signal complexe. Elle est constituée d'une partie réelle et d'une partie imaginaire. Pour passer de la donnée brute à l'image radar complexe, un traitement est nécessaire, c'est la focalisation (cf II.2.2).

II.2.1.3 Caractéristiques

-La longueur d'onde

Il s'agit d'une longueur qui est égale au rapport de la célérité de la lumière dans le vide et de la fréquence de l'onde lumineuse. Elle est comprise dans le spectre type micro-onde entre 1mm et 1m. L'intervalle de fréquence est divisée de la façon suivante :

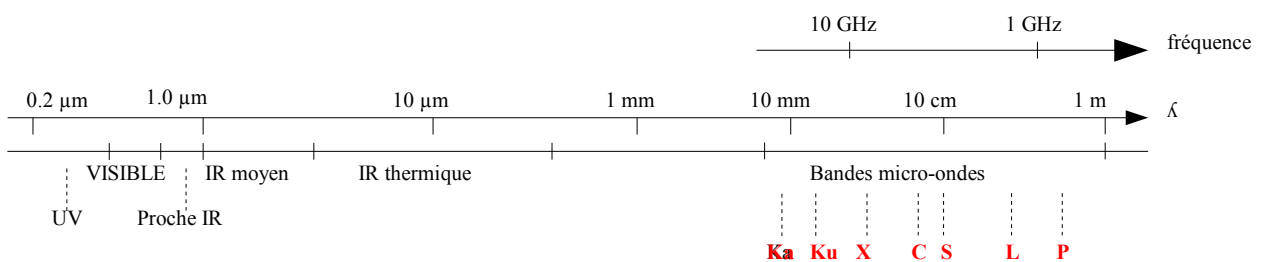


Figure 6a. Représentation des différents spectres. Les bandes du spectre micro-onde sont de couleur rouge, elles sont désignées par des lettres. (Source : Cours de R. Michel, UPMC, 2013)

Les ondes hyperfréquences les plus utilisées sont les bandes X, C et L car elles sont peu affectées par l'atmosphère. Elles sont plus ou moins sensibles à la rugosité de la surface, la bande L est moins sensible à la rugosité du sol que la bande X. Enfin les bandes aux longueurs d'ondes les plus élevées (L et P) ont une meilleure pénétration dans certains milieux (végétation, sable...). Plus la longueur d'onde est grande et plus faible est la décorrélation temporelle des signaux radars.

-La polarisation

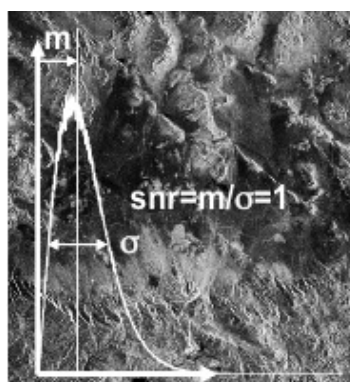
L'onde radar émise est polarisée horizontalement (H) ou verticalement (V) c'est à dire respectivement parallèle ou verticale à sa trajectoire. L'onde radar réfléchi est dépolarisée en deux composantes H et V. La polarisation d'un radar se caractérise par deux lettres. La première correspond à l'onde émise et la deuxième à la composante mesurée de l'onde réfléchi.

- Radars HH et VV : radars copolaires
- Radars HV et VH : radars contrapolaires
- Radars HH, VV, HV et VH : radars polarimétriques, ils fournissent les 4 composantes.

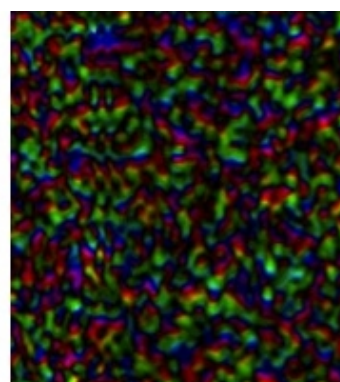
La Figure 6b présente les caractéristiques importantes des images radars pour notre sujet. L'équation de l'image $a(M)$ pour un point M du sol est de la forme :

$$a(M) = \rho(M) \cdot \exp\left(j \frac{4\pi[SM]}{\lambda}\right) \cdot \exp(j\phi(M))$$

Le terme d'amplitude ρ dépend de la signature radar du sol. Parmi les éléments intéressant le géologue, l'amplitude permet de distinguer les pentes du relief et les surface d'eau sont de faible amplitude. Le terme de phase inclus l'information quant à la distance entre le sol et le satellite $[SM]$ mais également un terme « aléatoire » ϕ , ou speckle causé par la diffusion de l'onde par le pixel rugueux à l'échelle de la longueur d'onde. Ainsi, la phase d'une seule image n'est pas exploitable. C'est alors l'intérêt d'utiliser plusieurs images, par **interférométrie**.



Amplitude et histogramme



Phase $[-\pi, \pi]$



Figure 6b. Bilan d'une image radar. L'image comporte un terme d'amplitude, caractéristique des éléments de la scène et un terme de phase. La phase d'une seule image présente un speckle caractéristique de l'interaction entre l'onde radar et la rugosité du pixel, elle est ici représentée par une variable aléatoire uniforme sur $[-\pi, \pi]$, le speckle est dit pleinement développé. (Source : Cours de R. Michel, UPMC, 2013)

II.2.2 Présentation des différents capteurs

Ce travail de recherche a nécessité des données provenant des satellites ERS-1, ERS-2 et ENVISAT. Les informations concernant ces satellites ont été recueillies sur le site de l'Agence Spatiale Européenne.

II.2.2.1 ERS

ERS-1 et ERS-2 (Figure 7) sont deux satellites de l'ESA lancés respectivement sur la même orbite en 1991 et en 1995. Cette même orbite est très utile pour l'interférométrie radar. En effet, une image d'un couple interférométrique peut être acquise par ERS-1 et l'autre par ERS-2. Les deux satellites sont quasi-similaires. Ils embarquent chacun un capteur SAR (Synthetic Aperture Radar), permettant d'observer la surface de la Terre, ainsi que d'autres instruments pour la mesure de la surface des océans. ERS-2 comporte un capteur en plus par rapport à ERS-1 pour la surveillance de la couche d'ozone. Dans notre étude, nous nous intéresserons aux données SAR. La mission d'ERS-1 s'est achevée en Mars 2000 et celle d'ERS-2 en Septembre 2011.

Dimensions	12*12*2.5m
Type d'orbite	Quasi-polaire
Altitude	780 km
Inclinaison	98,52°
Cycle orbital	35 jours
λ capteur SAR	5,66 cm (bande C)
Polarisation	VV
Taille antenne	10*1m
Couverture	100*100 km



Figure 7. ERS (Source : ESA)

Tableau 1. Description du capteur ERS

II.2.2.2 ENVISAT

Le satellite environnemental ENVISAT (Figure 8) de l'ESA a été lancé en 2002 et succède à la mission ERS. Il a pour objectif d'assurer la continuité des missions des satellites ERS. Dans le cas d'ENVISAT, on parle de radar à synthèse d'ouverture avancé ASAR (utilisé dans notre étude). La différence entre ce satellite et ses prédécesseurs est indiquée dans son nom : une de ces missions principales concerne le suivi des changements environnementaux de la Terre.

ENVISAT contient aussi à son bord un spectromètre MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) dont l'objectif principal est de déterminer la couleur des océans. Dans notre cas, nous

utiliserons les données MERIS pour l'analyse des effets atmosphériques « turbulents » sur les interférogrammes².

Taille	26*10*5m
Type d'orbite	Quasi-polaire
Altitude	780 km
Inclinaison	98,55°
Cycle orbital	35 jours
λ capteur ASAR	5,66 cm (bande C)
Polarisation	VV ou HH
Taille antenne	10*1.3m

Tableau 2. Description du capteur ENVISAT



Figure 8. ENVISAT (Source : CNES)

II.2.3 Application à l'interférométrie radar

II.2.3.1 Introduction

L'interférométrie radar a été proposée pour la première fois par Graham [1974] et mis en application à la fin des années 1980 au JPL. Cette méthode consiste à former des MNT. Elle répond à un besoin grandissant de données topographiques.

L'interférométrie différentielle radar (DInSAR) est une technique géodésique apparue à la fin des années 80 [Gabriel., et al 1989]. Elle découle de l'InSAR mais consiste à mesurer le déplacement de la surface de la Terre et non la topographie. Ce sont plus précisément les déplacements suivant l'axe sol-satellite qui sont détectés. L'amplitude de ces derniers varie de quelques millimètres à quelques mètres par an dans le cas de la tectonique [Simonetto et al., 2008].

Pour récupérer le signal de déformation, plusieurs étapes de traitement sont nécessaires. Ces étapes sont décrites de manière théorique dans ce chapitre, elles seront traitées de manière logistique dans le prochain chapitre.

II.2.3.2 Principe de l'interférométrie différentielle radar

Le principe DInSAR s'appuie sur celui de l'InSAR. Il consiste à former un interférogramme, image issue du produit conjugué entre une image maître et une image esclave recalée.

$$\begin{array}{l}
 \text{Image maître: } I_1 = A_1 e^{j\Phi_1} \\
 \text{Image esclave recalée: } I_2 = A_2 e^{j\Phi_2}
 \end{array}
 \longrightarrow
 \text{Interférogramme: } I_1 I_2^* = A_1 A_2 e^{j(\Phi_1 - \Phi_2)}$$

² La correction des effets atmosphériques turbulents est expliquée au chapitre III.3.2.

En interférométrie radar, c'est la phase qui est essentiellement exploitée. La phase interférométrique est la différence de phase entre deux échos radars émis à deux instants différents. L'interférogramme se présente sous la forme d'un réseau de franges, chaque frange représentant une variation de la phase de 2π . Une frange est codée par une table de couleur (Figure 9). La variation de phase correspond à un déplacement dans la direction du satellite (LOS) de $\lambda/2$, λ étant la longueur d'onde de l'onde radar (5.6 cm en bande C pour les satellites ERS et ENVISAT). La phase varie donc de 0 à 2.8 cm.

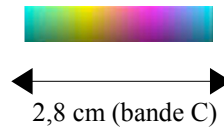


Figure 9. Échelle de couleurs représentant une frange.

Les variations de phase résultent de plusieurs facteurs : la différence de trajet, les artefacts atmosphériques et le bruit.

La différence de phase ou phase interférométrique notée $\Delta \Phi$, correspond à la différence de phase entre l'image maître (image de référence) et l'image esclave. L'image esclave doit être recalée précisément pixel à pixel sur l'image maître au préalable.

$$\Delta \Phi = \Phi_{I_2} - \Phi_{I_1} = \Delta \Phi_{trajet} + \Delta \Phi_{atmo} + bruit [2 \Pi]$$

$$\square \Delta \Phi_{trajet} = \frac{4 \Pi}{\lambda} (r_2 - r_1)$$

$$\Delta \Phi_{trajet} = \Delta \Phi_{orb} + \Delta \Phi_{topo} + \Delta \Phi_{déf} [2 \Pi]$$

- avec : $\Delta \Phi_{orb}$: Variation de phase orbitale
 $\Delta \Phi_{topo}$: Variation de phase topographique
 $\Delta \Phi_{déf}$: Variation de phase de déformation
 $\Delta \Phi_{atmo}$: Variation de phase atmosphérique

La déformation n'affectant que la deuxième image d'un couple, $\Delta \Phi$ y est très sensible.

$$\Delta \Phi_{déf} = \frac{4 \Pi}{\lambda} e \text{ où } e \text{ est la déformation.}$$

Ainsi, une frange représente une déformation de 2.8cm suivant la ligne de visée.

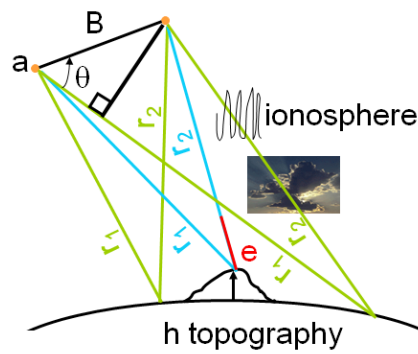


Figure 10. Principe de l'interférométrie différentielle. (Source: Cours de R. Michel, UPMC, 2013)

II.2.3.3 Composante orbitale

L'acquisition de deux images radars nécessite le passage d'un satellite à deux instants différents. La différence de phase orbitale correspond à l'écart de position du capteur entre les deux passages. Cet écart, que l'on nomme aussi baseline (B) (Figure 10), s'exprime en fonction de la baseline perpendiculaire B_{\perp} et de la baseline parallèle $B_{//}$. Ces franges se retirent de l'interférogramme car on connaît les orbites précises des satellites au moment des prises de vue. La phase orbitale se représente par des franges de « terrain plat ». On corrige l'interférogramme en enlevant ce terme. On obtient ainsi :

$$\Delta \Phi = \Delta \Phi_{topo} + \Delta \Phi_{déf} + \Delta \Phi_{atmo} + \text{bruit} [2 \Pi]$$

II.2.3.4 Composante topographique

Cette composante permet de calculer l'altitude des points terrains. Le contexte DInSAR consiste à la retirer de sorte à ne récupérer que le signal de déformation. Pour un effet de type stéréoscopique, cette composante varie d'autant plus que la baseline perpendiculaire est grande et lorsque les images sont acquises en bande C (notre cas). La contribution topographique éliminée est de la forme :

$$\Delta \Phi_{topo} = \frac{4 \Pi B_{\perp} h}{\lambda R \sin \theta}$$

avec :

θ : angle de visée

λ : longueur d'onde (m)

B_{\perp} : baseline perpendiculaire

h : altitude du point visé

R : distance Satellite/point visé au sol (range)

Après déduction de la composante topographique de l'interférogramme on obtient :

$$\Delta \Phi = \Delta \Phi \text{ déf} + \Delta \Phi \text{ atmo} + \text{bruit} [2 \Pi]$$

II.2.3.5 Composante atmosphérique

L'augmentation de l'indice de réfraction dans l'atmosphère engendre un ralentissement de la propagation des ondes radars. On parle de délai atmosphérique. Les conditions atmosphériques lors de l'acquisition des 2 images ne sont pas identiques ce qui provoque une variation du retard de délai de phase. Deux phénomènes atmosphériques quasi distincts engendrent un retard de délai de phase : la stratification de l'atmosphère, composante statique, et la turbulence atmosphérique, composante dynamique. Le premier dépend de plusieurs paramètres atmosphériques (vapeur d'eau, humidité de l'air et température). Plusieurs modèles permettent de corriger l'atmosphère stratifiée. Le phénomène de turbulence est pour le moment difficilement modélisable. Sa correction nécessite des données externes telles que des images météorologiques (MODIS, MERIS) ou des modèles météorologiques.

II.2.3.6 Déroulement des franges

Nous avons vu que le déphasage s'exprime suivant une valeur modulo 2π dans l'interférogramme. On dit que la phase est enroulée. Afin de restituer la mesure du déplacement du sol (la topographie dans le cas de l'InSAR), il est nécessaire de procéder au déroulement de la phase (Figure 11). Cette étape d'intégration consiste à déterminer pour chaque pixel le terme $2k\pi$, k correspondant au nombre de cycles d'une frange. Goldstein et al [1988], proposent une approche qui intègre la différence de phase de pixel à pixel, et qui permet d'éliminer des franges non exploitables. Ces franges n'apparaissent alors pas dans l'interférogramme déroulé et sont représentées par des régions « noires ». Ces zones correspondent à des endroits où la cohérence est faible. Plusieurs algorithmes ont été développés, mais il reste toujours quelques erreurs de déroulement de nos jours.

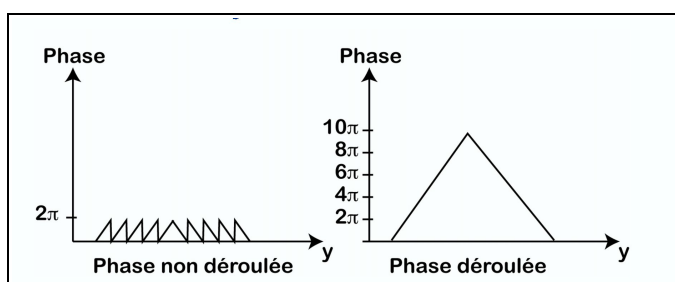


Figure 11. Représentation de la phase enroulée et déroulée. (Source : TD InSAR de R..Grandin, IPGP, 2013)

II.2.3.7 Domaines d'application de l'interférométrie radar

Les domaines d'application de la technique DInSAR sont nombreux. En voici quelques exemples :

-Sciences de la Terre

En sismologie, DInSAR permet de mesurer des déplacements co-sismiques et inter-sismiques. Le séisme de Landers en Californie le 28 Juin 1992 (magnitude 7.3 sur l'échelle de Richter) est le premier à avoir été modélisé par cette technique géodésique [Massonnet et al., 1993].

Les éruptions volcaniques ont des conséquences dramatiques et meurtrières sur l'environnement et la population. La déformation du sol est un signe précurseur d'une éruption volcanique. L'interférométrie différentielle peut détecter ce phénomène [Kasser et al., 1999] et peut ainsi limiter les conséquences volcaniques.

Enfin, la vitesse de déplacement des glaciers est aussi mesurable par DInSAR. Dans un contexte de préservation de l'environnement, cette application est très appréciable.

-Application en milieu urbain

Les interférogrammes sont plus faciles à interpréter en milieu urbain car la cohérence est bonne grâce aux bâtiments. On peut citer comme exemple d'application le suivi de la déformation du sol de la ville de Paris au niveau de la Gare St Lazare suite à la construction du RER E (Figure 12). Les travaux souterrains ont engendré un soulèvement du sol de 1.5 cm.

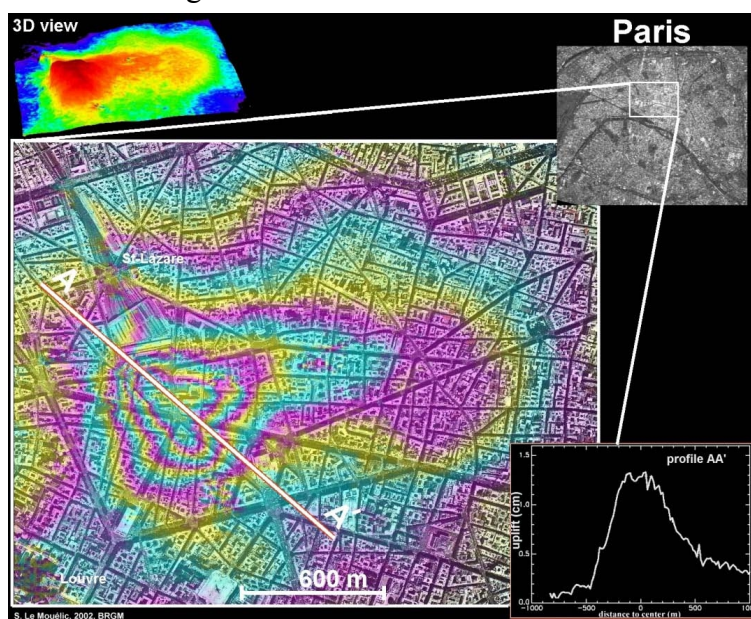


Figure 12. Déformations verticales sur une partie de la ville de Paris (gare Saint-Lazare) lors des travaux souterrains liés à la construction du RER E. La coupe AA' situe le soulèvement engendré. Une frange sur l'interférogramme correspond à un déplacement de 2.8 cm dans la ligne de visée du satellite. (Source : Cours de A. Cazenave, collège de France, 2013)

Partie III : Traitement des données

III.1 Acquisition des images radar

III.1.1 Démarche d'acquisition

L'ESA (Agence Spatiale Européenne), est la seconde agence spatiale dans le monde après la NASA. C'est par le biais de celle-ci que nous avons commandé des images satellites. Pour cela, il a avant tout fallu soumettre un projet scientifique et technique. Celui-ci s'intitule «Measuring of Tectonics Interseismic Deformation in Eastern Iran »³. Après approbation de l'ESA, nous disposons de 100 images ENVISAT, ERS et MERIS ainsi que de 20 ALOS⁴. Un rapport final de notre étude devra être fournie à l'agence spatiale.

L'accès au catalogue des produits de l'ESA se fait par la plateforme gratuite EOLI-SA. La banque de données est conséquente, elle est issue de plusieurs satellites (JERS, ERS, ENVISAT, ALOS, LANDSAT, Terra...). Seuls les produits ERS et ENVISAT ont été utilisés pour notre étude. La commande d'images a été effectuée par l'interface « SAR interferometric query » de EOLI-SA⁵. Celle-ci permet de fixer plusieurs critères non disponibles sur l'interface de base. Il s'agit du choix de la ligne de base perpendiculaire maximale ainsi que celui de la période de temps minimale entre deux dates d'acquisition. Ces critères seront détaillés dans ce chapitre (cf III.1.3.1).

III.1.2 Données utilisées

Un total de 57 images ont été commandées auprès de l'ESA :

- 28 images ERS
- 29 images ENVISAT

Toutes les images ont été acquises au moment de la phase descendante du satellite. Elles couvrent la zone de failles de l'Est du désert du Lut (Figure 12).

40 interférogrammes ont été formés :

- 16 interférogrammes ERS
- 24 interférogrammes ENVISAT

³ Le projet soumis à l'ESA se trouve en Annexe 1.

⁴ ALOS est un satellite japonais (capteur bande L). Nous n'avons pas utilisé ces images pour notre étude.

⁵ L'interface de EOLI-SA se trouve en Annexe 2.

Les images radar sont référencées par *track* et par *frame*. Le numéro de track correspond à l'orbite d'une zone visible par le satellite à un moment du cycle. La frame est le numéro correspondant à l'emprise au sol de l'image le long de la track. Une image radar couvre une zone d'environ 100 km sur 100 km.

Image maître	Image esclave	Capteur	Δt (jours)	B \perp (m)	Nombre de frames
03/04/93	15/04/96	ERS	1108	-6	1
16/04/96	06/04/99	ERS	1085	8	3
20/05/96	08/09/98	ERS	841	48	4
21/05/96	08/09/98	ERS	840	-23	4
05/05/96	10/10/04	ERS	3080	50	4
24/06/03	02/08/05	ENVISAT	770	-11	3
24/06/03	31/08/10	ENVISAT	2625	38	3
02/08/05	31/08/10	ENVISAT	1855	38	3
23/01/05	27/04/08	ENVISAT	1190	11	5
23/01/05	26/07/09	ENVISAT	1645	-50	5
12/06/05	27/04/08	ENVISAT	1050	-20	5

Tableau 3. Récapitulatif des données ERS et ENVISAT⁶ : La track 306 est en orange, la track 77 en bleu - le nombre de frames correspond au nombre d'emprises au sol pour lequel 1 couple d'images a été représenté sur une même track.

Remarque : L'interférogramme 03/04/1993-15/04/1996⁷ n'a pas pu être exploité car il montre des déformations du sol de plusieurs centimètres autour d'une faille. Il ne s'agit pas de déplacements inter-sismiques mais co-sismiques. Il s'agit de 3 séismes localisés à l'Est de l'Iran près de Sefidabeh en 1994 (Magnitude ~ 6 sur l'échelle de Richter), [Parsons et al., 2004].

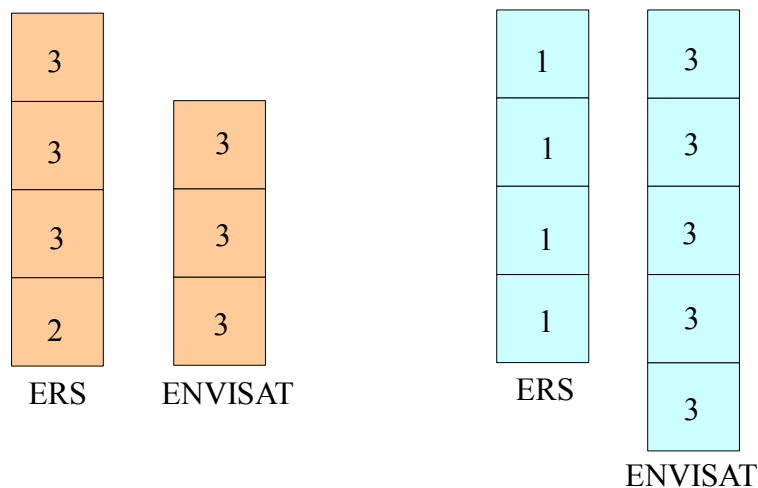


Figure 12. Schéma de la représentation spatiale des 39 interférogrammes exploitables issus de données ERS et ENVISAT. La track 306 est en orange la track 77 en bleu. Le nombre de carrés par track représente le nombre de frame. Les numéros inscrits dans chaque frame correspondent au nombre d'interférogrammes.

⁶ Les tableaux détaillés de toutes les données se trouvent en Annexe 3.

⁷ L'interférogramme 03/04/1993-15/04/1996 illustrant des déformations co-sismiques se trouve en Annexe 4.

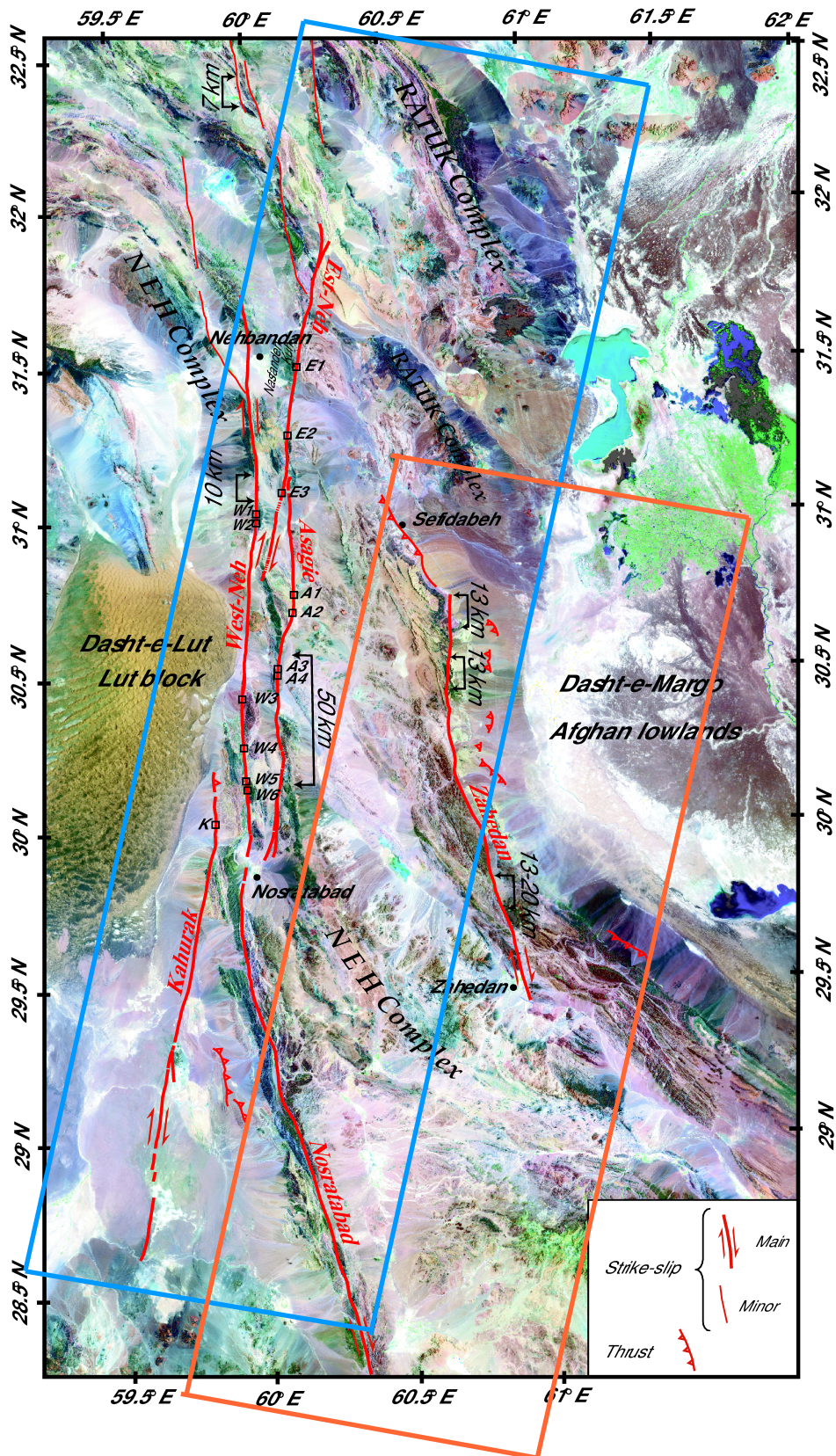


Figure 13. Carte des failles du bloc Est de l'Iran issue d'images Landsat. La plupart des failles sont décrochantes (coulissement), les autres sont de type inverse (compression). Les 2 tracks qui couvrent la zone de failles sont représentées : track 77 (bleu), track 306 (orange). (Source : Le Dortz., et al 2007)

III.1.3 Explications

III.1.3.1 Critères

Les couples d'images respectent 2 critères relatifs aux lignes de base perpendiculaire et temporelle.

La ligne de base perpendiculaire ou baseline, correspond au décalage entre les deux trajectoires des antennes radar. Plus on la minimise, plus l'influence de la composante topographique est faible, meilleure est la corrélation des signaux et donc plus la sensibilité au signal de déformation est importante. L'objectif de notre travail est de rechercher des déformations de l'ordre du millimètre, c'est pourquoi une baseline maximale de 50 m a été choisie. Les données acquises ont une baseline comprise entre 6m et 50m en valeur absolue. Une baseline de 20 m conduit, dans le cas des satellites considérés, à une frange sur l'interférogramme pour une variation de dénivelé de 500 m.

La ligne de base temporelle correspond à la période de temps séparant les dates d'acquisition des deux images. En période co-sismique (analyse d'une séisme), une ligne de base temporelle courte est préférable. Cependant, notre étude consiste à calculer des déformations inter-sismiques sur plusieurs années. Nous avons choisi une ligne de base temporelle minimale de 1 an. Pour notre étude, les périodes de temps entre deux images acquises au même endroit sont comprises entre 2 et 7 ans environ.

III.1.3.2 Répartitions spatiales et temporelles

Les images sont réparties sur deux séries spatiales :

- Track 77, de Mai 1996 à Juillet 2009
- Track 306, de Avril 1996 à Août 2010

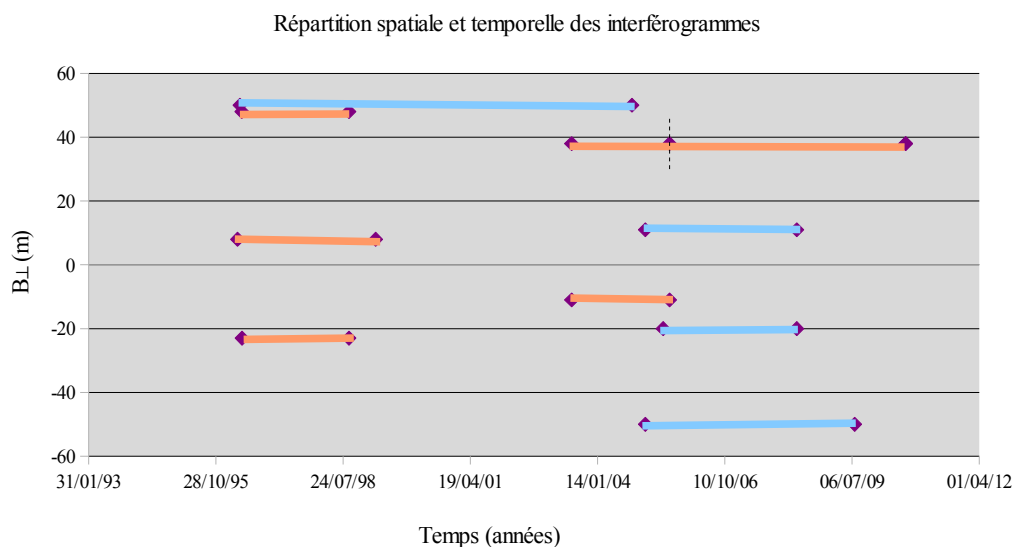


Figure 14. Répartition spatiale et temporelle des interférogrammes. Les interférogrammes oranges représentent la track 306, ceux de couleur bleu la track 77. Les interférogrammes avec une première date d'acquisition antérieure aux années 2000 sont issues de données ERS. Les autres, dont la première date d'acquisition est postérieure à 2000, sont issues de données ENVISAT. La période de temps de la track 77 s'étend sur environ 13 ans. La période de temps de la track 306 s'étend sur une période d'environ 14 ans mais de façon discontinue car nous ne disposons d'aucune image entre Novembre 1998 et Juillet 2003.

III.2 Processus de Traitement sous ROI_PAC

ROI_PAC (Repeat Orbit Interferometry Package) est un logiciel d'interférométrie open-source distribué par l'université de Caltech et le JPL en Californie aux États-Unis. Il utilise des données brutes radar des satellites ERS, ENVISAT et ALOS ainsi qu'un MNT afin de générer une carte de déplacement. Ce TFE a été l'occasion d'installer la dernière version de ROI_PAC, la 3.0.1 (Août 2009) au sein de l'ISTeP qui dispose maintenant d'une chaîne de traitement interférométrique. Ce chapitre expose les étapes de traitement du logiciel nécessaires à la formation d'un interférogramme différentiel⁸.

Contrairement à l'InSAR, le processus DInSAR consiste à mesurer le déplacement de la surface de la Terre et non la topographie. Pour récupérer ce signal de déformation, plusieurs étapes de traitement sont nécessaires. Celles-ci seront illustrées par le couple interférométrique ENVISAT 23/01/2005-27/04/2008 situé sur la track 77. Les images ont été acquises lors de la phase descendante du satellite.

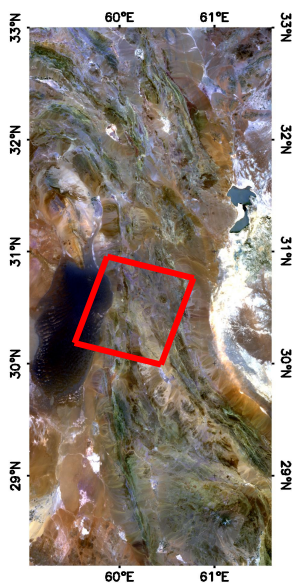


Figure 15 : Situation du couple interférométrique ENVISAT 23/01/2005-27/04/2008 (track 77, frame 2996). L'interférogramme à une emprise au sol de 100 km sur 100 km. L'image de fond est l'image MERIS acquise simultanément avec l'image radar 27/04/200.

⁸ Le schéma détaillé du processus se trouve en Annexe 4.

III.2.1 Acquisition des images brutes

Les données brutes ERS et ENVISAT commandées auprès de l'ESA, se présentent sous cette forme :

ASA_IM__0CNPDE20080427_060707_000000162068_00077_32195_9741.N1

- ASA_IMS_0C : Image ASAR au format brut (RAW) niveau 0 (SAR_IM__0 pour une image SAR ERS)
- 20080427 : date d'acquisition (27 Avril 2008)
- 060707 : heure d'acquisition (06:07:07 UTC)
- 000000162068 : durée d'acquisition 16 (secondes) 2 (phase) 068 (cycle)
- 00077 : Track (direction de l'orbite projetée au sol)
- 32195 : Orbite
- N1 : Satellite ENVISAT-1 (E1 pour satellite ERS1, E2 pour satellite ERS2)

Ces données ne sont pas directement exploitables sous ROI_PAC. La première étape consiste à convertir les fichiers de données fournies par l'ESA vers un format de données brutes (“*.raw*” pour l'image et “*.raw.rsc*” pour les métadonnées).

Cette étape nécessite de récupérer les orbites précises du satellite :

- ODR pour les ERS (calculées par l'université de Delft)
- DORIS pour les ENVISAT (calculées par l'ESA)

Les commandes qui permettent d'extraire les données et métadonnées sous ROI_PAC sont :

- « *make_raw_ers.pl* » pour les données ERS
- « *make_raw_envi.pl* » pour les données ENVISAT

III.2.2 De la donnée brute à l'interférogramme déroulé et géocodé

Les étapes suivantes sont réalisées par la commande « *process_2pass* ». Ce script s'exécute de la donnée brute jusqu'à l'interférogramme déroulé et géocodé.

-Focalisation des données : création de l'image radar synthétisée complexe (SLC)

En géométrie radar, les deux dimensions de l'image se nomment la portée (en horizontal) et l'azimut (en vertical). Le but de la focalisation est de créer l'image à partir des échos radars mesurés. La formation des deux image SLC se fait en deux étapes : la compression en portée et la compression en azimut.

-Corrélation

La corrélation des images d'amplitude radar consiste à recaler deux images SLC avec une précision sub-pixel de façon à pouvoir former l'interférogramme. En d'autres termes, la corrélation consiste à calculer le champ de distorsion entre l'image maître et l'image esclave. On choisit de définir l'image maître comme l'image la plus ancienne.

-Rééchantillonnage et calcul de l'interférogramme 1

Afin de calculer l'interférogramme, il faut rééchantillonner l'image SCL esclave pour qu'elle coïncide au mieux avec l'image SLC maître. Ce rééchantillonnage est possible grâce à une transformation affine calculée lors de l'étape de corrélation. Le calcul du premier interférogramme (Figure 16) est le résultat de la différence de phase entre les deux images SLC.

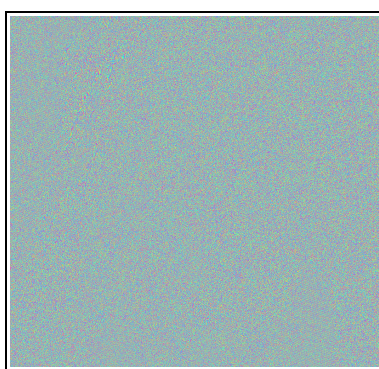


Figure 16. Interférogramme 1 en géométrie radar obtenu à partir d'images ENVISAT à l'Est de l'Iran. Cet interférogramme est à l'état brut. La phase est inexploitable. Elle représente à la fois les variations de position orbitale, les variations de topographie, le signal de déformation ainsi que les variations des effets atmosphériques entre les 2 acquisitions.

-Interférogramme aplati

Le premier terme à retirer sur l'interférogramme est le terme de «terrain plat» (Figure 17a). Il correspond à la différence de position orbitale des satellites (ligne de base perpendiculaire) au moment des deux instants d'acquisition. On obtient ainsi l'interférogramme aplati (Figure 17b).

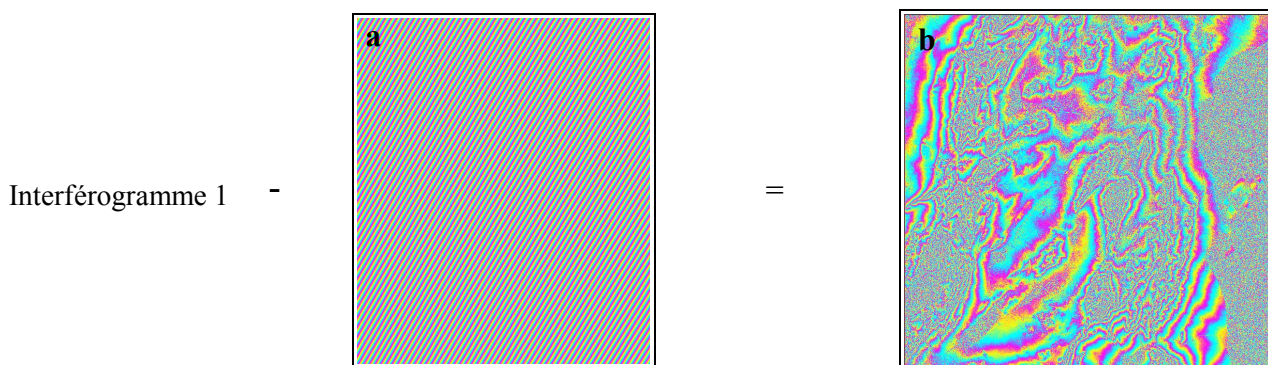


Figure 17. Création de l'interférogramme aplati en géométrie radar (Est de l'Iran). Il est le résultat de la différence entre l'interférogramme 1 et le signal de variation des positions orbitales (17a). Ce signal correspond à un effet de terrain plat, on parle de « rampe ». Les franges présentent sur l'interférogramme aplati (17b) représentent les variations topographiques, de déplacement, et atmosphériques.

-Interférogramme privé de la topographie

Cette étape consiste à retirer le signal dû à la topographie. Pour cela un MNT de l'emprise de l'interférogramme est nécessaire. Le MNT est d'abord projeté en géométrie radar. Une simulation de la phase interférométrique créée par la topographie est ensuite réalisée à partir du modèle de terrain. Le logiciel soustrait ensuite cette phase topographique à l'interférogramme aplati pour obtenir l'interférogramme privé de la composante topographique (Figure 18b).

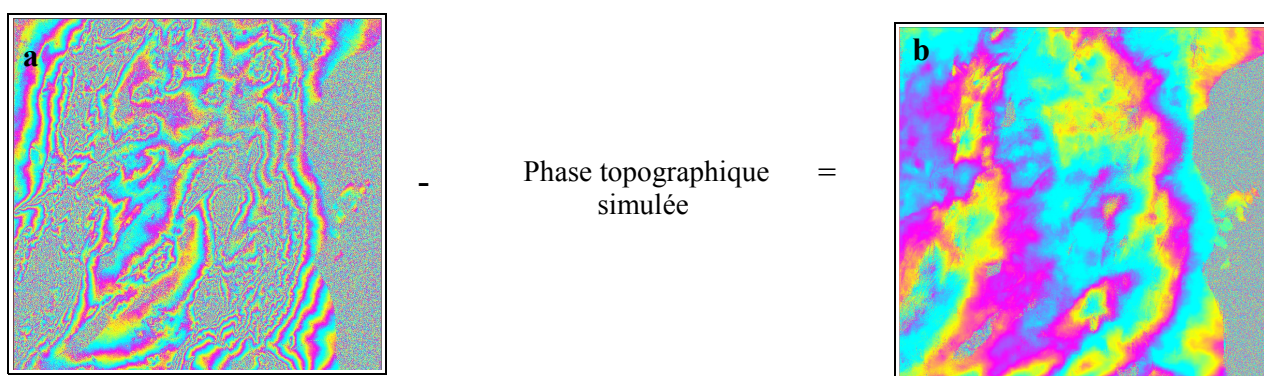


Figure 18. Création de l'interférogramme en géométrie radar privé de la topographie (18b) (Est de l'Iran). Il est le résultat de la différence entre l'interférogramme aplati (18a) et la simulation de la variation de phase topographique. A cette étape l'interférogramme est encore enroulé.

-Interférogramme déroulé et géocodé

L'étape de déroulement consiste à additionner toutes les phases entre elles. Le géocodage permet de passer d'un interférogramme en géométrie radar à un interférogramme géoréférencé dans le système de référence WGS84 (Figure 19).

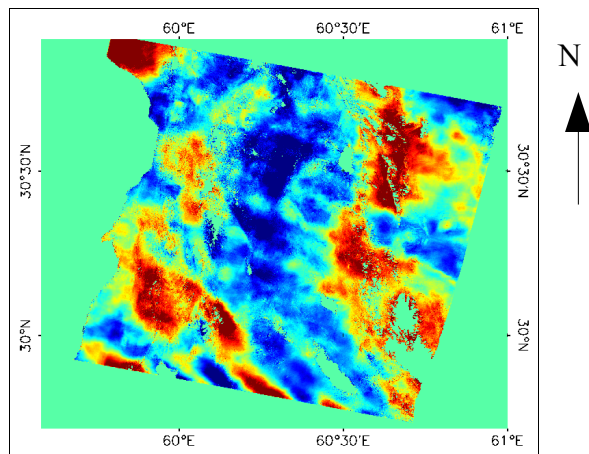


Figure 19. Création de l'interférogramme différentiel déroulé et géoréférencée (Est de l'Iran). Il reste encore la phase interférométrique due à l'atmosphère.

-Cohérence

La cohérence fournit un critère de fiabilité sur la qualité de l'interférogramme. Ses valeurs varient de 0 à 1 (du noir au blanc). Plus elle est proche de 1 plus la cohérence est élevée, elle signifie que les éléments entre les deux acquisitions sont stables. Au contraire plus elle est proche de 0, plus la figure de rugosité a changé et plus le bruit sur l'interférogramme est important.

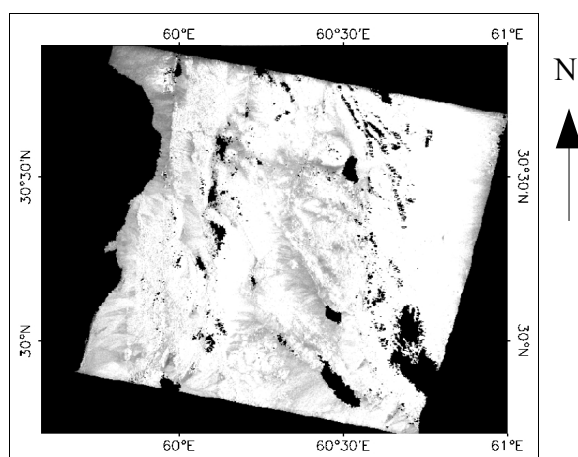


Figure 20. Carte de cohérence déroulée et géoréférencée (codage en niveau de gris sur [0,1]). Les zones non déroulées correspondent aux zones de très faible cohérence (en noir). L'espace non déroulé à l'Ouest représente le désert du Lut. Il est sujet à des vents importants, ce qui implique des mouvements des dunes de sable. Excepté le champ de dunes, la carte de cohérence est excellente car elle est majoritairement blanche (moyenne supérieure à 0.8). En effet, notre zone d'étude correspond à de grands espaces arides et désertiques dénués de végétation.

III.3 Correction du délai atmosphérique

Le délai atmosphérique peut provoquer une variation du délai de phase de quelques centimètres. Un nuage d'orage par exemple induit un déphasage d'environ trois franges soit 8 cm environ [Polidori, 1999]. Les déplacements co-sismiques sont souvent de l'ordre du mètre, ce qui couvre le bruit atmosphérique présent sur l'interférogramme. L'objectif de notre étude est de rechercher des déformations relativement faibles le long des failles. Il s'agit de déplacements millimétriques. Or, une frange mesure 28mm et peut résulter du délai atmosphérique. C'est pourquoi nous nous devons corriger les effets atmosphériques le mieux possible. Ces derniers sont de type tropostatique ou « turbulent ».

III.3.1 Compensation tropostatique

Le délai tropostatique est lié à la stratification de l'atmosphère. Il n'est donc pas le même suivant l'altitude du point. Notre zone d'étude présente un relief contrasté dû aux déformations tectoniques. Des écarts importants de près de 2000 m en altitude sont notables [Le Dortz, 2010]. Plus l'altitude augmente, moins le délai tropostatique est important. On dit qu'il est corrélé à la topographie.

Entre deux acquisitions, la pression, la température et la vapeur d'eau ne sont pas les mêmes dans l'atmosphère. On a donc une variation de phase du délai le plus long (point le plus bas) ainsi qu'une variation de phase du délai le plus court (point le plus haut). La différence de phase interférométrique due à l'atmosphère stratifiée correspond à la différence entre ces deux variations (Figure 21).

Pour notre étude, le script IDL « *comp_météo* » a été écrit par R. Michel. Il s'appuie sur un modèle polynomial et consiste à compenser un interférogramme des effets atmosphériques tropostatiques. Cette compensation nécessite un MNT superposé à l'image à compenser. Les 40 images ont été corrigées une à une. Cependant, le passage de ROI_PAC à ENVI/IDL a nécessité une conversion de format. Les métadonnées d'un fichier image de ROI_PAC sont de type .rsc et sous ENVI de type .hdr. Le script « *rsc2hdr* », écrit par R. Grandin⁹ a permis de passer d'un format à un autre.

⁹ R. Grandin est enseignant à l'Institut Physique du Globe de Paris (IPGP).

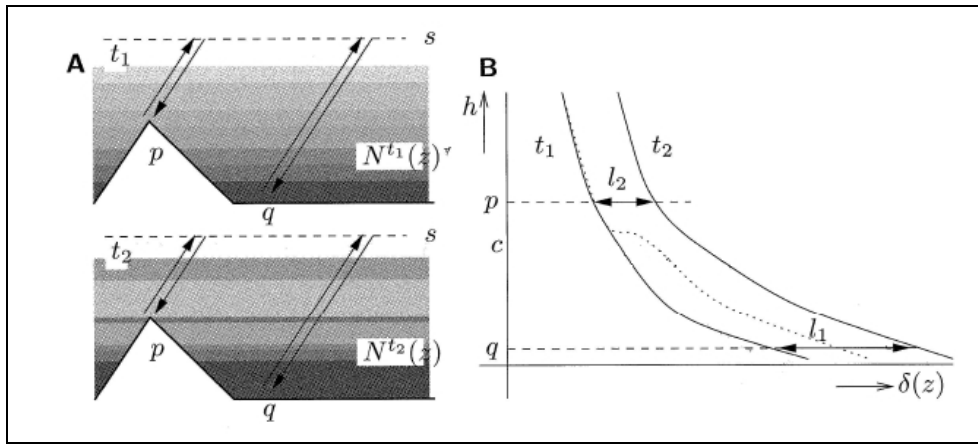


Figure 21. Représentation du délai tropostatique. (A)- Délais tropostatiques sur un point haut p et un point bas q à deux instants t_1 et t_2 . La composition de l'atmosphère stratifiée n'est pas la même aux deux instants. (B)- Courbe illustrant le délai de t_1 et t_2 en fonction de l'altitude. La différence de phase interférométrique correspond à la différence entre l_1 et l_2 . (Source : Cavalié, 2007).

III.3.2 Correction du délai « turbulent »

Le deuxième type d'artefacts atmosphériques qui peut engendrer une variation de phase est dû aux turbulences de l'atmosphère (nuages, orages...). Contrairement aux artefacts dus à l'atmosphère stratifiée, la turbulence affecte la zone indépendamment du relief. Elle engendre un retard de délai de phase de par un apport en vapeur d'eau. Deux méthodes permettent de réduire ce type de bruit.

La première, que nous utilisons pour notre étude, consiste à acquérir un grand nombre d'interférogrammes à des dates différentes. Les turbulences sont propres pour chaque image ce qui permet de les réduire par sommation d'interférogrammes [Wright et al., 2001]. Il faut cependant faire attention dans le cas où une image est utilisée pour plusieurs couples. Prenons l'exemple où une image se trouve dans deux interférogrammes. Cette étape se fait par l'utilisation du script IDL « moyenne_interfero ». Lorsque celle-ci est utilisée deux fois en tant que maître ou esclave, le bruit s'additionne. Au contraire si elle est utilisée en tant que maître dans le premier interférogramme et en tant qu'esclave dans le second, on perd l'information de l'image [Cavalié, 2013]. Nous possédons plusieurs images dans ces deux cas, c'est pourquoi une analyse du bruit issu de la turbulence atmosphérique a été effectuée.

La deuxième méthode consiste à utiliser des données externes issues d'instruments satellitaires. MODIS et MERIS sont deux spectromètres qui fournissent des indications sur la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Nous avons vu que l'instrument MERIS était embarqué dans le satellite ENVISAT. L'avantage est que les images MERIS sont acquises au même moment que l'image radar. Puységur et al., [2007] ont exploité cet intérêt afin de corriger au mieux les interférogrammes de la turbulence atmosphérique en intégrant les mesures de vapeur d'eau de MERIS dans des modèles météorologiques. Plusieurs images MERIS ont été acquises pour notre

étude mais cette méthode n'a pas pu être exploitée par faute de temps. Les données MERIS ont cependant été exploitées de façon à visualiser les dates à forte turbulence. Elles ont permis de discuter sur les images à enlever ou non pour la sommation des interférogrammes (cf IV.1).

III.4 Tracé des profils

Plusieurs profils ont été tracés sur les interférogrammes le long des failles de façon à évaluer leurs champs de déplacement (Tableau 4). Ils ont été réalisés sous ENVI/IDL à partir des scripts « slip_failles » et « visu_profil ». Ce dernier permet de visualiser le profil sur le MNT. Les scripts nécessitent de tracer manuellement la zone sur laquelle on désire obtenir un profil en travers au préalable sous ENVI.

Des profils en travers orthogonaux aux failles ont été tracés tous les 10 pixels (~0.8 km). Le profil obtenu est un stack de tous ces profils.

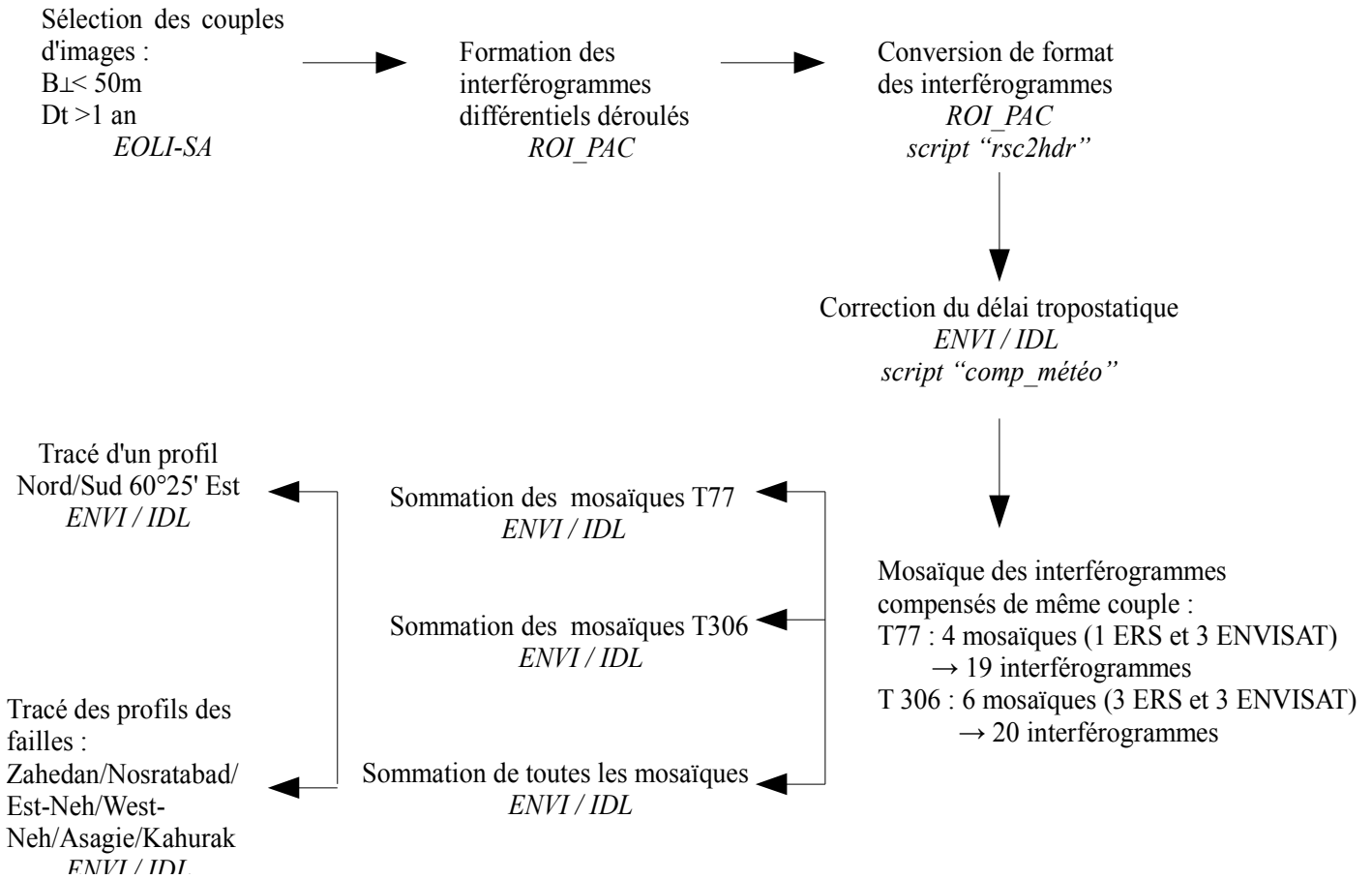
	60°25' Est	Zahedan	Nosratabad	Est-Neh	West-Neh	Asagie	Kahurak	a	b
Tracks 77 + 306 (ERS+ENVISAT)	1	14	26	29	32	35	38	41	42
Track 77 (ERS+ENVISAT)	2	15	27	30	33	36	39	-	-
Track 306 (ERS+ENVISAT)	3	16	28	31	34	37	40	-	-
16/04/1996_06/04/1999 (ERS)	4	17	-	-	-	-	-	-	-
20/05/1996_08/09/1998 (ERS)	5	18	-	-	-	-	-	-	-
21/05/1996_08/09/1998 (ERS)	6	19	-	-	-	-	-	-	-
24/06/2003_02/08/2005 (ENVISAT)	7	20	-	-	-	-	-	-	-
24/06/2003_31/08/2010 (ENVISAT)	8	-	-	-	-	-	-	-	-
02/08/2005_31/08/2010 (ENVISAT)	9	21	-	-	-	-	-	-	-
05/05/1996_10/10/2004 (ERS)	10	22	-	-	-	-	-	-	-
23/01/2005_27/04/2008 (ENVISAT)	11	23	-	-	-	-	-	-	-
23/01/2005_26/07/2009 (ENVISAT)	12	24	-	-	-	-	-	-	-
12/06/2005_27/04/2008 (ENVISAT)	13	25	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 4. Récapitulatif des profils en travers tracés. Les couples d'images oranges se situent sur la track 306, ceux en bleu sur la track 77.

Le profil majeur Nord/Sud (60°25' Est) épouse la zone de failles de l'Est du désert du Lut (Figure 23). Les autres profils en travers correspondent aux failles elles-mêmes. Dans ces dernières on trouve les failles majeures décrochantes (Figure 24) et deux petites failles inverses a et b (Figure 25).

Pour « 60°25' Est » et la faille « Zahedan », nous disposons des profils pour chaque couple d'images, pour chaque track, et pour tous les interférogrammes moyennés. Pour le reste des failles décrochantes, nous disposons de 3 profils en travers (track 77 + track 306, track 77, track 306). Enfin, pour les deux petites failles inverses, nous disposons d'un profil en travers (track 77 + track 306).

III.5 Synoptique de la procédure de traitement



Partie IV : Résultats et Analyse

IV.1 Interférogrammes différentiels calculés, Analyse préliminaire

Les interférogrammes obtenus sont présentés en Annexe 6. Voici les quatre sources de bruit principales :

- le résidu orbitographique, résultant de l'incertitude quant aux paramètres de vol du satellite,
- le bruit topographique, résultant de l'imprécision du Modèle Numérique de Terrain ,
- le bruit de décorrélation des images résultant des changements de la rugosité apparente des pixels
- les deux effets de l'atmosphère ; tropostatiques et turbulents.

Le bruit est typiquement inférieur à une frange sur notre scène. Le bruit concernant la valeur de la baseline est faible car les orbites utilisées sont connues avec une précision de l'ordre de 5 cm. On en déduit que le résidu orbitographique peut être modélisé par un polynôme d'ordre 2 au maximum avec une amplitude inférieure à typiquement une frange, soit 2-3 cm dans ce cas. Il est important de noter ici que les modèles tectoniques permettent de contraindre plutôt facilement les paramètres de ce polynôme.

Le bruit induit par les erreurs de compensation du Modèle Numérique de Terrain est négligeable dans notre étude. En effet, la base perpendiculaire est toujours très inférieure à 50 m et à pour valeur moyenne 20 m. L'altitude d'ambiguïté moyenne, c'est-à-dire la variation d'altitude conduisant à une frange (2.8 cm) sur l'interférogramme est dans ce contexte de l'ordre de 500 m, or le bruit RMS sur le MNT SRTM est de l'ordre de 10m ; on en déduit que le résidu de topographie est inférieur typiquement à 0.4 mm par mesure indépendante. Sous l'hypothèse réaliste d'un bruit blanc sur le MNT SRTM, ce résidu sera rendu tout à fait négligeable lors de l'analyse de profils moyennant des milliers de points le long des failles.

Le bruit de décorrélation des images est particulièrement faible. Les données sont en effet très cohérentes dans cette zone particulièrement aride. La cohérence moyenne est de 0.8 pour des images acquises avec cinq ans d'intervalle ce qui correspond à un bruit sur la phase d'environ 5° soit 0.7 mm. Certaines zones, dont bien entendu les zones de dunes (exemple du désert du Lut), sont fortement décorrélées. D'autres zones de petites extensions présentent des décorrélations saisonnières dues aux rares cultures locales.

Le bruit cohérent est essentiellement dû aux effets turbulents de l'atmosphère, qui n'est pas pris en compte par le filtre tropostatique. L'amplitude du bruit qui est d'environ 1 frange sur les

interférogrammes, a été fortement réduit lors de l'analyse qui consiste à déterminer des vitesses de déformation moyenne à l'échelle du système de faille. Les compensations des effets turbulents à l'aide de modèle météorologique dynamique restent à ce jour peut performantes à l'échelle de la précision requise par l'interférométrie [Puységur et al. 2007]. Nous avons exploité heuristiquement les données météorologique et les images MERIS afin d'analyser les images à retirer de notre catalogue. Il s'agit des images acquises lors de forts couverts nuageux. La figure 22 ci dessous illustre ce point :

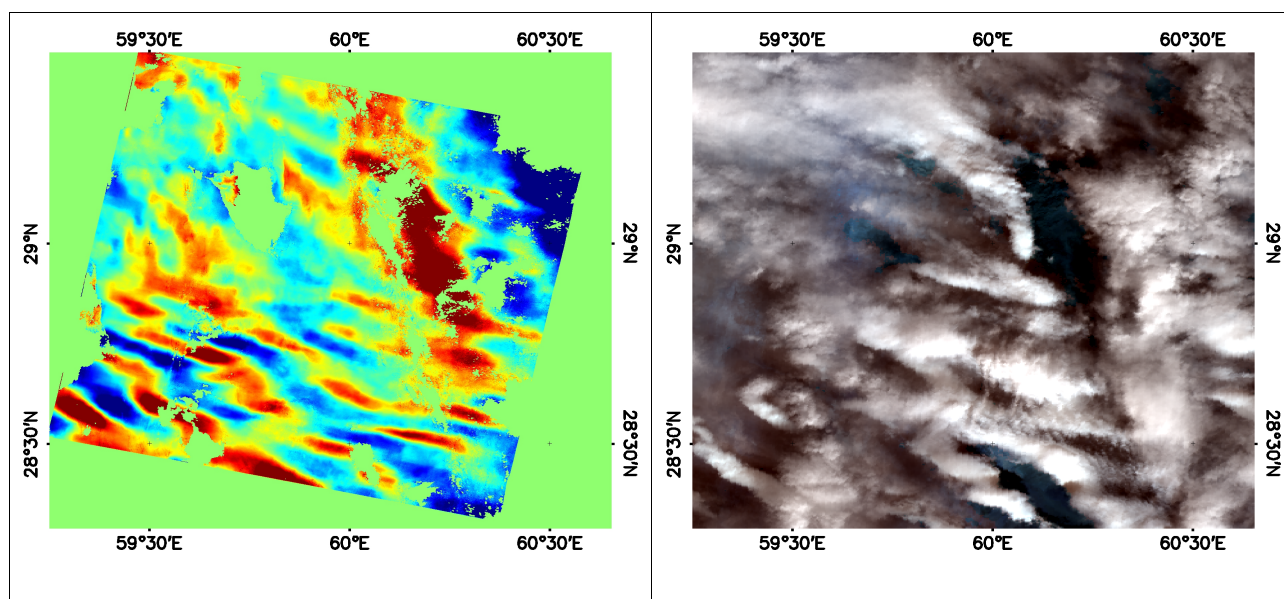


Figure 22. Corrélation entre couverture nuageuse et bruit de phase cohérent. a) Interférogramme différentiel (dates : 23/01/2005 et 27/04/2008, image ENVISAT : track 77/frame 3025). b) Image MERIS du 23/01/2005 (canal Infrarouge). La corrélation entre le bruit de phase et le couvert nuageux est évidente, l'amplitude du bruit sur l'interférogramme est d'environ 3cm maximum. Les données présentant un fort couvert nuageux ont été retirées manuellement de notre catalogue.

Nous pouvons conclure de cette analyse préliminaire que :

Nous sommes dans un cas exceptionnel pour la mesure des déformations tectoniques inter-sismiques car le bruit de décorrélation est l'un des plus faible rencontré à ce jour sur une série temporelle d'images satellites radars.

Il faudra vérifier sur les profils la corrélation entre l'estimation des déformations et le relief, pouvant résulter à la fois de la déformation tectonique mais surtout d'une corrélation entre la turbulence atmosphérique et les reliefs.

IV.2 Les Profils Tectoniques, Mesure et Modèle

Résultats majeurs de l'étude, nous présentons ici les profils tectoniques extraits des interférogrammes calculés. Un profil grande échelle, moyennant les mesures suivant une direction Nord/Sud, et considérant une faille moyenne située à une longitude de 60°25' est d'abord étudié. Nous présentons ensuite des profils obtenus pour chaque faille répertoriée de la scène.

IV.2.1 Profil grande échelle 60°25' E

Les résultats du profil Nord/Sud sont présentés ci-dessous sur la figure 23, la mesure est présentée en mm/an. L'extension du profil à grande échelle est de 200km, ce qui est compatible avec la mesure d'une déformation inter-sismique (Figure 25).

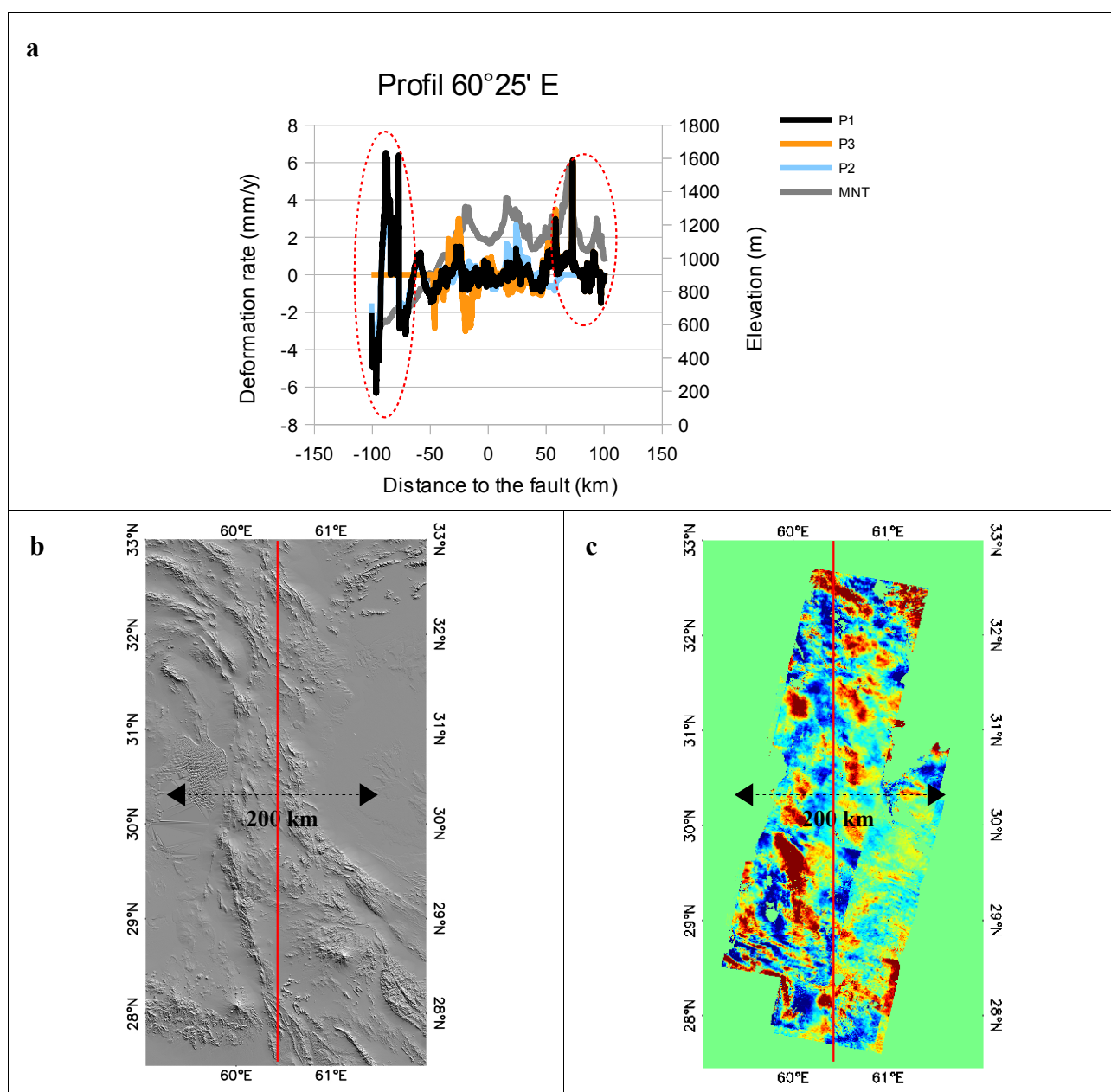
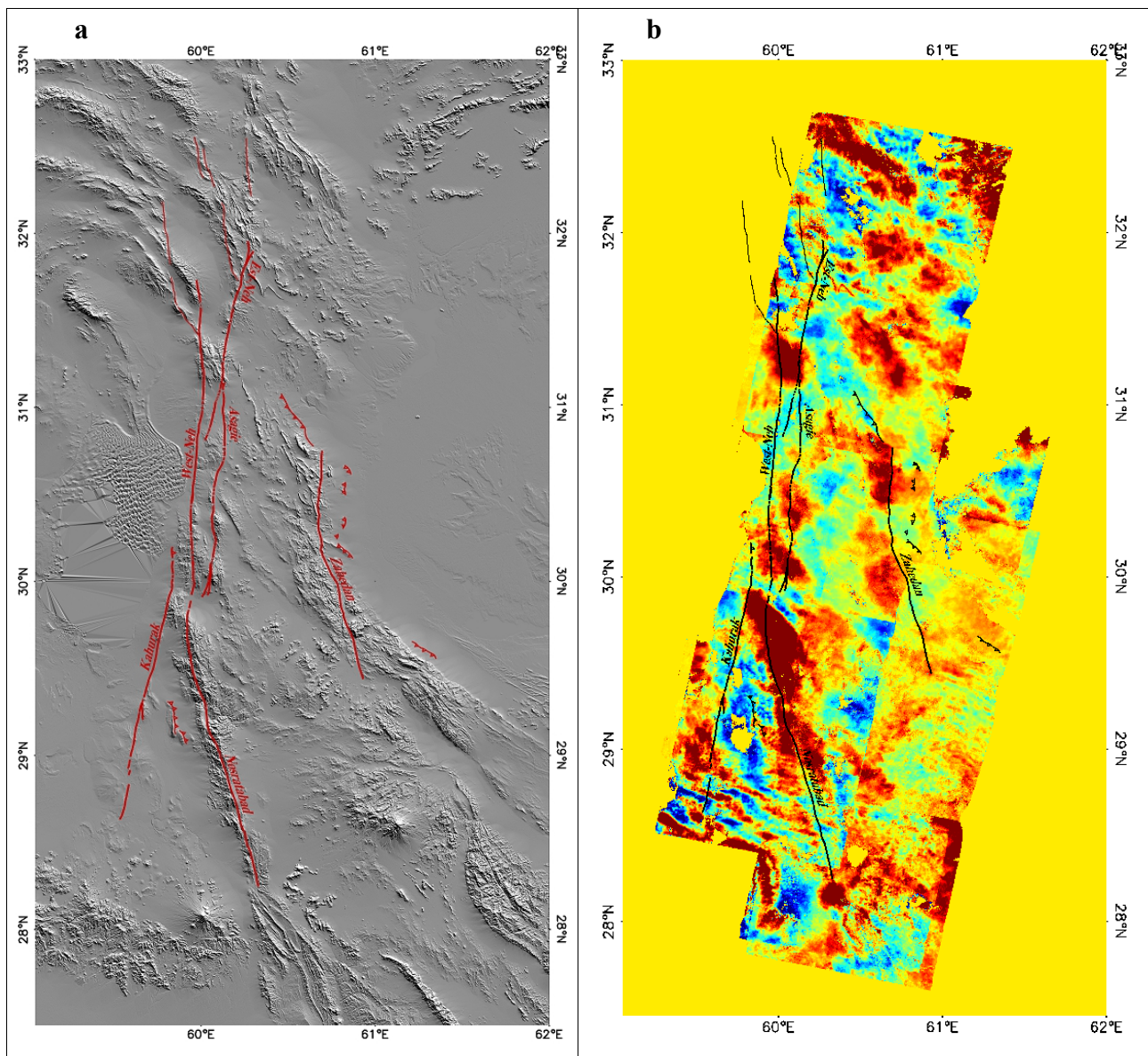


Figure 23. Profil à grande échelle Nord/Sud (a) et sa situation sur le MNT (b) et l'interférogramme stacké (c). La déformation est mesurée suivant l'axe de visée du satellite.

Nous constatons la présence de deux pics de -6 à 6 mm (cercles rouges) aux extrémités Ouest et Est du profil (Figure 23a). L'explication est que le profil sort du champ de l'interférogramme sur les extrémités (Figure 23c). Les pics correspondent au bruit en bordure de l'image. Le profil n°1 (en noir) a été réalisé sur l'interférogramme « stacké », c'est-à-dire moyenné temporellement. Ses valeurs sont globalement plus faibles que les profils n°2 de la track 77 (en bleu) et du profil n°3 de la track 306 (en orange). Ce sont ces valeurs que nous prenons en compte. Nous pouvons donc dire que les déformations suivant l'axe de visée du satellite ne dépassent pas 3 mm/an pour ce profil Nord/Sud à grande échelle.

IV.2.2 Profils des failles

Les résultats des profils des failles décrochantes sont présentés ci-dessous (Figure 24)



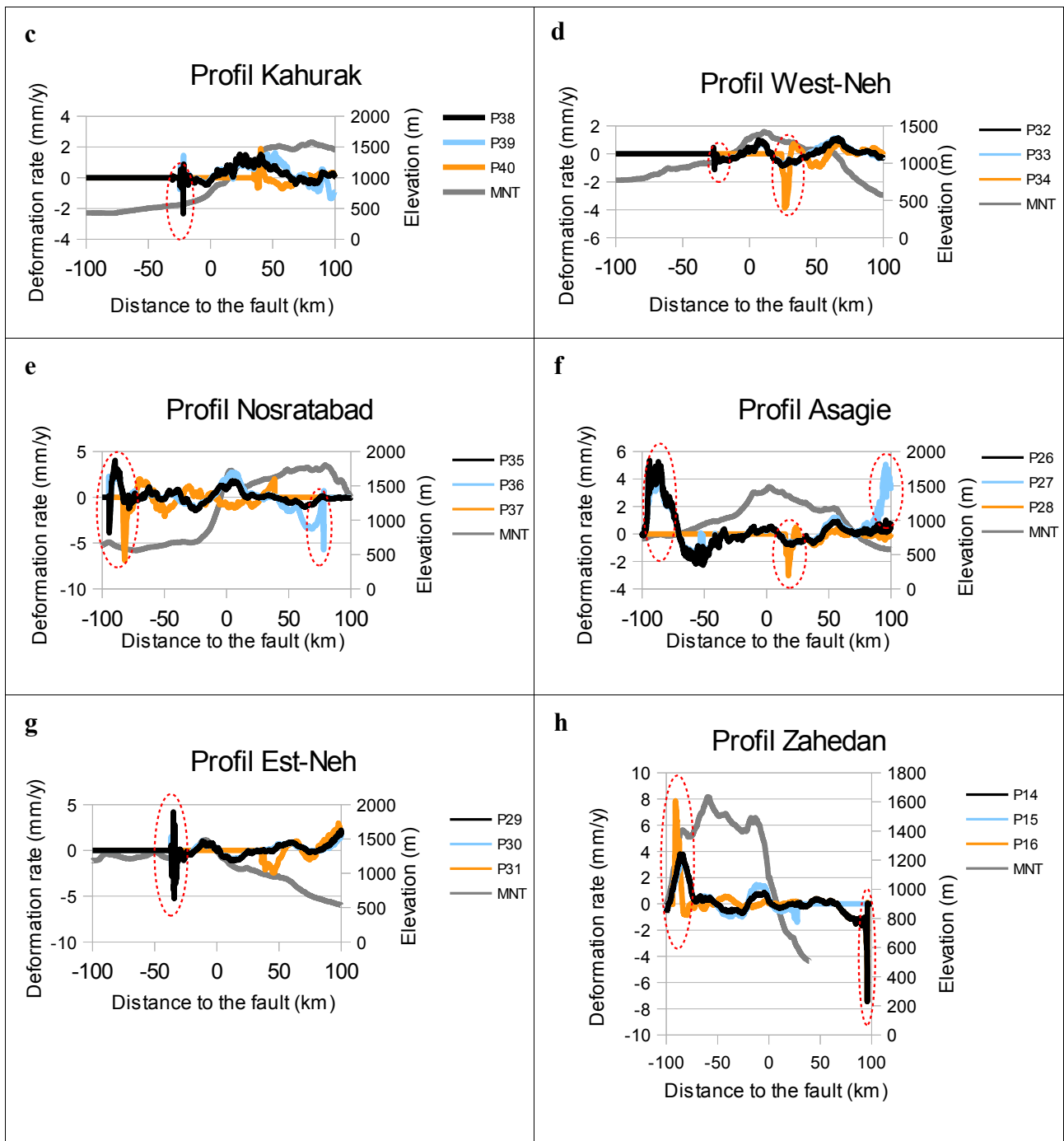


Figure 24. Profils déduits des mesures. a) Cartographie des failles sur le MNT b) Cartographie des failles sur l'interférogramme stacké c) Les profils des failles exprimés en mm/an avec le profil du MNT (gris). Les déformations sont mesurées suivant l'axe de visée du satellite. (voir Tableau 4 pour se référer aux numéros de profils).

Comme pour le profil à grande échelle, nous observons des pics (cercles rouges) qui n'interviennent pas dans le profil de déformation. Ils sont dus aux bordures de l'image (Figure 24b), Dans tous les cas les variations RMS entre les profils sur une même faille sont de l'ordre du mm/an. On constate une faible corrélation des profil avec le MNT.

Les résultats pour les failles inverses sont représentés ci-dessous (Figure 25).

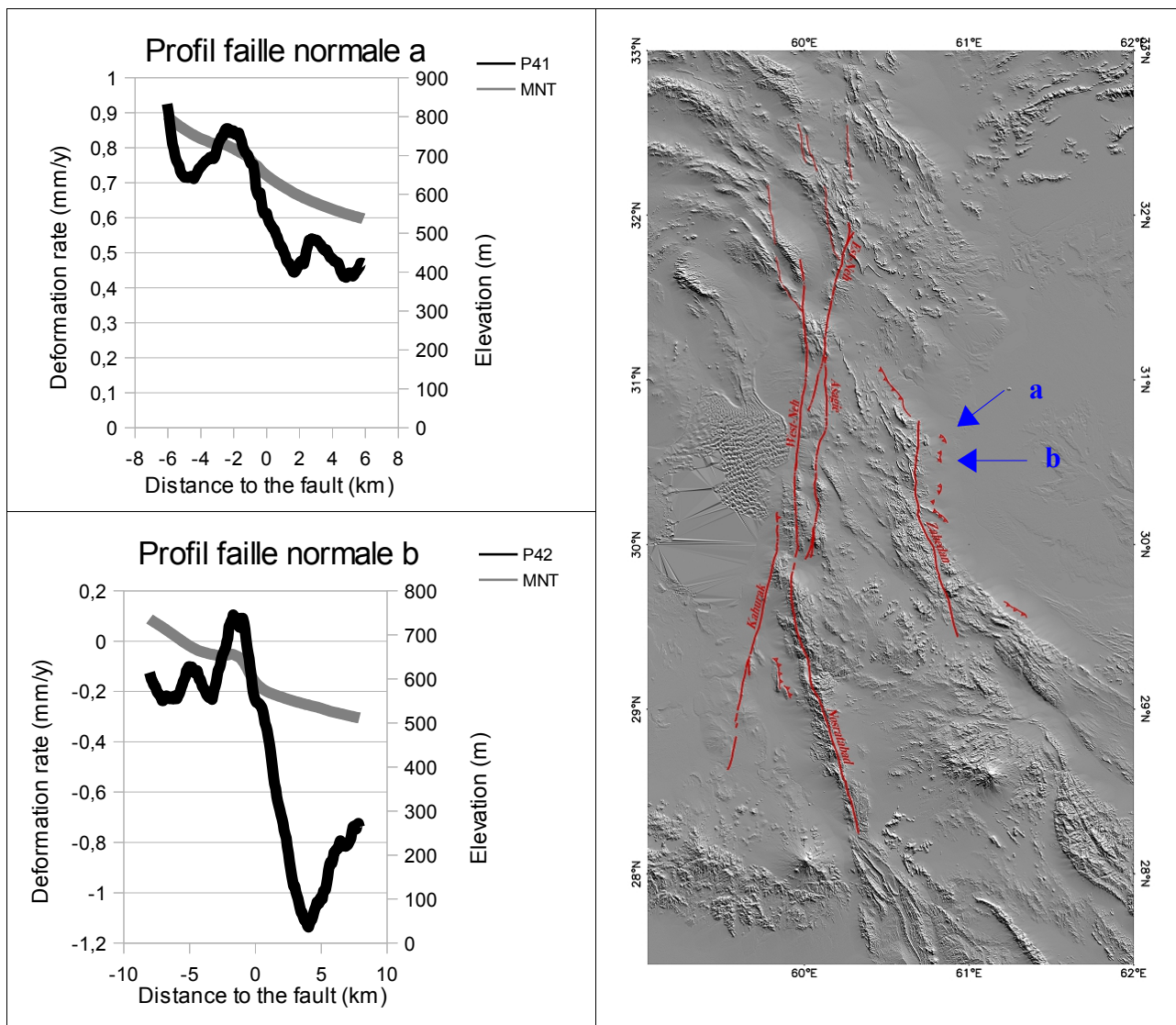


Figure 25. (a) Profils réalisés sur deux petites failles inverses. (b) Situation des failles sur le MNT. Les déformations sont mesurées suivant l'axe de visée du satellite.

On constate que les profils ne sont pas corrélés au MNT. Une déformation inférieure au millimètre dans l'axe de visée du satellite est observable.

IV.2.3 Profils pour chaque couple interférométrique

La stabilité des profils avec les couples interférométriques est remarquable, les profils ne se distinguent que de quelques mm/an (Figure 26). Les écarts entre profils sont localement corrélés à la topographie, suggérant des variations de pression en vapeur d'eau au sol variable dans la scène.

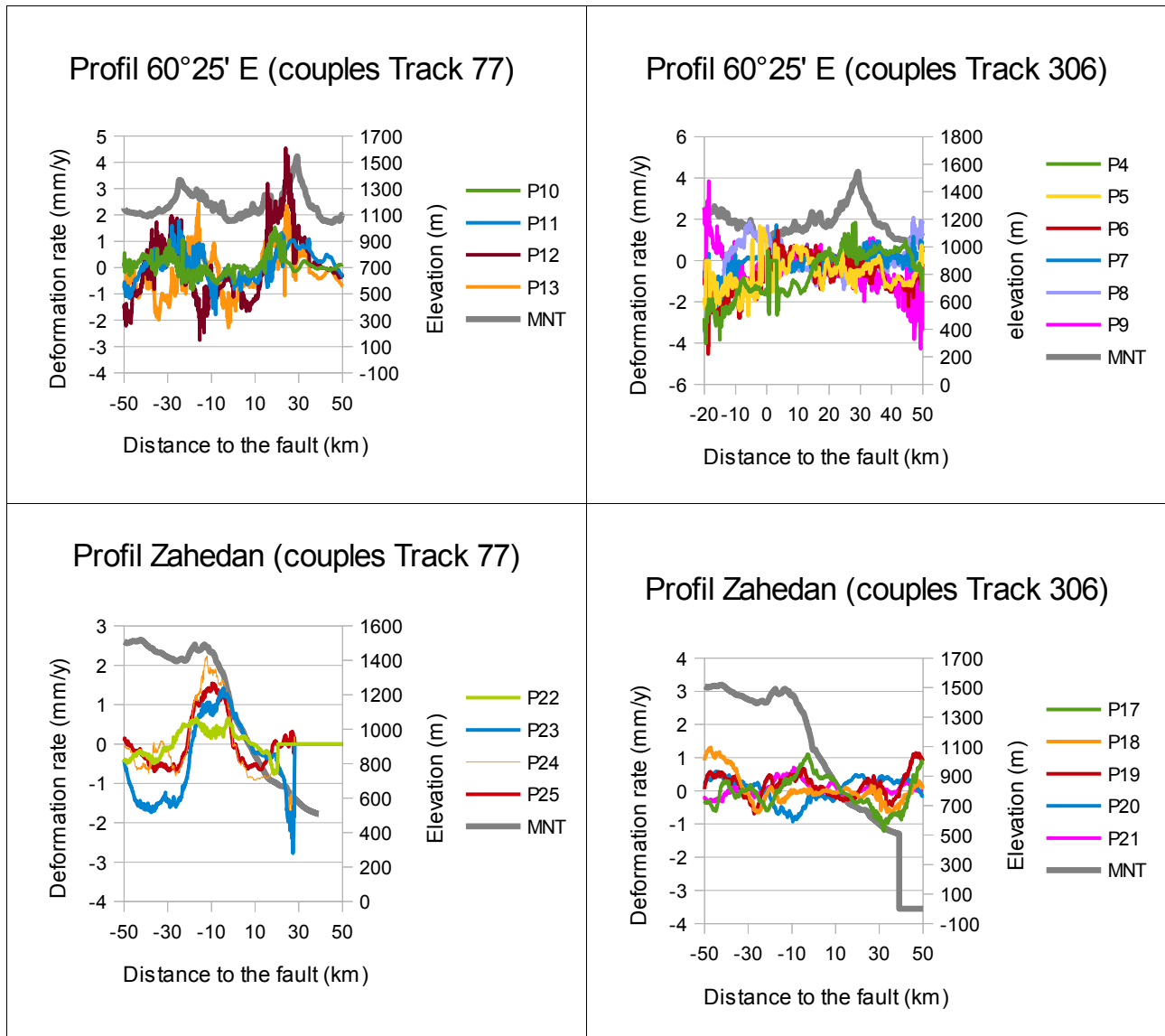


Figure 26. Profils Nord/Sud et de la faille Zahedan pour chaque couple interférométrique. Ils sont représentés par track pour plus de lisibilité. (voir Tableau 4 pour se référencer aux numéros de profils)

IV.2.4 Modélisation

Nous exploitons ici un modèle élastique de la déformation sismique. La faille est un plan, ici vertical, séparant deux demi-espaces infini et élastique défini par leur module d'Young et de Poisson caractérisant respectivement la composante en compression et en cisaillement. La typologie des

déformation attendues sont représentées sur la figure 27 ci-dessous. La déformation est discontinue sur la faille lors d'un séisme ou d'un creep (glissement sans propagation d'onde) et nulle à cet endroit durant la phase de chargement inter-sismique. A long terme, déformation co-sismique et inter-sismique s'ajoutent et la déformation globale est un échelon, c'est la théorie des plaques rigides en tectonique [Wegener et al., 1920].

Notre système, hormis le séisme de Sedifabeh (voir Annexe 4), est supposé ne pas avoir expérimenté de séisme. On s'attend donc à mesurer une déformation en forme d'arc tangente (courbe bleue sur la figure 27 ci-dessous). L'amplitude max-min de l'arc tangente sur le profil centré sur la faille fournit l'estimation de la vitesse de déformation inter-sismique.

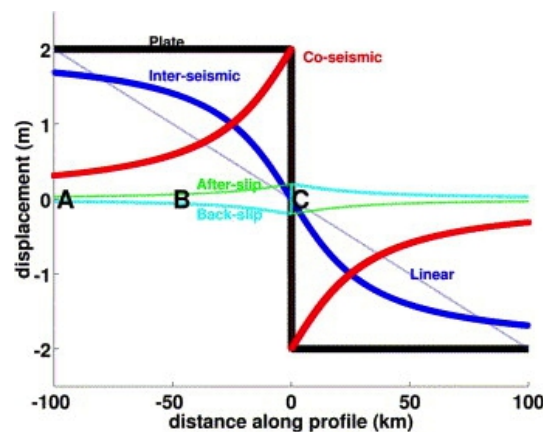


Figure 27. Modèle élastique de la déformation sismique [Okada, 1985]. La faille est à l'abscisse 0 km. Son extension est de la surface à une profondeur de 25 km. La déformation long terme est un échelon (théorie de la tectonique des plaques, en noir). La déformation inter-sismique est nulle sur la faille (pas de séisme, en bleu). La déformation sismique ou le “creep” (glissement sans propagation d'onde) présente une discontinuité sur la faille (en rouge). Les courbes vertes et bleu-ciel indiquent des ajustement résultants des séismes. Le modèle est linéaire.

Dans notre cas, l'absence de discontinuité dans les profils sur les failles (centre des profils) suggère que les failles sont bloquées (Figure 24). Quelques failles inverses montrent des profils de déformation avec des vitesses moyennes de l'ordre de 1mm/an (Figure 25).

IV.3 Estimation des déformations, Résultats tectoniques

La configuration géométrique du réseau de faille n'est pas optimale. En effet, l'interférométrie mesure la déformation suivant l'axe sol-satellite, c'est-à-dire ici suivant un vecteur Est-Ouest, Nord-Sud, vertical de coordonnées $(\sin(24)\cos(20), \sin(24)\sin(20), \cos(24))$, où 24° est l'angle d'incidence du radar au sol et 20° l'inclinaison locale de l'orbite. L'interférogramme ne fournit donc que 14 % de la déformation horizontale Nord-Sud attendue. Mais le bruit de phase étant extrêmement faible et la série d'une durée exceptionnelle, l'estimation de la vitesse de déformation

dans un modèle de faille décrochante est ici possible avec une précision de quelques millimètres par an.

En effet, concernant la grande échelle spatiale, qui est le cœur de cette étude, le meilleur modèle tectonique ajusté sur la courbe du profil 60°25' révèle que la déformation moyenne sur le système est égale à 0.0+-0.5 mm/an dans la direction sol-satellite, c'est-à-dire une vitesse de décrochement pur égale à 0+-3 mm/an. Cette vitesse est très inférieure aux 16 mm/an annoncés par le réseau GPS, ce qui suggère que la déformation estimée par le GPS pour l'Est de l'Iran est accommodée ailleurs.

Plusieurs failles normales présentent des déformations caractéristiques bien visibles sur les profils (Figure 25). La configuration géométrique de l'interféromètre est ici bien meilleur puisque les déformation sur ces failles est essentiellement sub-verticale. Ces déformations résultent probablement de tassements différentiels du sol. Les profils mesurés étant tout à fait décorrélés du profil topographique, il ne s'agit pas ici d'un artefact. On peut donc conclure, sur la base de la déformation constatée sur ces zones de failles quasi verticale, que le signal tectonique peut bien être estimé avec une précision de l'ordre de 0.3 mm/an sur cette série de données, ce qui soutient le modèle de bruit utilisé.

IV.4 Discussion

Les résultats obtenus sur 3 grandes failles décrochantes (Asagie, East-Neh et West-Neh) peuvent être comparés à ceux obtenus par Le Dortz et al [2007]. Ils montrent que les vitesses de déformations mesurées à l'échelle géologique et sur la décennie d'images radars disponibles sont compatibles. Néanmoins, nous sommes pour ces failles décrochantes, à la limite de résolution de l'interférométrie et ainsi il ne nous est pas possible de discuter, à partir des données SAR, si la déformation sur ces failles est préférentiellement induite par des séismes ou plutôt par un mouvement continu ou « creep ».

	Mesures géologiques	Mesures géodésiques
Asagie	~1-2.5 mm/an	
East-Neh	~1.75-2.5 mm/an	moins de 2 mm/an
West-Neh	~1-5 mm/an	

Tableau 5. Comparaison des vitesses de glissement de 3 failles décrochantes entre les mesures géodésiques de notre étude (interférométrie radar sur une dizaine d'années) et les observations géologiques court-terme [Le Dortz et al., 2007].

Nous avons vu que selon les observations géodésiques issues du réseau GPS [Vernant et al., 2004], le décrochement dextre entre l'Ouest et l'Est du désert du Lut est de 16 mm/an. La vitesse de déformation à l'extrémité Ouest est d'environ 2.4 mm/an [Walker et al., 2002]. Les résultats de notre étude indiquent une vitesse de déformation totale d'environ 3mm/an à l'Est du Lut. Afin d'être en accord avec ceux attendus par le GPS il aurait fallu trouver une vitesse de 13.5 mm/an. Nos résultats

rejoignent ceux de Le Dortz et al [2007] (Tableaux 5 et 6) ce qui nous laisse penser que les 16mm/an ne se trouvent pas limités aux failles situées aux extrémités Ouest et Est du Lut mais à une zone plus large.

	WEST LUT	EAST LUT					
	Gowk-Nayband	Asagie	East-Neh	West-Neh	Nosratabad	Kahurak	Zahedan
Mesures géologiques [Walker et al., 2002]	~2.4 mm/an	-	-	-	-	-	-
Mesures géologiques [Le Dortz et al., 2007]	-	~1-2.5 mm/an	~1.75-2.5 mm/an	~1-5 mm/an	-	-	-
Mesures géodésiques (notre étude)	-	moins de 3mm/an					

Σ # 16 mm/an

Tableau 6. Vitesses de déformation des failles situées à l'Ouest et à l'Est du Lut. Elles résultent d'observations géologiques court-terme [Walker et al., 2002], [Le Dortz et al., 2007] et d'observations géodésiques DInSAR (notre étude).

Conclusion

La télédétection est devenue une technique de plus en plus utilisée par les géomètres, notamment en matière d'aménagement du territoire, surveillance de l'environnement, etc. L'étude d'images optiques (aériennes et spatiales) a d'abord fait son apparition dans le milieu professionnel et l'imagerie radar, plus difficile d'interprétation mais très riche en terme d'informations, s'impose comme un outil de premier plan. L'arrivée des derniers satellites radars TerraSAR-X (2007) et TanDEM-X (2010) permet de fournir des images présentant une résolution sub-métrique encore jamais atteinte (~5 m pour les satellites ERS-1-2 et ENVISAT). Ces images haute résolution ont trouvé leur place en génie-civil notamment pour la mesure de faibles déformations en milieu urbain. La cartographie de ces déformations s'appuie sur la méthode de l'interférométrie radar différentielle (DInSAR) qui consiste à extraire le signal de déformation à partir de couples d'images radars acquises à deux moments différents sur une même zone. L'exemple de l'observation des déformations au niveau de la gare de Saint-Lazare (Paris) suite à la construction du RER E a été abordé dans ce mémoire (revue Géomètre n°2095). La technique DInSAR trouve aussi sa place pour des applications scientifiques, notamment en tectonique.

Ce stage a été l'occasion de mettre en place une chaîne de traitement interférométrique ROI_PAC au sein de l'ISTeP. Dorénavant, l'interférométrie radar différentielle vient s'ajouter aux méthodes actuellement en place; sismologie, GPS, géomorphologie, etc. Dans ce contexte, le travail de fin d'étude réalisé avait pour objectif d'évaluer les déformations inter-sismiques de l'Iran sur la zone de failles située à l'Est du désert du Lut et de comparer les résultats obtenus avec ceux d'une mission GPS.

Les profils de déformations ont été obtenues à partir du stack d'une trentaine d'interférogrammes issus d'images satellites radars ERS et ENVISAT. Les mesures bénéficient de caractères exceptionnels, à savoir une période temporelle d'une dizaine d'années et un très bon rapport signal sur bruit. Ce dernier résulte de l'aridité de la zone d'étude et de lignes de base très faibles entre les positions orbitales. Nous obtenons des déformations tectoniques très faibles de l'ordre de quelques millimètres seulement, ce qui laisse suggérer que la région du Lut présente une tectonique peu active et que les déformations annoncées par le GPS doivent être réparties sur une zone plus large que celle des abords du Lut. Le résultat tectonique majeur de l'étude est qu'une déformation à des vitesses supérieures à 2 mm/an est inenvisageable pour cette zone, ce qui est en contradiction avec la thèse discutée d'une vitesse d'environ 13 mm/an dans cette zone. De manière plus anecdotique, la déformation mesurée sur quelques failles inverses, bien comprise des géologues, atteste de la sensibilité des images, les vitesses estimées étant inférieures au millimètre par an.

Des déformations millimétriques signifient qu'une attention particulière doit être portée sur les artefacts atmosphériques, par conséquent, les résultats pourraient encore être améliorés. Un article scientifique est actuellement en cours de rédaction. Il s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés et consiste à proposer une nouvelle méthode pour filtrer la composante atmosphérique.

Ce stage reste une expérience enrichissante. Il m'a permis d'acquérir des compétences en InSAR aussi bien sur un plan pratique que théorique et de me découvrir un goût prononcé pour la télédétection, domaine dans lequel j'envisage de débiter ma carrière professionnelle.

Résumé

La télédétection spatiale est aujourd'hui utilisée pour de multiples applications dans le domaine du génie civil (aménagement du territoire, environnement, etc..). Elle est aussi exploitée en Sciences de la Terre. En effet, la surface de notre planète ne cesse de se transformer sous l'effet de la tectonique des plaques. Une technique de télédétection spatiale, l'interférométrie différentielle radar (DInSAR), permet de mesurer et de cartographier ces déformations du sol. D'abord mise en œuvre à la fin des années 80, DInSAR vient s'ajouter aux méthodes de mesures des déformations de la Terre déjà en place (GPS, mesures géologiques).

Nous rappelons dans un premier temps le principe de l'interférométrie différentielle radar. DInSAR consiste à créer une carte de déformation du sol, l'interférogramme. La construction de ce dernier se fait à partir du produit conjugué de deux images radars (une image maître et une image esclave). Les deux images sont acquises par un même satellite à deux instants différents, elles représentent la même zone du globe, et leur taille est d'environ 100*100 km.

$$\begin{array}{l}
 \text{Image maître : } I_1 = A_1 e^{j\Phi_1} \\
 \text{Image esclave recalée : } I_2 = A_2 e^{j\Phi_2}
 \end{array}
 \longrightarrow
 \text{Interférogramme : } I_1 I_2^* = A_1 A_2 e^{j(\Phi_1 - \Phi_2)}$$

En interférométrie différentielle radar, c'est la phase qui est exploitée. La différence de phase où phase interférométrique notée $\Delta \Phi$, correspond à la différence de phase entre l'image maître (image de référence) et l'image esclave. L'image esclave doit être recalée précisément pixel à pixel sur l'image maître au préalable.

$$\begin{array}{ll}
 \Delta \Phi = \Phi_{I_2} - \Phi_{I_1} = \Delta \Phi_{\text{trajet}} + \Delta \Phi_{\text{atmo}} + \text{bruit} [2 \Pi] & \Delta \Phi_{\text{orb}} : \text{Variation de phase orbitale} \\
 \Delta \Phi_{\text{trajet}} = \frac{4 \Pi}{\lambda} (r_2 - r_1) & \Delta \Phi_{\text{topo}} : \text{Variation de phase topographique} \\
 \Delta \Phi_{\text{trajet}} = \Delta \Phi_{\text{orb}} + \Delta \Phi_{\text{topo}} + \Delta \Phi_{\text{déf}} [2 \Pi] & \Delta \Phi_{\text{déf}} : \text{Variation de phase de déformation} \\
 & \Delta \Phi_{\text{atmo}} : \text{Variation de phase atmosphérique}
 \end{array}$$

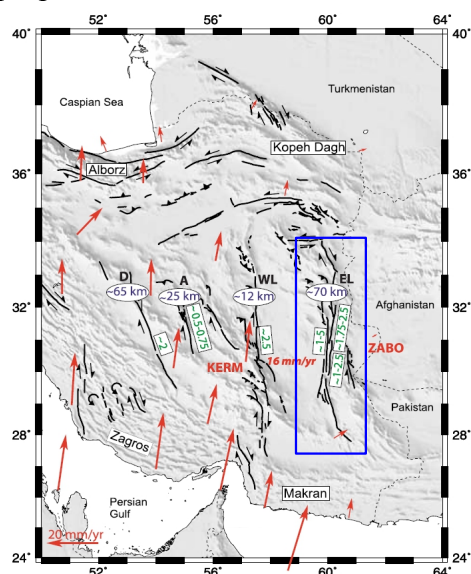
Plusieurs étapes de traitement sont nécessaires afin de récupérer le signal de déformation :

- *Retrait de la composante orbitale* : Elle correspond à la différence de position orbitale des satellites au moment des deux instants d'acquisition, on parle de « terrain plat ».

- *Retrait de la composante topographique* : Le signal topographique est retiré de l'interférogramme par une simulation de la phase interférométrique créée par la topographie à partir d'un MNT.

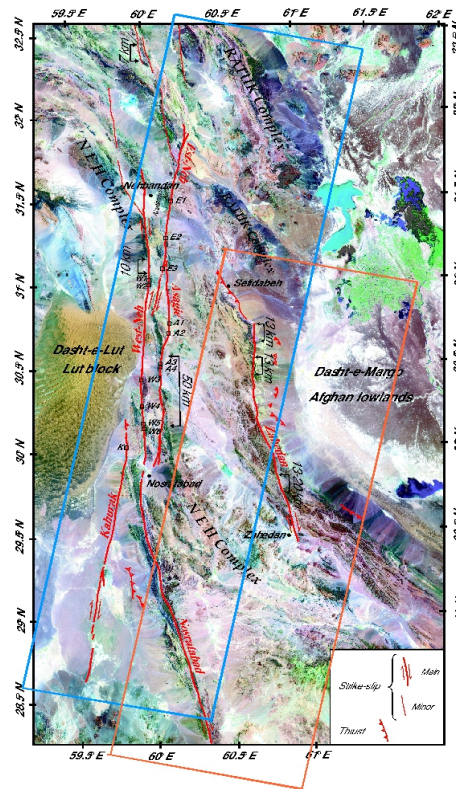
- *Retrait de la composante atmosphérique* : Deux phénomènes atmosphériques quasi distincts engendrent un retard de délai de phase : la stratification de l'atmosphère, composante statique dépendante du relief, et la turbulence atmosphérique, composante dynamique. Plusieurs modèles permettent de corriger l'atmosphère stratifiée, c'est un modèle relativement simple de mise en œuvre. Le phénomène de turbulence est pour le moment difficilement modélisable..

Notre travail de recherche a consisté à appliquer l'interférométrie différentielle radar au cas des déformations inter-sismiques de l'Est de l'Iran. Le pays est sujet à des déformations tectoniques importantes de par sa situation à la convergence des plaques Eurasienne et Arabe. Le champ de déplacement d'un décrochement dextre majeur de l'Iran situé au niveau du désert du Lut a été mesuré lors d'une campagne GPS. Le réseau indique une déformation de 16mm/an [Vernant et al., 2004]. Walker et al [2004] précise que le champ de déplacement concerne les zones de failles situées aux bords Ouest et Est du désert du Lut. La partie Ouest se déplace à une vitesse ~ 2.5 mm/an [Walker et al., 2002]. Afin d'être en accord avec les résultats déduits du réseau GPS, le bloc Est devrait se déplacer à environ 13.5 mm/an. Or, une étude récente basée sur des mesures géologiques court-terme [Le Dortz et al., 2007] a montré que la cinématique de quelques failles de cette zone était relativement inférieure au résultat attendu. L'interférométrie différentielle radar est un bon candidat pour mesurer de faibles déformations de l'ordre du millimètre. C'est pourquoi cette méthode géodésique a été utilisée pour mesurer les vitesses de déformations de l'Est du Lut. Le type de milieu aride et désertique de notre zone d'étude (rectangle bleu sur la figure ci-dessous) est un atout pour DInSAR car cela implique une cohérence élevée, critère de qualité pour la formation d'un interférogramme.



Carte de la tectonique de l'Iran. Le champ de déplacement de l'Iran issu du réseau GPS [Vernant et al., 2004] est représenté par les flèches rouges (en considérant la plaque Eurasienne comme fixe). Les vitesses des failles mesurées par des méthodes géologiques sont indiquées en vert [Walker et al., 2002 et Le Dortz., et al 2007]. La somme des vitesses de WL et EL est inférieure aux 16mm/an annoncés. (Source : Le Dortz., et al 2007)

Nous avons acquis 57 images radars issues des satellites ERS-1-2 et ENVISAT pour ainsi former un total de 39 interférogrammes sous le logiciel interférométrique ROI_PAC. Les images ont été commandées auprès de l'Agence spatiale Européenne. Cela a nécessité de soumettre un projet scientifique et technique au préalable auprès de l'ESA. Les images sont réparties sur deux tracks (direction de l'orbite du satellite projetée au sol) et couvrent une zone d'environ 150*400 km sur une période d'une dizaine d'années. 19 images sont réparties sur la track 77 et 20 autres sur la track 306 (voir figure ci-dessous).



Répartition des interférogrammes sur la carte des failles. La track 77 est en bleu, la track 306 est orange. Le fond de l'image est issu d'images Landsat. (Source :Le Dortz., et al 2007).

L'objectif de notre travail étant de récupérer un signal de déformation de l'ordre du millimètre par an seulement, une attention particulière a été portée sur la correction des artefacts atmosphériques. En effet, ces derniers engendrent une variation de phase qui peut couvrir le signal de déformation recherché. Ce phénomène est particulièrement observable sur les zones de relief élevé. Dans cette optique, le bruit issu de la stratification de l'atmosphère a été compensé de sorte à retirer le meilleur MNT possible.

Moyennées le long de profils perpendiculaires aux failles, les mesures pondérées par une estimation locale du bruit, suggèrent que la déformation inter-sismique est égale à 0+3 mm/an ce qui est notablement inférieur à l'estimation de +13.5 mm/an suggéré par le réseau GPS.

	WEST LUT	EAST LUT					
	Gowk-Nayband	Asagie	East-Neh	West-Neh	Nosratabad	Kahurak	Zahedan
Mesures géologiques [Walker et al., 2002]	~2.4 mm/an	-	-	-	-	-	-
Mesures géologiques [Le Dortz et al., 2007]	-	~1-2.5 mm/an	~1.75-2.5 mm/an	~1-5 mm/an	-	-	-
Mesures géodésiques (notre étude)	-	moins de 3mm/an					

Σ # 16 mm/an

Vitesses de déformation des failles situées à l'Ouest et à l'Est du Lut. Elles résultent d'observations géologiques court-terme [Walker et al., 2002], [Le Dortz et al., 2007] et d'observations géodésiques DInSAR (notre étude).

Dans un contexte différent de celui abordé dans cette étude, il est intéressant de noter que les perspectives opérationnelles pour le génie-civil sont importantes en interférométrie radar. Ceci en partie grâce à l'extrême sensibilité de cette technique (quelques millimètres de déformations sont détectables) et par l'existence de missions satellites radars à Très Haute Résolution Spatiale (TerraSAR-X par exemple) qui ouvrent plus avant l'intérêt de ces images, notamment en milieu urbain.

Bibliographie

Ouvrages

Cazenave, A. (2013), Rotation de la Terre, déformations de la croûte terrestre et marées mesurées depuis l'espace, cours sur l'étude de la Terre et de l'environnement depuis l'espace, collège de France

Cazenave, A. (2013), L'espace et les catastrophes naturelles, cours sur l'étude de la Terre et de l'environnement depuis l'espace, collège de France

Grandin, R. (2013), Interférométrie radar, support de cours de l'IPGP

Michel, R. (2013), Modalités d'Imagerie (1/2) Formations, propriétés et traitements des images, support de cours

Morel, L. (2012), Géodésie PARTIE 1, support de cours de 2ème année ESGT

Polidori, L. (1997), Cartographie radar, Gordon&Breach Science Publishers

Simonetto, E. (2012), Approfondissement en traitement d'images, support de cours 3ème année ESGT

Travaux universitaires

Le Dortz, K. Cinématique de l'Iran central et oriental : Morphotectonique et datations cosmogéniques et OSL. Spécialité Géosciences et ressources naturelles, thèse soutenue le 06/05/2010. Disponible sur : <http://hal.upmc.fr> (consulté en Février 2013)

Cavalié, O. Mesures InSAR et modélisation de faibles déformations d'origine anthropique (lac Mead, USA) ou tectonique (faille de Haiyuan, Chine). Spécialité Sciences de la Terre, thèse soutenue le 21/09/2007. Disponible sur : <http://tel.archives-ouvertes.fr> (consulté en Mai 2013)

Articles

Doin, M. P., Lasserre, C., Peltzer, G., Cavali, 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, doi:10.1016/j.jappgeo.

Elachi , C. and J. van Zyl (2006) *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*. Wiley Series in Remote Sensing. John Wiley & Sons, Inc, 2 edition.

Gabriel, K., R. M. Goldstein and H. A. Zebker, (1989), Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas : Differential Radar Interferometry, *Journal of Geophysical Research*, 94, 9183-9191

Goldstein, M., Howard A., Zebker A, and Werner Charles L. (1988), Satellite radar interferometry : Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, Volume 23, Number 4, Pages 713-720

Kasser, M et L. Polidori, (1999), l'interférométrie radar peut-elle contribuer au suivi des risques géologiques? *Téledétection*, Vol.1, pp 95-137

Le Dortz, K and B. Meyer, (2007), Strike-slip kinematics in Central and Eastern Iran: Estimating fault slip-rates averaged over the Holocene, *tectonics*, vol. 26, TC5009, doi:10.1029/2006TC002073

Le Dortz, K., Foroutan M., M. Sébrier, H. Nazari, B. Meyer, M. Fattahi, A. Rashidi, and M. D. Bateman, (2012), New evidence for large earthquakes on the Central Iran Plateau: Paleoseismology of the Anar fault, *Geophysical Journal International* 189

Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Fiegl, and T. Rabaute, (1993), The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364, 138–142.

Okada, Y. (1985) , Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space *Bulletin of the Seismological Society of America*(August 1985), 75(4):1135-1154

Parsons, B., T. Wright, P. Rowe, J.Andrews, J.Jackson, R. Walker, M.Khatib, M.Talebian, E. Bergman, and E. R. Engdahl, (2004), The 1994 Sefidabeh (eastern Iran) earthquakes revisited: new evidence from satellite radar interferometry and carbonate dating about the growth of an active fold above a blind thrust fault , *Geophysical Journal International* 164,202-2017

Polidori, L. (2007), Une cartographie du relief à l'échelle planétaire, *Géomètre* n°2043

Puysségur, B., R. Michel and J.P. Avouac, (2007), Tropospheric phase delay in interferometric synthetic aperture radar estimated from meteorological model and multispectral imagery, *Journal of Geophysical Research*, B05419

Sella, G. F., T. H. Dixon, and A. Mao (2002), REVEL : A model for recent plate velocities from space geodesy, *Journal of Geophysical Research*, 107(B4), 2081, doi:10.1029/2000JB000033.

Simonetto, E et L. Polidori, (2008), Déformations verticales du sol : DInSAR, une technique d'avenir des mesures, *Géomètre* n°2054

Vernant, Ph., F. Nilforoushan, D. Hatzfeld, M.R. Abassi, C. Vigny, F. Masson, H. Nankali, J. Martinod, A. Ashtiani, R. Bayer, F. Tavakoli, and J. Chery (2004), Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and Northern Oman, *Geophys. J. Int.*, 157, 381-398.

Walker, R. and Jackson, J.A. (2002) Offset and evolution of the Gowk fault, S.E. Iran: a major intra-continental strike-slip system. *Journal of Structural Geology* , 24, 1677-1698.

Walker, R. and Jackson, J.A. (2004), Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran, *Tectonics*, 23, TC5010, doi:10.1029/2003TC001529

Wright, T.J., Parsons, B and Fielding, E. (2001), Measurement of interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault by satellite radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 28, pp.2117-2120. doi:10.1029/2000GL012850

Sites WEB

<http://www.istep.upmc.fr> (consulté en Février 2013)

<http://www.roipac.org> (consulté de Février à Avril 2013)

<http://www.exelisvis.com> (consulté de Février à Avril 2013)

<http://www.eumetsat.int> (consulté en Avril 2013)

www.ESA.int/ (consulté de Février à Juin 2013)

<http://www.geologie.ens.fr> (consulté en Avril 2013)

Logiciels

ROI_PAC 3.0.1

ENVI/IDL

Table des figures

Figure 1. Les 368 applications de la Charte Internationale dans le monde entre 2000 et 2013.....	11
Figure 2. Carte des différentes plaques tectoniques.....	12
Figure 3. Profils de la vitesse de déformation en période inter-sismique.....	14
Figure 4. Carte de la tectonique de l'Iran.....	14
Figure 5. Schéma représentant la prise de vue d'une image SAR.....	18
Figure 6a. Représentation des différents spectres.....	19
Figure 7. ERS (Source : ESA).....	20
Figure 8. ENVISAT (Source : CNES).....	21
Figure 9. Échelle de couleurs représentant une frange.	22
Figure 10. Principe de l'interférométrie différentielle.....	23
Figure 11. Représentation de la phase enroulée et déroulée.....	24
Figure 12. Déformations verticales sur une partie de la ville de Paris (gare Saint-Lazare) lors des travaux souterrains liés à la construction du RER E.....	25
Figure 12. Schéma de la représentation spatiale des 39 interférogrammes exploitables issus de données ERS et ENVISAT.....	27
Figure 13. Carte des failles du bloc Est de l'Iran issue d'images Landsat.	28
Figure 14. Répartition spatiale et temporelle des interférogrammes.....	30
Figure 15 : Situation du couple interférométrique ENVISAT 23/01/2005-27/04/2008 (track 77, frame 2996).....	30
Figure 16. Interférogramme 1 en géométrie radar obtenu à partir d'images ENVISAT à l'Est de l'Iran.....	32
Figure 17. Création de l'interférogramme aplati en géométrie radar (Est de l'Iran).....	33
Figure 18. Création de l'interférogramme en géométrie radar privé de la topographie.....	33
Figure 19. Création de l'interférogramme différentiel déroulé et géoréférencée (Est de l'Iran).....	34
Figure 20. Carte de cohérence déroulée et géoréférencée.....	34
Figure 21. Représentation du délai tropostatique.....	36
Figure 22. Corrélation entre couverture nuageuse et bruit de phase cohérents.....	40
Figure 23. Profil à grande échelle Nord/Sud (a) et sa situation sur le MNT (b) et l'interférogramme stacké (c).....	41
Figure 24. Profils déduits des mesures. a) Cartographie des failles sur le MNT b) Cartographie des failles sur l'interférogramme stacké c) Les profils des failles exprimés en mm/an avec le profil du MNT (gris).	43
Figure 25. (a) Profils réalisés sur deux petites failles inverses. (b) Situation des failles sur le MNT.	44
Figure 26. Profils Nord/Sud et de la faille Zahedan pour chaque couple interférométrique.....	45
Figure 27. Modèle élastique de la déformation sismique.....	46

Table des tableaux

Table 1. Description du capteur ERS.....	19
Table 2. Description du capteur ENVISAT.....	20
Table 3. Récapitulatif des données ERS et ENVISAT : la track 306 est en orange, la track 77 en bleu - le nombre de frame correspond au nombre d'emprise au sol pour lequel 1 couple d'image a été représenté sur une même track.	26
Table 4. Récapitulatif des profils en travers tracés.....	36
Table 5. Comparaison des vitesses de glissement de 3 failles décrochantes entre les mesures géodésiques de notre étude (interférométrie radar sur une dizaine d'années) et les observations géologiques court-terme.....	47
Table 6. Vitesses de déformation des failles situées à l'Ouest et à l'Est du Lut..	47

Table des annexes

Annexe 1 : Projet soumis à l'Agence Spatiale Européenne.....	61
Annexe 2 : Interface de EOLI-SA.....	68
Annexe 3 : Tableaux détaillés des données acquises	70
Annexe 4 : Séisme de Sefidabeh.....	73
Annexe 5 : Construction d'un interférogramme sous ROI_PAC.....	75
Annexe 6 : Interférogrammes.....	77

Annexe 1 : Projet soumis à l'Agence Spatiale Européenne

Restrained Dataset Project

ID	13986
Title	Measuring of Tectonics Interseismic Deformation in Eastern Iran
Type	Restrained Dataset
Class	Peer Review
Cost	Free of Charge/Reproduction costs
Primary Application Domain	Geodesy
Secondary Application Domain	Hazards
Location	Asia
Executive Summary	FUNDING is provided by the University Pierre et Marie Curie, Institut des Sciences de la Terre de Paris, Paris, France. We propose to investigate the potential of differential sar interferometry for the estimate of poorly known interseismic deformation in Iran. GPS will also be used for that study. As far as the method is concern, ROI-PAC software will be used together with some new developments about atmospheric corrections and phase unwrapping. Deliverables will include scientific reports and articles on peer review journal (e.g. JGR Solide Earth) and a report to ESA.

Principal Investigator

Last name (Family name)	Hubert-Brierre
Name (Given name)	Marine
Title	Mr./Mrs./Ms.
Institution	Université Pierre et Marie Curie
Address	4 Place Jussieu, 46-00, 2e, 203
Town	Paris
Postal Code	75252
Country	FRANCE
Phone	33144275208
Fax	33144275208
Email Address	marine.hubert.brierre@gmail.com

Co – Investigators

Co - Investigators	Prof. Rémi Michel UPMC-ISTEP michel.remi@upmc.fr
--------------------	--

Team Composition, Experience, Innovation and Contribution

Team	Marine Huber-Brierre is an engineer is land surveyor and a specialist in remote sensing Rémi Michel is a Pr. in Remote Sensing at UPMC
Experience	Recently published papers in remote sensing of tectonics, including INSAR: ζ Michel, R.; Ampuero, J.; Avouac, J.; Lapusta, N.; Leprince, S.; Redding, D.C.; Somala, S.N.; , "A Geostationary Optical Seismometer, Proof of Concept," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on , vol.51, no.1, pp.695-703, Jan. 2013. ζ Pinel-Puysségur, B., R. Michel and J.-P. Avouac, Multi-Links InSAR Time Series: enhancement of a wrapped interferometric database, IEEE Trans. on Geo. and Rem. Sens., 2012. ζ Smet, S., R. Michel and L. Bollinger, Uplift of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake measured from differential hyperspectral imagery of coastal waters, JGR, B09403, 2008. ζ Puysségur, B., R. Michel and J.P. Avouac, Tropospheric phase delay in interferometric synthetic aperture radar estimated from meteorological model and multispectral imagery, JGR, B05419, 2007. ζ Michel, R. and J.P. Avouac, Imaging Co-Seismic Fault Zone Deformation from Air Photos: the Kickapoo Stepover along the Surface Ruptures of the 1992 Landers Earthquake, JGR, 2005JB003776, 2006.
Innovation	We will show that GPS network currently underestimate the tectonics deformation in Eastern Iran. We will develop a method to measure atmospheric turbulence within the images' spectrum
Contribution	The project will illustrate the potential of ESA's satellite for natural hazards assessment .

Detailed Description and Schedule

Detailed Description	<p>Below are the main details of the projects:</p> <p>Analysis of the deformation in Iran from the bibliography shows that there is a gap in the tectonics deformation at the East. We have checked that ESA has archived numerous images of interest along the tectonics system there. SAR images will be used to compute numerous INSAR interferograms from AMI instrument and arguably from ASR instrument onboard ENVISAT. In order to mitigate the effect of atmospheric turbulence METEOROLOGICAL SATELLITE IMAGES will be used and a dedicated mapping of the turbulence will also be estimated directly within the spectrum of the SAR data, thus providing two new way to get rid of atmospheric artifacts on INSAR. Permanent scatters are also envisioned has a tool to estimate displacements though the coherent there may be good enough to unwrapp most of standards interferograms. Then a MODEL of faulting will be use to estimate the tectonics velocities in the area.</p> <p>BELOW are the requested Clarification about METHODOLOGY, SOFTWARE, ALGORITHM and TECHNIQUE and JUTIFICATION for the amount of requested product.</p> <p>The METHODOLOGY will consist in analysis large TIME SERIES of SAR images using an approach derived by recent method co-authored by R. MICHEL, a member of the team of the current project: Béatrice Pinel-Puysségur, Rémi Michel, Jean-Philippe Avouac, Multi-Link InSAR Time Series: Enhancement of a Wrapped Interferometric Database, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing01/2012; 5(3):784-794.</p> <p>The INSAR software package ROI pack and software developed in the lab will be use for that purpose.</p> <p>Moreover, we will used a method based on meso-scale meteorological model and MERIS images in order to filter out the tropospheric component using a method recently co-authored by R. Michel : Puyssegur, B., R. Michel, and J.P. Avouac, Tropospheric phase delay in interferometric synthetic aperture radar estimated from meteorological model and multispectral imagery, Journal of Geophysical Research – Solid Earth, 112, 2007.</p> <p>Because the envisioned ground velocity induced by tectonics in eastern Iran may only about 16mm per year we need to use images acquired at very different dates. Hence the UNWRAPPING issue may be difficult and this project is thus a good test case to test a new TECHNIQUE developed by the authors and currently fund by the FRENCH CNES-CNRS(INSU) "Programme National de Teledetection Spatial" and untitled : A Semi-Classic Approach for Phase Unwrapping. Hence, the exploitation of the time series of SAR data will be considered within a new theoretical quantum graph approach.</p> <p>Because the envisioned ground velocity induced by tectonics in eastern Iran may only about 16mm per year we need to use images acquired at very different dates. Hence the UNWRAPPING issue may be difficult and this project is thus a good test case to test a new TECHNIQUE developed by the authors and currently fund by the FRENCH CNES-CNRS(INSU) "Programme National de Teledetection Spatial" and untitled : A Semi-Classic Approach for Phase Unwrapping. Hence, the exploitation of the time series of SAR data will be considered within a new theoretical</p>
----------------------	---

Detailed Description	<p>quantum graph approach.</p> <p>Once the ground velocity will be recovered from the data, we will use a standard TECHNIQUE of generalized inverse procedure to estimate the deformation at depth from both INSAR and available GPS data acquired by the laboratoty (ISTeP-UPMC)</p> <p>REQUIRED DATA : We have checked that several hundreds of SAR image are archived for the area of interest, that includes the total DASHT-e-LUT desert area and the DASHT-e-MARGO area as describe in Meyer, B.,and K. Le Dortz (2007), Strike-slip kinematics in Central and Eastern Iran: Estimating fault slip-rates averaged over the Holocene, Tectonics, 26. Because the tectonics deformation will be a maximum of 16mm/year there (see ref above) we will have to compute numerous interferograms to get the signal of interest.</p> <p>Hence we request about 100 ERS and 100 ENVISAT data for a detailed time series over the area of interest. This amount of data will allow to have a onsistent estimate of the ground deformation over a wide area (several degrees in both latitude and longitude) and about a decade. Tropospheric correction will use MERIS data as well (see ref above) so we also request 100 MERIS data.</p> <p>THE data will be processed on the computers of University Pierre et Marie Curie. We also request GOCE data because we want to check the rheology at depth in order to put some constrains on the slip distribution at depth.</p>
----------------------	---

Schedule	<p>preparation : starting from January 2013 data acquisition : starting from February 2013 analysis : from February to December 2014 reporting : December 2014, June 2015 final results : December 2015</p>
----------	---

Other Data Comment

Other Data	
------------	--

File Upload

Upload file comment	
Upload Filename	

Terms and Conditions acceptance

By checking this box I confirm my acceptance of ESA Terms and Conditions applicable to my requested data	yes
As Principal Investigator, I assume full responsibility for the approved utilisation of data, including utilisation with co-investigators.	yes

Acceptance of these Terms and Conditions includes general acceptance of the related ESA and Third Party Missions Data Policies, including the Specific Conditions for the Utilisation of data in the case of Third Party Missions (Annex of the Terms and Conditions)	yes
Results of the Project shall be published in publications of international renown and presented at dedicated workshops organised by ESA.	yes
Any publication whatsoever resulting from work carried out using ESA or TPM data shall contain the following sentence: /Data provided by the European Space Agency/.	yes

Product of ALOS / PALSAR

Product	Total	New	Archived
Fine Resolution Single Polarisation product (PSR_FBS)	20	20	2

Product of ENVISAT / ASAR Image Mode

Product	Total	New	Archived
L0 - ASA_IM_0P	100	0	100

Product of ENVISAT / MERIS

Product	Total	New	Archived
L1B Full Res - MER_FR_1P	100	0	100

Product of ERS-1/2 / AMI (SAR) Image Mode

Product	Total	New	Archived
Annotated RAW Data - SARRAW or SAR_IM_0P	100	0	100

Product of GOCE / EGG

Product
GOCE EGG Level 2 (excluded EGM_GVC_2)

Product of GOCE / SSTI

Product
GOCE SSTI Level 2

Product of SPOT / HRG

Product
MS or PAN online archive (ESA Collection)

Data Requirements

ESA Data: Details about archived products	Mostly SAR image over Eastern Iran
Specific polarisation schemes required for ASAR	no
Specific swaths required for ASAR	no
Alternative bands set required for MERI	no
Simultaneous acquisition of different ESA sensors required	no

Annexe 2 : Interface de EOLI-SA

The screenshot shows the ESA EOLI-SA interface. The main map displays a satellite view of Iran with a pink rectangular selection area (2) over the central part of the country. The interface includes a left sidebar with a collection tree (1) showing 'ENVISAT ASAR' selected. Below the sidebar are query filters for 'Interferometry' mode (3), date selection (4), and 'Perpendicular Base-line (m)' set to 50 (5). A date range of 365 to 3650 days (6) is also set. At the bottom, a table lists 12 items from the catalog, with item 7 highlighted.

Display	Mosaic	Id	Group	Mission	Sensor	Product	Track	Pass	Swath	Day Diff	Orbit Diff	Baseline diff	Doppler diff	Burst Sync %	Start
<input checked="" type="checkbox"/>		1	1-1	ENVISAT-1 - ENVISAT-1	ASAR/IM - ASAR/IM	Interferometry	77	D	I2	1190	17034	31	0	N/A	
<input checked="" type="checkbox"/>		2	1-2	ENVISAT-1 - ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_OP	77	D	I2				177		2004-08-01 06:06:18.85
<input checked="" type="checkbox"/>		3	1-3	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_OP	77	D	I2				177		2007-11-04 06:06:07.34
<input checked="" type="checkbox"/>		4	2-1	ENVISAT-1 - ENVISAT-1	ASAR/IM - ASAR/IM	Interferometry	77	D	I2	525	7515	-16	0	N/A	
<input checked="" type="checkbox"/>		5	2-2	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_OP	77	D	I2				132		2004-08-01 06:07:08.02
<input checked="" type="checkbox"/>		6	2-3	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_OP	77	D	I2				132		2006-01-08 06:06:53.13
<input checked="" type="checkbox"/>		7	3-1	ENVISAT-1 - ENVISAT-1	ASAR/IM - ASAR/IM	Interferometry	77	D	I2	805	11523	49	0	N/A	
<input checked="" type="checkbox"/>		8	3-2	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_OP	77	D	I2				167		2004-10-10 06:06:17.42
<input checked="" type="checkbox"/>		9	3-3	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_OP	77	D	I2				167		2006-12-24 06:06:12.38
<input checked="" type="checkbox"/>		10	4-1	ENVISAT-1 - ENVISAT-1	ASAR/IM - ASAR/IM	Interferometry	77	D	I2	1190	17034	16	0	N/A	
<input checked="" type="checkbox"/>		11	4-2	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_OP	77	D	I2				152		2005-01-23 06:06:13.15
<input checked="" type="checkbox"/>		12	4-3	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_OP	77	D	I2				152		2008-04-27 06:06:03.54

L'interface est centrée sur l'Iran (track 77). 1) Collection d'images utilisée (ENVISAT-ASAR) - 2) Zone sélectionnée - 3) Mode interférométrie - 4) Choix des dates - 5) Choix de B_{\perp} max (50 m) – 6) Choix de Δt (1 an) – 7) Catalogue

Annexe 3 : Tableaux détaillés des données acquises

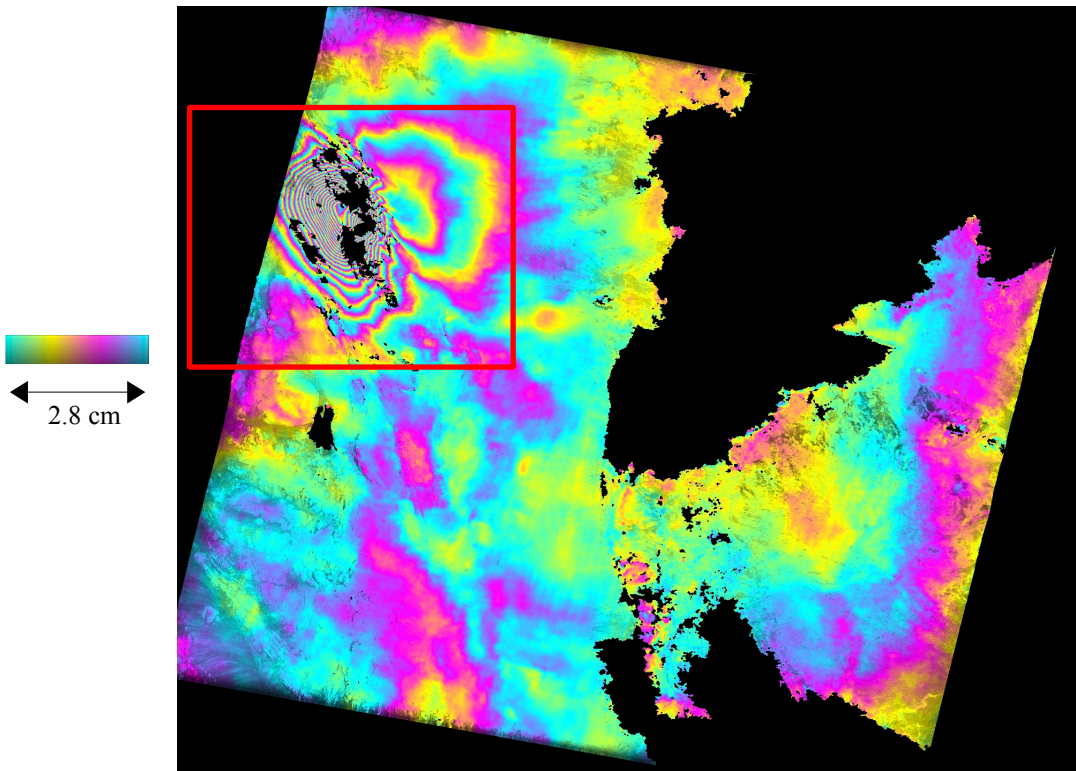
Track	Image	Frame	Orbite	Mode	Δt (jours)	B _L (m)	Interférogramme
306	03/04/93	2991	8968	D	1108	-6	1
	15/06/96		24843				
306	16/04/96	2991	5170	D	1085	8	2
	06/04/99		20701				
	16/04/96	3001	5170				3
	06/04/99		20701				
	16/04/96	3019	5170				4
06/04/99	20701						
306	20/05/96	2991	25344	D	841	48	5
	08/09/98		17695				
	20/05/96	3001	25344				6
	08/09/98		17695				
	20/05/96	3019	25344				7
	08/09/98		17695				
	20/05/96	3037	25344				8
	08/09/98		17695				
306	21/05/96	2991	5671	D	840	-23	9
	08/09/98		17695				
	21/05/96	3001	5671				10
	08/09/98		17695				
	21/05/96	3019	5671				11
	08/09/98		17695				
	21/05/96	3037	5671				12
	08/09/98		17695				
77	05/05/96	2969	25115	D	3080	50	13
	10/10/04		49530				
	05/05/96	2986	25115				14
	10/10/04		49530				
	05/05/96	3003	25115				15
	10/10/04		49530				
	05/05/96	3015	25115				16
	10/10/04		49530				

Récapitulatif détaillé des données ERS

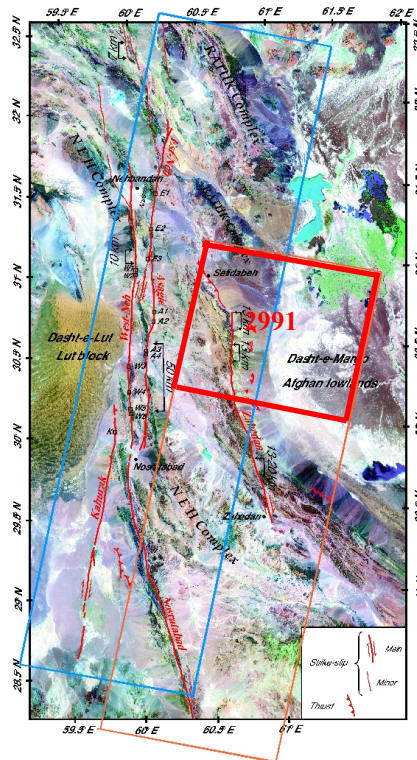
Track	Image	Frame	Orbite	Mode	Polarization	Δt (jours)	B \perp (m)	Interférogramme						
306	24/06/03	3005	6873	D	VV	2625	38	17						
	31/08/10		44448											
	24/06/03	3021	6873					770	-11	21				
	31/08/10		44448											
	24/06/03	3039	6873								1855	38	24	
	31/08/10		44448											
24/06/03	3005	6873	1190	11	28									
02/08/05		17895												
24/06/03	3021	6873				1645	-50	33						
02/08/05		17895												
24/06/03	3039	6873							1050	-20	38			
02/08/05		17895												
306	02/08/05	3005	17895	D	VV							1855	38	23
	31/08/10		44448											
	02/08/05	3021	17895			1190	11	28						
	31/08/10		44448											
	02/08/05	3039	17895						1645	-50	33			
	31/08/10		44448											
23/01/05	2960	15161	D	VV	1645							-50	26	
27/04/08		32195												
23/01/05	2978	15161				1050	-20	38						
27/04/08		32195												
23/01/05	2996	15161							1050	-20	38			
27/04/08		32195												
23/01/05	3014	15161	1050	-20	38									
27/04/08		32195												
23/01/05	3025	15161				1050	-20	38						
27/04/08		32195												
23/01/05	2960	15161							D	VV	1645	-50	31	
26/07/09		38708												
23/01/05	2978	15161	1050	-20	38									
26/07/09		38708												
23/01/05	2996	15161				1050	-20	38						
26/07/09		38708												
23/01/05	3014	15161							1050	-20	38			
26/07/09		38708												
23/01/05	3025	15161	1050	-20	38									
26/07/09		38708												
12/06/05	2960	17165				D	VV	1050				-20	36	
27/04/08		32195												
12/06/05	2978	17165							1050	-20	38			
27/04/08		32195												
12/06/05	2996	17165	1050	-20	38									
27/04/08		32195												
12/06/05	3014	17165				1050	-20	38						
27/04/08		32195												
12/06/05	3025	17165							1050	-20	38			
27/04/08		32195												

Récapitulatif détaillé des données ENVISAT

Annexe 4 : Séisme de Sefidabeh

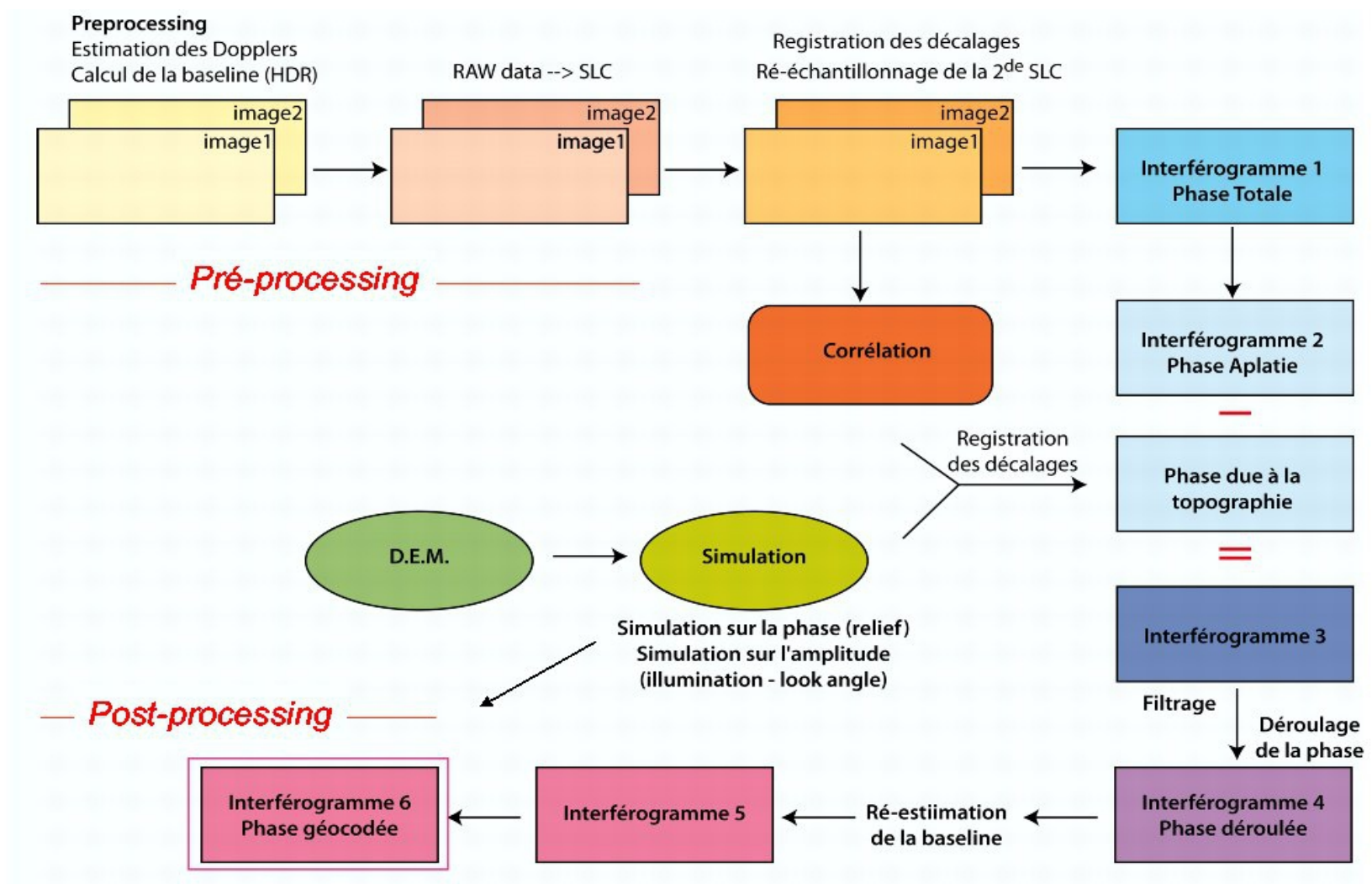


03/04/1993_15/04/1996



Situation

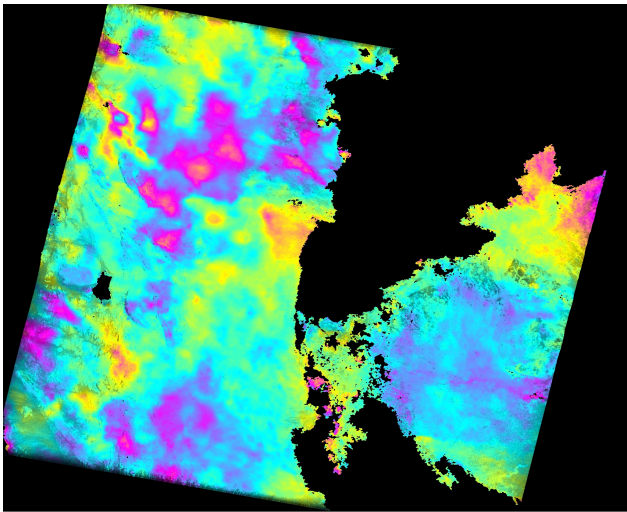
Annexe 5 : Construction d'un interférogramme sous ROI_PAC



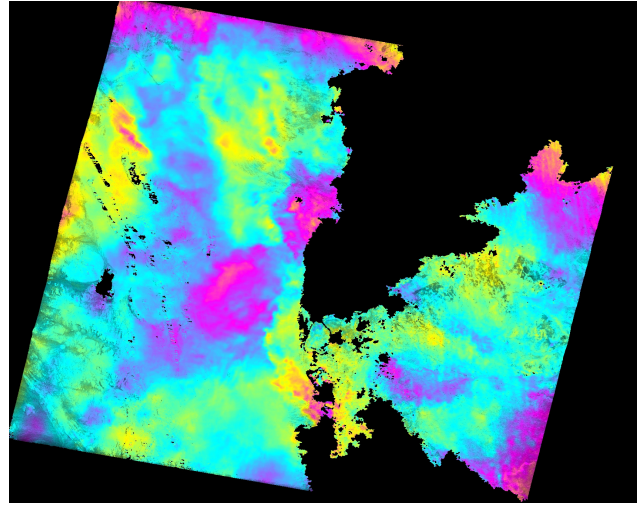
Source : TD InSAR de R. Grandin

Annexe 6 : Interférogrammes

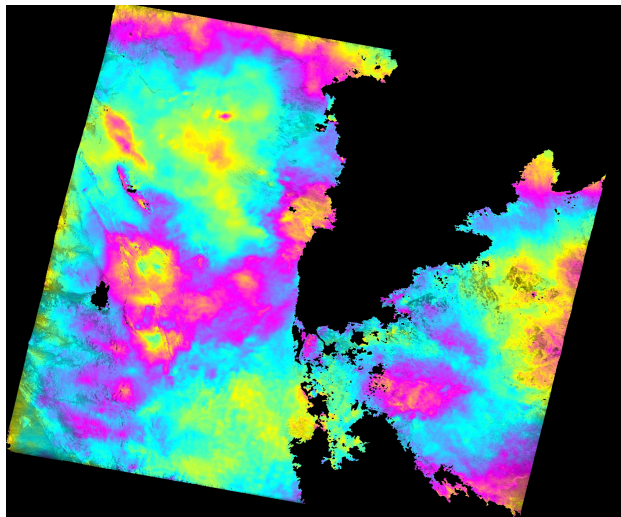
ERS : Track 306 Frame 2991



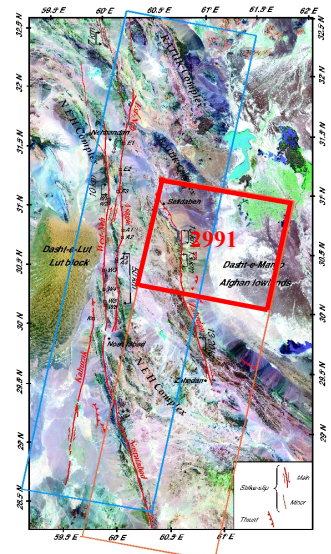
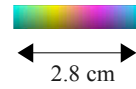
16/04/1996_06/04/1999



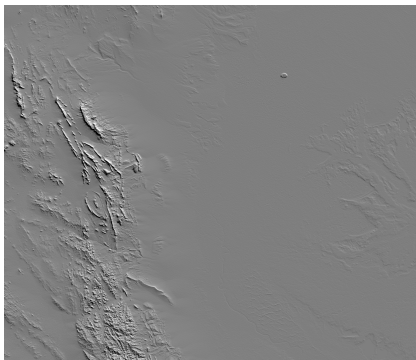
20/05/1996_08/09/1998



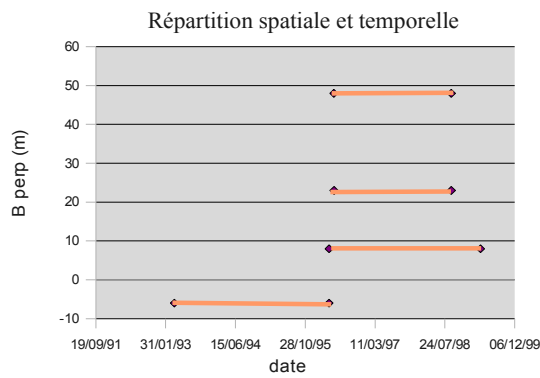
21/05/1996_08/09/1998



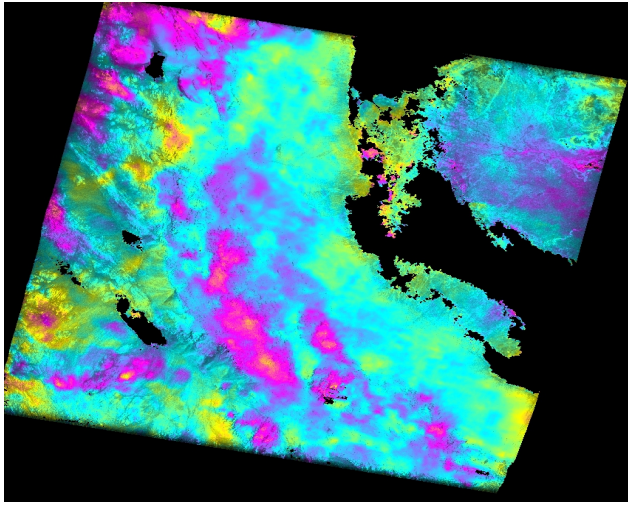
Situation



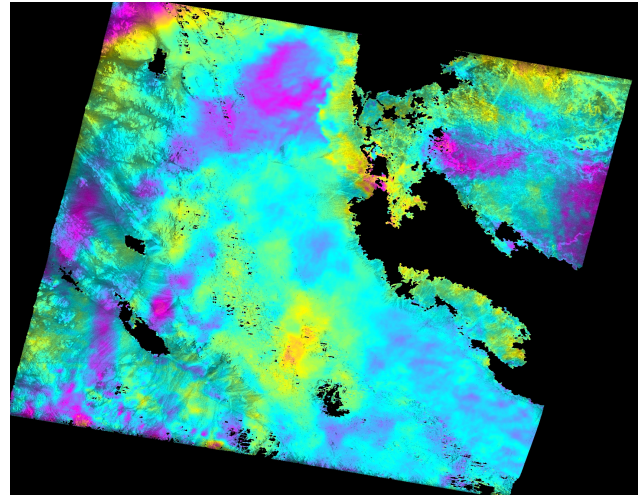
MNT



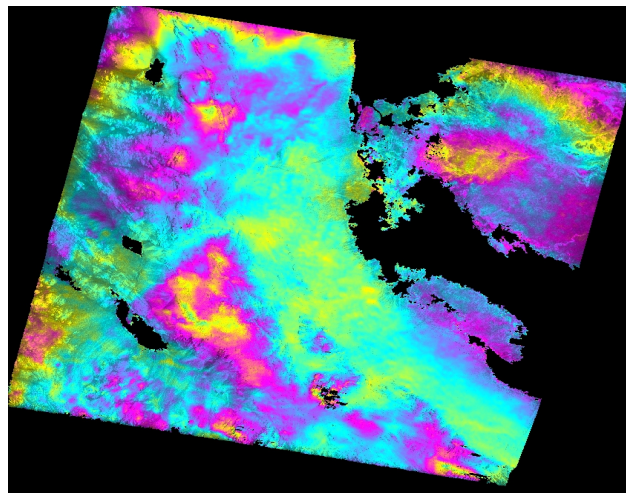
ERS : Track 306 Frame 3001



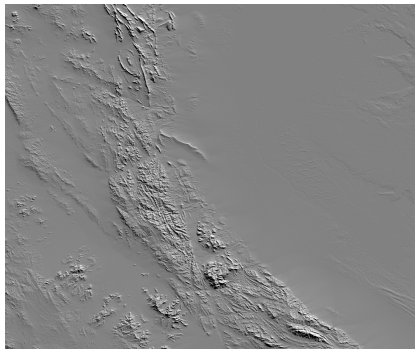
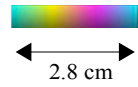
16/04/1996_06/04/1999



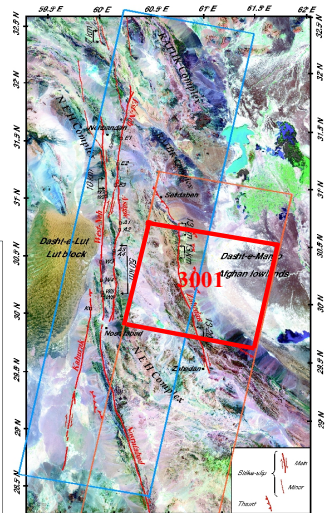
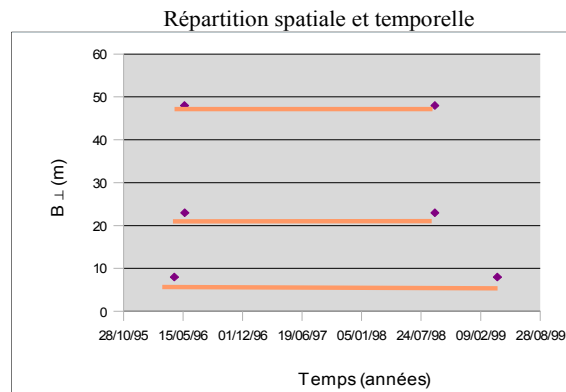
20/05/1996_08/09/1998



21/05/1996_08/09/1998

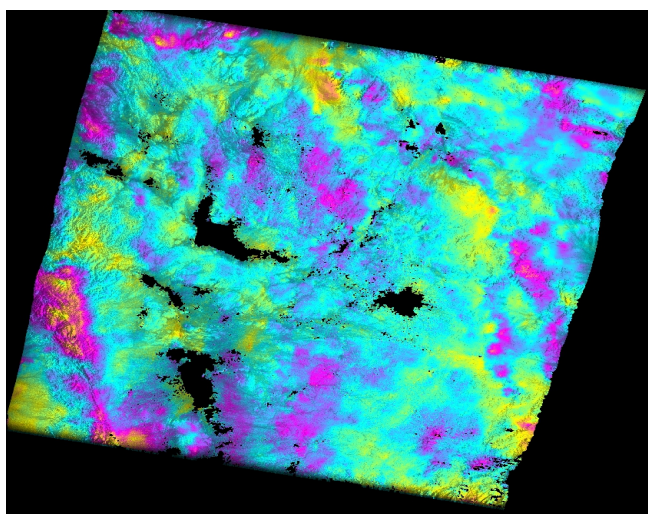


MNT

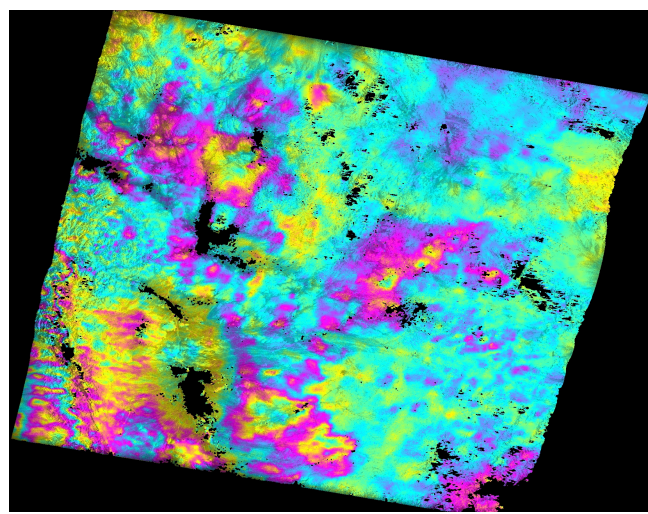


Situation

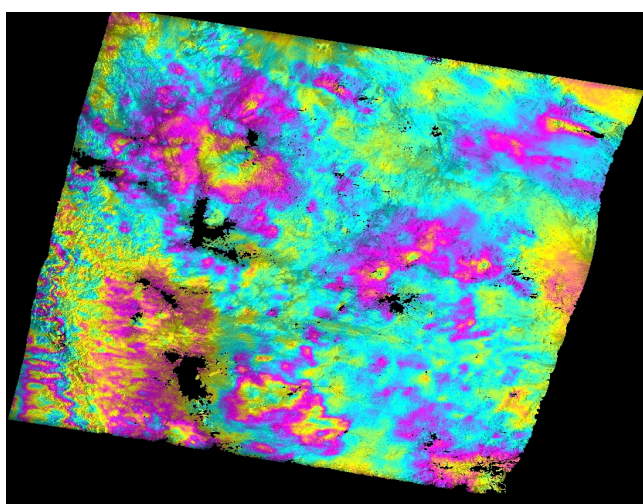
ERS : Track 306 Frame 3019



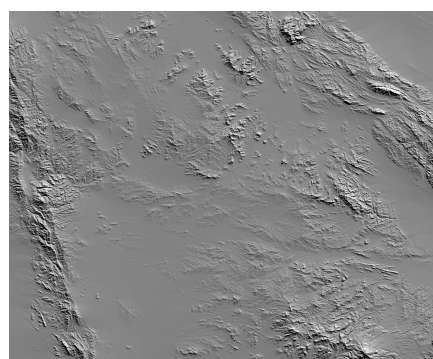
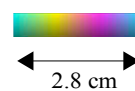
16/04/1996_06/04/1999



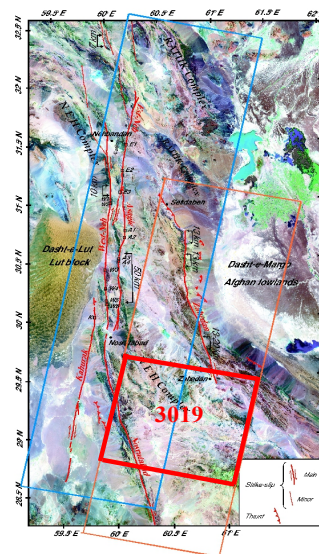
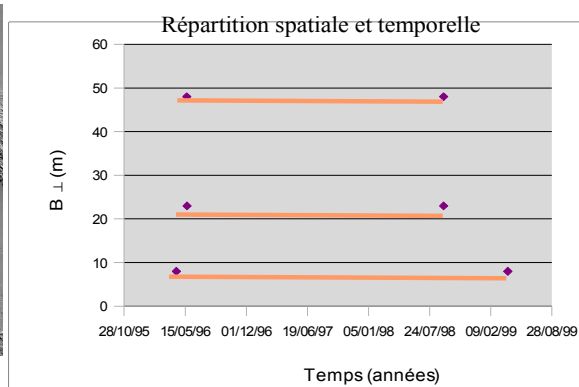
20/05/1996_08/09/1998



21/05/1996_08/09/1998

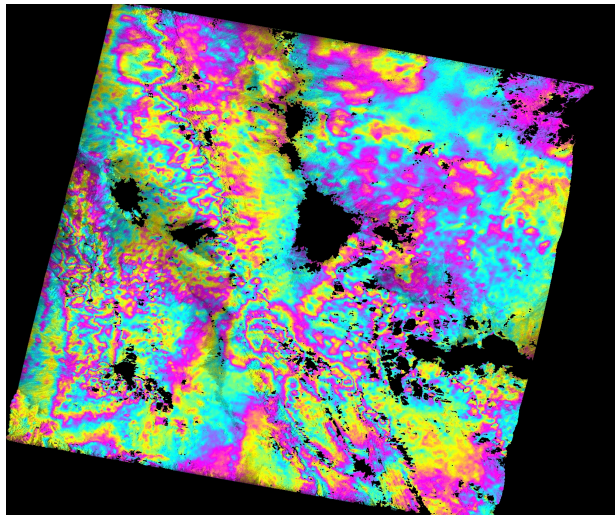


MNT

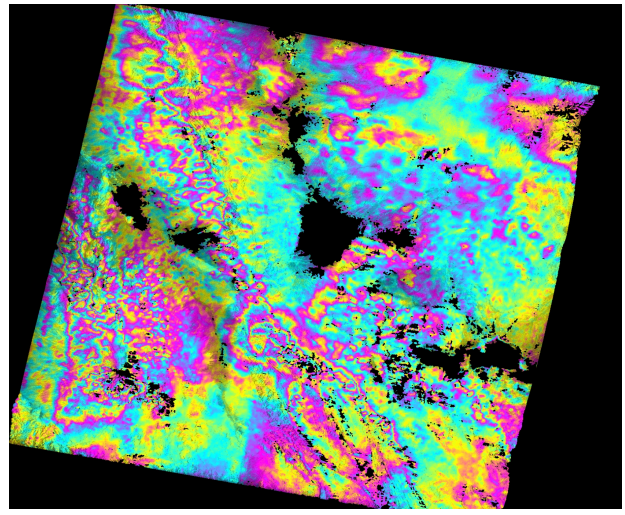


Situation

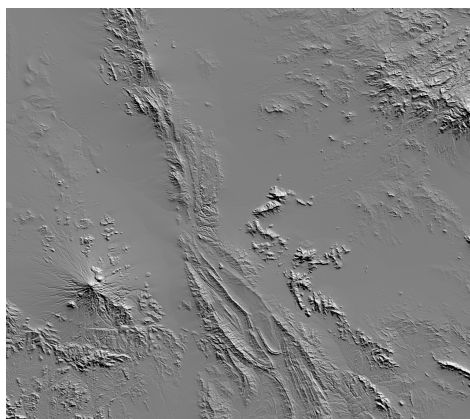
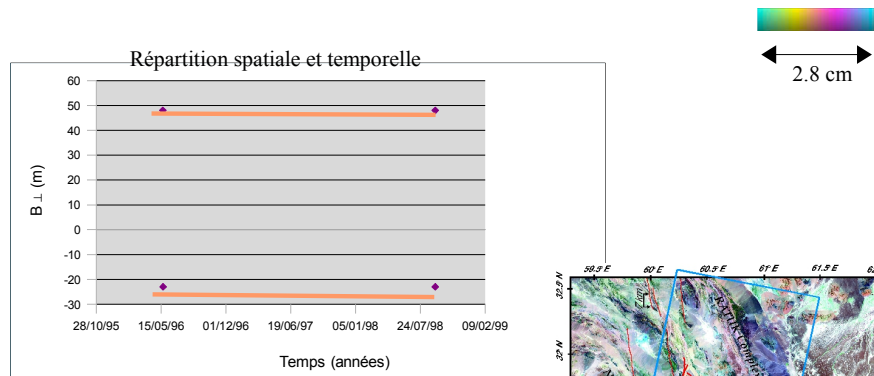
ERS : Track 306 Frame 3037



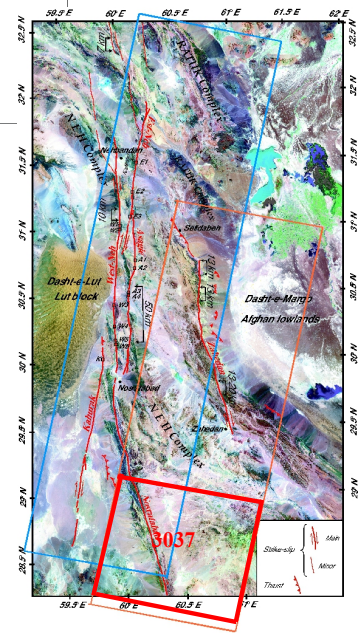
20/05/1996_08/09/1998



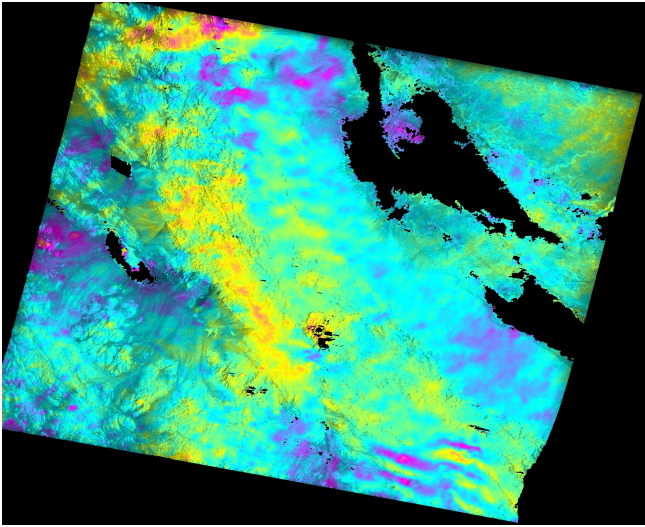
21/05/1996_08/09/1998



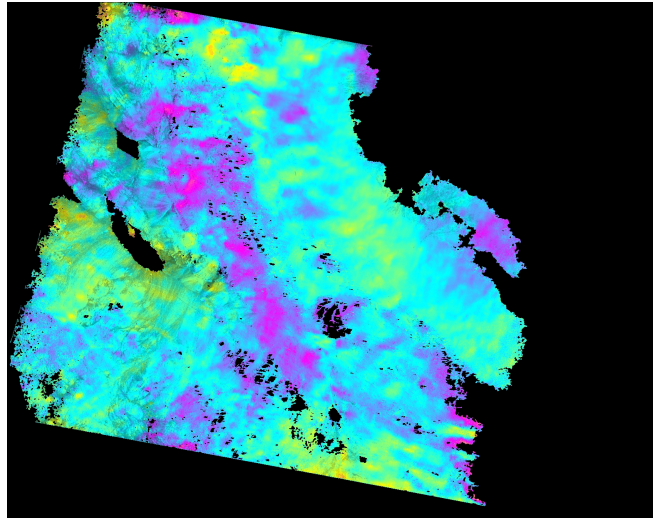
MNT



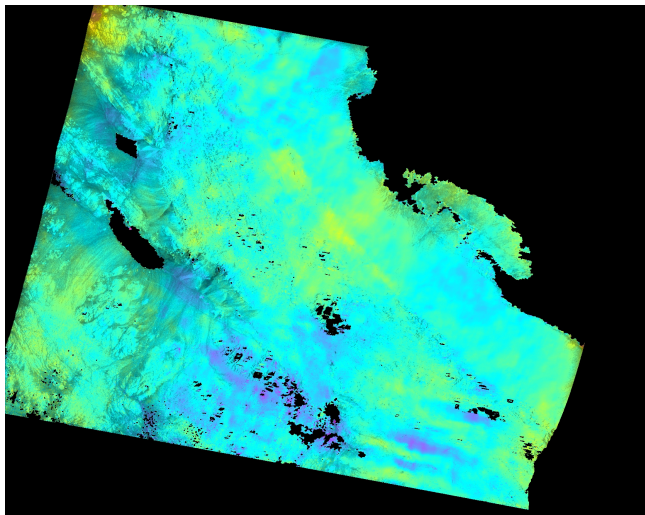
ENVISAT : Track 306 Frame 3005



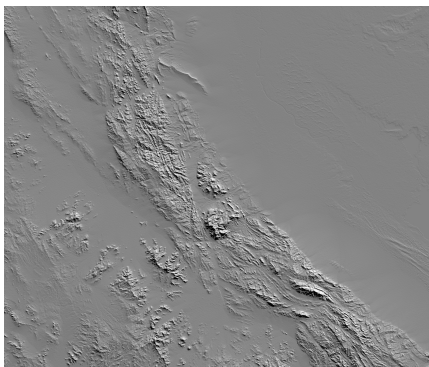
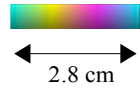
24/06/2003_02/08/2005



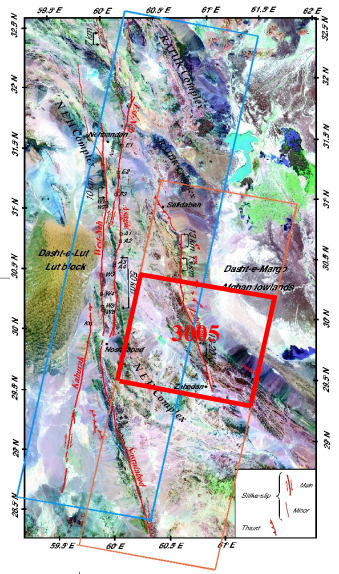
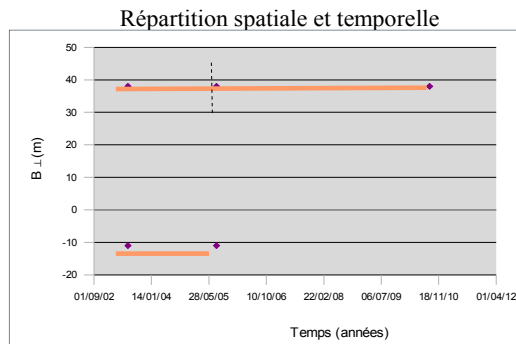
02/08/2005_10/08/2010



24/06/2003_10/08/2010

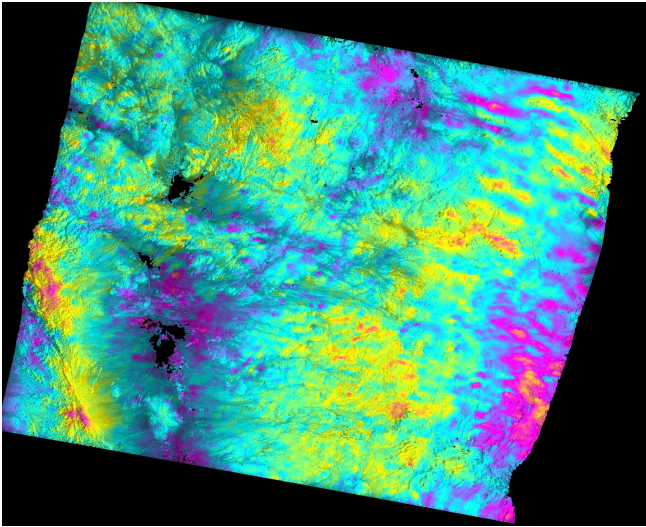


MNT

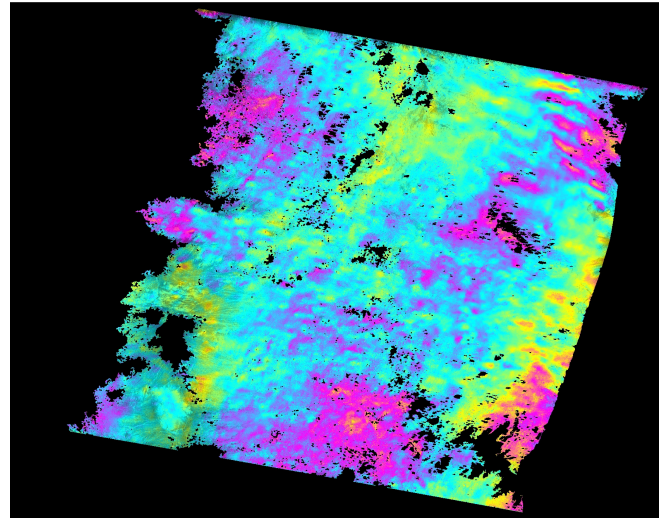


Situation

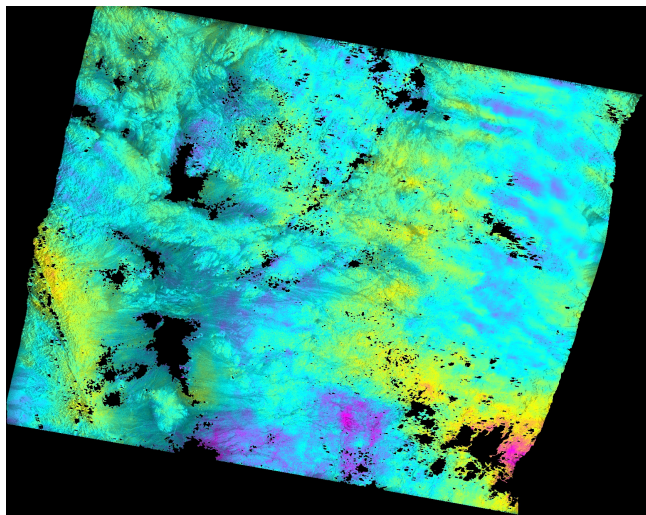
ENVISAT : Track 306 Frame 3021



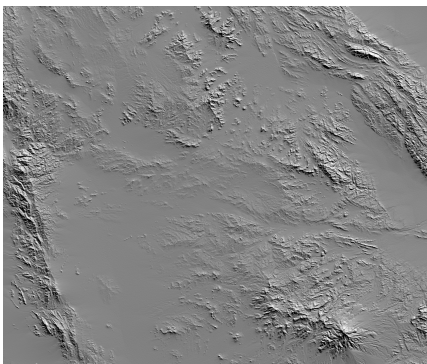
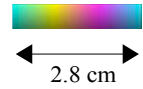
24/06/2003_02/08/2005



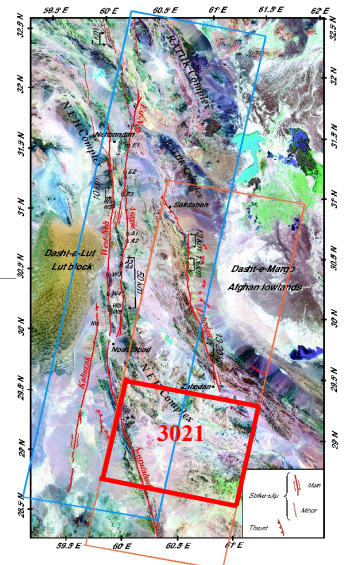
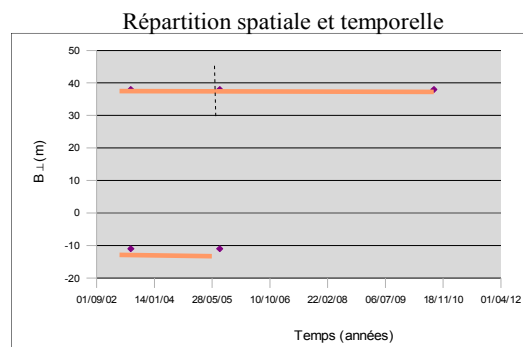
02/08/2005_10/08/2010



24/06/2003_10/08/2010

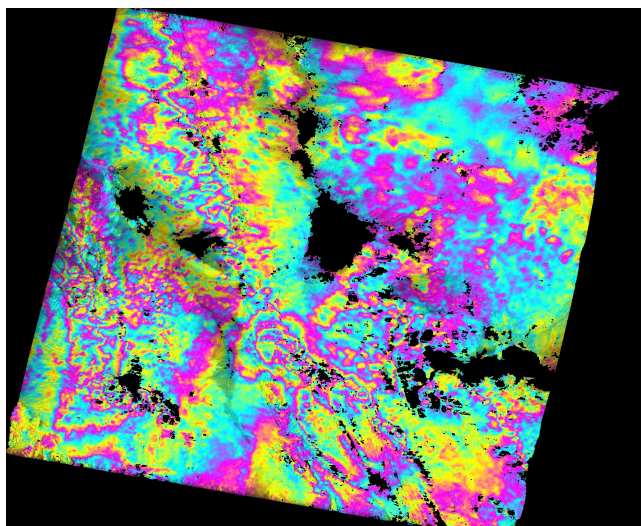


MNT

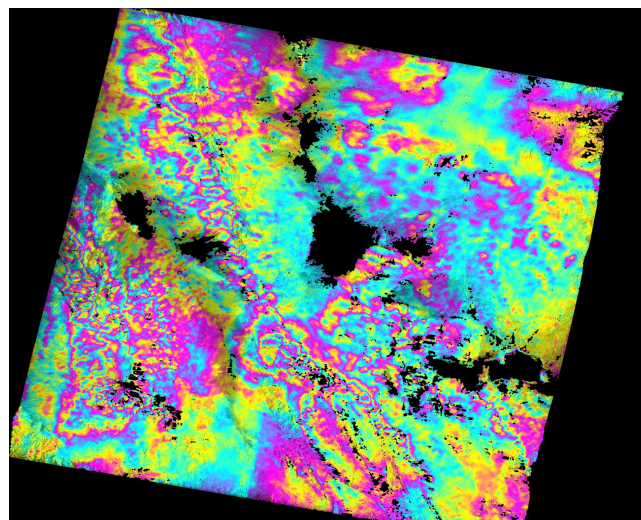


Situation

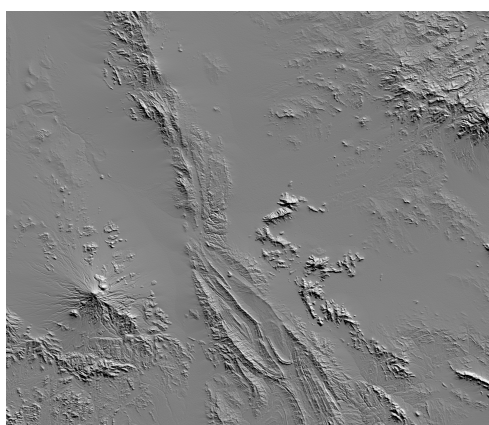
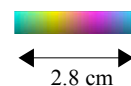
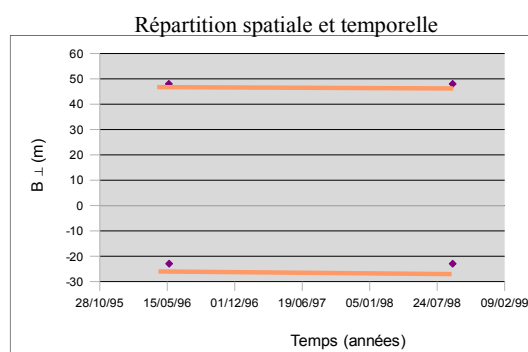
ERS : Track 306 Frame 3037



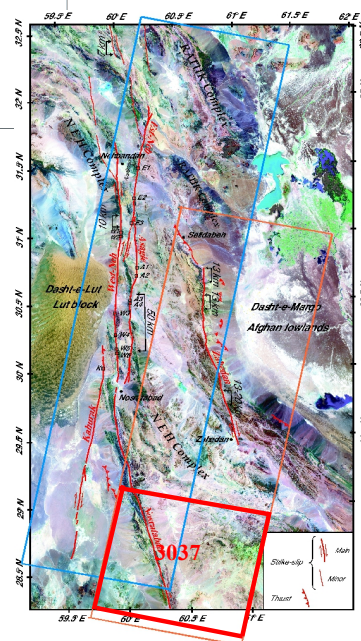
20/05/1996_08/09/1998



21/05/1996_08/09/1998

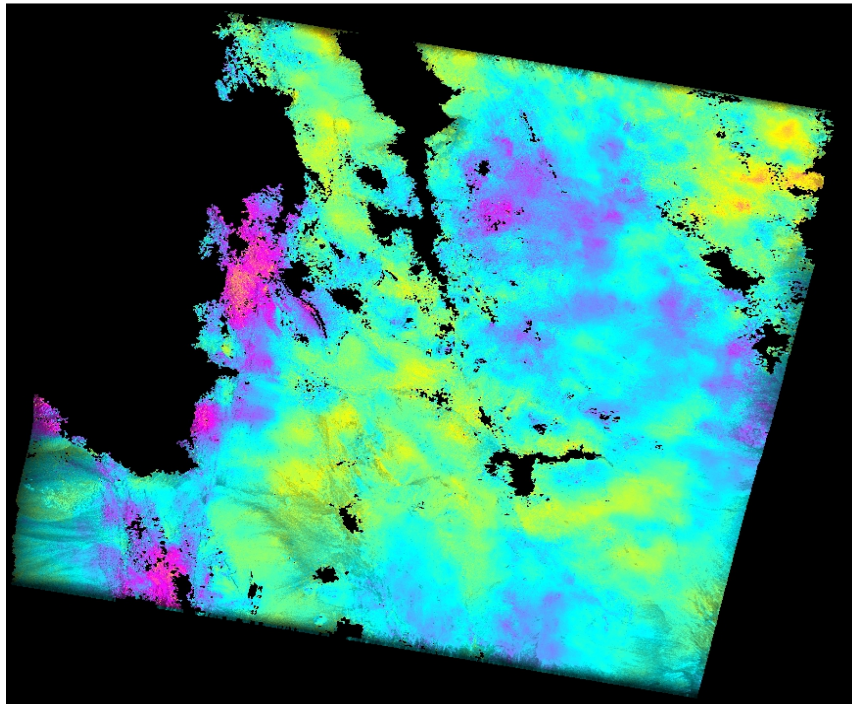


MNT

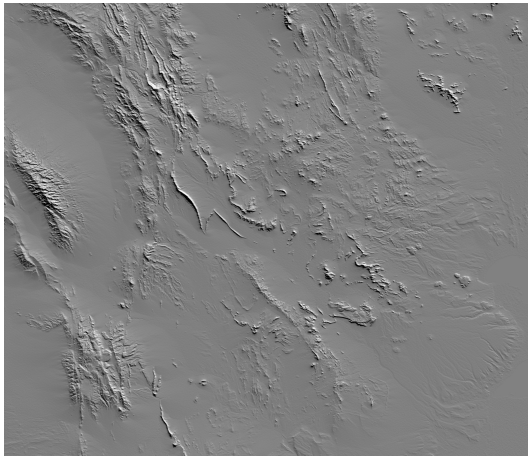


Situation

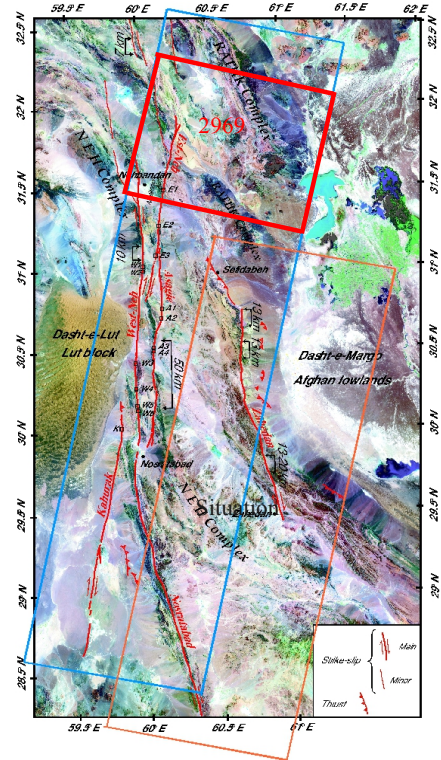
ERS : Track 77 Frame 2969



04/05/1996_10/10/2004

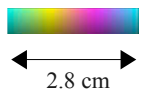
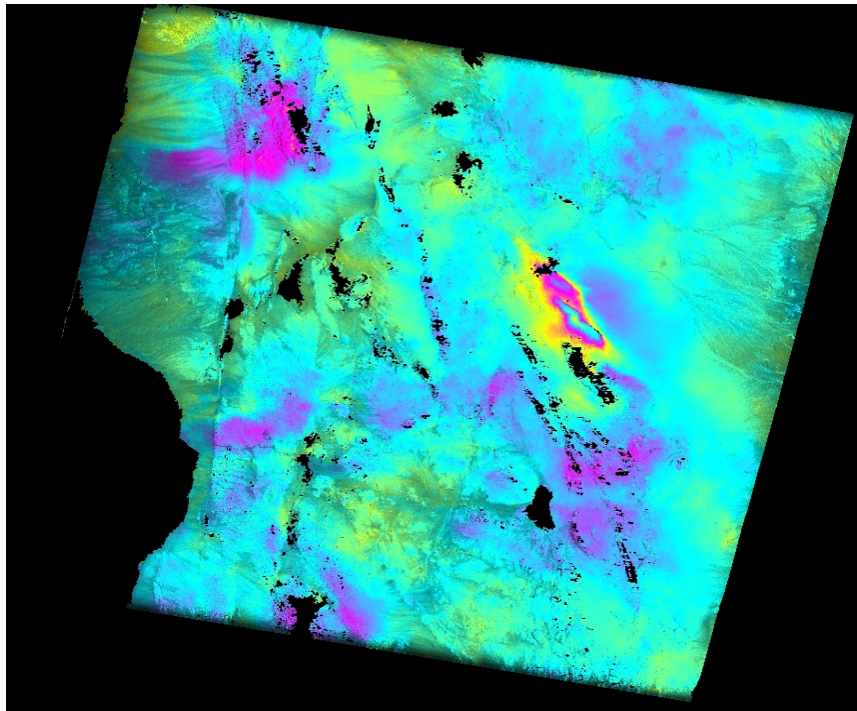


MNT

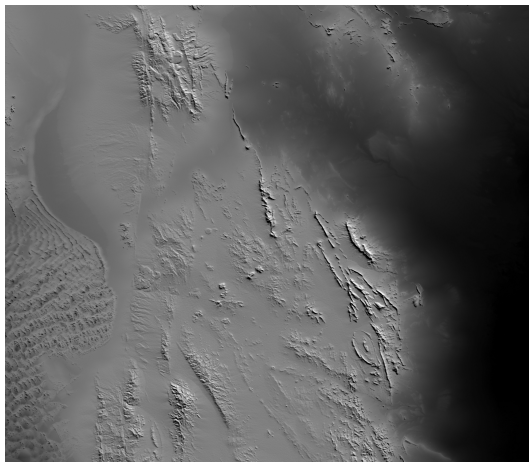


Situation

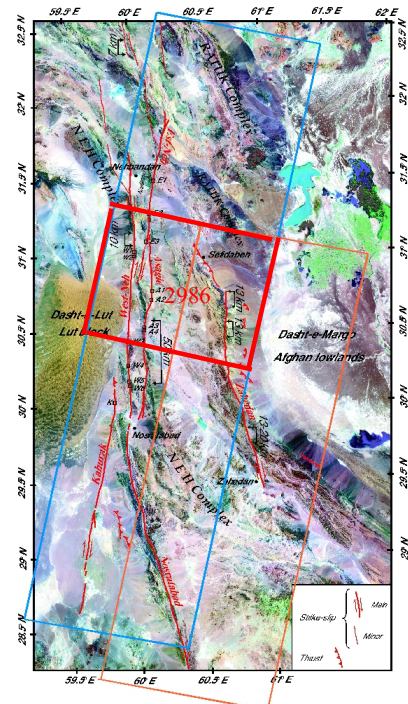
ERS : Track 77 Frame 2986



04/05/1996_10/10/2004

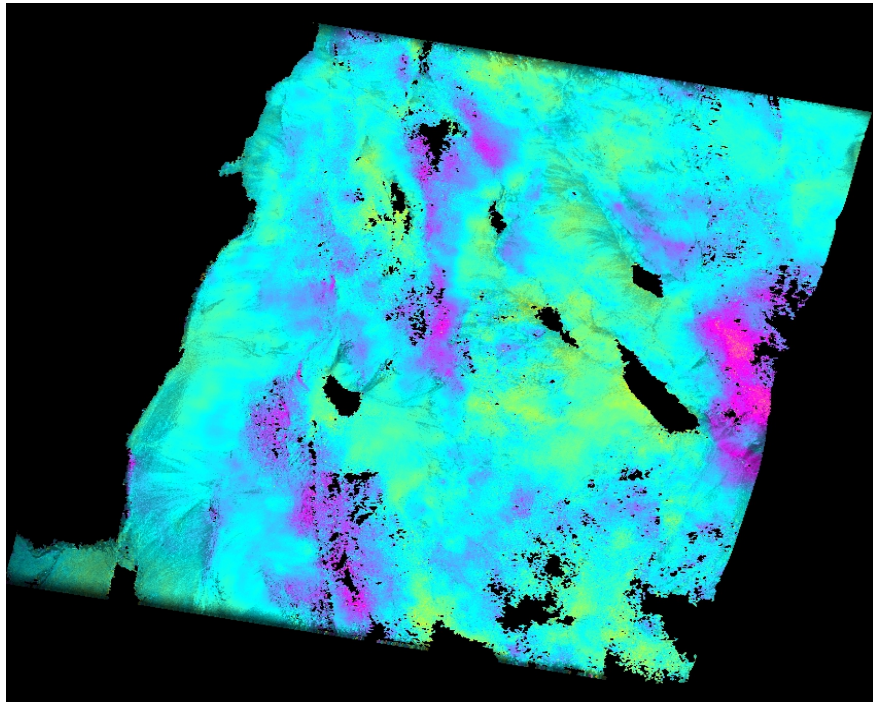


MNT

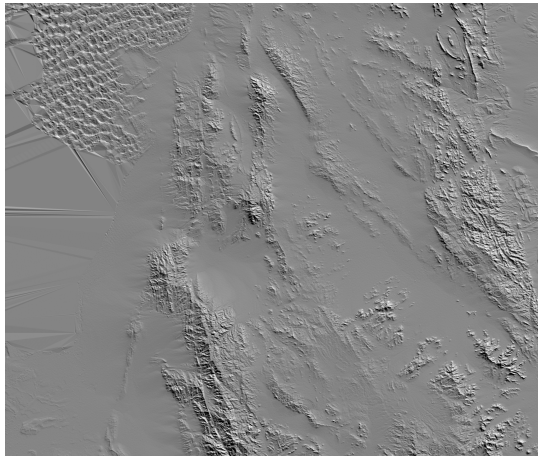


Situation

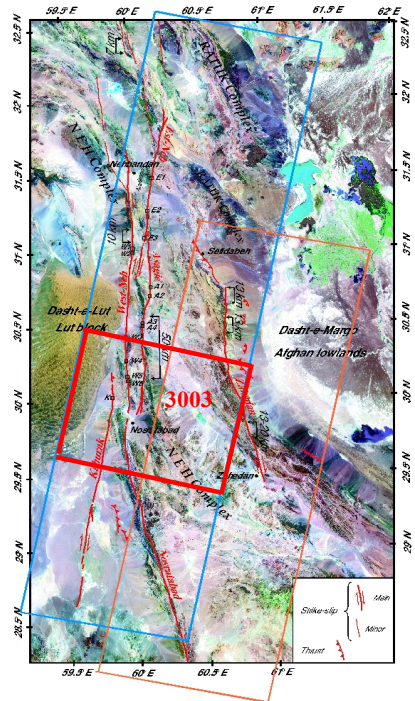
ERS : Track 77 Frame 3003



04/05/1996_10/10/2004

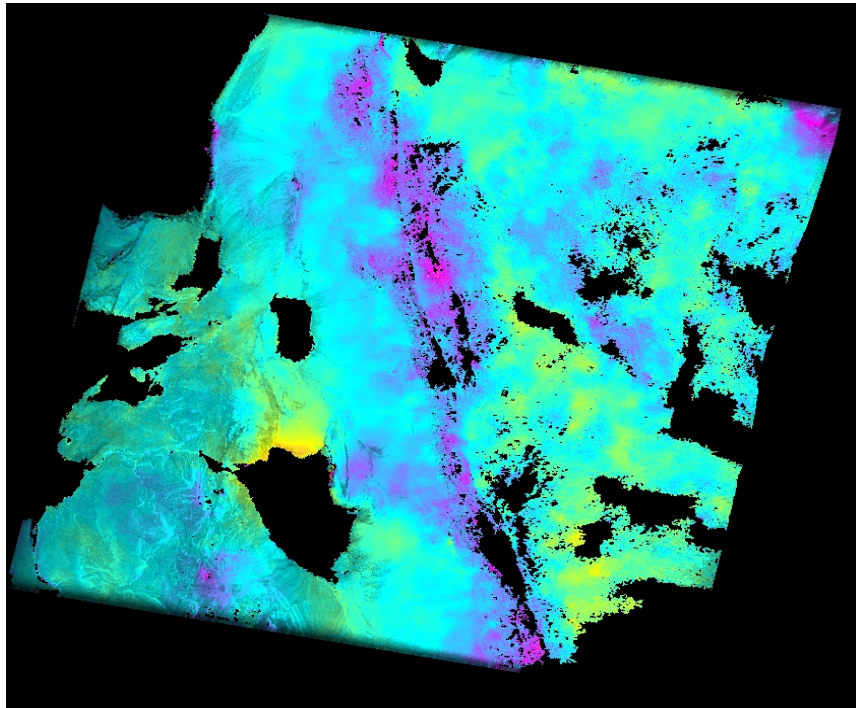


MNT

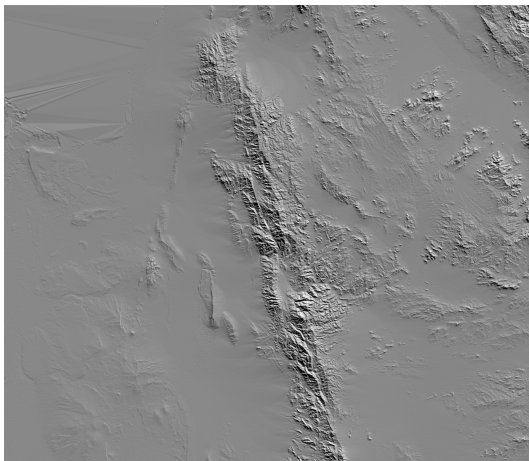


Situation

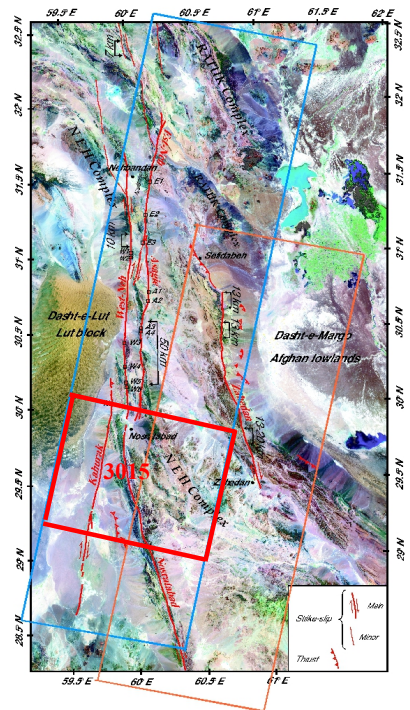
ERS : Track 77 Frame 3015



04/05/1996_10/10/2004

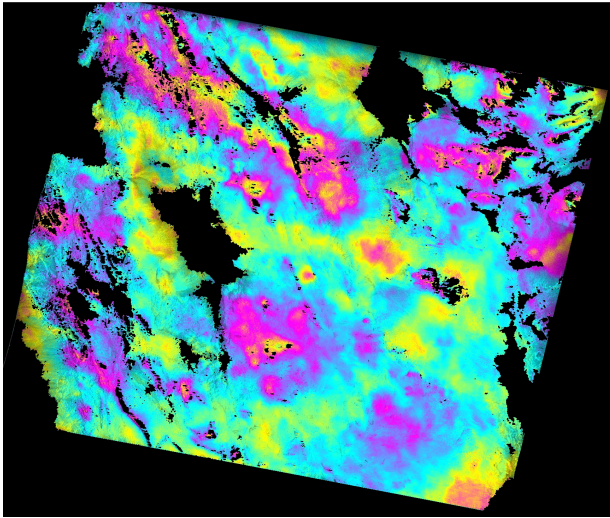


MNT

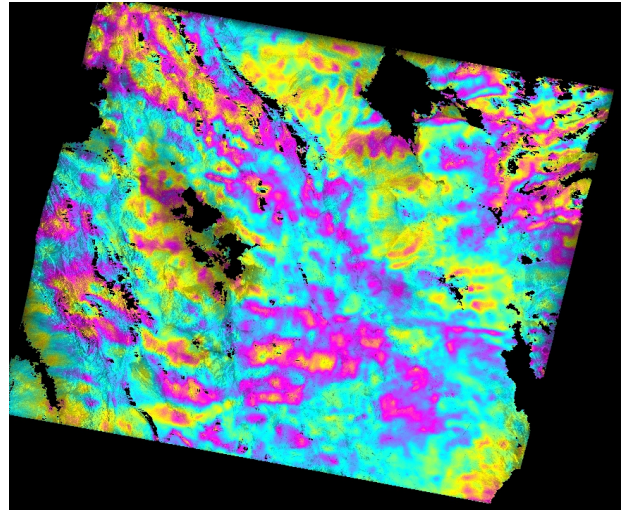


Situation

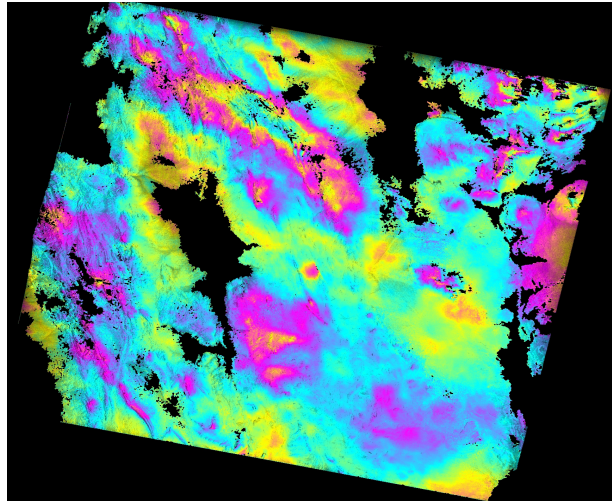
ENVISAT : Track 77 Frame 2960



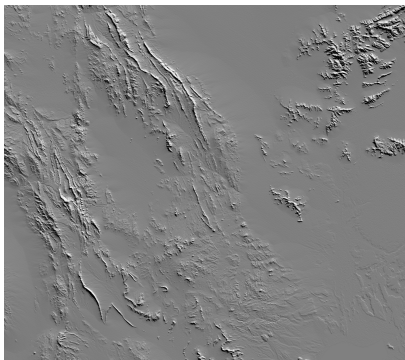
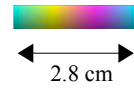
23/01/2005_27/04/2008



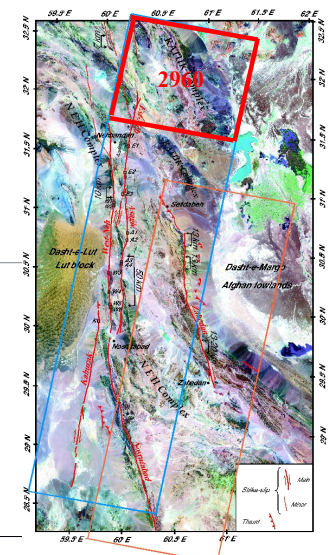
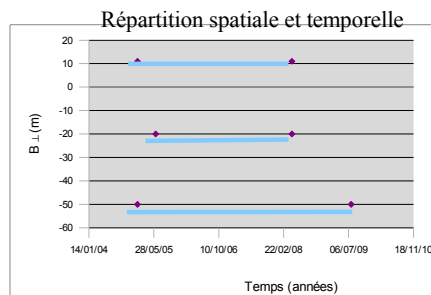
12/06/2005_27/04/2008



23/01/2005_26/07/2009

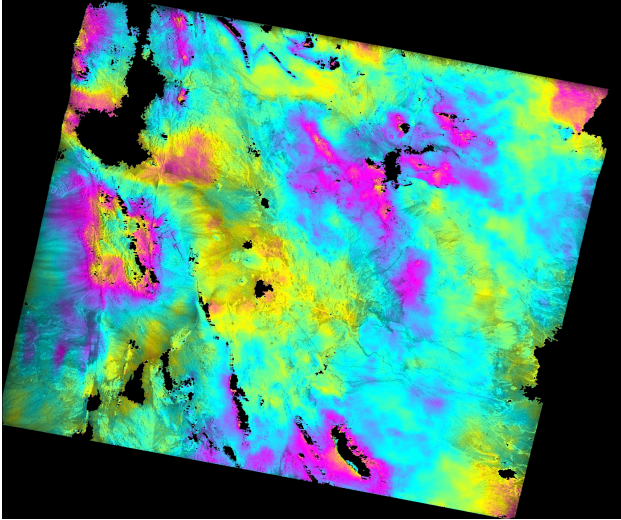


MNT

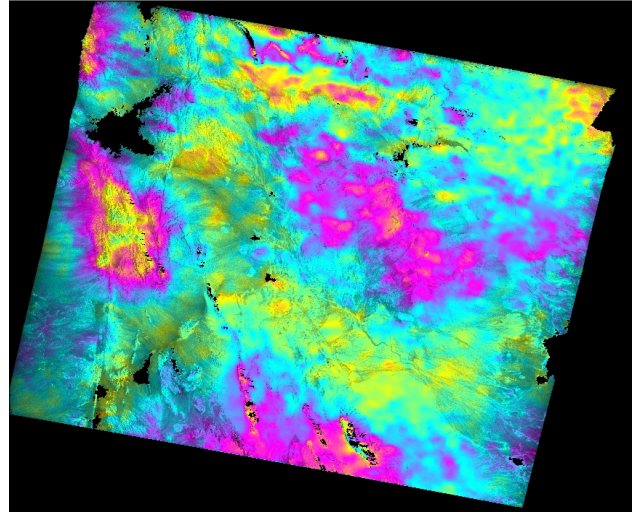


Situation

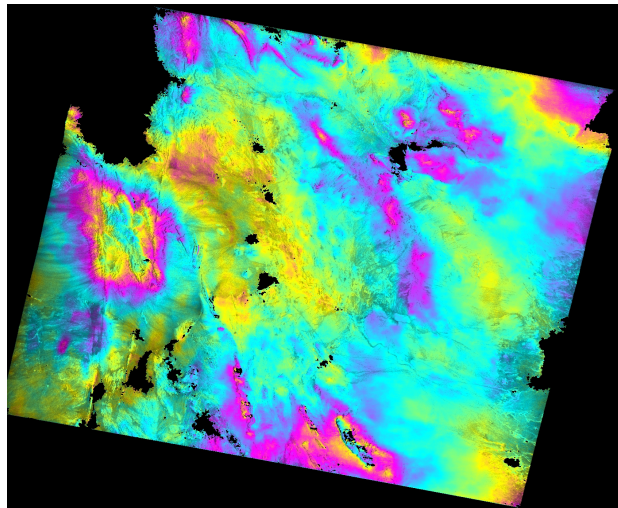
ENVISAT : Track 77 Frame 2978



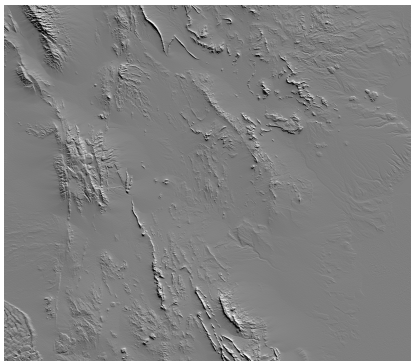
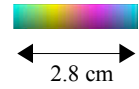
23/01/2005_27/04/2008



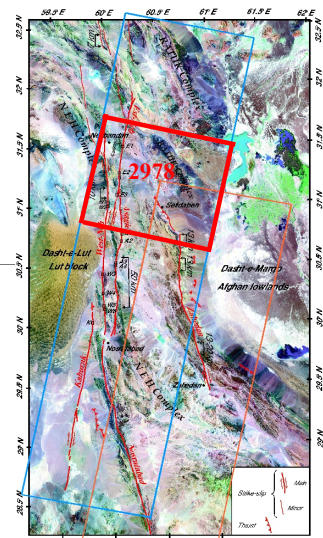
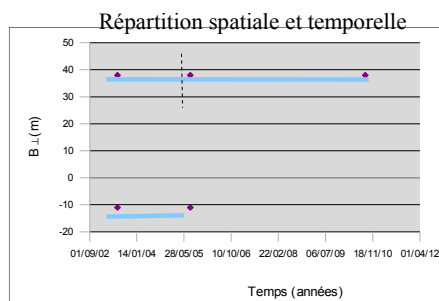
12/06/2005_27/04/2008



23/01/2005_26/07/2009

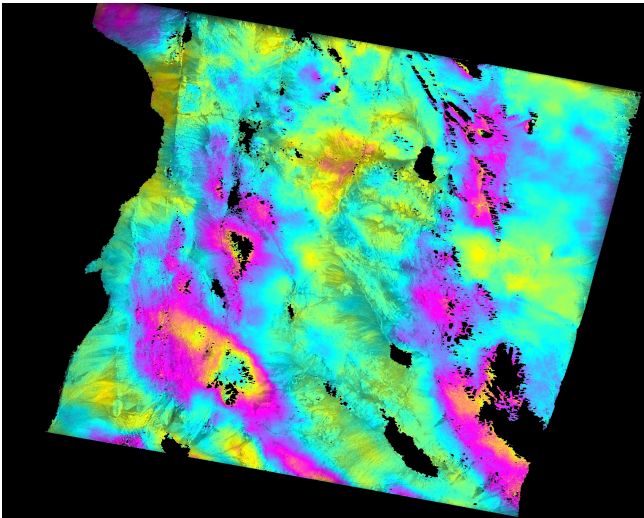


MNT

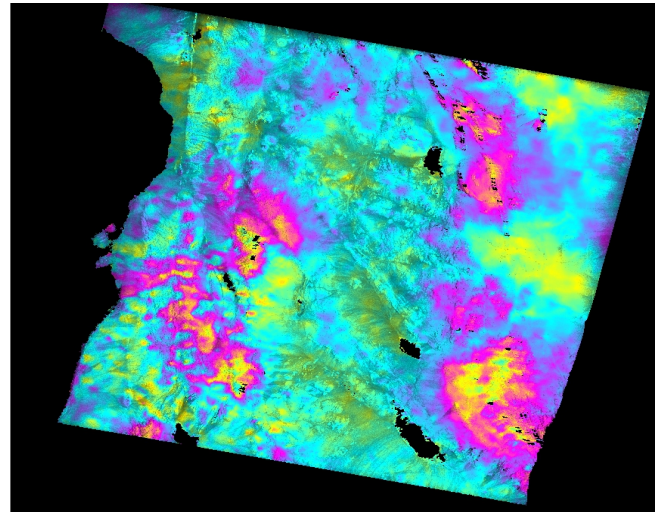


Situation

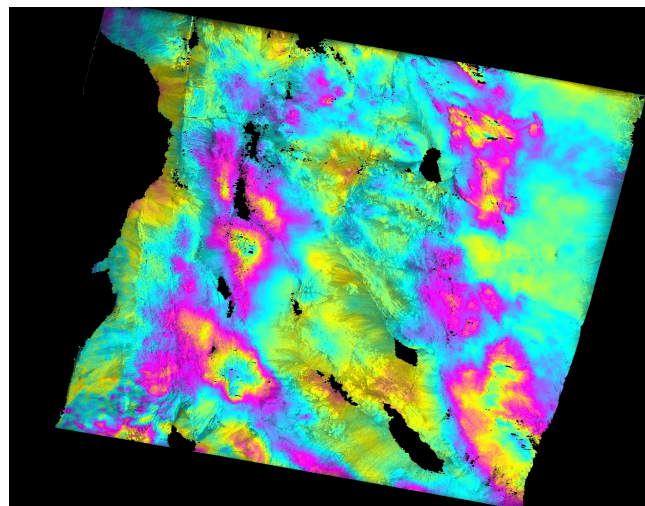
ENVISAT : Track 77 Frame 2996



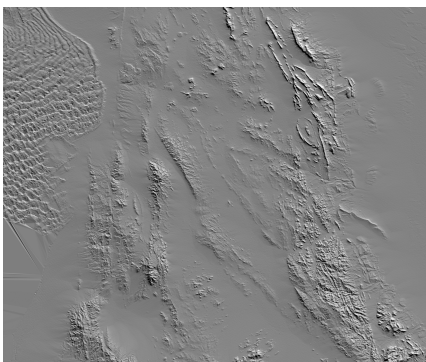
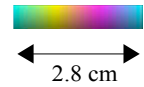
23/01/2005_27/04/2008



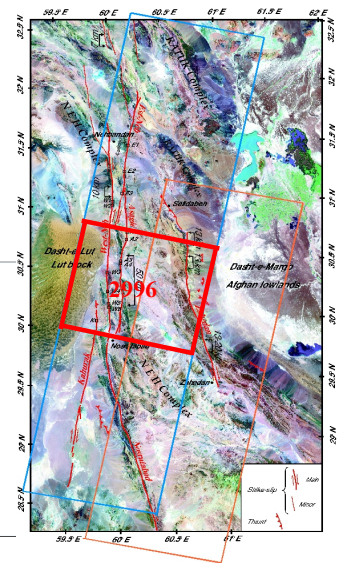
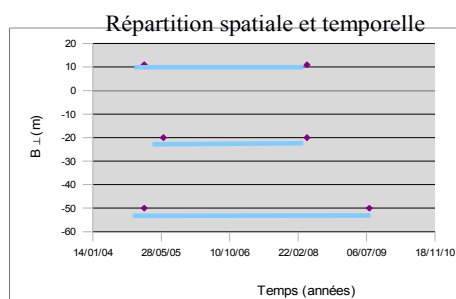
12/06/2005_27/04/2008



23/01/2005_26/07/2009

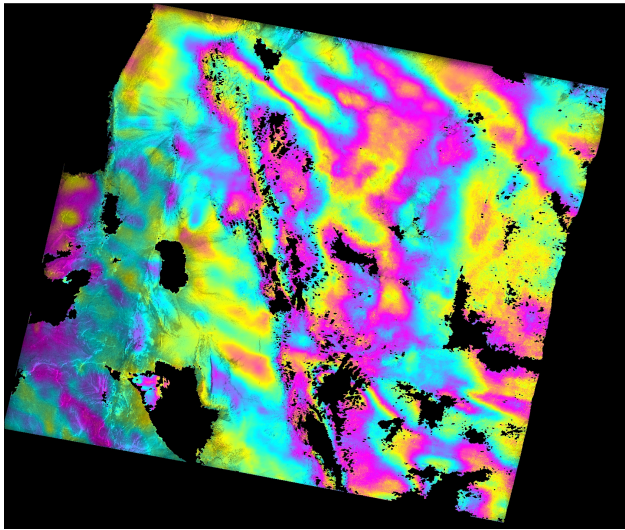


MNT

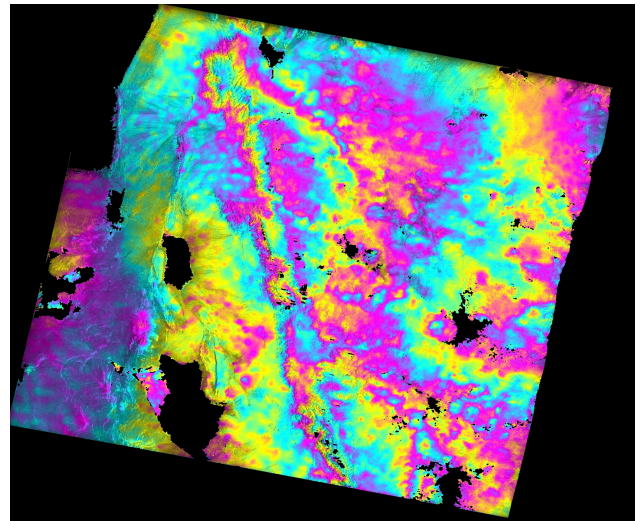


Situation

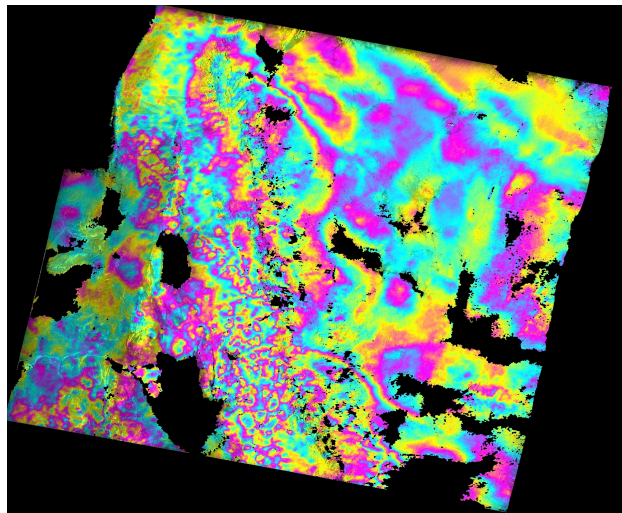
ENVISAT : Track 77 Frame 3014



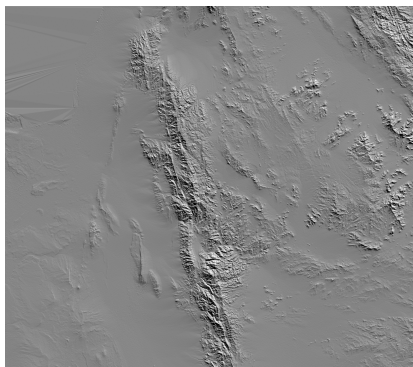
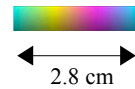
23/01/2005_27/04/2008



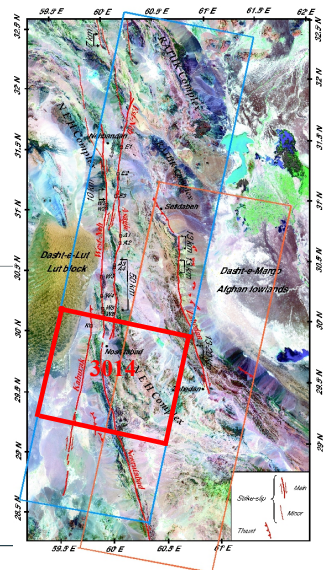
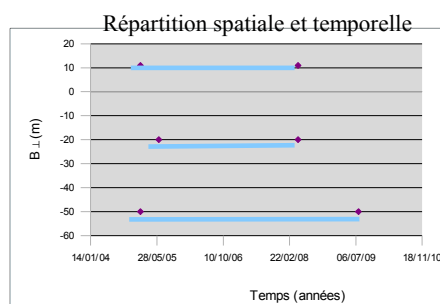
12/06/2005_27/04/2008



23/01/2005_26/07/2009

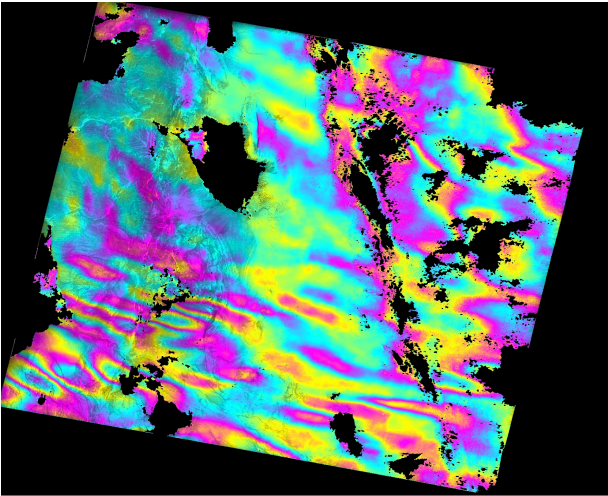


MNT

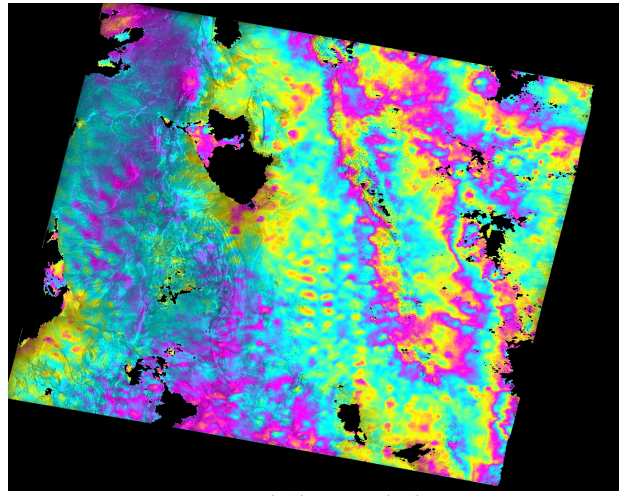


Situation

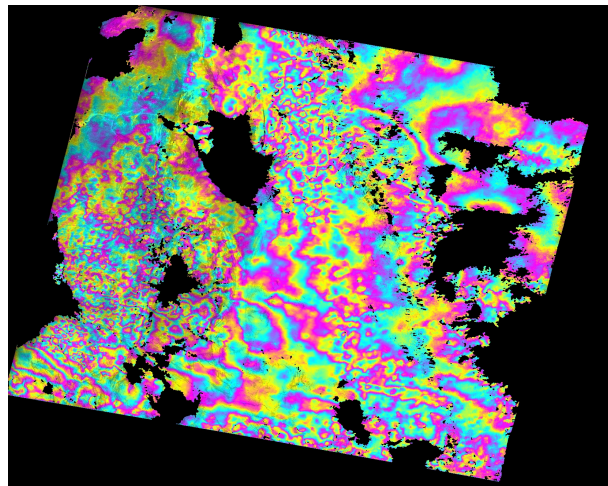
ENVISAT : Track 77 Frame 3025



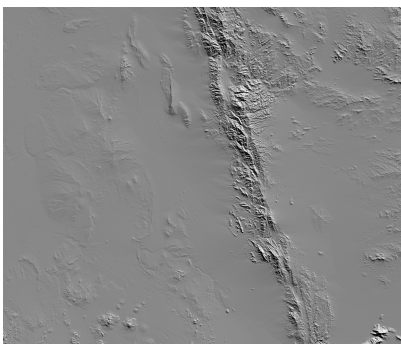
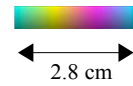
23/01/2005_27/04/2008



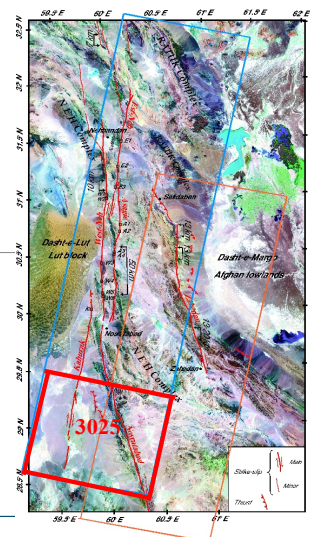
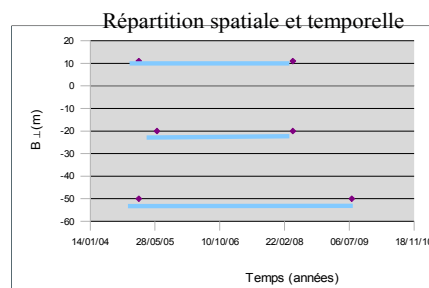
12/06/2005_27/04/2008



23/01/2005_26/07/2009



MNT



Situation

Mesures des Déformations du Sol par Interférométrie Radar : Application à la Sismotectonique de l'Iran.

Mémoire d'Ingénieur CNAM, Paris 2013

RESUME

Les images radars haute résolution acquises régulièrement par les satellites offrent l'opportunité de mesurer les déformations de la Terre. Les points du sol sont mesurés tous les 10m environ avec une précision typiquement meilleure que 1cm. La technique de l'interférométrie différentielle radar (DInSAR) permet de mesurer ce type de déplacement du sol. Elle est utilisée dans des domaines variés tels que le génie civil, la gestion des risques ou encore les Sciences de la Terre. Son principe consiste à mesurer la différence de phase entre deux images radars acquises à deux instants différents. Cette étude consiste à appliquer la méthode DInSAR aux déformations tectoniques de l'Est de l'Iran, celles-ci étant discutées sur un plan scientifique. Un projet soumis à l'agence Spatiale Européenne à permis d'obtenir 39 interférogrammes à partir d'images radars satellitaires ERS-1-2 et ENVISAT. Les interférogrammes couvrent une zone d'environ 150*400 km sur une période d'une dizaine d'années. Les résultats obtenus montrent que le champ de déplacement des failles n'excède pas 2-3 mm/an alors que des mesures GPS suggèrent que celui-ci est d'environ 13mm/an.

Mots clés : Iran, Déformations, Tectonique, Interférométrie différentielle radar, Interférogramme, ERS, ENVISAT.

ABSTRACT

High Resolution Radar images regularly acquired by satellites offer the opportunity to measure displacement maps of the ground that are dense (one measurement every about 10m on the ground) and highly accurate (uncertainty is typically better than 1cm). The technique is referred to as Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (DInSAR). It does open a wide range of application in civil engineering, risk mitigation and Earth sciences. It mainly consists in the phase difference of the phase of radar images acquired at different dates. In this study we apply DInSAR to the highly disputable tectonics deformation rate of Eastern Iran. From our science project accepted by the European Space Agency, we derived 39 interferograms from ERS-1-2 and ENVISAT satellites. Interferograms cover a region over 150*400 km and a 10 years period of time. The results show that the deformation over the faults can not exceed a few (2-3 mm) per year while some authors suggest velocity larger than 13 mm/y from GPS measurements and modeling.

Key words : Iran, Deformations, Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry, Tectonic, Interferogram, ERS, ENVISAT