

Analyse des déformations du réseau d'auscultation par GPS du barrage de Kramis (Mostaganem), durant la période 2019-2021

GOURINE Bachir¹, ABDELHAK Mohamed Anis² et DAR SEBA Mohamed²

¹Ecole Nationale Supérieure des Sciences Géodésiques et des Techniques Spatiales (ENSGTS), BP 14, 31204, Arzew, Algérie

²Centre des Techniques Spatiales (CTS), BP 13, 31204, Arzew, Algérie
bachirgourine@yahoo.com

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 revêt 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.

Le présent article traite l'analyse des déformations du réseau d'auscultation du barrage en remblai de Kramis qui se situe au Nord Est de la Wilaya de Mostaganem. Les campagnes d'observations GNSS ont été effectuées, dans le cadre du projet de collaboration CTS/ANBT sur l'auscultation géodésique par l'outil spatial (GNSS et InSAR) de ce barrage, entre 2019 et 2021. Le travail effectué a concerné le traitement de ces campagnes moyennant le logiciel TBC (Trimble Business Center). L'évaluation des champs de déformations horizontales et verticales (vecteurs de déplacement, tenseurs de déformation) est réalisée sur une triangulation de Delaunay des points de mesures. Pour faciliter l'interprétation des résultats, les primitives de déformation (Dilatation, Cisaillement, Rotation différentielle) sont calculées et représentées, par l'utilisation d'un programme développé, sous Matlab, dénommé « DamDeform_Kramis ». Il permet aussi l'analyse statistique des incertitudes sur ces déformations, basée sur la méthode de Monté Carlo, pour qualifier leur significativité. Pour une meilleure visualisation des différents résultats, le logiciel QGIS a été employé. Les résultats obtenus ont montré que les mouvements planimétriques du barrage, entre les deux périodes Juillet 2019- Novembre 2020 et Juillet 2019- Juin 2021, sont de l'ordre de 12 mm, avec une tendance tangentielle et de l'ordre de 11 mm, avec une tendance radiale, respectivement. Le déplacement moyen diminue graduellement de la crête, passant par le corps de la digue, avec une légère augmentation dans la zone de contrepoids, respectivement, de 13 mm, 5 mm et 8 mm. En termes de tenseurs de déformation, les résultats ont montré la présence de deux phénomènes de compression et de dilatation sur la zone du barrage, ainsi qu'un phénomène de rotation de bloc entre la digue et la partie de la rive droite aval. L'analyse statistique des différents résultats a révélé que les déformations enregistrées, notamment, sur la digue du barrage restent faibles et par conséquent le barrage est stable.

Mots-clés : Barrage, Auscultation géodésique, GNSS, Tenseur de déformation, Degré de significativité.

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

This article deals with the analysis of the deformations of the auscultation network of the embankment dam of Kramis which is located in the North East of the Wilaya of Mostaganem. The GNSS observation campaigns were carried out, within the framework of the CTS/ANBT collaboration project on geodetic auscultation by the space tool (GNSS and InSAR) of this dam, between 2019 and 2021. The work carried out concerned the processing of these campaigns, by the TBC software (Trimble Business Center). The evaluation of the horizontal and vertical deformation fields (displacement vectors and deformation strains) is performed on a Delaunay triangulation of the measurement points. To facilitate the interpretation of the results, the primitives of deformation (Dilation, Shear, Differential rotation) are calculated and represented, using a program developed, under Matlab, called

“DamDeform_Kramis”. It also allows the statistical analysis of the uncertainties on these deformations, based on the Monte Carlo method, to qualify their significance. For a better visualization of the different results, the QGIS software was used. The results obtained showed that the planimetric movements of the dam, between the two periods July 2019- November 2020 and July 2019- June 2021, are of the order of 12 mm, with a tangential trend and of the order of 11mm, with a radial trend, respectively. The average displacement gradually decreases from the crest, passing through the body of the dike, with a slight increase in the counterweight area, respectively, of 13 mm, 5 mm and 8 mm. In terms of strain tensors, the results showed the presence of two phenomena of compression and dilation on the dam area, as well as a phenomenon of block rotation between the dike and the part of the downstream right bank. The statistical analysis of the different results revealed that the deformations recorded, in particular, on the embankment of the dam remain weak and consequently the dam is stable.

Keywords : Dam, Geodetic auscultation, GNSS, Strain tensor, Degree of significance.

1. Introduction

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), 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 [17], [9] : le vecteur déplacement et le tenseur de déformation. Cependant, l'évaluation et la représentation des déplacements et des déformations dépendent, respectivement, du repère de référence (choix des points d'appui) et de la configuration des figures sélectionnées qui composent la structure géométrique du réseau. Ces contraintes rendent difficile l'interprétation des résultats obtenus [6]. 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 ?.

D'après les travaux de [7], l'aspect d'évaluation des primitives de déformation 2D et de leur significativité, sur un réseau géodésique, a été abordé.

Cependant, l'aspect de représentation et de visualisation cartographique de ces déformations a été développé dans [3].

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

L'application a concerné la zone d'étude du barrage de Kramis (Wilaya de Mostaganem).

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 et (ii) l'évaluation de la déformation ainsi que l'analyse statistique et la visualisation de cette déformation. Dans ce contexte, un programme a été développé sous Matlab, dénommé «DamDeform_Kramis» et le logiciel QGIS a été utilisé, pour concrétiser la méthodologie élaborée.

2. Méthodologie

2.1. 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 a 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 2D, [8] :

$$\delta(x, y) = \begin{bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{bmatrix} \quad (1)$$

autour d'un point de coordonnées (x, y) , le tenseur de déformation $E(x, y)$ est déterminé par le gradient du déplacement évalué en ce point [4] :

$$E(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix}_{(x,y)} = \begin{bmatrix} \epsilon_{ux} & \epsilon_{uy} \\ \epsilon_{vx} & \epsilon_{vy} \end{bmatrix}_{(x,y)} \quad (2)$$

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 [15], [13] :

$$E = S + A$$

$$\text{où} \quad S = \begin{bmatrix} \epsilon_{ux} & \frac{1}{2}(\epsilon_{uy} + \epsilon_{vx}) \\ \frac{1}{2}(\epsilon_{uy} + \epsilon_{vx}) & \epsilon_{vy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{ux} & \epsilon_{uy} \\ \epsilon_{vx} & \epsilon_{vy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2}(\epsilon_{uy} - \epsilon_{vx}) \\ \frac{1}{2}(\epsilon_{uy} - \epsilon_{vx}) & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{xz} \\ \omega_{xz} & 0 \end{bmatrix}$$

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 et la contraction, ainsi que le glissement. Cette matrice est diagonalisable puisque symétrique. On la représente le plus couramment par une ellipse dont les paramètres sont définis par les vecteurs

propres et les valeurs propres de la matrice S . Les contraintes principales sont les valeurs propres de $S(e_1, e_2)$ et les vecteurs propres sont les directions des axes principaux. Une contrainte négative correspond à une contraction, une contrainte positive à une expansion. L'expression des valeurs propres ou contraintes principales est obtenue par [6] :

$$\begin{cases} e_1 = \frac{e_{ux} + e_{vy}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(e_{ux} - e_{vy})^2 + (e_{uy} + e_{vx})^2} \\ e_2 = \frac{e_{ux} + e_{vy}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(e_{ux} - e_{vy})^2 + (e_{uy} + e_{vx})^2} \end{cases} \quad (4)$$

Le tenseur de déformation est défini par ses composantes e_1 et e_2 et son orientation θ du la composante e_1 :

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{uy + e_{vx}}{vy - e_{ux}} \right) \quad (5)$$

Les paramètres de déformation que l'on peut définir à partir de ce tenseur symétrique sont la dilatation et le cisaillement [16].

On définit la dilatation en un point comme étant l'extension ou la contraction moyenne géométrique des contraintes principales.

$$\sigma = \frac{1}{2}(e_1 + e_2) = \frac{1}{2}(e_{ux} + e_{vy}) \quad (6)$$

On peut également définir une quantité analogue la dilatation totale, comme étant la moyenne géométrique des contraintes principales.

$$\lambda = \sqrt{e_1^2 + e_2^2} = \sqrt{e_{ux}^2 + e_{vy}^2 + \frac{1}{2}(e_{uy} + e_{vx})^2} \quad (7)$$

La contrainte de cisaillement peut être scindée en deux catégories : le cisaillement pur et le cisaillement simple. Le cisaillement pur τ déforme un carré en rectangle, alors que le cisaillement simple ν déforme un rectangle en losange. Aucun type de cisaillement ne provoque de rotation. On peut également définir un cisaillement total γ qui est la moyenne géométrique des cisaillements purs et simples définis ci-dessus.

$$\begin{cases} \tau = \tau_{xy} = -\tau_{yx} = \frac{1}{2}(e_{ux} - e_{vy}) \\ \nu = \nu_{xy} = \nu_{yx} = \frac{1}{2}(e_{uy} + e_{vx}) \\ \gamma = \gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \nu_{xy}^2} = \frac{1}{2} \sqrt{(e_{ux} - e_{vy})^2 + (e_{uy} + e_{vx})^2} \end{cases} \quad (8)$$

Les axes principaux du tenseur définissent les directions dans lesquelles aucun cisaillement n'a lieu. Les directions dans lesquelles se produisent les cisaillements maximaux sont inclinées de 45° par rapport aux axes principaux. La magnitude du cisaillement total peut être indirectement déterminée par la demi-différence des deux contraintes principales (valeurs propres de S). La partie antisymétrique du tenseur peut être comprise comme une rotation d'angle ω . Elle est liée au rotationnel du champ de déplacement. On définit alors la rotation par :

$$\omega = -\frac{e_{uy} - e_{vx}}{2} \quad (9)$$

Cette rotation se décompose en une partie rigide qui correspond à la rotation globale du terrain d'étude et une rotation différentielle qui dépend de la position. Soit Ω la rotation globale du terrain d'étude, à savoir la moyenne des ω sur le terrain d'étude. On définit alors la rotation différentielle propre par $\delta\omega$:

$$\delta\omega = \omega - \Omega = -\frac{e_{uy} - e_{vx}}{2} - \Omega \quad (10)$$

Ce choix n'est pas fortuit car il se base sur des études faites par [16] 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).

2.2. Significativité des tenseurs de déformations

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 [7].

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 [5]. 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 :

$$Def = M + T \quad (11)$$

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 [7] :

$$\begin{aligned} \lambda_{def} &= \bar{\lambda} + 2,57\sigma_\lambda \\ \gamma_{def} &= \bar{\gamma} + 2,57\sigma_\gamma \\ \delta\omega_{def} &= \overline{\delta\omega} + 2,57\sigma_{\delta\omega} \end{aligned} \quad (12)$$

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) ;

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

Enfin, à partir de la déformabilité, le degré de signification (Σ) des tenseurs de déformation peut être défini pour chaque primitive de déformation réelle ($\lambda, \gamma, \delta\omega$) par les relations suivantes :

$$\Sigma_\lambda = \frac{\lambda - \lambda_{def}}{\lambda_{def}} ; \Sigma_\gamma = \frac{\gamma - \gamma_{def}}{\gamma_{def}} ; \Sigma_{\delta\omega} = \frac{\delta\omega - \delta\omega_{def}}{\delta\omega_{def}} \quad (13)$$

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.

Pour plus ample d'informations sur cette partie, voir [4].

3. Résultats et analyse

3.1. Programme développé

Le programme "DamDeform_Kramis" a été réalisé, sous

MATLAB version 7.9, au niveau de l'ENSGTS. Il permet d'effectuer la représentation de la déformation sur les réseaux géodésiques bidimensionnels (2D et 1D), suivant la notion de triangulation de Delaunay, [1]. L'objectif du programme est de calculer, de représenter et d'analyser la déformation du réseau d'auscultation du barrage de Kramis. L'objectif du programme est de calculer, de représenter et d'analyser la déformation du réseau d'auscultation du barrage de Kramis.

Le terme déformation comprend : les vecteurs de déplacement (2D et 1D) et les tenseurs de déformation. Ces derniers englobent la dilatation/compression, le cisaillement et les rotations différentielles. L'analyse des incertitudes de la déformation s'effectue par le calcul du degré de significativité. La (figure 1) illustre l'organigramme du programme développé DamDeform_Kramis et l'organigramme de visualisation des résultats, sous le logiciel QGIS.

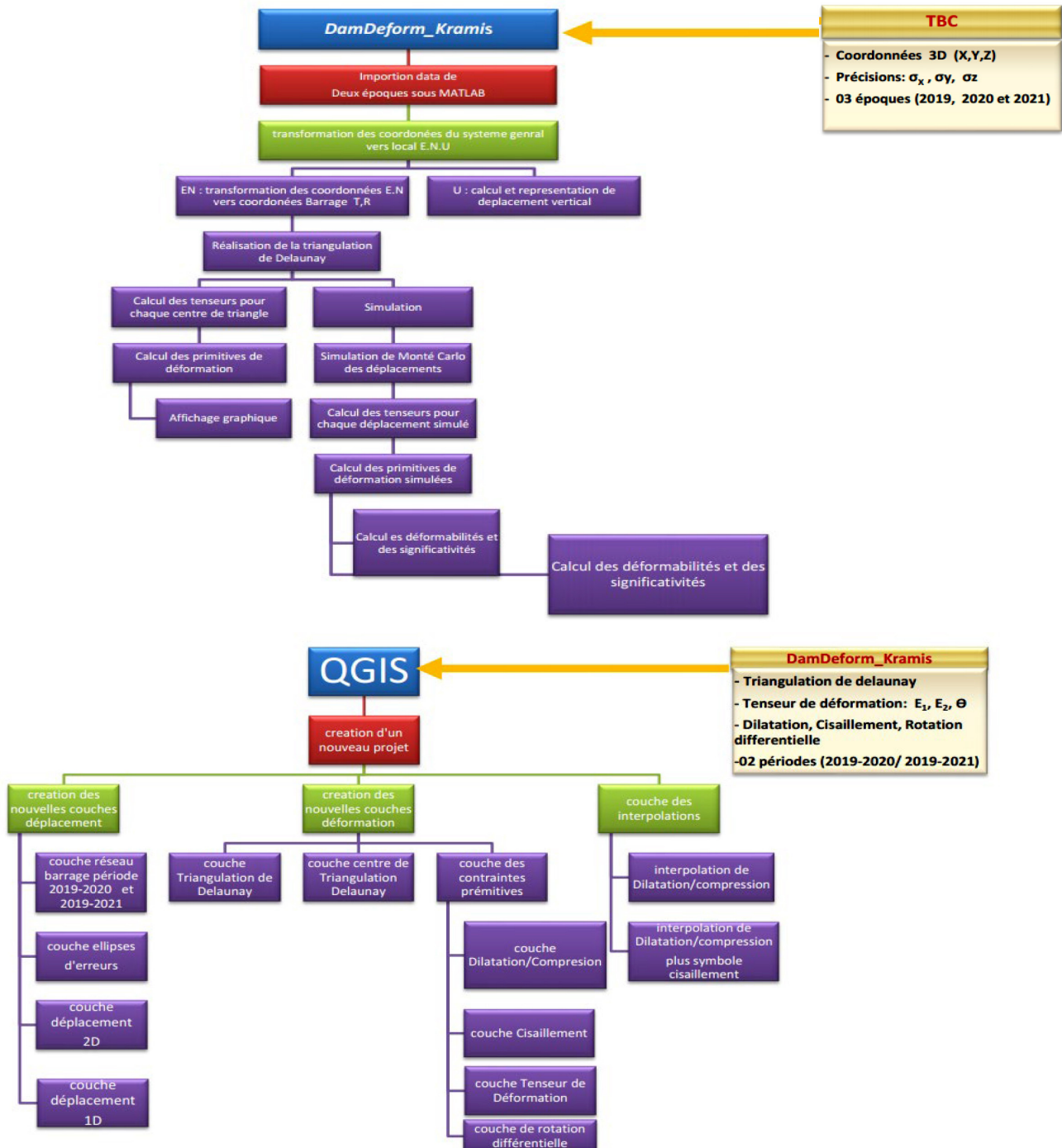


Fig. 1 (a) Organigramme du programme développé DamDeform_Kramis (b) Organigramme de visualisation des résultats sous le logiciel QGIS, [1]

3.2. Zone d'étude

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 80 km à l'Est de la ville de Mostaganem et de 14 km environ de son embouchure avec la mer Méditerranéenne, [2]. 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 2).

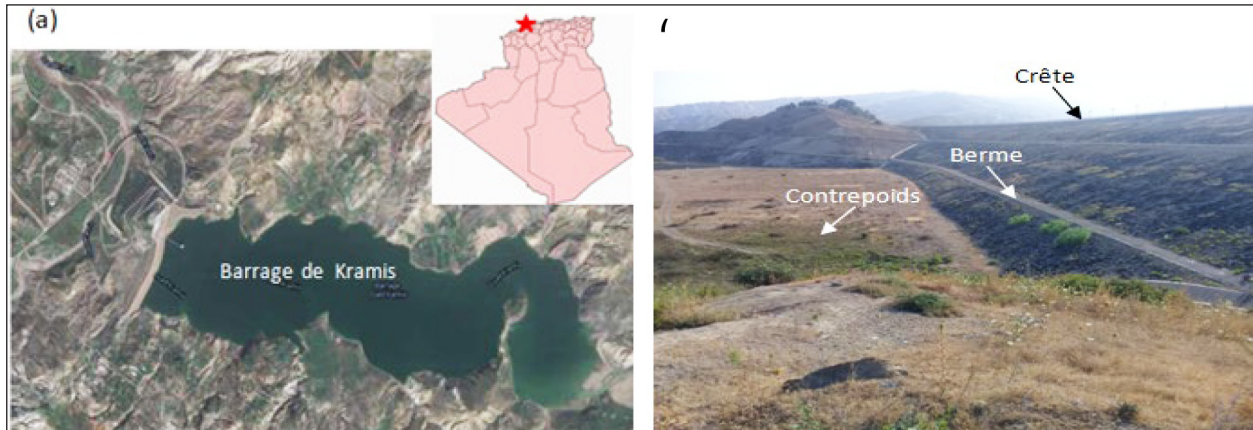


Fig. 2 (a) Localisation géographique du barrage de Kramis (b) Photo de la digue du barrage de Kramis (Avril 2019)

3.3. Données et traitement GNSS

Les données ont concernées celles des trois campagnes d'observations GNSS, de 2019, 2020 et 2021, [10], [11] et [12]. 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 [10] :

- 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.

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 3).

Le dispositif d'auscultation géodésique est composé de 107 points (70 points existants et 37 points nouveaux

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 .

matérialisés dans le cadre du projet CTS/ANBT), (figure 4). 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 celui de la station 305 Bis (CTS, Arzew).

Le traitement des données des trois campagnes d'observations GNSS a été effectué, par le logiciel TBC (Trimble Business Center v3.90), [14]. 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 planes UTM (*E* : Easting, *N* : Northing) et verticale (*h* : height), coordonnées géographiques et coordonnées cartésiennes géocentriques, exprimées par rapport au système géodésique WGS-84. Le réseau a été rattaché au point de référence 305 Bis (Arzew, Oran).

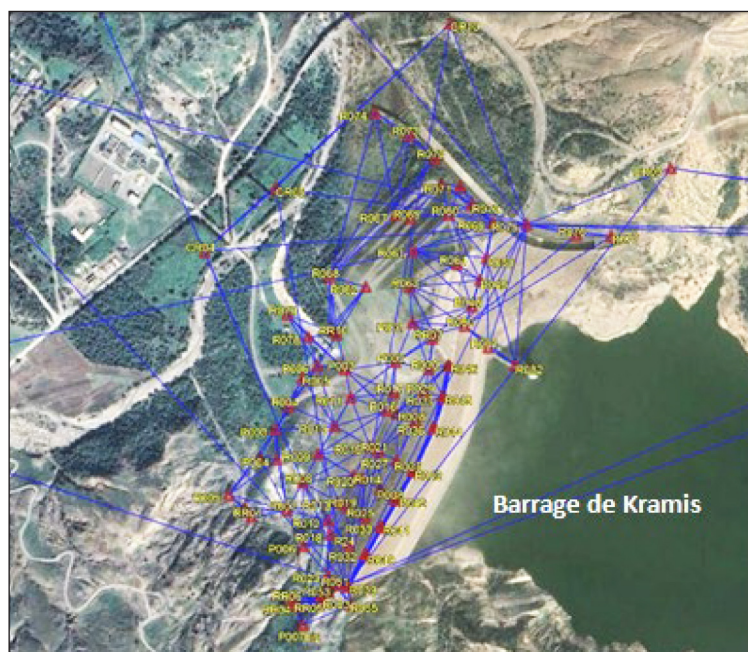


Fig. 3 Réseau d'auscultation du barrage de Kramis et configuration des sessions d'observations GNSS

Le (tableau. 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.

Tab 1. Précision des coordonnées géodésiques planes UTM (E, N) et verticale (h), et éléments des ellipses d'erreurs absolues des points du réseau d'auscultation, suivant les trois campagnes GNSS

	Précisions			Ellipses d'erreur	
	σ_E (mm)	σ_N (mm)	σ_h (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

3.4. 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. Le choix de représentation graphique des différents résultats de déformations est inspiré des travaux de recherche de [3].

• Vecteurs de déplacements 2D :

La (figure 4) illustre les vecteurs de déplacement 2D, entre les deux campagnes GNSS, exprimés dans un repère barrage (T : Tangentiel, R : Radial).

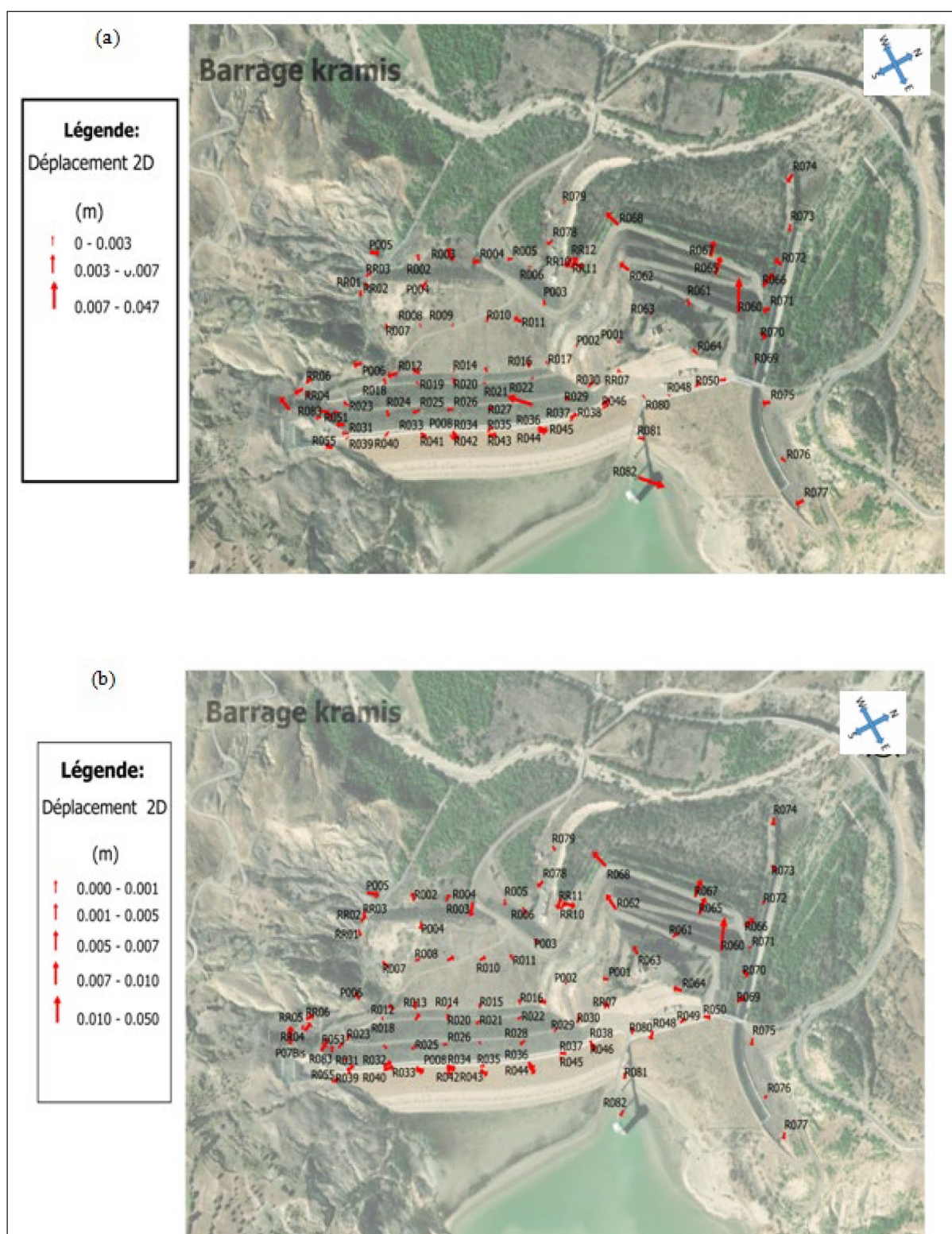


Fig. 4 Vecteurs des déplacements 2D des points du réseau d'auscultation du barrage Kramis. (a) période 2019-2020, (b) période 2019-2021

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 50 mm, 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 22 mm. 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 12 mm, 6 mm et 7 mm. Pour l'évacuateur de crues

(de R69 à R77), le mouvement n'excède pas 9 mm.

• Vecteurs des déplacements 1D :

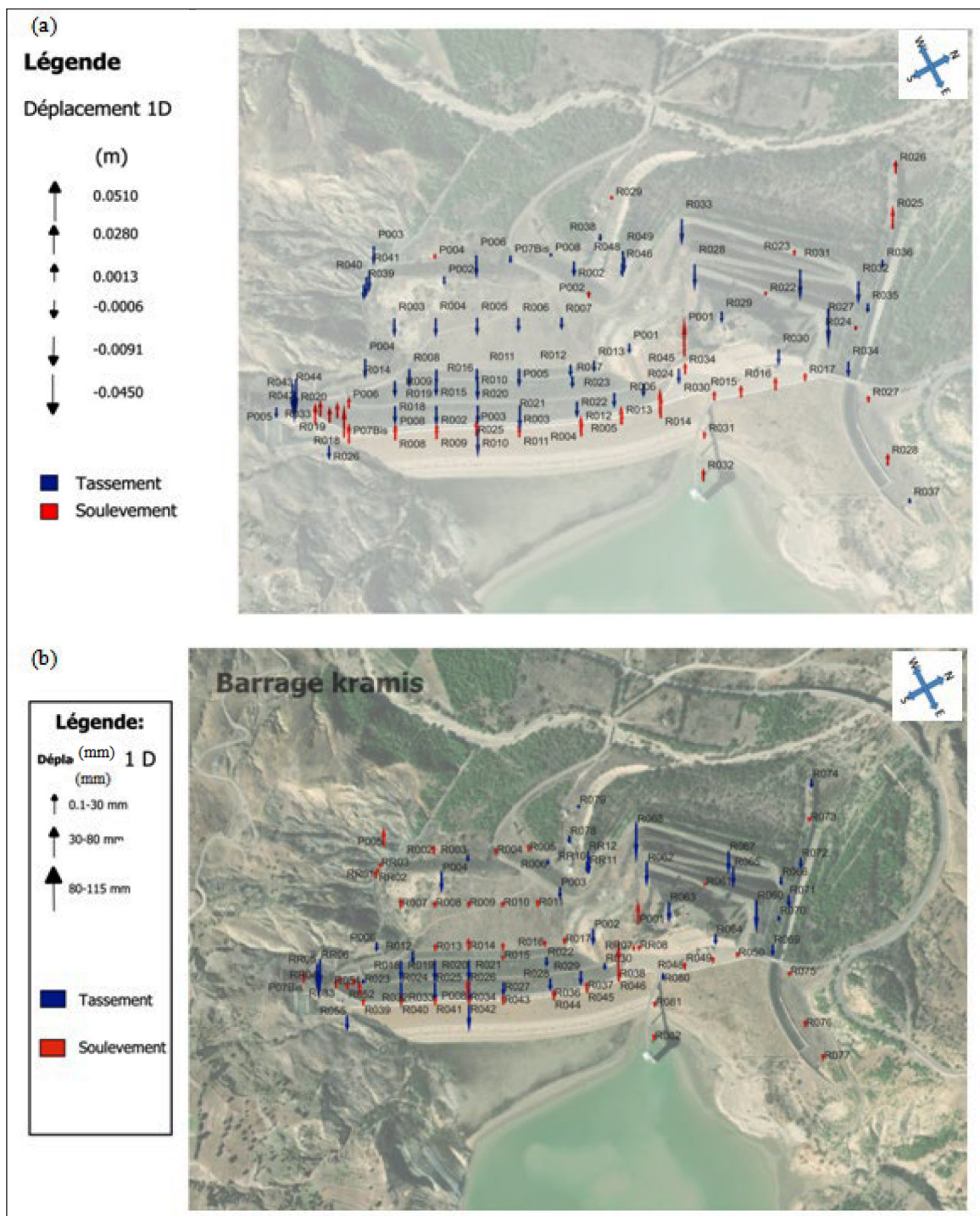


Fig. 5 Vecteurs des déplacements verticaux du réseau d'auscultation du barrage Kramis. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021

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 6 à 9) concernent les tenseurs de déformation et leurs primitives, du barrage de Kramis. Les statistiques de ces quantités sont présentées, dans le tableau ci-après.

Tab 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

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

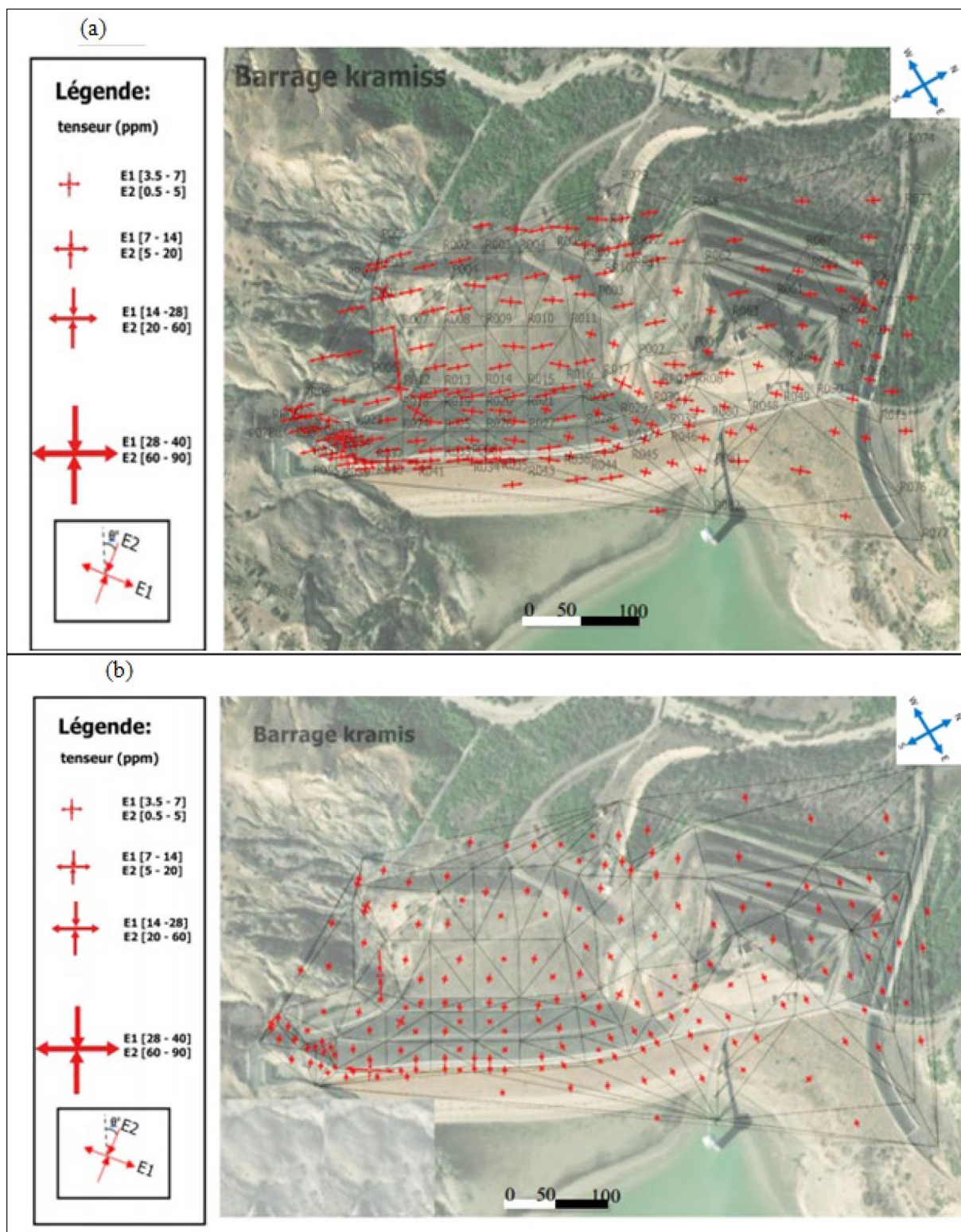


Fig. 6 Tenseurs de déformations du réseau d'auscultation du barrage Kramis. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021

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 :*

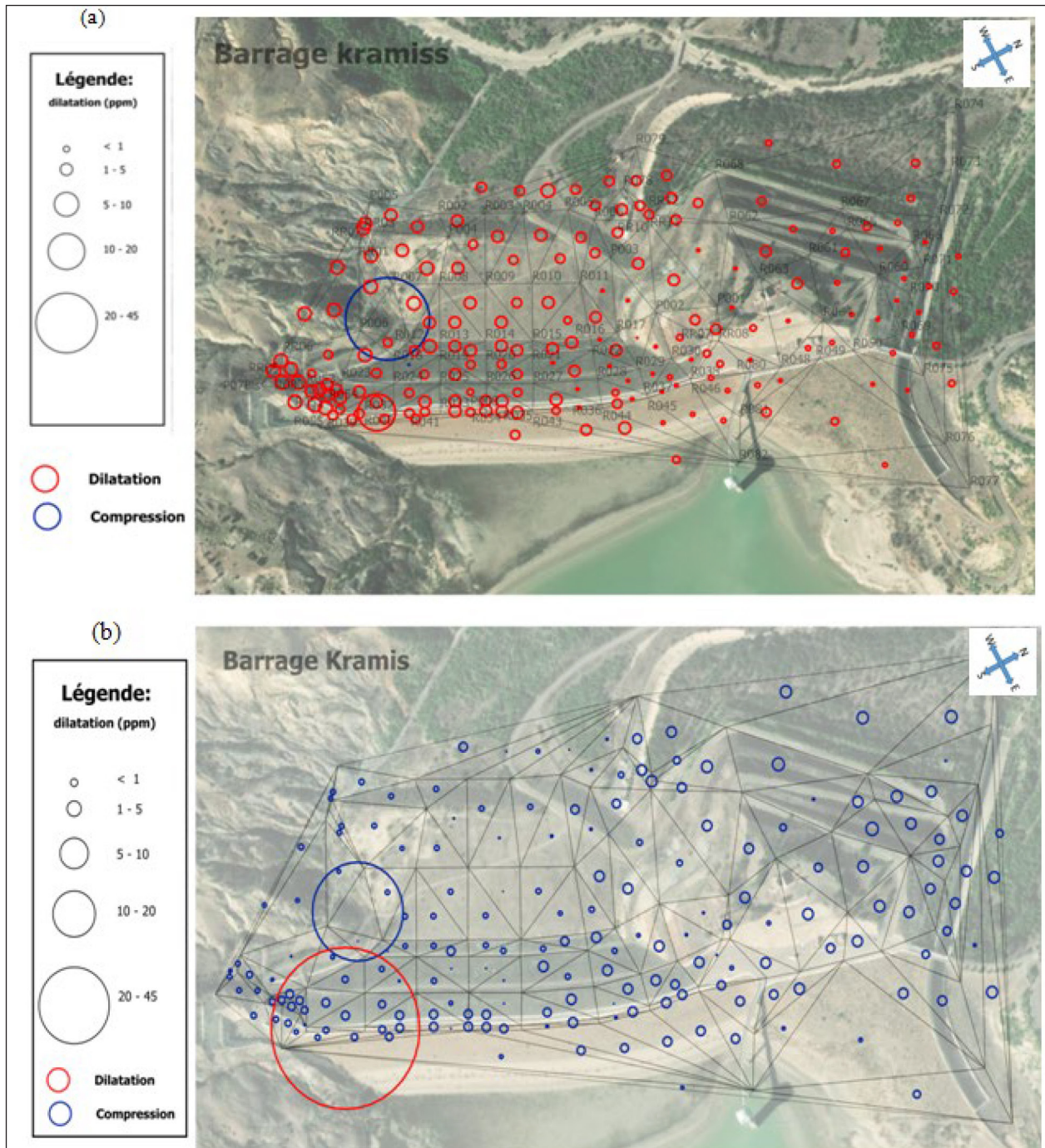


Fig. 7 Dilatations du réseau d'auscultation du barrage Kramis. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021

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 contrepoids. 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 :**

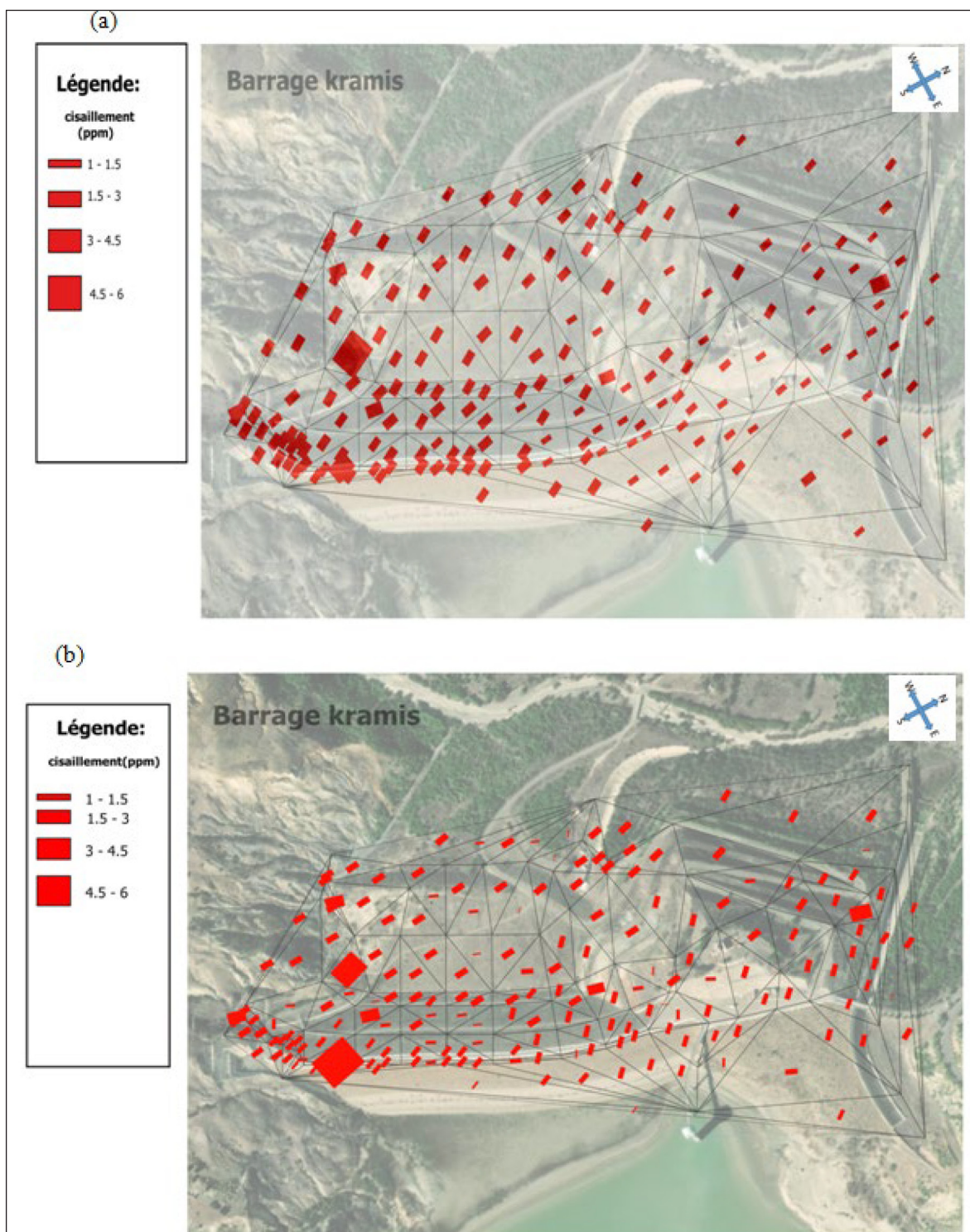


Fig. 8 Cisaillements du réseau d'auscultation du barrage Kramis. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021

Le champ de cisaillement est illustré dans la (figure 8), 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 :*

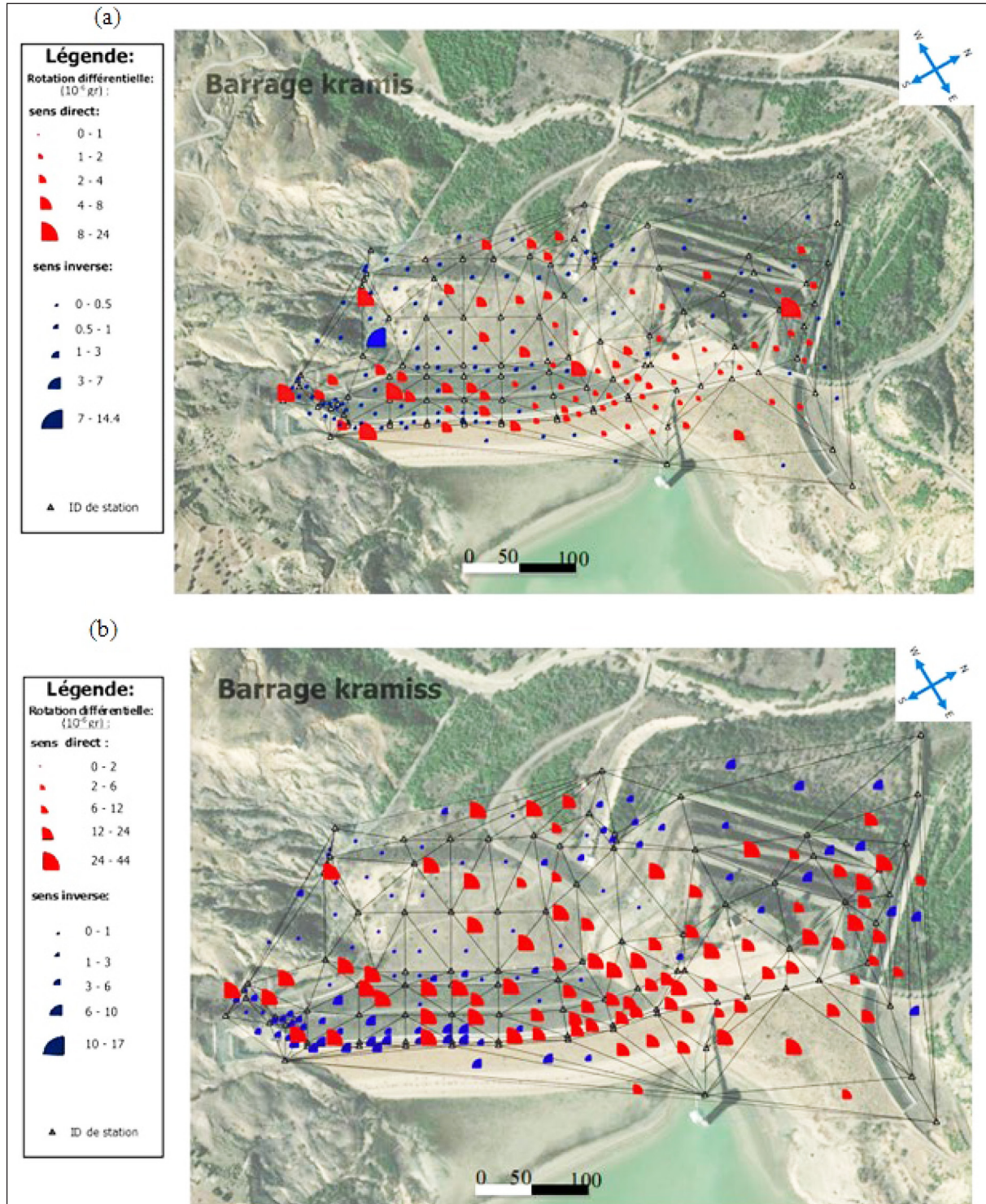


Fig. 9 Rotations différentielles du réseau d'auscultation du barrage Kramis. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021

En termes de rotation différentielle, le réseau est caractérisé par deux zones, (figure 9). 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.

3.5. 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 :

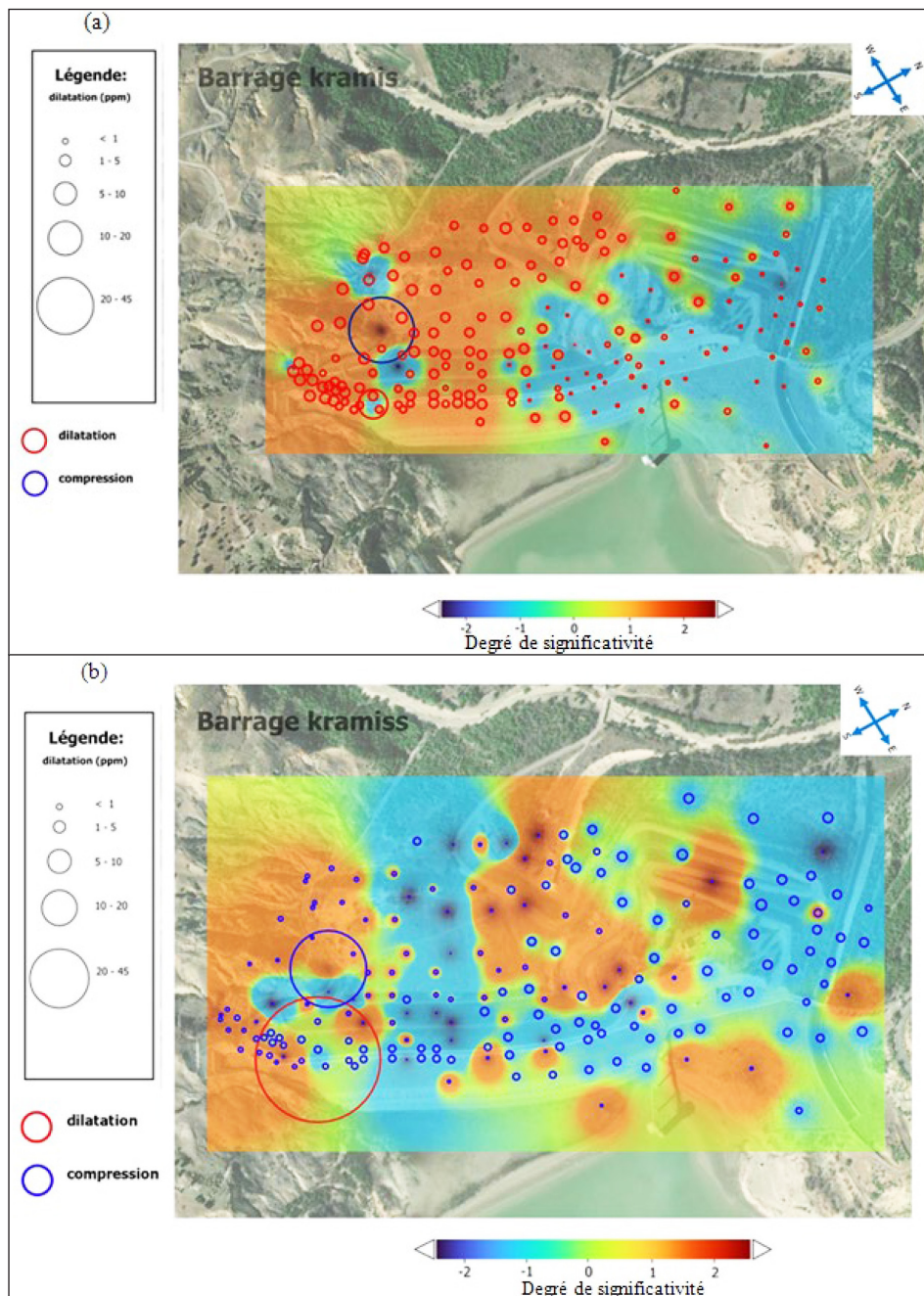


Fig. 10 Degré de significativité des dilatations. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021

D'après la (figure 10), 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 :*

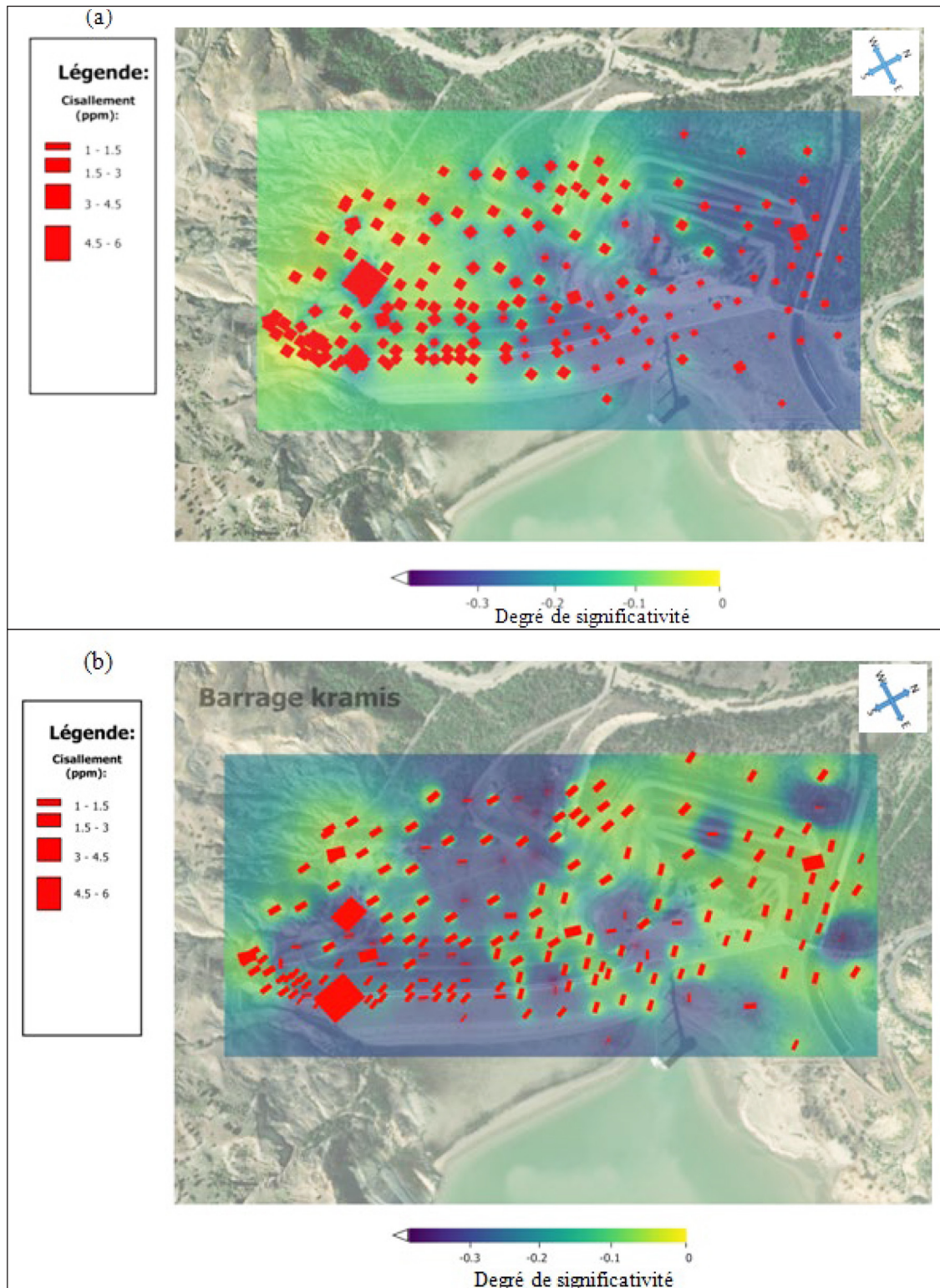


Fig. 11 Degré de significativité des cisaillements. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021

Selon la (figure 11), 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 des rotations différentielles :**

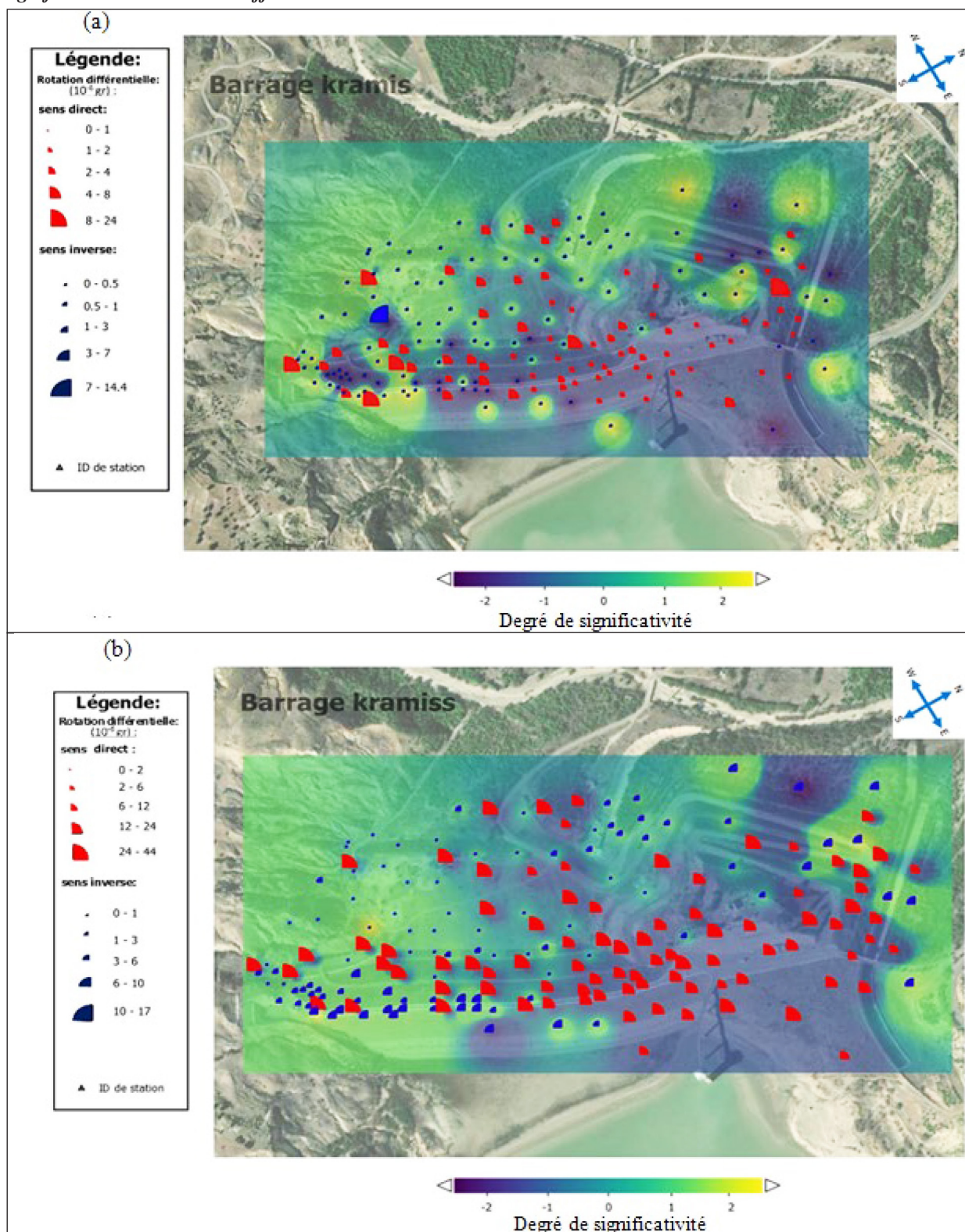


Fig. 12 Degré de significativité des rotations différentielles. (a) période : 2019-2020, (b) période : 2019-2021

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

• **Significativité des déformations verticales :**

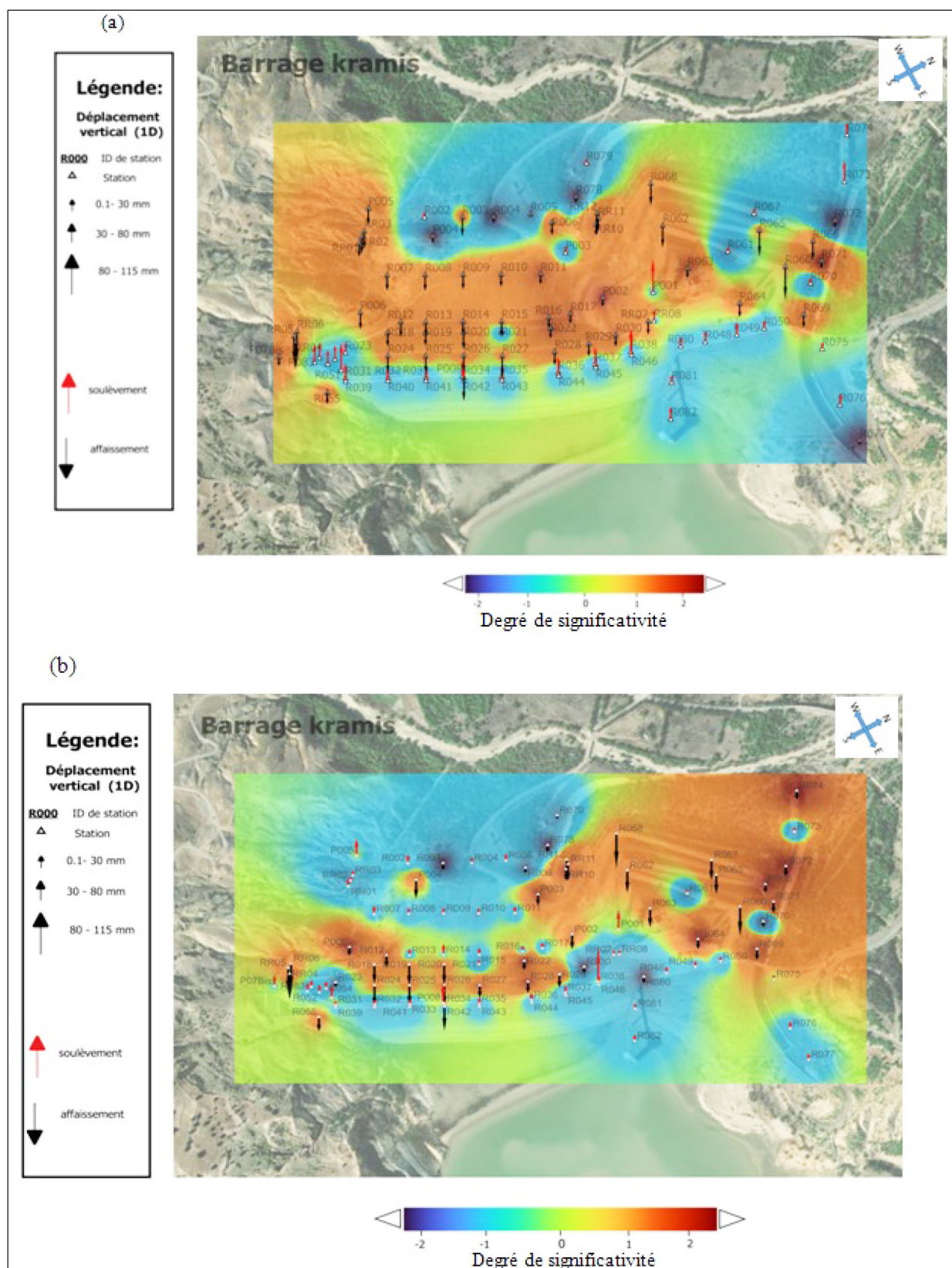


Fig. 13 Degré de significativité des déformations verticales. (a) période : 2019-2020,
(b) période : 2019-2021

Deux zones de significativité des déformations verticales caractérisent la région du barrage de Kramis, dans les deux périodes d'auscultation, (figure 13). 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.

4. Discussion et Conclusion

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 - 1.8 mm, 0.4 - 1.9 mm et 0.4 - 1.7 mm, en composantes planimétriques et de l'ordre de 4.5 - 11.0 mm, 4.1 - 10.0 mm et 4.3 - 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 12 mm, avec une tendance tangentielle et de l'ordre de 11 mm, 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 13 mm, 5 mm et 8 mm. Le déplacement maximal est environ 50 mm, 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 22 mm.

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 et par conséquent, ceci dénote la stabilité du barrage Kramis.

Néanmoins, la thématique de ce travail reste ouverte à d'autres aspects et considérations et ouvre le chemin vers des perspectives telles que :

- Élaborer un programme par python sous QGIS, pour automatiser la visualisation et les affichages des différents résultats.
- S'appuyer sur des données géotechniques du barrage, pour étayer les résultats obtenus.
- Appliquer cette étude sur d'autres barrages en Algérie, notamment, les barrages en béton.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tous les éléments du Département de Géodésie Spatiale (CTS) qui ont contribué au projet CTS/ANBT sur l'auscultation géodésique du barrage Kramis (2019-2021).

Références bibliographiques

- [1]. Abdelhak M.A. et Dar Seba M., 2022. Approche intuitive de représentation des déformations du réseau d'auscultation géodésique du barrage de Kramis (Mostaganem). Mémoire d'ingénieur, CTS – Arzew.
- [2]. ANBT, 2006. Réalisation du barrage de Kramis. Monographie, Constructeur : Astaldi S.p.a (Italie), Projet et surveillance des travaux : Inco-Mag (Italie), Avril 2006.
- [3]. Eissa L., 2011. Utilisation des méthodes de l'astrogéodésie et de la géodésie spatiale pour des études de déformation de l'écorce terrestre : Représentation des déformations et de leur degré de significativité par un champ régulier de tenseurs. Thèse de doctorat, Université de Paris Est, France.
- [4]. Gourine B., 2004. Ajustement avec contraintes du réseau géodésique National. Application : réseau de Base. Mémoire de Magister en techniques Spatiales et applications : Géodésie, CNTS – Arzew, 2004.
- [5]. Kasser, M., J.C. Ruegg, P. Lesage, L. Ortlieb, J. Pagarete, N. Duch, J. Guerrero, J. Roldan, 1987. Geodetic measurements of plate motions across the Central Gulf of California, 1982-1986. Geophys. Res. Lett., 14, 5-8.
- [6]. Merbah, A., B. Gourine, S. Kahlouche, M. Meghraoui, B. Ghezali and M. J. Sevilla, 2005. Evaluation et Interprétation des Déformations Horizontales et de leurs Erreurs sur un Réseau de Surveillance Sismique. FIG Working Week 2005 and GSIDI-8.

-
- [7]. Merbah, A., B. Gourine, S. Kahlouche, M. Meghraoui, B. Ghezali and M. J. Sevilla, 2005. Evaluation et Interprétation des Déformations Horizontale et de leurs Erreurs sur un Réseau de surveillance Sismique. FIG Working Week 2005 and GSDI-8.
- [8]. Michel V, Person T., 2003. From geodetic monitoring to deformation tensors and their reliability. Proceedings of 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece.
- [9]. Michel V., 2001. Utilisation des tenseurs pour la représentation des déformations et de leur degré de signification. Rapport de stage de 3^{ème} année du cycle ITGCE, ENSG, France, Octobre 2001.
- [10]. Prescott, W. H., Savage, J. C., and kinoshita, W. T., 1979. Strain accumulation rates in the western United States between 1970 and 1978. J. Geophys. Res., 84, 5423-5435.
- [11]. 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.
- [12]. Rapport CTS n°2, 2021. Rapport technique de l'opération Deux, du projet Auscultation géodésique du barrage de Kramis (W. Mostaganem) par l'outil spatial : GNSS et Interférométrie Radar. CTS, Octobre 2021.
- [13]. Rapport CTS n°3, 2021. Rapport technique de l'opération Trois, du projet Auscultation géodésique du barrage de Kramis (W. Mostaganem) par l'outil spatial : GNSS et Interférométrie Radar. CTS, Octobre 2021.
- [14]. Seemkooei A.A., 2001. Comparison of reliability and geometrical strength criteria in geodetic networks. Journal of Geodesy 75 (2001) 227-233.
- [15]. TBC, 2017. Manual Trimble Business Centre v3.7 – Planning, Processing and Adjusting GNSS Networks.
- [16]. Timoshenko, S. P. and J. N. Goodier, 1970. Theory of Elasticity. McGraw-Hill Book Company, New York.
- [17]. Vanicek P., Craymer M.R., Krakiwsky E.J., 2001. Robustness analysis of geodetic horizontal networks. Journal of Geodesy 75, pp 199-209, 2001.
- [18]. Welsch, W., 1983. Finite element analysis of strain patterns from geodetic observations across a plate margin. Tectonophysics. 97, pp. 57-71.