

République Algérienne Démocratique et Populaire



Université d'Oran 2

Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers

Département de Géographie et d'Aménagement du Territoire

**MEMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master « L.M.D. »

En Géographie et Aménagement du Territoire

Option : **Géomatique**

*Thème :*

**Evaluation et représentation des déformations d'un  
barrage en remblai, à partir des données InSAR et GNSS.  
*Cas du barrage de Kramis (Mostaganem).***

Présenté par : **M. GOURINE Bachir**

*Soutenu le 29 Septembre 2022, devant le jury composé de :*

ALLAL Nadir El-Ouassini	MAA	Université Oran 2	Président
SENHADJI Hafida	MAA	Université Oran 2	Examinatrice
HASNI Kamel	MRB	CTS - Arzew	Encadrant

Année Universitaire : 2021-2022.

# *Dédicaces*

A ma femme.  
A mes enfants.

## *Remerciements*

Je tiens tout d'abord à remercier notre Dieu Allah, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la patience, pour mener à bien ce modeste travail, qu'il soit béni et glorifié.

Je tiens à exprimer ma gratitude à mon encadrant Monsieur HASNI Kamal, Maître de Recherche au niveau du Département de Géodésie Spatiale / Centre des Techniques Spatiales (CTS, Arzew), pour sa grande disponibilité, son soutien scientifique et moral et son enthousiasme.

Je voudrais exprimer mes remerciements à Madame BACHIR BELMEHDI Farida, Cheffe du Département de Géographie et de l'Aménagement de Territoire / Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers (Université d'Oran 2) et à son staff, pour leur accompagnement administratif et pédagogique. Un grand merci au Professeur SOUIAH, Responsable du Master Géomatique.

Mes sincères remerciements vont à Monsieur ALLAL Nadir El-Ouassini, président du jury, ainsi qu'à Madame SENHADJI Hafida, d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Je tiens à remercier les ingénieurs ABDELHAK Mohamed et DAR SEBA Mohamed (promotion CTS 2022), pour leur précieuse aide, dans la visualisation des résultats, sous QGIS.

Mes profonds remerciements vont, également, à tous les collègues du Centre des Techniques Spatiales (CTS, Arzew), notamment, les éléments du Département de Géodésie Spatiale ainsi que tous mes collègues de l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences Géodésiques et des Techniques Spatiales (ENSGTS, Arzew).

Mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué scientifiquement, techniquement et moralement à l'aboutissement de ce travail qui n'aurait pu être réalisé sans leur aide, leur compréhension et leur soutien.

*Bachir.*

## Résumé :

En Algérie, les barrages en remblai constituent l'ossature de l'infrastructure de gestion de l'eau. La surveillance de ces ouvrages devient alors une nécessité, pour assurer leur sécurité et garantir leur pérennité. Elle revête une importance capitale, pour la prévention des risques liés aux phénomènes naturels et structurels affectant ces ouvrages. On distingue deux aspects de surveillance : interne et externe. Ce dernier aspect est pris en charge, par les techniques modernes de Géodésie, notamment, GNSS et InSAR.

L'objectif de ce mémoire est, d'une part, l'évaluation de la déformation de la zone du barrage en remblai de Kramis (Mostaganem), par l'utilisation des techniques de positionnement par satellites (GNSS) et d'interférométrie radar (InSAR) et de et d'autre part, la représentation et la visualisation des déplacements et des déformations de la digue et ses environs.

Les données utilisées, ont consisté aux mesures des campagnes GNSS du réseau d'auscultation (2019, 2020 et 2021) effectuées, dans le cadre du projet CTS/ANBT, portant sur l'auscultation géodésique du barrage de Kramis par l'outil spatial, ainsi que 38 images Radar de Sentinel-1A de la région, durant la période 2019-2021. Dans ce contexte, les logiciels TBC, QGIS et SNAP ont été utilisés, pour le traitement des données GNSS, la visualisation des déplacements et déformations du barrage ainsi que le traitement interférométrique des images Radar par la méthode PSInSAR, respectivement. Le traitement Radar multi-temporel a été effectué, par le programme StaMPS/MTI.

Les résultats obtenus sont, en termes, de vecteurs déplacements (2D et 1D), de tenseurs de déformation et ses primitives du réseau d'auscultation, par la technique GNSS et de cartes de vitesse moyenne de déformation, de séries temporelles de déplacement LOS, par la technique InSAR. Ces résultats ont montré la fiabilité de ces techniques, dans la surveillance du barrage Kramis et ont mis en évidence les déformations appréhendées qui restent faibles, ce qui a révélé que le barrage est stable.

**Mots clés :** Auscultation géodésique, GNSS, InSAR, Tenseur de déformation, Degré de significativité, Vitesse moyenne de déformation, Séries temporelles de déplacement LOS.

In Algeria, embankment dams form the platform of the water management infrastructure. The monitoring of these structures then becomes a necessity, to ensure their safety and guaranty their durability. It is of capital importance for the prevention of risks related to natural and structural phenomena affecting these structures. There are two monitoring aspects: internal and external. This later is carried out by modern geodetic techniques, in particular, GNSS and InSAR.

The objective of this thesis is, in one hand, the evaluation of the deformation of the embankment dam area of Kramis (Mostaganem), by the use of satellite positioning techniques (GNSS) and radar interferometry (InSAR) and in other hand, the representation and visualization of the displacements and deformations of the dike and its surroundings.

The data used is about observations from GNSS campaigns of the auscultation network (2019, 2020 and 2021) carried out, within the framework of the CTS/ANBT project, relating to the geodetic auscultation of the Kramis dam by space tool, as well as 38 Sentinel-1A Radar images of the region, during the period 2019-2021. In this context, the TBC, QGIS and SNAP software were used, for the processing of GNSS data, the visualization of the displacements and deformations of the dam as well as the interferometric processing of Radar images by the PSinSAR method, respectively. Radar multi-temporal processing was performed by the StaMPS/MTI program.

The results obtained are, in terms of displacement vectors (2D and 1D), deformation tensors and its primitives of the auscultation network, by the GNSS technique and maps of mean velocity of deformation, time series of LOS displacement, using the InSAR technique. These results showed the reliability of these techniques in the monitoring of the Kramis dam and highlighted the apprehended deformations which remain low, indicating that the dam is stable.

**Keywords:** Geodetic auscultation, GNSS, InSAR, Strain tensor, Degree of significance, Mean velocity of deformation, LOS displacement time series.

## Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements .....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Table des matières .....	v
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	viii
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I: Barrages en remblai et leur surveillance</b>	<b>3</b>
I.1. Introduction .....	4
I.2. Types des barrages en remblai.....	4
I.2.1. Barrages en terre .....	5
I.2.2. Barrages en enrochement .....	7
I.2.3. Avantages et inconvénients des barrages en enrochement.....	10
I.3. Surveillance des barrages en enrochements .....	10
I.3.1. Inspection visuelle .....	12
I.3.2. Auscultation.....	12
I.3.3. Essais périodiques .....	14
<b>Chapitre II: Techniques géodésiques pour l’auscultation des barrages</b>	<b>15</b>
II.1. Technique GPS (Global Positioning System) .....	16
II.2. Technique d’interférométrie Radar (InSAR).....	21
II.2.1. Principe de l'interférométrie radar InSAR.....	22
II.2.2. Mesure de déplacement par InSAR.....	23
II.2.3. Technique des Réflecteurs Persistants (PS InSAR) .....	23
II.2.4. Technique des Petites Lignes de Base (SBAS) .....	26
<b>Chapitre III: Méthodologie d’auscultation géodésique des barrages</b>	<b>28</b>
III.1. Méthodologie d’auscultation géodésique .....	29
III.2. Analyse tensorielle .....	31
III.3. Représentation de la déformation par triangulation de Delaunay.....	34
III.4. Significativité des tenseurs de déformation d'un réseau géodésique .....	37
<b>Chapitre IV: Application – Auscultation géodésique du barrage de Kramis</b>	<b>39</b>
IV.1. Zone d’étude : Barrage de Kramis.....	40
IV.2. Données et traitement GNSS .....	40
IV.3. Déformations du réseau d’auscultation du barrage Kramis .....	44
IV.4. Analyse des erreurs sur les déformations.....	52
IV.5. Données et traitement interférométrique radar .....	58
IV.5.1. Données utilisées .....	58
IV.5.2. Traitement interférométrique par SNAP .....	59
IV.5.3. Traitement multi-temporel par StaMPS/MTI.....	62
IV.5.4. Vitesses moyennes de déformation et les séries temporelles de déplacement LOS.....	70
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>74</b>
Références bibliographiques.....	76

## Liste des figures :

<b>Figure I.1</b> : Différents types de barrage en remblai [EPFL, 2002].	5
<b>Figure I.2</b> : Barrage de Douera, Algérie.	5
<b>Figure I.3</b> : Barrage en terre homogène.	6
<b>Figure I.4</b> : Barrage à noyau central étanche.	6
<b>Figure I.5</b> : Barrage à masque amont, [Heragmi, 2009].	7
<b>Figure I.6</b> : Coupe transversale d'un barrage en enrochement.	8
<b>Figure I.7</b> : Barrage en enrochement à masque amont.	8
<b>Figure I.8</b> : Coupe d'un barrage en enrochement à noyau central.	9
<b>Figure I.9</b> : Coupe d'un barrage en enrochement à diaphragme.	9
<b>Figure I.10</b> : Les activités de la surveillance des barrages [Christian, 2008].	11
<b>Figure I.11</b> : Inspection visuelle d'un barrage.	12
<b>Figure I.12</b> : Auscultation topographique d'un barrage ( <i>opération de nivellement de précision</i> ).	13
<b>Figure I.13</b> : Essai de fonctionnement d'un clapet de l'évacuateur du barrage de Cheliff Lot-1, Mostaganem.	14
<b>Figure II.1</b> : Le système GPS. (a) : constellation GPS, (b) : satellite GPS.	17
<b>Figure II.2</b> : Segment de contrôle du système GPS.	17
<b>Figure II.3</b> : Principe du radar à antenne réelle et le système radar Sentinel-1.	22
<b>Figure II.4</b> : Géométrie d'acquisition d'un couple interférométrique.	22
<b>Figure II.5</b> : (a) Principe de fonctionnement des déplacements des PS (b) Série d'images contenant les PS.	24
<b>Figure II.6</b> : Réflecteurs permanents PS (bâtiments, monuments, viaducs, antennes, pieux, conduites, roches, ...)	25
<b>Figure II.7</b> : Algorithme de la technique SBAS.	27
<b>Figure III.1</b> : Principaux réseaux géodésiques d'auscultation (surveillance).	29
<b>Figure III.2</b> : Illustration de la caractérisation de la triangulation de Delaunay.	34
<b>Figure III.1</b> : Formalisme d'un triangle (K) du réseau Delaunay.	35
<b>Figure IV.1</b> : (a) Localisation géographique du barrage de Kramis (b) Réseau hydrographique de l'oued Kramis (c et d) Photos de la digue du barrage de Kramis (Avril 2019).	40
<b>Figure IV.2</b> : Observations GNSS sur terrain.	41
<b>Figure IV.3</b> : Interface du logiciel TBC.	42
<b>Figure IV.4</b> : (a) Réseau d'auscultation du barrage de Kramis, (b) configuration des sessions d'observations GNSS.	43
<b>Figure IV.5</b> : Vecteurs des déplacements 2D des points du réseau d'auscultation du barrage Kramis. (a) période 2019-2020, (b) période 2019-2021.	45
<b>Figure IV.6</b> : Vecteurs des déplacements verticaux du réseau d'auscultation du barrage Kramis. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.	46
<b>Figure IV.7</b> : Tenseurs de déformations du réseau d'auscultation du barrage Kramis. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021	48
<b>Figure IV.8</b> : Dilatations du réseau d'auscultation du barrage Kramis. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.	49
<b>Figure IV.9</b> : Cisaillements du réseau d'auscultation du barrage Kramis. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.	50
<b>Figure IV.10</b> : Rotations différentielles du réseau d'auscultation du barrage Kramis. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.	51

<b>Figure IV.11:</b> Degré de significativité des dilatations. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.	<b>53</b>
<b>Figure IV.12:</b> Degré de significativité des cisaillements. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.	<b>54</b>
<b>Figure IV.13:</b> Degré de significativité des rotations différentielles. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.	<b>55</b>
<b>Figure IV.14:</b> Degré de significativité des déformations verticales. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.	<b>56</b>
<b>Figure IV.15:</b> La scène de l'image radar du passage ascendant du satellite Sentinel-1A/Track 30.	<b>58</b>
<b>Figure IV.16:</b> Interface du logiciel SNAP.	<b>60</b>
<b>Figure IV.17:</b> Distribution spatiale et temporelle de l'ensemble de données Sentinel-1A. Le point noir représente l'image master utilisée pour le traitement PS, les croix représentent les images esclaves et les lignes rouges correspondent aux interférogrammes calculés.	<b>61</b>
<b>Figure IV.18:</b> Exemple d'un interférogramme et de l'image de cohérence de la région d'étude, pour la période 25 Juin 2020-24 Août 2020.	<b>61</b>
<b>Figure IV.19:</b> Modèle numérique de terrain SRTM de la région d'étude.	<b>62</b>
<b>Figure IV.20 :</b> Algorithme du logiciel StaMPS/MTI.	<b>63</b>
<b>Figure IV.21:</b> Séries temporelles des phases différentielles enroulées des PS identifiés.	<b>65</b>
<b>Figure IV.22:</b> Interférogrammes déroulés contenant les PS sélectionnés.	<b>67</b>
<b>Figure IV.23:</b> Erreurs spatialement corrélés de ligne de visée (SCLA).	<b>68</b>
<b>Figure IV.24:</b> Interférogrammes déroulés corrigés des erreurs atmosphériques.	<b>69</b>
<b>Figure IV.25:</b> Carte de vitesse moyenne de déformation (LOS) de la zone du barrage de Kramis.	<b>71</b>
<b>Figure IV.26:</b> Points sélectionnés du barrage de Kramis.	<b>72</b>
<b>Figure IV.27:</b> Séries temporelles des déplacements LOS de quelques points du barrage de Kramis.	<b>73</b>

### Liste des tableaux :

<b>Tableau I.1:</b> Méthodes et instruments géodésiques de contrôle de déformation.	<b>14</b>
<b>Tableau II.1:</b> Principales erreurs affectant la mesure GPS.	<b>20</b>
<b>Tableau III.1:</b> Les invariants en cas des réseaux 2D et 3D [Vanicek et al., 2001].	<b>34</b>
<b>Tableau IV.1:</b> Précision des coordonnées géodésiques locales ( $E$ , $N$ , $U$ ) et éléments des ellipses d'erreurs absolues des points du réseau d'auscultation, suivant les trois campagnes GNSS.	<b>43</b>
<b>Tableau IV.2:</b> Statistiques des tenseurs et des primitives de déformation du réseau d'auscultation du barrage de Kramis. Entre crochets, sont les valeurs minimales et maximales.	<b>47</b>
<b>Tableau IV.3:</b> Caractéristiques des images radar acquises	<b>59</b>
<b>Tableau IV.4:</b> Tendances et termes périodiques du déplacement LOS de quelques points du barrage de Kramis.	<b>72</b>

## Introduction générale

Dans notre pays, les barrages en enrochement sont l'épine dorsale de l'infrastructure de gestion de l'eau. Malgré leurs avantages en termes de résistance et de structure, ces ouvrages doivent être équipés de système de surveillance précise, pour assurer leur sécurité et garantir leur pérennité. Toute forme de surveillance doit être accompagnée d'une instrumentation spécialisée et d'une modélisation adéquate.

A ce niveau deux aspects de surveillance précise, ou communément connue par le nom d'auscultation, se présentent. La première étant l'auscultation interne et la deuxième l'auscultation externe. Cette dernière vise à mesurer, avec précision, les déplacements et les déformations superficiels encourus, par l'utilisation des techniques de la géodésie et la topographie. L'outil spatial, à savoir les techniques GNSS (Global Navigation Satellite System) et InSAR (Interferometry Synthetic Aperture Radar), s'est imposé, ces dernières années, autant qu'outil fiable et précis, pour l'appréhension des déformations des barrages.

Généralement, l'analyse de ces déformations se base sur deux méthodes traditionnelles : le vecteur déplacement et le tenseur de déformation. Cependant, l'évaluation et la représentation des déplacements et des déformations dépendent, respectivement, du référentiel a priori et de la configuration des figures sélectionnées qui composent l'ensemble du réseau. Ces contraintes rendent difficile l'interprétation des résultats obtenus. La question qui se pose quelle est la meilleure représentation de ces déformations, pour faciliter leur lecture à des utilisateurs non spécialistes en géodésie, ou à des décideurs, afin de mieux comprendre ces phénomènes ?

L'objectif assigné, à ce mémoire, est d'une part, l'estimation de la déformation d'un barrage, à partir des données GNSS du réseau d'auscultation et des images Radar de la zone d'étude et d'autre côté, l'analyse et la visualisation adéquate de cette déformation.

L'application a concerné la zone d'étude du barrage de Kramis (Wilaya de Mostaganem) où ce dernier a fait l'objet d'un projet entre le CTS et l'ANBT, durant la période 2019 – 2021, portant sur l'auscultation géodésique de ce barrage par l'outil spatial : GNSS et Interférométrie Radar.

La méthodologie adoptée repose sur : (i) le calcul des déplacements planimétriques et altimétriques des points du réseau d'auscultation, à partir des coordonnées estimées des campagnes d'observations GNSS effectuées, (ii) l'évaluation de la déformation ainsi que l'analyse statistique et la visualisation de cette déformation et (iii) le traitement interférométrique des images radar de la région d'étude, basé sur la méthode PSInSAR et l'estimation des vitesses moyennes de déformation et des séries temporelles de déplacement.

Le présent mémoire est structuré suivant quatre chapitres, tels que :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les types de barrage en remblai, suivies par des avantages et inconvénients des barrages en enrochements, puis une introduction au monde

d'auscultation et l'inspection visuelle, leurs objectifs et les résultats souhaités ainsi que les techniques géodésiques de surveillance de déformations des barrages en enrochement.

Dans le deuxième chapitre, est dédié aux techniques de géodésie spatiale : GPS (Global Positioning System) et InSAR, qui feront l'objet d'utilisation, dans le processus de surveillance des barrages.

Le troisième chapitre représente l'aspect méthodologique d'auscultation géodésique des barrages. Est abordé, la théorie de calcul et d'estimation de la déformation (tenseur de déformation). Le tenseur de déformation est caractérisé par ses primitives : dilatation/compression, cisaillement et la rotation différentielle. L'analyse statistique de la déformation et ses primitives est réalisée sur la base de la méthode de Monté Carlo pour qualifier la significativité des résultats obtenus.

Le quatrième chapitre porte sur l'application de la méthodologie développée sur le barrage en enrochements de Kramis. Sont abordé le calcul GNSS des déformations du réseau d'auscultation, ses degrés de significativité et leurs visualisations sous QGIS, ainsi que le traitement PSinSAR des images Radar de Sentinel-1A par le logiciel SNAP et l'utilisation du programme StaMPS/MTI pour l'évaluation des vitesses moyennes de déformation et les séries temporelles de déplacement LOS, de la zone du barrage.

Enfin, le mémoire se termine par une conclusion et des perspectives.

# Chapitre I : Barrages en remblai et leur surveillance

## I.1. Introduction

La surveillance et l'auscultation ont pour objectif principal le suivi du comportement du barrage dans le temps, afin de maintenir son fonctionnement et d'assurer la sécurité de l'ouvrage et par conséquent celles des agglomérations à l'aval du barrage. La surveillance et l'auscultation permettent de déterminer la consistance des travaux d'entretien, mais elles peuvent dépasser ce cadre, en permettant, d'une part, de prendre des mesures de sécurité éventuelle et d'autre part, de confronter le résultat des calculs à celui d'auscultation. Cette comparaison permet l'amélioration des connaissances théoriques.

La disponibilité des mesures enregistrées de ces déformations peut constituer un outil d'analyse du comportement des barrages en remblais à long terme et être aussi une alternative aux méthodes numériques utilisées pour l'étude de ce comportement [Hamriche, 2013].

Le comportement du corps d'un barrage peut varier de façon significative en fonction du type de matériau choisi pour le construire. L'intérêt majeur d'un barrage en remblai est de pouvoir utiliser les matériaux se trouvant à proximité du lieu de construction de celui-ci. La qualité et la quantité du matériau sont donc des données que doit prendre en compte le concepteur, dans son choix du type et de la géométrie interne et externe du barrage [Alain, 2013].

## I.2. Types des barrages en remblai

Les barrages en remblai sont constitués essentiellement de matériaux granulaires naturels meubles prélevés à proximité immédiate de l'ouvrage. On distingue deux catégories de barrages en remblai (Figure I.1) :

- Les barrages en terre, réalisés essentiellement à partir de sols naturels meubles prélevés dans des zones d'emprunt ;
- Les barrages en enrochements, dont la majeure partie est constituée de matériaux de carrières concassés, [Cherif & Bouhassane, 2013].

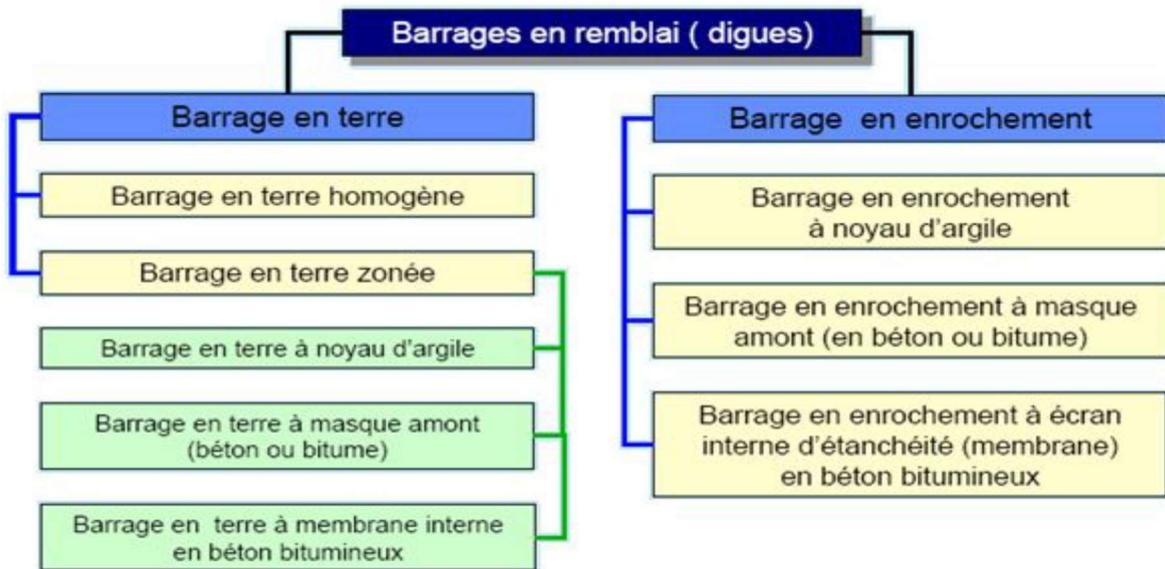


Figure I.1: Différents types de barrage en remblai [EPFL, 2002].

### I.2.1. Barrages en terre

Le terme "Terre" doit être, pour les ingénieurs, pris dans le sens le plus large du mot et sert à désigner toute sorte de matériaux terreux comprenant non seulement les différents sols définis par le pédologue, mais aussi l'ensemble des matériaux provenant de la désagrégation ou de la décomposition des roches [Rolley, 1989].

Les sols meubles des barrages en terre peuvent, selon leurs caractéristiques géotechniques, être suffisamment imperméables pour suffire aux deux fonctions : étanchéité, d'une part, et résistance à la poussée de l'eau, d'autre part ; ces fonctions sont assurées par des matériaux naturels de type « sol » judicieusement organisés. Ils représentent notamment l'avantage d'être construit, pratiquement sans limitation de hauteurs et sur des fondations pas suffisamment solides, comme pour des barrages en béton [Maalel & Hafsia, 2012].



Figure I.2 : Barrage de Douera, Algérie.

Les barrages en terre compactés peuvent être divisés en trois principaux types : les ouvrages en terre homogènes, ceux à noyaux étanches et ceux à masques amont, [Cherif & Bouhassane, 2013].

**a) Barrages en terre homogène**

Ils sont totalement construits avec un seul matériau qui est le plus souvent argileux remplissant simultanément les deux fonctions d'écran et de masse. Ce matériau doit présenter des caractéristiques permettant de garantir une étanchéité suffisante et une stabilité du remblai.

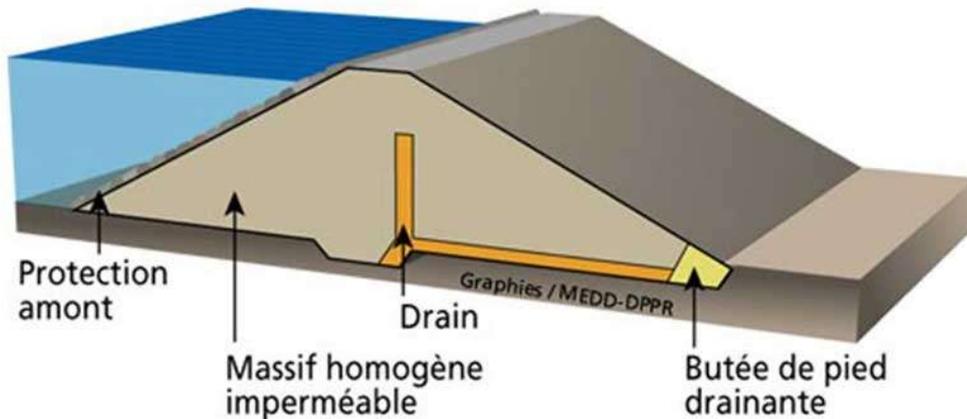


Figure I.3 : Barrage en terre homogène.

**b) Barrages en terre à noyau étanche**

Les barrages zonés sont des barrages en remblai constitués de plusieurs types des matériaux disposés de façon à assurer séparément les fonctions de stabilité du barrage et l'étanchéité. Les zones encadrant le noyau imperméable sont en tout venant compacté, elles assurent la résistance et la stabilité du barrage, en particulier pour le talus amont en cas de vidange rapide, [Heragmi, 2009].

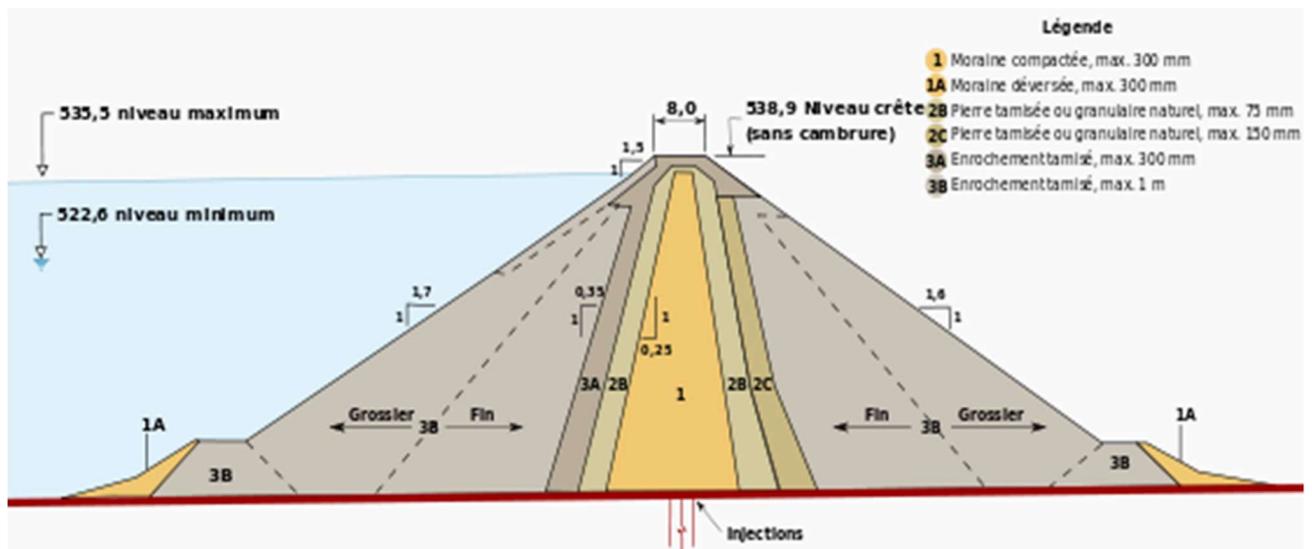


Figure I.4: Barrage à noyau central étanche.

### c) Barrage à masque amont

Les barrages à masque sont constitués d'un remblai plus ou moins perméable assurant la stabilité d'ensemble. Un écran imperméable, appelé masque, est mis en place sur le parement amont de façon à rendre le barrage étanche et lui permettre de retenir l'eau du réservoir.

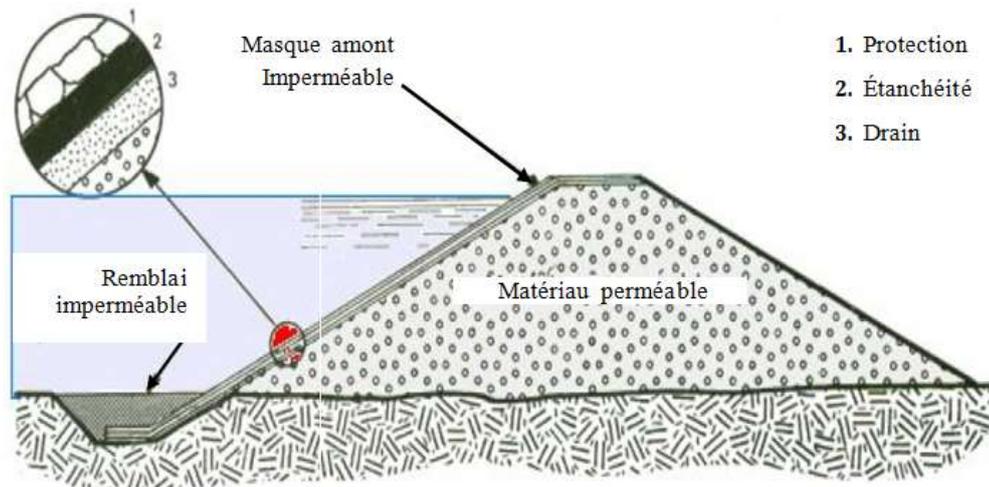


Figure I.5: Barrage à masque amont, [Heragmi, 2009].

### I.2.2. Barrages en enrochement

Les barrages en enrochement comportent des blocs qui peuvent atteindre des dimensions de plusieurs dizaines de centimètres (« tout-venant » de carrière). Ces blocs rocheux présentent généralement des fissures liées à la genèse de la roche ou à la technique d'extraction. Le réseau de fissures peut s'évoluer sous l'action des efforts appliqués ainsi que de conditions environnementales (pluie, gel, ...), ce qui peut conduire à la rupture de certains blocs. Suite à ces ruptures, sous l'action de leur poids propre et des charges d'exploitation, ces ouvrages en enrochements présentent une évolution des déformations relativement importantes au cours du temps, [Larbi & Mezoudji, 2014].

On peut le définir aussi qu'il est constitué d'éléments sans cohésion dont le poids et l'imbrication les uns dans les autres déterminent la stabilité de l'ensemble du massif sur lequel s'applique la poussée de l'eau. Ce type d'ouvrage présente donc un fort coefficient de sécurité, du point de vue des tassements éventuels du sol de fondation et des risques de rupture, puisqu'il repose sur une très grande emprise et qu'il répartit les contraintes sur une très grande surface, [Castan, 1975].

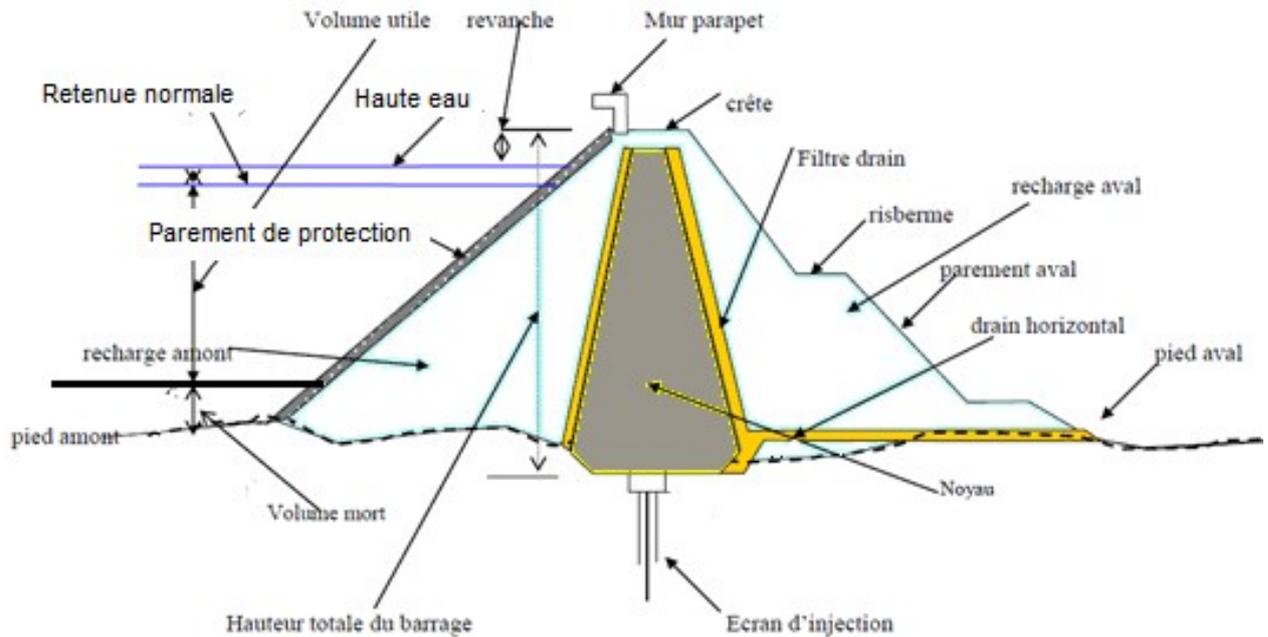


Figure I.6: Coupe transversale d'un barrage en enrochement.

Les barrages en enrochements essentiellement de trois types :

**a) Barrage en enrochement à masque amont**

Le masque amont est une paroi étanche plaquée sur le talus amont du barrage. Il existe de nombreuses natures de masque étanche telles que le béton de ciment ou bitumineux, chapes préfabriquées, membranes étanches etc. Il repose en général sur une couche d'élément finis drainants et peut nécessiter suivant sa nature, une couche de protection. Il présente l'avantage de pouvoir être exécuté après l'édification du remblai et de pouvoir être réparé aisément, [Baghzim, 2015].

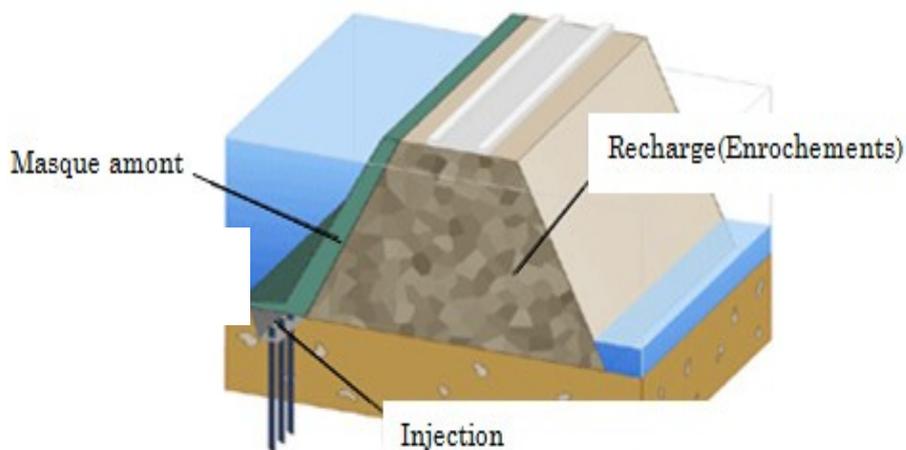
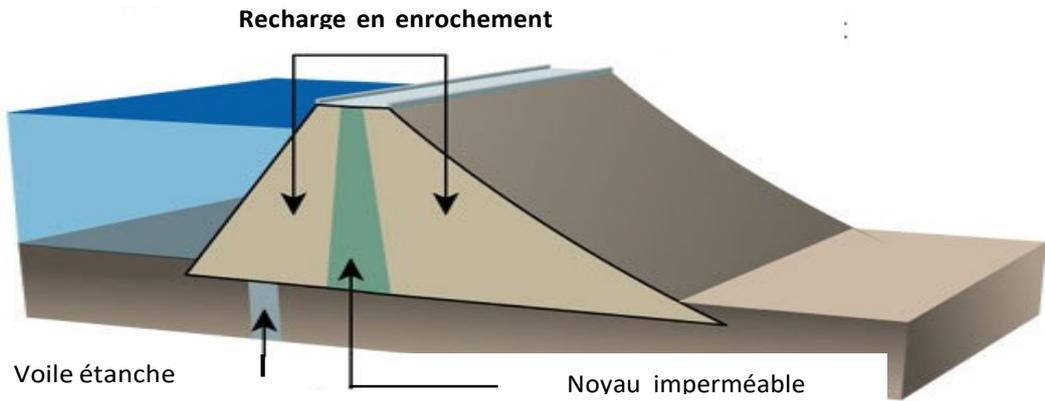


Figure I.7: Barrage en enrochement à masque amont.

**b) Barrage en enrochement à noyau central**

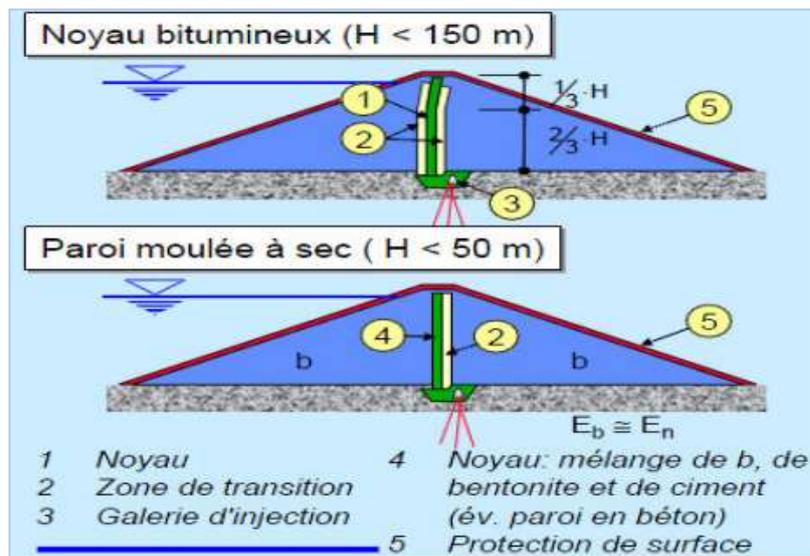


**Figure I.8:** Coupe d'un barrage en enrochement à noyau central.

L'étanchéité est assurée par un organe dans le corps de l'ouvrage, un noyau central (ou incliné), qui peut être constitué d'argile et/ou de limon et sable. Des noyaux étanches en argile sont les plus couramment utilisés. La fonction de résistance à la poussée de l'eau peut être garantie par des enrochements placés des deux côtés du noyau ; ceux-ci sont donc directement en contact avec l'eau. Les barrages à noyau peuvent également tasser et causer des désagréments à l'ouvrage : on relève un grand nombre de barrages où des fissures longitudinales se sont produites entre la recharge amont et le noyau, suite aux tassements de la recharge amont, [Larbi & Mezoudji, 2014].

**c) Barrage en enrochement à diaphragme**

Il s'appelle barrage à diaphragme ou à écran interne d'étanchéité en béton bitumineux. Cet élément d'étanchéité satisfait, en effet, aux exigences de sécurité les plus strictes grâce à sa déformation, sa bonne résistance à l'érosion et au vieillissement, et surtout grâce mode de construction sans joint, [Cherif & Bouhassane, 2013].



**Figure I.9:** Coupe d'un barrage en enrochement à diaphragme.

### I.2.3. Avantages et inconvénients des barrages en enrochement

D'après [Christian, 2008] :

#### a) avantages :

- Ne supportent pas bien les variations rapides du plan d'eau ;
- Volume de matériau à mettre en place très important ;
- Ne supportent pas la submersion par-dessus la crête ;
- Le noyau argileux est sensible aux conditions météorologiques défavorables ;
- Les déformations dues aux contraintes internes et/ou externes.

#### b) Inconvénients :

- Le corps du barrage est très flexible et adaptable aux conditions du terrain ;
- La mise en œuvre des matériaux peut être très fortement mécanisée et les cadences très importantes, même si le volume à mettre en place est sensiblement plus important ;
- N'engendrent que peu de contraintes ;
- Peuvent accepter des tassements de la fondation ;
- Peu susceptible aux séismes.

L'eau introduit des pressions interstitielles, que l'on peut également qualifier de sous-pressions qui dégradent la stabilité au glissement rotationnel des talus et peut introduire aussi des érosions de surface ou par érosion interne. Il y a des autres grandeurs physiques, (le poids propre du mur, les forces extérieures, ...), causent des déplacements et déformations au niveau de mur du barrage qu'on peut les surveiller en utilisant diverses méthodes [Heragmi, 2009].

## I.3. Surveillance des barrages en enrochements

La surveillance des barrages en enrochements a trois grands objectifs :

- ***Pendant la construction et la première mise en eau***, on cherche essentiellement à comparer le comportement de l'ouvrage par rapport aux prévisions du projet, que ce soit pour vérifier certaines hypothèses de calcul, pour valider les résultats de ces calculs ou pour vérifier la pertinence de tel ou tel choix technique [Paul et al., 2012].

La première mise en eau fait l'objet de consignes particulières de gestion de la retenue, de surveillance visuelle et de suivi d'auscultation. En règle générale, la présence permanente de l'exploitant est exigée pendant toute cette phase. Dans les six mois qui suivent l'achèvement de la mise en eau, le propriétaire (ou le concessionnaire) doit rédiger un rapport de première mise en eau qui indique les éventuelles modifications par rapport au projet et analyse le comportement réel du barrage.

- ***En phase d'exploitation***, comme déjà indiqué, les objectifs essentiels sont la sécurité de l'ouvrage et la maîtrise des coûts d'exploitation. On cherche donc à déceler tout signe

avertisseur de changement dans le comportement de l'ouvrage, ce qui amène à s'intéresser d'une part à l'apparition de phénomènes nouveaux et d'autre part aux évolutions lentes liées au vieillissement. Il faut garder en mémoire que, passée la première épreuve de la mise en eau et en dehors d'événements exceptionnels tels que les crues et les séismes, la rupture d'un barrage en exploitation est toujours précédée de signes avertisseurs.

- Enfin, un dernier objectif, commun aux deux phases ci-dessus est **le retour d'expérience** pour l'ingénierie, ce retour d'expérience étant valorisé autant sur les futurs projets que sur le suivi des autres barrages d'une même famille (un phénomène constaté sur un barrage peut se produire sur un autre barrage semblable).

Cela concourt à garantir, sur le long terme, d'une part la sûreté des ouvrages, et d'autre part la maîtrise des coûts par une maintenance qui peut être programmée et optimisée. L'aspect sécurité prime avant toute autre considération, mais il est évident que plus tôt une anomalie est détectée, moindres en sont les conséquences en termes de travaux ou de coût d'exploitation.

La surveillance inclut trois composantes complémentaires [Cherif & Bouhassane, 2013] :

- L'inspection visuelle dont l'objectif est de déceler des anomalies perceptibles à l'œil ;
- L'auscultation qui permet de mesurer l'évolution de certains paramètres et d'établir une analyse du comportement de l'ouvrage sur le long terme ;
- Les essais périodiques de certains organes, les vannes en particulier, dans différentes conditions de fonctionnement.

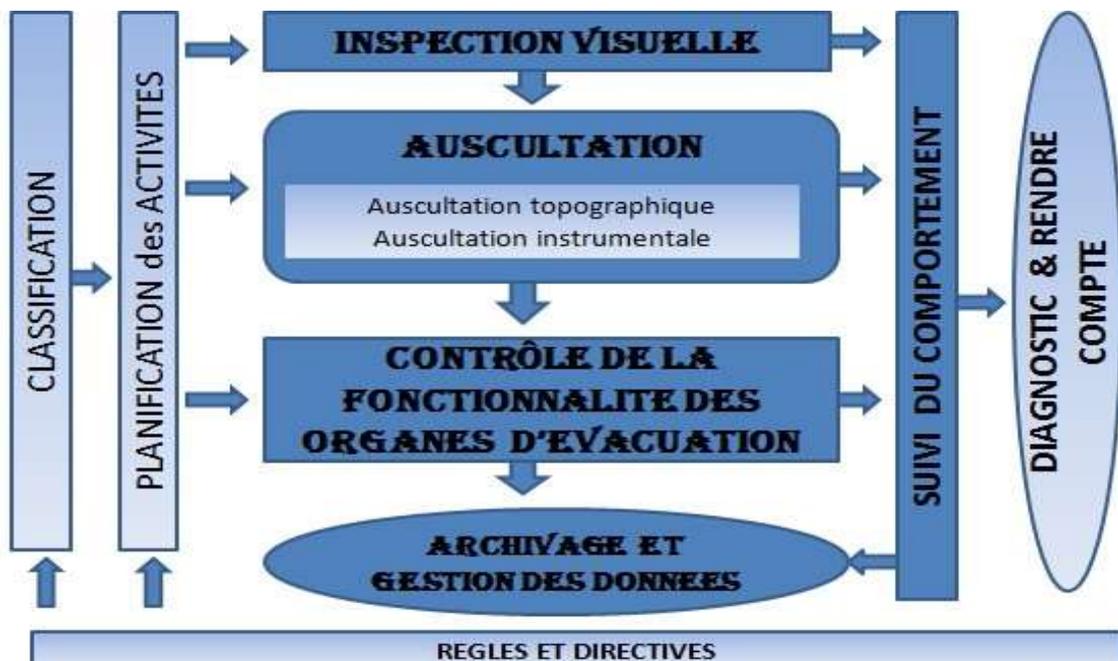


Figure I.10: Les activités de la surveillance des barrages [Christian, 2008].

### I.3.1. Inspection visuelle

Dans le domaine de la surveillance, l'accent est mis prioritairement sur l'inspection visuelle qui consiste à [Comité suisse des barrages, 2005] :

- Visites systématiques et formalisées (périodicité hebdomadaire à mensuelle selon les cas) ;
- Inspection visuelle si possible en crue et systématiquement en post-crue ;
- Visites techniques : examen visuel approfondi du barrage et de ses abords, une fois par an avec un ingénieur spécialiste ;
- Tenue à jour d'un registre avec report de toutes les observations et interventions sur le barrage.
- La bonne exécution de ces visites nécessite de procéder à des travaux d'entretien, tels que :
  - Entretien strict de la végétation sur les talus des remblais et aux abords des ouvrages ;
  - Enlèvement de la calcite, gênant l'observation des parements en maçonnerie
  - Dégagement des exutoires de drainage et surveillance des dépôts de matériaux.



Figure I.11: Inspection visuelle d'un barrage.

### I.3.2. Auscultation

Dans le but de suivre et contrôler le comportement des barrages, on en réalise l'auscultation. Ceci consiste à mesurer certains paramètres physiques afin d'en suivre l'évolution. Tout comme l'inspection, l'auscultation fournit des données pour suivre le comportement d'un barrage et évaluer sa sécurité. L'auscultation est une action de contrôle basée sur des mesures physiques sur un barrage (ou des éléments d'un barrage) ou une zone de terrain.

On distingue, comme relevant de méthodes, moyens et intervenants nettement différents, deux types d'auscultation :

- l'**auscultation générale ou interne**, de type géotechnique et structurale (mesures de débit de drain, niveaux piézométriques, lectures de pendules), au moyen d'équipements fixes installés dans le barrage et d'appareils de mesure mobiles. Il importe que l'opérateur qui effectue les mesures puisse valider lui-même les résultats obtenus, en disposant au préalable de valeurs de référence attendues.
- l'**auscultation topographique ou externe**: basée sur des mesures topographiques périodiques (classique et/ou spatiale), elle permet d'évaluer les déplacements géométriques avec une grande précision.



**Figure I.12:** Auscultation topographique d'un barrage (*opération de nivellement de précision*).

L'auscultation vise à atteindre les trois objectifs suivants [Maalel & Hafsia, 2012] :

- Assurer la sécurité des populations d'aval sans restreindre a priori les conditions d'exploitations de l'ouvrage, en dépit des incertitudes et des inévitables modifications des conditions de résistance ;
- Evaluer les évolutions de l'ouvrage avec suffisamment de précision pour permettre l'adoption, en temps approprié ;
- Approfondir les connaissances en mécanique des roches et des sols, le comportement des matériaux de construction et des instruments de mesures adoptés en vue de la réalisation ultérieure d'ouvrages plus conformes aux exigences de sécurité et d'économie.

Les conditions de sécurité d'un barrage ne peuvent être évaluées de façon complète à aucun moment, et encore moins garanties une fois pour toutes. Elles dépendent d'éléments plus ou

moins bien définis ou contrôlables d'évolutions, comme, par exemple, la résistance, la rigidité et le régime hydraulique des fondations.

En première approche, on apprécie l'évolution d'un phénomène d'après son allure : une évolution ralentie est plutôt rassurante ; une évolution uniforme est plus ou moins préoccupante ; une évolution accélérée est inquiétante et peut être le signe avant-coureur d'une catastrophe. Il est nécessaire de s'appuyer sur la compréhension du mode de résistance de l'ouvrage et sur la connaissance des grandeurs significatives telles que déplacements et contraintes [Messaid, 2009].

Méthodes	Instruments et équipements
Levés d'alignements	Théodolite, laser optique, fil invar, etc.
Levés classiques	Théodolites
Positionnement par satellite	Récepteurs GPS
Nivellement trigonométrique précis	Théodolite précis
Nivellement géométrique précis	Niveau de précision
Technique de Scanner laser	Scanner Laser
Interférométrie d'image SAR	Images radar SAR

Tableau I.1: Méthodes et instruments géodésiques de contrôle de déformation.

### I.3.3 Essais périodiques

Ils concernent les vannes et clapets, les capteurs et leurs liaisons avec les postes de commande, les moyens d'alimentation en énergie. La périodicité des essais doit être précisément définie ainsi que leurs conditions de réalisation. La sécurité en aval du barrage doit être prise en compte lorsque les essais conduisent à relâcher des volumes d'eau significatifs. On vérifie également le fonctionnement en mode dégradé (alimentation de secours en énergie, commande manuelle, ...) [Talatizi, 2014].



Figure I.13: Essai de fonctionnement d'un clapet de l'évacuateur du barrage de Cheliff Lot-1, Mostaganem.

# Chapitre II : Techniques géodésiques pour l'auscultation des barrages

## II.1. Technique GNSS (Global Navigation Satellite System)

GNSS ou le système global de navigation par satellite, comprend quatre systèmes spatiaux de positionnement et de navigation : GPS (Etats Unis), GLONASS (Russie), BEIDOU (Chine) et GALILEO (Union Européenne). Dans la suite de cette partie, on s'intéresse seulement au système américain GPS (Global Positioning System).

Dès la fin des années 70, l'un des principaux soucis du "Department of Defense" (DoD) américain est de concevoir un système permettant à tous les éléments de l'armée américaine (avions, navires, véhicules blindés, troupes) de se positionner de manière précise et quasi instantanée, n'importe quand et n'importe où à la surface de la Terre (cf. Figure II.1). Le "Global Positioning System" (GPS) a donc été conçu pour répondre à ces impératifs. Cependant, sous les directives du Congrès américain, le DoD a favorisé son utilisation pour des applications civiles, pour devenir actuellement un système dual civil et militaire. Il a été développé en vue du remplacement du système de positionnement Transit<sup>1</sup> qui présentait deux limitations majeures : la première étant la couverture satellitaire insuffisante et la deuxième étant la faible précision en navigation.

Actuellement, le système GPS (qui fait partie des techniques radioélectriques de géodésie spatiale) permet de se positionner, avec précision, en absolu à quelques mètres près et en relatif jusqu'à quelques millimètres près.

### II.1.1. Segments du système GPS

Le système est composé de trois secteurs :

- Le secteur spatial qui est constitué d'un ensemble de satellites ;
- Le secteur de contrôle qui permet de piloter le système ;
- Le secteur utilisateur.

Le segment spatial est composé d'un système comportant 24 satellites (orbitant à 20200 km d'altitude et répartis sur 6 plans orbitaux ayant une inclinaison d'environ 55° sur l'équateur) qui assure en tout lieu une visibilité simultanée de 4 à 8 satellites avec une élévation d'au moins 15°.

La période de révolution orbitale des satellites est de 12 heures sidérales, soit 11h58mn02s en temps UTC. Pour un observateur au sol, la constellation GPS se répète toutes les 23h56mn04s UTC (résonance 1/2 avec la durée du jour). Chaque satellite est muni d'un émetteur-récepteur, de plusieurs horloges atomiques, d'ordinateurs et d'équipements auxiliaires destinés au fonctionnement du système. Chaque satellite génère un signal dont la stabilité en fréquence est assurée avec une très grande fiabilité grâce aux horloges atomiques (césium ou rubidium) embarquées ( $10^{-13}$  à  $10^{-14}$ ). A partir de la fréquence fondamentale GPS à 10.23 MHz, l'émetteur génère deux ondes (L1 et L2) de fréquences 1575.42 MHz et 1227.60MHz, respectivement.

---

<sup>1</sup> Transit ou NNSS (*Navy Navigation Satellite System*) est un système américain développé à partir de 1958 et opérationnel depuis 1964. Ce système émettait sur deux fréquences (150 et 400 MHz) et la précision atteinte sur le positionnement était de 100 à 1500m.

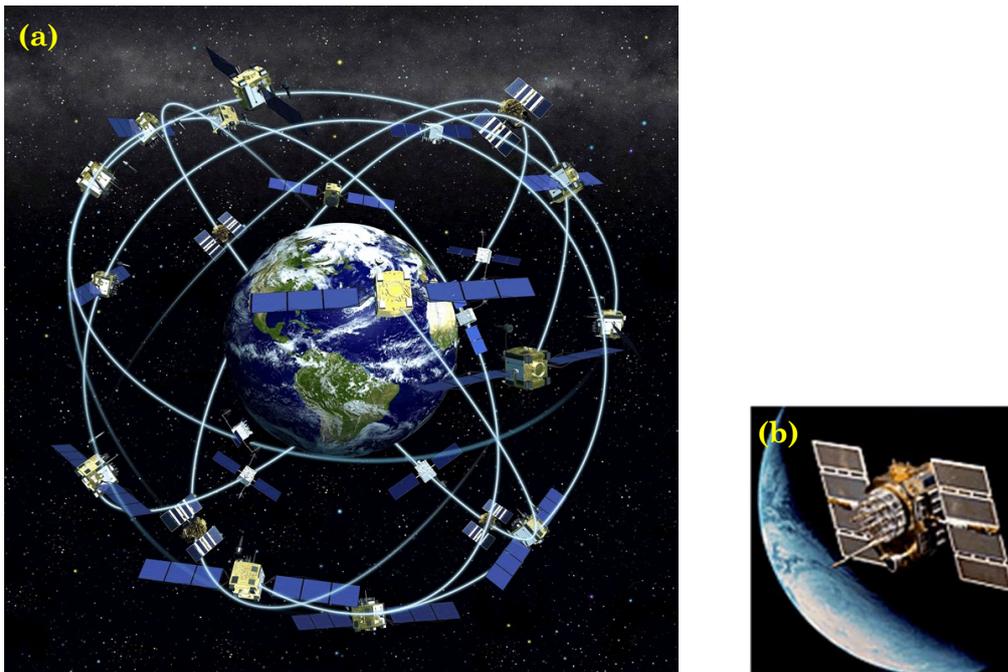


Figure II.1: Le système GPS. (a) : constellation GPS, (b) : satellite GPS.

Le secteur de contrôle est composé de 5 stations au sol (Hawaii, Colorado Springs, Ascension, Diego Garcia, Kwajalein) qui enregistrent en continu les signaux GPS sur les deux fréquences (L1 et L2), effectuent des mesures météorologiques et envoient les données à la station principale Colorado Springs. A cette station, les éphémérides des satellites ainsi que les paramètres d'horloge sont calculés, prédits et envoyés aux stations de transmission (Ascension, Diego Garcia et Kwajalein) qui retransmettent les informations du message GPS aux satellites.

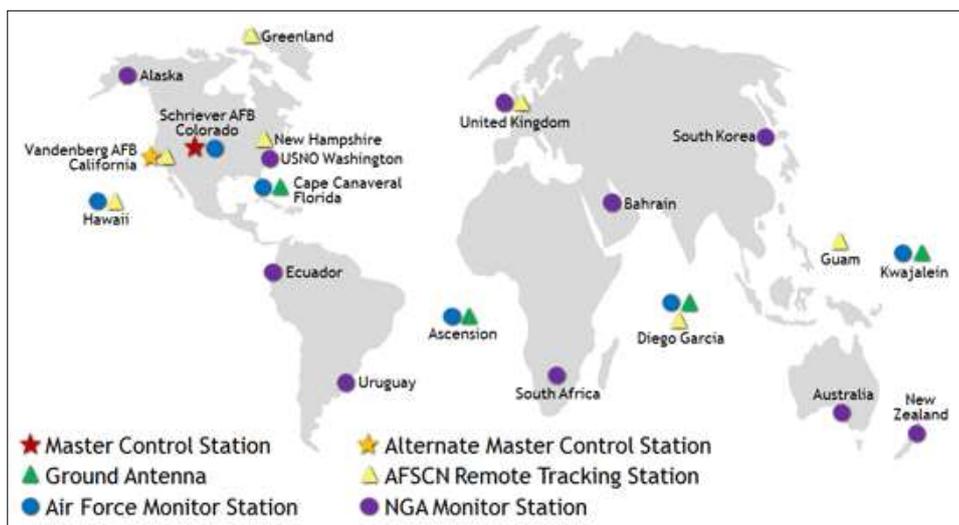


Figure II.2: Segment de contrôle du système GPS.

Enfin, le secteur utilisateur est constitué par l'ensemble de tous les utilisateurs potentiels civils et militaires du système GPS. Les utilisations principales sont le positionnement (absolu ou relatif) et la datation précise d'événements.

### II.1.2. Principe de la technique GPS

Les mesures GPS sont cryptées par la modulation de deux porteuses (L1 et L2, de fréquences 1575.42 MHz et 1227.60MHz, respectivement) grâce à des codes pseudo-aléatoires. Le code C/A (Coarse/Acquisition) est présent uniquement dans la porteuse L1. Le code P (Precise) est porté par L1 et L2, il est dix fois plus précis que le code C/A. Ce dernier était volontairement dégradé par l'armée américaine (altération des horloges et des éphémérides) pour éviter son utilisation par des forces ennemies en cas de conflit. Cette dégradation est appelée SA (Selective Availability) a été supprimée le 2 mai 2000. Un dispositif anti-leurrage (Anti-Spoofing, ou AS) est également actif sur le code P depuis 1994. Chaque satellite émet un message codé contenant un certain nombre d'informations, dont sa propre position et l'instant exact de l'émission du signal. Un simple récepteur suffit alors pour mesurer le temps écoulé entre émission et réception, et par là en déduire la distance qui le sépare du satellite.

Le récepteur reconnaît le satellite dont il reçoit le signal (chaque satellite possède une signature, donnée par le code C/A) et génère une réplique du code présent dans ce signal. Les deux signaux sont mis en corrélation afin de déterminer le temps de propagation du signal entre le satellite et le récepteur. On obtient ainsi la distance satellite-récepteur, par multiplication du temps de propagation avec la vitesse de la lumière  $c$ , en la corrigeant des erreurs liées à la synchronisation entre les horloges bord et récepteur, ainsi que des biais atmosphériques (troposphériques et ionosphériques). La composante ionosphérique est éliminée par la combinaison judicieuse des fréquences de L1 et L2. Ce type de mesures est connu sous la dénomination de **pseudo-distance** dans la terminologie GPS. La combinaison des pseudo-distances, d'au moins quatre satellites, permet de positionner le récepteur à quelques dizaines de mètres.

Un autre type de mesure existe : la **mesure de phase** sur les ondes porteuses L1 et L2. Son principe est basé sur la mesure de la différence de phase entre le signal reçu du satellite et sa réplique générée par le récepteur. La mesure de phase est la somme d'une quantité comprise entre 0 et  $2\pi$  et d'un nombre entier de cycles « comptés » par le récepteur depuis l'instant de sa mise en marche (i.e., depuis que le satellite est en visibilité du récepteur). Cette mesure, très précise par rapport à celle de la pseudo-distance, est toutefois ambiguë à cause de l'impossibilité de connaître ce nombre de cycles. En plus, il existe un autre facteur limitatif : les sauts de cycles, dus à une interruption momentanée de la mesure. Ces nombres de cycles, ou ambiguïtés entières sont déterminés par ajustement. La mesure de phase permet des applications sub-centimétriques.

### II.1.3. Bilan d'erreurs

Les mesures GPS sont tributaires de nombreuses influences susceptibles de perturber la qualité de ces mesures, à savoir :

- **Satellites :**
  - Détermination des orbites : imprécision des orbites des satellites utilisées (Généralement, calculées au préalable) ;
  - Horloge des satellites : défauts de l'horloge des satellites lors de la mesure de distance.
- **Défaut du récepteur GPS :**
  - Antennes : décalages des centres de phases de l'antenne GPS (point de mesure), ceux-ci peuvent varier pour des constellations différentes des satellites ;
  - Multi-trajet : la propagation sur plusieurs trajectoires du signal des satellites (par exemple, par réflexion), engendre des erreurs de la mesure de distance ;
  - Centrage : défaut de centrage l'antenne au-dessus du point de contrôle.
- **Influence de l'atmosphère :**
  - Ionosphère : l'épaisseur "stationnaire" de l'ionosphère (environ 500 – 1000 km), en relation avec l'activité solaire, engendre un retard du signal GPS et, de ce fait, une erreur sur la distance mesurée entre le récepteur GPS et les satellites . Cela se répercute par une erreur d'échelle.
  - Troposphère : une prise en compte erronée des conditions météorologiques engendre avant tout des erreurs dans la détermination des hauteurs au moyen du GPS.
- **Configuration des satellites :**
  - Configuration des satellites : des configurations différentes des satellites (par exemple, la panne d'un satellite) peuvent provoquer des erreurs systématiques.
  - Couverture : des accidents de terrains (collines, montagnes), des bâtiments et la végétation peuvent nuire à la visée en direction des satellites, de telle façon que le nombre de satellites, pour la mesure soit inférieur au minimum requis.
- **Analyse :**
  - Choix erroné des lignes de base/des stations de référence.

Le tableau suivant récapitule les principales erreurs et leur ordre de grandeur.

Erreur	Ordre de grandeur
Horloge du satellite	de 10 à 30 m
Erreur des éphémérides radiodiffusées	1 m (IGS)
Ionosphère	de 1 à 100 m 1 m (observations bifréquences)
Troposphère	0.5 m (après application d'un modèle standard)
Multi trajet Obs. : - Code C/A - Phase	selon l'équipement GPS et le lieu d'observation : de 50 cm à 2 m Jusqu' à quelques centimètres
Bruit du récepteur Obs. : - Code C/A - Phase	selon l'équipement GPS utilisé : de 10 cm à 3 m de 0.5 à 5 m

**Tableau II.1:** Principales erreurs affectant la mesure GPS.

Il est à noter que les erreurs peuvent être minimisées et parfois éliminées par application de modèles standards (par exemple, le modèle de *Hopfield* pour la troposphère et le modèle de *Klobuchar* pour l'ionosphère) ou par un positionnement relatif.

La qualité de détermination de la position des stations par GPS est ainsi tributaire de la modélisation de ces erreurs.

#### II.1.4. Système de référence associé à la technique GPS

Le WGS (World Geodetic System) est un système de référence terrestre conventionnel développé par le service géographique de l'armée des Etats-Unis (DMA – Defense Mapping Agency). Dans les éphémérides radiodiffusées, les coordonnées des satellites GPS sont exprimées dans ce système de référence.

Le WGS84 correspond à la première réalisation du système WGS en 1984. Elle a été établie à partir des coordonnées d'un ensemble de 1500 points dans le monde obtenues par des observations Doppler sur satellite. En 1987, les premières coordonnées radiodiffusées des satellites GPS ont été exprimées à partir de cette réalisation du WGS.

Les réalisations du système WGS postérieures au WGS84 sont identifiées par le sigle générique WGS-84 suivi entre parenthèses du numéro de la semaine GPS de leur entrée en application pour le calcul des coordonnées des satellites GPS. Par exemple, la réalisation du WGS-84[1150], utilisée pour l'expression des éphémérides radiodiffusées, depuis le 1er janvier 2002, est basée sur la détermination des coordonnées d'un ensemble de 17 stations GPS permanentes, incluant les 05 stations du secteur de contrôle. On peut noter que le WGS-84 s'est progressivement alignée sur l'ITRF (International Terrestrial Reference Frame), et qu'à l'heure actuelle, les deux

systèmes sont alignés à mieux que le cm. Toutefois, le WGS-84 n'est pas accessible directement à une précision centimétrique à cause de la limitation de précision des éphémérides radiodiffusées.

Désignation	Valeur
Demi grand axe	6 378 137 m
Aplatissement	1/298.257 222 101
Vitesse de la rotation de la Terre	7.2921151467x10 <sup>-5</sup> rad/s
Célérité de la lumière	299 792 458 m/s
Constante Gravitationnelle de la Terre [GM]	398600.4418x10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup>

**Tableau II.2:** Quelques constantes fondamentales du WGS-84

### II.1.5. Domaines d'applications du système GPS

En plus des applications militaires pour lesquelles il a été conçu, le GPS est utilisé dans la navigation et des applications géodésiques. Sommairement, on peut citer :

- Positionnement terrestre, maritime et aérien ;
- Etablissement, extension des réseaux géodésiques globaux et régionaux ;
- Rattachement des réseaux géodésiques ;
- Mesures de déformations tectoniques, sismiques, d'auscultation, etc.

Grâce à sa grande précision, le GPS permet d'autres applications scientifiques pour la géodynamique, la météorologie, l'altimétrie spatiale, le transfert de temps, ...

## II.2. Technique d'interférométrie Radar (InSAR)

La technique d'interférométrie radar est utilisée pour la mesure des déformations verticales (vitesses moyennes et séries temporelles de déplacement) de toute la région du barrage de Kramis, à l'aide des images radar multi-dates du satellite Sentinel-1.

Le radar est une technique de télédétection active, à savoir qu'un rayonnement est envoyé par un émetteur vers le sol ; une partie de ce rayonnement est renvoyée vers la plate-forme (satellite) et enregistrée par un récepteur, l'autre partie étant absorbée par le sol ou réfléchi dans une autre direction.

Le faisceau Radar, dirigé, est envoyé sur une surface terrestre. Celle-ci, suivant ses propriétés géométriques et physico-chimiques, le renvoie plus ou moins vers l'espace en le diffusant dans toutes les directions. Le signal résultant appelé signal radar, signal rétrodiffusé ou écho-retour est défini quantitativement le coefficient de rétrodiffusion de la surface considérée, exprimé en décibels. La figure (II.3) illustre le fonctionnement du radar imageur à visée latérale.

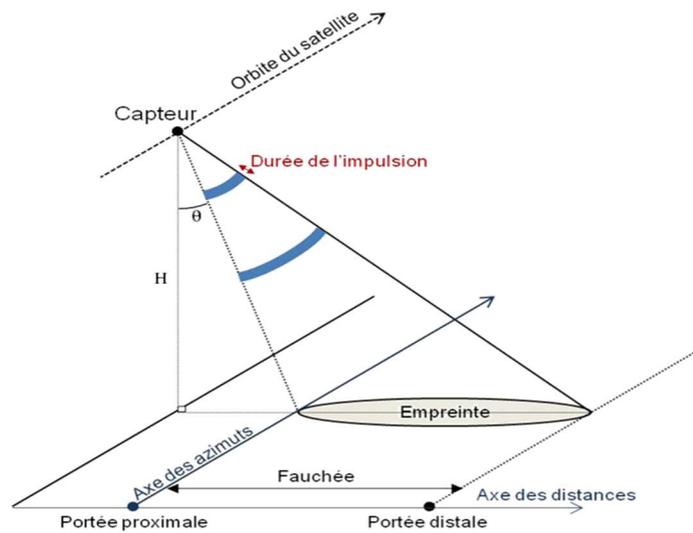


Figure II.3: Principe du radar à antenne réelle et le système radar Sentinel-1.

Le radar imageur émet des trains d'impulsions d'ondes hyperfréquences dans une polarisation donnée et dans une direction oblique à la scène. Il est généralement monté sur une plateforme aéroportée ou embarqué sur un satellite qui suit une trajectoire rectiligne. Ces ondes sont réfléchies ensuite par la surface de la terre. Ce sont les échos retournés qui permettent la formation de l'image.

### II.2.1. Principe de l'interférométrie radar InSAR

L'interférométrie radar est basée sur la différence de phase pixel à pixel de deux images SAR acquises à des dates différentes, avec des géométries d'acquisition similaires et couvrant la même surface au sol. Il est important de conserver ces paramètres identiques, dans le but de garder la phase propre  $\varphi_{prop}$  constante de chaque pixel.

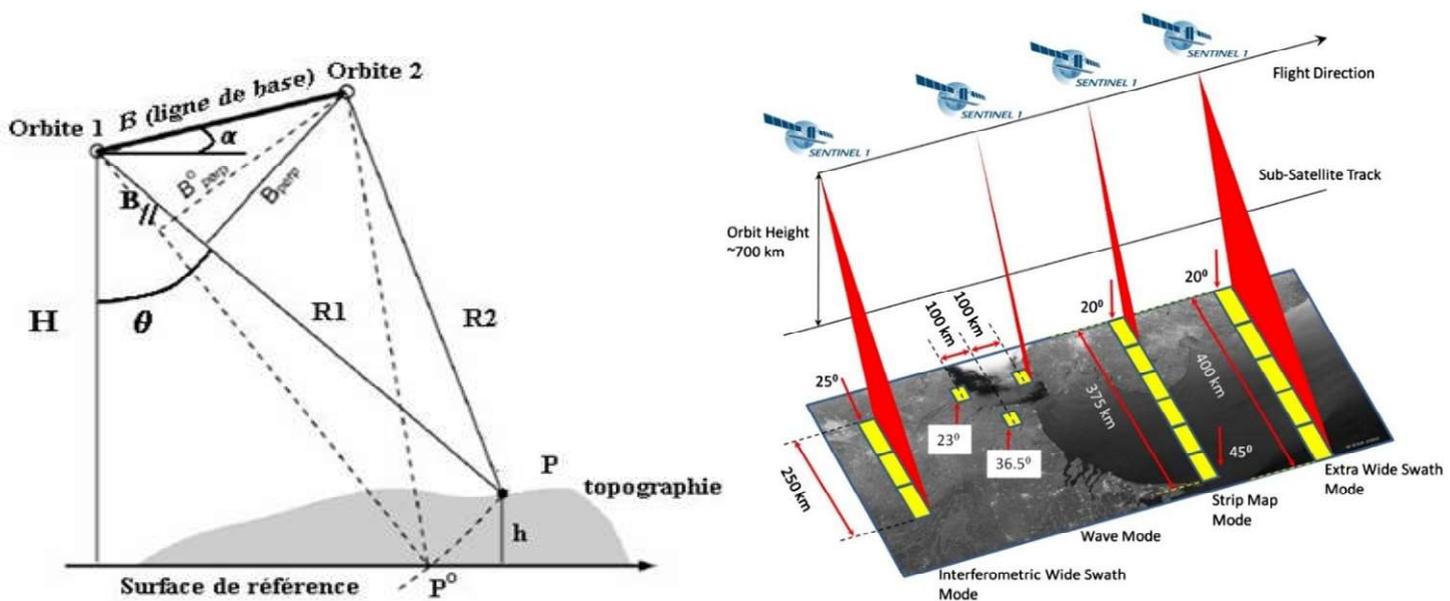


Figure II.4: Géométrie d'acquisition d'un couple interférométrique.

La différence de phase pixel à pixel obtenue permet la création d'une troisième image (avec pour chaque pixel de coordonnées  $(x, y)$  une valeur de phase interférométrique  $\varphi_{int}$ ) appelée **interférogramme**. Ce dernier contient des franges qui traduisent le changement de l'état de la surface entre les deux prises de vues, dans la ligne de visée du satellite avec une précision à l'échelle de la demi longueur d'onde du signal émis (bande C :  $\lambda/2 = 2.83$  cm, dans le cas des satellites **Sentinel-1**, ERS et Envisat).

### II.2.2. Mesure de déplacement par InSAR

L'analyse interférométrique des images SAR est devenue une technique répandue et efficace pour mesurer des déplacements que subit la surface de la terre. Lorsque deux passages radar sont effectués à des moments différents à partir d'un même angle de prise de vue, une petite modification de la position de la cible (surface du sol) peut créer un changement détectable dans la phase des signaux réfléchis. Ce changement de phase est proportionnel à la différence de marche entre les deux signaux, et peut donc se traduire par un déplacement le long de la ligne de visée satellite-sol. La différence en distance entre deux passages du satellite au-dessus d'une même zone est appelée ligne de base ( $B_{\perp}$  Figure II.4). Les images de deux antennes sont différentes et étirées les unes par rapport aux autres. C'est pourquoi, avant tout calcul d'interférogramme, il est nécessaire d'effectuer un recalage précis d'une image par rapport à l'autre (les images esclaves '**slave images**' par rapport à l'image maître '**master image**').

Contenu de la **phase interférométrique** :  $\varphi_{int} = \varphi_{topo} + \varphi_{orb} + \varphi_{atmo} + \varphi_{dépl} + \varphi_{bruit}$

- $\varphi_{topo}$  : phase topographique, modélisée à partir d'un modèle numérique de terrain MNT.
- $\varphi_{orb}$  : phase orbitale, modélisée par les données des éphémérides précises du satellite radar.
- $\varphi_{atmo}$  : phase atmosphérique, modélisée par des modèles globaux atmosphériques (ionosphériques et troposphériques).
- $\varphi_{dépl}$  : phase de déplacement, représente le déplacement de la cellule de résolution entre les deux acquisitions, dans la direction de visée Radar.
- $\varphi_{bruit}$  : phase de bruit, minimisée par filtrage et multi-vue (*multilooking*) spatiaux.

Deux méthodes sont envisageables, pour mesurer la déformation, par la technique InSAR et suivant l'analyse en séries temporelles d'interférogrammes Radar :

### II.2.3. Technique des Réflecteurs Persistants (PS InSAR)

La technique des Réflecteurs Persistants ("Persistent Scatterers"), est une méthode qui permet de suivre l'évolution temporelle des déplacements linéaires sur des points spécifiques appelés réflecteurs persistants (PS). L'idée générale de cette méthode est de pouvoir utiliser toutes les données (dans une série d'images) SAR disponibles pour calculer une série d'interférogrammes par rapport à une seule image maîtresse. Tous les interférogrammes sont calculés, quelle que soit la configuration orbitale (ligne de base perpendiculaire) et l'écart temporel entre chacune des images esclaves avec l'image maîtresse. Cette technique exige par conséquent une sélection

judicieuse des points spécifiques. Pour réaliser cette sélection, la phase interférométrique est analysée spatialement et temporellement [Champenois, 2011].

La technique a été développée initialement pour l'étude des milieux urbains [Ferretti et al., 2001], et des améliorations ont par la suite été apportées [Colesanti et al., 2005]. Cette méthode a fait l'objet d'un brevet sous le nom de "Permanent Scatterer Technique". Depuis, d'autres algorithmes se basant sur la méthode des réflecteurs persistants ont été proposés [Kampes, 2006].

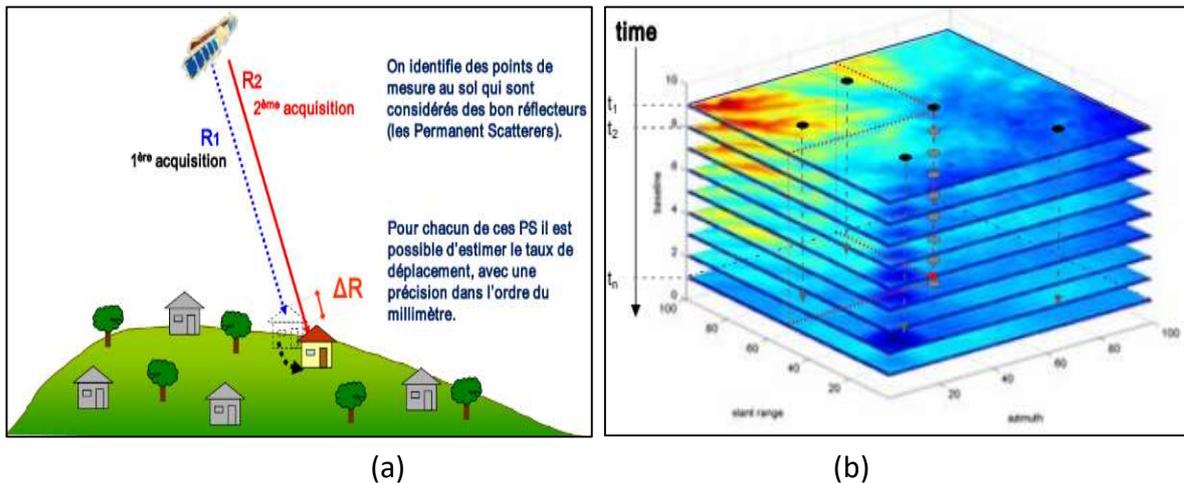


Figure II.5: (a) Principe de fonctionnement des déplacements des PS (b) Série d'images contenant les PS.

Dans le traitement PSInSAR, on ne prend pas en compte tous les pixels de l'interférogramme. Il est procédé à une sélection de pixels cohérents, c'est-à-dire, ceux dont la phase est stable au cours du temps (présentant une faible variation quel que soit l'interférogramme calculé). L'ensemble des acquisitions SAR va être exploité lors du traitement, même dans le cas où la configuration orbitale entre deux images est critique. Ces réflecteurs persistants ont une phase dotée d'une cohérence élevée dans le temps (jusqu'à quelques dizaines d'années), et il est possible d'analyser l'évolution des informations d'amplitude et de phase afin d'en retirer des informations sur les déplacements du sol. L'avantage de l'approche PS est qu'il est possible de dissocier, dans les cas où la densité de points de mesure est suffisamment grande, les différentes contributions de la phase interférométrique à partir d'une analyse spatio-temporelle de cette dernière [Champenois, 2011].

Aussi, pour chaque pixel d'une image SAR, la phase d'un pixel est déterminée par la somme cohérente de toutes les contributions des cibles élémentaires présentes au sein de la cellule de résolution. Les phénomènes de décorrélation spatio-temporelle, procurent une instabilité à cette mesure de phase. Néanmoins, une famille de pixels n'est pas affectée par ces phénomènes (ou alors très faiblement), il s'agit de pixels présentant à l'intérieur de la cellule de résolution une cible élémentaire forte (diffuseur dominant) dont la contribution au sein de ce pixel va dominer toutes les autres (de par son amplitude élevée).

Quelles que soient les variations de phase des autres cibles élémentaires, la phase mesurée du pixel restera stable au cours du temps. Ces points peuvent correspondre, dans la réalité, à un rocher, au coin d'un immeuble, un tronc d'arbre, etc. (Figure II.6).



**Figure II.6:** Réflecteurs permanents PS (bâtiments, monuments, viaducs, antennes, pieux, conduites, roches, ...)

La méthode se déroule en quatre étapes principales :

1. Génération des interférogrammes différentiels.
2. Identification des pixels PS candidats.
3. Déroulement de phase et estimation de l'erreur troposphérique (*Atmospheric Phase Screen -APS*).
4. Sélection des pixels PS (après soustraction de l'APS).

• **Avantages de la technique PS :**

- La densité des PS est assez grande (surtout) dans les zones urbaines (plus de 1000PS/km<sup>2</sup>).
- L'utilisation de l'ensemble des images SAR, permettant d'augmenter la résolution temporelle pour le suivi des déformations.
- L'application sur de grandes étendues spatiales (pour l'étude des déformations à petite échelle) mais aussi permettant un suivi des déformations locales (à l'échelle du bâti).
- Une précision centimétrique des mesures de déformation (qui dépend de la résolution temporelle des images SAR utilisées).
- Cette technique ne requiert pas une installation de matériel, parce qu'elle utilise les éléments physiques présents sur la surface du sol.

• **Limitations de la technique PS :**

- Exigence d'un nombre d'images élevé (20 à 30) qui soient bien réparties temporellement.
- Il est impossible de connaître à l'avance la quantité et la position des points PS. Il est clair que si la zone d'étude est un milieu urbain, la densité de points de mesure sera forte.
- La méthode n'est pas optimale pour étudier les faibles déformations à grande longueur d'onde et satisfait mieux des déformations localisées.
- Les déplacements mesurés suivant la ligne de visée (LOS) du radar, il n'est donc pas possible d'obtenir directement les composantes Nord, Est et verticale des déplacements.
- L'incapacité à mesurer des déplacements avec un comportement fortement non linéaire.

Dans notre cas d'application, la technique PSinSAR a été préconisée, pour le traitement interférométrique.

#### **II.2.4. Technique des Petites Lignes de Base (SBAS)**

La technique **SBAS** (Small BAseline Subset) est basée sur une combinaison appropriée d'interférogrammes (générés à partir d'une série d'images SAR multi-datées), en vérifiant le critère de **minimisation** de la **base spatiale** (ligne de base perpendiculaire) entre les orbites d'acquisition et de la **base temporelle** entre les époques d'acquisition [Berardino et al., 2002]. Après la génération et le déroulement des interférogrammes, les corrections des erreurs orbitales et atmosphériques (troposphériques) sont appliquées. Cette approche permet de générer des cartes de vitesse moyenne de déformation de la zone étudiée ainsi que d'évaluer les séries temporelles des déplacements encourus.

Les principales étapes de la technique SBAS sont les suivantes (cf. figure II.7) :

- a. Évaluation des paramètres orbitaux associés à chaque acquisition SAR (utilisée ultérieurement dans l'estimation de la valeur de la ligne de base spatiale) et sélection de l'image maître de référence ;
- b. Génération d'un ensemble d'images SAR (SLC) à partir des fichiers de données brutes disponibles (*raw data*) ;
- c. Conversion du DEM (*Digital Elevation Model*) en coordonnées SAR de l'image Maître et calcul des distances capteur cibles (fichiers de distance) pour chaque acquisition ;
- d. Sélection optimale de la distribution des paires de données interférométriques ;
- e. Recalage (*coregistration*) de chaque paire de données SLC par rapport à l'image maître sélectionnée ;
- f. Interférogrammes différentiels et génération de cartes de cohérence spatiale correspondantes ;
- g. Filtrage du bruit des franges DInSAR générées ;

- h. Génération de la carte de vitesse moyenne de déformation et de la série temporelle des déplacements correspondante, pour chaque pixel cohérent de la zone étudiée, via l'inversion de la séquence calculée des interférogrammes DInSAR ;
- i. Géocodage (*géoréférencement*) des résultats obtenus et projection sur une grille cartographique universelle.

**InSAR** : interférogramme radar.

**DinSAR** : interférogramme radar corrigé de la topographie.

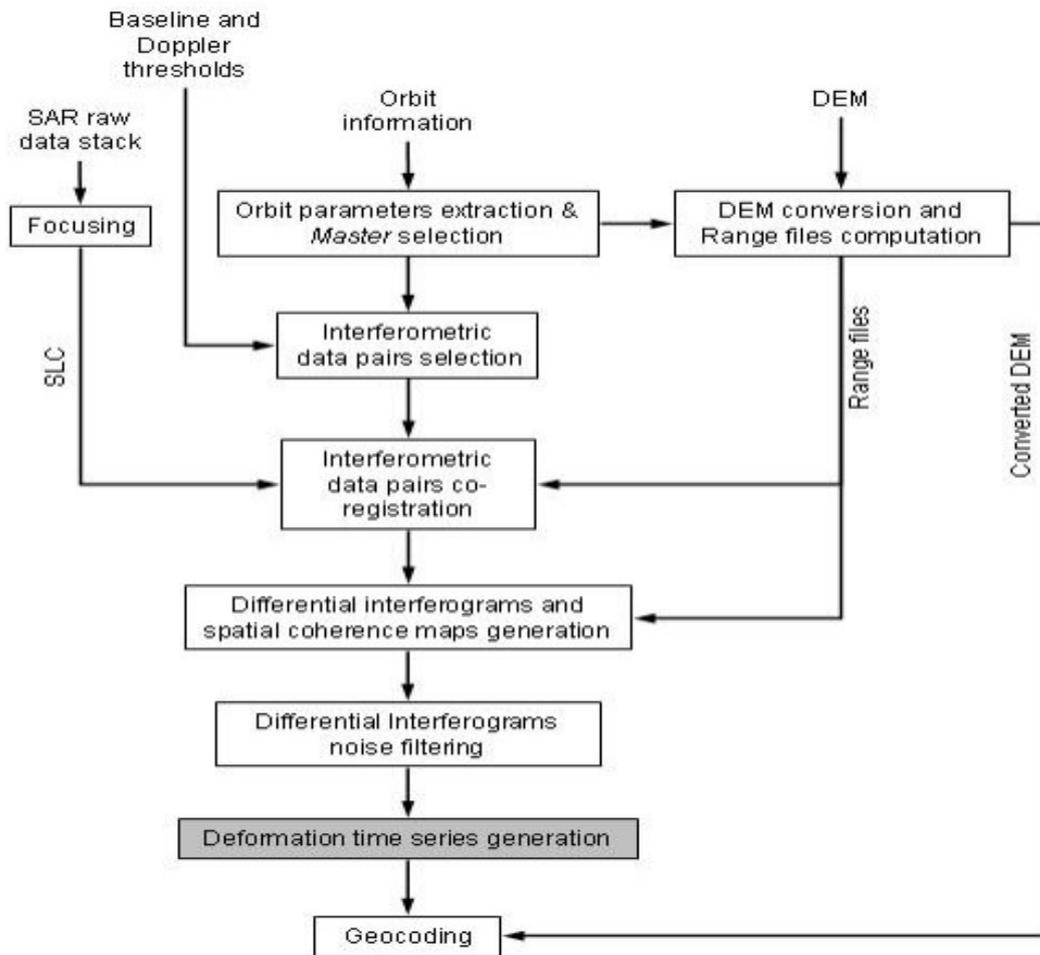


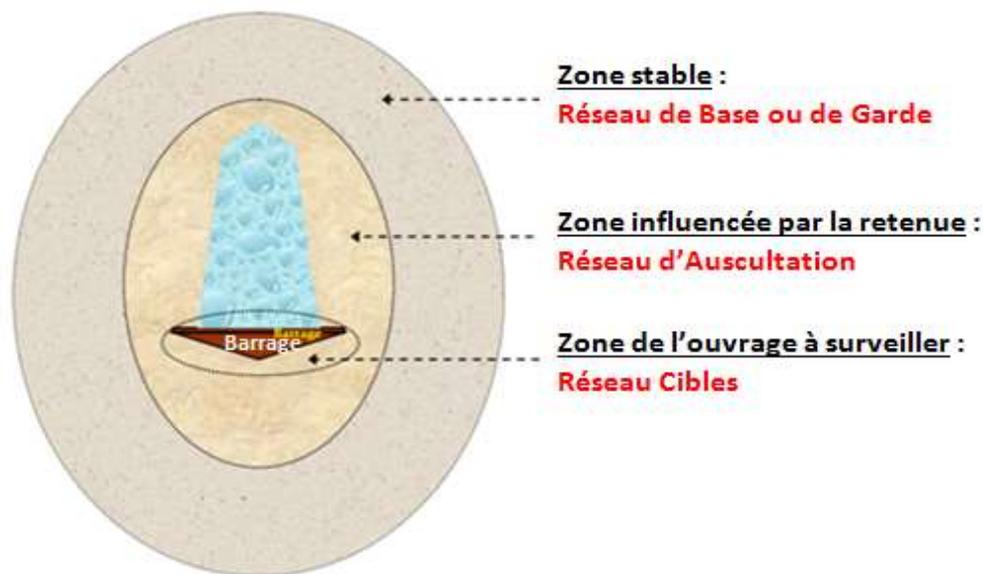
Figure II.7: Algorithme de la technique SBAS.

# Chapitre III : Méthodologie d'auscultation géodésique des barrages

### III.1 Méthodologie d'auscultation géodésique

Les mesures géodésiques constituent un moyen d'obtention des déplacements planimétriques et altimétriques. La méthodologie employée consiste à établir, grâce à la **technique GNSS (GPS)**, un **réseau** géodésique **précis** et **homogène**, couvrant le barrage et son voisinage immédiat et lointain. La réitération des observations du même réseau, après un certain temps, permet de déceler les mouvements apparus pendant cette période.

Si les points de mesure sont situés à l'intérieur du barrage, seuls les déplacements relatifs sont obtenus, ce qui est suffisant dans le cadre de la surveillance courante. En revanche, pour obtenir des indications sur l'évolution des déformations ou dans le cas d'un comportement particulier, des valeurs de déplacements absolues sont requises. A cet effet, le système propre au barrage (réseau cibles) est complété par un espace de référence (réseau d'auscultation) auquel il est relié. A ce dernier, un espace de référence étendu stable (réseau de base) est adjoint. Les trois (03) réseaux doivent être rattachés au même système géodésique, figure (III.1).



**Figure III.1:** Principaux réseaux géodésiques d'auscultation (surveillance).

La méthodologie adoptée pour l'auscultation géométrique d'un barrage est basée sur l'exploitation de mesures de la phase des signaux GNSS en positionnement statique ainsi que sur la compensation tridimensionnelle dans le système géodésique mondial WGS 84. Les différentes étapes de cette étude sont :

- a. **Matérialisation du réseau de base (référence) ou réseau de garde :** Choisir des points hors de la zone de déformation (points géologiquement stables) et les matérialiser par des bornes en béton. L'altitude des stations de base doit être proche de celle des points du réseau d'auscultation pour minimiser l'influence de la troposphère sur les paramètres ajustés (cas du GPS). Ce réseau, supposé stable, sert d'ossature pour tous les travaux ultérieurs réalisés dans le cadre de cette étude.

- b. Matérialisation du réseau d'auscultation appuyé sur le réseau de base :** Choisir des points bien répartis et délimitant la zone d'influence de la retenue (flancs et rives du réservoir à l'amont et à l'aval) et qui sont matérialisés par des bornes en béton ou des repères scellés (*inox*) dans les sites en béton. Ils serviront à l'étude du comportement du voisinage du barrage et comme points d'appui au réseau cibles.
- c. Matérialisation du réseau cibles :** Choisir des cibles distribuées de façon homogène, selon la forme et le type de barrage, par un maillage approprié. Les cibles (bornes en béton et repères scellés dans les sites en béton) doivent être matérialisées sur l'ouvrage (l'axe de la crête, parement aval/amont, quelques ouvrages annexes) et sur son voisinage immédiat (pied aval de l'ouvrage), d'une manière durable avec une configuration optimale. Ce réseau servira au suivi du comportement du barrage.
- d. Observations et traitements (Suivi du comportement du barrage et de son voisinage) :**
- **Opération zéro (référence époque  $t_0$ ):** observations et ajustement des coordonnées tridimensionnelles des points des réseaux d'auscultation et de cibles. Les positions de ces points par rapport au réseau de base constituent la configuration de référence. Afin d'assurer une bonne gestion des données issues de ces travaux, une mise en place d'une base de données est nécessaire.
  - **Opération  $i$  (époque  $t_i$ ):** détermination des positions des points des réseaux d'auscultation et de cibles à partir d'une nouvelle session d'observations et de traitements pour quantifier les déplacements du barrage et de son voisinage immédiat et éloigné par rapport à la configuration de référence. Cette nouvelle configuration ainsi déterminée servira de configuration de référence pour la prochaine opération d'auscultation ( $i+1$ ).

La fréquence d'intervention (des mesures) est définie en fonction du type de barrage et de son exploitation. Elle varie selon l'amplitude des déformations, de la vitesse de déplacement et suite à des événements naturels (séisme, glissement de terrain, etc.). Les opérations 0 et 1 sont espacées de 06 mois ou plus (En général, 02 fois par an : niveaux de retenue maximale et minimale par saisons hivernale et estivale). En fonction de l'amplitude des mouvements du barrage et de son voisinage, évaluée à partir des deux premières opérations (0 et 1), que la fréquence d'intervention sera fixée.

- e. Représentation des déformations dans le réseau géodésique d'auscultation du barrage et son voisinage :** Cette étape consiste à l'évaluation :
- du champ de déplacement,
  - des tenseurs de déformations élémentaires et leurs primitives,
  - du degré de signification des déformations calculées.

L'établissement des réseaux géodésiques par GNSS, de quelle nature qu'ils soient, passe obligatoirement par la préparation d'un avant-projet dans lequel on tient compte des critères et étapes nécessaires. Cet avant-projet devra être, dans la mesure du possible, d'une planification

très complète et réfléchi pour éviter les modifications nombreuses qui augmenteront assurément le coût, les moyens ainsi que la durée de la réalisation. Lors de la planification d'un tel projet, une des premières tâches consiste à prendre en considération les points suivants :

- La précision avec laquelle seront déterminées les coordonnées des points.
- La méthodologie de détermination en fonction de la précision, modes et durée d'observation.
- Les précautions à prendre durant toute la campagne GNSS.

### III.2. Analyse tensorielle

La méthode adoptée pour évaluer les mouvements repose sur les *vecteurs-déplacement* et les *tenseurs de déformation*. L'analyse tensorielle est la plus adaptée pour ce genre d'études afin estimer et représenter d'une façon intrinsèque la déformation locale. Contrairement aux vecteurs de déplacement, elle ne dépend pas du système de référence à priori qui rend très délicate l'interprétation des mouvements. Même les tenseurs n'échappent pas à leur tour des critiques. Il s'agit de la dépendance des tenseurs de déformation de la configuration des figures choisies qui constituent l'ensemble du réseau. Ces contraintes rendent difficile l'interprétation des résultats obtenus. Afin de remédier à ce problème, parmi les solutions à adopter est l'utilisation de la triangulation de Delaunay qui permet une triangulation optimale des points de mesures du réseau d'auscultation. La solution consiste à évaluer la déformation, au centre des triangles, basée sur les déplacements des points de mesure.

Le tenseur de déformation contient toutes les informations sur le comportement d'un champ vectoriel de déplacement. Soit un champ local de déplacement 3D :

$$\Delta X(x, y, z) = \begin{bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{bmatrix} \quad (\text{III. 1})$$

autour d'un point de coordonnées  $(x, y, z)$ , le tenseur de déformation  $E(x, y, z)$  est déterminé par le gradient du déplacement évalué en ce point :

$$E(x, y, z) = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}_{(x,y,z)} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{ux} & \varepsilon_{uy} & \varepsilon_{uz} \\ \varepsilon_{vx} & \varepsilon_{vy} & \varepsilon_{vz} \\ \varepsilon_{wx} & \varepsilon_{wy} & \varepsilon_{wz} \end{bmatrix}_{(x,y,z)} \quad (\text{III. 2})$$

Le gradient du champ de déplacement local est évalué composante par composante. Pour chaque coordonnée de ce champ, les dérivées partielles selon chaque axe de coordonnée sont évaluées pour donner les composantes de la matrice de déformation.

Cependant, l'interprétation d'un tenseur de déformation n'est pas directe. Pour cela, on doit décomposer ce tenseur et en tirer des éléments caractéristiques. Généralement, un tenseur de déformation est décomposé en partie *symétrique* et *antisymétrique* (cas de l'hypothèse des petites déformations). Cette décomposition conduit aux résultats suivants :

$$E = S + A \quad (\text{III. 3})$$

où

$$S = \begin{bmatrix} \varepsilon_{ux} & \frac{1}{2}(\varepsilon_{uy} + \varepsilon_{vx}) & \frac{1}{2}(\varepsilon_{uz} + \varepsilon_{wx}) \\ \frac{1}{2}(\varepsilon_{uy} + \varepsilon_{vx}) & \varepsilon_{vy} & \frac{1}{2}(\varepsilon_{vz} + \varepsilon_{wy}) \\ \frac{1}{2}(\varepsilon_{uz} + \varepsilon_{wx}) & \frac{1}{2}(\varepsilon_{uz} + \varepsilon_{wx}) & \varepsilon_{vy} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{xz} & \omega_{yz} \\ \omega_{xz} & 0 & -\omega_{xy} \\ -\omega_{yz} & \omega_{xy} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2}(\varepsilon_{uy} - \varepsilon_{vx}) & \frac{1}{2}(\varepsilon_{uz} - \varepsilon_{wx}) \\ \frac{1}{2}(\varepsilon_{uy} - \varepsilon_{vx}) & 0 & -\frac{1}{2}(\varepsilon_{vz} - \varepsilon_{wy}) \\ -\frac{1}{2}(\varepsilon_{uz} - \varepsilon_{wx}) & \frac{1}{2}(\varepsilon_{vz} - \varepsilon_{wy}) & 0 \end{bmatrix}$$

$S$  : représente le *tenseur symétrique* de déformation, appelé aussi tenseur de *Cauchy*.

$A$  : représente le *tenseur antisymétrique* de déformation.

Le tenseur  $S$  représente l'*expansion* (dilatation) et la *contraction* (compression), ainsi que le *glissement* (cisaillement). Il est défini par les composantes principales, qui sont les valeurs propres  $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ , et les directions des axes principaux de la matrice  $E_i$ . Les paramètres de déformation que l'on peut définir à partir de ce tenseur symétrique sont la *dilatation* et le *cisaillement*. La dilatation en un point étant l'extension ou la contraction moyenne en ce point, i.e., la moyenne des composantes principales :

$$\sigma = \frac{1}{3}(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) = \frac{1}{3}(\varepsilon_{ux} + \varepsilon_{vy} + \varepsilon_{wz}) \quad (\text{III.4})$$

La dilatation totale est donnée par la formule suivante :

$$\lambda = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2} \quad (\text{III. 5})$$

Le cisaillement peut être scindé en deux catégories : le cisaillement pur et le cisaillement simple. Le cisaillement pur  $\tau$  déforme un carré en rectangle, alors que le cisaillement simple  $\nu$  déforme un rectangle en losange. Aucun type de cisaillement ne provoque de rotation [Michel, 2001 ; 2003].

Le cisaillement pur est donné par ces composantes :

$$\begin{cases} \tau_{xy} = -\tau_{yx} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{ux} - \varepsilon_{vy}) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right) \\ \tau_{xz} = -\tau_{zx} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{ux} - \varepsilon_{wz}) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial z}\right) \\ \tau_{yz} = -\tau_{zy} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{vy} - \varepsilon_{wy}) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}\right) \end{cases}$$

Le cisaillement simple est donné par ces composantes :

$$\begin{cases} v_{xy} = -v_{yx} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{uy} + \varepsilon_{vx}) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \\ v_{xz} = -v_{zx} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{uz} + \varepsilon_{wx}) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ v_{yz} = -v_{zy} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{vy} + \varepsilon_{wz}) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) \end{cases}$$

Le cisaillement total  $\gamma$  peut être défini comme étant la moyenne géométrique des cisaillements pur et simple,

$$\gamma = \sqrt{\gamma_{xy}^2 + \gamma_{xz}^2 + \gamma_{yz}^2} \quad (\text{III. 6})$$

où :

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} &= \sqrt{\tau_{xy}^2 + v_{xy}^2} \\ \gamma_{xz} &= \sqrt{\tau_{xz}^2 + v_{xz}^2} \\ \gamma_{yz} &= \sqrt{\tau_{yz}^2 + v_{yz}^2} \end{aligned}$$

La partie antisymétrique du tenseur est liée au rotationnel du champ de déplacement et peut être définie, comme une rotation d'angle  $\omega$  [Vanicek et al., 2001] :

$$\begin{aligned} \omega_{xy} &= -\frac{1}{2}(\varepsilon_{vz} - \varepsilon_{wy}) \\ \omega_{xz} &= -\frac{1}{2}(\varepsilon_{uz} - \varepsilon_{wx}) \\ \omega_{yz} &= -\frac{1}{2}(\varepsilon_{uy} - \varepsilon_{vx}) \end{aligned}$$

Soit la rotation différentielle totale  $\Omega$  comme étant la somme géométrique des composantes de la rotation  $\omega$ , la rotation différentielle propre  $\delta\omega$  est donnée par :

$$\delta\omega = \omega - \Omega \quad (\text{III. 7})$$

$$\text{avec: } \Omega = \sqrt{\omega_{xy}^2 + \omega_{xz}^2 + \omega_{yz}^2}$$

Ce choix n'est pas fortuit car il se base sur des études faites par [Vanicek et al., 2001] et [Berber, 2006] concernant les invariants de déformation, c.à.d., les composantes du tenseur de déformation qui restent inchangées avec le changement de Datum (repère de référence du

réseau). Le tableau (III.1) illustre une comparaison des invariants de primitives de la déformation, dans le cas des réseaux 2D et 3D.

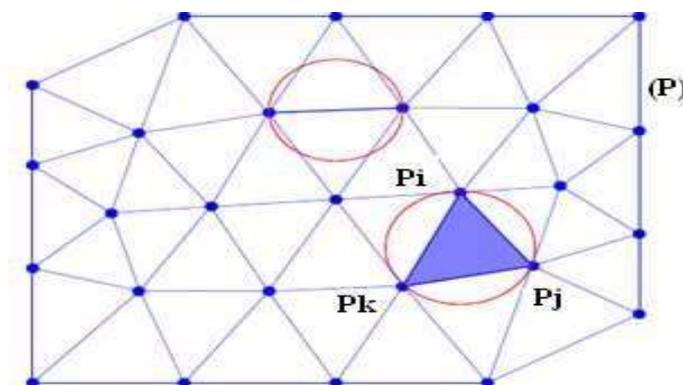
Primitives de la déformation	2D	3D
Dilatation	<b>Invariant</b>	Invariant
Cisaillement pur	Non invariant	Non invariant
Cisaillement simple	Non invariant	Non invariant
Rotation différentielle	<b>Invariant</b>	Invariant
Cisaillement total	<b>Invariant</b>	Non invariant
Cisaillement maximal	<b>Invariant</b>	Invariant

**Tableau III.1:** Les invariants en cas des réseaux 2D et 3D [Vanicek et al., 2001].

### III.3. Représentation de la déformation par triangulation de Delaunay

Il existe plusieurs modes de représentation des tenseurs de déformation d'un réseau géodésique. A travers cette section, nous présentons le mode le plus répandu, qui est celui de la triangulation de Delaunay. La notion de triangulation de Delaunay a été proposée en 1934 par un mathématicien russe : Boris Delaunay, élève de Georgy Voronoï. La triangulation de Delaunay est un type de partitionnement d'un ensemble de points  $E$  positionnés dans un plan formé de triangles dont les sommets sont des objets, et qui à eux tous constituent une partition de l'enveloppe convexe de ces objets. Cette triangulation, figure (III.2), a deux propriétés principales :

- Le « critère du cercle » : un triangle de Delaunay est un triangle qui a comme sommet trois objets, et tel que son cercle circonscrit n'ait en son intérieur aucun autre objet.
- La triangulation de Delaunay est parmi toutes les triangulations de  $E$  celle qui maximise l'angle minimum de tous les triangles.



**Figure III.2:** Illustration de la caractérisation de la triangulation de Delaunay.

Du point de vue de la théorie des graphes, la triangulation de Delaunay est définie comme le diagramme dual du diagramme de Voronoï de telle façon que deux objets sont liés par un arc dans la triangulation de Delaunay s'ils appartiennent à des régions de Voronoï adjacentes [Belhadj et al., 2012]. Cette représentation trouve son application dans la triangulation des réseaux géodésiques où elle procure l'unicité du maillage géométrique qui est un intérêt bénéfique pour l'étude de la déformation dans le sens où les résultats changent en fonction de la configuration géométrique. Les étapes de calcul des tenseurs de déformations sur des éléments finis de type triangulaire (triangulation de Delaunay) sont les suivantes :

**a) Calcul du champ de déplacement :**

Les vecteurs déplacements des sommets de chaque triangle représentent les composantes du déplacement des points du réseau géodésique observé entre deux époques. En d'autres termes, les trois sommets de chaque triangle sont des points géodésiques observés.

**b) Calcul du tenseur de déformation :**

Le calcul des déformations est effectué pour chaque triangle du réseau Delaunay. A chaque triangle correspondent trois vecteurs déplacements observés situés aux trois sommets du triangle (points du réseau géodésique).

Soit le triangle (K), figure (III.3).

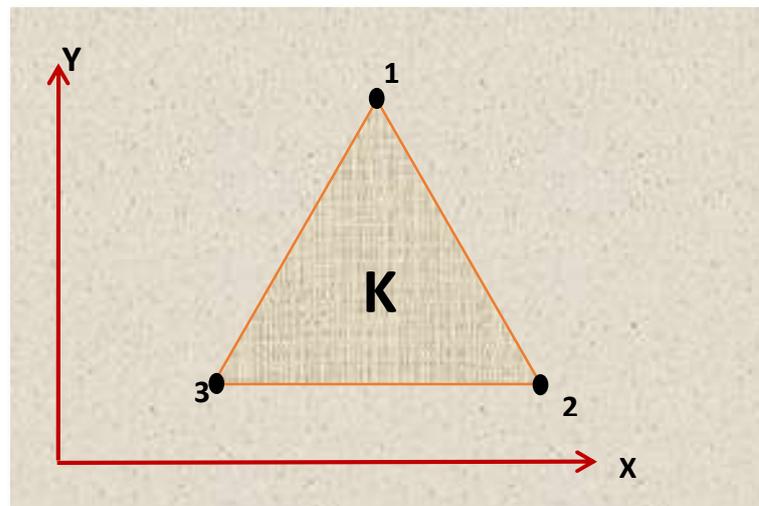


Figure III.2 : Formalisme d'un triangle (K) du réseau Delaunay.

Dans le cas de petites déformations, la fonction du champ de déplacement local (u, v) peut être représentée par un polynôme du 1<sup>er</sup> degré en position (X, Y), tel que :

$$\begin{cases} u_i(x_i, y_i) = dx_i = a_1 + a_2x_i + a_3y_i \\ v_i(x_i, y_i) = dy_i = a_4 + a_5x_i + a_6y_i \end{cases} \quad \text{Avec } 1 \leq i \leq 3 \quad (\text{III.8})$$

Où  $(dX_i, dY_i)$  représentent les composantes du vecteur déplacement observé du sommet  $i$  du triangle  $(K)$  de coordonnées  $(X_i, Y_i)$ .

Si l'on rapporte les coordonnées des trois sommets du triangle et les vecteurs déplacements s'y rapportant au centre de gravité du triangle, le système d'équations ci-dessus devient :

$$\begin{cases} u_i(x_i, y_i) = dx_i = a_2x_i + a_3y_i \\ v_i(x_i, y_i) = dy_i = a_5x_i + a_6y_i \end{cases} \quad (III.9)$$

Avec :  $dx_i = dX_i - dX_0, dy_i = dY_i - dY_0, x_i = X_i - X_0, y_i = Y_i - Y_0$

Où  $(X_0, Y_0)$ .et  $(dX_0, dY_0)$  représentent respectivement les coordonnées et les déplacements ramenés au centre de gravité du triangle  $(K)$ .

Sous forme matricielle, le système (III.9) s'écrit alors :

$$N_{(3,2)}P_{(2,1)} = R_{(3,1)} : \text{Équation de déplacement en x} \quad (III.10)$$

$$N_{(3,2)}G_{(2,1)} = T_{(3,1)} : \text{Équation de déplacement en y} \quad (III.11)$$

Avec :

$$N_{(3,2)} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \end{bmatrix}; \quad P_{(2,1)} = \begin{bmatrix} a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}; \quad R_{(3,1)} = \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ dx_3 \end{bmatrix}; \quad G_{(2,1)} = \begin{bmatrix} a_5 \\ a_6 \end{bmatrix}; \quad T_{(3,1)} = \begin{bmatrix} dy_1 \\ dy_2 \\ dy_3 \end{bmatrix}$$

Les coefficients inconnus  $(a_2, a_3)$  et  $(a_5, a_6)$  sont estimés indépendamment par la méthode des moindres carrés. Les coefficients  $(a_2, a_3)$  sont estimés à partir de la relation de déplacement en  $x$  (III.13) et l'ajustement des coefficients  $(a_5, a_6)$  utilise l'équation de déplacement en  $y$  (III.14).

A partir de la relation (III.12), on en déduit les composantes du tenseur de déformation pour le triangle  $(K)$  :

$$\begin{cases} \epsilon_{ux} = \frac{\partial u}{\partial x}(x, y) = a_2 \\ \epsilon_{uy} = \frac{\partial u}{\partial y}(x, y) = a_3 \\ \epsilon_{vx} = \frac{\partial v}{\partial x}(x, y) = a_5 \\ \epsilon_{vy} = \frac{\partial v}{\partial y}(x, y) = a_6 \end{cases} \quad (III.12)$$

Connaissant les tenseurs de déformations élémentaires  $(\epsilon_{ux}, \epsilon_{uy}, \epsilon_{vx}, \epsilon_{vy})$ , nous en déduisons les primitives de déformations élémentaires : dilatation, cisaillement, rotation différentielle propre, comme définies dans les équations (III.5), (III.6) et (III.7).

### III.4. Significativité des tenseurs de déformation d'un réseau géodésique

Cette partie est inspirée de [Gourine, 2004]. La signification de ces paramètres est basée sur l'estimation de la **déformabilité** du réseau qui représente l'inverse de sa solidité dans le sens où un réseau déformable est un réseau sensible aux incertitudes des observations. En d'autres termes, c'est l'étude du comportement du réseau sous l'effet des variations des observations dans leur intervalle de confiance. Ce choix de caractériser la déformabilité d'un réseau est dû au fait qu'il est possible de quantifier les déformations qu'implique une variation des observations. Pour cela, nous introduisons la notion de déplacement virtuel d'un point qui est défini comme étant le déplacement de ce point qu'impliquent des modifications aléatoires des observations dans leur intervalle de confiance et de déformation virtuelle du réseau qui représente la déformation consécutive aux déplacements virtuels de l'ensemble des points du réseau.

La quantification de la déformabilité d'un réseau est basée sur les primitives de déformation virtuelle obtenue par la méthode de Monté Carlo qui consiste à effectuer une série de tirages aléatoires de jeux d'observations bruitées selon leur distribution statistique. A partir d'un jeu d'observations donné, on ajuste le réseau et on évalue sa fiabilité externe. Les nouvelles valeurs de la fiabilité externe maximale ainsi déterminées seront les déplacements virtuels à partir desquels les déformations virtuelles sont calculées. La réitération de ce processus s'effectue suivant le nombre de simulations.

La déformabilité est donnée par la relation suivante :

$$Def = M + T \quad (III.13)$$

Où  $M$  et  $T$  représentent, respectivement, la moyenne et la tolérance des primitives de déformation virtuelle obtenues à partir d'un jeu de **simulations de Monté Carlo**. La tolérance  $T$ , égale à 2,57 fois l'écart type de ces primitives, permet de recouvrir 99% des déformations virtuelles, dans l'hypothèse que l'échantillon calculé suive une loi normale [Michel et al., 2003] :

$$\begin{aligned} \lambda_{def} &= \bar{\lambda} + 2,57\sigma_{\lambda} \\ \gamma_{def} &= \bar{\gamma} + 2,57\sigma_{\gamma} \\ \delta\omega_{def} &= \delta\bar{\omega} + 2,57\sigma_{\delta\omega} \end{aligned} \quad (III.14)$$

Avec :

$\bar{\lambda}, \sigma_{\lambda}$  : moyenne et écart type des dilatations virtuelles (simulées);

$\bar{\gamma}, \sigma_{\gamma}$  : moyenne et écart type des cisaillements totaux virtuels (simulés);

$\delta\bar{\omega}, \sigma_{\delta\omega}$  : moyenne et écart type des rotations différentielles virtuelles (simulées).

Enfin, à partir de la déformabilité, le degré de signification ( $\Sigma$ ) des tenseurs de déformation peut être défini pour chaque primitive de déformation réelle ( $\lambda_{max}, \gamma_{max}, \delta\omega_{max}$ ), par les relations suivantes :

$$\begin{aligned}\Sigma_{\lambda} &= \frac{\lambda_{max} - \lambda_{def}}{\lambda_{def}} \\ \Sigma_{\gamma} &= \frac{\gamma_{max} - \gamma_{def}}{\gamma_{def}} \\ \Sigma_{\delta\omega} &= \frac{\delta\omega_{max} - \delta\omega_{def}}{\delta\omega_{def}}\end{aligned}\tag{III.15}$$

Avec :  $-1 \leq \Sigma \leq +\infty$ , tel que si :

- $\Sigma < 0$  : la déformation n'est pas significative car elle peut être considérée comme la conséquence d'un bruit de mesure dans les observations.
- $\Sigma > 0$  : la déformation est significative.
- $0 < \Sigma < 1$  : la déformation est significative et elle est de l'ordre de la déformabilité.

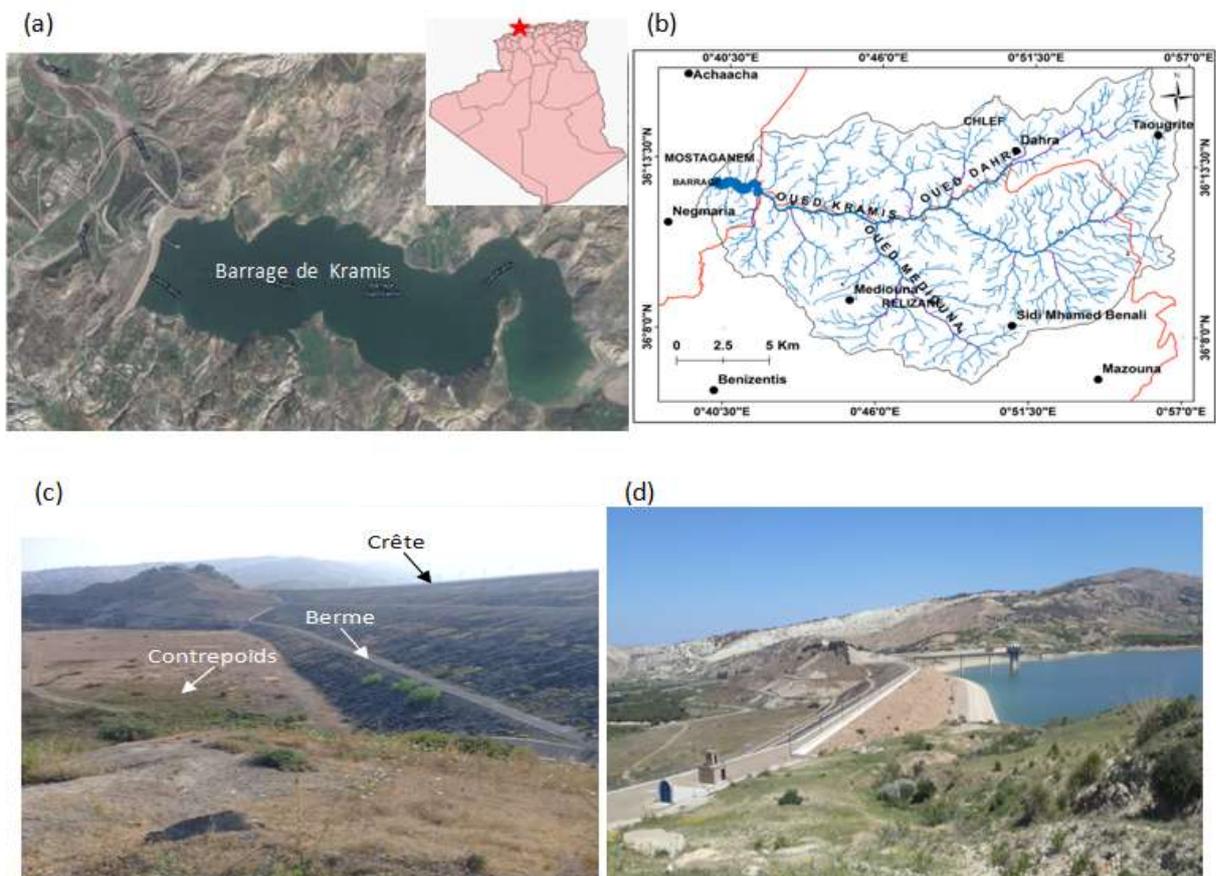
Dans ce qui suit, notre étude sera menée sur la **déformation 2D** et suivant le **repère barrage** (coordonnées tangentielle T et radiale R). Ceci nous permettra de mieux appréhender la déformation locale.

# Chapitre IV : Application – Auscultation géodésique du barrage de Kramis

## IV.1 Zone d'étude : Barrage de Kramis

Le barrage de Kramis est implanté sur l'Oued Kramis, situé au Sud-Est du chef-lieu de la commune de Achaacha (Wilaya de Mostaganem) et au Nord-Est du chef-lieu de la commune de Nekemaria, approximativement à 80km à l'Est de la ville de Mostaganem et de 14 km environ de son embouchure avec la mer Méditerranéenne, [ANBT, 2006]. Il se situe à une longitude moyenne de  $0^{\circ}40'30''E$  et à une latitude moyenne de  $36^{\circ}13'00''N$ , figure (IV.1).

Cet ouvrage est destiné à irriguer le périmètre de la commune de Achaacha d'une superficie de 4 300 ha pour un volume affecté de 10 millions  $m^3$  et à renforcer l'AEP de la zone de Dahra (Sidi Lakhdar, Nekmaria, Ouled Boughalem et Achaacha) avec une population totale de 11546 habitants (2003), avec un volume affecté de 5,3 millions  $m^3$ .



**Figure IV.1:** (a) Localisation géographique du barrage de Kramis (b) Réseau hydrographique de l'oued Kramis (c et d) Photos de la digue du barrage de Kramis (Avril 2019).

## IV.2 Données et traitement GNSS

Dans le cadre du projet contractualisé CTS/ANBT (2019-2021) : 'Auscultation du barrage de Kramis (Wilaya de Mostaganem) par l'outil spatial : GNSS et Interférométrie Radar', trois campagnes d'observations GNSS, de 2019, 2020 et 2021, ont été effectuées. Cinq (05) à six (06) récepteurs de type « Trimble NetR9 » et antennes de « Zephyr Geotetic » ont été déployés, dans

ces campagnes. Le paramétrage adopté dans la configuration de ces récepteurs, est comme suivant [Rapport technique CTS n°1, 2019] :

- Type de constellation : GPS + GLONASS + BEIDOU + GALILEO (multifréquence).
- Mode d'observation : statique relatif.
- Angle d'élévation égale à 10°.
- Cadence d'enregistrement de 10 secondes.
- Paramètres météo standards.



Figure IV.2: Observations GNSS sur terrain.

Généralement, les sessions et la durée d'observations ont été respectées comme celles de la première campagne d'observations (déroulée en Juillet 2019) : 35 sessions et 20 minutes d'observations, figure (IV.3.b).

Le dispositif d'auscultation géodésique est composé de 107 points (70 points existants et 37 points nouveaux matérialisés dans le cadre du projet CTS/ANBT), figure (IV.4.a). Ce dispositif a été établi selon trois réseaux : réseau de cibles (bornes construites sur la digue et son voisinage immédiat côté aval), réseau d'auscultation (piliers d'observations) et réseau de garde (piliers construits dans une zone stable). Ces différents réseaux sont rattachés au même système géodésique.

Le traitement des données des trois campagnes d'observations GNSS a été effectué, par le logiciel TBC (Trimble Business Center v3.90), [TBC, 2017], figure (IV.3). Le processus du traitement consiste au contrôle des données, le choix des paramètres de calcul et traitement ligne de base par ligne de base et session par session, et puis l'ajustement final du réseau.

Les résultats de l'ajustement du réseau de surveillance du barrage de Kramis, de chaque campagne d'observations, sont fournis en termes de coordonnées géodésiques locales ( $E$  : Easting,  $N$  : Northing,  $U$  : Up), coordonnées géographiques et coordonnées cartésiennes géocentriques, exprimées par rapport au système géodésique WGS-84. Le point de garde G02, rattaché à la station 305Bis (CTS, Arzew), est pris comme point de référence.

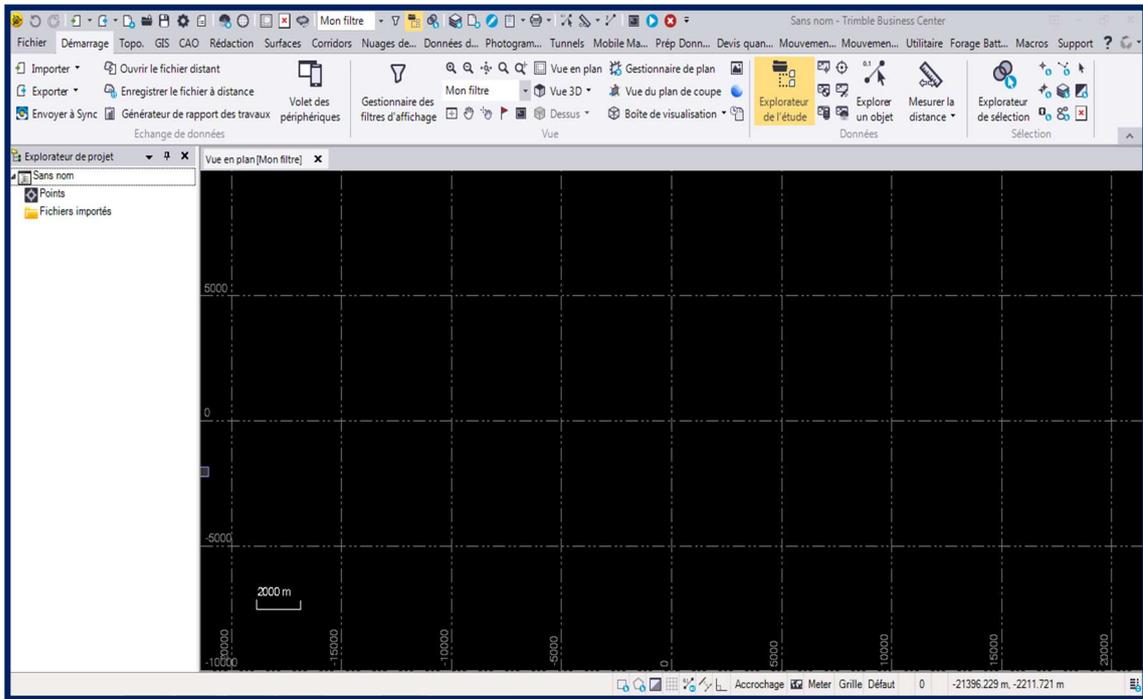


Figure IV.3: Interface du logiciel TBC.



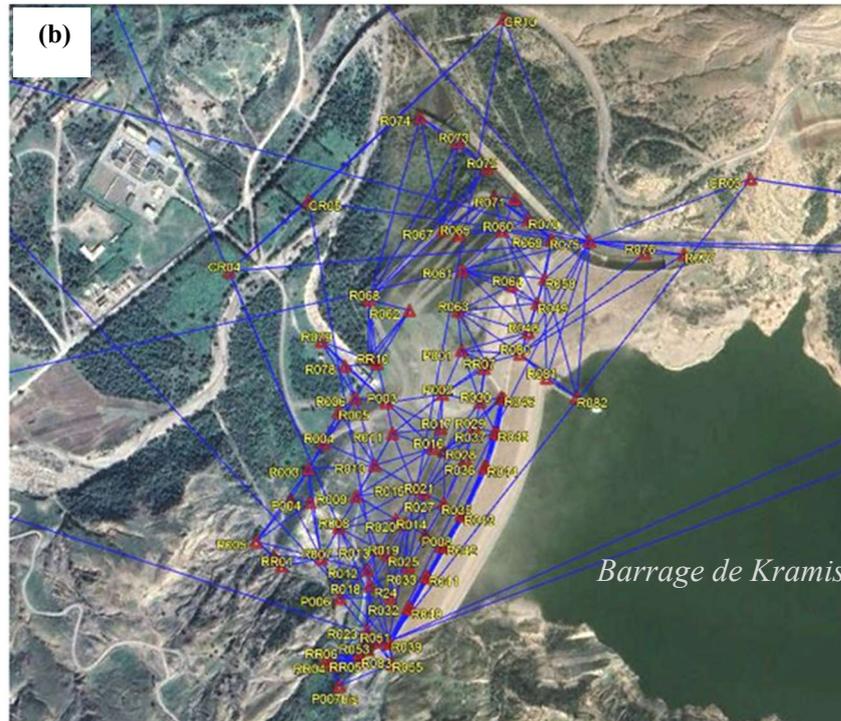


Figure IV.4: (a) Réseau d'auscultation du barrage de Kramis, (b) configuration des sessions d'observations GNSS.

Le tableau (IV.1) récapitule les statistiques de la précision de détermination des points du réseau d'auscultation et leurs ellipses d'erreurs absolues, des trois campagnes d'observations GNSS. La qualité de l'ajustement du réseau d'auscultation est de l'ordre millimétrique.

	Précisions			Ellipses d'erreur	
	$\sigma_E$ (mm)	$\sigma_N$ (mm)	$\sigma_U$ (mm)	$a$ (mm)	$b$ (mm)
Campagne 2019	1.0	1.1	4.6	1.3	1.2
Campagne 2020	0.9	1.0	3.8	1.0	0.9
Campagne 2021	1.0	1.0	4.1	1.2	1.0

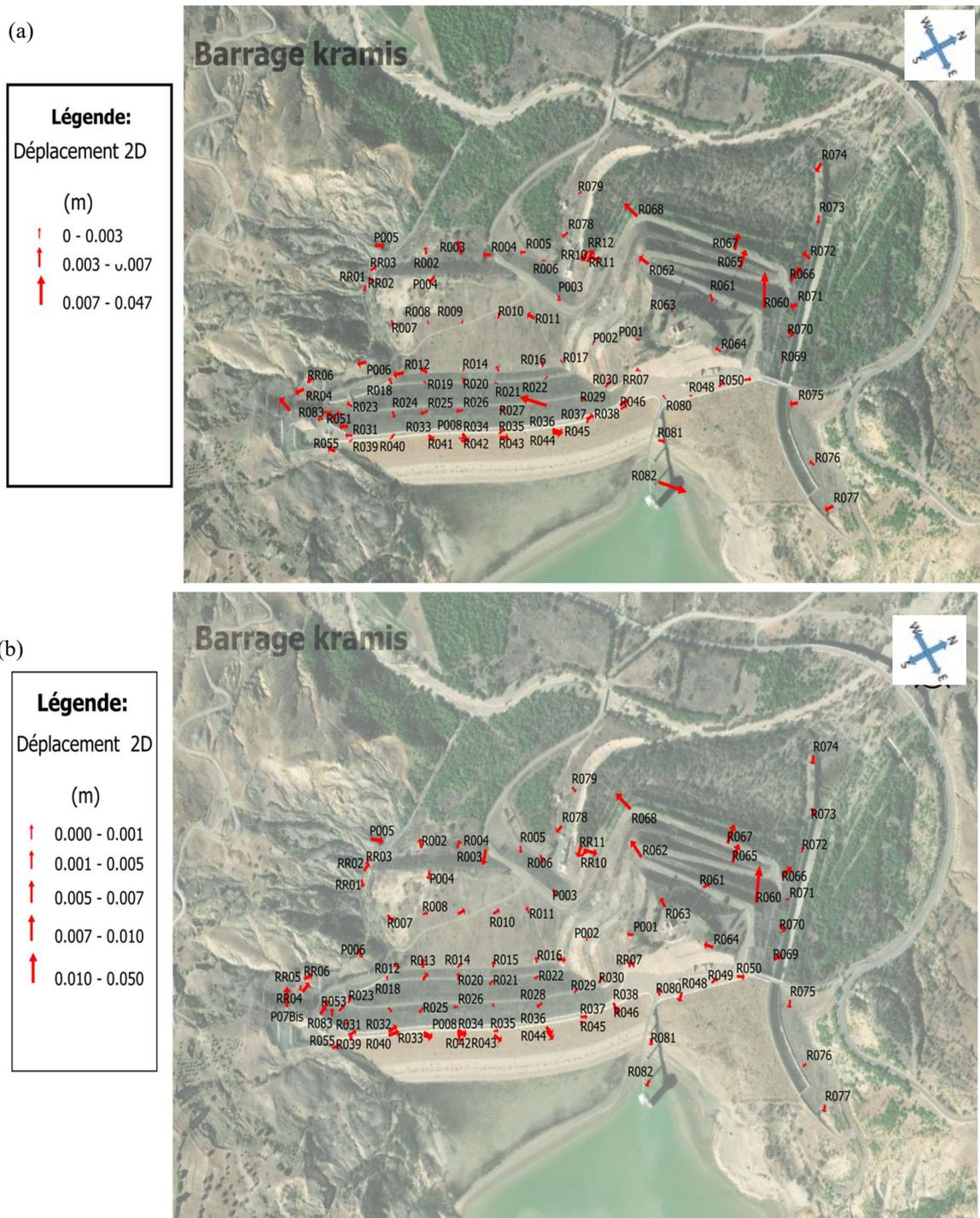
Tableau IV.1: Précision des coordonnées géodésiques locales ( $E, N, U$ ) et éléments des ellipses d'erreurs absolues des points du réseau d'auscultation, suivant les trois campagnes GNSS.

### IV.3. Déformations du réseau d'auscultation du barrage Kramis

Dans ce qui vient après, les figures sont établies par le logiciel de Système d'Information Géographique QGIS.

- **Vecteurs de déplacements 2D :**

La figure (IV.5) illustre les vecteurs de déplacement 2D, entre les deux campagnes GNSS, exprimés dans un repère barrage ( $T$  : Tangentiel,  $R$  : Radial).



**Figure IV.5:** Vecteurs des déplacements 2D des points du réseau d'auscultation du barrage Kramis. (a) période 2019-2020, (b) période 2019-2021.

Les vecteurs de déplacements des points du réseau, entre la période de Juillet 2019 et Juin 2021, sont en moyenne d'environ 12 mm, en module. Le déplacement maximal est de l'ordre de 50mm, au niveau du point R060. Ce point se trouve dans la zone de glissement de la colline de station de contrôle (couverte par les points de R060 à R068) dont la moyenne des déplacements est d'environ 22mm.

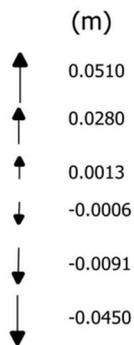
Concernant le barrage, le déplacement moyen diminue graduellement de la crête (de R50 à R31), passant par le corps de la digue (de R30 à R18) puis il augmente légèrement dans la zone de contrepoids (de R17 à R7), respectivement, de 12mm, 6mm et 7mm. Pour l'évacuateur de crues (de R69 à R77), le mouvement n'excède pas 9mm.

- Vecteurs des déplacements 1D :

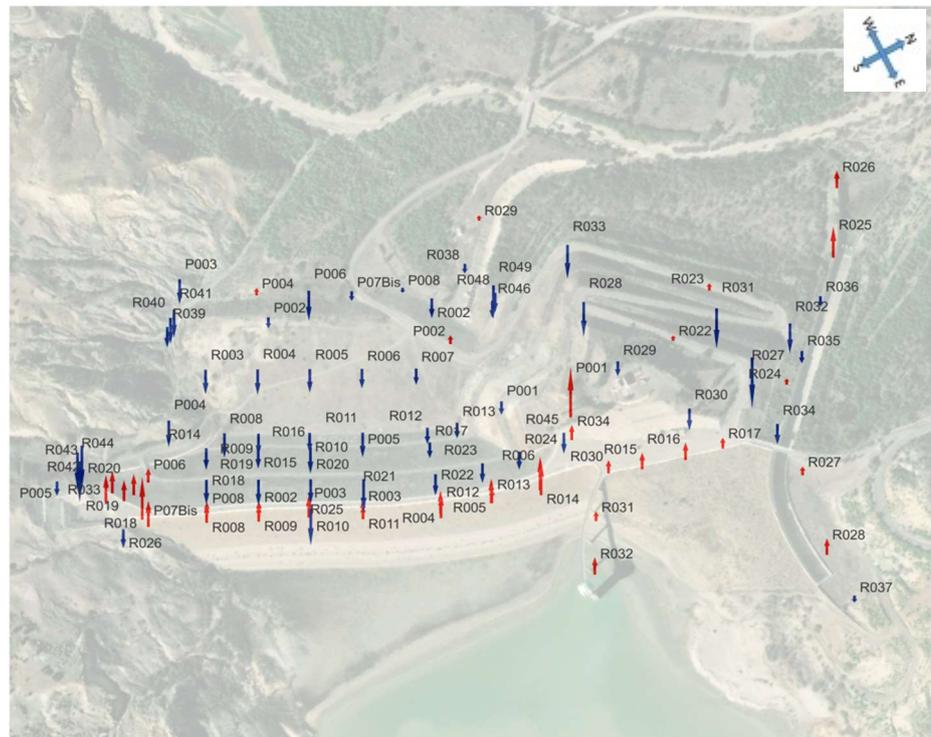
(a)

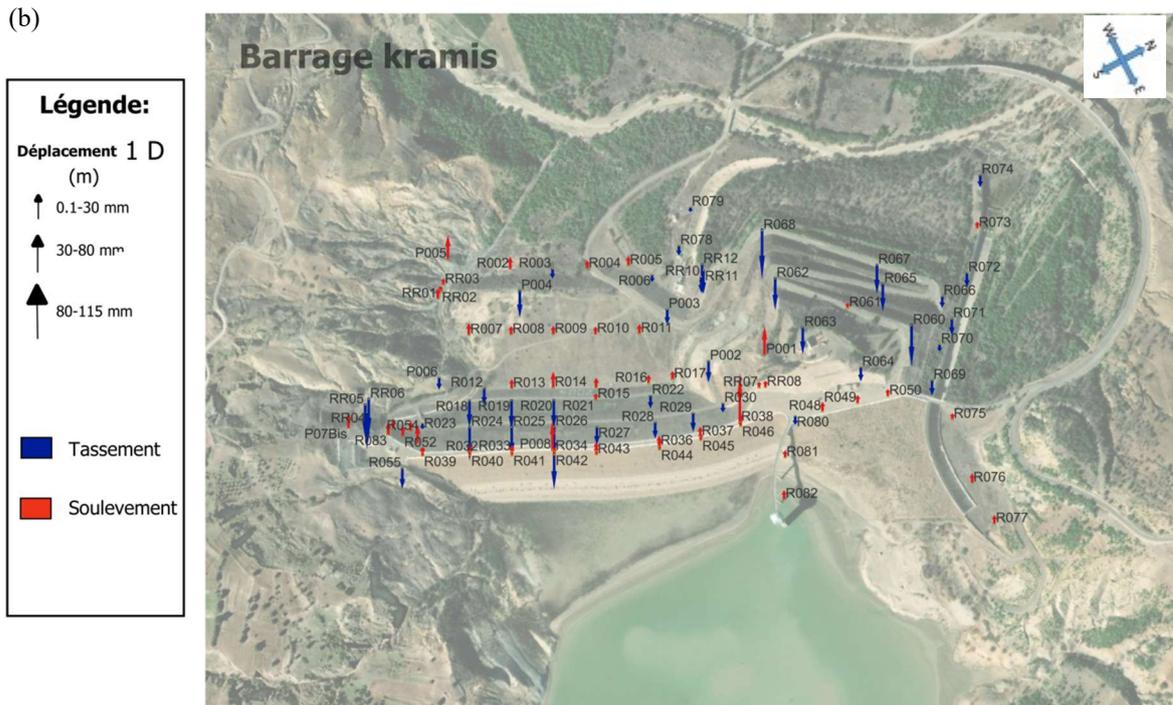
**Légende**

Déplacement 1D



- Tassement
- Soulevement





**Figure IV.6:** Vecteurs des déplacements verticaux du réseau d’auscultation du barrage Kramis. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.

Les vecteurs de déplacements verticaux des points du réseau, de la période 2019- 2020, sont en moyenne d’environ 2.6 cm, en module. Le déplacement maximal est de l’ordre de 5.1 cm (point P001), au niveau de la zone de tassement de la colline de station de contrôle du barrage près de la rive droite.

Concernant le barrage, le déplacement vertical moyen diminue graduellement de la crête (de R31 à R50), puis il augmente légèrement dans la zone de la digue (de R18 à R30) respectivement, de 0.1 cm et 1.0 cm. Pour l’évacuateur de crues (de R69 à R77), le mouvement n’excède pas 1.0 cm.

Durant la période 2019-2021, la moyenne des déplacements verticaux est de l’ordre de 5.8 cm. Le maximum des déplacements est au niveau du point R068 qui se trouve dans la zone de tassement de la colline de station de contrôle.

Concernant le barrage, le déplacement vertical moyen diminue graduellement de la crête (de R31 à R50), puis il augmente légèrement dans la zone de la digue (de R18 à R30), de 3.0 cm et 8.0 cm, respectivement. Pour l’évacuateur de crues (de R69 à R77), le mouvement n’excède pas 1.0 cm.

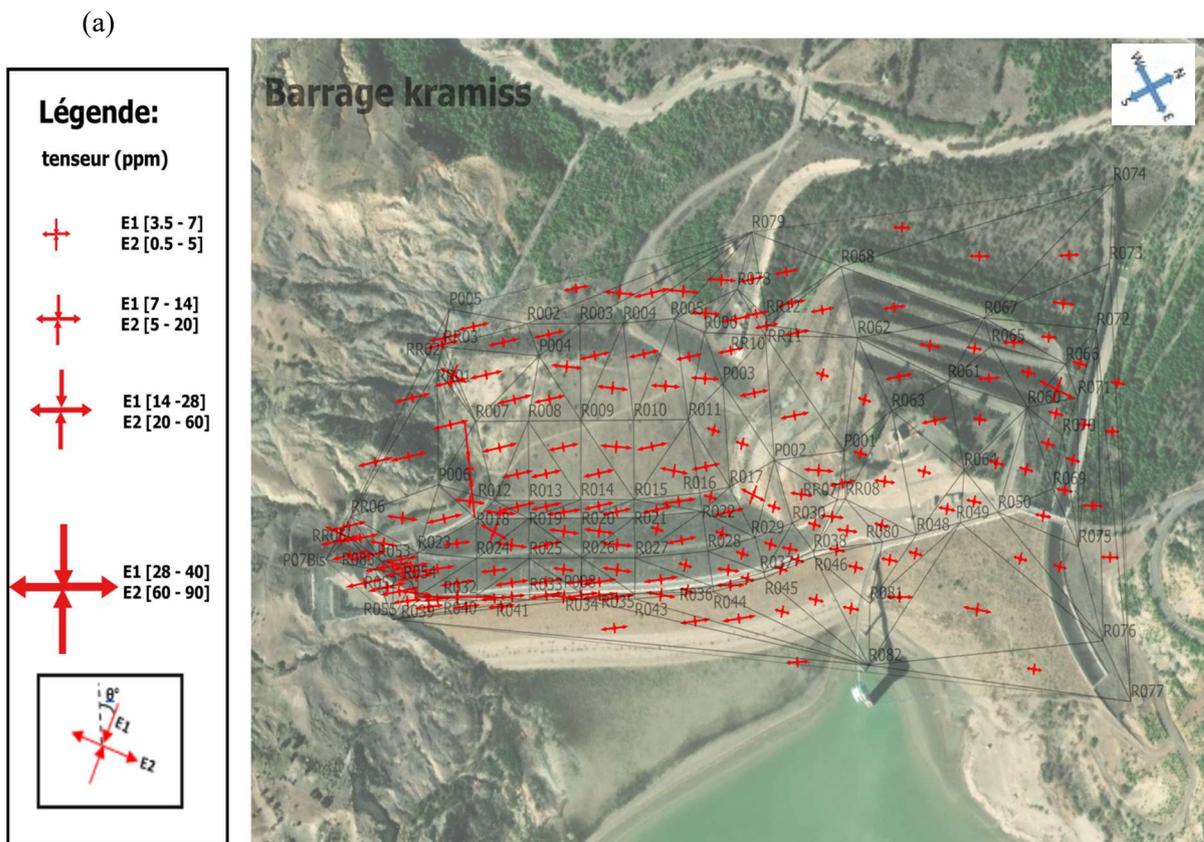
Généralement, la rive droite et la crête ont subi un soulèvement léger, contrairement, à la digue et le contrepoids du barrage qui ont subi un tassement significatif.

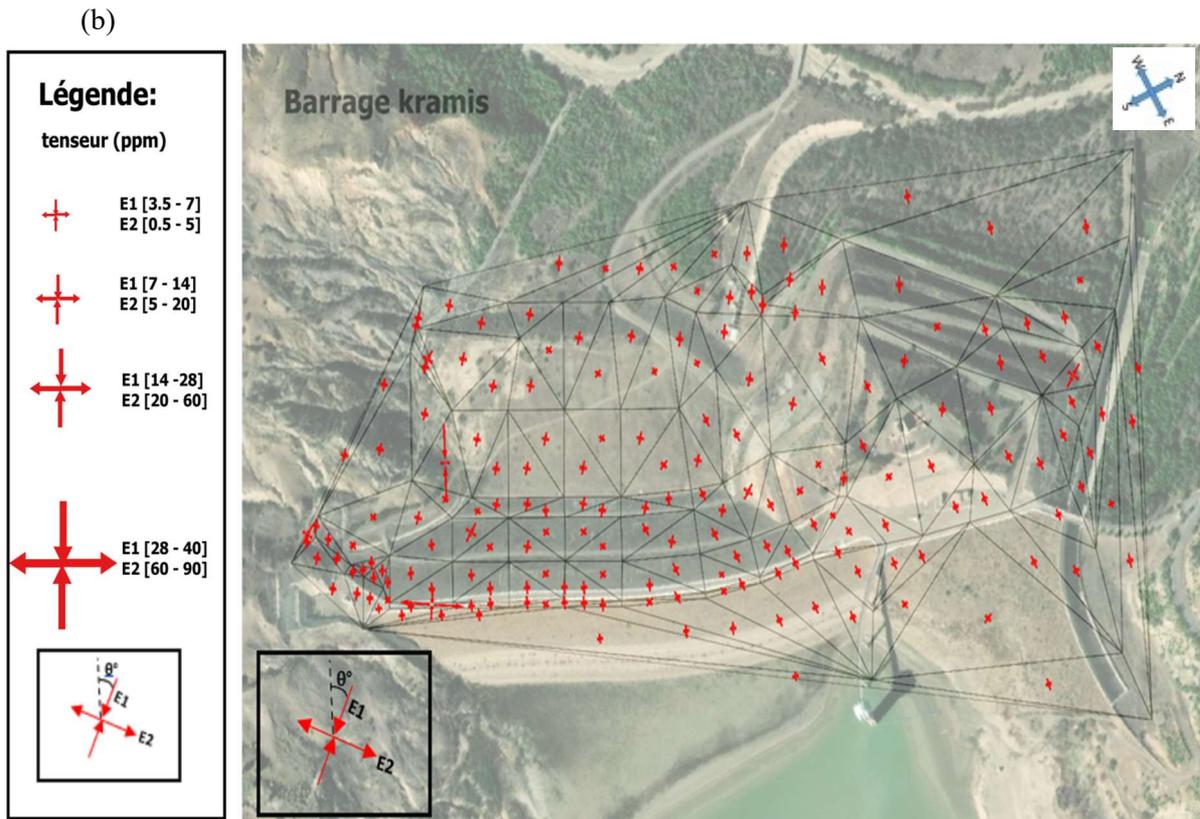
• **Tenseurs de déformations :**

Les figures ci-après (de IV.7 à IV.10) concernent les tenseurs de déformation et leurs primitives, du barrage de Kramis. Les statistiques de ces quantités sont présentées, dans le tableau ci-après.

	E1 (ppm)	E2 (ppm)	Dilat (ppm)	Cisail (ppm)	Rot_diff (10-6 gr)
Période 2019-2020	<b>12</b> [4, 39]	<b>-2.6</b> [-90, 0]	<b>4.1</b> [-7, 5]	<b>4.8</b> [-43, 17]	<b>0</b> [-24, 14]
Période 2019-2021	<b>2.3</b> [0, 28]	<b>-5.6</b> [-59, -1]	<b>-1.7</b> [-26, 43]	<b>3.9</b> [1, 62]	<b>0</b> [-18, 47]

**Tableau IV.2:** Statistiques des tenseurs et des primitives de déformation du réseau d’auscultation du barrage de Kramis. Entre crochets, sont les valeurs minimales et maximales.





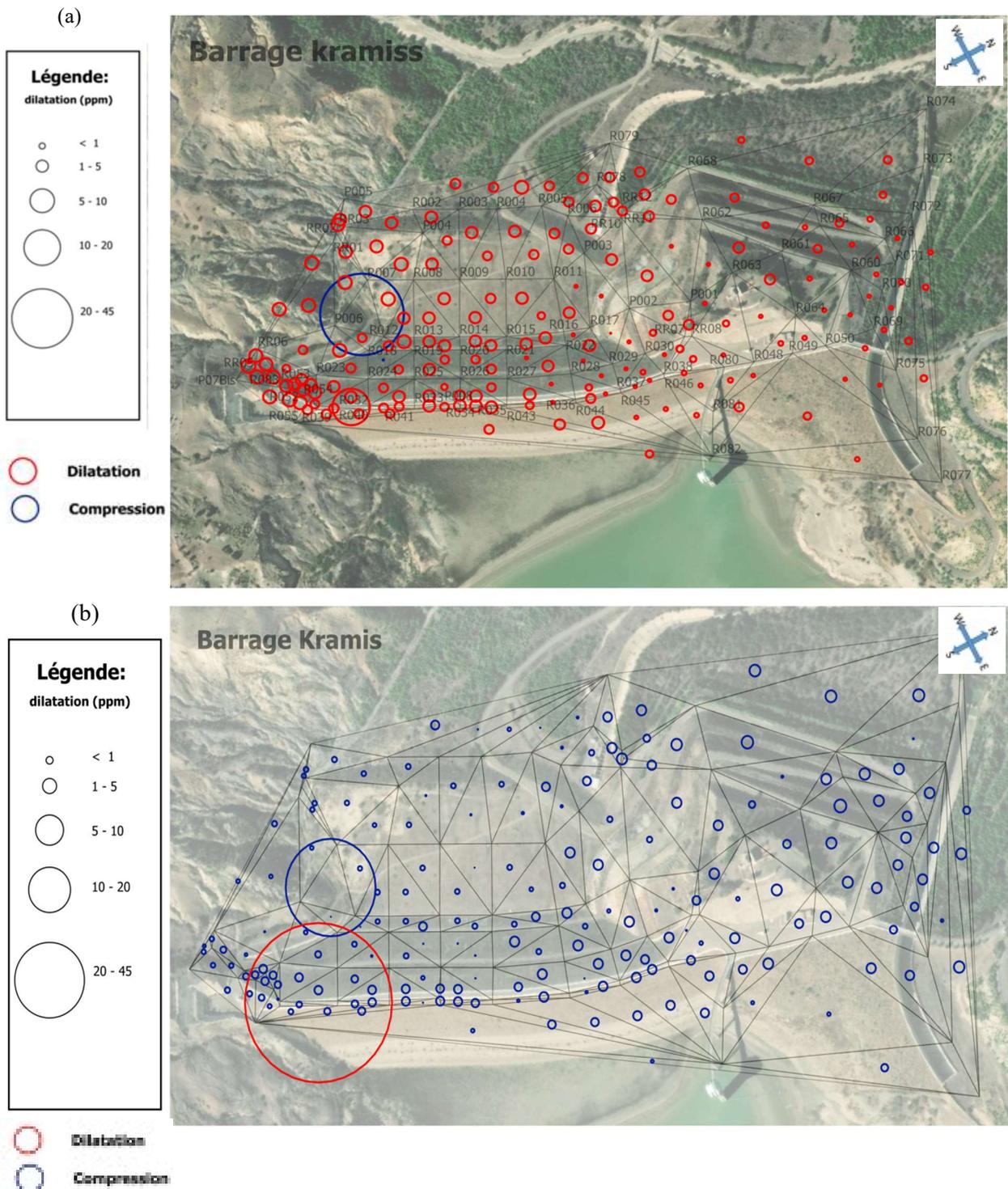
**Figure IV.7:** Tenseurs de déformations du réseau d’auscultation du barrage Kramis. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.

La déformation est évaluée à chaque centre de triangle de la triangulation de Delaunay du réseau. Elle est basée sur les vecteurs de déplacements des points constituant chaque triangle.

A partir des résultats des tenseurs de déformation principaux, on remarque que la première composante du tenseur principal E1 est positive et de l’ordre de 2.3 ppm, par contre la deuxième composante E2 est négative et de l’ordre de -5.6 ppm. Par convention, le signe plus (+) désigne la tension (dilatation) et le signe moins (-) désigne la compression. Par conséquent, les deux phénomènes existent dans la zone du barrage, avec une direction globale NE-SO, qui est tangentielle par rapport à la digue.

En s’éloignant de la digue, un changement de direction des tenseurs de déformations du NE-SO vers NO-SE, en sens direct (sens contraire d’une aiguille d’une montre), est observé, dans la rive droite. Ce qui laisse supposer la présence d’un phénomène de rotation de bloc. Le même constat a été observé, dans l’opération précédente (2019-2020).

• Dilatations / Compressions :

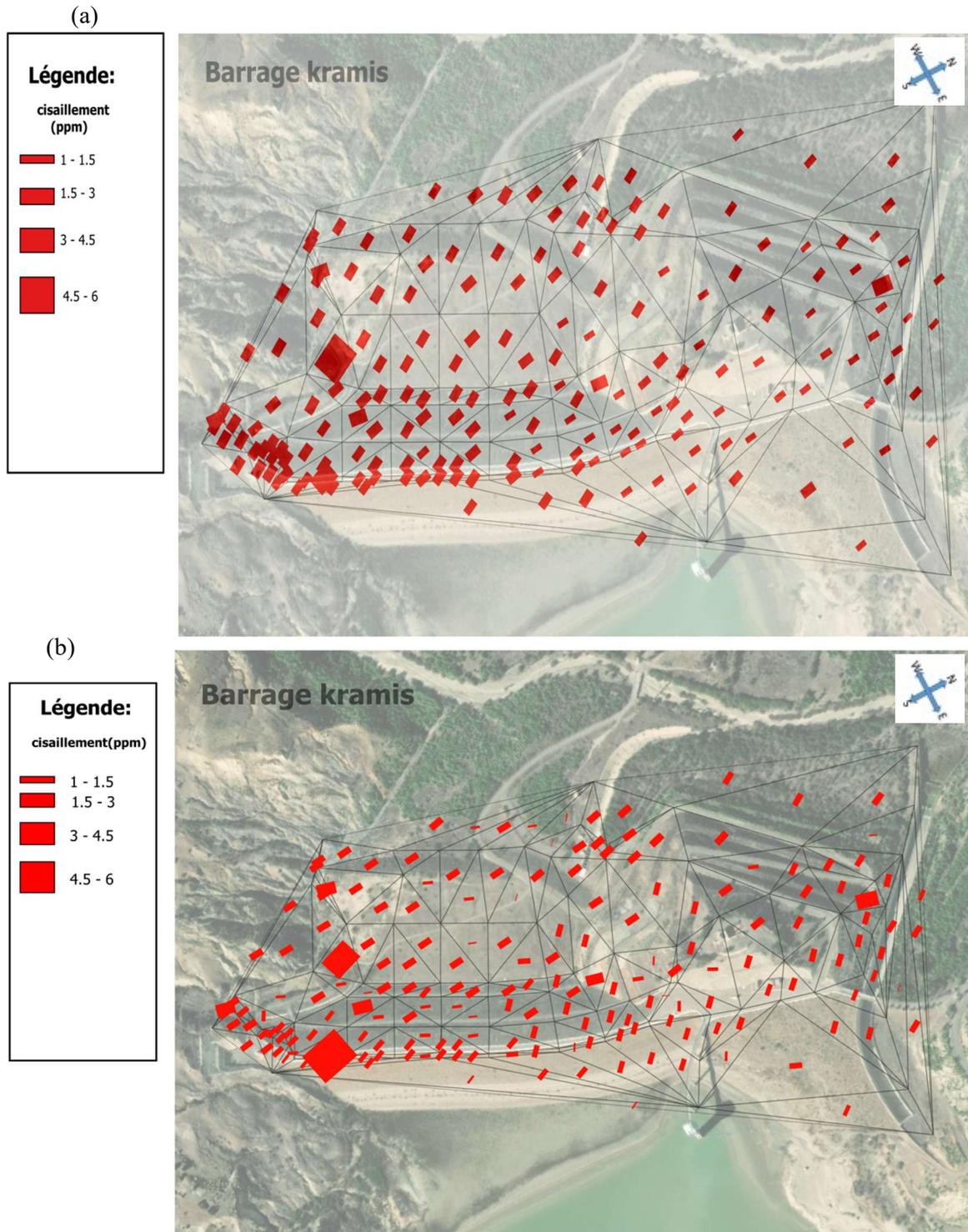


**Figure IV.8:** Dilatations du réseau d’auscultation du barrage Kramis. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.

Les phénomènes de dilatation et de compression caractérisent la région du barrage selon deux zones. La zone de compression concerne la crête de la digue, les deux bermes et toute la rive droite jusqu’au pied de contreponds. La zone de dilatation s’étale seulement la rive gauche.

En effet en 2021, le barrage a connu un remplissage de quelques mètres, après avoir été complètement desséché. Ceci a déclenché l'action de la pression hydrostatique de la retenue sur la digue. Malgré sa faible intensité, les effets de cette pression ont causé ces phénomènes de compression et dilatation.

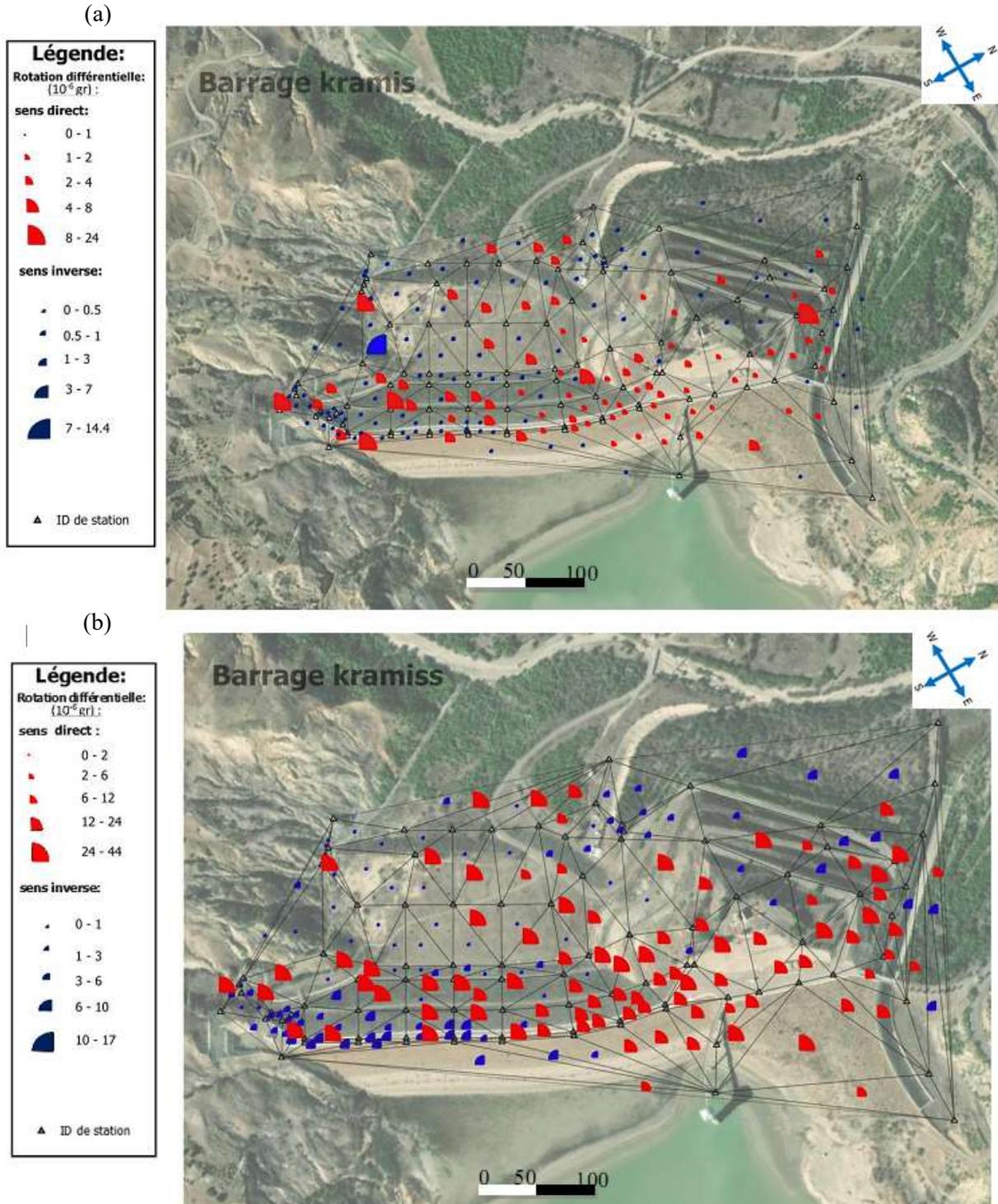
- **Cisaillements :**



**Figure IV.9:** Cisaillements du réseau d'auscultation du barrage Kramis. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.

Le champ de cisaillement est illustré dans la figure (IV.9), il représente la déformation du réseau en termes de configuration, de l'ordre de 3.9 ppm et 4.8 ppm, respectivement pour les périodes 2019-2020 et 2019-2021. Pratiquement, ce champ est orienté dans la direction NO-SE.

- Rotations différentielles :



**Figure IV.10:** Rotations différentielles du réseau d'auscultation du barrage Kramis. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.

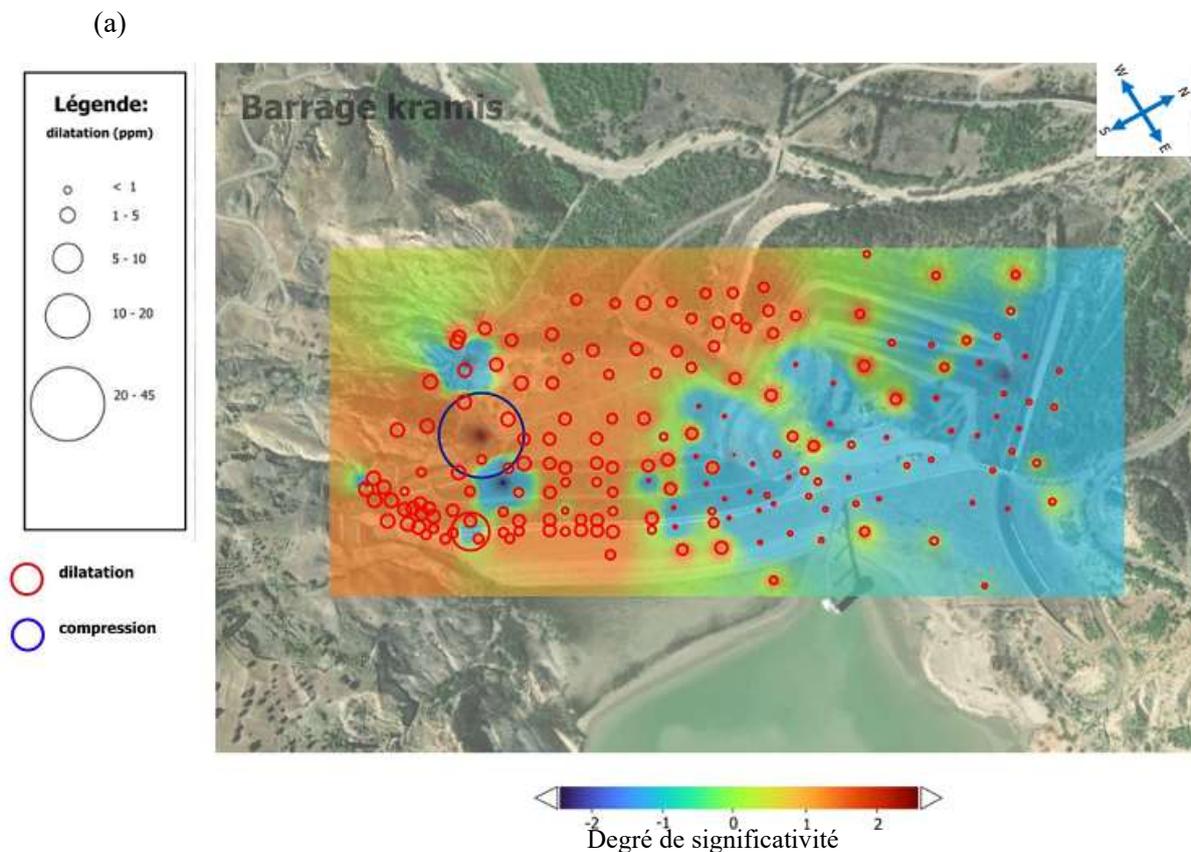
En termes de rotation différentielle, le réseau est caractérisé par deux zones, figure (IV.10). La première étant négative (sens rétrograde) concerne la digue et la zone de contrepoids s'étalant jusqu'à la rive droite aval. La deuxième étant positive (sens direct) concerne une partie de la rive droite Aval du barrage (colline de la station de contrôle et l'évacuateur de crues). Ceci soutient l'hypothèse de présence de rotation de bloc, mentionné précédemment.

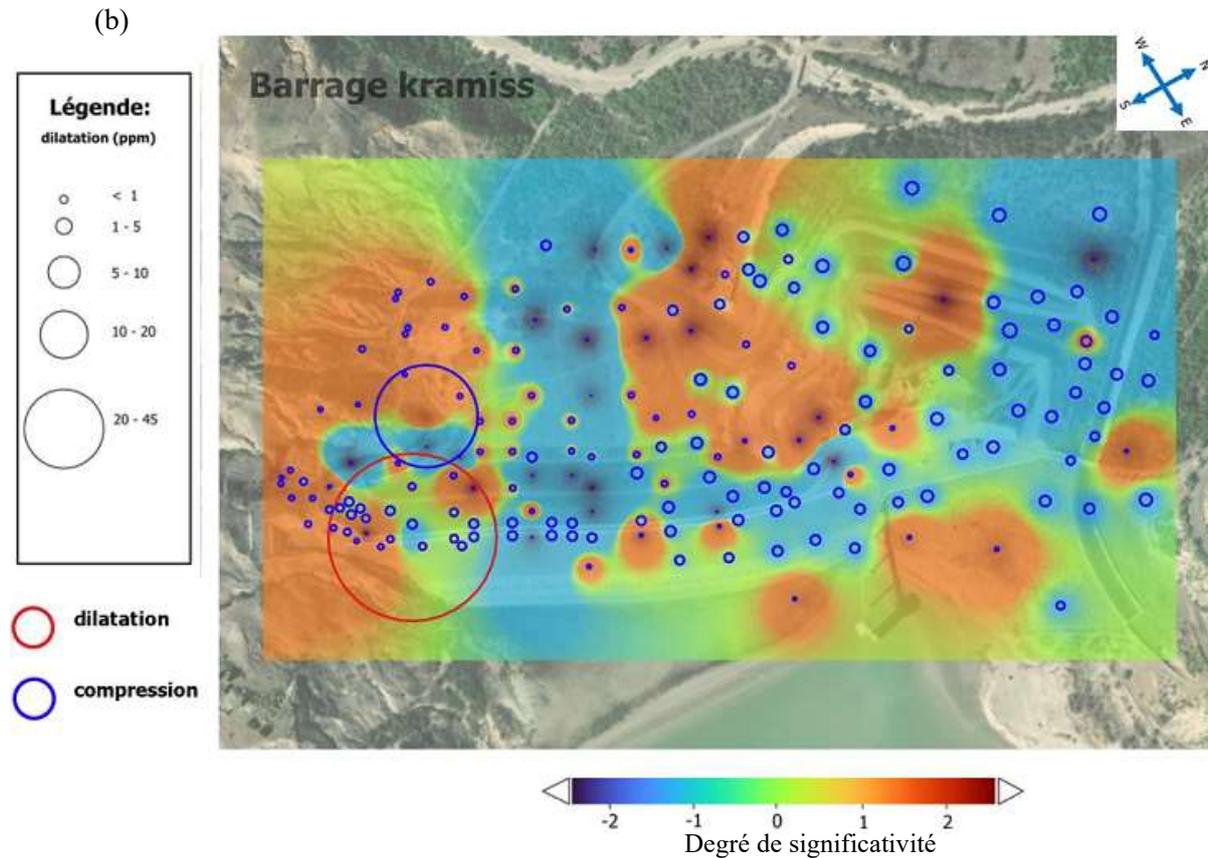
Généralement, la rotation différentielle est de l'ordre de 20 ppm durant les deux périodes. La valeur maximale est de l'ordre de 40 ppm. Pour la partie du barrage, elle augmente graduellement de la crête jusqu'à le pied de la digue, durant la période 2019-2020. Cependant, elle diminue graduellement de la crête jusqu'à la rive droite, durant la période 2019-2021.

#### IV.4. Analyse des erreurs sur les déformations

Cette partie concerne l'analyse des incertitudes sur les primitives de la déformation dont le degré de confiance est estimé, par la méthode de Monté Carlo. Les résultats de calcul sont obtenus à partir de 5000 simulations. L'analyse de ces résultats permet de qualifier la significativité des résultats obtenus, c.-à-d., s'assurer des déformations réelles dues aux mouvements et non aux erreurs de mesures.

- **Significativité des dilatations :**



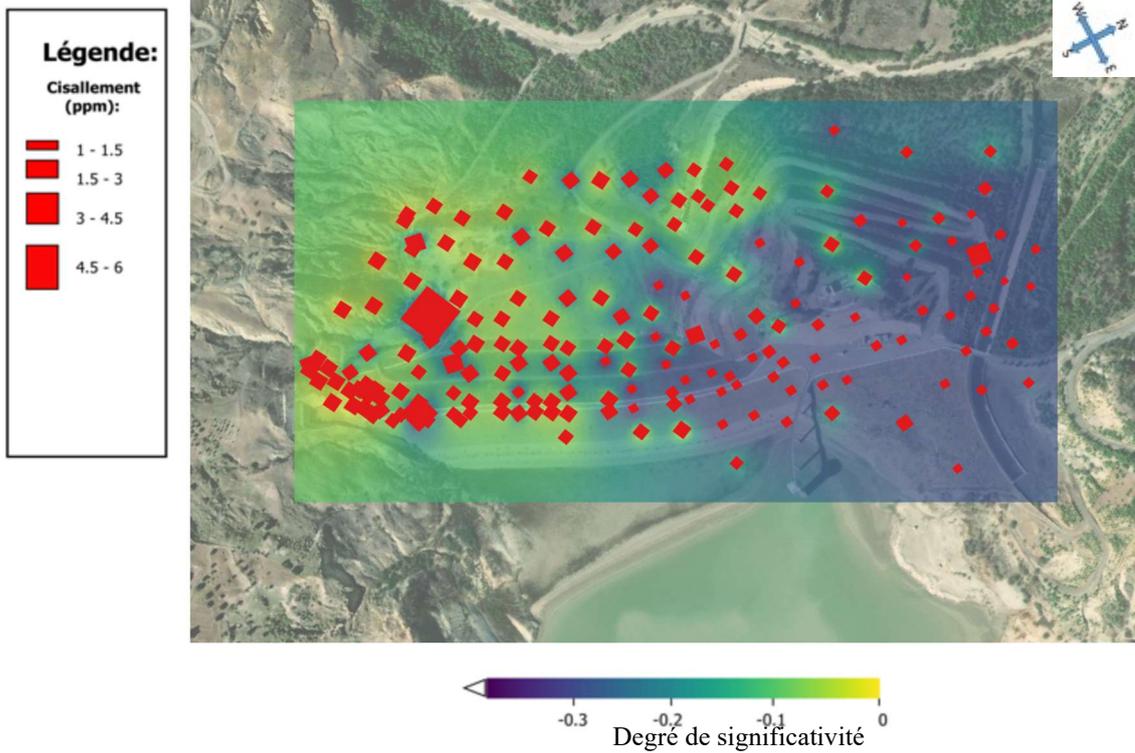


**Figure IV.11:** Degré de significativité des dilatations. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.

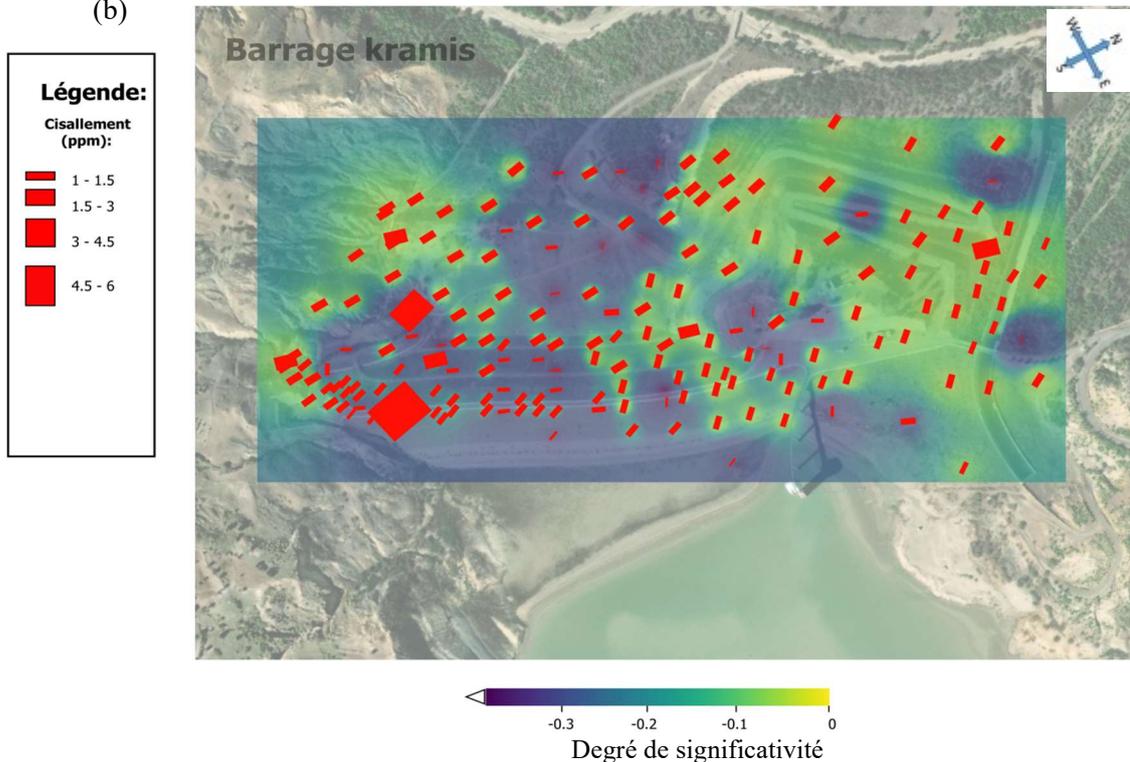
D'après les figures (IV.11), on distingue des zones de significativité de la dilatation. La première est une zone de dilatation significative, se trouvant dans les parties rive gauche, moitié de la digue et contrepoids. La deuxième est une zone de dilatation non significative, se trouvant au niveau de l'autre moitié de la digue et la rive droite.

- **Significativité des cisaillements :**

(a)



(b)



**Figure IV.12:** Degré de significativité des cisaillements. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.

Selon la figure (IV.12), la majorité des valeurs du seuil de significativité des cisaillements, pour les deux périodes, sont inférieures à 0, cela veut dire que ces déformations sont insignifiantes et n'affectent pas le barrage.

• Significativité rotation différentielle :

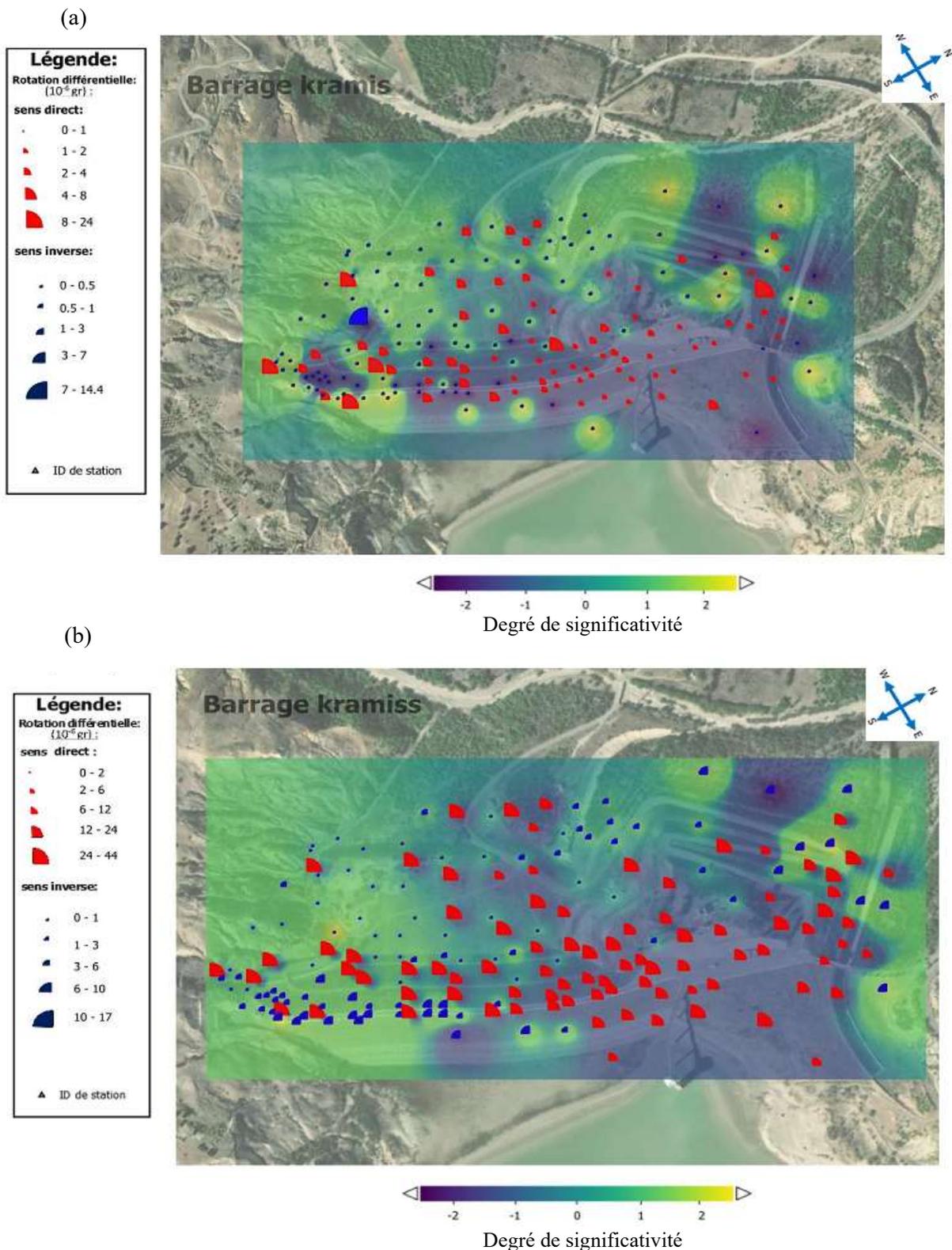
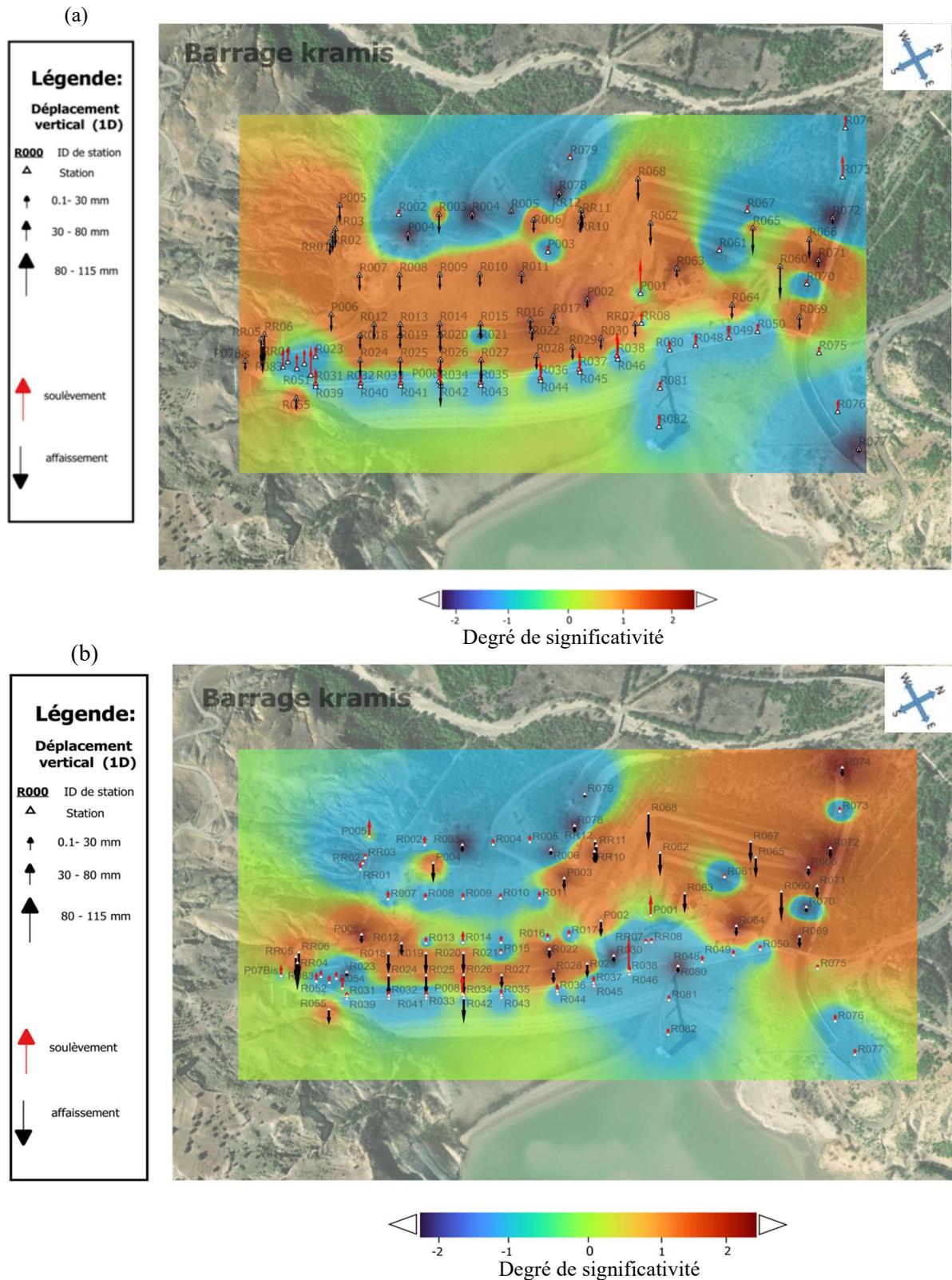


Figure IV.13: Degré de significativité des rotations différentielles. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.

D'après la figure (IV.12), la rotation différentielle est insignifiante au niveau de la digue du barrage. Les rives droite et gauche enregistrent des déformations significatives mais restent minimales.

- **Significativité des déformations verticales :**



**Figure IV.14:** Degré de significativité des déformations verticales. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021.

Deux zones de significativité des déformations verticales caractérisent la région du barrage de Kramis, dans les deux périodes d'auscultation, figure (IV.14). Pour la période 2019-2020, les déformations verticales, notamment les tassements, sont significatifs sur la digue et la partie de contrepoids. Alors que, cette significativité s'est rétrécie principalement au niveau de la digue et la rive droite, durant la période 2019-2021.

- **Conclusion sur les résultats du traitement GPS et l'analyse des déformations :**

Les campagnes d'observations GNSS effectuées, en Juillet 2019, en Novembre 2020 et en Juin 2021, ont permis de déterminer les coordonnées des points du réseau de surveillance, avec une précision millimétrique. Elle est de l'ordre de 0.4 - 1.9 mm, 0.5 - 2.1 mm et 0.5 - 1.8 mm, en composantes planimétriques et de l'ordre de 4.7 - 12.2mm, 3.6 - 7.4 mm et 3.1 - 6.2 mm, en composante verticale, respectivement.

En termes de déplacements planimétriques, entre les deux périodes Juillet 2019- Novembre 2020 et Juillet 2019- Juin 2021, le barrage a subi des mouvements, de l'ordre de 12mm, avec une tendance tangentielle et de l'ordre de 11mm, avec une tendance radiale, respectivement.

Généralement, pendant toute la durée du projet (2019-2021), le déplacement moyen diminue graduellement de la crête (de R50 à R31), passant par le corps de la digue (de R30 à R18), avec une légère augmentation dans la zone de contrepoids (de R17 à R7), respectivement, de 13mm, 5mm et 8mm. Le déplacement maximal est environ 50mm, au niveau du point R60. Ce point se trouve dans la zone de glissement de la colline de station de contrôle (couverte par les points de R60 à R68) dont la moyenne des déplacements est d'environ 22mm.

Concernant les résultats des tenseurs de déformation, durant cette période, ils ont montré la présence de deux phénomènes de compression et de dilatation sur la zone du barrage. La zone de compression concerne la crête de la digue, la première berme et toute la rive droite. La zone de dilatation s'étale de la deuxième berme de la digue jusqu'au pied du contrepoids.

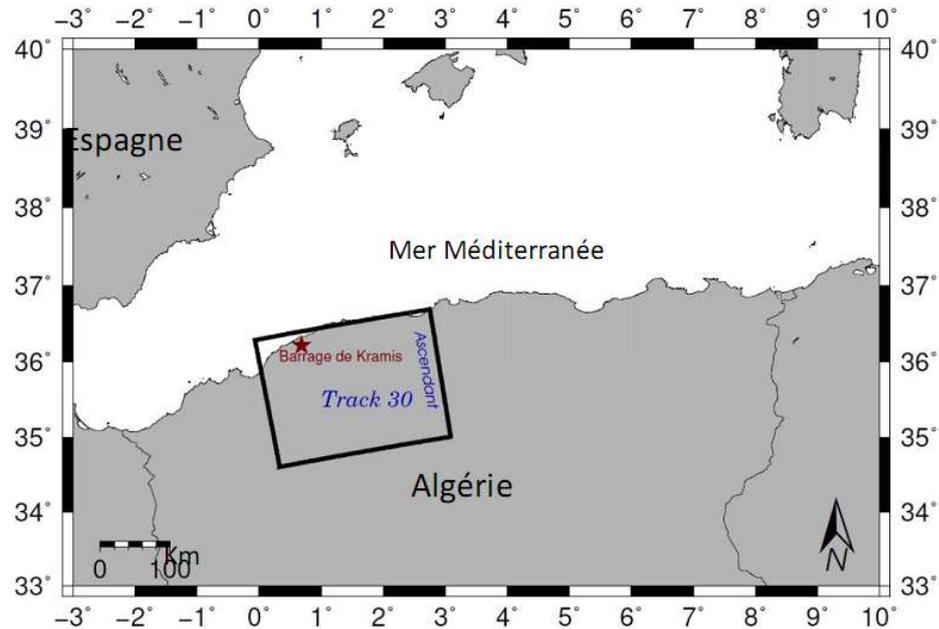
En effet en 2021, et après avoir été complètement desséché, le barrage a connu un remplissage de quelques mètres. Ceci a causé l'action de la pression hydrostatique de la retenue sur la digue. Malgré sa faible intensité, les effets de cette pression ont causé ces phénomènes de compression et dilatation. Aussi un phénomène de rotation de bloc entre la digue et la partie de la rive droite aval a été observé.

L'analyse statistique des tenseurs, en termes de significativité, a montré que les déformations enregistrées, notamment, sur la digue du barrage restent faibles.

## IV.5. Données et traitement interférométrique radar

### IV.5.1 Données utilisées

38 images SAR du satellite européen Sentinel-1A, du passage ascendant Track 30, ont été considérées dans le traitement interférométrique multi-temporel. La période d'étude couvre une durée de 03 ans, à partir de Janvier 2019. L'image master est celle du 25 juin 2020. La scène de ces images radar correspond à une zone couvrant une superficie d'environ 240\*250 km<sup>2</sup>, figure (IV.15).



**Figure IV.15:** La scène de l'image radar du passage ascendant du satellite Sentinel-1A/Track 30.

Le tableau (IV.3) illustre les caractéristiques des images acquises du satellite Sentinel-1A ascendant, sur la région du barrage de Kramis. Les angles d'élévation et d'azimut du satellite sont obtenus en fonction de l'orbite, du type du passage, et de la position géographique de la zone.

Satellite	Date	Angle d'élévation (°)	Angle d'Azimut (°)	Track
Sentinel-1A	2019-January-26	40	259	30
Sentinel-1A	2019-February -19	40	259	30
Sentinel-1A	2019-March -15	40	259	30
Sentinel-1A	2019-April-20	40	259	30
Sentinel-1A	2019-May -26	40	259	30
Sentinel-1A	2019-June-19	40	259	30
Sentinel-1A	2019-July-13	40	259	30
Sentinel-1A	2019-August-18	40	259	30
Sentinel-1A	2019-September-23	40	259	30
Sentinel-1A	2019-October-17	40	259	30
Sentinel-1A	2019-November-22	40	259	30

Sentinel-1A	2019-December-16	40	259	30
Sentinel-1A	2020-January-21	40	259	30
Sentinel-1A	2020-February-26	40	259	30
Sentinel-1A	2020-March-21	40	259	30
Sentinel-1A	2020-April-26	40	259	30
Sentinel-1A	2020-May-20	40	259	30
Sentinel-1A	<b>2020-June-25 *</b>	40	259	30
Sentinel-1A	2020-July-31	40	259	30
Sentinel-1A	2020-August-24	40	259	30
Sentinel-1A	2020-September-17	40	259	30
Sentinel-1A	2020-October-23	40	259	30
Sentinel-1A	2020-November-16	40	259	30
Sentinel-1A	2020-December-22	40	259	30
Sentinel-1A	2021-January-15	40	259	30
Sentinel-1A	2021-February-20	40	259	30
Sentinel-1A	2021-March-16	40	259	30
Sentinel-1A	2021-April-21	40	259	30
Sentinel-1A	2021-May-27	40	259	30
Sentinel-1A	2021-June-20	40	259	30
Sentinel-1A	2021-July-14	40	259	30
Sentinel-1A	2021-August-19	40	259	30
Sentinel-1A	2021-September-24	40	259	30
Sentinel-1A	2021-October-18	40	259	30
Sentinel-1A	2021-November-23	40	259	30
Sentinel-1A	2021-December-17	40	259	30
Sentinel-1A	2022-January-22	40	259	30
Sentinel-1A	2022-February-27	40	259	30

(\*): Image master

**Tableau IV.3:** Caractéristiques des images radar acquises

#### IV.5.2 Traitement interférométrique par SNAP

Le traitement interférométrique, des différentes images Sentinel-1A de la zone du barrage de Kramis, a été exécuté à travers le logiciel SNAP (SeNtinel's Application Platform / European Space Agency), [Azmi & Ami Hassan, 2022], Figure (IV.16).

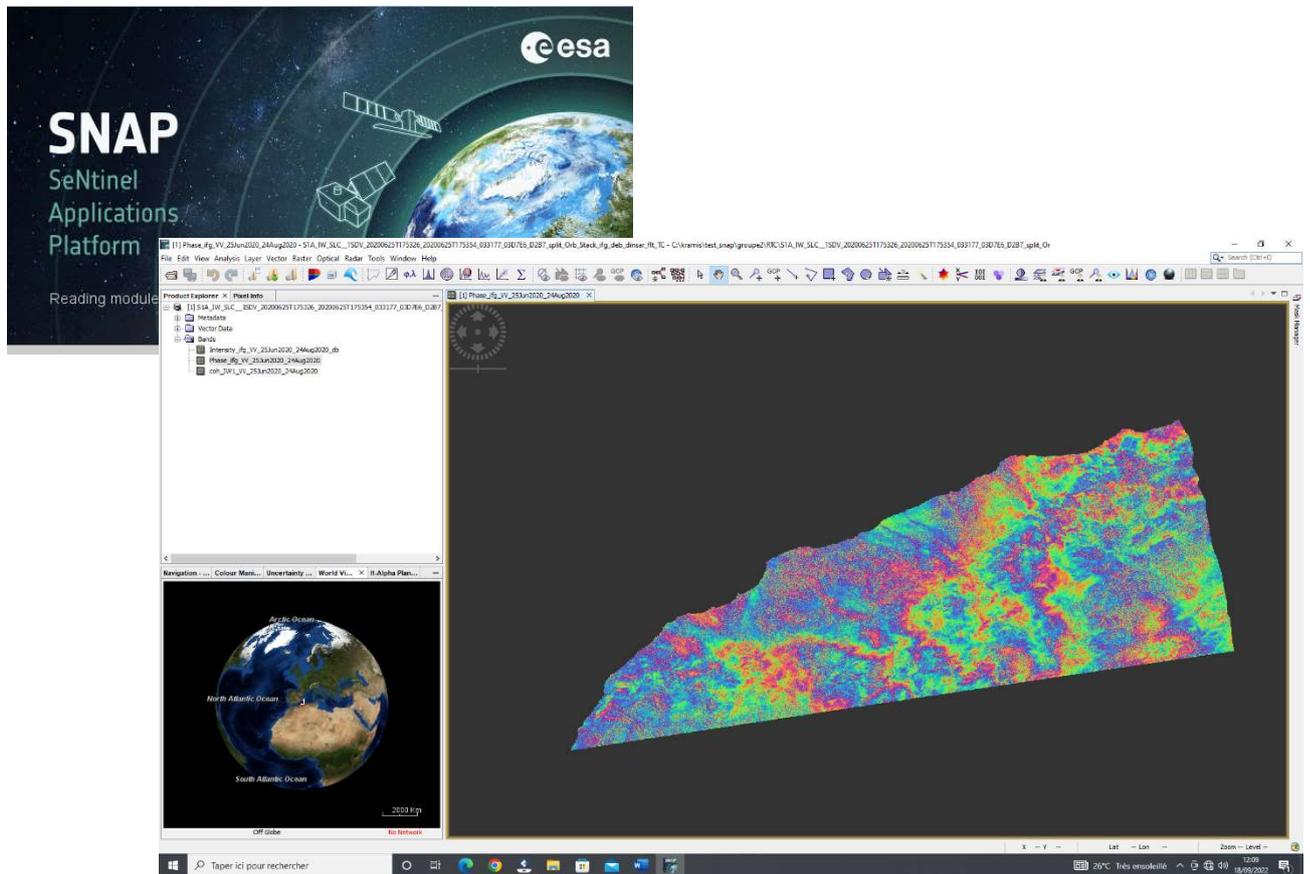


Figure IV.16: Interface du logiciel SNAP.

- **Calage des images (Corregistration) :**

Le calage des images esclaves par rapport à l'image master consiste à déterminer, pour chaque pixel dans une image esclave, son homologue dans l'image master. La position des pixels ( $P$ ) est exprimée en fonction du décalage, par la relation suivante :

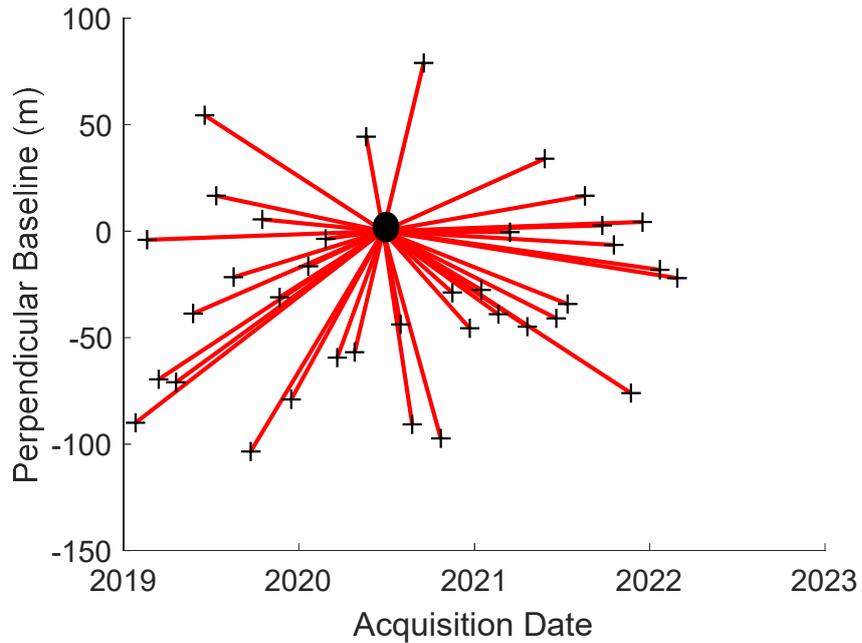
$$P_{slave} (\text{ligne}, \text{colonne}) = P_{master} (\text{ligne}, \text{colonne}) + \text{décalage} (\text{ligne}, \text{colonne})$$

La procédure du calage est réalisée en deux étapes :

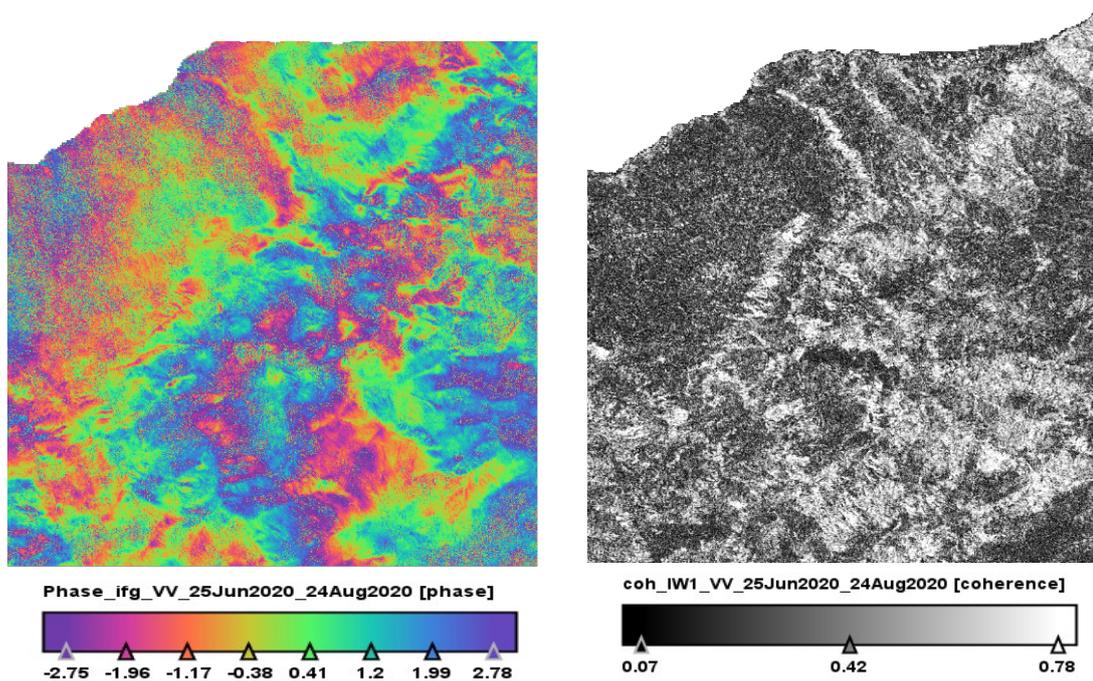
- Un calage grossier, basé sur les orbites précises (où, les images SLC dont la ligne de base perpendiculaire est inférieure à une valeur choisie ; 150m dans notre cas).
- Un calage fin, basé sur la corrélation croisée (une fenêtre de l'image esclave et une fenêtre glissante de l'image master).

- **Génération des interférogrammes :**

Après le calage des 37 images SLC esclaves, dans la géométrie de l'image master, les interférogrammes sont générés. Les figures (IV.17 et IV.18) illustrent la configuration de la distribution spatiale et temporelle des images Sentinel-1A utilisées, et un interférogramme et son image de cohérence, respectivement. Les étapes du traitement multi-temporel, par StaMPS/MTI, sont présentés dans la section suivante (IV.5.3).



**Figure IV.17:** Distribution spatiale et temporelle de l'ensemble de données Sentinel-1A. Le point noir représente l'image master utilisée pour le traitement PS, les croix représentent les images esclaves et les lignes rouges correspondent aux interférogrammes calculés.



**Figure IV.18:** Exemple d'un interférogramme et de l'image de cohérence de la région d'étude, pour la période 25 Juin 2020-24 Août 2020.

- **Estimation de la phase topographique :**

L'estimation de la contribution du relief nécessite un modèle numérique du terrain (MNT). Un MNT de la mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), avec une résolution de 30m, a été utilisé pour cette application, figure (IV.19).

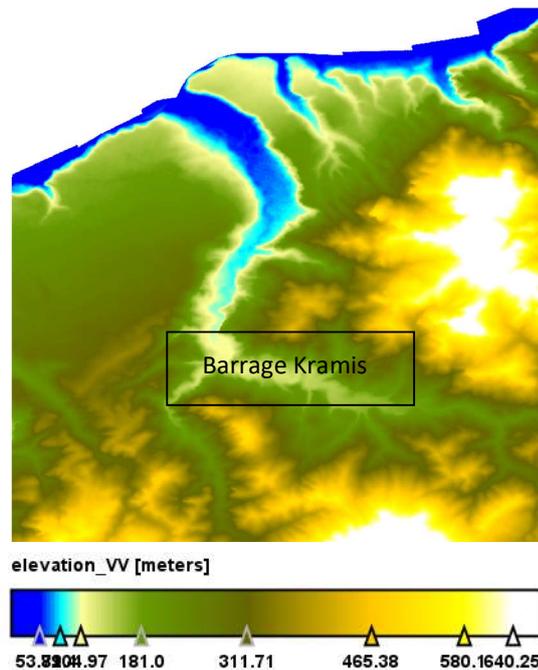


Figure IV.19: Modèle numérique de terrain SRTM de la région d'étude.

- **Geocoding :**

Cette étape consiste à l'extraction des coordonnées géographiques pour le géoréférencement des produits interférométriques. La position de chaque pixel est estimée dans un référentiel géocodé, en utilisant les paramètres orbitaux du satellite Sentinel-1A et le MNT. Dans cette étape, les altitudes dans la géométrie Radar sont converties en hauteurs ellipsoïdiques (GRS-80) qui seront utilisées, dans le traitement PS.

### IV.5.3. Traitement multi-temporel par StaMPS/MTI

StaMPS/MTI (Stanford Method Persistent Scatters/Multi-Temporal Interferometry) est un ensemble de programmes en Matlab, développé à l'Université de Stanford (Etats Unis), [Hooper et al., 2013], qui permet le traitement multi-temporel des interférogrammes, pour l'estimation des cartes de vitesses moyennes de déformation et des séries temporelles de déplacement. Dans ce logiciel, sont implémentées, les deux méthodes interférométriques : PSInSAR et SBAS.

La méthode PS exploite les caractéristiques d'amplitude de chaque image et de phase des paires interférométriques, sélectionnant les pixels persistants et estimant les différentes contributions de phases en termes de déformation, d'atmosphère, de topographie et d'orbite.

Les étapes du programme StaMPS/MTI sont illustrées par la figure (IV.20), [Boudhane & Slimani, 2018].

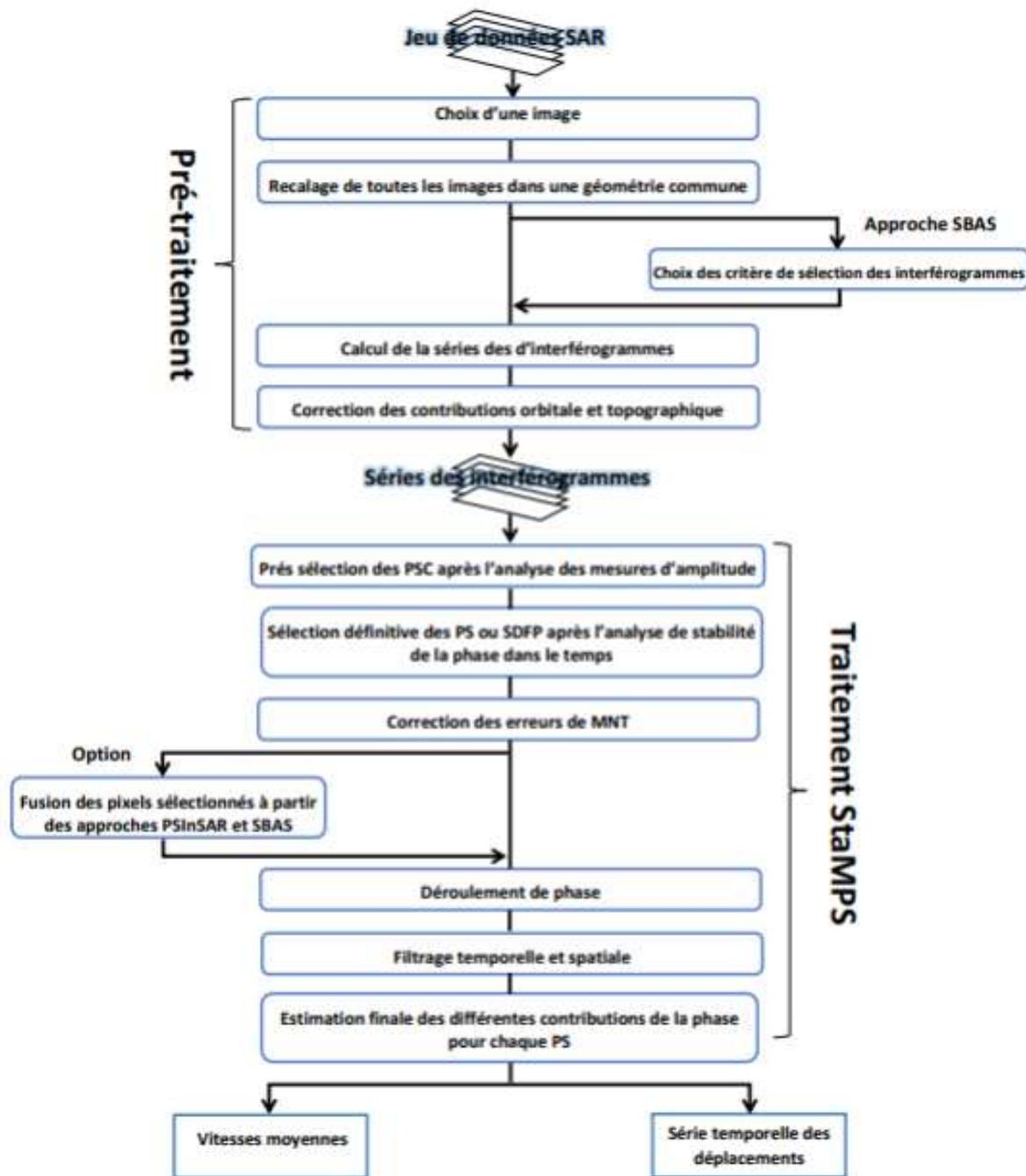


Figure IV.20: Algorithme du logiciel StaMPS/MTI.

- **Identification des candidats diffuseurs persistants (PSC) :**

Les candidats diffuseurs persistants (PSC) sont des points qui constituent une première approximation des pixels PS, basée sur des critères de sélection prédéfinis. [Hooper et al., 2013] proposent d'utiliser un indice de dispersion d'amplitude  $DA=0.4$  (choisi dans cette application). Cela donne la possibilité de sélectionner des pixels PS ayant un indice de dispersion adéquat permettant une stabilité de phase. Une analyse ultérieure de cette phase permettra d'éliminer les PSC dont le bruit est supérieur à un seuil autorisé. Afin de réduire la taille de mémoire, lors du traitement interférométrique, les données sont partagées sur plusieurs patches (sous fenêtres).

Le bruit de phase est estimé, par un filtrage adaptatif passe-bande, appliqué aux pixels PSC sélectionnés précédemment, en estimant dans un premier temps la contribution corrélée spatialement de la phase différentielle, y compris le signal de déformation, le signal atmosphérique et la phase orbitale. Par la suite, l'estimation de la phase liée à l'erreur d'angle d'incidence et non corrélée spatialement, [El Rai & Simonetto, 2010].

- **Sélection des PS :**

Après l'identification des PSC, les pixels PS sont sélectionnés en fonction de la variation de leur phase. Un seuillage est appliqué sur la mesure de cohérence  $\gamma_x$  (qui est une représentation de la stabilité de phase). Le seuil estimé  $\gamma_{thresh}$  est linéairement corrélé avec la valeur de l'indice de dispersion,  $K$  est une constante calculée, par moindres carrés, à partir des mesures réalisées sur les PSC. Seul les pixels PSC ayant une stabilité de phase (mesure de cohérence)  $\gamma_x > K$ , sont conservés comme des pixels PS. Le procédé est itératif et à chaque nouvelle itération, les pixels PSC les plus fiables sont pris en compte pour former la grille. La convergence est atteinte lorsque la variation de la variance des mesures de stabilité de phase est négligeable.

La densité des points PS obtenue est tributaire de plusieurs paramètres : la densité des pixels ayant un bruit aléatoire accepté par  $\text{km}^2$ , le seuil de bruit maximal autorisé pour un pixel et l'écart type de phase. Dans notre cas d'étude, 5487 pixels cohérents ont été sélectionnés couvrants suffisamment la zone d'étude. Les phases différentielles enroulées sur les PS sélectionnées sont représentées, suivant les différentes dates, dans la figure (IV.21).

- **Déroulement de phase :**

Après l'identification des diffuseurs persistents (PS), le reste des pixels est rejeté, les patches sont fusionnés après avoir divisé les interférogrammes en 04 patches, afin de bien gérer l'espace de stockage [Hooper, 2008]. Le déroulement de phase consiste à estimer les fonctions de densité de probabilité dans la dimension spatiale après le déroulement temporel. Cette étape est contrôlée par plusieurs paramètres, tels que le pas de ré-échantillonnage des pixels PS, pour former une grille régulière de points [El Rai & Simonetto, 2010]. La figure (IV.22) illustre les phases différentielles déroulées.

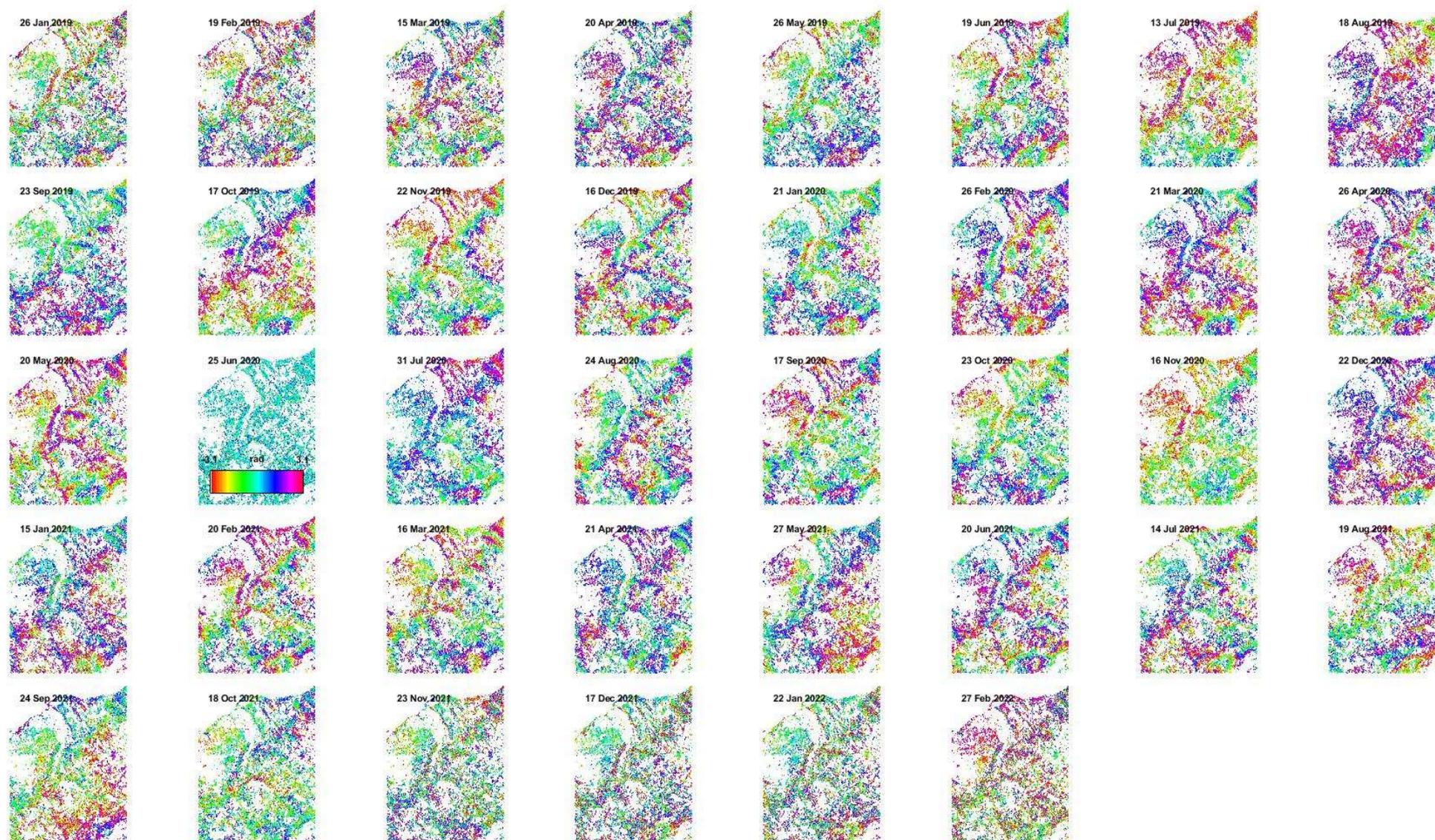


Figure IV.21: Séries temporelles des phases différentielles enroulées des PS identifiés.

- **Estimation du déplacement :**

Après le déroulement de phase, la phase différentielle résultante contient plusieurs contributions: l'erreur d'angle de visée spatialement corrélée, l'imprécision d'orbite et le délai atmosphérique, qui tendent à masquer la phase de déplacement.

- **Estimation de l'erreur d'angle de visée corrélée spatialement (SCLA) :**

L'erreur d'angle de visée est estimée par la méthode des moindres carrés, en utilisant une corrélation avec la ligne de base perpendiculaire. Cette erreur est causée, pratiquement, par l'erreur du MNT spatialement corrélée. La phase corrélée temporellement due au délai atmosphérique et à l'erreur d'orbite de l'image master est estimée (AOE), par un filtre temporel passe-bas [Hooper et al., 2013]. Les résultats de cette estimation sont représentés, dans la figure (IV.23).

- **Estimation de la phase atmosphérique :**

Dans cette application, la correction atmosphérique linéaire a été appliquée, pour réduire la contribution troposphérique (non corrélée spatialement), dans les interférogrammes des PS. Les résultats de cette correction sont montrés, dans la figure (IV.24) et illustrent les interférogrammes du déplacement, corrigés de l'ensemble des contributions estimées.

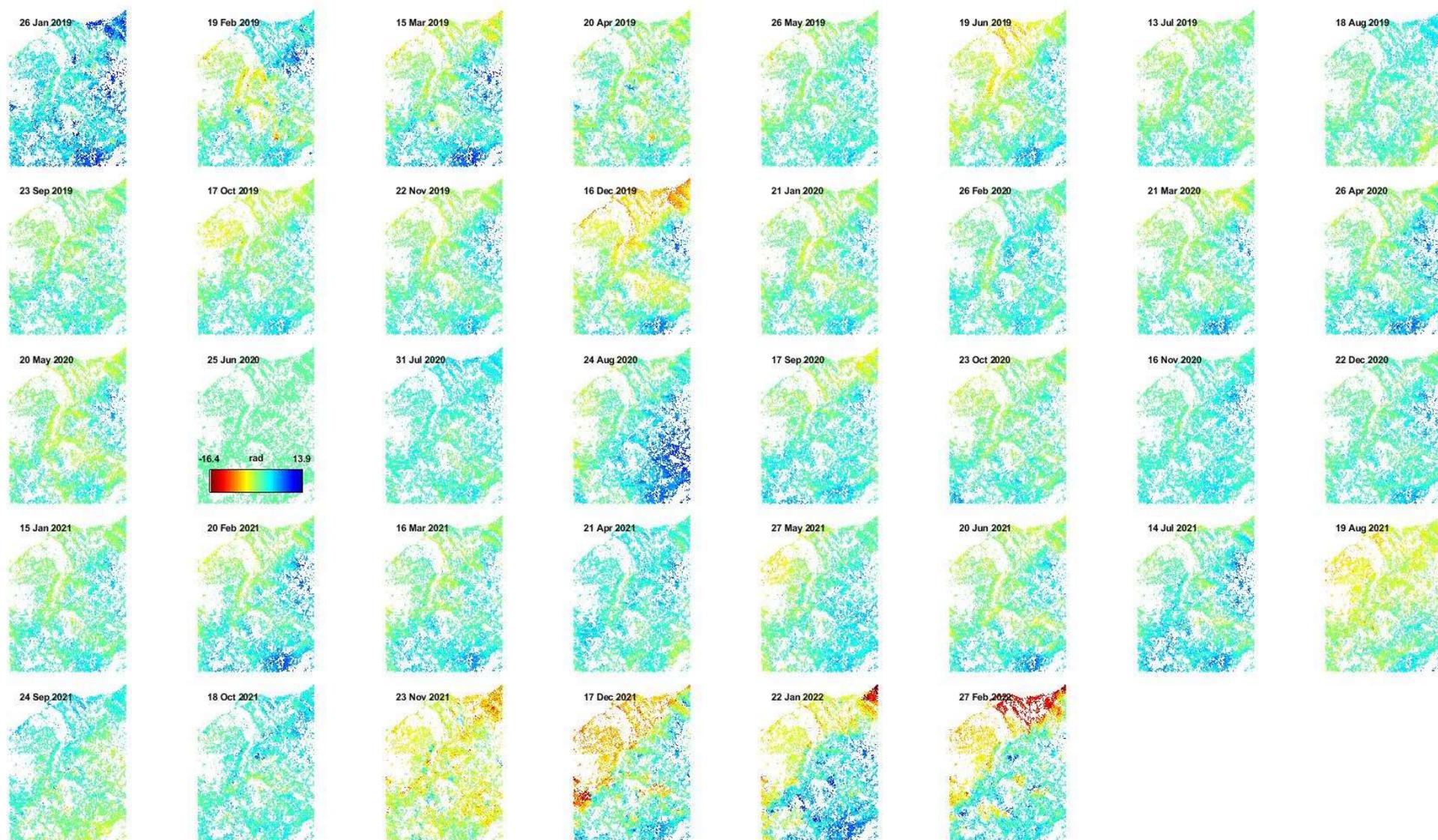


Figure IV.22: Interférogrammes déroulés contenant les PS sélectionnés.

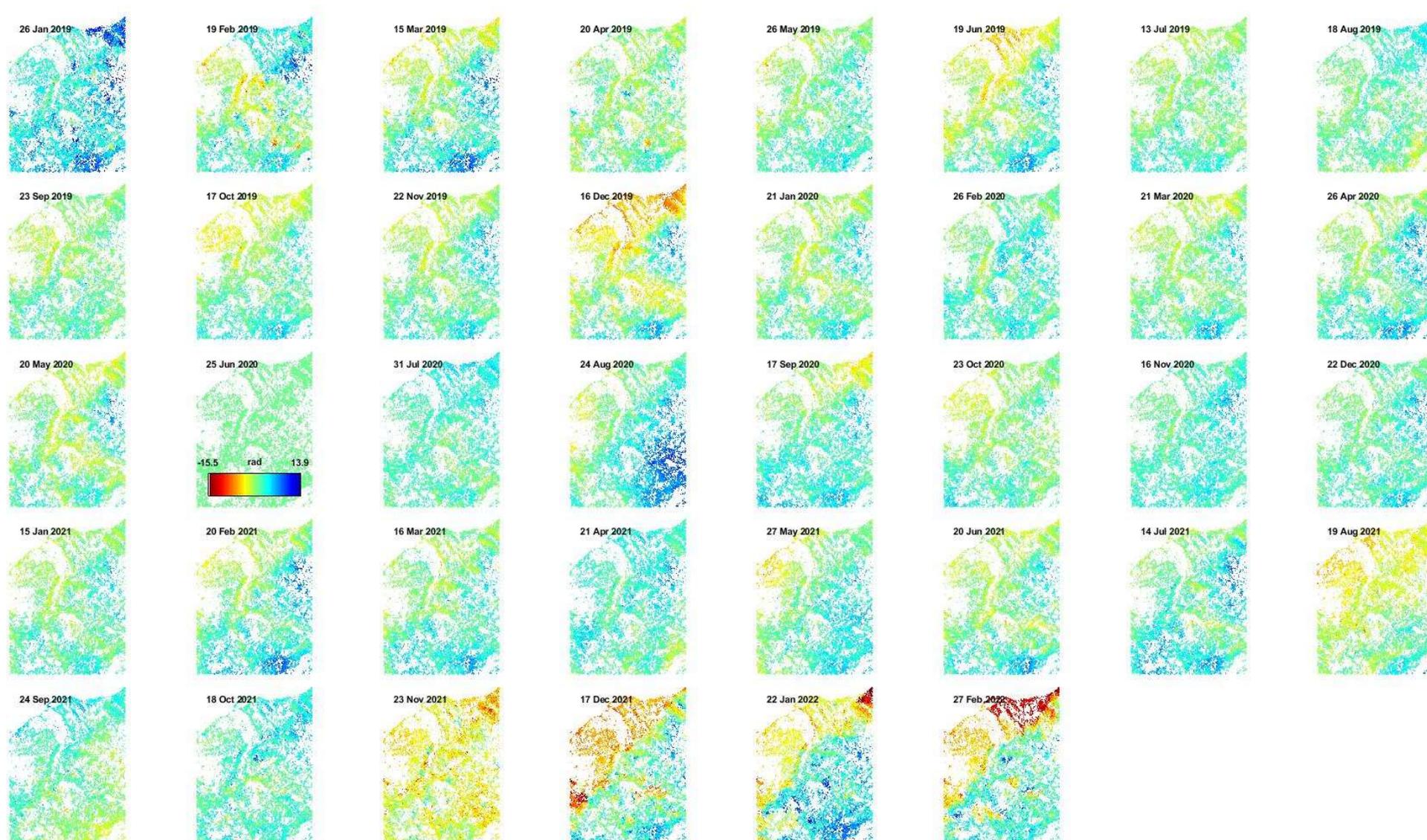


Figure IV.23: Erreurs spatialement corrélés de ligne de visée (SCLA).

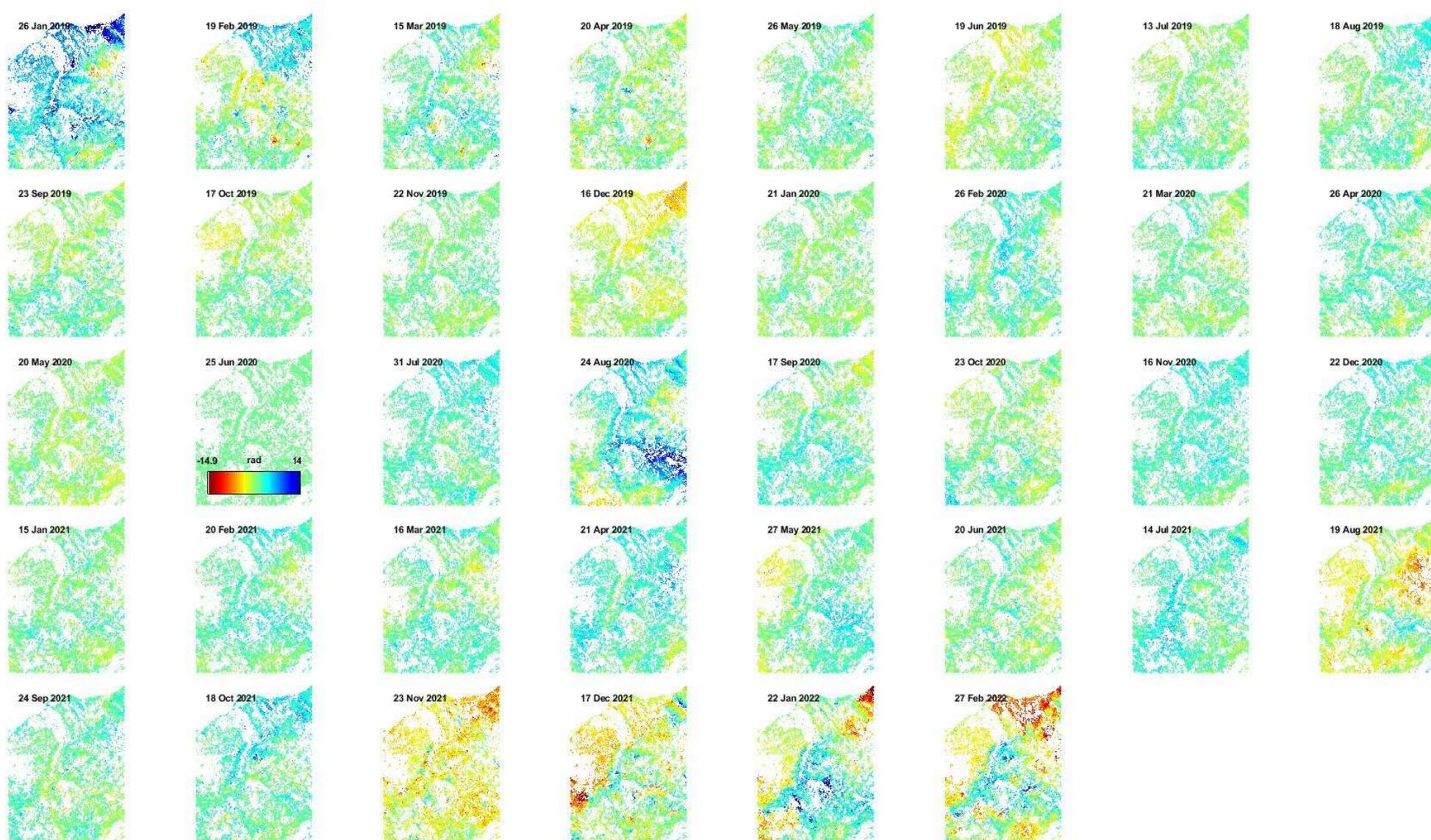


Figure IV.24: Interférogrammes déroulés corrigés des erreurs atmosphériques.

#### IV.5.4. Vitesses moyennes de déformation et les séries temporelles de déplacement LOS

La figure (IV.25.a) montre la vitesse moyenne de déformation, suivant la ligne de visée du satellite (LOS : Line Of Sight), de toute la région du barrage de Kramis, pendant la période 26 janvier 2019 - 27 février 2022. L'amplitude de cette vitesse est de l'ordre de -9.9 à 11.2 mm/an.

La vitesse LOS positive indique que le mouvement du sol est vers le satellite (soulèvement), suivant la ligne de visée. Alors, que la vitesse négative indique un éloignement du satellite (affaissement). Ces phénomènes sont illustrés par une variation de couleur, du rouge au bleu. Les zones relativement stables (avec une vitesse de déplacement presque nulle) sont représentées par une variation de couleur, du jaune au vert.

Concernant, la zone du barrage l'amplitude de la vitesse est de -9.2 à 7.6 mm/an, figures (IV.25.b et c). Sur la figure (IV.25.c), est illustrée la vitesse moyenne de déformation du barrage de Kramis et le réseau d'auscultation GPS. On distingue un affaissement au niveau d'une zone de la digue et un léger gonflement au niveau de la zone de contrepoids, avec une stabilité sur le reste.

Les séries temporelles de déplacement LOS, de quelques points choisis sur des différents endroits du barrage, figure (IV.26), sont représentées suivant la figure (IV.27). Cette dernière, représente la variation de la composante LOS, sur la période d'étude 2019-2022, de ces points, dans un intervalle de -40 à +20 mm.

Afin d'analyser ces séries temporelles, une analyse en ondelettes multi-résolution [Mallat, 1989], a été appliquée, pour extraire les composantes périodiques, notamment, annuelles et semi-annuelles, et la tendance. A travers cette analyse, tableau (IV.4), il a été constaté, d'une part, un phénomène d'affaissement sur la majorité des points choisis, de l'ordre de -3.5 à -0.3 mm/an et d'autre part, un phénomène de gonflement sur quelques points de l'ordre de 0.6 à 1.3 mm/an. Ces phénomènes expriment l'action de la retenue d'eau, sur la zone du barrage. Les termes périodiques, annuel et semi-annuel, sont de l'ordre de, 3 – 5 mm. Ils expriment l'effet saisonnier sur le barrage.

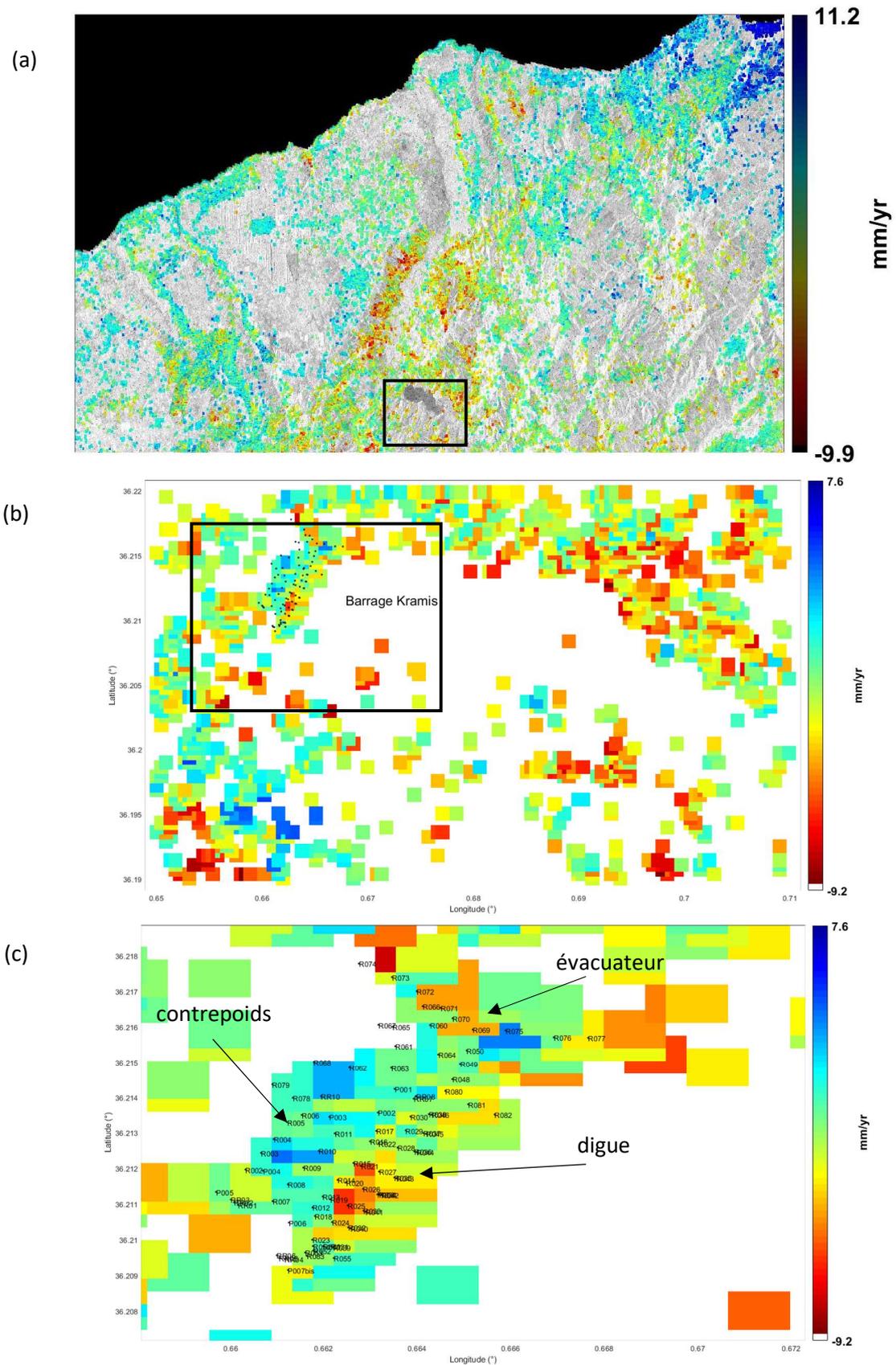


Figure IV.25: Carte de vitesse moyenne de déformation (LOS) de la zone du barrage de Kramis.

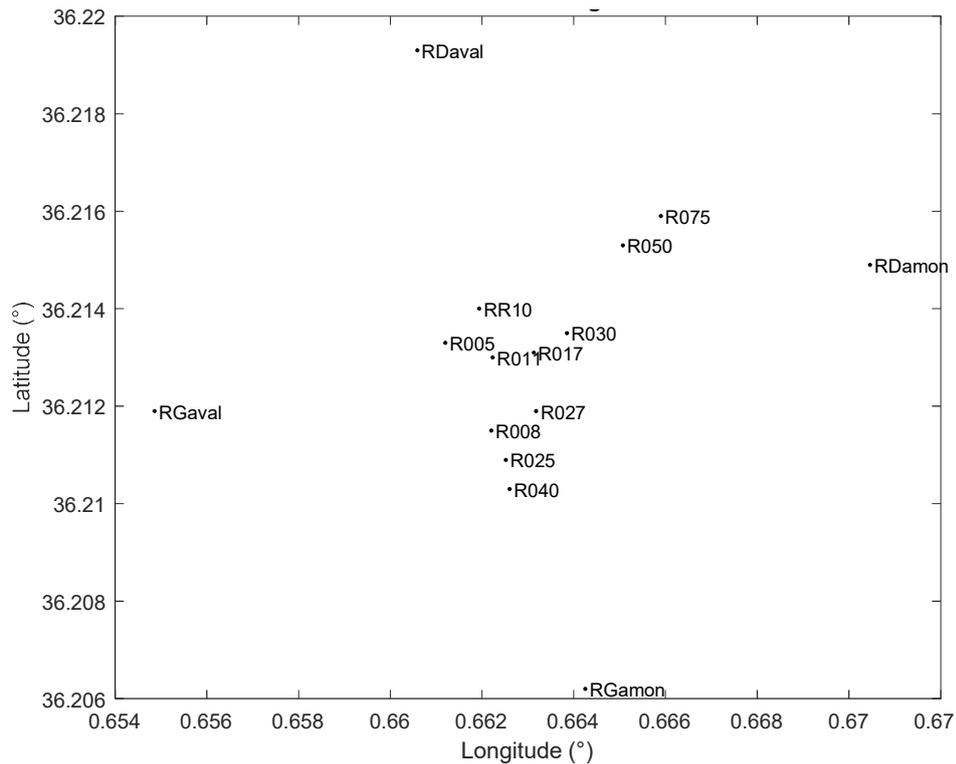


Figure IV.26: Points sélectionnés du barrage de Kramis.

Point ID:	Dép. LOS (mm)	Tendance (mm/an)	Terme annuel (mm)	Terme semi-annuel (mm)
R025	-7.2	-1.2 ± 0.02	3.5	3.5
R027	-8.8	-3.5 ± 0.05	3.7	3.3
R011	-9.0	-0.6 ± 0.02	4.2	3.7
R008	-7.9	0.0 ± 0.00	4.1	3.6
R040	-7.0	-1.5 ± 0.02	3.5	3.4
R005	-9.1	1.3 ± 0.05	4.4	3.7
RR10	-9.1	-0.3 ± 0.02	4.0	4.4
R050	-7.6	-0.9 ± 0.01	4.3	3.8
R075	-7.3	1.0 ± 0.01	4.0	3.4
R017	-9.3	-1.2 ± 0.03	4.3	4.3
R030	-8.7	-1.7 ± 0.02	3.6	3.5
RDamon	-8.0	-2.5 ± 0.03	5.1	5.0
RGamon	-3.7	-2.3 ± 0.04	4.2	5.4
RGaval	-8.8	0.6 ± 0.02	5.0	3.3
RDaval	-9.9	-1.9 ± 0.03	4.6	4.1

Tableau IV.4: Tendance et termes périodiques du déplacement LOS de quelques points du barrage de Kramis.

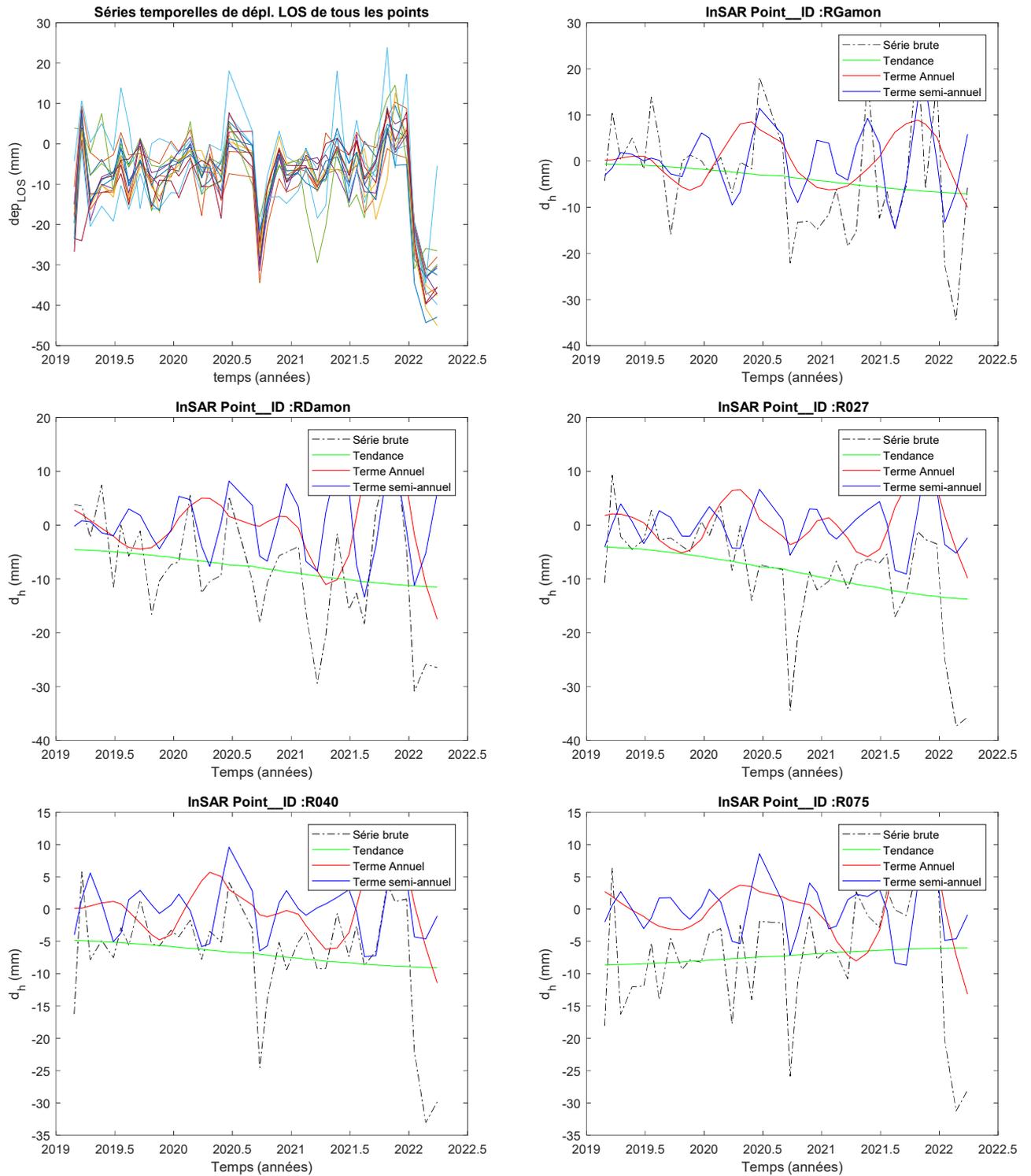


Figure IV.27: Séries temporelles des déplacements LOS de quelques points du barrage de Kramis.

## Conclusion générale

Les travaux menés à travers de mémoire, ont conduit à la représentation et à la visualisation des déplacements et des déformations du réseau d'auscultation du barrage Kramis (Mostaganem), calculées, à partir des données géodésiques GNSS et d'images Radar Sentinel-1A. Le barrage de Kramis fait partie des barrages en enrochement dont le type est le plus prépondérant en Algérie et qui constitue l'ossature de l'infrastructure de gestion hydrique, dans notre pays.

La méthodologie adoptée consiste aux étapes suivantes :

- Traitement des données des trois campagnes d'observations GNSS (2019, 2020 et 2021) du Barrage Kramis, en utilisant le logiciel TBC.
- Calcul des vecteurs de déplacement des points du réseau d'auscultation, entre les différentes époques d'observations.
- Evaluation des tenseurs de déformation et de leurs primitives (dilatation, cisaillement et rotation différentielle), suivant une triangulation de Delaunay du réseau d'auscultation.
- Analyse des incertitudes sur la déformation, par le calcul de degré de significativité.
- Visualisation des différents résultats par le logiciel de Système d'Information Géographique QGIS.
- Traitement interférométrique des 38 images radar de Sentinel-1A, sur la région du barrage, par la méthode PSInSAR, sous le logiciel SNAP.
- Evaluation des vitesses moyennes de déformation et des séries temporelles de déplacement LOS, durant la période 2019-2021, par le logiciel StaMPS/MTI.
- Analyse des séries temporelles de déplacement LOS, par la méthode des ondelettes multi-résolution.

Les résultats obtenus à travers ce travail, ont révélé que :

- Les campagnes d'observations GNSS effectuées, en Juillet 2019, en Novembre 2020 et en Juin 2021, ont permis de déterminer les coordonnées des points du réseau de surveillance, avec une précision millimétrique, ce qui est exigé dans les travaux d'auscultation. Cette qualité est de l'ordre de 0.4 à 1.8 mm, 0.4 à 1.9 mm et 0.4 à 1.7 mm, en composantes planimétriques et de l'ordre de 4.5 à 11mm, 4.1 à 10 mm et 4.3 à 8.1 mm, en composante verticale, respectivement.
- En termes de déplacements planimétriques, entre les deux périodes Juillet 2019 - Novembre 2020 et Juillet 2019 - Juin 2021, le barrage a subi des mouvements, de l'ordre de 12mm, avec une tendance tangentielle et de l'ordre de 11mm, avec une tendance radiale, respectivement. Généralement, pendant toute la durée de la période (2019-2021), le

déplacement moyen diminue graduellement de la crête (de R50 à R31), passant par le corps de la digue (de R30 à R18), avec une légère augmentation dans la zone de contrepoids (de R17 à R7).

- En ce qui concerne des tenseurs de déformation, durant cette période, les résultats ont montré la présence de deux phénomènes de compression et de dilatation sur la zone du barrage. La zone de compression concerne la crête de la digue, la première berme et toute la rive droite. La zone de dilatation s'étale de la deuxième berme de la digue jusqu'au pied du contrepoids. En effet en 2021, et après avoir été complètement desséché, le barrage a connu un remplissage de quelques mètres. Ceci a causé l'action de la pression hydrostatique de la retenue sur la digue. Malgré sa faible intensité, les effets de cette pression ont causé ces phénomènes de compression et dilatation. Aussi un phénomène de rotation de bloc entre la digue et la partie de la rive droite aval a été observé.
- L'analyse statistique des tenseurs, en termes de significativité, a montré que les déformations enregistrées, notamment, sur la digue du barrage restent faibles et par conséquent, le barrage Kramis est considéré stable.
- L'efficacité de l'utilisation de la technique InSAR, dans l'estimation des déformations LOS (vitesses moyennes et séries temporelles de déplacement), de la région du barrage. L'amplitude de la vitesse de déformation est de l'ordre de -9.2 à 7.6 mm/an, où on distingue un affaissement au niveau d'une zone de la digue et un léger gonflement au niveau de la zone de contrepoids, avec une stabilité sur le reste.

Néanmoins, le thème de ce mémoire reste ouvert à d'autres aspects et considérations et ouvre le chemin vers des perspectives, telles que :

- Utilisation des images Radar, d'au moins de deux passages de Sentinel-1, sur la région du barrage de Kramis, pour la déformation Radar 2D et 3D.
- Comparaison entre les résultats GNSS et InSAR.
- S'appuyer sur des données géotechniques du barrage, pour étayer les résultats obtenus.
- Application et généralisation de cette étude sur d'autres barrages en Algérie, notamment, les barrages en béton.

## Références bibliographiques

1. Boudhane & Slimani, 2018: Combinaison PSinSAR/SBAS pour une estimation optimale des déplacements multi-temporelles en zone urbaine : cas de Wilaya d'Oran. Mémoire d'Ingénieur, CTS – Arzew.
2. Alain P., 2013 : Analyse numérique du comportement sismique d'un barrage en enrochement avec un noyau en béton bitumineux, Maitrise en Sciences Appliquées, Université de Montréal, Canada.
3. ANBT, 2006. Réalisation du barrage de Kramis. Monographie, Constructeur : Astaldi S.p.a (Italie), Projet et surveillance des travaux : Inco-Mag (Italie), Avril 2006.
4. Baghzim, H. 2015. Etude numérique de la conception des barrages en terre, Mémoire de Master, Université de Biskra, Algérie.
5. Belhadj A., Ghezali B., Kahlouche S., 2012: Triangulation of Delaunay: Application to the deformation monitoring of geodetic network by use of strain tensors. Proceeding of FIG Working Week 2012, TS03F - Deformation Monitoring I, Rome, Italy
6. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E., 2002. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, No. 11.
7. Berber M., 2006: Robustness Analysis Of Geodetic Networks. PhD thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering University of New Brunswick.
8. Castan, 1975 : Remblais rocheux expérimentaux. Laboratoire régional de Lyon, France.
9. Champenois J, 2011 : Caractérisation des déformations tectoniques inter-sismiques de l'île de Taiwan par interférométrie radar. PhD en Géophysique, Université Paris-Est.
10. Cherif S., Bouhassane M., 2013 : Étude comparative des barrages à noyau central. Master en Génie civil, Faculté de Technologie Tlemcen.
11. Christian Kert, 2008 : Amélioration de la sécurité des barrages et ouvrages hydrauliques.
12. Colesanti C, Mouelic S L, Bennani M; Raucoules D, Carnec C, Ferretti A, 2005: A Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers technique: A case study in the east of France. Int. J. Remote Sens. 2005, 26, 201–207.
13. Comité suisse des barrages, 2005 : Dispositif d'auscultation des Barrages Concept, fiabilité et redondance. Groupe de travail pour l'observation des barrages, Suisse.
14. El Rai, M. C. & Simonetto, E. (2010). Mesure des déformations du sol par la méthode des réflecteurs permanents StaMPS. Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, ESGT – CNAM.

15. Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F., 2001: Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. RemoteSens.* 2001, 39, 8–20.
16. Gourine B., 2004 : Ajustement avec contraintes du réseau géodésique National. Application: réseau de Base. Mémoire de Magister en Géodésie, CNTS – Arzew, 2004.
17. Vanicek P., Craymer M.R., Krakiwsky E.J., 2001: Robustness analysis of geodetic horizontal networks. *Journal of Geodesy* 75, pp 199-209.
18. Hamriche H., 2013 : Etude de l'évolution de certaines grandeurs physiques d'un barrage en terre. Thèse Magistère, Université de Batna.
19. Hanssen, R.F., 2001: *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic; Springer: Dordrecht, The Netherlands.
20. Heragmi, A. 2009 : Choix et conception de l'organe de l'étanchéité des barrages en terre, barrage el-Agrem Jijel. Mémoire de Magister, Université de Annaba, Algérie.
21. Hooper, A., Bekaert, D., & Spaans, K., 2013: *StaMPS/MTI Manual Version 3.3b1*. University of Leeds. <http://homepages.see.leeds.ac.uk/earahoo/stamps/>.
22. Hooper, A., Segall, P., and Zebker, H. 2007: Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis with application to Volcan Alcedo, Galapagos. *Journal of Geophysical Research*, 112(B07407).
23. Kampes B M, 2006 : *Radar Interferometry: Persistent Scatterers Technique*. The Netherlands: Springer.
24. Larbi, M & Mezoudji, F. 2014 : Analyse des déformations des barrages en enrochements. Mémoire de Mastère : Université de Tlemcen, Algérie.
25. Maalel, K & Hafsia, Z. 2012 : Polycopié du cours Ouvrages hydrauliques. Ecole nationale d'ingénieur de Tunis. Tunisie.
26. Mallat S., 1989: A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Trans Pattern nal* 11(7):674–693
27. Messaid, B. 2009 : Etude de la position efficace des drains dans les barrages en terre. Thèse de doctorat, Université de Batna, Algérie.
28. Michel V, Person T., 2003: From geodetic monitoring to deformation tensors and their reliability. *Proceedings of 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece*.
29. Michel V., 2001: *Utilisation des tenseurs pour la représentation des déformations et de leur degré de signification*. Rapport de stage de 3<sup>ème</sup> année du cycle ITGCE, ENSG, France, Octobre 2001.
30. Paul, R.& al. 2012 : Les mesures d'auscultation : principes et outils - le rapport d'auscultation, Dam monitoring : principles and tools - The monitoring report. Colloque

- Technique CFGB, Aix-en-Provence, France.
31. EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne), 2002 : Cours Barrages (barrages en remblai types et matériaux).
  32. Rapport CTS n°1, 2019 : Rapport technique de l’opération Zéro, du projet Auscultation géodésique du barrage de Kramis (W. Mostaganem) par l’outil spatial : GNSS et Interférométrie Radar. CTS, Décembre 2019.
  33. S. Azmi, Ami Hassan MD DIN, 2022: processing sentinel-1a images using sentinel application platform software to generate interferogram for measure ground deformation in kelantan. Environmental Science Journal of Information System and Technology Management.
  34. Talatizi, A. 2014 : Etude des infiltrations à travers une digue de barrage en terre, cas d’un barrage algérien. Mémoire de Magister, Université Mouloud Maamri de Tizi Ouzou, Algérie.
  35. TBC, 2017: Manual Trimble Business Centre v3.7 – Planning, Processing and Adjusting GNSS Networks.