



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi –Tébessa –  
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département : Sciences de la Terre et de l'univers



THESE DE DOCTORAT (L.M.D)  
Domaine : *Sciences de la Terre et de l'univers*  
Filière : *Géologie*  
Option : *Environnement Sédimentaire*

Thèse :

La Modélisation Du Risque D'effondrement De  
Terrain Par L'application des Méthodes  
d'Interférométrie : Cas D'étude Dra Douamis  
Cheria-Tébessa- NE Algérie

Présentée par :  
HAMDI Loubna

Devant le jury :

|                                   |            |  |                      |
|-----------------------------------|------------|--|----------------------|
| <b><i>Baali Fethi</i></b>         | Professeur | <i>Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi</i> | <i>Président</i>     |
| <b><i>Djamel Boubaya</i></b>      | Professeur | <i>Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi</i> | <i>Examineur</i>     |
| <b><i>Djaiz Fouad</i></b>         | Professeur | <i>Université Batna 2</i>                      | <i>Examineur</i>     |
| <b><i>Chouabi Abdelmadjid</i></b> | Professeur | <i>Université Badji Mokhtar Annaba</i>         | <i>Examineur</i>     |
| <b><i>Defaflia Nabile</i></b>     | Professeur | <i>Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi</i> | <i>Encadrant</i>     |
| <b><i>Fehdi Chamseddine</i></b>   | Professeur | <i>Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi</i> | <i>Co- Encadrant</i> |

Date de soutenance : 05/10/2023

Mention : Très Honorable



## Résumé

---

La détection, la cartographie et la modélisation spatio-temporelle des déformations de la surface terrestre nécessitent une observation et une mesure fiables. Les technologies spatiales fournissent des mesures globales, dynamiques et diverses de la surface de la Terre et de ses variations. Les radars imageurs font partie des systèmes d'observation de la Terre. Le bassin de Chéria en Algérie souffre des problèmes d'affaissement de terrain. Ce phénomène s'accroît ces dernières années dues à l'expansion démographique et l'exploitation incontrôlée des eaux souterraines. Les terrains karstiques sont généralement dominés par des systèmes aquifères et/ou des cavités souterraines. La surexploitation des eaux souterraines dans ces zones induit souvent des affaissements de terrain et parfois des dolines. Les phases des signaux radar sont proportionnelles aux mesures télémétriques. L'exploitation de ces mesures, représentées sous forme d'images et application des concepts interférométriques. Cependant, les précisions requises pour la mesure de cette technique dépendent fortement des résolutions spatiales et temporelles des images, de leur qualité informationnelle, et des techniques de traitement et d'analyse à appliquer. Ce travail utilise techniques de Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) pour surveiller le taux d'affaissement des terrains en utilisant les données du satellite Sentinel-1 pour une période d'analyse de 2016 à 2022. Nos résultats démontrent que le bassin de Chéria souffre d'un affaissement de terrain. L'affaissement total cumulé atteint un maximum de -500 mm. Néanmoins, ces résultats peuvent être utilisés pour extraire les zones susceptibles au déplacement vertical, évaluer la déformation de surface de la région, réduire les pertes humaines et l'impact économique des événements d'effondrement qui pourraient déclencher à tout moment.

**Mots-clés :** *affaissement des terrains ; InSAR ; karst ; Géorisques ; PSInSAR*

## Abstract

---

The detection, mapping and spatiotemporal modelling of land surface deformation require reliable observation and measurement. Space technologies provide global, dynamic and diverse measurements of the Earth's surface. Imaging radar systems are part of Earth observation systems. The Cheria basin in Algeria suffers from severe land subsidence issues and this phenomenon is increasing in recent years due to population expansion and uncontrolled groundwater exploitation. Karstic terrains are usually dominated by aquifer systems and/or underground cavities. Groundwater overexploitation often induces land subsidence and sometimes sinkholes. The phases of the radar signals are proportional to the telemetric measurements. The exploitation of these measurements, represented as images, has led to interferometric concepts. However, the accuracies required for the measurement depend strongly on the spatial and temporal resolutions of the images, their informational quality, and the processing and analysis techniques to be applied. In this research persistent scatterer interferometry synthetic aperture radar (PS-InSAR) technique was used to monitor the land subsidence rate by employing Sentinel-1 satellite data for the period of analysis from 2016 to 2022. Our results demonstrate that the Chéria basin experiences a serious land subsidence phenomenon, the total cumulative subsidence reached a maximum of -500 mm. Nonetheless, these results can be used to extract the susceptible zones for vertical ground displacement and evaluate the surface deformation of the region for reducing damages (e.g., human losses, economic impact, and environmental degradation) that may occur in the future (e.g., sinkholes), and can be further utilized in perspective for a sinkhole early warning system.

**Keywords:** *land subsidence; InSAR; karst; Sinkholes; geohazard; PSInSAR*

اكتشاف ورسم الخرائط لنمذجة التغيرات المكانية والزمنية على سطح الأرض تتطلب مراقبة وقياسات دقيقة. توفر تقنيات الفضاء قياسات متنوعة ذات مجال واسع وديناميكية لمراقبة سطح الأرض و تعد أنظمة رادار التصوير جزءاً من أنظمة مراقبة الأرض. يعاني حوض الشريعة في الجزائر من مشاكل هبوط شديدة في الأرض وهذه الظاهرة أخذت في الازدياد في السنوات الأخيرة بسبب التوسع السكاني والاستغلال الغير المنضبط للمياه الجوفية. المناطق التي تتواجد بها تضاريس كاريستية عادة ما تتكون على أنظمة الخزان الجوفي و / أو التجاويف الجوفية. الاستغلال المفرط للمياه الجوفية في مثل هذه المناطق يؤدي إلى هبوط الأرض وأحياناً انهيارات لسطح الأرض. تتناسب إشارات الرادار مع القياسات عن بعد و استغلال هذه القياسات ، الممثلة في صور ، يادي إلى مفاهيم قياس التداخل. ومع ذلك ، فإن الدقة المطلوبة لقياس هذا الارتفاع واختلافاته تعتمد بشدة على الدقة المكانية والزمانية للصور ، وجودة المعلومات ، وتقنيات المعالجة والتحليل المراد تطبيقها. يستخدم هذا العمل تقنيات الرادار ذي الفتحة التركيبية المتناثرة المستمرة (PS-InSAR) لمراقبة معدل هبوط الأرض من خلال استخدام صور القمر الصناعي Sentinel-1 للفترة الممتدى من 2016 إلى 2022. توضح نتائجنا أن حوض الشريعة يواجه مشكلة هبوط سطح الأرض و بلغ إجمالي الهبوط المسجل على مدى 6 سنوات ازيد من 500 ملم. ومع ذلك ، يمكن استخدام هذه النتائج لاستخراج المناطق الأكثر عرضة للهبوط الشاقولي لسطح الأرض وتقييم التشوه في المنطقة لتقليل من الأضرار الناجمة (مثل الخسائر البشرية والأثر الاقتصادي والتدهور البيئي) التي قد تحدث في المستقبل ، ويمكن استخدامها أيضاً لإنشاء نظام إنذار ضد المخاطر.

**الكلمات المفتاحية:** هبوط الأرض ؛ *InSAR* ؛ كارست ؛ خطر جيولوجي ؛ PSInSAR .

## Remerciements

---

*Je tiens à remercier Dieu le tout puissant pour m'avoir donné la chance, la force et le courage pour terminer cette recherche. Je teins tout particulièrement à remercier infiniment mon marie Dr. Abdelaziz MERGHADI pour son aide et soutien durant toute la période de ce travail et qui m'a fait bénéficier de ces connaissances en géotechnique, risque naturel traitement des images et télédétection.*

*Je remercie mon directeur de thèse Monsieur Nabil DEFAFLIA et, Professeur à l'Université de Echahid Echikh Larbi Tebessi- Tébessa de leur accueil avec bienveillance, son aide pour améliorer ce travail. Ma gratitude et ma profonde reconnaissance à mon co-directeur de thèse Monsieur Chamssedine FEHDI, Professeur à l'Université de Echahid Echikh Larbi Tebessi- Tébessa pour son égard pour son encadrement et bénéficié toujours de ces connaissances pour leurs remarques pertinentes qui m'ont permis d'améliorer ce travail.*

*J'adresse mes remerciements les plus sincères à Monsieur Fethi BAALI, Professeur à l'Université de Echahid Echikh Larbi Tebessi -Tébessa- pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de cette thèse.*

*Je remercie également Monsieur Djamel BOUBAYA, Professeur à l'Université de Echahid Echikh Larbi Tebessi- Tébessa et Monsieur Djaiz Fouad, Professeur à Université Batna 2 et Monsieur Chouabi Abdelmadjid, Professeur à Université Badji Mokhtar Annaba d'avoir accepté de faire partie de jury, pour leurs commentaires et recommandations précieuses.*

*Ma gratitude à Mon beau père Abdelhamid pour son aide durant ce travail et ces remarques pertinentes qui m'ont permis d'améliorer ce manuscrit.*

*Je dédie ma famille et particulièrement mes parents sans le soutien de Dieu et eux je n'ai pas pu de profiter de cette chance.*

# Sommaire

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>Résumé</b> .....   | <b>ii</b>  |
| <b>Abstract</b> .....   | <b>iii</b> |
| <b>ملخص</b> .....   | <b>iv</b>  |
| <b>Remerciements</b> .....  | <b>v</b>   |
| <b>Sommaire</b> .....   | <b>vi</b>  |
| <b>Glossaire Des Figures</b> .....  | <b>x</b>   |
| <b>Glossaire Des Tableaux</b> .....   | <b>xii</b> |
| <b>Chapitre 1: Introduction</b> .....   | <b>1</b>   |
| 1.1 La problématique.....   | 3          |
| 1.2 Les Objectifs de la thèse.....  | 4          |
| 1.3 Aperçu et organisation de la thèse.....   | 5          |
| <b>Chapitre 2: Cadre Théorique</b> .....  | <b>7</b>   |
| 2.1 Phénoménologie d'affaissement et d'effondrement.....  | 7          |
| 2.1.1 Les mouvements de terrain .....   | 7          |
| 2.1.1.1 Les mouvements verticaux.....   | 8          |
| 2.1.1.1.1 Affaissements.....  | 8          |
| 2.1.1.1.1.1 La consolidation.....   | 8          |
| 2.1.1.1.1.2 Les tassements d'ouvrages.....  | 8          |
| 2.1.1.1.1.3 Les affaissements des cavités souterraines : .....  | 9          |
| 2.1.1.1.2 Effondrements.....  | 10         |
| 2.1.1.1.2.1 Les dolines de dissolution .....  | 11         |
| 2.1.1.1.2.2 Les dolines de subsidence .....   | 12         |
| 2.1.1.1.2.3 Les dolines d'effondrement.....   | 13         |
| 2.1.1.2 Les mouvements de pente .....   | 14         |
| 2.1.1.2.1 Ecoulements rocheux.....  | 14         |
| <b>La Modélisation Du Risque D'effondrement De Terrain Par L'application Des Méthodes D'interférométrie : Cas</b> |            |
| <i>D'étude Dra Douamis Cheria-Tébessa- Ne Algérie</i>   | <b>vi</b>  |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| 2.1.1.2.2   | Mouvements lents et continus.....                       | 15 |
| 2.1.1.2.2.1 | Reptation.....  | 15 |
| 2.1.1.2.2.2 | Fluage.....   | 15 |
| 2.1.1.2.3   | Glissements.....  | 16 |
| 2.1.1.2.3.1 | Glissement rotationnel.....                             | 16 |
| 2.1.1.2.3.2 | Glissement plan.....                                    | 17 |
| 2.1.1.2.4   | Coulée.....   | 17 |
| 2.2         | Principes de la télédétection radar.....                | 18 |
| 2.2.1       | La télédétection.....                                   | 18 |
| 2.2.1.1     | Les capteurs en télédétection.....                      | 19 |
| 2.2.1.1.1   | Un capteur passif.....                                  | 19 |
| 2.2.1.1.2   | Un capteur actif.....                                   | 19 |
| 2.2.1.2     | Le rayonnement électromagnétique et ses propriétés..... | 20 |
| 2.2.1.2.1   | La physique du rayonnement électromagnétique.....       | 20 |
| 2.2.1.2.2   | Onde et Polarisation.....                               | 21 |
| 2.2.1.3     | Le système radar imageur.....                           | 22 |
| 2.2.2       | Télédétection radar.....                                | 24 |
| 2.2.2.1     | Les satellites.....                                     | 24 |
| 2.2.2.2     | Les orbites satellitaires.....                          | 27 |
| 2.2.2.3     | Les images SAR.....                                     | 27 |
| 2.2.3       | Principe de mesure des images SAR.....                  | 27 |
| 2.2.3.1     | Système d'acquisition.....                              | 28 |
| 2.2.3.1.1   | Géométrie d'acquisition.....                            | 28 |
| 2.2.3.1.2   | La résolution spatiale.....                             | 32 |
| 2.2.3.1.3   | La résolution en distance.....                          | 32 |
| 2.2.3.1.4   | La résolution en azimute.....                           | 35 |
| 2.2.3.2     | L'interférométrie.....                                  | 36 |
| 2.2.3.2.1   | Principe de l'interférométrie.....                      | 36 |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 2.2.3.2.2  | Phase et interférence .....                                       | 37 |
| 2.2.3.2.3  | Interférométrie différentielle DInSAR.....                        | 38 |
| 2.2.3.2.3.1  | Eléments de contribution de l'interférométrie différentielle..... | 40 |
| <b>Chapitre 3: Méthodologie De Recherche .....</b> | <b>42</b>   |    |
| 3.1  | Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) .....            | 42 |
| 3.1.1  | La phase interférométrique .....                                  | 42 |
| 3.2  | Persistent Scatterer Interferometry .....                         | 45 |
| 3.2.1  | Origine et développement de la technique. ....                    | 45 |
| 3.2.2  | Principe .....  | 46 |
| 3.3  | Traitement des images InSAR.....                                  | 47 |
| 3.3.1  | Données disponibles sur la zone d'étude .....                     | 48 |
| 3.3.2  | Construction d'un produit interférométrique .....                 | 50 |
| 3.4  | Traitement PSInSAR (Workflow).....                                | 54 |
| 3.5  | Analyse de déplacement.....                                       | 57 |
| <b>Chapitre 4: Contexte d'étude .....</b>          | <b>62</b>   |    |
| 4.1  | Région d'étude .....  | 62 |
| 4.1.1  | Situation géographique.....                                       | 62 |
| 4.1.2  | Occupation des sols et la couverture végétale.....                | 63 |
| 4.1.3  | Climat.....   | 64 |
| 4.1.4  | Hydrologie .....  | 65 |
| 4.1.5  | Hydrogéologie.....  | 67 |
| 4.1.6  | Séismicité .....  | 68 |
| 4.1.7  | Géologie .....  | 69 |
| 4.2  | Les affaissements du bassin de Chéria .....                       | 72 |
| 4.2.1  | Les affaissements de Draa-Douamis .....                           | 73 |
| 4.2.2  | Les affaissements de Harkat Bouziane .....                        | 75 |

|   |   |            |
|---|---|------------|
| 4.2.3   | Fissuration et karstification .....       | 76         |
| <b>Chapitre 5: Analyse et Discussion des Résultats.....</b> |   | <b>78</b>  |
| 5.1   | Résultat .....                            | 78         |
| 5.2   | Discussion .....                          | 92         |
| <b>Chapitre 6: Conclusions .....</b>                        |   | <b>97</b>  |
| 6.1   | Les avantages de la technique InSAR ..... | 97         |
| 6.2   | Les limites de la technique InSAR .....   | 98         |
| 6.3   | Les recommandations .....                 | 99         |
| <b>Bibliographies .....</b>                                 |   | <b>101</b> |

## Glossaire Des Figures

---

|  |    |
|--|----|
| Figure 2.1 Un tassement différentiel.....                                    | 9  |
| Figure 2.2 Affaissements des cavités.....                                    | 10 |
| Figure 2.3 Les dolines de dissolution.....                                   | 12 |
| Figure 2.4 Les dolines de subsidence.....                                    | 13 |
| Figure 2.5 Les dolines d'effondrement.....                                   | 14 |
| Figure 2.6 Ecoulements rocheux.....  | 15 |
| Figure 2.7 Les mouvements lents et continu, fluage et reptation.....         | 16 |
| Figure 2.8 Glissement rotationnel.....                                       | 16 |
| Figure 2.9 Glissement plan.....  | 17 |
| Figure 2.10 Coulée.....  | 17 |
| Figure 2.11 Capteurs en télédétection.....                                   | 20 |
| Figure 2.12 Absorption, réflexion et transmission du rayonnement.....        | 21 |
| Figure 2.13 Direction de polarisation.....                                   | 21 |
| Figure 2.14 Onde électromagnétique.....                                      | 22 |
| Figure 2.15 Le système radar monostatique.....                               | 23 |
| Figure 2.16 Le système radar bistatique.....                                 | 24 |
| Figure 2.17 Les missions des satellite SAR.....                              | 25 |
| Figure 2.18 Orbite ascendante et descendantes.....                           | 27 |
| Figure 2.19 Géométrie d'acquisition d'image SAR.....                         | 30 |
| Figure 2.20 Distorsion géométrique d'une image SAR.....                      | 31 |
| Figure 2.21 La résolution spatiale.....                                      | 33 |
| Figure 2.22 Profil temporel d'une impulsion émise.....                       | 34 |
| Figure 2.23 Projection des pixels de la géométrie radar.....                 | 35 |
| Figure 2.24 Amplitude et la phase d'une image InSAR.....                     | 37 |
| Figure 2.25 Acquisition d'un couple d'images de la même zone d'étude.....    | 39 |
| Figure 2.26 Interférogramme.....   | 40 |
| Figure 3.1 Persistant Scatterer distribution dans un terrain réel.....       | 47 |
| Figure 3.2 Représentation des différents modes d'acquisition Sentinel-1..... | 49 |
| Figure 3.3 Workflow de construction d'un produit interférométrique.....      | 54 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 3.4 Illustration de la méthodologie globale adoptée dans la recherche. ....                 | 57 |
| Figure 3.5 Projection du déplacement sur l'axe de visée. ....                                      | 59 |
| Figure 4.1 Situation géographique du plateau de Chéria. ....                                       | 63 |
| Figure 4.2 Carte de la précipitation de la région d'étude. ....                                    | 65 |
| Figure 4.3 Le système hydrographique dans le plateau de Chéria. Modifié par Hamdi, 2023. ....      | 67 |
| Figure 4.4 Carte de découpage sismique de l'Algérie avec l'historique des séismes enregistré. .... | 68 |
| Figure 4.5 Carte géologiques de Chéria. Modifié par Hamdi, 2023. ....                              | 71 |
| Figure 4.6 Esquisse tectonique de la région de Tébessa. ....                                       | 72 |
| Figure 4.7 Situation géographique du plateau de Chéria. ....                                       | 73 |
| Figure 4.8 Représentation des dolines de Draa-Douamis. ....  | 74 |
| Figure 4.9 Schématisation des dolines de Chéria. ....  | 75 |
| Figure 4.10 Photo les effondrements de Harkat Bouziane. ....                                       | 76 |
| Figure 5.1 Carte de vitesse verticale moyenne de la zone d'étude. ....                             | 80 |
| Figure 5.2 Carte de vitesse horizontale moyenne de la zone d'étude. ....                           | 82 |
| Figure 5.3 Profils temporels PS-Sentinel 1. ....   | 85 |
| Figure 5.4 Mouvements cumulatifs verticale selon les profils. ....                                 | 87 |
| Figure 5.5 Positions et vue d'ensemble des huit sites sélectionnés. ....                           | 89 |
| Figure 5.6 Représentent avec un agrandissement d'ensemble des sites sélectionnés. ....             | 92 |
| Figure 5.7 Résultat de suivi du niveau piézométrique des trois forages, B1, B2 et B3. ....         | 94 |

## **Glossaire Des Tableaux**

---

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1.1 Les pays les plus exposés à risque d'affaissement. ....                                      | 1  |
| Tableau 2.1 Satellites et constellations SAR.....  | 25 |
| Tableau 3.1 Tableau récapitulatif des données radars utilisés. ....                                      | 50 |
| Tableau 4.1 Tableau descriptif résumant les formations géologiques constituant la région de Chéria. .... | 69 |

## Chapitre 1: Introduction

---

Les mouvements de terrain verticaux sont des phénomènes naturels existant partout dans le monde entier qui peuvent être causés par un large éventail de déclencheurs naturels ou anthropiques et peuvent provoquer des catastrophes. Les mouvements de terrain sont de plus en plus répandus et leurs conséquences ne cessent d'être plus lourdes, entraînant des coûts et des désordres plus au moins importants. Leurs fréquences et leurs intensités varient d'une région à une autre.

Le risque d'affaissement est un phénomène mondial, des villes entières s'enfoncent dans le sol à une vitesse vertigineuse tels que les pays ; Italie [1], Indonésie, Iran [2], Mexique [3], les États Unis [4], Émirats Arabe Unis [5], Turquie [6], la Chine [7]. Des multiples études menées par les chercheurs dans le but de cartographier les zones à risque, déterminer les facteurs déclenchants et essayer de trouver des solutions soit en contrôlant les facteurs principaux derrière ces états catastrophiques ou proposer des nouvelles zones d'extension urbaines alternatives moins menacées par ce risque. Les facteurs de cet affaissement sont multiples, dans la plupart des cas c'est un pompage excessif des aquifères qui crée des cavités souterraines (pareil au cas d'étude), affaissement des cavités minière, le poids croissant des infrastructures et ainsi la multiplication de la sécheresse et le réchauffement climatique qui sont des facteurs aggravants.

*Tableau 1.1 Les pays les plus exposés à risque d'affaissement.*

*Source : [8].*

| <i>Pays</i>       | <i>Indice d'affaissement du sol en 2010</i> |
|-------------------|---|
| <i>Chine</i>      | 60,8  |
| <i>Etats-Unis</i> | 54,2  |
| <i>Japon</i>      | 41  |
| <i>Egypte</i>     | 40,5  |
| <i>Inde</i>       | 39,3  |

|                   |      |
|-------------------|------|
| <i>Indonésie</i>  | 31,3 |
| <i>Mexique</i>    | 28,5 |
| <i>Pays-Bas</i>   | 24,2 |
| <i>Italie</i>     | 23,1 |
| <i>Bangladesh</i> | 22,3 |
| <i>Birmanie</i>   | 22,2 |
| <i>Algérie</i>    | 20,5 |
| <i>Taiwan</i>     | 20,1 |
| <i>Vietnam</i>    | 19,7 |

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur le phénomène d'affaissement des terrains dans un terrain karstique (d'après les études scientifiques antérieures). Les affaissements résultèrent principalement de la mobilisation souterraine de solides ou de fluides, peuvent se traduire en surface par un effondrement des cavités souterraines. Plusieurs recherches ont été faites dans le but d'aboutir une étude approfondie pour répondre à des objectifs bien déterminées afin de nous donner un portfolio complet de point de vue hydrogéologique et géotechnique pour mieux comprendre le site et les phénomènes naturels courant dans la région de Chéria.

L'identification des déformations de surface, suivi et modélisation sont des étapes essentielles d'une part pour obtenir des informations sur le dynamique et les conditions de déclenchement et d'autre part pour une meilleure appréhension (anticipation) de la manière dont cela peut affecter les structures et les infrastructures sur la surface.

La télédétection par synthetic aperture radar (SAR) est une technique avancée d'observation de la terre avec haute résolution. Le développement et l'amélioration de la résolution spatiale qu'a connue cette technique est due à l'utilisation d'une antenne courte qui peut simuler une antenne virtuelle de longueur très importante et peuvent affiner la résolution spatiale des images. L'imagerie radar a des applications multiples dans des domaines différents comme la détection de la déformation de surface par

interférométrie (glissements de terrain, subsidence,), la géologie (l'exploitation minière et pétrolière), l'actualisation des modèles numérique de terrain (DEM) [9, p. 6].

Le travail effectué au cours de cette étude est une application particulière de l'interférométrie radar ayant pour but d'exploiter des images SAR acquises sur la région d'étude par le satellite Sentinel-1, afin de mettre en œuvre une méthodologie générale pour quantifier l'état actuel et l'estimation des déplacements verticaux dans la région d'étude.

## 1.1 La problématique

La région d'étude a connu dans la dernière décennie deux sites différents d'effondrement, le premier s'est déroulé en 2002 en dehors la ville de Chéria a Draa-Douamis, et l'autre évènement en 2009 dans le quartier Harkat Bouziane au centre de la ville de Chéria. Les dégâts engendrés varient d'une zone à autre selon la population et l'infrastructure qui caractérisent la région menacée. Dans les cas qu'a connu la région d'étude le premier à causer une perte des diamètres d'une propriété rurale de 60 m et 24 m respectivement, tandis que le deuxième cas à causé une destruction totale des infrastructures au-dessus de cette cavité et une panique humaine.

La région de Chéria est un terrain karstique au niveau es calcaires d'Éocènes avec un potentiel hydrique énormes avec des niveaux piézométriques en subsurface. Suite à un régime intensif d'implantation des forages légale et illicite et la surexploitation des eaux souterraines continue, un abaissement total des niveaux piézométrique à des niveaux plus profonds est remarqué. Plusieurs facteurs sont indispensables de l'état de pauvreté de la région suit cette exploitation non éthique de la quasi-totalité de la masse d'eau potable tels que, les permissions d'implantation non stricte des nombres de forages d'eau et une implantation aléatoire sans étude approfondie par les autorités, et les forages illicites implantés par les citoyens eux-mêmes.

Cette recherche est une approche systématique à l'étude de l'effondrement de terrain dans le bassin de Chéria (Nord-Est) Algérie, cas d'étude Draa Douamis. Les effondrements de terrain qui menacent la région d'étude posent un risque économique et social aux propriétés. Le sujet proposé va négliger l'aspect théorique de ce risque dans le cas d'étude, car ils sont déjà étudiés on détails par plusieurs chercheurs mais consiste à cartographier, caractériser et dimensionner et quantifier les zones affectées par les affaissements et/ou les effondrements de terrain.

## 1.2 Les Objectifs de la thèse

L'étude présente a pour but de :

- Utiliser une technique avancée par interférométrie radar pour l'observation et la mesure de faibles déplacements du sol de quelques millimètres à quelques centimètres.
- Tester le potentiel de l'imagerie radar dans la région pour l'étude et le suivi temporel de faibles déplacements du sol sur des zones plus étendues, liés à la subsidence ou les mouvements de terrain.
- Connaitre l'état actuel de point de vue de stabilité de terrain suite au phénomène d'effondrement qu'a connu la région.
- Cartographier et déterminer les zones susceptibles au risque d'affaissement et/ou effondrement.
- Une présentation des principes de télédétection et de l'imagerie SAR.
- Une brève présentation des principes de l'imagerie radar et de la technique d'interférométrie radar (InSAR) est faite ainsi qu'une description du jeu de données utilisé dans les études de cas.

### 1.3 Aperçu et organisation de la thèse

La structuration de la thèse retrace la logique et les objectifs présentée à la section précédente. La thèse est structurée en quatre chapitres, introduction, et conclusion générale comme ce qui suit :

- **Le chapitre 1**, Une introduction générale du sujet de recherche avec une problématique de la thèse. Les objectifs décrits de recherche de la thèse, et les observations initiales qui inspirent la recherche ont été décrits dans le même chapitre.
- **Le chapitre 2**, une présentation théorique des principaux types et les caractéristiques de la typologie des mouvements de terrain. La deuxième section est une présentation des principes de télédétection et d'imagerie SAR. La télédétection par synthetic aperture radar (SAR) est maintenant une technique mature qui a démontré ses potentiels pour l'observation de la terre grâce à l'amélioration de la résolution spatiale. Ainsi que les principales caractéristiques de l'interférométrie qui exploite la différence de phase de signaux SAR rétrodiffusés pour mesurer les variations de distances entre le capteur et la cible illuminée.
- **Le Chapitre 3**, présente la méthodologie de cette recherche, les principes de méthodes employées dans le traitement des images InSAR, une description et caractérisation des données utilisée et application des algorithmes spécifique dans l'analyse par Persistent Scatterer Interferometry (PSI).
- **Le Chapitre 4**, il a été abordé les caractéristiques physiques du bassin versant ainsi que la géologie (situation géographique, stratigraphie et tectonique), destinées à fournir des informations fondamentales sur les propos de cas d'étude de la région de Chéria, suivie d'une description des affaissements qui se sont déroulé dans la région d'étude.

- **Le Chapitre 5**, est consacré à la présentation et la discussion des différents résultats obtenus. Les résultats sont utilisés pour établir des lignes directrices permettant aux utilisateurs de mettre en œuvre efficacement la cartographie et l'évaluation des risques d'affaissement et/ou effondrement de surface.
- **Le Chapitre 6**, présente les conclusions tirées de cette recherche. Une conclusion générale mettant en exergue les contributions et les difficultés rencontrées, les avantages et les limites de la technique de recherche ainsi que les perspectives à ce travail termineront ce manuscrit de thèse.
- **Le Bibliographie**, comprend une liste des références de bibliographie utilisées dans la recherche.

## **Chapitre 2: Cadre Théorique**

---

Les déformations des surfaces peuvent être induites par des catastrophes naturelles ou des facteurs déclenchants anthropiques. Dans le but de discuter la problématique de la recherche, il est d'abord nécessaire de définir et communiquer le contexte théorique de base derrière la phénoménologie des mouvements de terrain, une identification, classification et évaluation qualitative des différents types. La télédétection radar, la géométrie d'acquisition, résolution spatiale (azimut, distance) et formation de l'image SAR et ses composantes feront l'objet de la deuxième section du chapitre. Comprendre le principe et les conditions de performance de l'interférométrie différentielle pour la détection, la mesure des déformations de la surface terrestre, afin de cartographier et extraire les déplacements de surface à grande échelle avec une résolution ayant du centimètre au millimètre.

### **2.1 Phénoménologie d'affaissement et d'effondrement**

Cette section synthétise et analyse les connaissances de mouvements de terrain spécialement les mouvements dus à l'instabilité des cavités souterraines. Plusieurs classifications essayant à décrire et à déterminer les différents types de mouvement de terrain. Elles reposent pour l'essentiel sur des critères, géomorphologique, géotechnique, cinématique ou dynamique. Dans le cas suivant nous avons utilisé la classification de P. Martin [10]. Il existe d'une part, les mouvements verticaux (affaissement et effondrement) et d'autre part, les mouvements de pente (écroulement, mouvement lent et continu, glissement et coulée) [10].

#### **2.1.1 Les mouvements de terrain**

Les mouvements de terrain ce sont des phénomènes extrêmement divers et complexe qui impliquent une rupture et un déplacement simultané de matériaux [10]. En matière de risque naturel on distingue deux ensembles de mouvements de terrain :

### 2.1.1.1 Les mouvements verticaux

Qui entraînent une déformation différentielle des terrains. L'instabilité de cavités souterraines modifie le comportement du sol autour de la cavité jusqu'en surface, et cela produit deux principales catégories de mouvements de masse verticale :

#### 2.1.1.1.1 Affaissements

Est un phénomène lent et progressif qui se traduit par une déformation topographique sans rupture apparente. Il se développe souvent sous forme d'une cuvette. La déformation en subsurface due au développement des cavités souterraines (naturel et/ou anthropique) en un affaissement et/ou effondrement qui peuvent produire de vastes zones d'affaissement en surface. Les cavités souterraines déséquilibrées sont susceptibles d'engendrer une déformation des terrains de surface qui les surplombent. Selon le type de terrain l'affaissement peut se transformer en effondrement [10].

##### 2.1.1.1.1.1 La consolidation

Elle est le résultat d'écrasement des sous vides d'un matériau meuble récemment déposé, sédiment sub-actuel, remblai, sous l'effet de son propre poids [10].

##### 2.1.1.1.1.2 Les tassements d'ouvrages

L'ouvrage construit provoque des déformations progressives et/ou permanentes sous l'effet d'un champ de contrainte. Par conséquent, l'ouvrage s'enfonce dans le sol et peut subir des distorsions qui entraînent une fissuration voire son inclinaison (voir Figure 2.1) [10].

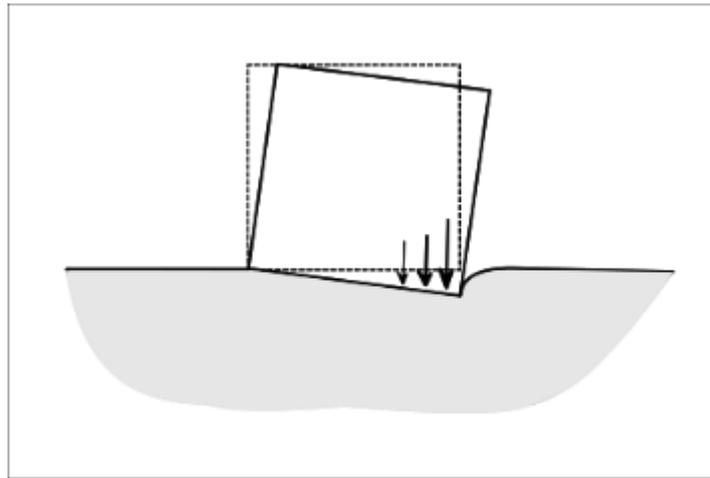


Figure 2.1 Un tassement différentiel.

Source : [10]

#### 2.1.1.1.3 Les affaissements des cavités souterraines :

Le sol des régions d'existence des cavités souterraines s'affaisse généralement de façon irrégulière. Certaines techniques d'exploitation des eaux souterraines ou minière créent des vides souterrains importants qui se combent par effondrement du toit, cela entraine une décompression et fragmentation des matériaux des cavités (voir Figure 2.2) [10].

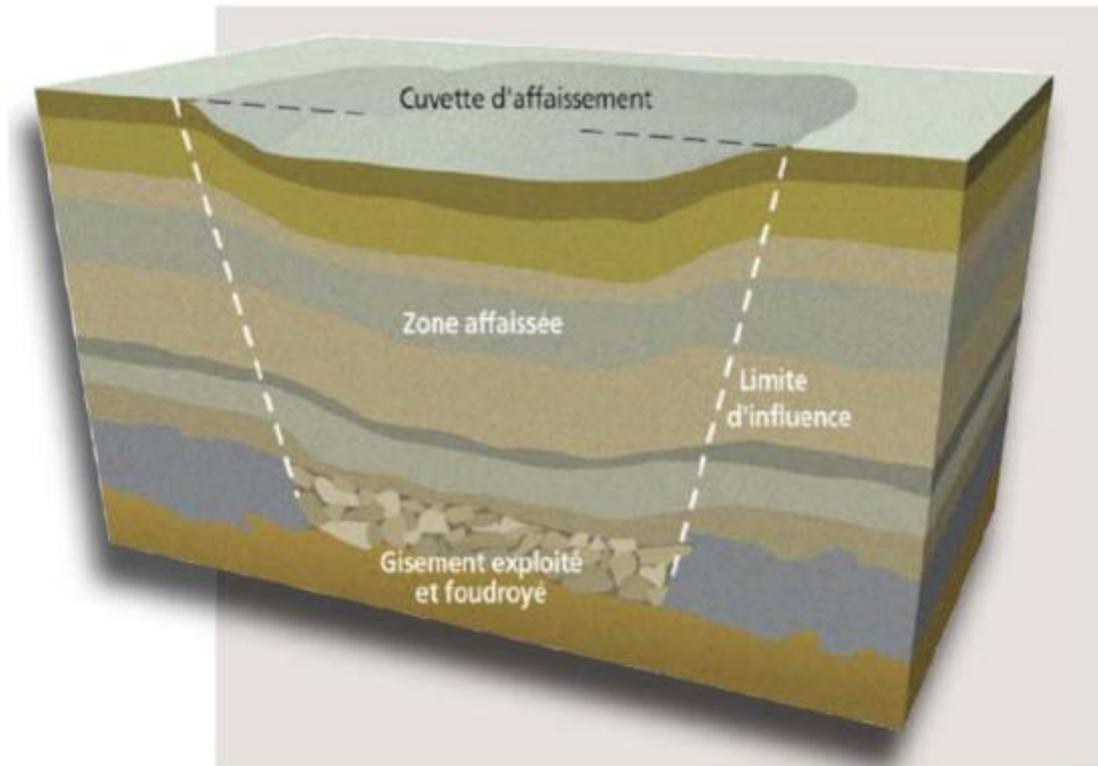


Figure 2.2 Affaissements des cavités.

Source : [11]

Un affaissement d'un point se caractérise par un déplacement vertical et horizontal progressifs ressentis à la surface. L'affaissement se distingue des effondrements par un comportement discontinu soudain (une rupture franche à la surface entre zone effondrée et la zone environnante) dans le temps et dans l'espace[12].

#### 2.1.1.1.2 Effondrements

C'est un mouvement vertical brutal et discontinu qui entraîne le plus souvent de la rupture brusque des toits des cavités souterraines naturelles ou artificielles. Les cavités souterraines d'origine naturel résultant de la dissolution de roche (calcaire, gypse, etc.) ce qu'on appelle le phénomène de karstification, ou d'origine anthropique humaine (mine). Ce phénomène peut produire une dépression subcirculaire en surface puis un effondrement brusque [10].

D'après la morphologie des terrains karstiques, les conduits karstiques évoluant en profondeur peuvent se distinguer en surface par des indicateurs spécifiques tels que les dolines (indique une présence de karst développé). En revanche, l'absence des indicateurs des dolines en surface ne signifie pas une absence des karsts en profondeur [10].

Les dolines (Sinkholes en anglais) sont des dépressions fermées aboutissant en surface, elles se produisent par la dissolution d'une roche carbonatée sous l'influence de l'infiltration d'eau riche en acide carbonique. L'eau traverse les fissures et les fentes préexistantes au sein d'une roche ; c'est le phénomène de karstifications. Les fissures s'élargissent et les espaces se développent et créent des cavités. Un déséquilibre des toits des cavités favorise un tassement de surface sous forme d'une dépression subcirculaire [13]–[15].

Les dolines peuvent être classées en plusieurs groupes [16], chacune possède un mécanisme de formation différent :

#### *2.1.1.1.2.1 Les dolines de dissolution*

Sont formées par la dissolution de la partie superficielle du calcaire ou de dolomie. Une dissolution lente et progressive se produit par un écoulement selon les zones de faiblesse préexistantes dans la roche (les joints, fissuration, etc.). Les précipitations et les eaux de surface s'infiltrent à travers les joints, la roche carbonatée dissoute et une petite dépression à la surface se forme progressivement. Cette dépression se développe à cause d'une concentration du drainage de surface (voir Figure 2.3) [16].

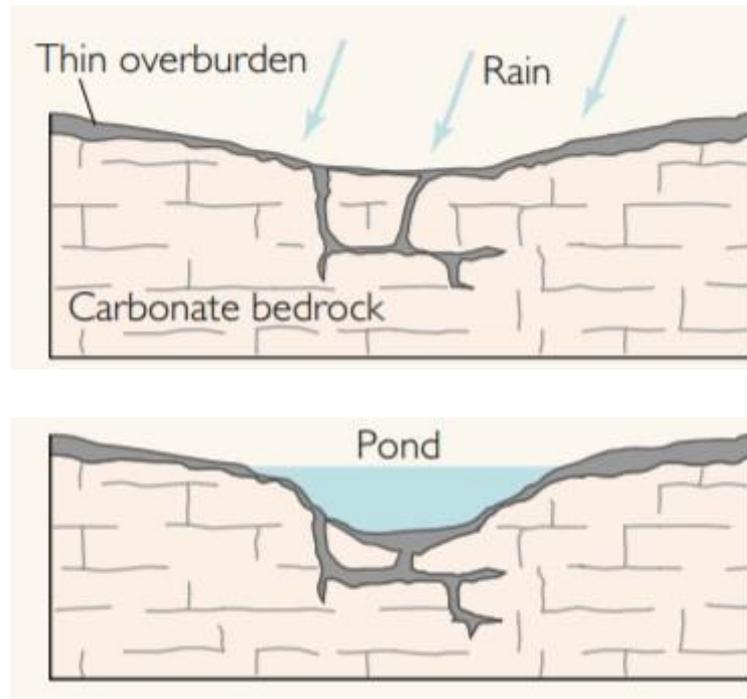


Figure 2.3 Les dolines de dissolution.

Source : [16]

#### 2.1.1.1.2.2 Les dolines de subsidence

Ce type se développe progressivement dans les zones où une couverture des sédiments meuble recouvre un banc de roche calcaire fissuré (voir Figure 2.4). Les sédiments continus d'effondre dans les roches sous-jacentes, la dissolution et le remplissage formant une dépression notable a la surface du sol. Selon la nature de la couverture elle se subdivise en deux types : une doline de suffosion lorsque la couverture est des formations sableuses sans cohésion, et une doline d'effondrement lorsque la couverture constitue des formations argileuses cohésives (ce type est relativement rare, petits et peuvent passer inaperçus pendant de longues périodes) [16].

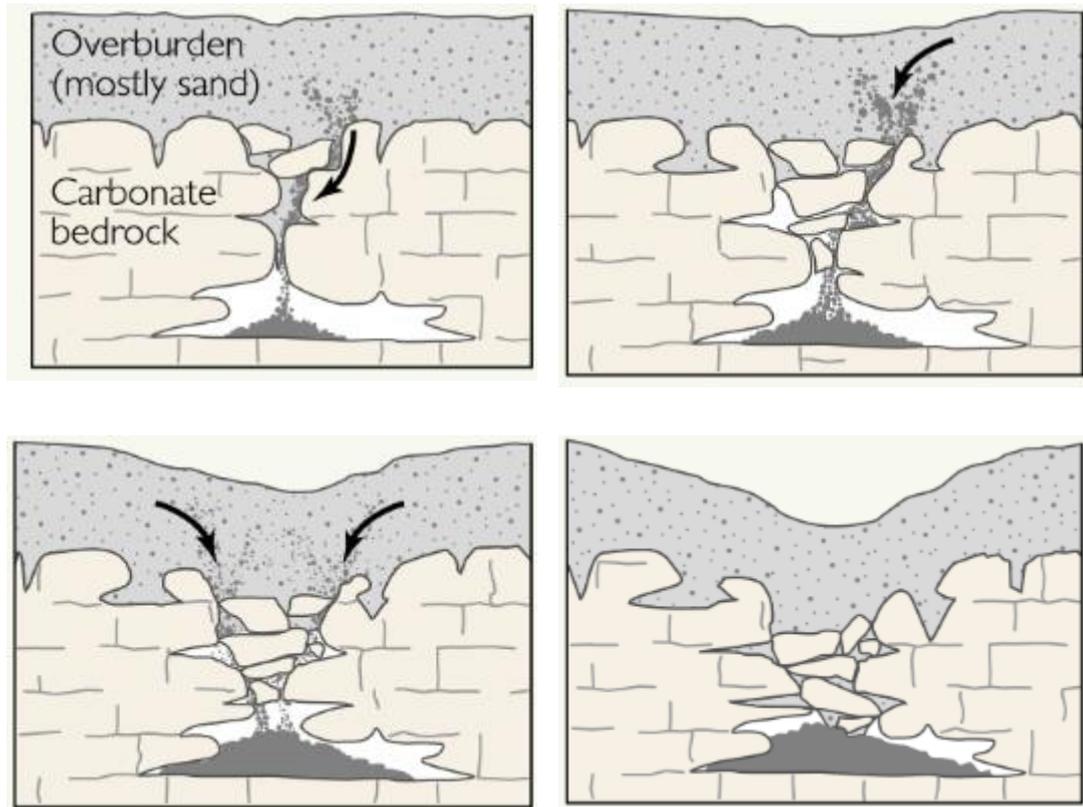


Figure 2.4 Les dolines de subsidence.

Source : [16]

#### 2.1.1.1.2.3 Les dolines d'effondrement

Les dolines d'effondrement sont formées par un effondrement instantané ou progressif du toit d'une cavité. Il se produit par l'érosion du toit d'une doline et le dépôt des sédiments dans une dépression moins profonde, au fur et à mesure, les sédiments tombent et la cavité migre vers le haut par effondrement progressif ou brutale du toit. Les dolines d'effondrement ne sont pas communes ; ce sont souvent des formes très avancées des dolines de dissolution (voir Figure 2.5) [16].

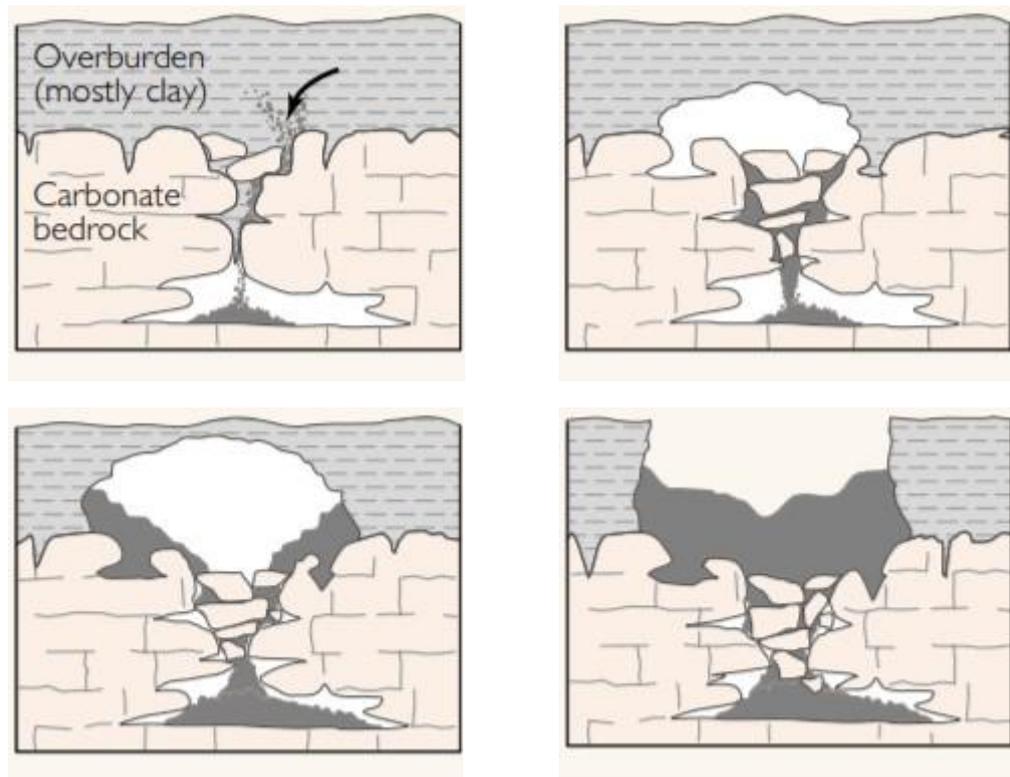


Figure 2.5 Les dolines d'effondrement.

Source : [16]

#### 2.1.1.2 Les mouvements de pente

Ce sont des déplacements obliques affecte les surfaces en pente (de matériaux généralement meuble, plastique ou fragmente) plus ou moins étendus et rapides.

##### 2.1.1.2.1 Eroulements rocheux

Ce sont des chutes rocheuses en masse soudaines affecte les reliefs à forte pente constitue de roche fissurées (des plans de discontinuité préexistants) [10]. Ces chutes peuvent produire suivant des processus différents (voir Figure 2.6) ; un mouvement rapide, basculement, escarpement rocheux...

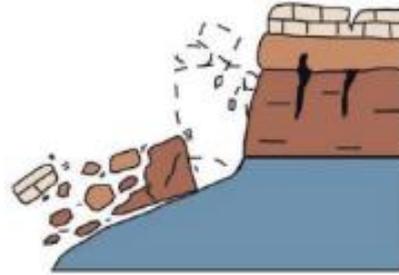


Figure 2.6 Ecoulements rocheux.

Source : [17]

#### 2.1.1.2.2 Mouvements lents et continus

Ce type de mouvement affecte les formations meubles, leur déformation est progressive et lente (voir Figure 2.7).

##### 2.1.1.2.2.1 Reptation

Reptation est une redistribution des particules d'une formation meuble avec une descente lente le long des pentes qui peuvent fluer sur de faibles épaisseurs sans qu'une surface de rupture soit clairement identifiée sous l'effet de la pesanteur. Elle s'exprime en pente par la courbure de la base des troncs d'arbres et par l'inclinaison des piquets [10].

##### 2.1.1.2.2.2 Fluage

Fluage le mouvement se produit au sein des formations plastiques de grande épaisseur supportant une surcharge naturelle ou anthropique. Le phénomène s'observe dans des bancs meubles saturés d'eau, et flue sous le poids d'une falaise de calcaire par exemple [10].

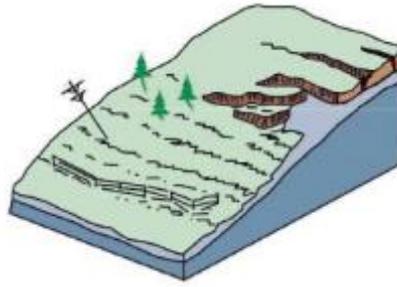


Figure 2.7 Les mouvements lents et continu, fluage et reptation

Source : [17]

### 2.1.1.2.3 Glissements

Un glissement de terrain est un phénomène complexe avec un mouvement oblique, affectant les terrains de pente limitant des massifs constitués de matériaux meubles. Le déplacement se fait en une descente d'une masse de terrain faiblement cohérente (argile, marne...) sur une pente le long d'une surface de rupture identifiable [10]. La forme de la surface de rupture permet de distinguer les types suivants :

#### 2.1.1.2.3.1 Glissement rotationnel

Le déplacement suit un plan de rupture d'une surface concave ayant la forme d'une cuillère (voir Figure 2.8).

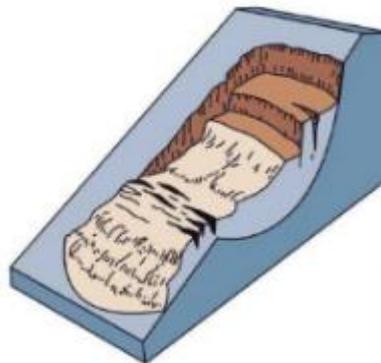


Figure 2.8 Glissement rotationnel

Source : [17]

#### 2.1.1.2.3.2 Glissement plan

La ligne de rupture suit une surface de discontinuité sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau (voir Figure 2.9).

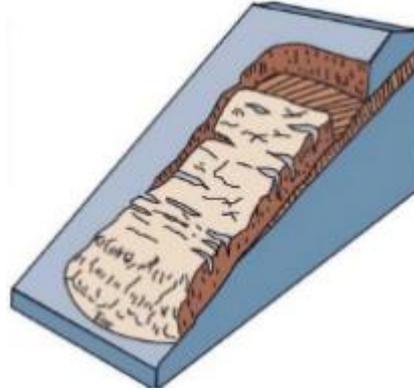


Figure 2.9 Glissement plan

Source : [17]

#### 2.1.1.2.4 Coulée

Est un phénomène très rapide d'écoulement des matériaux soumis à de fortes concentrations d'eau. Une cinématique rapide confère une capacité érosive importante (voir Figure 2.10) [10].



Figure 2.10 Coulée.

Source : [17]

## 2.2 Principes de la télédétection radar

### 2.2.1 La télédétection

La télédétection est l'ensemble des connaissances et des techniques qui permettent l'acquisition d'informations sur un objet ou un phénomène étudié à distance. Le processus de détection est fondé généralement sur la mesure de l'énergie du rayonnement des micro-ondes électromagnétiques émis ou réfléchis par les objets [9].

La possibilité de réaliser des images du sol par radar a été explorée dès la fin des années cinquante, mais l'utilisation scientifique a véritablement commencé à l'occasion du satellite SEASAT (1978). La télédétection est un outil adapté pour la caractérisation géométrique et cinématique des phénomènes terrestres. Cette méthode permet d'acquérir l'information sur la surface du globe à l'aide d'un instrument intermédiaire volant. Les techniques de la télédétection sont développées grâce au développement des porteurs tels que les ballons, avions et satellites qui permettent d'observer la surface de la terre à un niveau donné [9], [18], [19].

La variété des instruments de télédétection est vaste, tout comme leur gamme d'applications. Des diverses détections peuvent atteindre par la technologie de la télédétection tels que ; la détection optique, détection thermique, détection des micro-ondes, détection gravimétrique et détection acoustique. Pour la problématique qui nous concerne, nous nous intéressons par la détection à micro-ondes et uniquement aux systèmes imageurs radar, qui permettent une acquisition des images de la surface observée [9].

L'imagerie aéroportée ou satellitaire permet notamment d'avoir une vision globale et précise d'un site d'étude avec une résolution centimétrique voire millimétrique. Il est ainsi possible de récolter des informations importantes sur des sites difficilement accessibles du sol ou un site d'une grande superficie rend l'analyse sur le terrain difficile et parcellaire. Les capteurs satellitaires sont souvent privilégiés

en raison du coût minimal et une partie des dépenses étant prise en charge par les agences spatiales [19]–[21].

### 2.2.1.1 *Les capteurs en télédétection*

Les capteurs utilisés en télédétection ont une sensibilité diverse au rayonnement et se subdivisent en deux catégories : les capteurs passifs et les capteurs actifs (voir Figure 2.11).

#### 2.2.1.1.1 *Un capteur passif*

Dans ce type il est indispensable de capter un objet sans la présence d'une source d'énergie (tel que le soleil) émis un rayonnement pour la télédétection. L'interaction de la cible avec le rayonnement émis soit réfléchi, absorbé ou retransmis. En effet les satellites caractérisés d'un capteur de ce type sont plus opérationnels le jour que la nuit [9].

#### 2.2.1.1.2 *Un capteur actif*

Dans ce type le radar produit sa propre énergie pour illuminer une cible (par ex ; Synthetic Aperture Radar). Le rayonnement électromagnétique émis permet une acquisition des informations de la cible jour et nuit et n'est pas limité par les conditions météorologiques. Ce type fonctionne à la base de la longueur des micro-ondes qui n'est pas suffisamment fournies par le soleil [9].

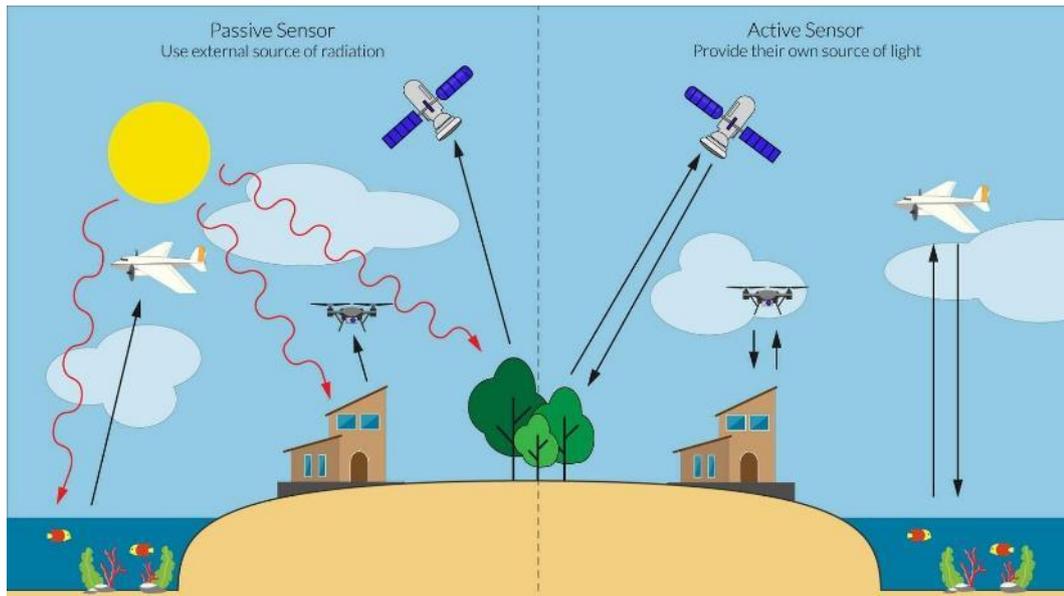


Figure 2.11 Capteurs en télédétection

Source : [22]

### 2.2.1.2 Le rayonnement électromagnétique et ses propriétés

Examination du fonctionnement de la télédétection et sa base physique nous permettra de mieux comprendre comment sont créées les données de télédétection, et comment elles peuvent être utilisées de façon créative pour extraire les informations nécessaires à un objectif spécifique.

#### 2.2.1.2.1 La physique du rayonnement électromagnétique

Tout corps de température supérieure à zéro absolu est un émetteur de rayonnement électromagnétique. Le rayonnement émis par ce corps qui arrive sur une surface est réfléchi, absorbé ou transmis par réfraction suivant le type de surface rencontrée (voir Figure 2.12) [23].

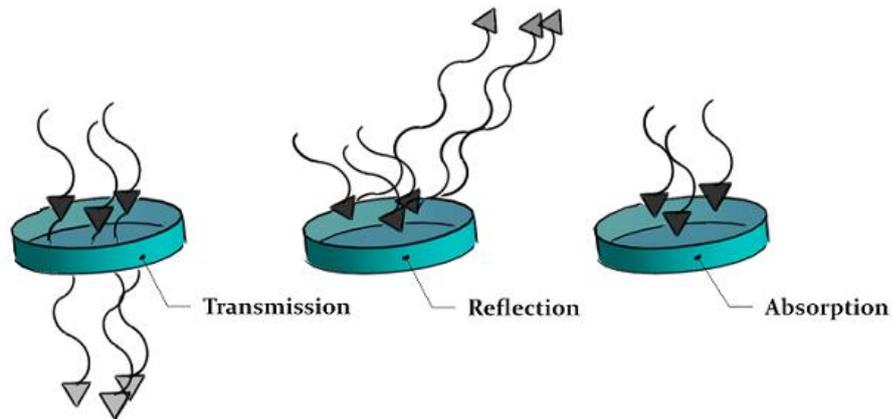


Figure 2.12 Absorption, réflexion et transmission du rayonnement.

Source : [24].

#### 2.2.1.2.2 Onde et Polarisation

La plupart des radars fonctionnent par la transmission des hyperfréquences suivant une polarisation horizontale ou verticale. En fonction de la polarisation à l'émission et à la réception, le rayonnement interagit et est rétrodiffusé différemment (voir Figure 2.13). Par conséquent, les images radar recueillies à l'aide de polarisation et des combinaisons de longueur d'onde différentes peuvent fournir des informations différentes et complémentaires sur les cibles [9], [23].



Figure 2.13 Direction de polarisation.

Source : [25]

Le champ électrique d'une onde peut se déplacer dans un milieu de propagation comme le vide ou l'air avec une vitesse avoisinante de la lumière. Les ondes électromagnétiques transportent de l'énergie et de l'information captée (voir Figure 2.14). L'onde évoluant en fonction du temps se propageant en une direction et se compose d'une amplitude avec une longueur (voir Eq 2.1) [23]. Le champ électrique se propageant selon l'axe z est donné dans l'équation :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \begin{cases} E_x = a_x \cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ E_y = a_y \cos(\omega t - kz + \delta_y) \\ E_z = 0 \end{cases} \quad \text{Eq 2.1}$$

Où :

$\delta_x$  et  $\delta_y$  représentent les phases absolues des composantes de  $E_x$  et  $E_y$ ;

$a_x$  et  $a_y$  étant leur amplitude ;

$\vec{k}$  étant la direction de propagation ;

$\omega$  la fréquence ou pulsation de l'onde.

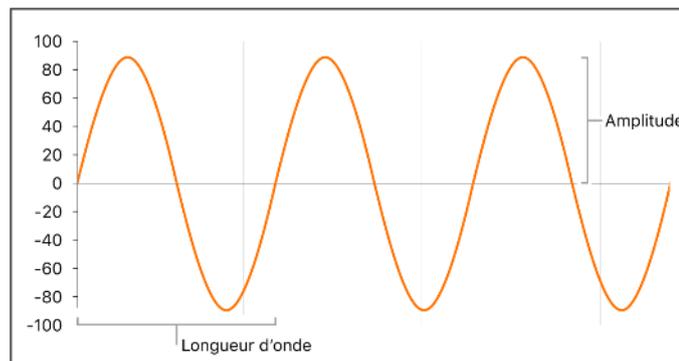


Figure 2.14 Onde électromagnétique

Source : [26].

### 2.2.1.3 Le système radar imageur

Les capteurs d'un radar imageur, est un système qui produit des images en utilisant des ondes électromagnétiques pour cibler et déterminer la position ainsi que la vitesse d'un objet. Ces capteurs actifs captent les échos (le signal de retour) et

mesurent de l'énergie rétrodiffusée. Les systèmes radar se subdivisent en deux types (voir Figure 2.15 et Figure 2.16) ; monostatique, bistatique.

Un radar monostatique dont l'émetteur et le récepteur partage une seule antenne, a l'avantage de réduire l'encombrement et les coûts de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur (voir Figure 2.15). Le système monostatique a l'avantage d'éliminer la décorrélation temporelle des images, en assurant la qualité de la cohérence [9], [27] ;

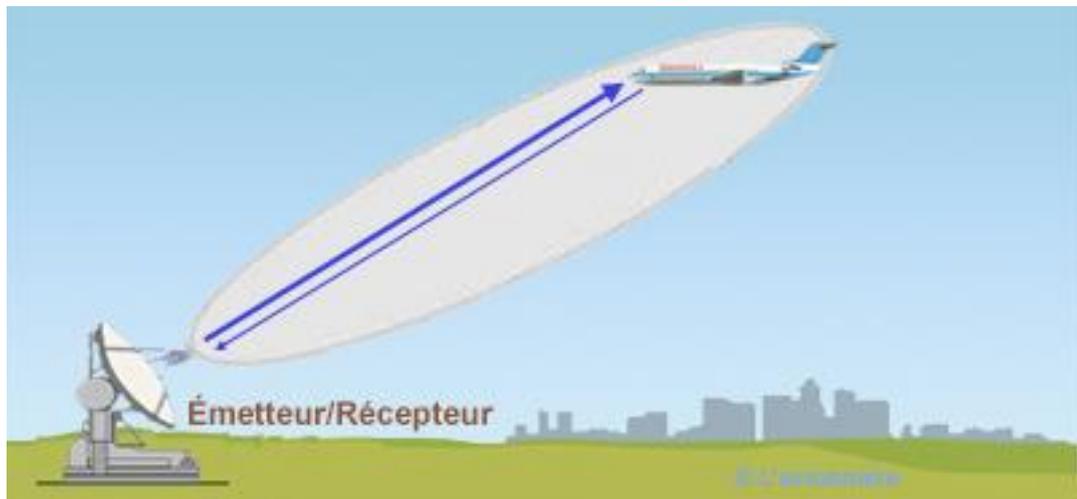


Figure 2.15 Le système radar monostatique.

Source : [28].

Un radar bistatique dont l'émetteur et le récepteur sont séparés. Ce système est avantageux car le type d'onde, la fréquence utilisée et la position du récepteur sont inconnus. L'inconvénient de ce système c'est qu'il est plus facile d'être détecté par un ennemi due au récepteur passif, et a une décorrélation temporelle qui apparaît dans les images acquise et les paramètres d'orbite sont très difficiles à déterminer (voir Figure 2.16) [9], [27].

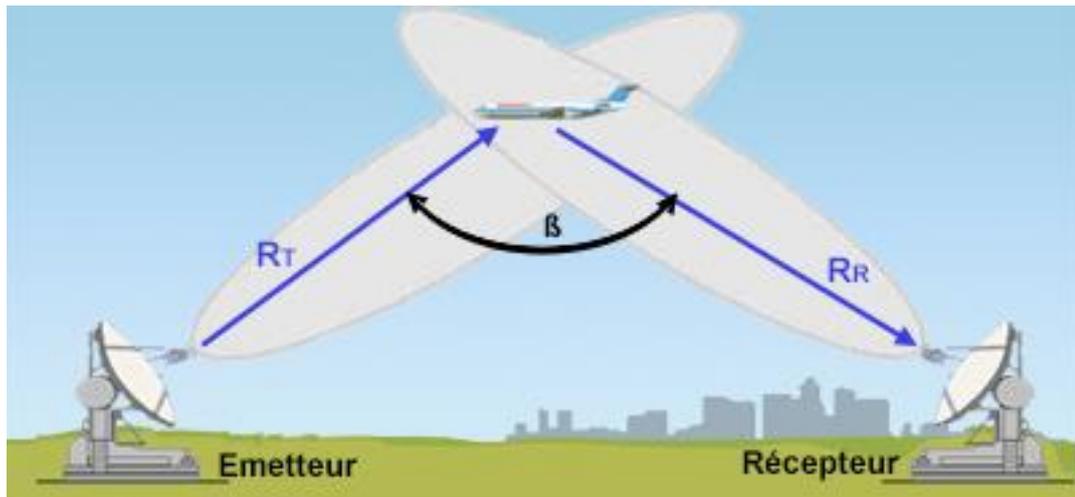


Figure 2.16 Le système radar bistatique.

Source : [28]

### 2.2.2 Télédétection radar

Les RADARS (Radio Detection And Ranging) sont des outils de télémétrie active qui utilisent les micro-ondes ou hyperfréquence pour l'observation des changements de la terre jour et nuit peu importe les conditions météorologiques. Ce système d'analyse le plus efficace est un outil indispensable aux observations des impacts naturels et artificiels sur l'environnement ou la gestion des crises [27].

#### 2.2.2.1 Les satellites

La télédétection satellitaire utilisée pour cartographier les évolutions de l'environnement fournit des données :

- **A large échelle** : l'emprise des images varie du km à plusieurs centaines de km.
- **Inter-calibrées** : les données acquises sur des endroits différents ont des paramètres d'acquisition identiques, contrairement à une campagne de terrain dont l'acquisition peut être différente selon le collecteur de données.

**Reproductibles** : les acquisitions peuvent être renouvelées régulièrement dans les mêmes conditions d'acquisition. Permettant de déduire des indicateurs

biophysiques [29]. Ces caractéristiques imposent les images satellitaires pour cartographier les évolutions de l'environnement [23].

Nous rappelons ci-dessous (voir Figure 2.17 et Tableau 2.1) les missions spatiales utilisant un capteur radar SAR utile à l'application d'interférométrie radar.

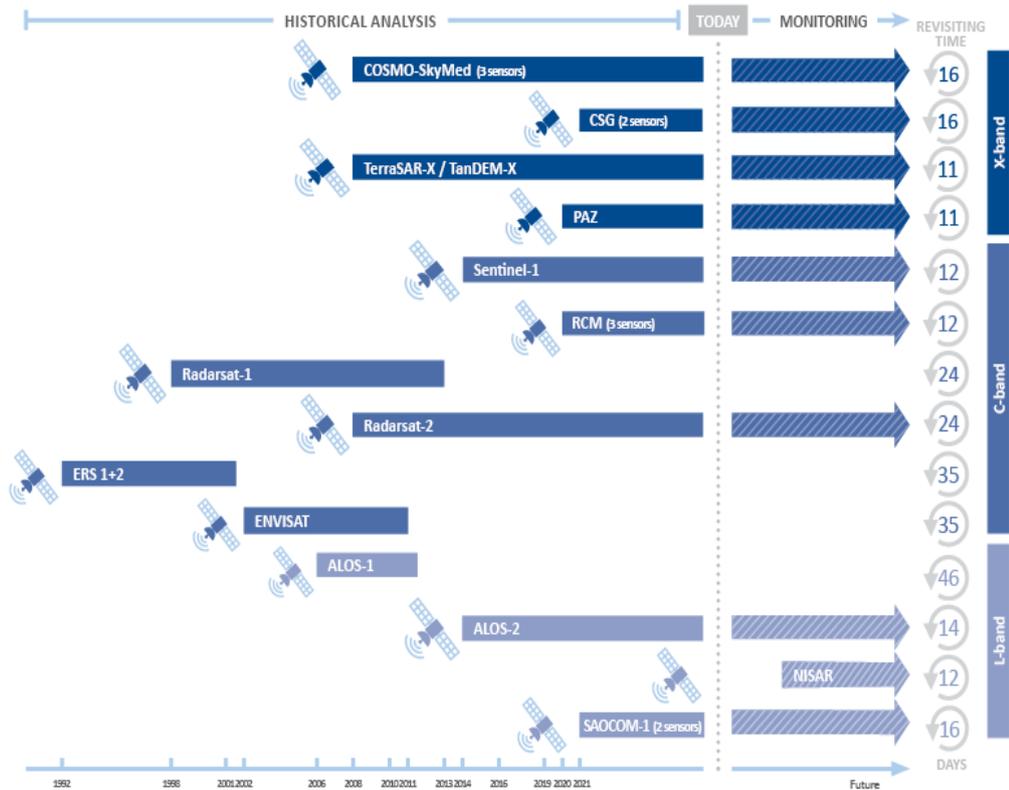


Figure 2.17 Les missions des satellite SAR.

Source: [30]

Tableau 2.1 Satellites et constellations SAR.

Liste des satellites utilisées pour la détection et la cartographie des mouvements de terrain, répertoriés du plus ancien au plus récent. Source : [31].

| Satellite | Band       | Longueur d'onde | Période     |
|-----------|------------|-----------------|-------------|
| ERS-1     | C, 5.3 GHz | 5.6 cm          | 1991–4/2001 |

| <i>Satellite</i> | <i>Band</i> | <i>Langueur d'onde</i> | <i>Période</i>    |
|------------------|-------------|------------------------|-------------------|
| JERS-1           | L, 1.2 GHz  | 23.5 cm                | 1992–11/1998      |
| ERS-2            | C, 5.3 GHz  | 5.6 cm                 | 1995–9/2011       |
| Radarsat         | C, 5.3 GHz  | 5.6 cm                 | 1995–3/2013       |
| Envisat ASAR     | C, 5.3 GHz  | 5.6 cm                 | 2002–4/2012       |
| ALOS             | L, 1.2 GHz  | 23.6 cm                | 2006–5/2011       |
| COSMO-SkyMed     | X, 9.6 GHz  | 3.1 cm                 | 2007– à nos jours |
| TerraSAR-X       | X, 9.6 GHz  | 3.1 cm                 | 2007– à nos jours |
| Radarsat-2       | C, 5.4 GHz  | 5.5 cm                 | 2007– à nos jours |
| Risat-1          | C, 5.3 GHz  | 5.6 cm                 | 2013– à nos jours |
| Kompsat-5        | X, 9.6 GHz  | 3.2 cm                 | 2014– à nos jours |
| Sentinel-1       | C, 5.4 GHz  | 5.5 cm                 | 2014– à nos jours |
| ALOS-2           | L, 1.2 GHz  | 22.9 cm                | 2014– à nos jours |
| PAZ              | X, 9.6 GHz  | 3.1 cm                 | 2018– à nos jours |
| Saocom-1         | L, 1.2 GHz  | 23.5 cm                | 2018– à nos jours |
| Radarsat Cons.   | C, 5.4 GHz  | 5.5 cm                 | 2019– à nos jours |
| Capella          | X, 9.6 GHz  | 3.1 cm                 | 2020– à nos jours |

#### 2.2.2.2 Les orbites satellitaires

De nos jours, la plupart des plateformes satellitaires sont placée sur des orbites quasi-polaire. Quand elles se déplacent vers le nord on dit qu'elles ont une orbite ascendante, et vers le sud est appelée orbite descendante (voir Figure 2.18). Une même déformation visualisée dans une carte de déplacements a été prise selon deux lignes de visées différentes par le même satellite donnera donc deux interférogrammes avec des aspects différents [27], [32].

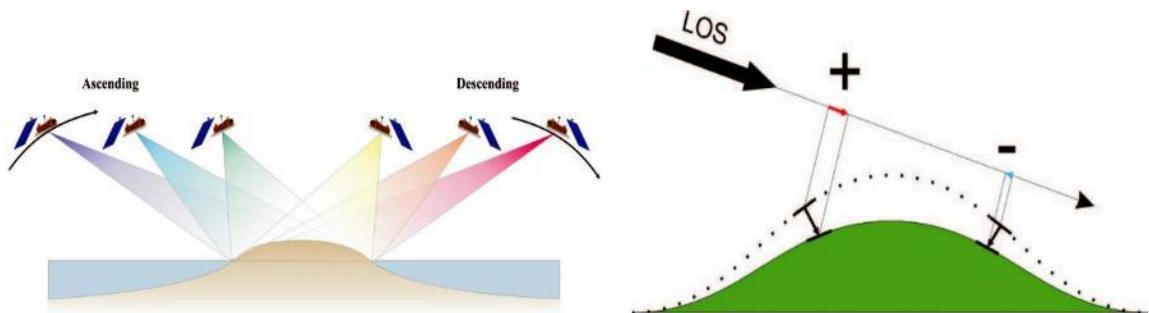


Figure 2.18 Orbite ascendante et descendantes.

Source : [33]

#### 2.2.2.3 Les images SAR

L'imagerie radar est un outil de télédétection actif utilisant des ondes électromagnétiques dans des gammes de longueur d'onde différentes (du millimètre à quelques mètres). Les mesures du radar imageur se traduit en trois mesures fondamentales sont celles du :

- Le temps de propagation d'aller-retour de l'onde entre le radar et le sol.
- L'intensité de l'onde reçue.
- Déphasage (la phase) entre la référence de l'onde émise et l'onde reçue [18], [19].

### 2.2.3 Principe de mesure des images SAR

L'interférométrie est une technique qui exploite la différence de phase de signale SAR rétrodiffusés pour mesurer les variations de distances entre le capteur et la cible illuminée. Pour appliquer cette technologie, on a besoin au moins des deux images

complexes de date d'acquisition différente provenant d'un synthetic aperture radar. Aujourd'hui, l'interférométrie peut intervenir dans nombreux domaines, en géologie, topographie, géophysique, foresterie, hydrologie, glaciologie, volcanologie, etc.

Dans cette partie, une brève synthèse est présentée sur la formation et les particularités des images SAR acquises par les satellites ainsi que les principes de l'interférométrie radar. Aux latitudes de l'Algérie, le satellite Sentinel-1 acquiert des données en orbite ascendante le soir et en orbite descendante le matin

### 2.2.3.1 *Système d'acquisition*

Les données SAR ont des caractéristiques spécifiques ; la résolution spatiale, la taille du pixel en géométrie radar, une distorsion géométrique qui dépend du système d'acquisition. La compréhension globale de l'imagerie SAR est nécessaire pour mieux appréhender le signal et ainsi pouvoir interpréter correctement les données.

#### 2.2.3.1.1 *Géométrie d'acquisition*

Le satellite se déplace dans la direction azimutale en émettant des impulsions émises avec une fréquence de répétition des impulsions (FRI). Les échos successifs forment les lignes de l'image. En mesurant le temps écoulé (durée  $\tau$ ) entre la transmission de l'impulsion et la réception de l'écho rétrodiffusé, on peut déterminer la distance entre le radar et la cible. La Figure 2.19 récapitule le principe d'acquisition. [18], [34], [35].

Les capteurs SAR satellitaires possèdent une antenne qui émet des impulsions électromagnétiques ( $1\text{mm} < \lambda < 1\text{m}$ ) en direction orthogonale au sens de déplacement du satellite. L'axe de déplacement du satellite est appelé direction azimutale et l'axe orthogonal est appelé la direction distale (ground range). Après interaction avec la surface terrestre, une partie de l'onde sera rétrodiffusée vers le capteur, le champ électromagnétique (en amplitude et phase) de cet écho sera enregistré par la même antenne (monostatique) [35].

Le radar émet régulièrement, latéralement par rapport au sens de déplacement (Azimuth direction) du satellite, des impulsions modulées. Les dimensions et la forme du faisceau principal émis dépendent de la taille de l'antenne. Ground range ; la surface du sol éclairée à chaque impulsion est allongée suivant l'axe des distances.

Radar Swath ; la succession des impulsions permet d'obtenir des informations sur une bande continue de sol parallèle à la direction d'azimut dont la largeur est limitée par les portées proximales et distales du satellite [36]. Le début de l'écho correspond à la partie de l'onde ayant parcouru la distance la plus courte, donc qui aura interagi avec le point le plus proche de l'antenne ou near range, la fin de l'écho portera l'information du far range suivant la direction Ground range. L'angle d'incidence  $\theta$  est l'angle entre le faisceau du radar à la surface du sol, il augmente graduellement de la portée proximale à la portée distale. La puissance du signal reçu en retour est dépendante de l'angle d'incidence. En effet, d'un point de vue géométrique, plus l'angle d'incidence est important plus le signal en retour sera faible. L'angle d'incidence dépend donc de l'orientation de la visée du système imageur radar (angle d'émission) et de l'orientation de l'objet au sol qui rétrodiffuse le signal radar [9], [37].

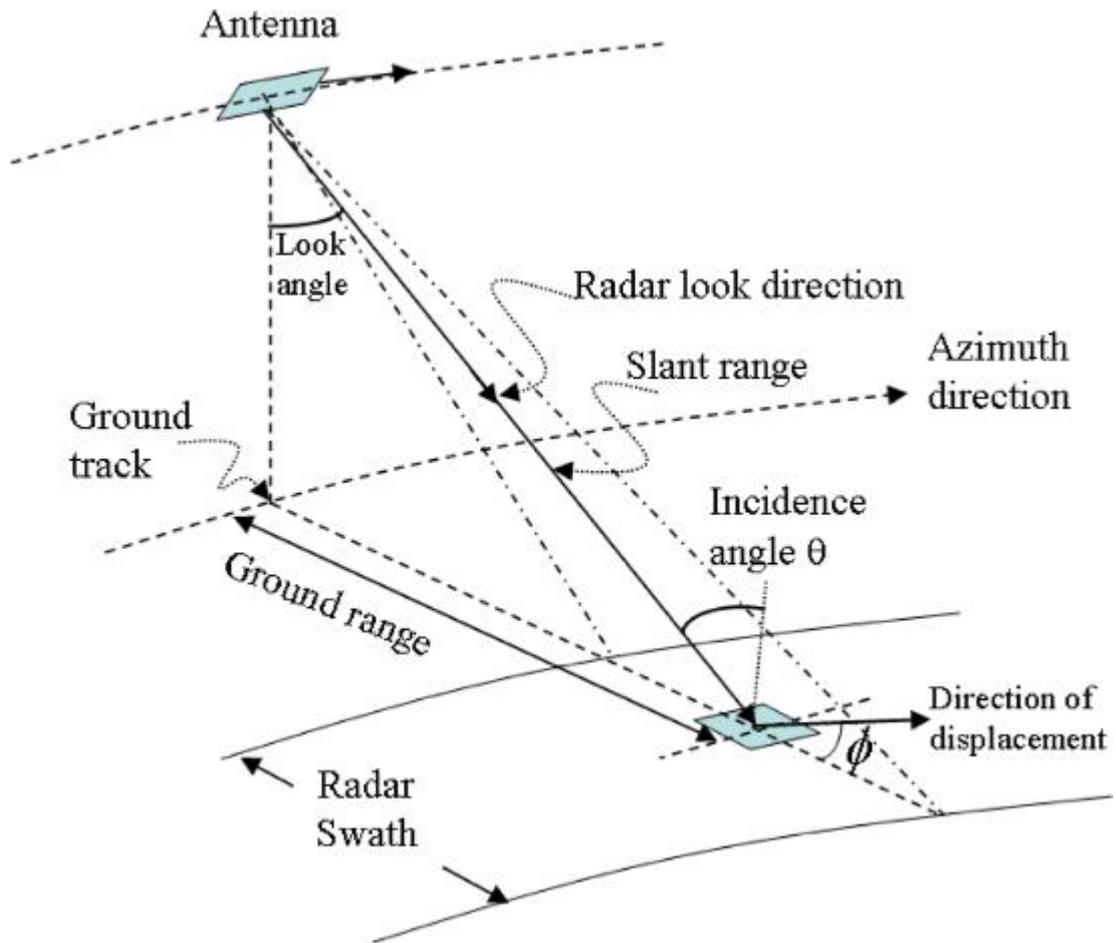


Figure 2.19 Géométrie d'acquisition d'image SAR.

Source : [38].

Les images SAR sont fortement influencées par le relief pour plusieurs raisons, notamment la variation de l'angle d'incidence liée au relief qui entraîne une compression dilatation de la taille du pixel en fonction de la pente et variation de l'angle d'incidence.

L'onde (wavelength) du satellite se propagent sur les zones accidentées et l'enregistrement du signal radar rétrodiffuser selon l'orientation de l'objet au sol, le mode d'acquisition des images engendrent des déformations géométriques en range et des effets selon l'azimut (voir Figure 2.20).

Les déformations en distance induite par l'imagerie radar :

- **Zone de raccourcissement** (foreshortening) apparaît quand la pente n'est pas trop prononcée et la distance au niveau du plan image est inférieure à la réalité.
- **Zone d'inversion** (layover) apparaît quand si la pente augmente au point d'invertir les projections de deux points sur le plan image.
- **Zone d'ombre** (shadow) quand la pente est opposée à la visée du radar, alors le faisceau n'est pas capable d'illuminer la surface du sol [9], [31].

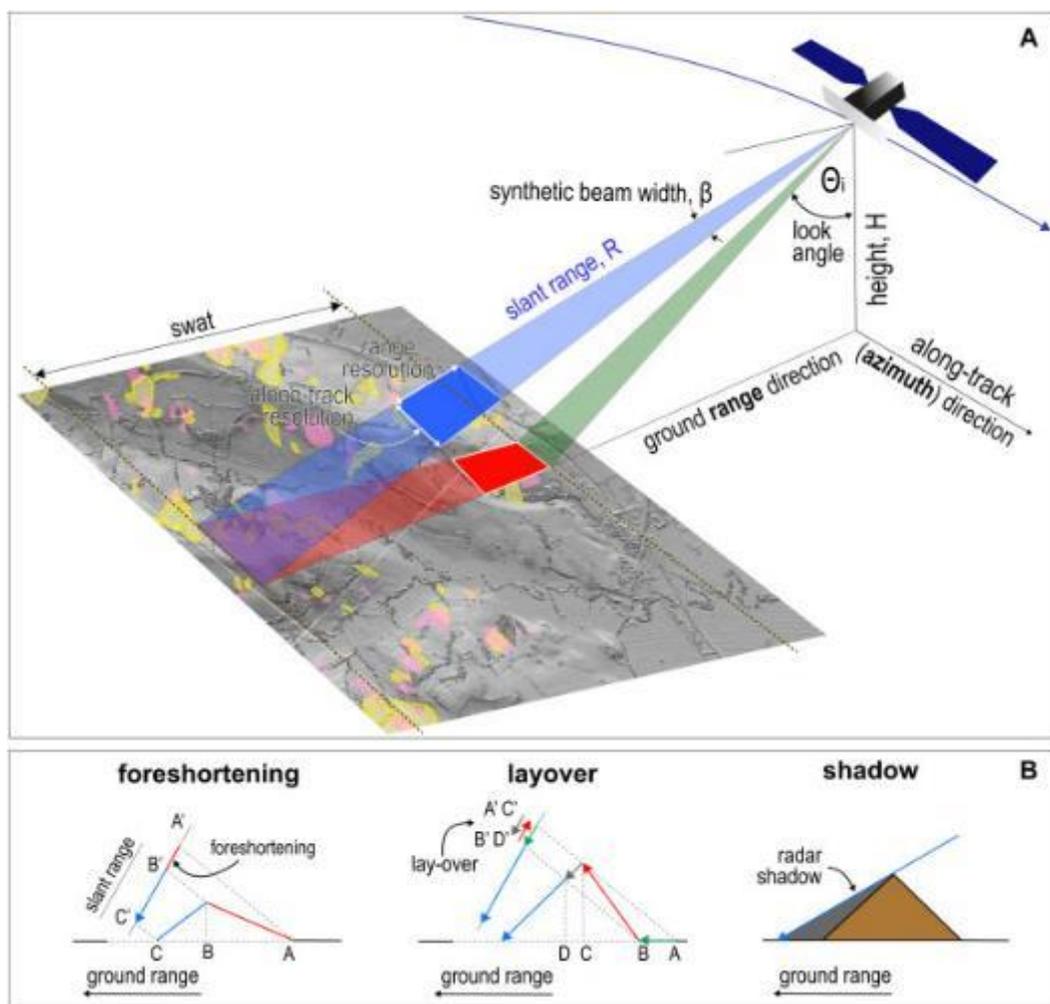


Figure 2.20 Distorsion géométrique d'une image SAR.

Dans la figure : (A) Un modèle typique de la géométrie latérale d'un système SAR (voir Figure 2.20). L'exemple concerne un satellite orienté vers la droite volant le long d'une orbite descendante. (B) Distorsions géométriques et ombres typiques d'un système SAR. Les proportions des objets, les distances et les angles sont exagérés. Slant range mesure la distance entre l'antenne radar et la partie du sol éclairée représentée par le pixel, déduit de la temporisation. Source : [31].

### 2.2.3.1.2 La résolution spatiale

La résolution spatiale est définie comme étant la plus petite distance entre deux objets qui permettent de les distinguer. Les résolutions spatiales du SAR en direction azimutale et distale dépendent des paramètres liés au système d'acquisition (voir Figure 2.21).

### 2.2.3.1.3 La résolution en distance

La résolution en distance (*range resolution*) est donnée quand la géométrie du capteur est parallèle à la direction orbitale du satellite. Elle est reliée à la durée de l'impulsion émise  $\tau$  (temps d'illumination de la surface). Considérons deux cibles rapprochées sur le terrain qui produisent des échos radar (voir Figure 2.21). La possibilité de séparer ces cibles par le radar est déterminée par les impulsions de retour. Si les cibles sont trop proches, leurs échos se chevauchent et ne peuvent pas être séparés dans le signal reçu. Les objectifs doivent être plus d'une demi-longueur d'impulsion en dehors pour ne pas occuper ensemble de l'impulsion [9], [23].

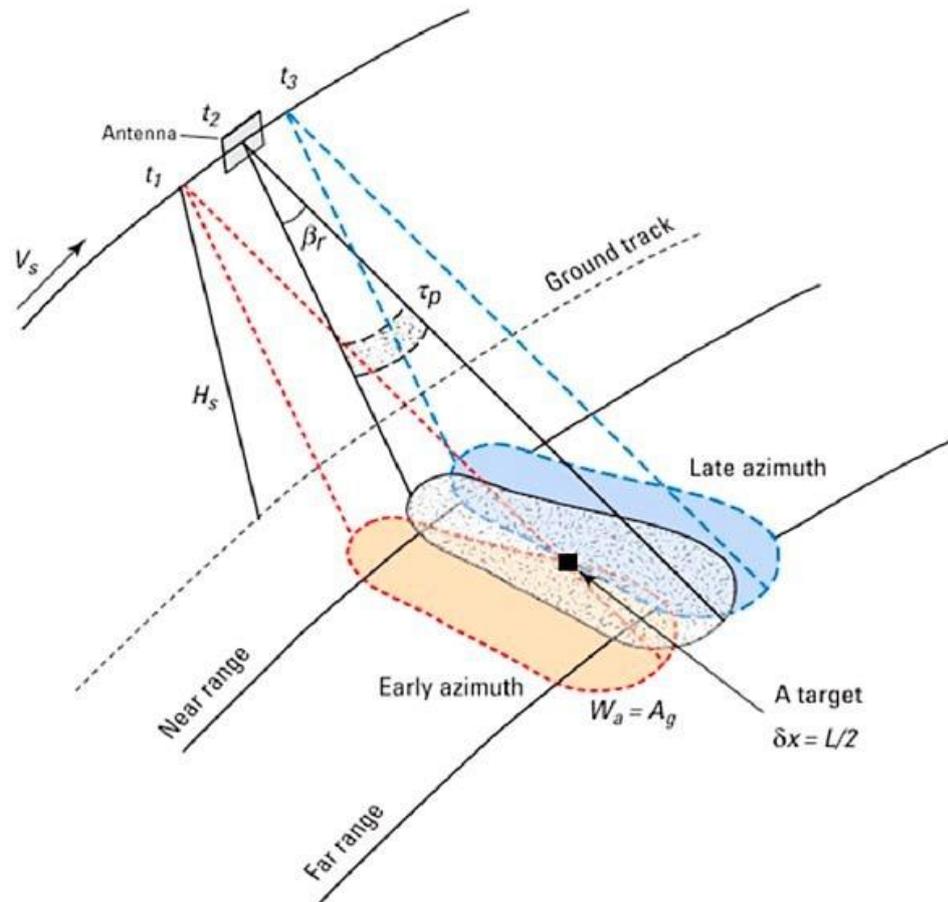


Figure 2.21 La résolution spatiale.

Résolution en distance (range) présentée dans la photo par near range et far range, tandis que la résolution en azimuth est représentée par early azimuth et late azimuth. Source : [39].

Ce défi est relevé par traitement du signal : l'impulsion émise, aussi appelée *chirp* est une onde cohérente dont le signal périodique est modulé linéairement en fréquence variable (voir Figure 2.22). Deux éléments du terrain en direction distale seront éclairés par une fréquence différente, l'écho reçu par le capteur sera corrélé avec une réplique de l'impulsion émise afin de réparer les réponses selon leur fréquence et donc selon leur position[35].

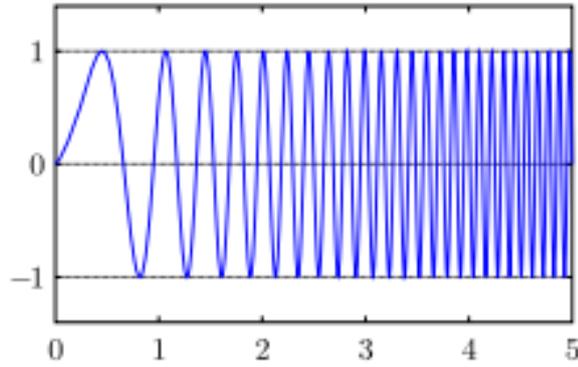


Figure 2.22 Profil temporel d'une impulsion émise.

L'axe des ordonnées présente l'amplitude de l'onde tandis que l'abscisse porte l'information temporelle. Source: [23].

La résolution en distance peut être mesurée par l'équation (voir Eq 2.2)

$$R_d = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2B} \quad \text{Eq 2.2}$$

Où ;  $c$  la vitesse de propagation de l'onde ;

$\tau$  est la durée de l'impulsion émise ;

$B$  étant la bande passante du chirp ;

Le facteur 2 étant lié à l'aller/retour de l'onde.

Pour obtenir  $R_d$  en géométrie sol  $R_{d,sol}$ , il est nécessaire de projeter les pixels de la géométrie radar au sol en utilisant l'angle d'incidence  $\theta$  (voir Figure 2.19) varie du near range au far range d'une même swath. C'est calculer par l'équation suivante (voir Eq 2.3) :

$$R_{d,sol} = \frac{R_d}{\sin\theta} \quad \text{Eq 2.3}$$

La Figure 2.23 illustre la projection des pixels de l'image selon l'axe de visée du radar vers la géométrie sol.

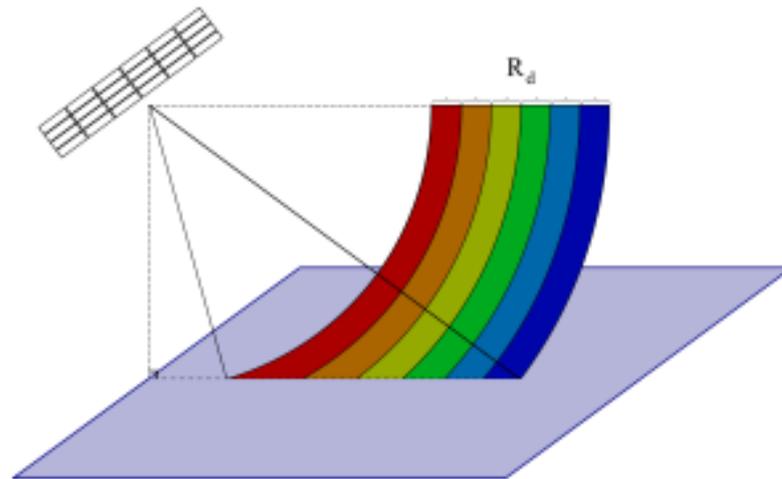


Figure 2.23 Projection des pixels de la géométrie radar.

Source : [40].

#### 2.2.3.1.4 La résolution en azimuth

La résolution azimuthale dépend de la largeur de l'empreinte du lobe principal d'antenne visible dans la Figure 2.19. Selon la position du satellite, l'effet Doppler modifie la fréquence de l'écho. La résolution azimuthale dépend de la largeur de la bande de fréquence, qui dépend de la vitesse du satellite (voir Figure 2.21). Un même élément sera éclairé par plusieurs empreintes au sol successif du lobe d'antenne grâce au déplacement du satellite [23], [41]. La résolution azimuthale mesure par l'équation (Eq 2.4) :

$$R_{az} = \frac{L}{2} \quad \text{Eq 2.4}$$

Où :

$L$  est la longueur d'antenne physique

La résolution azimuthale dépend de la distance radiale au capteur et en théorie elle est non constante sur toute la largeur de swath : les cibles au plus proche (Near Range) du capteur ont une résolution meilleure que celle au plus loin (Far Range). Cette antenne doit être le plus petit possible pour obtenir la résolution spatiale la plus

fine possible, cependant, cette antenne doit conserver une taille suffisante pour limiter le rapport signal-sur-bruit [9], [23], [37].

### 2.2.3.2 L'interférométrie

#### 2.2.3.2.1 Principe de l'interférométrie

Le principe de l'interférométrie n'est pas nouveau et n'est nullement réservé à l'imagerie RADAR. L'interférométrie radar consiste à exploiter l'information de phase contenue dans les images SAR complexes enregistrées par un ou plusieurs capteurs, les paramètres d'acquisition varient (la date, la position et l'orientation d'orbite, la fréquence, la polarité de l'onde émise/reçue) en fonction de l'application souhaitée [42]. Cette définition assez large permet d'inclure l'ensemble des méthodes et domaines d'application de l'interférométrie : (1) l'étude des déplacements de la surface du sol, (2) l'étude de la topographie ou géodésie et (3) la caractérisation des milieux sols et atmosphère [18], [19], [34], [42].

Un radar SAR permet de créer des images de la surface terrestre en émettant, au moyen d'une antenne, des impulsions de micro-ondes perpendiculairement à la trajectoire du satellite. Après réflexion sur le terrain, l'écho d'une impulsion est recueilli par la même antenne, permettant d'engendrer une ligne de l'image, dans laquelle les différents réflecteurs sont localisés en fonction de leur éloignement (temps de propagation aller-retour). La répétition des impulsions le long de la trajectoire assure la deuxième dimension [19], [36].

Les images SAR sont le résultat d'un traitement complexe des données brutes et contiennent en chaque pixel une valeur d'amplitude et de phase sont liés étroitement à la nature du sol observé (voir Figure 2.24).

L'amplitude est liée à la quantité d'énergie rétrodiffusée par le sol, liée à la distance géométrique entre le satellite et le sol lors de l'acquisition.

La phase correspond à une superposition de plusieurs contributions résultant de la propagation de l'onde dans l'atmosphère, et une correspondant à la contribution des multiples réflecteurs contenus dans le pixel [19], [43].

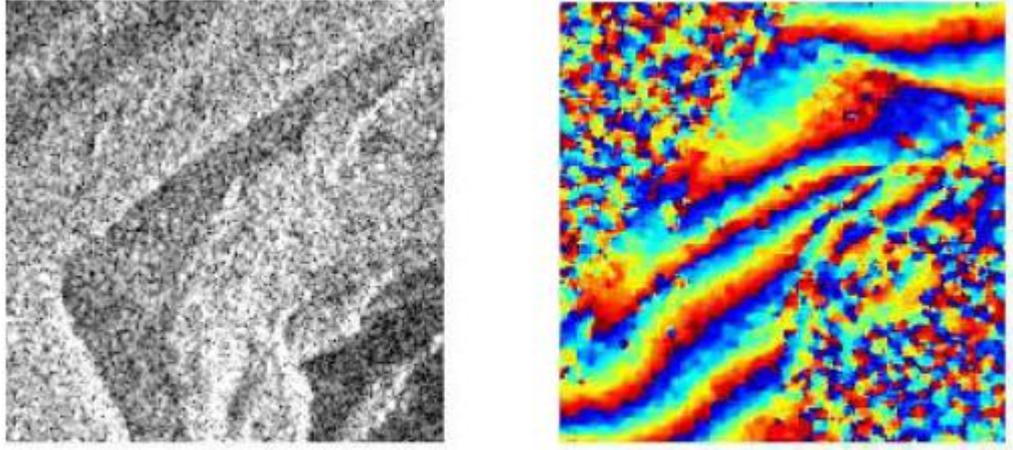


Figure 2.24 Amplitude et la phase d'une image InSAR.

#### 2.2.3.2.2 Phase et interférence

Comme on a vu, les images SAR sont des images complexes, chaque pixel comportant deux informations : l'amplitude de l'onde, qui représente la capacité du sol à rétrodiffuser l'onde radar de façon plus ou moins forte, et la phase.

La phase d'un pixel d'une image correspond au déphasage entre le signal rétrodiffusé et le signal émis pris comme référence. Elle dépend de nombreux facteurs de natures différentes : le trajet-aller-retour de l'onde (la distance géométrique pendant l'acquisition), l'atmosphère traversée (propagation de l'onde), mais aussi la disposition relative des objets constituant la cellule de résolution et leurs propriétés physiques. De ce fait, la phase est très variable d'un pixel à l'autre, même sur une surface relativement homogène [27], [37].

Seule l'information de la longueur de chemin parcouru par l'onde est utile pour la détection de mouvement du sol entre deux acquisitions radar. Pour extraire cette contribution il faut s'affranchir en particulier de la réponse propre du sol. Ceci s'effectue par différence de phase, pixel à pixel, de deux images radar acquises dans des conditions de prise de vue légèrement différente [18], [44].

### 2.2.3.2.3 Interférométrie différentielle DInSAR

L'interférométrie radar différentielle (InSAR) est une méthode d'imagerie satellitaire qui permet de produire des cartes de déplacements du sol ayant eu lieu entre deux dates d'acquisition d'images par des radars embarqués à certaines altitudes. Des acquisitions sur de grandes surfaces et avec une forte densité spatiale pouvant atteindre plusieurs milliers de points de mesure par km<sup>2</sup>, il est possible de mesurer un déplacement relatif entre ces points avec une haute précision [36].

En imagerie SAR, l'interférogramme est obtenu grâce à deux images SLC (Single Look Complex) de la même zone et dans la même orbite track. L'interférogramme SAR est généré par croisée-multiplicant d'une image SAR avec la conjuguée complexe du deuxième pixel par pixel. La phase interférométrique est la différence de phase entre les images, et l'amplitude de l'interférogramme est l'amplitude de la première image multipliée par celle de la seconde [37, p. 84].

Dans Figure 2.25 la première passe appartient à l'acquisition de l'image esclave, et le second passe appartient à l'acquisition de l'image maitresse. La distance entre les deux images représente Baseline (ligne de base) interférométrique. Deux images SAR de la même zone sont acquises à des moments différents. Si la surface bouge entre les deux acquisitions un déphasage est enregistré. Un interférogramme cartographie ce déphasage spatial. Ce processus sera dépendant de la ligne de base entre les deux satellites, des états atmosphériques aux deux dates d'acquisition, à la topographie, aux changements de l'état de surface du sol et finalement aux déplacements de la surface du sol [44].

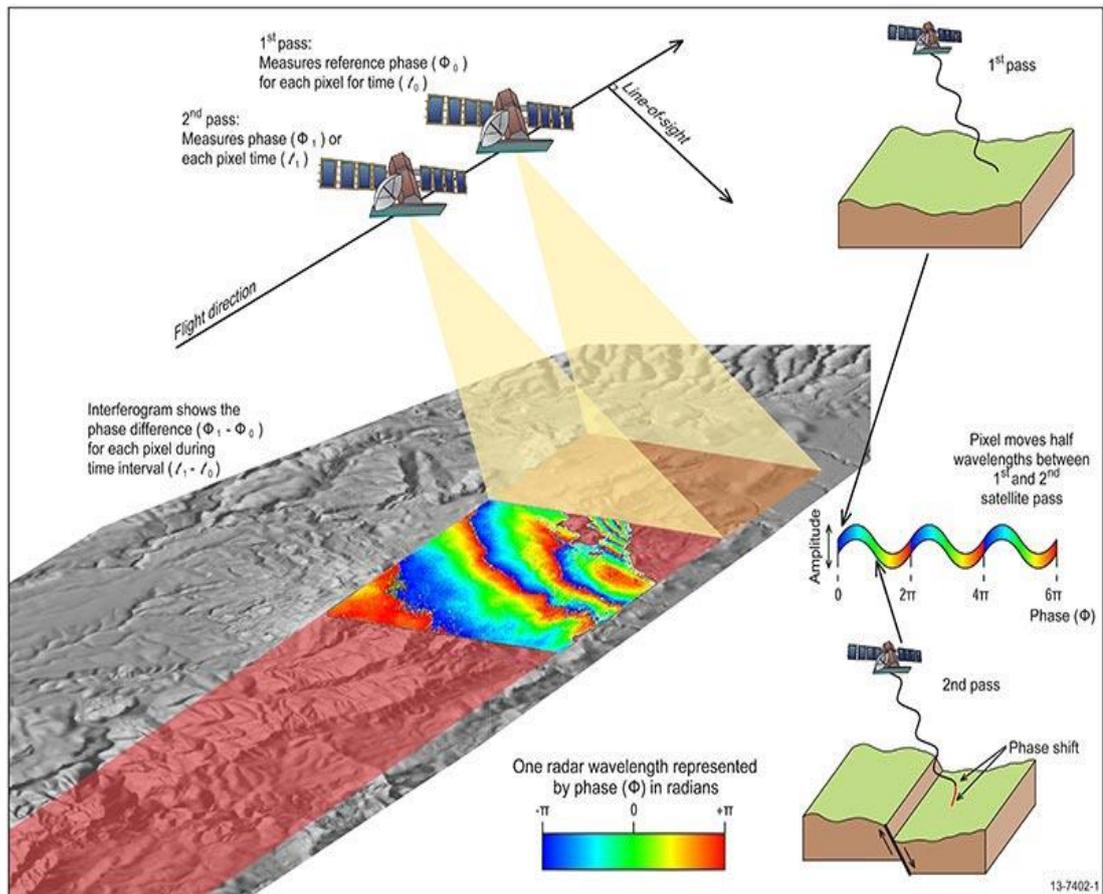


Figure 2.25 Acquisition d'un couple d'images de la même zone d'étude.

Source : [45].

Un interférogramme (voir Figure 2.26) est la différence de phase entre les images. Pratiquement la phase enregistre des informations potentiellement très riches essentielles au calcul. Cette différence peut se convertir en carte indique les déplacements millimétriques suivant la direction de la ligne de visée du satellite. L'interférogramme se compose par des franges d'interférence par lesquelles enregistrent des informations importantes sur la topographie du terrain et sur le déplacement qui a eu lieu. La contribution topographique à une phase donnée se mélange à celle des déplacements capturés. Dans ce cas, il est nécessaire d'éliminer la phase topographique de l'interférogramme à l'aide des enregistrements topographiques fourni par un DEM (Modèle Numérique de Terrain) [46].

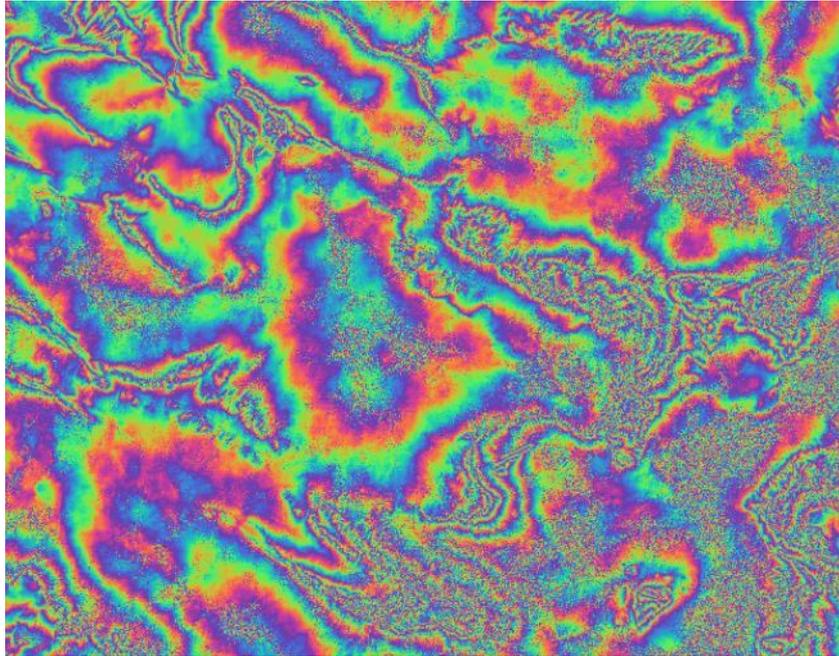


Figure 2.26 Interférogramme.

Un interférogramme différentiel donc mesure des déplacements du sol suivant radar ligne of sight (LOS). Comme la phase n'est connue que modulo  $2\pi$  la mesure possède une ambiguïté qui peut être levée sous certaines conditions par des méthodes de unwrapping. Chaque cycle de phase correspond à une demi-longueur d'onde de déplacement selon la ligne de visée [47].

#### 2.2.3.2.3.1 *Eléments de contribution de l'interférométrie différentielle*

L'interférométrie différentielle est un outil de mesure des déplacements de terrain qui assume deux éléments importants ; une couverture à grande échelle et une précision millimétrique. La faisabilité et la performance de l'interférométrie est liée à des facteurs liés aux caractéristiques du système d'acquisition, à l'environnement d'acquisition et des facteurs liés à l'opération elle-même :

- La base spatiale dégrade la cohérence de la phase en introduisant des effets stéréoscopiques. Cet effet traduit dans l'interférogramme par des franges resserrées dans un site en mouvement. En conséquence c'est facile de séparer les franges. Il est conseillé d'analyser les orbites du satellite afin de voir si le principe géométrique est respecté [9, p. 38].

- La base temporelle elle se traduit par la différence de temps entre les dates d'acquisition des images, elle a une influence sur la cohérence de la phase.
- La géométrie d'acquisition se décompose en deux paramètres indépendants ; un angle d'incidence et une direction azimutale d'éclairage suivant l'axe de la direction de visée du satellite.
- La résolution spatiale influence la qualité des mesures de déplacements.
- La longueur d'onde permet de traduire des contraintes de base temporelle. En fonction de la base temporelle la qualité de l'interférogramme se varie et peut fournir une carte de déformation et un DEM.
- L'atmosphère traversée par le rayonnement émis enregistre des variations spatiales changeantes d'une acquisition à une autre. Ces perturbations atmosphériques ajoutent un déphasage important à l'échelle d'une scène, donc c'est une source d'erreur systématique pour l'estimation des déplacements.
- La végétation sa croissance et son agitation affectent la qualité des interférogrammes, car, il dépend d'un grand nombre de facteurs biologiques et environnementaux.
- Le sol présente des instabilités et la modification de ses propriétés augmente avec le temps. Les changements du sol dans sa propriété géométrique et électromagnétiques varient sous l'effet des variations naturelles d'humidité et température et par les actions de l'homme.
- L'enjeu économique est important, des superviseurs qualifiés pour la vérification des procédures de traitement des images SAR interférométriques.

## Chapitre 3: Méthodologie De Recherche

---

Ce chapitre décrit la technique InSAR (Interferometry Synthetic Aperture Radar) qui est adoptée par cette recherche et plus précisément la méthode d'analyse PSI (Persistent Scatterer Interferometry) ainsi que les logiciels utilisés. Une présentation des données et les différentes étapes de traitement des images SAR. La méthode utilisée est établie à partir de l'évolution temporelle et la stabilité de rétrodiffusion des points dans un terrain donnée. En effet, dans les dernières décennies il est possible de quantifier et suivre les faibles déformations de surface depuis le lancement du satellite radar ERS-1 en 1992.

### 3.1 Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

InSAR est une technique de la géodésie spatiale peut être utilisée pour différentes mesures, telles que la mesure de la déformation du sol ou le calcul des modèles numériques de terrain (DEM). L'analyse, le traitement et l'interprétation des données interférométriques nécessitent la compréhension du principe de la technique de l'interférométrie, de la géométrie d'acquisition des couples interférométriques, des sources d'erreurs pour sa faisabilité ainsi que la propagation de ces erreurs et leurs impacts sur les résultats applicatifs [20], [32], [42], [48].

#### 3.1.1 La phase interférométrique

Lors de la génération de l'interférogramme à partir des images SAR, la phase interférométrique est la somme d'un ensemble de contributions de phases donnée par l'équation suivante (voir Eq 3.1) :

$$\Phi = \varphi_{orb}\varphi^{orb} + \varphi_{dem}\varphi^{dem} + \varphi_{unw}\varphi^{unw} + \varphi_{noise}\varphi^{noise} + \varphi_{atm}\varphi^{atm} \quad \text{Eq 3.1}$$

Où :

$\varphi_{orb}\varphi^{orb}$  est la composante liée aux variations de l'orbite.

$\varphi_{dem}$  liée à la variation topographique et dépend des facteurs physiques de la surface du sol.

$\varphi_{unw}$  l'erreur unwrapping et le processus algorithmique principal appliqué à la récupération d'une phase non ambiguë et à la correction des phases résiduelles (orbite, dem et unw) pour obtenir des résultats fiables de la déformation.

$\varphi_{noise}$  la phase des bruits générés par l'instrumentation.

$\varphi_{atm}$  est la phase due à l'erreur atmosphérique [49], [50].

*La rampe orbitale* ou l'erreur orbitale est due à l'imprécision d'état de vecteur d'orbite et peut entraîner des franges orbitales dans l'interférogramme différentielle. Suivant les cas, la longueur d'onde et l'intensité de ces franges peuvent se confondre avec le signal de déformation. Une attention particulière doit donc être apportée pour distinguer et retirer ce système de franges du signal lié au déplacement du sol. Ce qui peut entraver l'estimation de la déformation dans les applications d'interférométrie différentielle (DInSAR) [48]. Elle décrit comme suit (voir Eq 3.2):

$$\varphi_{orb} = -\frac{4\pi}{\lambda} \cos\theta \quad \text{Eq 3.2}$$

*La topographie* dépend de la ligne de base perpendiculaire (Perpendicular Baseline) et du relief. Plus la ligne de base sera grande plus l'interférogramme sera sensible au relief, diminuant ainsi l'altitude d'ambiguïté. Alors, après élimination des franges orbitales, on obtient deux systèmes des franges qui se superposent, l'un lié au relief et l'autre lié aux déformations de surface. Dans le cas où les déphasages parasites d'origines diverses qui s'ajoutent à ces deux termes sont négligés, le calcul du déplacement suppose donc que l'on puisse isoler son effet, en retranchant celui du relief.

Pour s'affranchir de ce terme, une méthode consiste à éliminer les franges topographiques afin d'obtenir le déplacement. Donc, un DEM précis ou d'un autre

interférogramme où l'on suppose que les autres composantes (déplacement, atmosphère) sont négligeables (voir Eq 3.3) [20].

$$\varphi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B^{\perp}}{r_P \sin \theta_P} (h_P + e_P) \quad \text{Eq 3.3}$$

Où :

$\theta_P$  L'angle d'incidence local sur le point P ;

$h_P$  La hauteur du point P issue du DEM ;

$e_P$  L'erreur entre la hauteur issue du DEM et la topographie

La *déformation (Unwrapping)* pour l'obtention des valeurs continue des déplacements (voir Eq 3.4), les interférogrammes doivent être déroulés supprimer les erreurs enregistrer lors de l'acquisition de radar. Plusieurs algorithmes ont déjà été développés comme les algorithmes de « Minimal Cost Flow » tel que SNAPHU [21], [51]. Cette étape est importante avant la génération d'une série temporelle, mais également très sensible aux erreurs dues au bruit  $\varphi$  (noise) ou à un gradient de phase trop fort. Si la phase varie de plus d'un cycle entre un pixel et son voisin alors estimer l'ambiguïté de cette phase ne sera pas possible. Une fois la phase unwrapped, les erreurs peuvent être corrigées manuellement. Une fois déroulé et corrigé, le réseau d'interférogrammes permet de construire une série temporelle [20], [51].

$$\varphi_{defo} = \frac{4\pi}{\lambda} d_{LOS} \quad \text{Eq 3.4}$$

*Noise (bruit)* correspond à toutes les sources de bruit existant lors du calcul de l'interférogramme. Notamment un grand nombre de phénomènes physiques induisent un délai supplémentaire de l'onde lors de son passage dans l'atmosphère. L'InSAR n'est sensible qu'aux hétérogénéités provoquant des retards différenciés à l'intérieur de la scène interférométrique. Il est fortement atténué par les filtres appliqués aux

interférogrammes permettant d'affiner la continuité des franges interférométriques et de supprimer les pixels aberrants (filtre adaptatif proposé par Goldstein et Werner [52]).

*Erreur atmosphérique* les distorsions atmosphériques (nébulosité, humidité, etc.) peuvent être la cause d'erreurs sur les interférogrammes. L'effet d'un milieu hétérogène tel que l'atmosphère sur la propagation d'une onde électromagnétique est différée. L'atmosphère est composée principalement de 3 couches ces différentes couches correspondent à des milieux plus ou moins dispersifs. La troposphère est une couche où de nombreux phénomènes météorologiques prennent naissance, la stratosphère est particulièrement sèche et peu de nuages se forment dans cette partie, et l'ionosphère, quant à elle, est un milieu dispersif qui est électriquement chargé. L'origine des délais de l'onde radar observés sur les interférogrammes vient de la partie neutre de l'atmosphère, donc principalement de la troposphère. Le délai des ondes électromagnétiques lors de la traversée de cette couche dépend des variations de la densité d'électron [53]. Pour éliminer cet effet, dans le cas d'interférométrie multi passe, on peut générer et combiner plusieurs interférogrammes dans lesquels on a au moins un diffuseur qui reste dans la même position. Ce diffuseur peut être utilisé comme référence pour éliminer la contribution de l'atmosphère.

## **3.2 Persistent Scatterer Interferometry**

### **3.2.1 Origine et développement de la technique.**

La technique Persistent Scatterers Interferometry (PSI) (i.e. des réflecteurs persistant) a été proposée et développée scientifiquement par Ferretti [54]. De nombreuses approches ont commencé à être développées à partir de la fin des années 90 pour essayer de résoudre les problèmes de la méthode différentielle (perte de cohérence temporelle et géométrique, artefacts atmosphériques) et d'exploiter au mieux les bases de données fournies par les satellites SAR [44], [46], [54], [55]. Ces approches, utilisant plusieurs acquisitions sur une même scène, permettent d'améliorer

la précision des mesures et de suivre en temps l'évolution des déplacements de coins rétrodiffusant [37].

Les méthodes PSI ont l'intérêt de fournir pour chaque point PS une évolution temporelle de déplacement par rapport à une date de référence et un point de référence. D'autre part la méthode PSI permet une estimation des erreurs liées aux artefacts atmosphériques et aux erreurs de DEM [19]. L'analyse PSI repose généralement sur des modèles de déplacements linéaires, c'est-à-dire des déplacements avec des taux de déformations relativement constant au cours de la période d'observation [37].

Ces réflecteurs sont dits stables non pas qu'ils soient immobiles au cours du temps, mais stable au sens où ils sont suffisamment rétrodiffusant de manière forte et stable sur tout le jeu de données. Pour qu'on puisse étudier la phase du signal dominant, l'information apportée par plusieurs interférogrammes il est possible de mieux estimer la composante atmosphérique et diminuer le bruit sur les mesures et de séparer le terme de phase lié à la déformation du reste du signal interférométrique [37].

Le domaine urbain offre de nombreux points d'accroche, est très favorable à cette technique et permet d'obtenir un réseau dense de points PS. En sortie d'une telle chaîne de traitement, une carte de vitesse moyenne des déplacements est produite [19].

### **3.2.2 Principe**

Le principe de la méthode consiste à sélectionner des points particuliers, les PS dont la réponse radar est suffisamment forte et continue dans le temps. Ces réflecteurs stables permettant le calcul du déphasage lié aux mouvements des réflecteurs au cours du temps [37].

Pour cette méthode de traitement on sélectionne une seule image maîtresse et à combiner le maximum d'images avec celle-ci. Plus la ligne de base (spatiale et temporelle) est grande, plus la décorrélation entre les images est importante. Un point clé de la méthode est donc de sélectionner correctement les réflecteurs dont la phase reste stable dans le temps et quelles que soient les configurations orbitales (voir Figure

3.1) : l'utilisation de toutes les images disponibles sur la zone étudiée est possible pour choisir la ligne de base perpendiculaire et temporelle des interférogrammes[41].

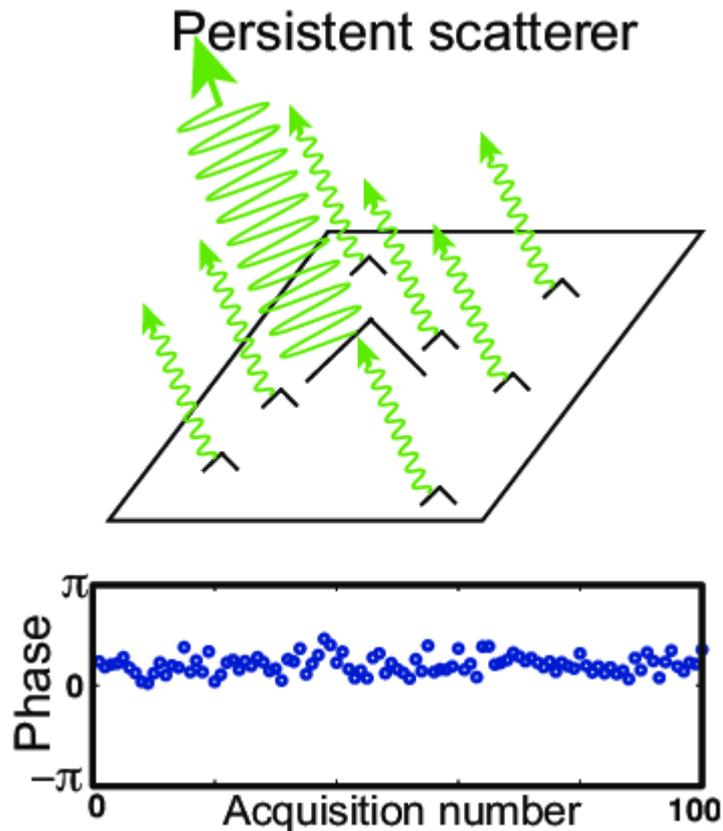


Figure 3.1 Persistent Scatterer distribution dans un terrain réel.

Source : [56].

Simulations de phase pour un pixel PS. Les dessins ci-dessus représentent les réflecteurs contribuant à la phase d'un pixel dans une image et les graphiques ci-dessous montrent des simulations de la phase pour 100 acquisitions (voir Figure 3.1). Les plus petits réflecteurs se déplaçant de manière aléatoire entre chaque itération. Le PS le plus brillant dans le cas du réflecteur persistant a une phase constante et une amplitude trois fois plus brillante que la somme des PS plus petits, qui ont une phase aléatoire [56].

### 3.3 Traitement des images InSAR

Cette partie consiste à présenter les données utilisées ainsi que la chaîne de traitement mise en place.

### 3.3.1 Données disponibles sur la zone d'étude

Pour réaliser cette étude, les images satellitaires radar exploitées dans cette étude, sont issues du réseau d'observation du programme européen Copernicus, lancé en 2014, dont l'objectif est de fournir en tout temps des images radar pour la collecte et la restitution de données continue sur l'état de la Terre. Ces images sont issues de la série de satellites d'observation de la Terre nommée Sentinel-1.

Les satellites fonctionnent via un système synthetic aperture radar en bande C dont la fréquence varie de 5,725 à 7,075 GHz en émission et de 3,4 à 4,2 GHz en réception. La résolution liée à cette bande est d'environ 5 m. Chaque zone sur la planète est survolée tous les 6 jours par un ensemble de deux satellites Sentinel-1, ce qui implique qu'un même satellite survole une zone définie tous les 12 jours dû au déphasage de 180° entre le 1A et le 1B [1].

Les produits Single Look Complex (SLC) sont des données SAR fournies avec des données orbitales et d'attitude définis. Les données SLC sont requises lors du traitement PSInSAR [57]. Les modes d'acquisition des données SAR sont illustrés sur la figure ci-après (voir Figure 3.2).

Il existe une grande variété de modes d'acquisition auxquels vont correspondre des swaths et des résolutions différentes. Nous nous intéressons aux principaux modes d'acquisitions utilisés en télédétection satellitaire actuelle (voir Figure 3.2).

- **Interferometric Wide Swath (IW)** Ce mode permet de prendre des mesures sur des swath de 250 km avec une résolution de 5 m sur 20 m. De plus, trois sub-swaths sont possibles grâce à la technique de « Terrain Observation with Progressive Scan SAR » mode (TOPSAR).
- **Wave mode (WV)** Le Wave Mode est utilisé pour connaître la direction et la hauteur des vagues des océans. Ce mode permet d'acquérir une succession d'images de 20 km sur 20 km espacés d'une distance constante.

- **Stripmap** (SM) Ce mode d'acquisition fournit une couverture avec une résolution de 5 m sur 5 m sur une bande de 80 km
- **Extra-Wide Swath** (EW) Ce mode est utilisé pour les zones maritimes ou polaires, ou bien pour des zones étendues avec un temps de passage court. Ce mode est similaire au mode IW, utilisant également la technique du mode TOPSAR, mais avec cette fois 5 sub-swaths, résultant d'une résolution allant de 20 m à 40 m. Ce mode permet de prendre une swath de 400 km.

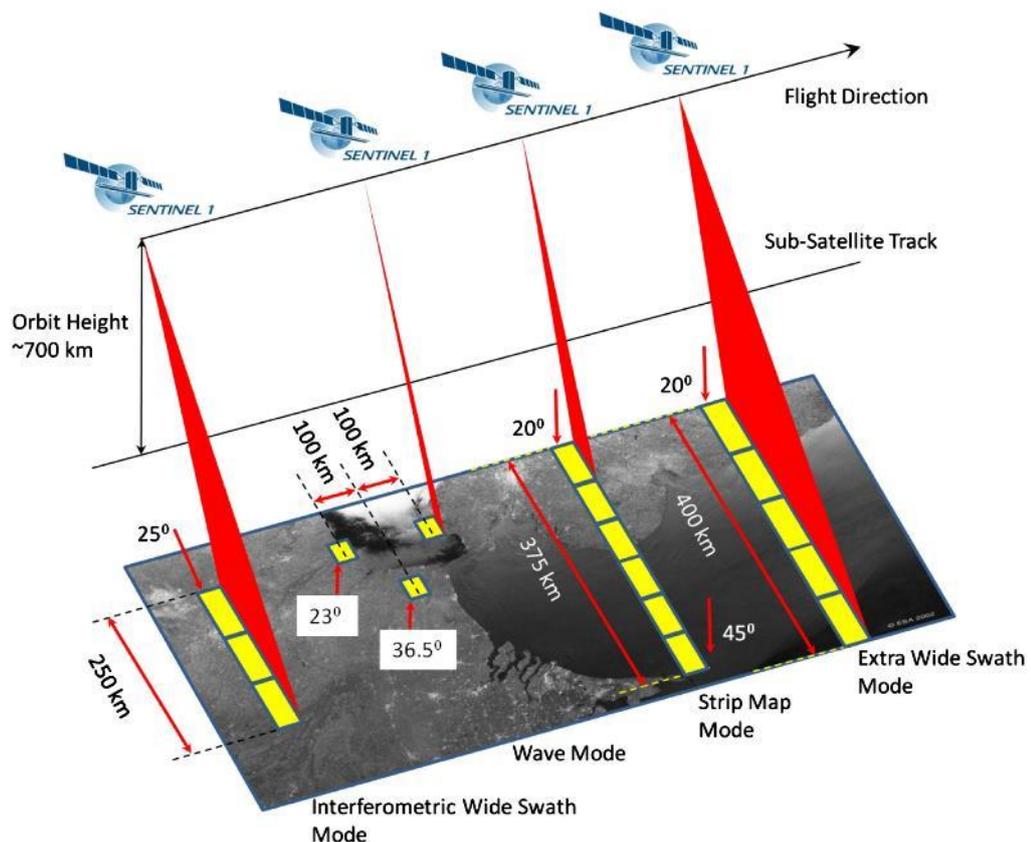


Figure 3.2 Représentation des différents modes d'acquisition Sentinel-1

Source : [58].

Pour notre cas d'étude, le mode d'acquisition Interferometric Wide Swath (IWS) qui nous intéresse. L'image radar de ce mode contient 3 swaths et chacune est composée de 9 bursts. Ces bursts sont séparées entre eux par une bande noire.

Il en existe des polarisations différentes horizontal et vertical. En polarisation simple VV, l'onde sera émise et réceptionnée à la verticale, tandis qu'une polarisation croisée (VH) envoie les ondes à la verticale et les réceptionne à l'horizontal (voir Figure 2.13). Les doubles polarisations permettent de préserver la phase et contiennent des informations complexes [23].

Selon la direction orbitale du satellite qu'elles soient ascendantes ou descendantes, ont choisi les données utilisables. La différence entre ces deux critères est la direction de l'orbite et donc celle de la ligne de visé du radar (Line of Sight LOS). L'exploitation des deux données permet de les comparer pour choisir la plus pertinente dans le contexte de ce travail. Le mieux pour nous était de travailler avec l'orbite précise pour avoir la meilleure précision possible lors de l'estimation des positions des PS [59].

Nous disposons 100 images SAR issue d'un intervalle de période entre 2016 et 2022 (voir Tableau 3.1), et de deux orbites différentes :

Tableau 3.1 Tableau récapitulatif des données radars utilisés.

| <i>Satellite</i> | <i>Orbite</i> | <i>Bande</i> | <i>Période couvrante</i>  | <i>Nombre de scènes</i> |
|------------------|---------------|--------------|---------------------------|-------------------------|
| Sentinel-1A      | 161           | C-band       | 03 Jan 2016 à 07 Jan 2022 | 50                      |
| Sentinel-1B      | 168           | C-band       | 12 Oct 2016 à 22 Oct 2021 | 50                      |

### 3.3.2 Construction d'un produit interférométrique

Les traitements des images ont été réalisés essentiellement à l'aide des logiciels scientifique SNAP, GAMMA et MATLAB qui ont adapté pour automatiser les étapes suivantes :

Avant tout traitement, La sélection d'images SAR convenable pour l'interférométrie est la première étape à réaliser pour tout traitement interférométrique il faut déterminer l'image maîtresse qui servira d'image de référence. Les critères adoptés pour cette étape ont un impact important sur la qualité des résultats finals et

dépend de l'application spécifique pour laquelle les images interférométriques sont nécessaires. Parmi ces critères on compte :

- L'angle et la direction de prise de vue (une orbite ascendante ou descendante)
- Une base géométrique et base temporelle (ligne de base perpendiculaire et temporelle convenable a la technique d'analyse).
- Une date d'acquisition convenable.
- La cohérence, une estimation de la cohérence est également utilisée dans la sélection d'une image maîtresse optimale. Cette image est sélectionnée en maximisant la cohérence attendue de la pile interférométrique
- Des conditions météorologiques optimales parce que ces phénomènes généralement causent la perte de cohérence [19].

A partir d'une série de  $N + 1$  d'images SAR disponibles sur la scène d'intérêt, l'indice de dispersion d'amplitude est calculé sur chaque pixel (voir Eq 3.5) :

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A} \quad \text{Eq 3.5}$$

Où  $\sigma_A$  et  $m_A$  correspondent à l'écart-type et la moyenne de l'amplitude d'un pixel en temps respectivement. La sélection des pixels qui seront utilisés par la suite s'effectue par seuillage sur cet indice (en général environ 0.4) [23], [37], [50], [60], [61].

L'étape suivante est la formation des interférogrammes différentiels : à partir des  $N + 1$  images SAR, un nombre des interférogrammes sont construits, en faisant interférer chacune des images avec une même image maîtresse. Le choix de l'image

maîtresse est fait de façon à limiter la dispersion des lignes de base perpendiculaires [43].

Avant le calcul d'un interférogramme, les images SLC doit être recalée par rapport à une image appelée « maîtresse » afin qu'un pixel de même coordonnées ligne/colonne dans les deux images correspond au même objet au sol. Cette étape est une transformation géométrique qui a le but de mettre dans les mêmes conditions les réflecteurs impliqués dans l'image maître et dans l'image esclave [62]. Ce recalage permet de corriger les effets de distorsion liés aux variations relatives de position du satellite dans le tube orbital [32]. Dans le cas idéal, tous les réflecteurs élémentaires qui ont contribué à la phase propre lors de la formation de l'image maîtresse se retrouvent exactement dans le même pixel de l'image esclave. On appelle cette étape la coregistration (voir Figure 3.3) [19].

Tous d'abord, A l'aide de SNAP on applique les fonctionne suivante pour une précision de l'orbite ainsi de faire un découpage spatial de sorte à choisir la swath qui contient notre zone d'étude (pour les esclaves la même que pour l'image maîtresse) : Split et Apply-Orbit-file. Une fois cette étape réalisée il est possible de construire un ensemble des images calibrer et couvre la zone d'étude [9], [63].

On utilise une méthode de corrélation d'images pour cette étape. Les décalages sont estimés grâce à la corrélation de cohérence des images. On calcule une grille de décalages appelés « offsets » entre l'image maîtresse. Cette grille, plus ou moins bruitée va être modélisée à partir de deux modèles de distorsion :

- A partir des données de modèle numérique de terrain (DEM) et l'information orbitales pour simuler la distorsion de la phase liée à la topographie (une extraction des franges de la phase topographique enregistrer) [19], [64]

- En estimant un modèle de distorsion quadratique en azimut et d'une translation en range. Une précision du recalage au 10e de pixel près est fondamentale pour préserver la cohérence de la phase [19].

La corrélation est un produit de quatre termes, un intervalle de temps ( $T$ ), Baseline perpendiculaire ( $B$ ) (la ligne base perpendiculaire entre 2 images), Doppler centroïde différence  $F_{DC}$  et du bruit thermique [48].

Un simple model est générer pour la corrélation total  $\rho_{total}$  ( Eq 3.6 ; Eq 3.7 et Eq 3.8) :

$$\rho_{total} = \rho_{temporal} * \rho_{spatial} * \rho_{doppler} * \rho_{thermal} \quad \text{Eq 3.6}$$

$$\rho_{total} \approx \left(1 - f \left(\frac{T}{T^c}\right)\right) * \left(1 - f \left(\frac{B}{B^c}\right)\right) * \left(1 - f \left(\frac{F_{DC}}{F_{DC}^c}\right)\right) * \rho_{thermal} \quad \text{Eq 3.7}$$

Où ;

Où ;

$$f(x) = \begin{cases} x, & \text{for } x \leq 1 \\ 1, & \text{for } x > 1 \end{cases} \quad \text{Eq 3.8}$$

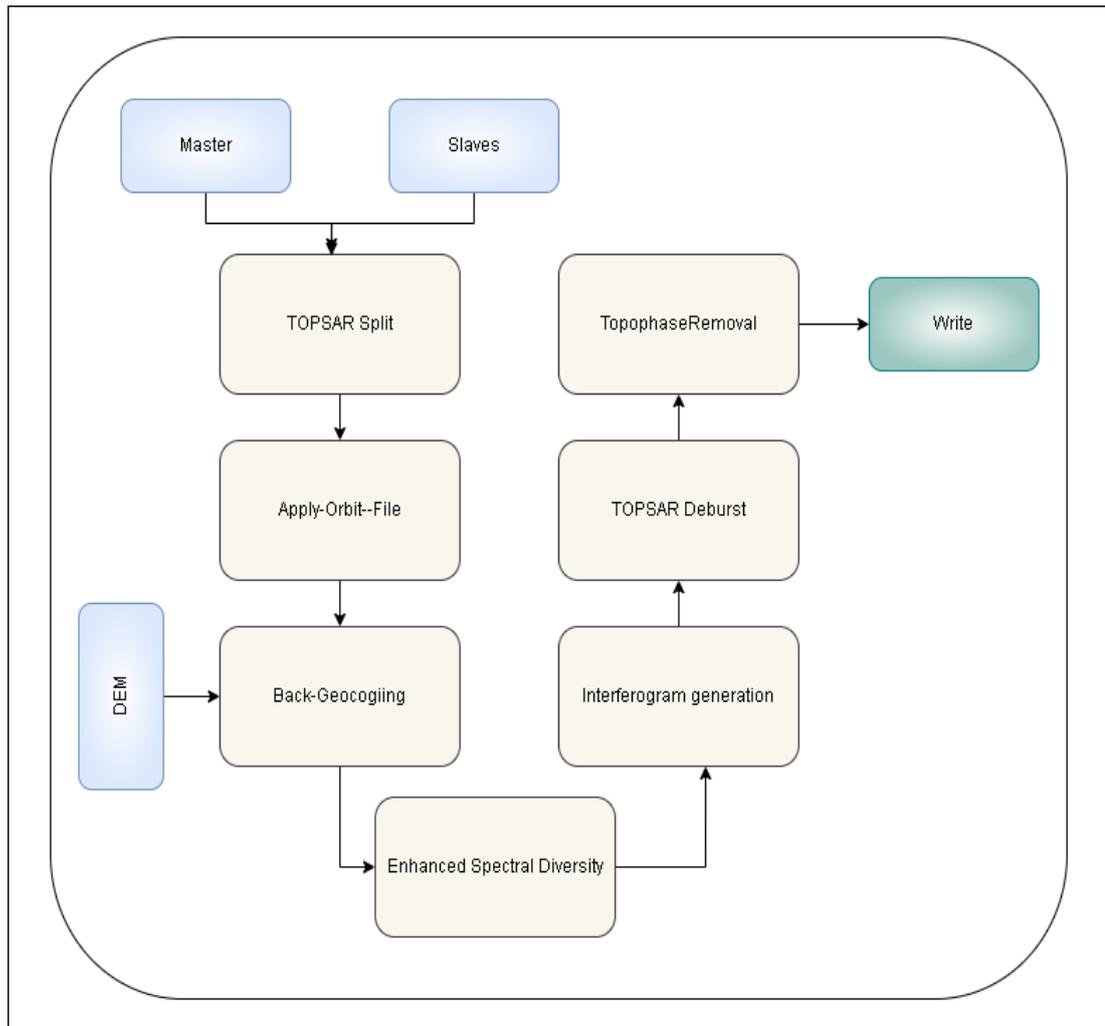


Figure 3.3 Workflow de construction d'un produit interférométrique.

### 3.4 Traitement PSInSAR (Workflow)

Un réseau des interférogrammes à est créé afin de reconstituer une série temporelle du déplacement. La méthode de Persistent Scatterer Interferometry (PSI) qui s'appuie sur la sélection des points PS gardant une bonne cohérence dans le temps le long de la période d'étude. La partie suivante décrit le traitement PSInSAR [32], [54], [59].

Le traitement de la méthode PSI a pour but de trouver des pixels non affectés par le bruit avec une stabilité de phase élevée en utilisant les étapes suivantes (voir Figure 3.4) :

- *Chargement des données*, dans l'analyse préliminaire un chargement des candidats persistant scatterer (PS) est effectué. Ces PS sont sélectionnés en tant que pixels selon la valeur de l'indice de dispersion d'amplitude (ADI). Dans notre cas environ 19000 à 20000 points ont été retenus.
- *Estimation du bruit*, l'estimation du bruit de la phase signifie que les pixels des candidats PS sélectionnés dans l'interférogrammes sont chargés des valeurs de Atmospheric Phase Screen (APS). L'effet de ce bruit est défini par une phase spatialement corrélée et des erreurs de terrain non corrélées. Pour de bons résultats, différents filtres spatio-temporels sont utilisés pour corriger l'APS.
- *Sélection des PS*, les points PS sont sélectionnés en fonction du paramètre de correction de atmospheric phase screen (APS). La densité du pourcentage des pixels aléatoires dans la scène est estimée par l'application d'une méthode de probabilité statistique.
- *PS weeding*, les PS sélectionnés à l'étape précédente sont éliminés, en supprimant les points très bruités due aux contributions de signal des éléments du sol voisin.
- *Correction de la phase*, (wrapped phase) les pixels sélectionnés sont corrigés de l'erreur d'angle de visée spatialement non corrélée (spatially uncorrelated look angle DEM error).
- *Unwrapping phase*, enroulement tridimensionnel des résultats corrigés des PS mentionnée ci-dessus. L'erreur d'enroulement apparait principalement les interférogrammes de ligne de base perpendiculaire plus longue.
- *Estimation de l'erreur d'angle de visée spatialement corrélée*, l'erreur SCLA (Spatially unCorrelated Look Angle or SCLA error) calculée à l'étape 3 et supprimée à l'étape 5. A l'étape 7, une erreur spatiale d'angle

de visée est calculée, cette erreur est due à l'erreur du DEM spatialement corrélée (ceci inclut les erreurs dans le DEM eux même et une cartographie incorrecte du DEM en coordonnées radar). L'équation de calcule (voir Eq 3.9) :

$$\Delta\theta = \frac{\Delta h \sin(\theta_i) + \xi \cos(\theta_i)}{r} \quad \text{Eq 3.9}$$

Où :

$\Delta h$  est l'erreur dans l'élévation ;

$\xi$  est la distance horizontale entre le centre de la phase et le milieu du pixel dans la direction du Range ;

$\theta_i$  est l'angle d'incidence.

- *Filtrage atmosphérique*, un filtrage atmosphérique et une estimation d'autres termes d'erreur de corrélation spatiale sont effectués. Les résultats sont un fichier de données contenant des points PS avec les vitesses de déformation calculé représente la déformation du terrain de la zone d'intérêt avec une précision de mm/an. [55], [59]–[61]

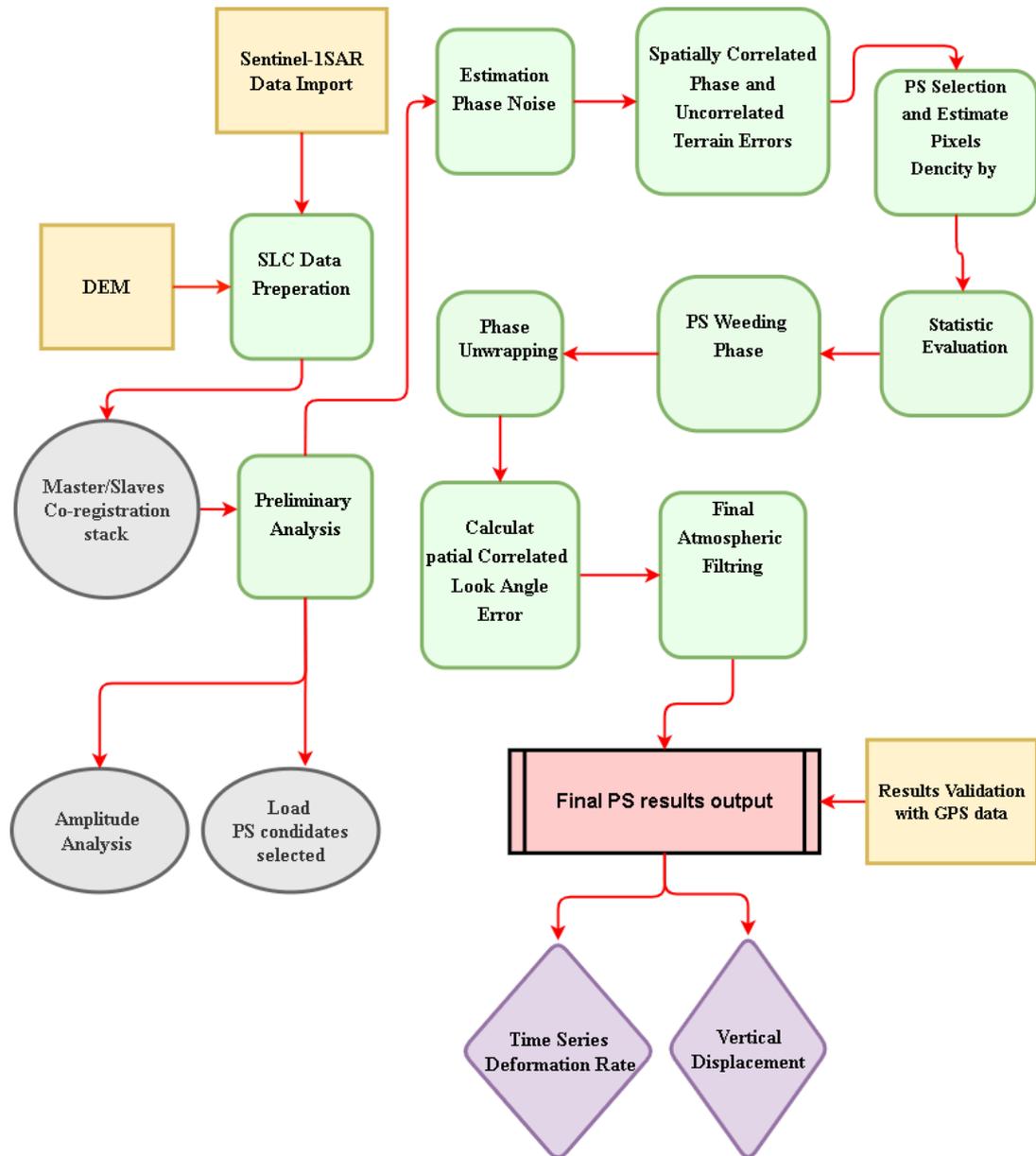


Figure 3.4 Illustration de la méthodologie globale adoptée dans la recherche.

### 3.5 Analyse de déplacement

Une image radar a une géométrie très particulière et n'est pas directement superposable à une carte. Le passage en carte pose de nombreux problème d'interpolation notamment sur les flancs éclairés par le radar où apparaissent des artefacts liés à l'interpolation. C'est pourquoi il est préférable de faire les analyses en géométrie radar puis les résultats de l'analyse se convertir en géométrie carte[19].

La déformation de surface enregistrée lors de l'acquisition des images selon la direction de la ligne de visée du satellite. Dans le cas idéale de prise des images moins

affectée par les artefacts, on n'échappe pas à une contrainte géométrique majeure : le déphasage des échos radar n'est sensible qu'à la projection du déplacement sur l'axe de visée (Line of Sight) (voir Figure 3.5) [34], [59]. Tout mouvement dans un plan perpendiculaire à l'axe de visée, qui n'affecte pas la distance mesurée, est donc indétectable par l'interférométrie [1], [9], [65].

Pour obtenir les trois composantes du vecteur de déplacement à partir d'une seule projection selon la direction de la ligne de visée qu'il est nécessaire d'avoir une information supplémentaire sur les caractéristiques du mouvement notamment sa direction (par exemple vertical, horizontal et en Nord).

Le déplacement obtenu est donné de façon relative. Les déplacements obtenus sont classés en directions selon la géométrie d'acquisition d'image SAR. La vitesse se calcule par les équations suivantes :

La vitesse dans un cible représenté par l'équation :

$$D = d_v \cos \theta - d_e \cos \alpha \sin \theta + d_n \sin \alpha \sin \theta \quad \text{Eq 3.10}$$

Où  $\theta$  et  $\alpha$  sont respectivement les angles d'incidence de radar basés sur les pixels et les angles d'azimut (look angle) du satellite (voir Figure 2.19) ;

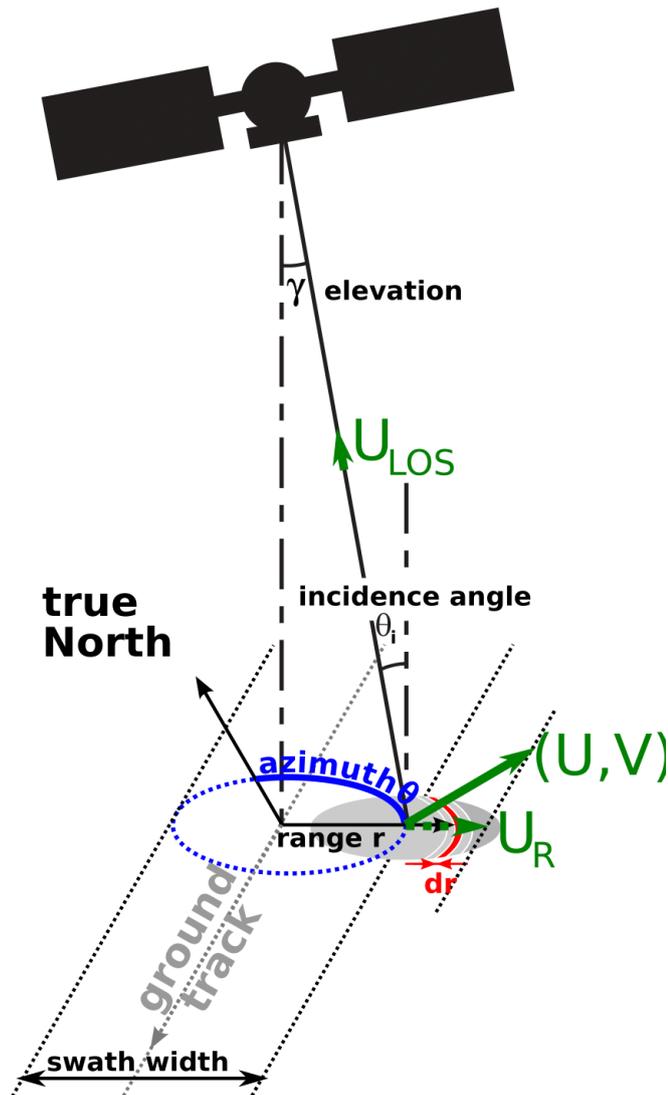


Figure 3.5 Projection du déplacement sur l'axe de visée.

Source : [66].

Le déplacement obtenu est donné de façon relative. Les déplacements obtenus sont classés en directions selon la géométrie d'acquisition d'image SAR. La vitesse se calcule par les équations suivantes :

La vitesse dans un cible représenté par l'équation :

$$D = d_v \cos \theta - d_e \cos \alpha \sin \theta + d_n \sin \alpha \sin \theta \quad \text{Eq 3.11}$$

Où  $\theta$  et  $\alpha$  sont respectivement les angles d'incidence de radar basés sur les pixels et les angles d'azimut (look angle) du satellite (voir Figure 2.19) ;

A partir de l'équation Eq 3.11 la sensibilité du système SAR au déplacement 3D peut être expliqué par les dérivées partielles montré dans l'équation Eq 3.12 :

$$\frac{\partial D}{\partial d_v} = |\cos\theta|, \frac{\partial D}{\partial d_e} = |-\cos\alpha\sin\theta|, \frac{\partial D}{\partial d_n} = |-\sin\alpha\sin\theta| \quad \text{Eq 3.12}$$

Pour un processus de calcul de multi-platform des images ascendantes et descendantes, l'équation de calcul s'écrit comme suit Eq 3.13

$$\begin{bmatrix} D_I \\ D_{II} \\ D_{III} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} d_v \\ d_e \\ d_n \end{bmatrix} \quad \text{Eq 3.13}$$

Où

$$A = \begin{bmatrix} a_I & b_I & c_I \\ a_{II} & b_{II} & c_{II} \\ a_{III} & b_{III} & c_{III} \end{bmatrix} \quad \text{Eq 3.14}$$

A partir l'équation Eq 3.13, dans un point arbitraire donné une vitesse de déplacement en trois directions peut être calculée par les équations et la matrice suivante Eq 3.15

$${}^B_{3n * (n + 2)} * {}^X_{(n + 2) * 1} = {}^L_{3n * 1} + {}^R_{3n * 1} \quad \text{Eq 3.15}$$

Où :

$B$  Coefficient de la matrice ;

$X$  Vecteur inconnu à estimer ;

$L$  Vecteur observé ;

$R$  Vecteur de correction.

Le détail de la matrice s'écrit :

- Le coefficient  $R$  :

$$\begin{matrix} B \\ 3n * (n + 2) \end{matrix} = \begin{bmatrix} a_I & 0 & \dots & 0 & b_I & c_I \\ 0 & a_I & \dots & 0 & b_I & c_I \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & a_I & b_I & c_I \\ a_{II} & 0 & \dots & 0 & b_{II} & c_{II} \\ 0 & a_{II} & \dots & 0 & b_{II} & c_{II} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & a_{II} & b_{II} & c_{II} \\ a_{III} & 0 & \dots & 0 & b_{III} & c_{III} \\ 0 & a_{III} & \dots & 0 & b_{III} & c_{III} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & a_{III} & b_{III} & c_{III} \end{bmatrix} \quad \text{Eq 3.16}$$

- Le vecteur  $X$  :

$$\begin{matrix} X \\ (n + 2) * 1 \end{matrix} = [d_v^1 \quad d_v^2 \quad \dots \quad d_v^n \quad d_e \quad d_n] \quad \text{Eq 3.17}$$

- Le vecteur  $L$ :

$$\begin{matrix} L \\ 3n * 1 \end{matrix} = [D_1^1 \quad D_1^2 \quad \dots \quad D_1^n \quad D_{II}^1 \quad D_{II}^2 \quad \dots \quad D_{II}^n \quad D_{III}^1 \quad D_{III}^2 \quad \dots \quad D_{III}^n] \quad \text{Eq 3.18}$$

- Le vecteur  $R$  :

$$\begin{matrix} R \\ 3n * 1 \end{matrix} = [r_I^1 \quad r_I^2 \quad \dots \quad r_I^n \quad r_{II}^1 \quad r_{II}^2 \quad \dots \quad r_{II}^n \quad r_{III}^1 \quad r_{III}^2 \quad \dots \quad r_{III}^n] \quad \text{Eq 3.19}$$

Les valeurs de vitesse de déplacement retenu du calcul se présentent par la suite dans des cartes des vitesses couvrant la région d'étude.

## **Chapitre 4: Contexte d'étude**

---

Ce chapitre est dédié à une description de la région d'étude, ces caractéristiques de point de vue géographique, géologique et hydrogéologique. Une présentation de la phénoménologie des affaissements apparus à la région de Chéria et une représentation des dégâts naturels et humaine engendré.

### **4.1 Région d'étude**

#### **4.1.1 Situation géographique**

Le bassin de Chéria est situé au Nord-Est de l'Algérie exactement dans la partie sud-ouest de Tébessa, située entre la latitude de  $35^{\circ}18'41,62''$  et  $35^{\circ}14'51,30''$  N, et la longitude de  $7^{\circ}42' 51,40''$  et  $7^{\circ}47'34,62''$  E (voir Figure 4.1).

Le plateau de Chéria à une forme généralement triangulaire orienté suivant la direction NE-SW avec une inclinaison de faible degré vers le SW. Le bassin est limité sur sa périphérie par une série montagneuse continue convergent en entonnoir et laissent entre eux une vallée étroite, un col peu entaillé c'est l'exutoire de Oued Chéria [67]. De point de vue hydrologique (voir Figure 4.3), le bassin se divise en deux sous bassins :

- Un sous bassin nord se représente par une cuvette amont comprise entre Gaaga et Chéria.
- Un sous bassin sud se représente par une cuvette avale.

Le bassin est entouré par des massifs des Djebels à des altitudes qui culminent à plus de 1400 m Tazbent, Troubia, Krime, Reddama, Zeghrata, kef Nsour, Dj. El Mezraa, Dj, Zohra, Dj. Gaagaa, et le sommet le plus culminant est Dj. Doukkane avec des pentes accentuées qui s'adoucent jusqu'à se confondre avec l'inclinaison de la plaine.

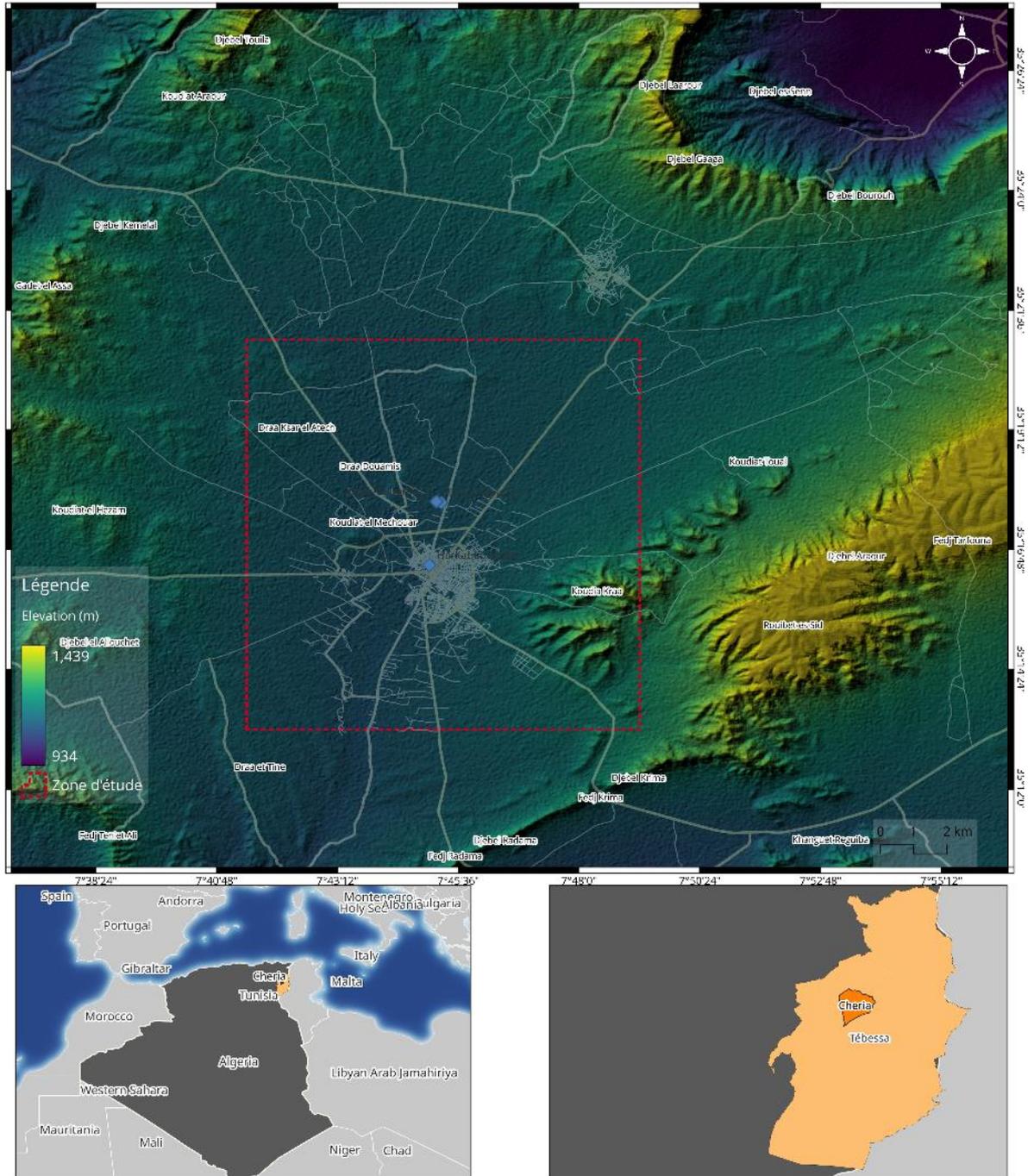


Figure 4.1 Situation géographique du plateau de Chéria.

#### 4.1.2 Occupation des sols et la couverture végétale

La végétation naturelle dans la région est caractérisée par une absence de végétation arbustive (presque nulle), une présence d'une forêt de pin d'Alep développée au Nord de la zone d'étude et se décroît de plus en plus vers le Sud jusqu'à sa disparition.

L'activité économique essentielle se caractérise par une activité d'élevage et agricole. L'activité d'élevage, ovin et bovin, est la plus importante activité dans la région.

L'activité agricole consiste à une culture des céréales qui est conditionnée à cause d'un régime de précipitations aléatoires dans la région. Dans les dernières décennies cette région a pu même de procéder une culture de quelques légumes dont l'irrigation est assurée grâce aux eaux souterraines. Dans nos jours cette culture agricole n'existe plus à cause de la sécheresse et l'épuisement des niveaux piézométrique des eaux souterraines exploitées. La zone en question appartient au domaine sub-saharien ce qui limite la végétation [13].

### **4.1.3 Climat**

L'Algérie orientale, appartient à un climat semi-aride très contrasté, caractérisé par un hiver froid avec des chutes de neige pendant plusieurs semaines, et un été chaud sec et prolonge [13]. La région de Chéria est contrôlée par les stations pluviométriques suivantes : Chéria, Bir Mokadem, Bir Touil, Bir Troubia et Ain Babouche [14].

Les précipitations ont un régime saisonnier avec une moyenne entre 361 et 521 mm/an de l'année 1974 à 2014 (voir Figure 4.2). Selon les travaux antérieurs réalisée utilisant l'archive des données météorologiques disponible sur la région d'étude, la saison la plus pluvieuse est le printemps et le mois le plus pluvieux est septembre [13], [15], [67]. Les précipitations, jouent un rôle primordial dans l'alimentation du réseau hydrographique d'une région ainsi que son système aquifère.

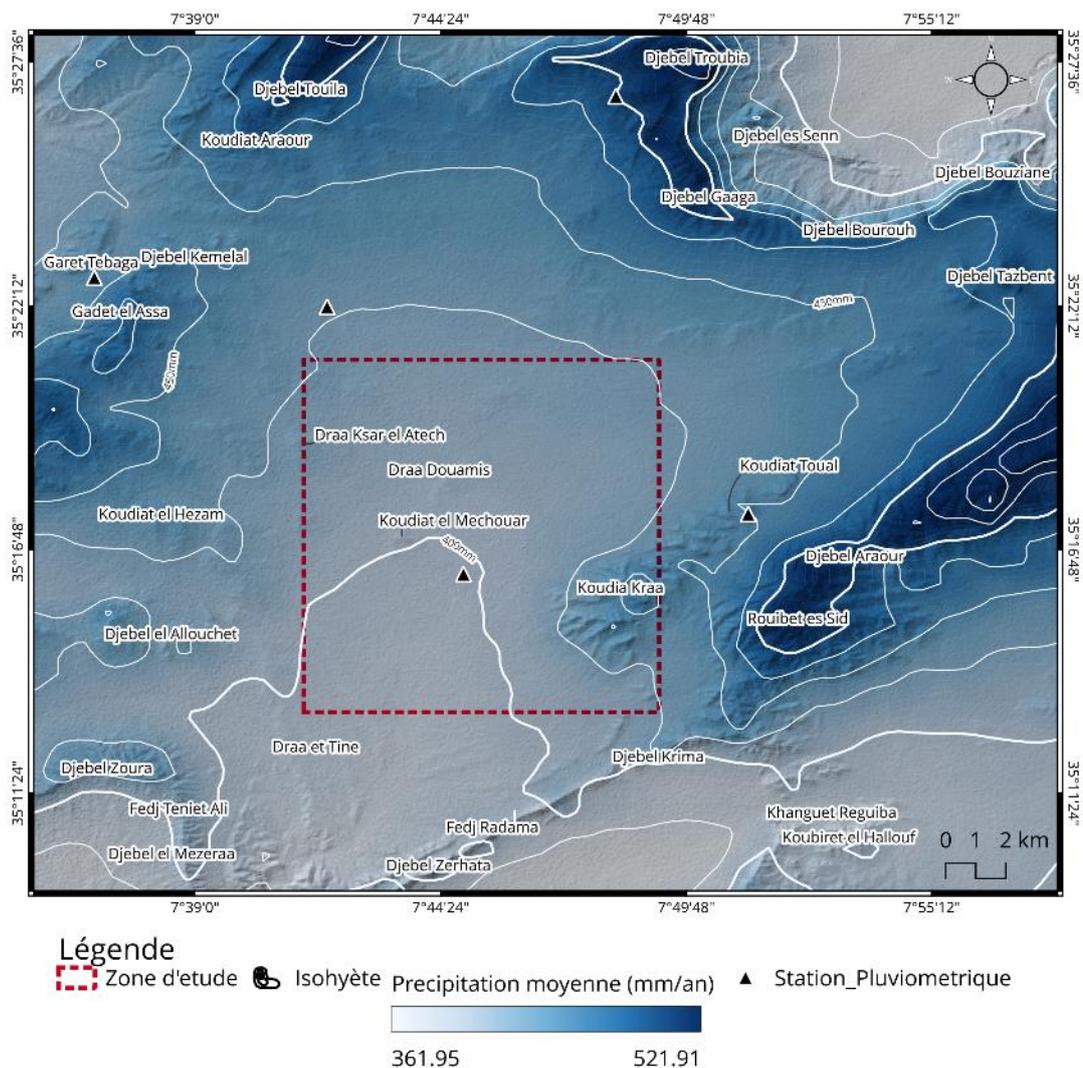


Figure 4.2 Carte de la précipitation de la région d'étude.

Variation des moyennes interannuelles de précipitation de la station de Chéria. (1972 - 2014) [14]. Le rectangle rouge représente la zone d'étude et les petits triangles noir présentent les stations pluviométriques disponible.

#### 4.1.4 Hydrologie

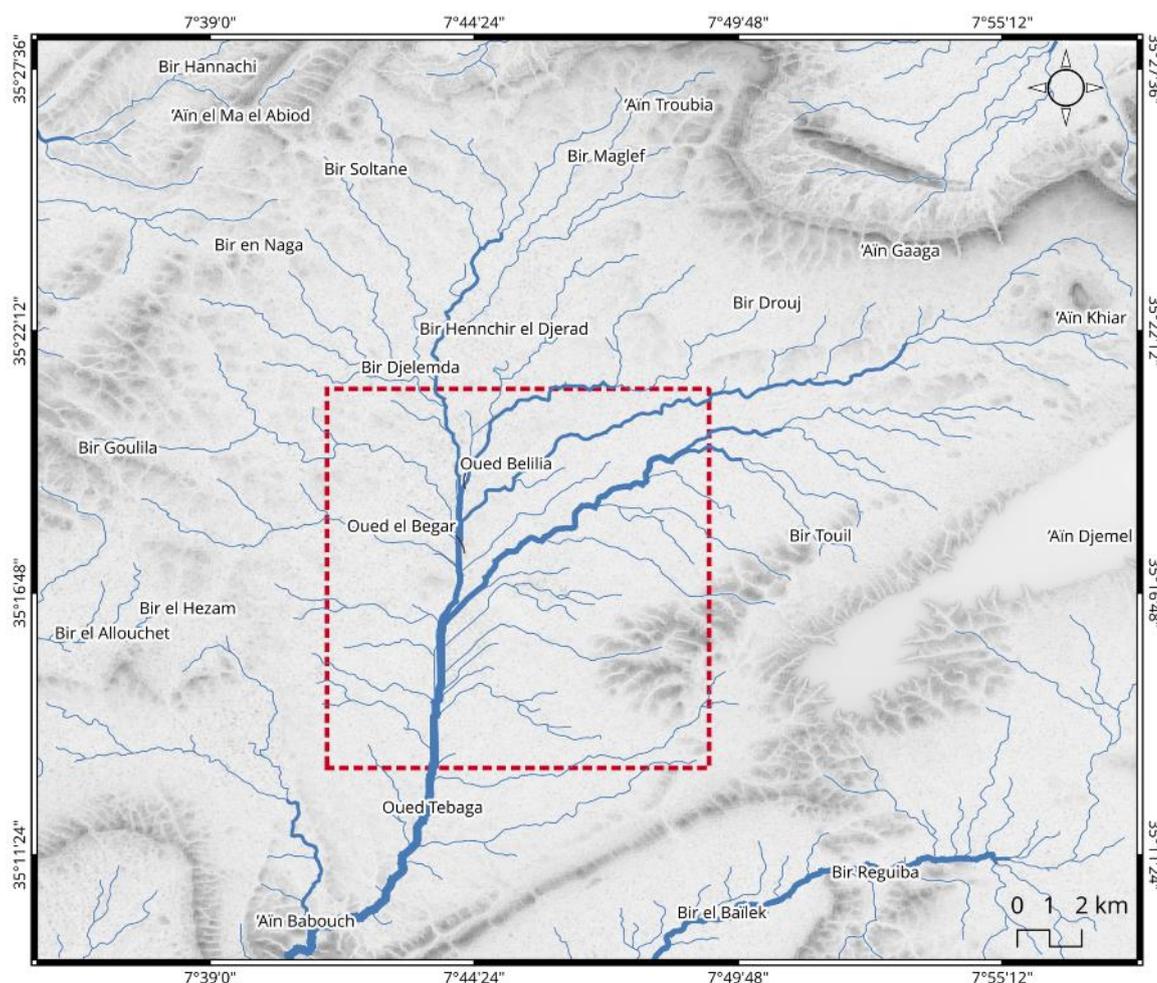
L'Algérie orientale au climat semi-aride très contrasté, est drainée par deux systèmes hydrographiques opposés du nord au sud : des Oueds tributaires de la mer méditerranée et des oueds reliés aux dépressions fermées de l'intérieur [68].

Le réseau hydrographique c'est l'ensemble des canaux naturels (permanent ou temporaire) par lequel s'écoulent toutes les eaux (ruissellement, neige...etc.) et convergent tous en un seul point de vidange du bassin versant (exutoire). Le bassin versant de Chéria collecte et recueille les pluies et les drainent vers les zones les plus basses ou vers les nappes souterraines.

Le plateau de Chéria présente un régime hydrique différent au nord de ce qu'il est au sud [13]–[15] (voir Figure 4.3).

- Au Nord les oueds convergent vers la cuvette du centre du plateau avec un nombre important des talwegs suivant les directions de drainage suivante NE-SW, NW-SE et N-S.
- Au Sud le drainage est orienté N-S suivant l'écoulement d'Oued Chéria vers l'exutoire du bassin.

La densité de drainage est liée étroitement de deux facteurs principaux: La lithologie et l'abondance des précipitations, elle permet d'apprécier le réseau hydrographique dans le bassin versant [14].



#### Légende

Zone d'étude

Réseau hydrographique

— Cours d'eau

*Figure 4.3 Le système hydrographique dans le plateau de Chéria. Modifié par Hamdi, 2023.*

#### **4.1.5 Hydrogéologie**

Basant sur les études disponibles dans la région de Chéria (pour plus de détail voir [13], [15], [67], [69]). Le bassin de Chéria de point de vue hydrogéologique se constitue de trois aquifères d'âge différent avec un potentiel hydrique aussi différent. Le sens d'écoulement souterrain est orienté N-S à NNE-SSW coïncide avec le sens d'écoulement superficielle d'Oued Chéria.

Trois type d'aquifère sont distingués de l'ancien vers le récent :

- ***L'aquifère des calcaires maestrichtiens*** : Des calcaires fissurés avec des cavités seulement aux bordures. Les forages réalisés in-situ indique un intérêt hydrogéologique uniquement en bordure.
- ***L'aquifère des calcaires éocènes*** : constitue d'un réservoir sous forme d'une cuvette synclinale orientée grossièrement NNE - SSW interrompue par deux failles. La cuvette de réservoir se réduit à une étroite gouttière qui draine la nappe en direction d'Outa Oum Khaled et des sources d'El Mezeraa, avec un intérêt hydrique important où de nombreux forages sont implantés spécialement autour la ville de Chéria. On peut conclure que : les 50 premiers mètres caractérisent par des calcaires karstifiées et dans les 100 premiers mètres on rencontre des séries calcaires fissurées.
- ***L'aquifère Mio-Plio-Quaternaire*** : Ce niveau d'aquifère renferme deux nappes, qui ont traversé par plusieurs forages (l'état des forages actuellement est à sec). La lithologie constituée par des argiles, des graviers et des sables d'âge Moi-Pliocène surmonté par des cailloutis fluviaux. Ces formations occupent la majorité du plateau de Chéria. Elles assurent dans la partie Nord, l'alimentation des calcaires Maestrichtiens et Éocènes par l'infiltration [13], [69].

Le réseau des sources dans la région est principalement localisé au contact entre les formations du Crétacé et celles du Danien et Campanien, au nord et au sud tel que la source de Salhi BenTaeib et Ain Kadi. Actuellement, elles sont à sec, sauf pour celle de Ain Babouche au Sud et Ain Troubia au Nord [67].

#### 4.1.6 Séismicité

La sismicité dans la zone d'étude est unique. Selon le CRAAG (Le Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique), la région de Chéria situé dans la « Zone I » (voir Figure 4.4), caractérisée par des activités sismiques stable [70].

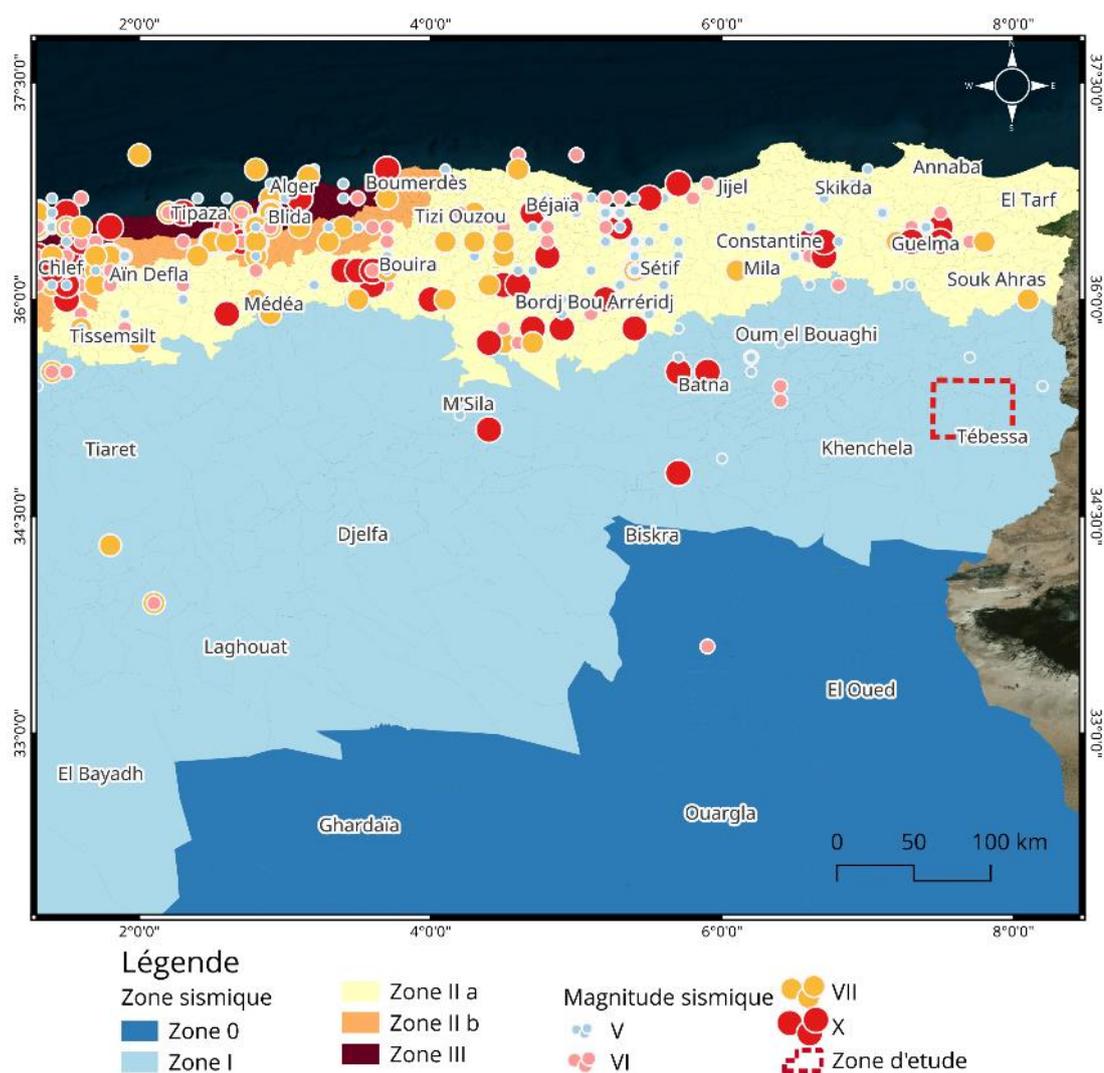


Figure 4.4 Carte de découpage sismique de l'Algérie avec l'historique des séismes enregistré.

Source : [70].

#### 4.1.7 Géologie

Basant sur les travaux antérieurs [13], [69], [71]–[77], les formations géologiques rencontrées dans la région de Chéria de bas en haut sont les suivantes :

- Les affleurements de la limite de la plaine d'âge Crétacé supérieur.
- Les affleurements à l'intérieur de la plaine d'âge Eocène.
- Les formations alluvionnaires d'âge Mio-Plio-Quaternaire

A partir du livret de la paléontologie des vertébrés en Afrique du Nord [12], une richesse de débris de vertébrés (des poissons) dans les niveaux phosphatés de l'éocène et aussi dans les formations maestrichtiennes. Pour ce qui concerne les mammifères, la connaissance des faunes du niveau miocène inférieur et moyen reste très partielle et très incomplète.

La géologie de la région d'étude se résume dans le tableau ci-dessous (voir Figure 4.5 et Tableau 4.1).

*Tableau 4.1 Tableau descriptif résumant les formations géologiques constituant la région de Chéria.*

*Source : D'après [72].*

| <i>Ere</i> | <i>Période</i> | <i>Époque</i> | <i>Étage</i> | <i>Description</i>  |
|------------|----------------|---------------|--------------|---|
| Cénozoïque | Quaternaire    |               |              | Il est distribué dans les parties basses des reliefs et couvrant des surfaces importantes. L'aval de Chéria est représenté par des cailloutis fluviaux formant un vaste plateau limité au Sud-Ouest par le talus Draa Fidh el Mahri et à l'Est par les marécages de Chéria [13]. Les formations lithologiques sous forme des alluvions actuelles sont : |
|            |                |               |              | <ul style="list-style-type: none"><li>• Alluvions de remplissage</li></ul>  |

|            |           |                   |   |  |
|------------|-----------|-------------------|---|--|
|            |           |                   | Elles sont sous forme des alternances avec les horizons argileux dans le marécage de Chéria. Ce sont des cailloutis et petits galets enrobés dans un ciment plus ou moins argileux.   |  |
|            |           |                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Alluvions de piedmont</li> </ul> Elle est constituée par des formations caillouteuses, elles occupent toute la bordure de la plaine de Chéria. |  |
|            | Néogène   | Moi-pliocène      | Argile gypseuse, lentille de sable, sable siliceux, conglomérats, et des molasses. Il reposent en discordant avec une série transgressif sur les calcaires de l'Eocène moyen [78].    |  |
|            | Paléogène | Eocène            | Lutétien  | Des formations calcaires à gypse   |
| Yprésien   |           |                   | Une série gréseuse ou marneuse, avec des calcaires marneux et des calcaires brun-beiges à silex.  |  |
| Paléocène  |           | Thanétien         | Calcaire lumachellique et marne.  |  |
|            |           | Danien            | Dépôt marneux très argileux.  |  |
| Mésozoïque | Crétacé   | Crétacé supérieur | Maestrichtien   | Calcaire beige.  |
|            |           |                   | Campanien   | Des marnes argileuses gris verdâtre et jeune gris à plaquettes de calcite fibreuse et interaction de marne à lumachelles [73]. |
|            |           |                   | Turonien  | Calcaire à Incérâmes.  |

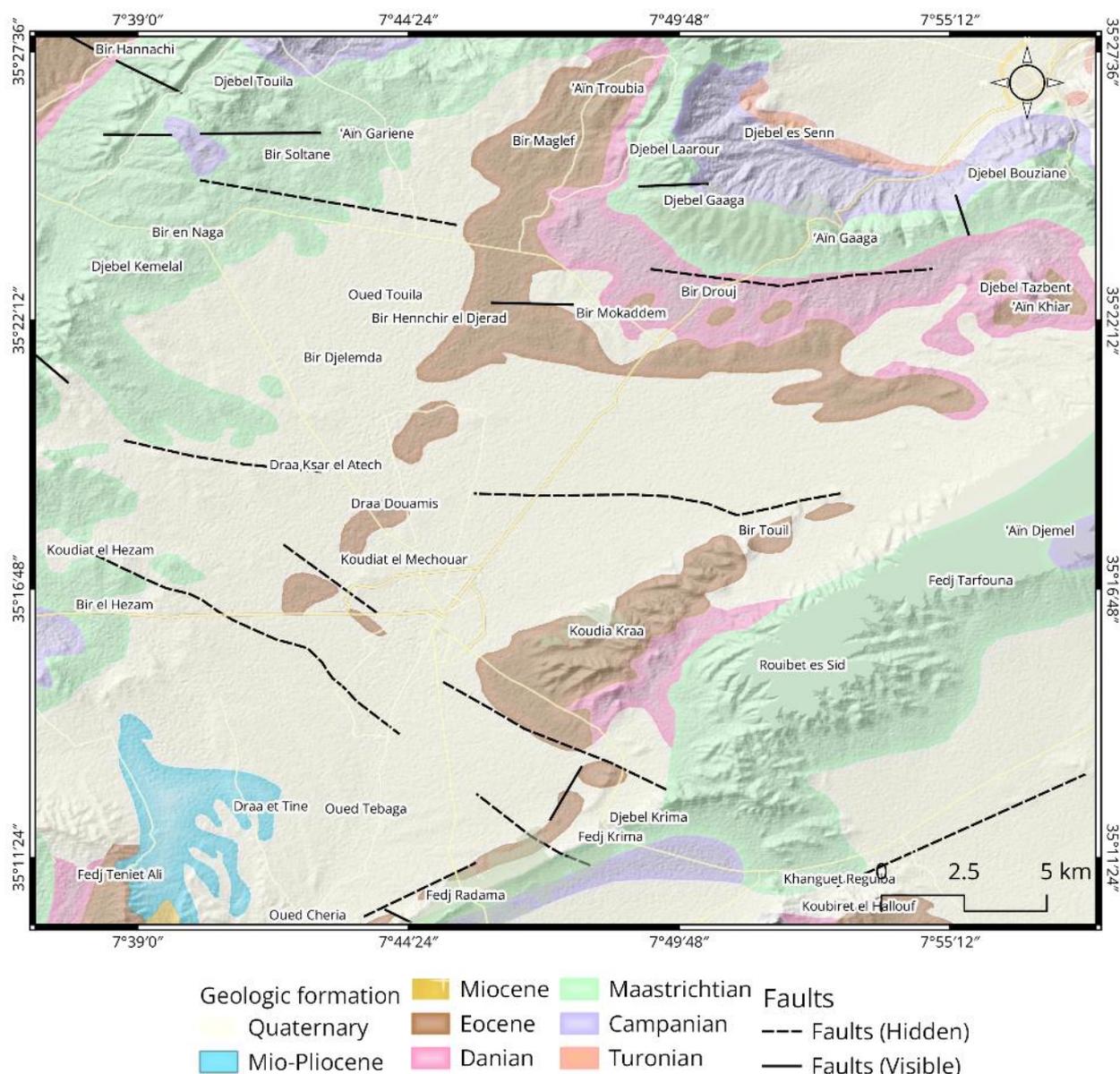


Figure 4.5 Carte géologiques de Chéria. Modifié par Hamdi, 2023.

Source : [79].

Le plateau de Chéria appartient à l'Atlas saharien [76]. Structuralement, il s'est formé de deux phases tectoniques s'oppose de manière orthogonale (voir Figure 4.6) :

- **La première phase** : les charnières synclinales sont allongées suivant des directions NE-SW[13].
- **La deuxième phase** : sensiblement orthogonale à la première, se traduit par de grand faille et des plis peu accusés sur le plateau [78], [80].

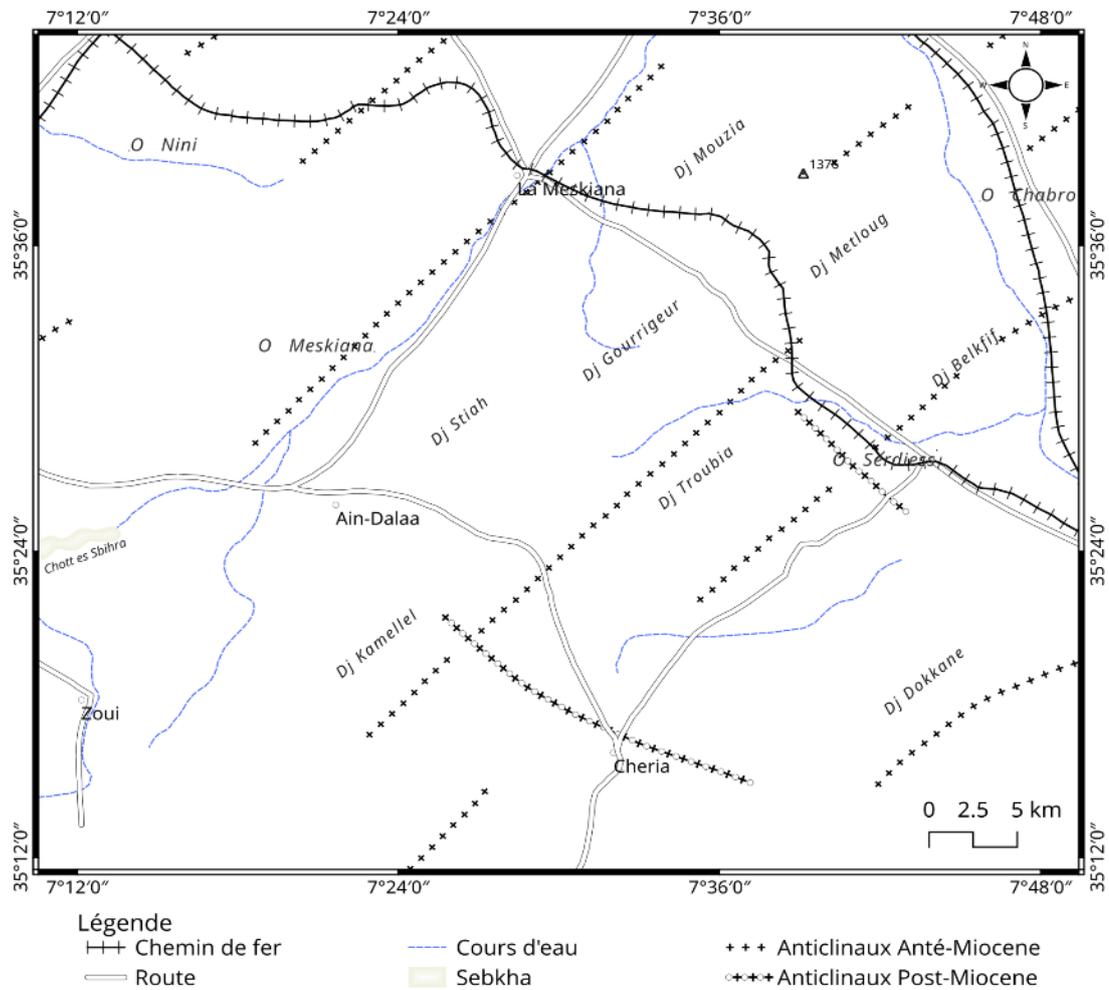


Figure 4.6 Esquisse tectonique de la région de Tébessa.

Source : D'après [72].

## 4.2 Les affaissements du bassin de Chéria

La région de Chéria a connu deux événements d'effondrement (voir Figure 4.7). D'après les études antérieures [13]–[15], [67] les Karsts sont créés principalement dans les terrains solubles du calcaire éocène par l'action de la corrosion entraînée par les précipitations chargées de  $CO_2$ .

Les phénomènes d'effondrement sont apparus par conséquent d'assèchement des niveaux d'aquifères karstiques. Suite à une constatation sur site et sur la base des informations acquises de reconnaissance géologique et hydrogéologique de la région, il est constaté que cet effondrement pourrait être due :

- La diminution de la pression interstitielle due à l'intensification des pompages prolongés.

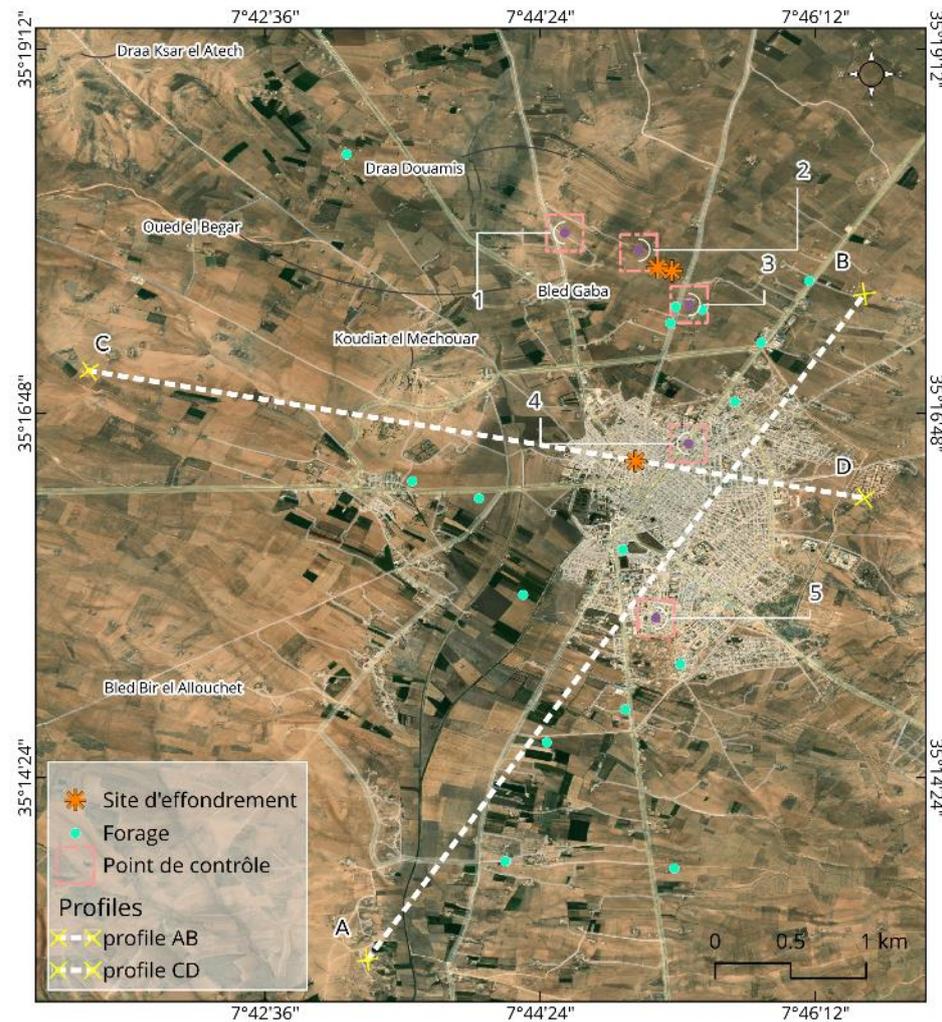


Figure 4.7 Situation géographique du plateau de Chéria.

#### 4.2.1 Les affaissements de Draa-Douamis

En dehors au nord de la ville de Chéria a quelque kilomètre une apparition de deux grands affaissements avec un diamètre plus de 60 m et 24 m et une dépression de quelques mètres (voir Figure 4.8). D'après les études acquis l'origine de cet affaissement est le résultat de la surexploitation des eaux souterraines et la diminution de la pression interstitielle (un abaissement du toit de la nappe karstique). En effet, l'effondrement des cavités est déclenché par une forte averse estivale (en 2002), où les cavités effondrées absorbant toutes les eaux qui a inonde la plaine [15], [67].



*Figure 4.8 Représentation des dolines de Draa-Douamis.*

Après les effondrements, des phénomènes d'érosion régressive ont provoquée par les ruissellements des eaux pluviales à travers les alluvions recouvrant la quasi-totalité de la plaine. Les effondrements engendrent une dégradation des sols voisins au fur et à mesure. Parmi les résultats des travaux réalisés par la mission de PHC Tassili- mission Tébessa en 2013, une représentation schématisé des cavité souterraine de Chéria avec les canaux souterraines (voir Figure 4.9) [81].

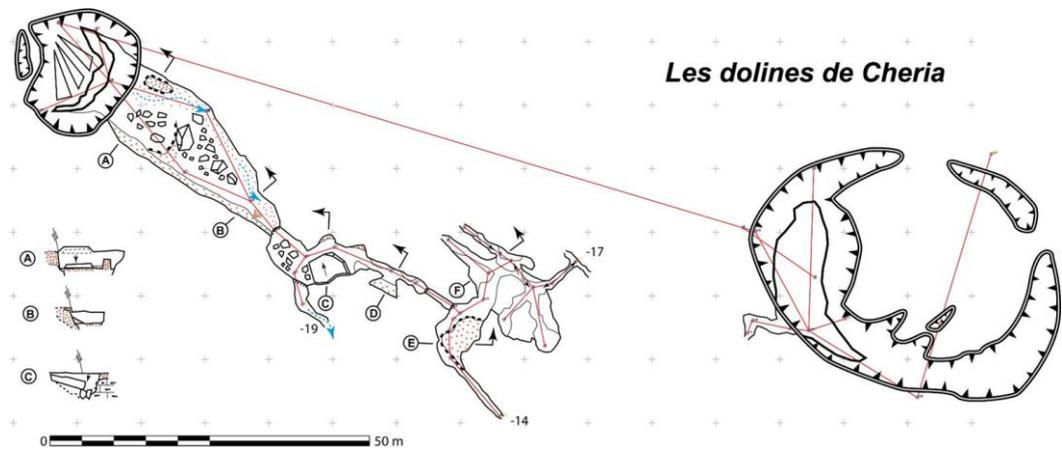


Figure 4.9 Schématisation des dolines de Chéria.

Source : [81].

#### 4.2.2 Les affaissements de Harkat Bouziane

Dans le nord de la ville de Chéria, le 26/02/2009 un affaissement a eu lieu dans un quartier qui s'appelle Harkat Bouziane (voir Figure 4.7 pour la localisation géographique). Une cavité souterraine est effondrée de forme cylindrique avec un diamètre d'environ 40 m cette action a causé de dégâts sérieuse (voir Figure 4.10): une destruction avancée et fissuration importante des infrastructures sans perte humaine [15], [67].



*Figure 4.10 Photo les effondrements de Harkat Bouziane.*

*Source : D'après Benabass. C, 2009.*

### **4.2.3 Fissuration et karstification**

La tectonique cassante influence d'une manière considérable la distribution des perméabilités dans le milieu karstique. Le développement morphologique des karsts se fait par des réactions chimiques durant une action de corrosion. La réaction chimique eau

carbonates suivant des chemins préférentiels des fissures préexistantes avec un écoulement de vitesse différente. Les fissures qui sont exposées aux eaux pluviales agressives chargées en CO<sub>2</sub> atmosphérique, et l'écoulement élargissent et façonnent des galeries sous-sol de différentes dimensions. Elles constituent de véritables réseaux hydrographiques souterrains avec chenaux et galeries souterraines. L'orientation générale des cavités souterraines est généralement celle des fissures originales préexistantes.

D'après les résultats des études et les observations tectoniques réalisées dans la région de Chéria, on peut constater que : la direction majeure de fracturation coïncident avec l'axe d'effondrement, l'axe majeurs des effondrements coïncide avec l'axe d'écoulement d'Oued Chéria NNE-SSW, les fissures s'élargissent avec des formes spécifiques selon les directions d'écoulement souterraines et superficiels et les forages implanter proche et parallèles à l'Oued Chéria sont positifs. Il est conclu que le développement du processus de karstification s'est fait de manière préférentielle selon les axes de fissuration qui coïncident avec les directions d'écoulement superficiel et souterrain [13]–[15], [67].

## **Chapitre 5: Analyse et Discussion des Résultats**

---

Ce chapitre montre les résultats de nos travaux de traitements et d'analyse PSInSAR des images SAR de Sentinel-1 se subdivise en deux sections, la première souligne les résultats acquis par la technique PSI sous forme de cartes de vitesse de déplacement verticale et horizontale, une évaluation temporelle du déplacement détecté par le satellite. La seconde une section destinée à une discussion explicative des résultats obtenus de l'interférométrie, et d'un suivi piézométrique des forages dans la région.

### **5.1 Résultat**

La technique interférométrique différentielle employée est celle des Persistent Scatterer (PSI). La déformation est suivie dans le temps sur des positions spatiales qui conservent une cohérence et les artefacts atmosphériques sont soustraits. Les données utilisées consistent en 100 images SLC SAR Sentinel-1 de 2016 à 2022 et un DEM de la mission SRTM.

Les cartes de distributions des vitesses moyennes annuelles verticale et horizontale obtenue par le processus PSI sont illustrées par les Figure 5.1 et Figure 5.2.

La distribution des rampes de couleurs des cartes de vitesses verticale peut donner un aperçu visuel préliminaire du mouvement de terrain dominant dans la zone d'étude, par exemple, un affaissement ou un soulèvement si la direction de déplacement est verticale, et un mouvement Est-Ouest si la direction de déplacement est horizontale. Nous observons plus clairement un phénomène de subsidence dans la région de Cheria. Les résultats obtenus montrent une vitesse moyenne verticale des valeurs comprises entre  $-35,95$  et  $12,73$  mm/an, ainsi les cartes montrent une distribution spatiale des valeurs négatives par rapport aux valeurs positive.

Les cartes montrent une distribution spatiale des valeurs négatives et d'autre positive (voir Figure 5.1). Dans la partie rurale qui entoure la ville de Chéria, nous observons une dominance presque totale des valeurs négative de vitesse verticale moyenne. Ces distributions ne mettent en évidence que presque la quasi-totalité de la

partie rurale a été touchée par un pourcentage important et des forts taux des valeurs négatives des vitesses moyenne obtenues dans cette recherche.

La partie qui se situe au *NW* de la ville de Chéria, la zone de Draa-Douamis où se situe l'effondrement qui s'est déroulé en 2002, est marquée par des taux élevés des valeurs négatives moyennes presque -35mm/an du calcul effectuée par la technique PSI.

Dans la carte de vitesse verticale moyenne la zone urbaine de la ville de Chéria est marquée par deux zones différentes de distribution des valeurs négatives. La partie urbaine *NW* de la ville de Chéria qui se situe proche de la zone rurale dont nous avons déjà parlé où se situe le deuxième événement d'effondrement en 2009, est marquée par des taux plus au moins élevés des déplacements verticaux touche presque les -15 mm/an. Tandis que, le reste de la ville de Chéria est marquée par une couverture des valeurs assez moyenne touche les -9 mm/an.

Dans la carte des vitesses verticales moyennes, les taux négatifs indiquent une subsidence ou un affaissement du terrain et les taux positifs indiquent un soulèvement du terrain.

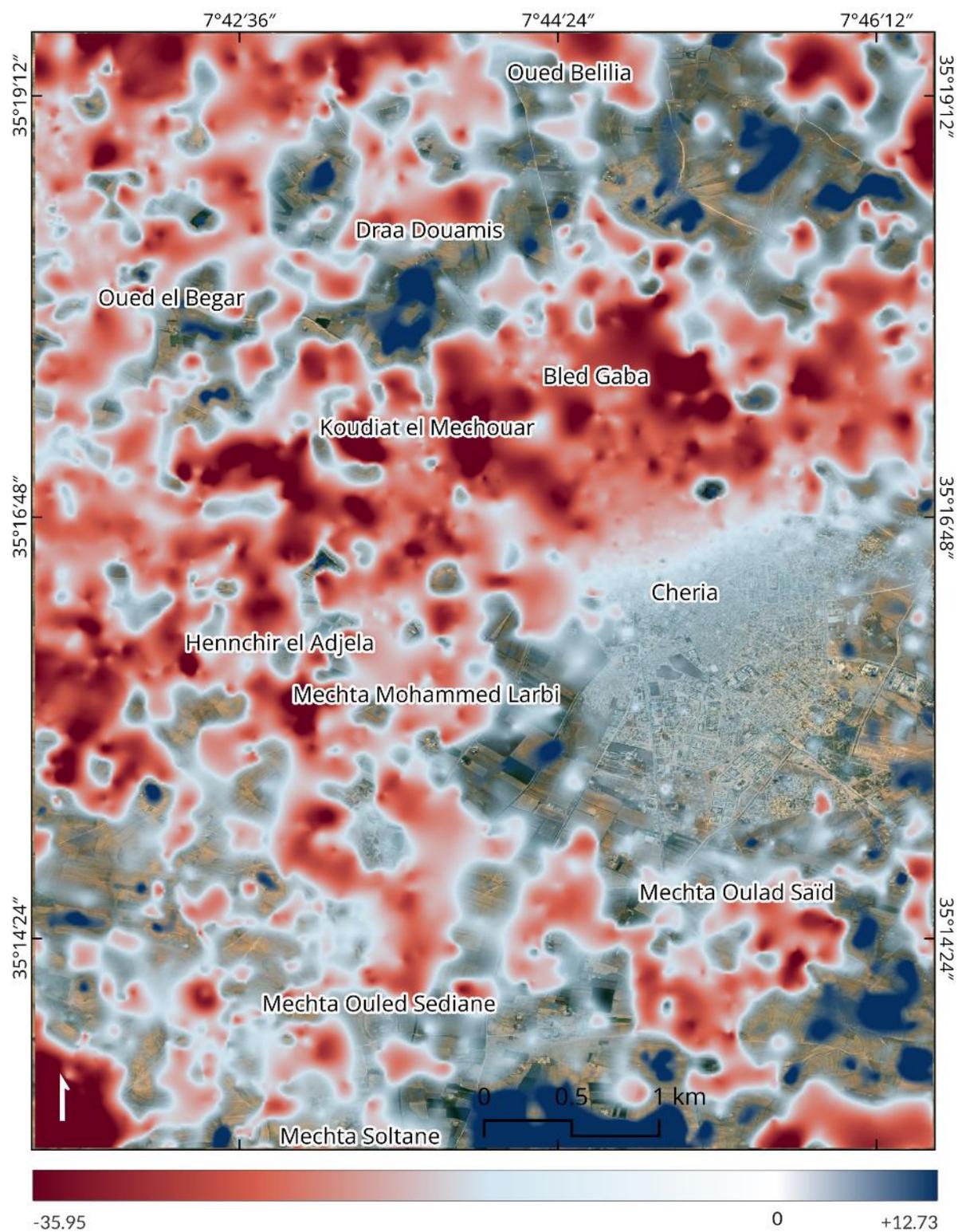


Figure 5.1 Carte de vitesse verticale moyenne de la zone d'étude

(Notons que sur l'échelle des couleurs les valeurs proches de 0 ont été rendues transparentes pour améliorer la visibilité des valeurs positives et négatives,).

La carte de vitesse horizontale moyenne montre les déplacements dans la direction Est-Ouest (voir Figure 5.2). Les valeurs enregistrées sont comprises entre  $-22,98$  à  $21,85$  mm/an avec une distribution spatiale égale entre les valeurs négatives et les valeurs positives. Les valeurs positives ont une tendance de se déplacer en direction Est proche du satellite et les valeurs négatives ont une tendance de se déplacer en direction Ouest loin du satellite.

Dans la carte de vitesse moyenne horizontale, les valeurs négatives indiquent des déformations de surface vers la direction ouest et les valeurs positives indiquent des déformations de surface dans la direction Est.

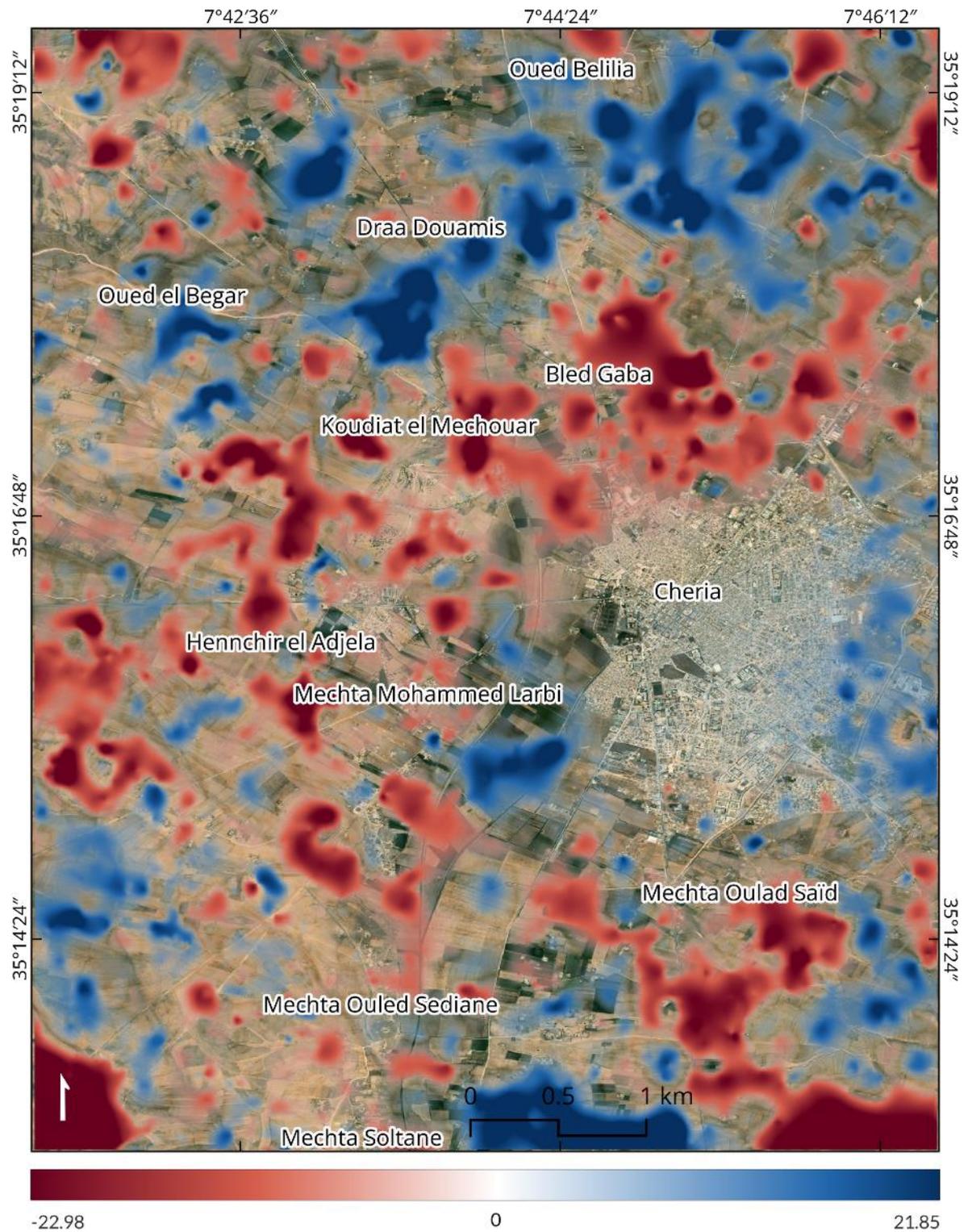
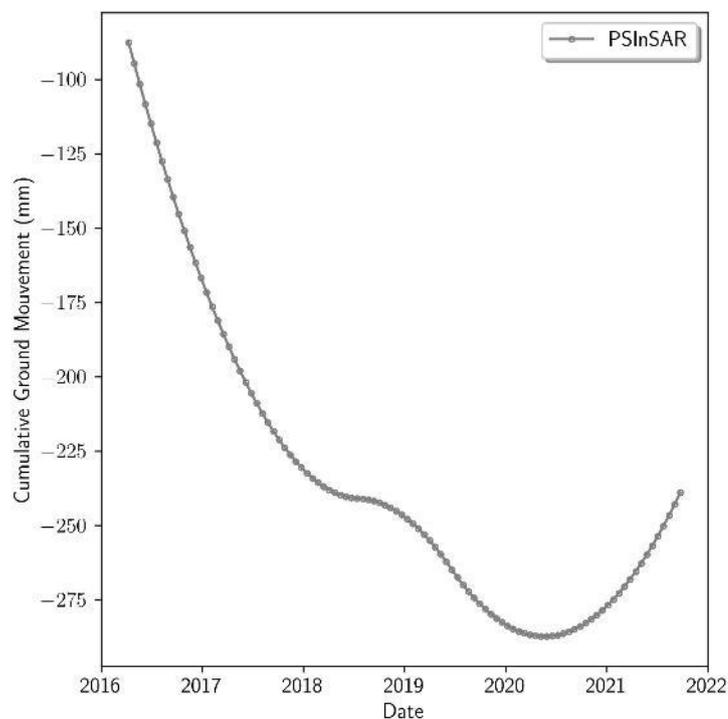


Figure 5.2 Carte de vitesse horizontale moyenne de la zone d'étude.

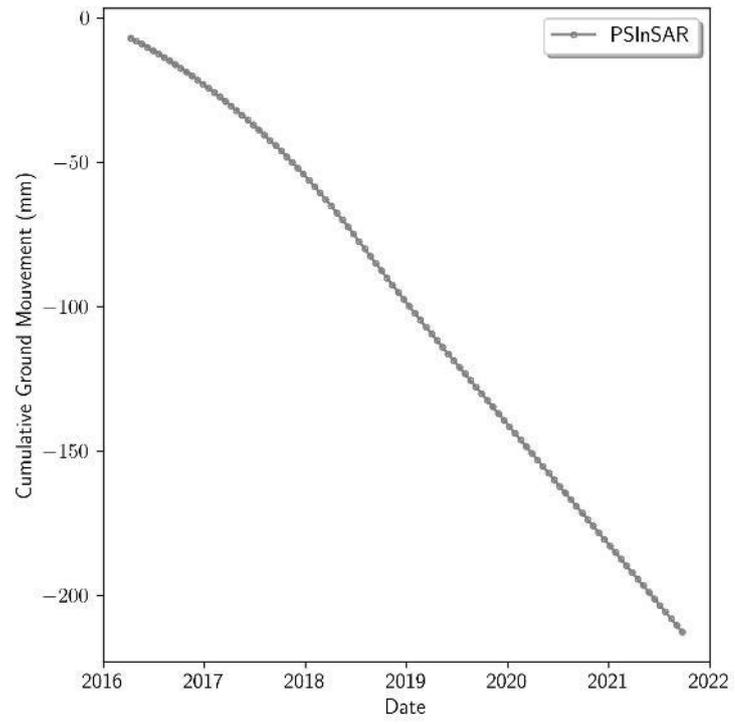
(Notons que sur l'échelle des couleurs les valeurs proches de 0 ont été rendues transparentes pour améliorer la visibilité des valeurs positives et négatives,).

Cinq point GCP (Ground Control Point) P1, P2, P3, P4 et P5 ont été sélectionnés afin de tracer des profils temporels pour faire une analyse du mouvement cumulative de terrain à partir de la cumulée de la vitesse verticale obtenue dans la zone d'étude au cours de la période entre 2016 et 2022 (voir la Figure 4.7 pour l'emplacement géographique des points). L'analyse des profils temporels montre des taux très élevé des valeurs négatives, les pointes sélectionnées montrent une tendance linéaire d'affaissement avec un régime remarquable a des valeurs importantes.

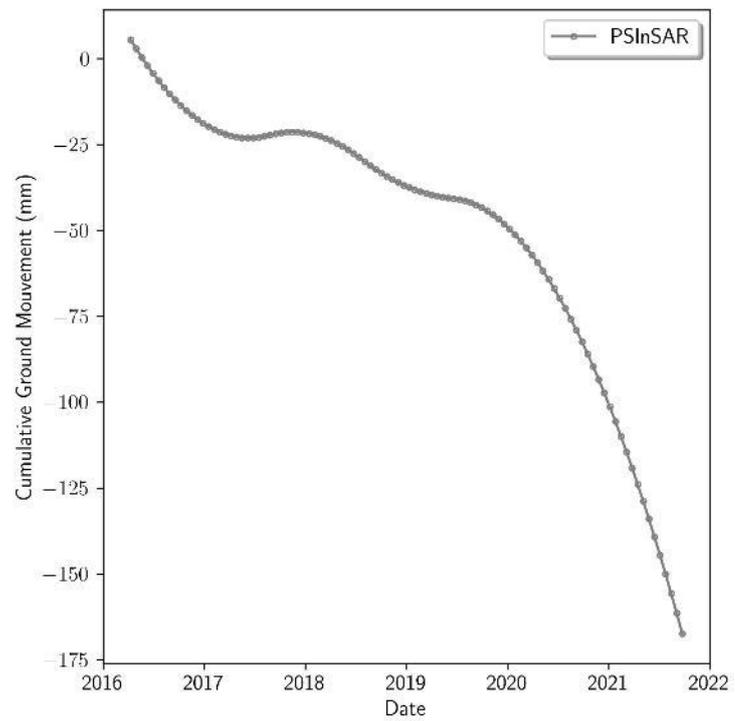
Les valeurs maximums de déplacements cumulative atteint par les points sélectionnée P1, P2, P3, P4 et P5 sont -275mm, -200mm, -140mm, ~ -250mm, et -275mm respectivement (voir Figure 5.3). D'après le résultat des fluctuations enregistré par les graphiques P1, P2, P3, P4 et P5, le terrain illustre un taux élevé de mouvement vertical causé par un affaissement important du terrain particulièrement dans la partie rurale.



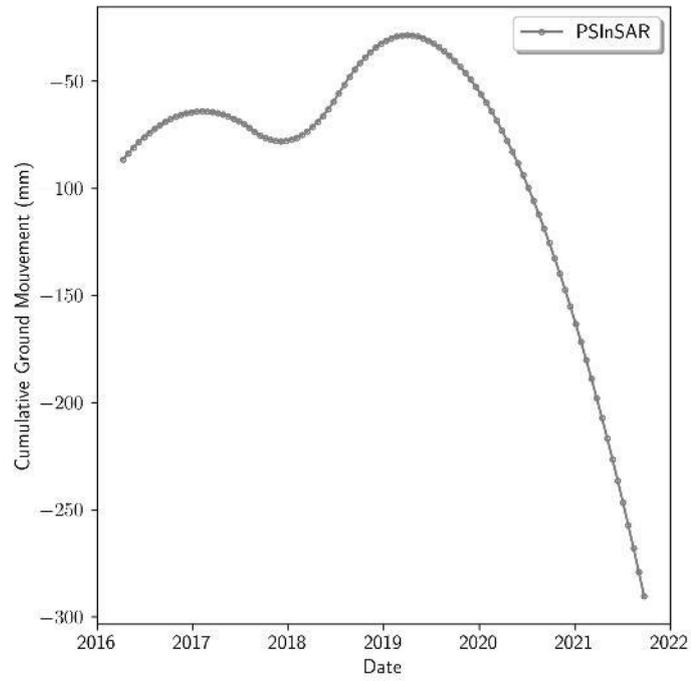
(P1)



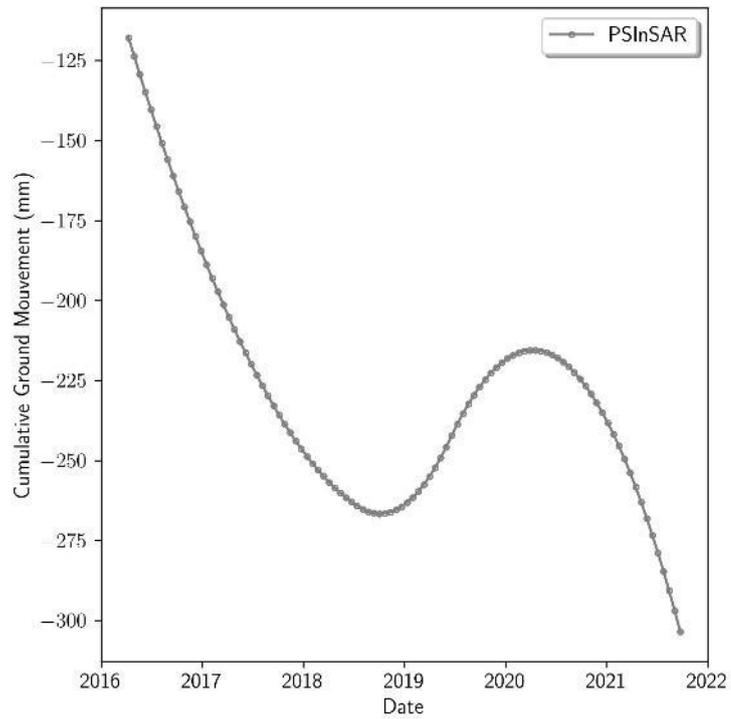
(P2)



(P3)



(P4)



(P5)

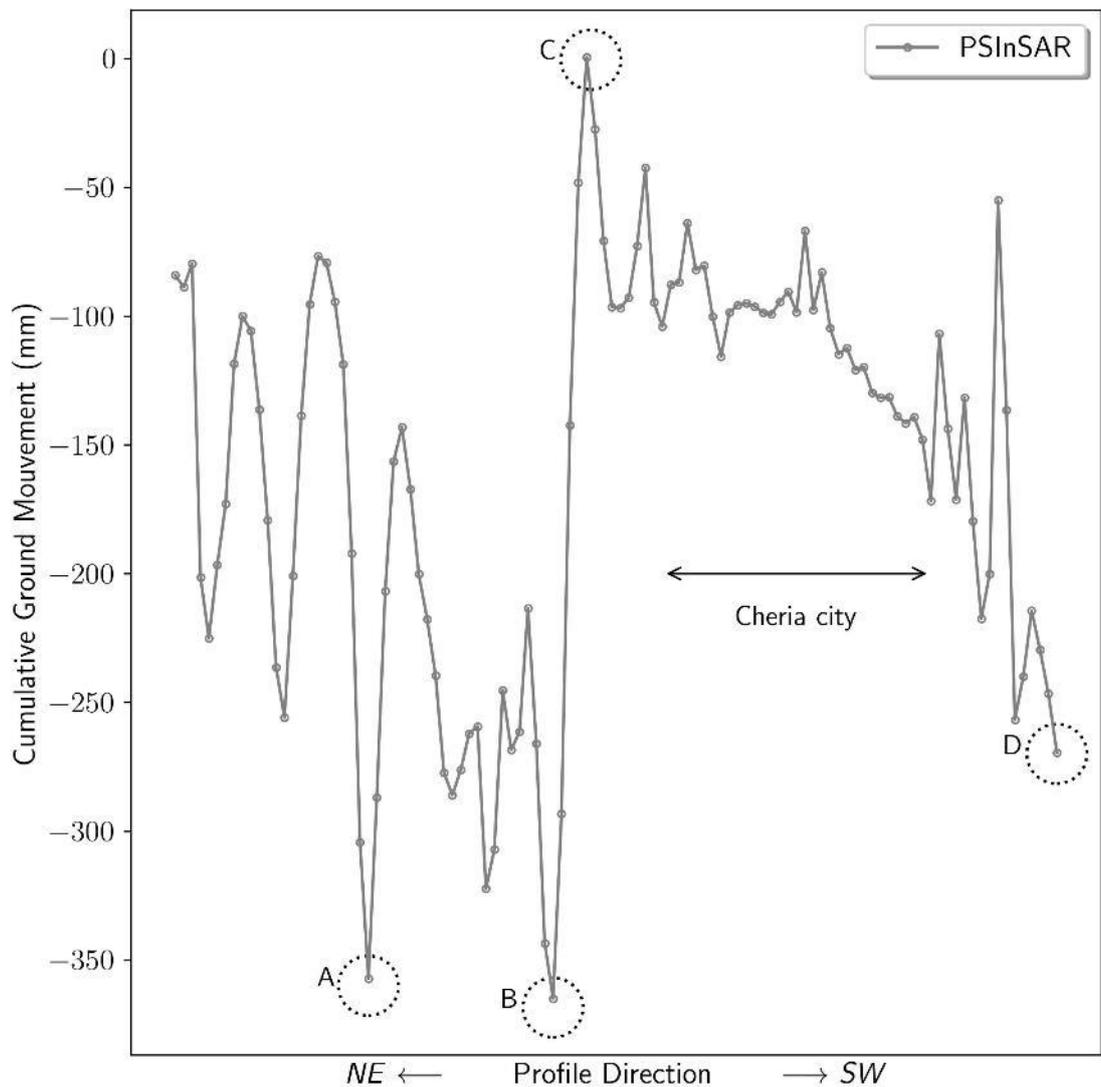
Figure 5.3 Profils temporels PS-Sentinel 1.

Des graphiques représentent le cumulée de la vitesse verticale aux points de contrôles sélectionnés (P1, P2, P3, P4 et P5) à partir des résultats PSI utilisés pour détecter

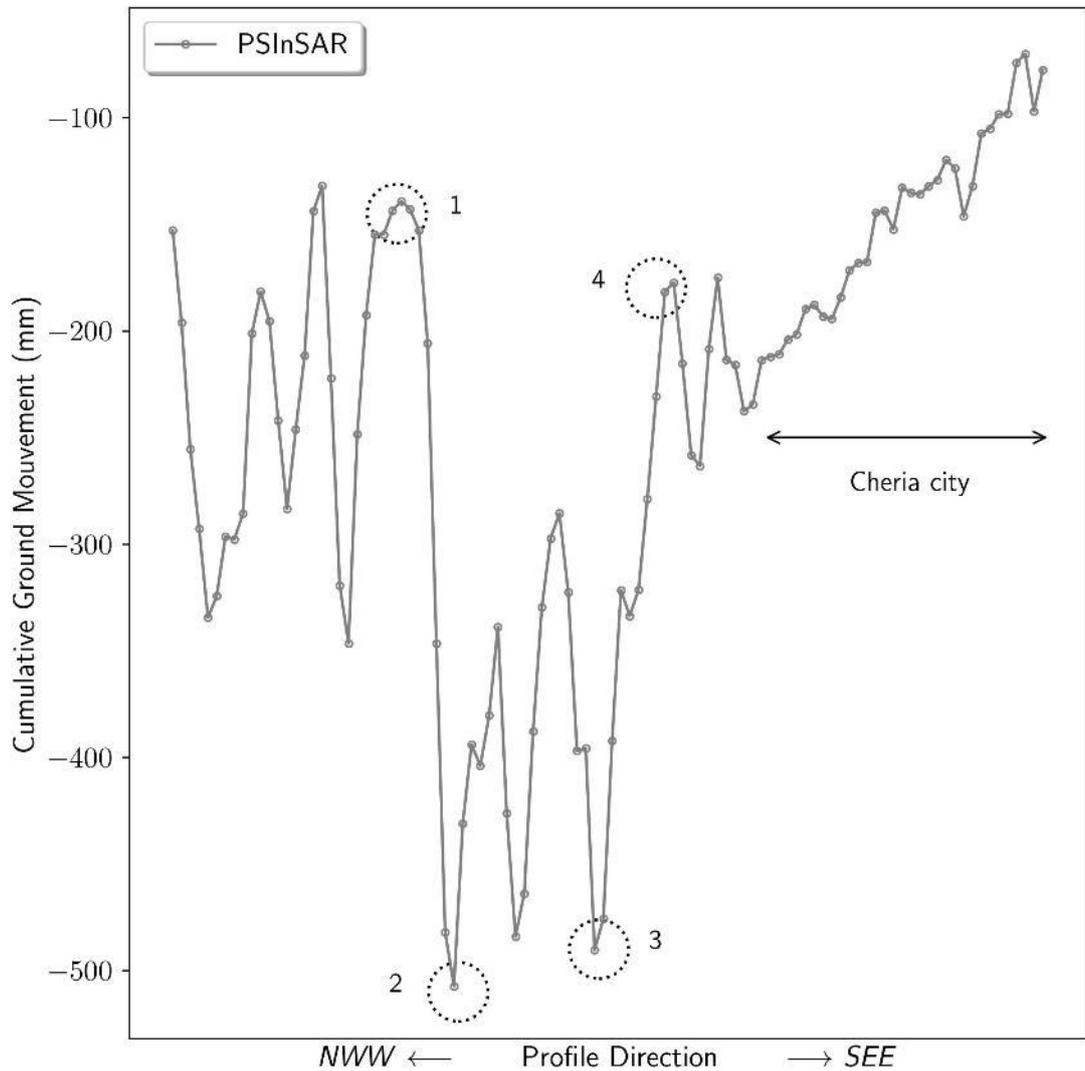
*l'affaissement ; l'axe des x est le temps, 2016-2022, et l'axe des y représente le mouvement vertical enregistré*

Pour analyser la tendance de l'affaissement dans la zone d'étude, nous avons également tracé des profils temporels *AB* et *CD* dans des directions *NE-SW* et *NW-SEE* pour extraire le cumule de déplacement calculé (voir Figure 5.4).

Les mouvements verticaux du terrain indiqués par un traçage des profils cumulatifs qui a été visualisés pour déterminer les changements et les déplacements verticaux dans la zone d'étude pendant la période d'analyse. La fluctuation du mouvement vertical démontre que la zone d'étude souffre d'une abondance d'affaissement important avec une valeur de vitesse de déplacement maximale comprise entre 0 et -350 mm environ pour le profil *AB*, et des valeurs comprises entre -100 et -500 mm pour le profil *CD*.



(a)



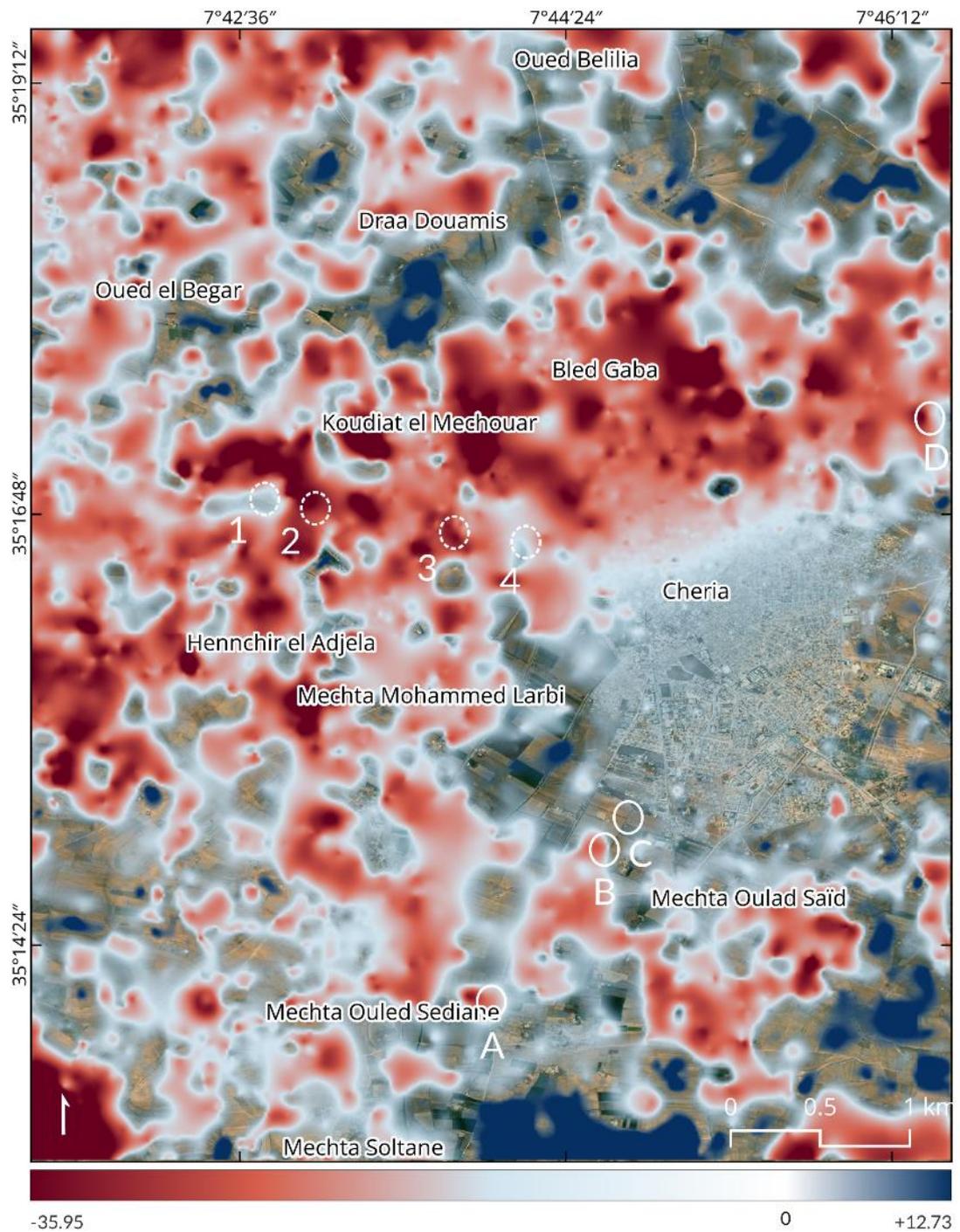
(b)

Figure 5.4 Mouvements cumulatifs verticale selon les profiles.

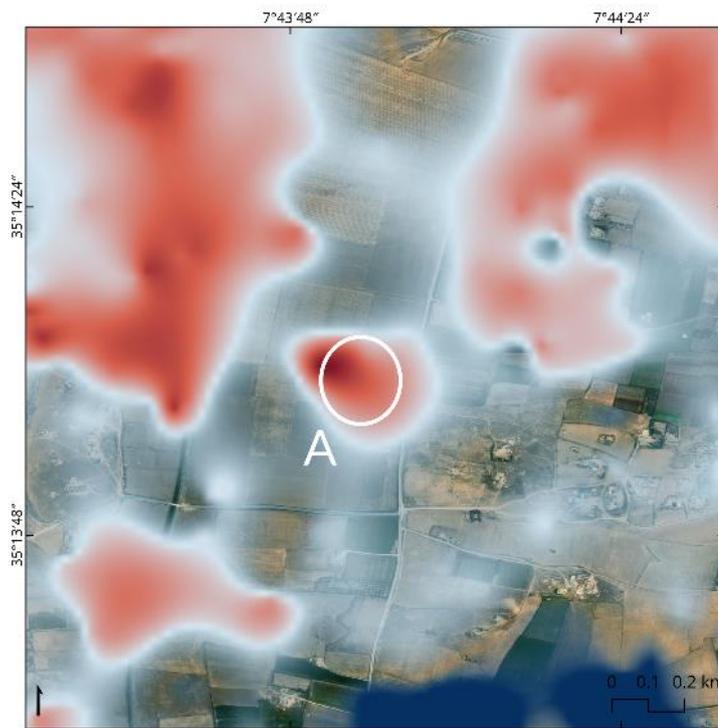
(a)représente le profile AB et (b) représente le profile CD. L'axe des x sur la figure représente la direction du profil dans les directions NE-SW et NWW-SEE, tandis que l'axe des y représente le cumulé du mouvement vertical(mm). Le cercle noir sont des points sélectionnés A, B, C et D du le profil AB, et 1, 2, 3 et 4 du le profil CD, sont également présentés dans la Figure 5.5.

Une vue L'ensemble des huit sites sélectionnés à partir des profils de mouvement vertical AB et CD (voir Figure 5.5) sont présenter dans la Figure 5.6 avec un agrandissement d'échelle pour illustrer le cumulé des déplacements résultant d'une analyse pendant la période de 2016 à 2022.

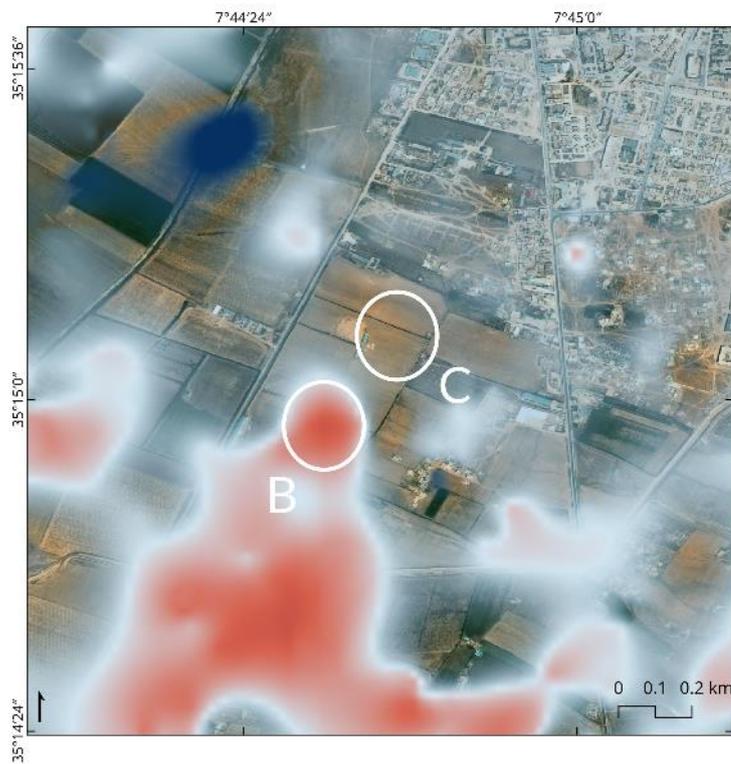
Les sites sélectionnés *A* et *B* (voir Figure 5.6 b et c) sont présentées sur la carte par des formes subcirculaires et des valeurs totales atteignant plus de -350 mm ce qui indique un affaissement important dans ces zones. Le point *C* (voir Figure 5.6c) est représenté dans la carte par des mouvements verticaux quasi nuls qui indiquent des zones relativement stables. Le point *D* (voir Figure 5.6d) c'est pareil au cas des points *A* et *B* avec une valeur atteignant -270mm. Les points 1 et 4 (voir Figure 5.6e et f) indique des valeurs comprises entre -140 et -170 mm indique un déplacement assez moyen par rapport aux valeurs très élevées. Le point 2 et 3 (voir Figure 5.6 e et f) représente des zones ou un cumule de déplacements élevés enregistré au cours de la période d'analyse. Ces déplacements de plus de -490mm indique un affaissement très important.



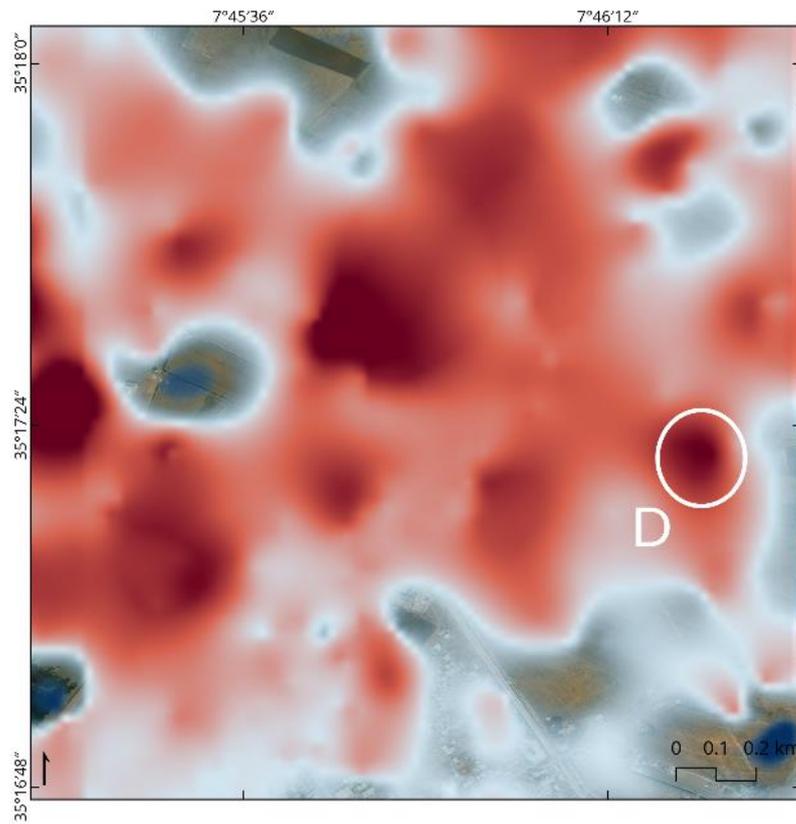
*Figure 5.5 Positions et vue d'ensemble des huit sites sélectionnés.  
 (A, B, C et D du le profil AB, et 1, 2, 3 et 4 du le profil CD) de la Figure 5.4.*



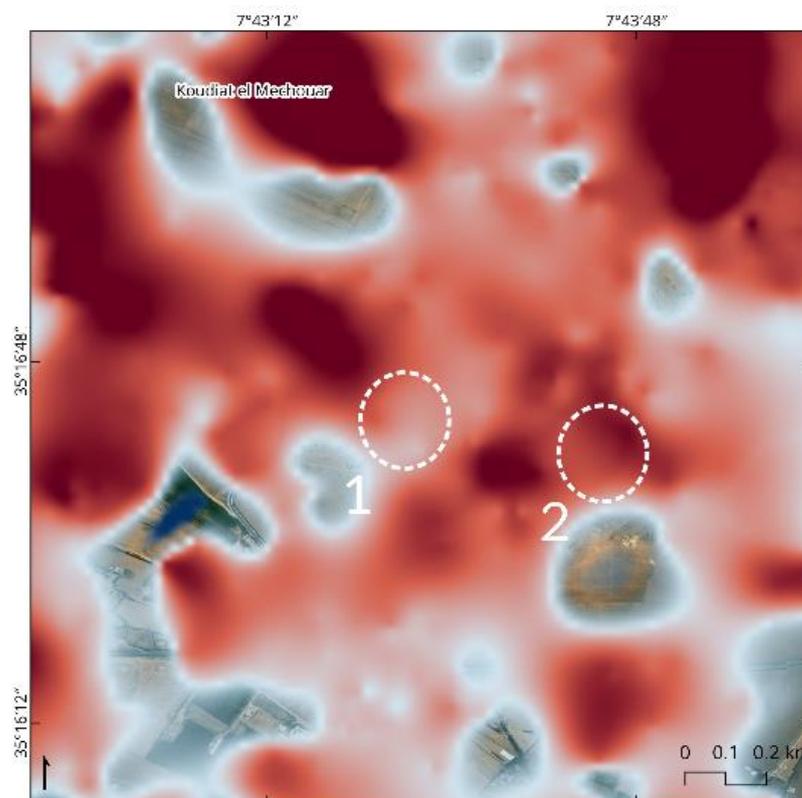
(b)



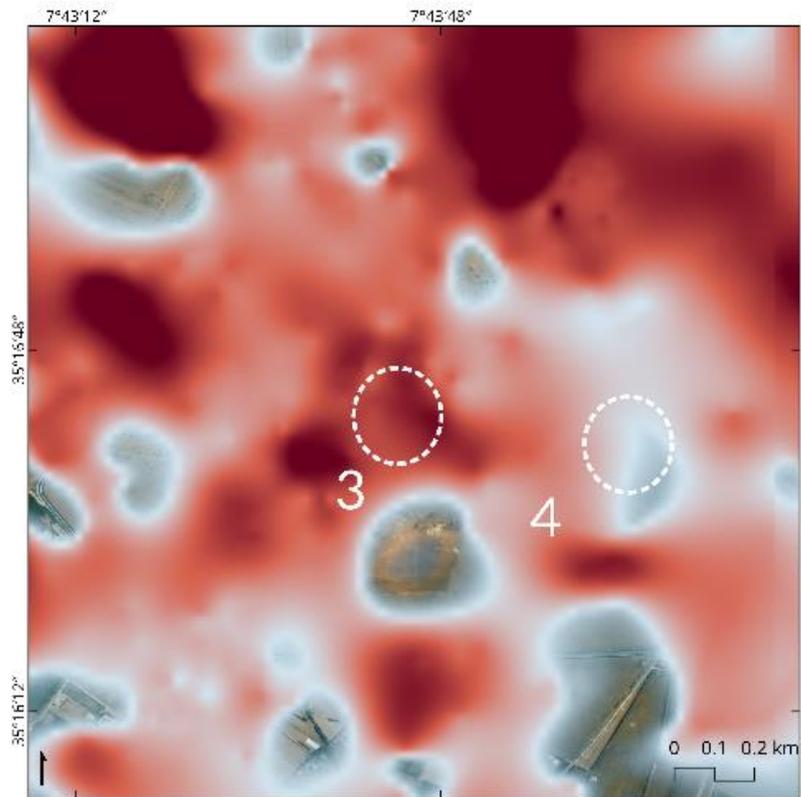
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure 5.6 Représentent avec un agrandissement d'ensemble des sites sélectionnés.

(Entourée par des cercles blancs)

## 5.2 Discussion

Les résultats obtenus dans cette recherche montrent l'efficacité du système de télédétection basé sur l'utilisation des données de la technique PSInSAR. Les résultats des cartes de vitesse et les profils temporelle (voir Figure 5.1, Figure 5.2, et Figure 5.3) montrent des valeurs négatives importantes couvrent la totalité de la zone d'étude qui indique une dominance d'un affaissement du terrain.

Dans des littératures scientifiques [82], [83], une carte de classification climatologique du globe a été publiée, et qui suggère que la zone d'étude est reconnue comme un type de climat désertique chaud. Le réchauffement climatique qui touche les régions semi-arides intensifie une sécheresse plus sévère et dure plus longtemps [84], ce qui rend les régions sèches plus sèches [85]. La zone d'étude souffre de faibles taux de précipitations et de variations de température extrêmes.

L'irrigation d'agriculture dans cette région dépend principalement de l'utilisation des eaux souterraines due au manque de ressource d'eau de surface nécessaire.

Les eaux souterraines pompées sont principalement destinées à :

- L'agriculture qui utilise une énorme quantité d'eau, avec un système d'irrigation ancien, par l'irrigation primitive. L'eau utilisée d'une part s'échappe par l'action d'évaporation et d'autre part s'écoule et infiltre suivant les fissures préexistantes au sein des roches, et par cette action une dissolution des formations karstiques a été provoquée.
- L'utilisation domestique des eaux potables. l'eau pompé se déverse généralement dans la nature sous forme d'eau non-consommable à cause des cassures périodiques au réseau de canalisation, et sous forme des rejets urbains directement dans l'Oued de Chéria (la plupart des villes algériennes ne disposent pas d'installations de traitement des eaux usées) [13].

Trois forages (B1, B2 et B3 ; voir la Figure 4.7 pour la localisation géographique) ont été surveillés entre 2011 et 2012 (voir Figure 5.7). Les graphiques montrent que les niveaux piézométriques se diminuent progressivement. Ce résultat confirme l'abaissement du niveau piézométrique actuel des aquifères qui se traduit par une insuffisance d'approvisionnement d'eau potable dans la région de Chéria.

La pénurie d'eau a stoppé les activités liées à l'agriculture. La consommation d'énormes quantités des réserves d'eau déjà en diminution (une enquête in situ sur la consommation des eaux souterraines réalisée en 2007 par Baali [85] déclare que la consommation moyenne d'eau souterraine trouvée est d'environ 22 hm<sup>3</sup>/an. ). Créée par la suite un déséquilibre des toits des cavités souterraines en raison des densités d'eau qui existaient dans les cavités karstiques. Par conséquent, ce déséquilibre engendré un affaissement (subsidence) et/ou un effondrement des toits des cavités souterraines.

A partir des interprétations des profils et des déplacements observés, l'interprétation convenable des résultats est inclinée vers l'hypothèse que l'origine de ces

mouvements est liée au pompage excessif dans la région. Le pompage excessif d'eau souterraine entraîne des compressions des sols et un affaissement des terres apparus.

En remarque une existence des dépressions subcirculaire en surface. Ces dépressions s'enfoncent progressivement dans le sol. Les agriculteurs essaient de les supprimer en ajoutant du remblai au-dessus pour tenter d'arrêter l'enfoncement du sol de la surface sans connaître l'origine de ces enfoncements.

Les risques géologiques dans la loi de la protection contre les risques naturels de 2004 n'ont pas été cités avec détails où le régime de récompensation contre ces risques n'a pas été pris en considération par les autorités locales. Par conséquent, les agriculteurs ne déclarent pas de telle découverte d'enfoncement de sol ou carrément d'un effondrement des cavités.

Aujourd'hui, la zone d'étude souffre de la diminution du niveau piézométrique des eaux souterraines en raison de deux facteurs majeurs :

- L'exploitation continue et non contrôlé des eaux souterraines pour répondre à la demande accrue en eau.
- La sécheresse aigue et la dégradation des sols affectant la région [85].

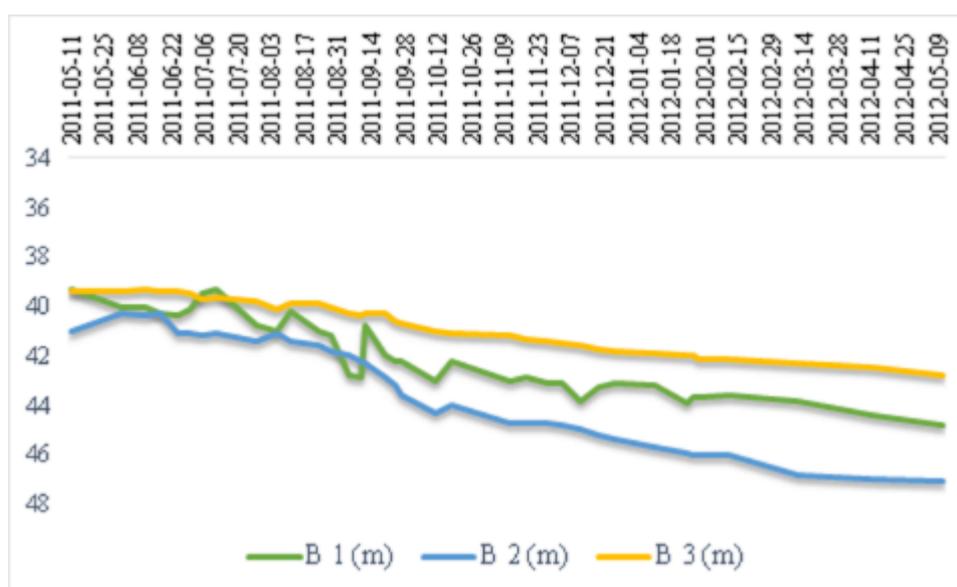


Figure 5.7 Résultat de suivi du niveau piézométrique des trois forages, B1, B2 et B3.

*La période de suivi entre 2011 et 2012 situés dans la partie nord de la zone d'étude (modifié d'après [86]).*

Basant sur la fluctuation des mouvements verticaux cumulée des profils AB et CD (voir Figure 5.4), les zones urbaines sont affectées par des taux minimaux continus de déformation avec des variations légèrement différentes. D'autre part, les zones rurales sont extrêmement affectées par des taux de déformation plus élevées (bas/haut) qui indique des mouvements assez importants. Cette analyse montre clairement que la quasi-totalité de la zone d'étude est affectée par des mouvements verticaux qui se traduisent par un affaissement de sol au cours de la période d'enquête.

Les résultats des affaissements obtenus dans la région d'étude sont assez similaires au résultat d'un examen des cartes piézométriques réalisée par des études antérieures [14]. Cet examen a fait ressortir que les zones de dépression piézométrique expliquée par la surexploitation des forages d'eau sont indiquées par des taux élevés d'affaissement par la technique du PSI. Ces résultats sont confrontés et complétés par le suivi des niveaux piézométrique des forages dans la même zone. En effet, on conclut un affaissement important dans une région karstique peut à tout moment se transformer a des effondrements.

Dans le but de connaître l'origine des affaissements et avec l'hypothèse d'une origine tectonique et/ou hydrogéologique, basant sur les résultats du PSInSAR et les résultats de suivi du niveau piézométrique on conclut notamment que l'état de souffrance en eau du plateau de Chéria est le résultat d'une forte densité de pompage à travers des forages d'eau implanter d'une manières aléatoire et illicitement, ce qui résulte un épuisement du niveau piézométrique et un important phénomène de subsidence augmente pour remplir le déséquilibre crée dans un terrain karstique et fissurée.

InSAR est une technologie avancée pour la télédétection des changements de la surface terrestre avec une mesure de déformation à grande échelle et une haute précision allant du centimètre au millimètre. En revanche, les techniques traditionnelles de mesure de déformation de surface tels que GPS, GPR et ERT sont couteuses et consomment beaucoup de temps afin d'obtenir des cartes de déformation à petite échelle.

PSInSAR s'est avéré être une technique très utile pour la télédétection des déformations affectant les zones rurales et urbaines et fournit des informations sur les mouvements de surface à grande échelle et détecte des mouvements lents avec une précision centimétrique voire millimétrique pour les risques de mouvement verticaux tels que l'affaissement de surface, l'effondrement, les glissements de terrain, l'affaissement des grottes minières, etc. Pendant ce temps, nos résultats ont montré l'existence des phénomènes d'affaissement dans la zone d'étude, et peuvent être encore approuvés avec des analyses de données in situ, ou application d'autre technique d'analyse telle que SBAS ou Quasi-PS. Le satellite Sentinel-1, avec un temps court de revisite, offrent une plus grande couverture spatiale, et l'étude temporelle offre une excellente opportunité aux pays en développement d'évaluer et de suivre les risques naturels avec une grande cohérence au lieu des stations ponctuelles d'observation comme le GPS, qui sont très coûteux et chronophages. Notre résultat préliminaire à partir des données Sentinel-1 démontre que d'excellents résultats ont été obtenus couvrant une large région avec le PSInSAR, ce qui est une condition fondamentale pour l'application de la méthodologie proposée.

## **Chapitre 6: Conclusions**

---

L'objectif de cette thèse est de localiser, caractériser, cartographier et quantifier les déformations de la surface du sol liées aux mouvements de terrain affaissement et/ou effondrement par la mesure interférométrique radar. Une nouvelle méthode de calcul interférométrique PSI a été appliquée dans la région de Chéria pour quantifier les faibles déplacements. Les résultats obtenus indiquent les déformations de surface enregistrées par le radar liées au phénomène d'affaissement de terrain.

Les mesures obtenues ont été comparées et analysées à l'aide d'une base de données exploitée par un QGIS afin de mettre une analyse spatiale approfondie sur les déplacements acquis liés au phénomène d'affaissement. Il est difficile de distinguer que les affaissements du sol détectés sont liés au déséquilibre des cavités souterraines ou juste un affaissement du sol dans toute la région de Chéria avec un affaissement différentiel dans quelque endroit caractérisé par ; une densité de forages implantés et une forte exploitation souterraine.

L'avantage de l'analyse spatiale est de localiser l'endroit susceptible à un tel phénomène naturel comme un support guide d'orientation. Par la suite une application des méthodes in situ pour cartographier les structures et les caractéristiques enfouies dans le sol a des endroits bien définis.

### **6.1 Les avantages de la technique InSAR**

L'objectif de cette partie est d'évaluer dans la région de Chéria le potentiel de la technique dite d'interférométrie radar (InSAR) pour mesurer des déplacements du sol survenus entre des différentes dates d'acquisitions des images radar. La technique, avec le jeu de donnée envisagé, et la capacité de mesurer des déplacements dans une gamme de vitesse allant de quelques millimètres à une dizaine de centimètres par an.

La technique de l'interférométrie radar différentielle a déjà montrée son intérêt dans l'étude de ce type de phénomènes dans d'autres régions dans le monde entier en

permettant d'obtenir des résultats sur les déplacements du sol avec une précision spatiotemporelle distincte.

La mesure par télédétection radar des déformations par l'utilisation de la technique PSInSAR est un bon préalable pour détecter à l'échelle régionale tous les types de mouvements avec une résolution spatiale et temporelle insuffisante. La forte cohérence spatiale des Persistent Scatterer sont suffisamment rétrodiffusant pour qu'on puisse étudier la phase du signal dominant linéaire et continu dans le temps pour étudier les déplacements relatifs dans un tissu urbain et rural.

Récemment la télédétection radar satellitaire a vécu une véritable révolution grâce au lancement du satellite Sentinel-1A en 2014 suivi de son jumeau Sentinel-1B deux ans plus tard par l'Agence Spatiale Européenne dans le cadre du programme Copernicus. Ces capteurs acquièrent des données en bande C ( $\lambda = 5,6 \text{ cm}$ ) tous les 6 jours et une observation à grande échelle par le satellite. Le présent travail de thèse vise à évaluer des données de haute résolution pour un suivi temporel des surfaces.

## **6.2 Les limites de la technique InSAR**

Toutefois il convient de rappeler ses limitations qui sont inhérentes à ses caractéristiques :

- Des difficultés liées à la disponibilité des données : l'accès aux images de certaines dates des effondrements de 2002 et 2009 n'est pas libre ou gratuit. Ajoutons à cela, l'indisponibilité des données auxiliaires (mesures de terrain, données de positionnement, etc.) ayant pour but de cartographier les évènements.
- La décorrélation temporelle (la stabilité temporelle de la distribution spatiale des diffuseurs dans un pixel). Lorsque la surface est fortement perturbée dans le temps, la répartition spatiale des diffuseurs au sein d'un pixel change ce qui entraîne des franges dans les interférogrammes. Par conséquence les mesures par InSAR sont impossibles à cause de la décorrélation temporelle.

- Une autre limite de l'InSAR est liée au gradient spatial. Si le déplacement relatif entre deux pixels voisins dépasse une frange, il ne peut pas être détecté par l'interférométrie.
- Les mesures des déplacements est faite selon l'axe de visée du satellite. Il en résulte des observations différentes selon la géométrie d'acquisition radar, en mode descendant et ascendant.
- Limites liées aux moyens de calcul et capacité de stockage et traitement des images InSAR.
- Enfin il faut souligner que la qualité des images radar est aussi un facteur limitant de la technique InSAR, même si cela n'est pas directement lié à la méthode. Les données SAR doit être dans une géométrie d'acquisition la plus proche possible, avec des écarts de valeur de doppler conforme.

### **6.3 Les recommandations**

- Pour éviter la répétition du cas de Chéria dans d'autre région de même potentiel hydrique, il est nécessaire d'imposer des restrictions strictes de pompage des nappes souterraines.
- La modernité des techniques d'irrigations plus économique pour modérer les pompages en introduisant des cultures moins consommatrices d'eau.
- Il est nécessaire de faire des investigations in situ dans les endroits signaler par de forts taux de déplacement vertical pour éviter de futurs problèmes d'effondrement et minimiser les dégâts et les pertes humaines.
- Les résultats obtenus sont adressés aux autorités locales pour les aider à renouveler le plan d'aménagement de la ville de Chéria afin d'éviter les zones susceptibles d'affaissements dans les nouveaux plans d'extensions urbaines.
- Il est recommandé d'utiliser les résultats acquis par l'analyse interférométrique pour la réalisation d'une carte des risques d'effondrements.

- En Algérie, tout creusement de nouveau puits d'eau doit être effectué après une étude sérieuse, on doit conserver le potentiel hydrique spécialement suite à la sécheresse aigüe mondiale et les effets de changement climatique.
- Il est également suggéré ultérieurement de faire des études a multi-échelle (spatiale et sur terrain). Ces résultats permettent de mieux cibler les sites d'installation des stations de mesure sur terrain.

## Bibliographies

---

- [1] J. M. Delgado Blasco, M. Foumelis, C. Stewart, et A. Hooper, « Measuring Urban Subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry », *Remote Sens.*, vol. 11, n° 2, p. 129, 2019.
- [2] B. Soldo, S. Mahmoudi Sivand, A. Afrasiabian, et B. Đurin, « Effect of Sinkholes on Groundwater Resources in Arid and Semi-Arid Karst Area in Abarkooh, Iran », *Environments*, vol. 7, n° 4, p. 26, mars 2020, doi: 10.3390/environments7040026.
- [3] P. Castellazzi *et al.*, « Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data », *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, vol. 47, p. 102-111, mai 2016, doi: 10.1016/j.jag.2015.12.002.
- [4] H. Ito, J. Susaki, et T. Anahara, « Integrating Multi-Temporal SAR Images and GPS Data to Monitor Three-Dimensional Land Subsidence », *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 4, p. 9-16, 2019.
- [5] S. I. Elmahdy, M. M. Mohamed, T. A. Ali, J. E.-D. Abdalla, et M. Abouleish, « Land subsidence and sinkholes susceptibility mapping and analysis using random forest and frequency ratio models in Al Ain, UAE », *Geocarto Int.*, vol. 37, n° 1, p. 315-331, janv. 2022, doi: 10.1080/10106049.2020.1716398.
- [6] M. Imamoglu, F. Kahraman, Z. Cakir, et F. B. Sanli, « Ground Deformation Analysis of Bolvadin (W. Turkey) by Means of Multi-Temporal InSAR Techniques and Sentinel-1 Data », *Remote Sens.*, vol. 11, n° 9, p. 1069, mai 2019, doi: 10.3390/rs11091069.
- [7] W. Zhu *et al.*, « A Decade of Ground Deformation in Kunming (China) Revealed by Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) Technique », *Sensors*, vol. 19, n° 20, p. 4425, 2019.
- [8] G. Herrera-García *et al.*, « Mapping the global threat of land subsidence », *Science*, vol. 371, n° 6524, p. 34-36, janv. 2021, doi: 10.1126/science.abb8549.
- [9] I. T. Laura et G. Vasile, « Traitement des images RSO interférométriques à haute résolution spatiale pour la surveillance des barrages et digues par télédétection radar : validation de la chaîne opérationnelle », 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.32581.04328.

- [10] P. Martin, *Ces risques que l'on dit naturels*. Paris: Eyrolles, 2006.
- [11] « RN 3 – Mouvements de terrain – Mémento du maire et des élus locaux ». Consulté le: 19 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://web.archive.org/web/20230321181507/http://www.mementodumaire.net/les-risques-naturels/rn-3-mouvements-de-terrain/>
- [12] C.Arambourg, *livret de la paléontologie des vertébrés en Afrique du Nord*. 1952.
- [13] F. Baali, « Contribution à l' étude hydrogéologique; hydrochimique et vulnérabilité à la pollution d'un système aquifère karstique en zone semi aride .cas du plateau de chèria N.E. algèrien. », 2007.
- [14] K. Chamekh, « Influence de la fracturation sur l'évolution de réservoir karstique. Exemple des calcaires fissures de la région de Chéria. (Nord - est Algérien) », 2016.
- [15] A. Yacine, « Les effondrements dans les terrains karstiques du plateau de Chéria (Nord-Est de l'Algérie): genèse, impacts géotechniques et environnementaux et cartographie des zones vulnérables au phénomène », 2017.
- [16] usgs, « Sinkholes | U.S. Geological Survey ». Consulté le: 19 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/sinkholes>
- [17] USGS, « Landslide Types and Processes ». Consulté le: 19 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/fs-2004-3072.html>
- [18] D. Massonnet, « La télésurveillance par interférométrie radar », 1996.
- [19] P. Erwan, H. Didier, K. Ulrich, B. Jérémy, F. Bénédicte, et R. Jean-Paul, « 2007\_Pathier-juin09 - Potentiel de l'imagerie radar satellitaire pour la détection et la mesure d'instabilités gravitaires dans la région grenobloise », 2007.
- [20] H. A. Zebker et R. M. Goldstein, « Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations », *J. Geophys. Res.*, vol. 91, n° B5, p. 4993, 1986, doi: 10.1029/JB091iB05p04993.
- [21] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, et C. L. Werner, « Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping », *Radio Sci.*, vol. 23, n° 4, p. 713-720, juill. 1988, doi: 10.1029/RS023i004p00713.

- [22] reefersilence.org, « What is Remote Sensing? | Reef Resilience ». Consulté le: 21 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://reefresilience.org/management-strategies/remote-sensing-and-mapping/introduction-to-remote-sensing/what-is-remote-sensing/>
- [23] C. Cazals, « Apport des données Sentinel-1 pour la cartographie des milieux humides », 2017.
- [24] chroma.com, « Transmission, Reflection, and Absorption ». Consulté le: 21 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.chroma.com/knowledge-resources/about-fluorescence/introduction-to-fluorescence/transmission-reflection-and>
- [25] P. radartutorial.eu, « Radar Tutoriel - Polarisation ». Consulté le: 22 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Polarisation.fr.html>
- [26] logicpro, « Autres propriétés de la forme d'onde », Apple Support. Consulté le: 21 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://support.apple.com/fr-fr/guide/logicpro/lgsife418f71/mac>
- [27] G. Vasile, « Imagerie Radar à Synthèse d'Ouverture interférométrique et polarimétrique. Application au suivi des glaciers alpins. ».
- [28] lavionnaire.fr, « Radar de controle aérien ». Consulté le: 22 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lavionnaire.fr/RadarATCIntroduction.php>
- [29] N. Pettorelli, W. F. Laurance, T. G. O'Brien, M. Wegmann, H. Nagendra, et W. Turner, « Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges », *J. Appl. Ecol.*, vol. 51, n° 4, p. 839-848, août 2014, doi: 10.1111/1365-2664.12261.
- [30] tre-altamira.com, « InSAR Interferometric Synthetic Aperture Radar - TRE ALTAMIRA », TRE ALTAMIRA - A CLS Group Company. Consulté le: 22 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://site.tre-altamira.com/insar/>
- [31] A. C. Mondini, F. Guzzetti, K.-T. Chang, O. Monserrat, T. R. Martha, et A. Manconi, « Landslide failures detection and mapping using Synthetic Aperture Radar: Past, present and future », *Earth-Sci. Rev.*, vol. 216, p. 103574, mai 2021, doi: 10.1016/j.earscirev.2021.103574.
- [32] D. Massonnet et J.-C. Souyris, *Imaging with Synthetic Aperture Radar*, 0 éd. EPFL Press, 2008. doi: 10.1201/9781439808139.

- [33] BCPST, « Interférométrie RADAR : Principes et utilisation dans la surveillance de la déformation du sol ». Consulté le: 21 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.bcpst.kunos.fr/COURS\\_HTML/DOSSIERS\\_SERVEUR\\_HTML/articles/Geosciences/InSAR\\_principes/InSAR\\_principes.php?idnode=section.0.0.0.6](https://www.bcpst.kunos.fr/COURS_HTML/DOSSIERS_SERVEUR_HTML/articles/Geosciences/InSAR_principes/InSAR_principes.php?idnode=section.0.0.0.6)
- [34] D. Massonnet et K. L. Feigl, « Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface », *Rev. Geophys.*, vol. 36, n° 4, p. 441-500, 1998.
- [35] C. Cazals, « Apport des données Sentinel-1 pour la cartographie des milieux humides ».
- [36] E. Pathier, « Apports de l'interférométrie radar différentielle à la tectonique active de Taiwan », 2003.
- [37] H. Kaveh, « Apport de l'interférométrie radar (DinSAR et PSI) pour l'étude des effets de la sécheresse géotechniques: applications à l'Est de la région Île-de-France », déc. 2010.
- [38] X. Zhou, N.-B. Chang, et S. Li, « Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research », *Sensors*, vol. 9, n° 3, p. 1876-1912, mars 2009, doi: 10.3390/s90301876.
- [39] E. H. Y. Bouali, « Analyzing the life-cycle of unstable slopes using applied remote sensing within an asset management framework », 2018.
- [40] C. Lardeux, « Apport des données radar polarimétriques pour la cartographie en milieu tropical », phd, Université Paris-Est, 2008.
- [41] L. Maubant, « Séismes lents et variations du couplage intersismique: le cas de la subduction Mexicaine vue par géodésie spatiale. ».
- [42] R. Bamler et P. Hartl, « Synthetic aperture radar interferometry », *Inverse Probl.*, vol. 14, n° 4, p. R1-R54, août 1998, doi: 10.1088/0266-5611/14/4/001.
- [43] C. Colesanti, A. Ferretti, C. Prati, et F. Rocca, « Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique », *Eng. Geol.*, vol. 68, n° 1-2, p. 3-14, févr. 2003, doi: 10.1016/S0013-7952(02)00195-3.
- [44] D. A. Schmidt et R. Bürgmann, « Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar

data set: SANTA CLARA VALLEY INSAR TIME SERIES », *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 108, n° B9, p. B9, sept. 2003, doi: 10.1029/2002JB002267.

[45] G. ga.gov.au, « Interferometric Synthetic Aperture Radar », Geoscience Australia. Consulté le: 22 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/geodetic-techniques/interferometric-synthetic-aperture-radar>

[46] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, et E. Sansosti, « A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms », *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, n° 11, p. 2375-2383, nov. 2002, doi: 10.1109/TGRS.2002.803792.

[47] F. Bovenga, D. O. Nitti, A. Ganas, et K. Chousianitis, « Co-seismic deformation due to the Tohoku-Oki earthquake measured by ENVISAT-ASAR data and GPS », in *Proceedings of the Fringe*, 2011, p. 19-23.

[48] H. A. Zebker et J. Villasenor, « Decorrelation in interferometric radar echoes », *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 30, n° 5, p. 950-959, sept. 1992, doi: 10.1109/36.175330.

[49] A. L. Parker, M. S. Filmer, et W. E. Featherstone, « First results from Sentinel-1A InSAR over Australia: application to the Perth Basin », *Remote Sens.*, vol. 9, n° 3, p. 299, 2017.

[50] W. Luo *et al.*, « A Novel Hybrid LMD–ETS–TCN Approach for Predicting Landslide Displacement Based on GPS Time Series Analysis », *Remote Sens.*, vol. 15, n° 1, p. 229, déc. 2022, doi: 10.3390/rs15010229.

[51] C. W. Chen et H. A. Zebker, « Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms », *JOSA A*, vol. 17, n° 3, p. 401-414, 2000.

[52] R. M. Goldstein et C. L. Werner, « Radar interferogram filtering for geophysical applications », *Geophys. Res. Lett.*, vol. 25, n° 21, p. 4035-4038, 1998.

[53] H. A. Zebker, P. A. Rosen, et S. Hensley, « Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps », *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 102, n° B4, p. 7547-7563, avr. 1997, doi: 10.1029/96JB03804.

- [54] A. Ferretti, C. Prati, et F. Rocca, « Permanent Scatterers in SAR Interferometry », *IEEE Trans. Geosci. REMOTE Sens.*, vol. 39, n° 1, p. 13, 2001.
- [55] A. Ferretti, C. Prati, et F. Rocca, « Analysis of Permanent Scatterers in SAR interferometry », in *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120)*, Honolulu, HI, USA: IEEE, 2000, p. 761-763. doi: 10.1109/IGARSS.2000.861695.
- [56] A. Hooper, F. Prata, et F. Sigmundsson, « Remote Sensing of Volcanic Hazards and Their Precursors », *Proc. IEEE*, vol. 100, n° 10, p. 2908-2930, oct. 2012, doi: 10.1109/JPROC.2012.2199269.
- [57] Y.-J. Yang, C. Hwang, W.-C. Hung, T. Fuhrmann, Y.-A. Chen, et S.-H. Wei, « Surface Deformation from Sentinel-1A InSAR: Relation to Seasonal Groundwater Extraction and Rainfall in Central Taiwan », *Remote Sens.*, vol. 11, n° 23, p. 2817, 2019.
- [58] ESA, « Sentinel-1 - Instrument Payload - Sentinel Online », Sentinel Online. Consulté le: 20 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://copernicus.eu/missions/sentinel-1/instrument-payload>
- [59] A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, et B. Kampes, « A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers: A NEW PERSISTENT SCATTERERS METHOD », *Geophys. Res. Lett.*, vol. 31, n° 23, p. 110, déc. 2004, doi: 10.1029/2004GL021737.
- [60] K. Fárová, J. Jelének, V. Kopačková-Strnadová, et P. Kycl, « Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel-1 Data to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovičky Landslide, Czech Republic », *Remote Sens.*, vol. 11, n° 22, p. 2670, nov. 2019, doi: 10.3390/rs11222670.
- [61] R. Khan, H. Li, Z. Afzal, M. Basir, M. Arif, et W. Hassan, « Monitoring Subsidence in Urban Area by PSInSAR: A Case Study of Abbottabad City, Northern Pakistan », *Remote Sens.*, vol. 13, n° 9, p. 1651, avr. 2021, doi: 10.3390/rs13091651.
- [62] O. Cavalié, « Mesures InSAR et modélisation de faibles déformations d'origine anthropique (lac Mead, USA) ou tectonique (faille de Haiyuan, Chine) », 2011.

- [63] M. Foumelis *et al.*, « ESA SNAP-StaMPS Integrated Processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry », in *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 2018, p. 1364-1367.
- [64] L. Beccaro *et al.*, « Multitemporal and Multisensor InSAR Analysis for Ground Displacement Field Assessment at Ischia Volcanic Island (Italy) », *Remote Sens.*, vol. 13, n° 21, p. 4253, oct. 2021, doi: 10.3390/rs13214253.
- [65] T. Fuhrmann et M. C. Garthwaite, « Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-Geometry Data Fusion », *Remote Sens.*, vol. 11, n° 3, p. 241, janv. 2019, doi: 10.3390/rs11030241.
- [66] F. Ardhuin *et al.*, « Measuring currents, ice drift, and waves from space: the Sea Surface Kinematics Multiscale monitoring (SKIM) concept », *Remote Sensing/Current Field/Surface/All Geographic Regions*, preprint, juill. 2017. doi: 10.5194/os-2017-65.
- [67] R. Mouici, « Impact Environnemental Des Effondrements Karstiques De L'éocène De La Région De Cheria. Nord Est Algérien », 2019.
- [68] R. Marmi, « Les bassins continentaux de l'avant pays de la chaîne alpine d'Algérie nord oriental. Etude stratigraphiques, sédimentaires, structurales et géochimiques. Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, 1995. », 1995.
- [69] H. Chaffai, « Evaluation des ressources en eaux de la plaine de Chéria (NE Algérie). Synthèse et analyse des données. », 1986.
- [70] craag.dz, « CRAAG, Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique ». Consulté le: 20 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.craag.dz/>
- [71] Lambert et Durozoy, « Compte rendu la tournée effectuée dans la région de Tébessa (plateau de Chéria) A.N.R.H de Tébessa ». 1947.
- [72] Durozoy, « Etude hydrogéologique du synclinal de l'Ain Dalaa. Public.ser.carte.Géologique Algérie ». 1952.
- [73] R. Laffite, « Etude géologique et hydrogéologique de la région de Chéria. Rapport interne ANRH de Tébessa ». 1956.
- [74] M. Raoult, « Géologie du centre de la chaîne numidique (Nord Constantinois, Algérie). Mém. Soc. Géol. Fr., N.S. » 1974.

- [75] B. Gaud, « Etude hydrogéologique du plateau de Chèria ». 1977.
- [76] V. J. M. Villa, « La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro - Tunisiens. », 1980.
- [77] Wildi, « La chaîne tello rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. Rev. Géol. Dyn. géog. Phys., (24), 3, pp 201-297 ». 1983.
- [78] M. Hamimed, « Etude sédimentologique et paléogéographique des sédiments miocènes au pays du Nord-Est de l'Atlas saharien des confins algéro-tunisiens. Thèse de doctorat d'état, Université de Constantine, Algérie, 223p », 2005.
- [79] Durand Delga. M, « Etude géologique de l'Ouest de la chaîne Numidique. Publ. serv. Carte géol. Algérie, Bull. n° 24, 533 p., 143 fig., 16 pl., 10 pl.h.t. » 1955.
- [80] W. M. Kowalski, M. Hamimed, et A. Pharissat, « Les étapes d'effondrement des grabens dans les confins algero-tunisiens. Bull. Serv. Géologie. de l'Algérie juillet, V.13,n°2, p.131-152. », 2002.
- [81] PHC Tassili, « PHC Tassili Tebessa », 2013.
- [82] M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, et F. Rubel, « World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated », *Meteorol. Z.*, vol. 15, n° 3, p. 259-263, juill. 2006, doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- [83] J. Huang, M. Ji, Y. Xie, S. Wang, Y. He, et J. Ran, « Global semi-arid climate change over last 60 years », *Clim. Dyn.*, vol. 46, n° 3-4, p. 1131-1150, févr. 2016, doi: 10.1007/s00382-015-2636-8.
- [84] A. Dai, « Increasing drought under global warming in observations and models », *Nat. Clim. Change*, vol. 3, n° 1, p. 52-58, janv. 2013, doi: 10.1038/nclimate1633.
- [85] F. Baali, A. Rouabhia, N. Kherici, L. Djabri, L. Bouchaou, et A. Hani, « Underground water quality and contamination risk. The case of the basin of Chèria (NE Algeria) », *Estud. Geológicas*, vol. 63, n° 2, p. 127-133, déc. 2007, doi: 10.3989/egeol.07632193.
- [86] C. Fehdi, I. Nouioua, D. Belfar, L. Djabri, et E. Salameh, « Detection of Underground Cavities by Combining Electrical Resistivity Imaging and Ground

Penetrating Radar Surveys: A Case Study from Draa Douamis Area (North East of Algeria) », in *H2Karst Research in Limestone Hydrogeology*, Springer, 2014, p. 69-82.