Gouvernement de la Polynésie Française



ANALYSE DES DEFORMATIONS DU SOL - SMART MONITOR

Entre le 31 Octobre 2016 et le 16 décembre 2021

Côte Nord de la Presqu'ile de Tahiti entre Afaahiti et Tautira Commune de Taiarapu-Est

> Rapport d'analyse version 1 Du 05 Août 2024





Table des matières

1. CONTEXTE ET DEMANDE	1
1.1. ZONE D'ETUDE	1
1.2. MOUVEMENT DE TERRAIN DE RAIMATEA	1
2. ANALYSE SMART	3
2.1. ANALYSE SMART REALISEE	4
2.2. CONTENU DES DONNEES SMART	
2.2.1. Format de SMART	
2.2.2. Les paramètres de l'analyse	
2.2.1. Les mesures SMART	
3. DONNÉES EXOGÈNES	 7
3.1. Donnees de sismicite regionale	7
3.2. DONNEES PLUVIOMETRIQUES	8
4. RÉSULTATS DE L'ANALYSE SMART	10
4.1. RESULTATS SUR L'ENSEMBLE DE LA ZONE ANALYSE	
4.1.1. Cohérence	
4.1.2. Déformations	
4.1.4. Risque d'instabilité	
4.2. ANALYSE DETAILLEE SUR LE SECTEUR DE RAIMATEA	
4.2.1. Synthèse des déformations observées	17
4.2.2. Analyse temporelle	19
4.2.1. Variation spatiale du mouvement observé en 2019	
5. PRÉCONISATIONS	33
6. RÉFÉRENCES	34
7. ANNEXES	36
7.1. ANNEXE 1 : ZONES INSTABLES INDENTIFIES	36
7.1.1. Description des fiches	36
7.1.2. Légendes des cartes géologique, géomorphologique et pédologique	
7.2 ΔNNEYE 2: DROELLS VÉLOCITÉ DAR RADDORT À LA DILLIVIOMÉTRIE	0/



Table des figures

Figure 1: Zone d'analyse SMART	
Figure 2: Cartographie des aléas mouvement de terrain tirée de (Bernon and Garnier 2023)	2
Figure 3: Observations de terrain des désordres constatés sur le quartier de Raimatea (photographies réalisées par	
GEOLITHE et fournies par la DCA)	3
Figure 4: Principes de l'interférométrie radar	
Figure 5: Image satellitaire Sentinel-1 sur la zone d'analyse et localisation de Raimatea (Traitements BLUECHAM SAS)	
Figure 6: Série temporelle de données SAR	
Figure 7: Série chronologique de déplacements annuels et saisonniers complexes et d'une transition vers un état	
catastrophique. Tiré de Lacroix, Handwerger, and Bièvre 2020	6
Figure 8: Carte de la sismicité régionale entre le 31 octobre 2016 et le 16 décembre 2021 et distance à la zone d'analys	 ie.
Figure 9: Cumuls de précipitations journaliers en mm entre le 31 octobre 2016 et le 16 décembre 2021	_
Figure 10: Cohérence SMART entre octobre 2016 et décembre 2021	1
Figure 11: Déplacements cumulés en mm entre octobre 2016 et décembre 2021	
Figure 12: Vélocité moyenne en mm/an entre octobre 2016 et décembre 2021	
Figure 13: Types de mouvement du sol en fonction des variations de déplacements dans le temps (Source : OFEV, 2016	
Figure 14: Déplacements et vélocités mesurées sur le secteur 3 (GPS_491) Vallée de Pueu	
Figure 15: Photo terrain GPS 491 (source GEOLITHE)	1
Figure 16: Déplacements et vélocités mesurées sur la Pointe Pihaa	 14
Figure 18: Déplacements et vélocités mesurées sur le fluage à Pahua - Afaahiti	
Figure 17: Photo terrain GPS 330 (source GEOLITHE)	1
Figure 19: A gauche, schéma théorique de l'évolution des déformations de terrain tiré de (Royán, Abellán, and Vilapla	
2015), à droite succession de phases secondaires dans les mouvement réguliers, tiré de (Lacroix, Handwerger, and Bièv	
2020)	10
Figure 20: Risque d'instabilité des sols entre octobre 2016 et décembre 2021	1
Figure 21: Déplacements cumulés et vélocités moyennes entre 2016 et 2021	
Figure 22: Détection des instabilités entre 2016 et 2021	
Figure 23: Localisation des profils temporels	19
Figure 24 : Effets de la modification de la porosité et de la pression du sol lors de phase d'accélération	
Figure 25: Profils temporels caractéristiques	20
Figure 26 : Profils temporels	2:
Figure 27: Profil topographique	
Figure 28: évolution du profil topographique entre mars 2019 et avril 2020 sur Raimatea	22
Figure 29 : Evolution du profil temporel en fonction des étapes du mouvement observé en 2019. En haut, entre mars et	
2019 ; au centre, entre Juillet et novembre 2019 et en bas, entre novembre 2019 et avril 2020.	
Figure 30: Profil topographique entre Vaiana et raimatea	2:
Figure 31: évolution du profil topographique entre mars 2019 et avril 2020 entre le lotissement Vaiana et Raimatea	
Figure 32 : Evolution du profil temporel en fonction des étapes du mouvement observé en 2019. En haut, entre mars et	
2019 ; au centre, entre Juillet et novembre 2019 et en bas, entre novembre 2019 et avril 2020 entre le lotissement Vaid	
Raimatea.	2110 CC
Figure 33 : Evolution du profil topographique sur Raimatea et entre Viana et Nuutae entre octobre 2016 et décembre 2	
ga. 2 22 . 2.3.2.3.1 au proji topograpingae zar namateu et entre viana et matae entre octobre 2010 et detembre i	27.
Figure 34 : Relations entre pluviométrie et vélocité (profil temporel A).	
Figure 35 : Profils analysés entre pluviométrie et vélocité (profil en annexe)	
Figure 36: Variations spatiales des déformations entre mars 2019 et février 2020	
Figure 37: Extension proposée de la zone en mouvement	
Figure 38: Structure de la zone en mouvement	
rigare 30. 30 decare de la zone en mouvement	3.
Talala das talala autu	
Table des tableaux	
Tableau 1: Evénements pluvieux majeurs entre le 31 octobre 2016 et le 16 décembre 2021	
Tableau 2: Evénements pluvieux majeurs en 2019	28

Citer ce rapport :

Andreoli Rémi, 2024 : « Analyses des déformations du sol – SMART MONITOR – entre le 31 octobre 2016 et le 16 décembre 2021, côte Nord de la Presqu'ile de Tahiti entre Afaahiti et Tautira ». Rapport BLUECHAM PF-DCAPF-161123-01|000614/MSF/DCA, 88 pages.



1. CONTEXTE ET DEMANDE

Le quartier de Raimatea (quartier Afaahiti Sud, commune de Taiarapu-Est) est un secteur urbanisé (habitat résidentiel peu dense) où un risque de mouvement de terrain a été identifié (Géolithe 2022).

Suite aux préconisations du LABO T.P. (GINGER CEBTP 2023), l'analyse des déformations à l'aide de l'outil SMART doit permettre de mieux comprendre le phénomène, sa périodicité et les liens avec les forçages externes.

1.1. Zone d'étude

Pour l'analyse SMART, une zone minimale de 25 km² est requise. Sur proposition de la Direction de la Construction et de l'Aménagement, une zone littorale de 25 km² allant de Afaahiti Sud à Tautira et comprenant une partie du plateau et de la caldeira sur Afaahiti (figure 1) a été définie.

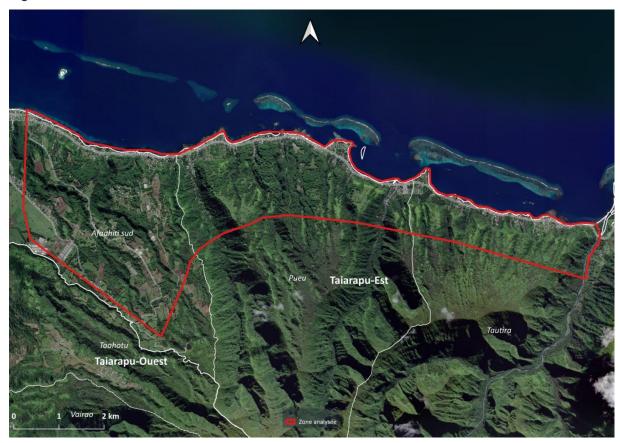


Figure 1: Zone d'analyse SMART

1.2. Mouvement de terrain de Raimatea

Le quartier de Raimatea connait des désordres liés aux mouvements de terrain (figure 2) dont les premières mentions remontent à 1998. Les traces et témoignages les plus anciens concernent des niches d'arrachements et un soulèvement de la route dans la zone amont du quartier (GINGER CEBTP 2023) imputables à des glissements de versant probablement profonds et à forte cinématique (Bernon and Garnier 2023). Sur les secteurs urbanisés, les



riverains témoignent régulièrement, notamment ces dernières années, de déformations souples des chaussées et caniveaux et de fissurations sur les structures bâties (figure 3) indiquant un fluage des formations superficielles (Bernon and Garnier 2023). Le contexte géomorphologique et les différentes observations de terrain sont synthétisés dans les travaux de Bernon and Garnier 2023, GINGER CEBTP 2023 et Géolithe 2022.

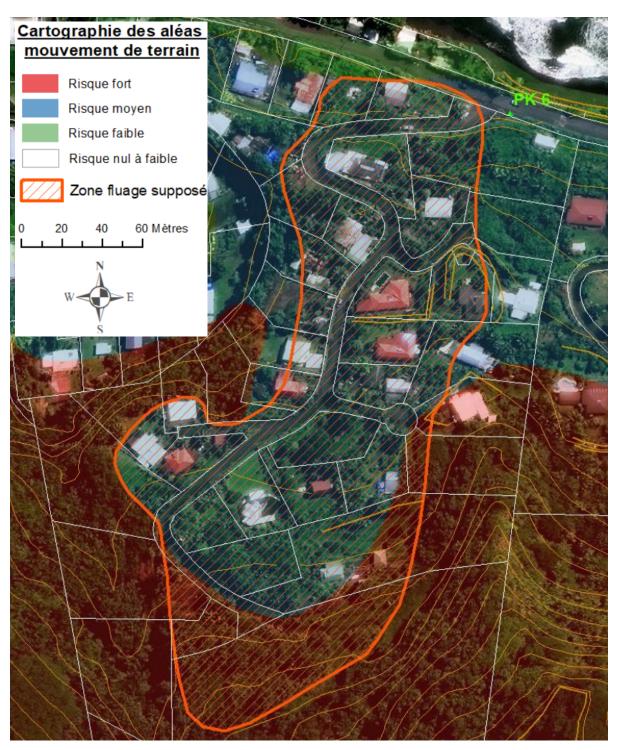


Figure 2: Cartographie des aléas mouvement de terrain tirée de (Bernon and Garnier 2023)



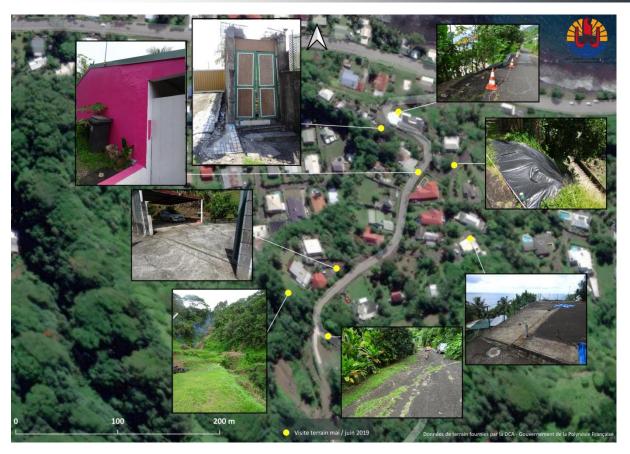


Figure 3: Observations de terrain des désordres constatés sur le quartier de Raimatea (photographies réalisées par GEOLITHE et fournies par la DCA)

2. ANALYSE SMART

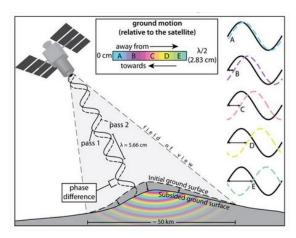


Figure 4: Principes de l'interférométrie radar

L'analyse SMART est une chaine de traitement calculant les déformations du sol à partir de mesures satellitaires radar. L'analyse SMART comprend:

- SMART-REVIEW permettant d'établir un état des lieux de synthèse des déformations totales sur une période de temps donné sur un secteur donné;
- SMART-MONITOR permettant de disposer d'une analyse temporelle de l'évolution des phénomènes dans l'espace et dans le temps;
- SMART-PREDICT permettant de prédire dans les 30 jours à venir la possibilité d'événements à forte accélération pouvant entrainer une instabilité majeure du terrain (rupture ou effondrement).

L'analyse réalisée est SMART-MONITOR qui englobe également la synthèse SMART-REVIEW.



2.1. Analyse SMART réalisée

L'analyse SMART réalisée sur la zone d'étude a été effectuée à partir d'une série temporelle de données satellitaires radar par synthèse d'ouverture (SAR) en bande C de la constellation Sentinel-1.

Les satellites Sentinel-1 opèrent dans une longueur d'onde de 5,66cm et le signal radar présente une résolution en azimut de 4.8m et une résolution selon l'angle de visée de 2 à 3.1m en fonction de l'angle d'incidence. La précision du positionnement géographique est de 2 à 3m en moyenne, mais cette précision peut décroître localement en fonction de la topographie (Schmidt et al. 2018, "SentiWiki" 2024).

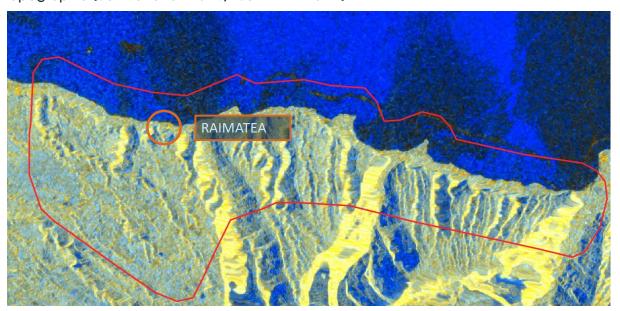


Figure 5: Image satellitaire Sentinel-1 sur la zone d'analyse et localisation de Raimatea (Traitements BLUECHAM SAS)

La série comprend 151 images entre le 31 Octobre 2016 et le 16 décembre 2021 acquises sur l'orbite descendante. La revisite moyenne des satellites est de 12,49 jours.

La série présente une revisite de 24 jours sur les 6 premières et la dernière mesures radar de la série. Sinon, la revisite est régulière tous les douze jours (figure 5).

Série temporelle de données SAR

01/10/2016 30/12/2016 30/03/2017 28/06/2017 26/09/2017 25/12/2017 25/03/2018 23/06/2018 21/09/2018 20/12/2018 20/12/2018 20/03/2019 18/06/2019 16/09/2019 15/12/2019 14/03/2020 12/06/2020 10/09/2020 09/12/2020 09/12/2020 09/03/2021 07/06/2021 05/09/2021 04/12/2021

Figure 6: Série temporelle de données SAR

La chaine SMART permet d'estimer les paramètres suivants, détaillés dans la section 2.2:

- Cohérence du signal;
- Déplacements instantanés en mm;
- Déplacements cumulés en mm;
- Direction du déplacement;
- Vélocité ;
- Risque d'instabilité passé



2.2. Contenu des données SMART

2.2.1. Format de SMART

SMART est livré au format vectoriel Geopackage (GPKG) conforme aux exigences de l'OGC. La donnée SMART est délivrée sous forme de grille hexagonale régulière. Pour chaque hexagone sont attribués des champs attributaires de l'analyse SMART.

2.2.2. Les paramètres de l'analyse

Les paramètres de l'analyse SMART sont donnés par les attributs :

SMART: Indique le nom et la version de l'algorithme SMART utilisé pour l'analyse.

START: Correspond à la première date d'observation radar de la période analysée.

END: Correspond à la dernière date d'observation radar de la période analysée.

FREQUENCY: Indique la fréquence médiane des observations radar de la série analysée pour l'algorithme REVIEW et l'écart en nombre de jour avec la précédente mesure radar pour l'algorithme MONITOR.

SOURCES: Mention légale des données radar sources utilisées.

NB_OBS: Nombre total d'observations radar utilisées pour l'analyse REVIEW et comprises entre la date START et la date END incluses.

2.2.1. Les mesures SMART

Les mesures de déformations SMART sont données par les attributs :

COHERENCE: Indique la mise en cohérence de la donnée radar lors de l'analyse SMART. Pour l'analyse REVIEW, COHERENCE Indique le pourcentage de mesures de déformations cohérentes sur l'ensemble des interférogrammes réalisés. COHERENCE est un pourcentage, 0 indiquant qu'aucune mesure de déformations ne remplit les critères de cohérence, et 100% indiquant que toutes les mesures de déformations remplissent les critères de cohérence.

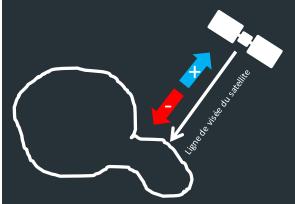
Pour l'analyse MONITOR, COHERENCE varie de 0 à 1 et indique la qualité de la mise en cohérence des deux signaux radar consécutifs. On considère en général une cohérence inférieure ou égale à 0.1 comme médiocre, une cohérence supérieure ou égale à 0.3 comme bonne et une cohérence supérieure à 0.5 comme excellente.

2 La mise en cohérence du signal dépend de la couverture végétale et de l'orientation des pentes topographiques par rapport à l'angle de visée du satellite. Ainsi, les secteurs boisés pourront présenter le plus souvent une faible cohérence du signal radar, tout comme les versants opposés à l'angle de visée du satellite.

FILT_DISPL: Déformations totales cohérentes observées entre la date START et la date END exprimées en millimètres. Les mesures de déformations sont filtrées en fonction de la cohérence: ne sont conservées que les valeurs de déformations atteignant les critères de cohérence.

RATE: Vélocité moyenne des déformations exprimée en mm/an pour l'analyse REVIEW et en mm/jour pour l'analyse MONITOR.





FILT_DISPL et RATE sont orientés

Les paramètres FILT_DISPL et RATE sont orientés en fonction du signe + ou -. Le signe indique la direction du déplacement.

Pour l'analyse SMART, la direction est exprimée selon la ligne de visée du satellite (ou *Line of Sight*).

les déformations positives (représentées convention, en correspondent aux déformations qui se « rapprochent » et les déformations négatives (en rouge) correspondent aux déformations qui s'« éloignent » du satellite. Sur Raimatea, le satellite passe au nord-est en orbite descendante. Les déformations positives correspondent soit aux mouvements vers le nord-est surrection. de et/ou aux mouvements Les déformations néaatives correspondent soit aux mouvements vers le sud-ouest et/ou aux mouvements de subsidence.

BURST_P: Exprime le risque d'instabilité du terrain en fonction de l'analyse de la vitesse et des accélérations des déformations entre la date START et la date END. BURST_P est une grandeur adimensionnelle: plus BURST_P est élevé, plus le risque de rupture ou de glissement détecté sur la période est grand. Pour l'analyse REVIEW, BURST_P fait la synthèse des occurrences d'instabilités sur l'ensemble de la période analysée. Quant à l'analyse MONITOR, BURST_P indique la possibilité de survenue d'un événement instable dans les 30 jours suivant la date END.

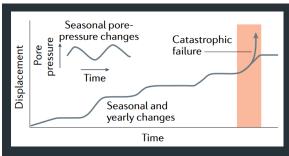


Figure 7: Série chronologique de déplacements annuels et saisonniers complexes et d'une transition vers un état catastrophique. Tiré de Lacroix, Handwerger, and Bièvre 2020

DETERMINER L'INSTABILITE DU SOLS

L'analyse d'instabilité est issue travaux de Fukuzono (1985) et Lacroix, Handwerger, and Bièvre (2020) sur la relation entre le déplacement et la rupture de la stabilité du sol. Les schémas de comportement des mouvements de s'appliquent aussi bien terrain glissements de terrains, aux glissements coulées. fluaaes au'aux aux effondrements.



MIN_LOS: Valeur minimale de déformation instantanée sur la ligne de visée du satellite (LOS) estimée sur la période d'analyse entre la date START et la date END (analyse REVIEW uniquement).

MAX_LOS: Valeur maximale de déformation sur la ligne de visée du satellite (LOS) estimée sur la période d'analyse entre la date START et la date END (analyse REVIEW uniquement).

2.2.1. Attributs additionnels

LIC: Organisme détenteur de la licence d'utilisation interne.

PROD: Producteur de la donnée.

SLOPES: Pentes en degrés dérivées du modèle numérique de terrain à la meilleure résolution disponible. Dans le cadre de cette analyse, le modèle numérique de terrain à 5m du Gouvernement de la Polynésie française a été utilisé.

3. DONNEES EXOGENES

Afin d'appréhender les relations entre les déformations mesurées et les sources potentielles de mouvement de terrain, des données exogènes ont été collectées sur la sismicité régionale et les précipitations. Nous avons exclu de l'analyse les températures moyennes annuelles. Celles-ci varient de 25,6° à 27,8° et ne sont donc pas explicatives de variations saisonnières.

3.1. Données de sismicité régionale

Les données de sismicité régionale sont extraites de la base de données globale du "Earthquake Hazards Program" (2024) de l'USGS et concernent tous les tremblements de terre survenus entre le 31 octobre 2016 et le 16 décembre 2021 et dont la magnitude enregistrée est supérieure à 1.

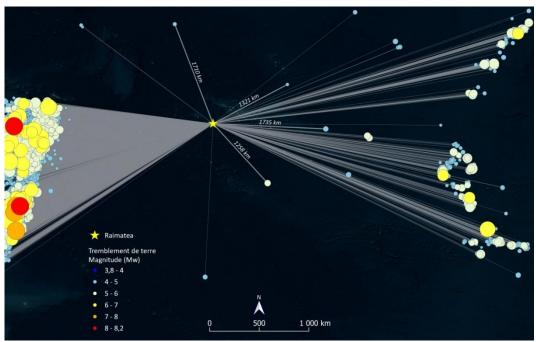


Figure 8: Carte de la sismicité régionale entre le 31 octobre 2016 et le 16 décembre 2021 et distance à la zone d'analyse.



Le séisme le plus proche enregistré dans la période se situe à plus de 1200 km et la magnitude de ce dernier est comprise entre 5 et 6.

Quatre autres séismes se situent à moins de 2000km de la zone d'analyse, mais leur magnitude n'excède pas 5. L'influence de la sismicité régionale sur les mouvements observés sur la zone d'analyse est exclue.

3.2. Données pluviométriques

Les données pluviométriques sont basées sur l'ensemble de données de réanalyse ERA5 qui utilise une combinaison d'observations de stations météorologiques, d'avions, de bouées, de radar et de satellites, dont les lacunes sont comblées par modélisation mathématique, pour capitaliser l'ensemble des enregistrements complet des conditions météorologiques passées (Hersbach et al. 2020).

Les modèles de données météorologiques historiques utilisent une résolution spatiale de 9 km pour résoudre les détails les plus fins à proximité des côtes ou des terrains montagneux complexes.

Les données de pluviométrie journalière exprimées en mm ont été extraites entre le 31 octobre 2016 et le 16 décembre 2021 sur la coordonnée géographique Long. - 149,261374 et Lat. -17,739373 (quartier de Raimatea).

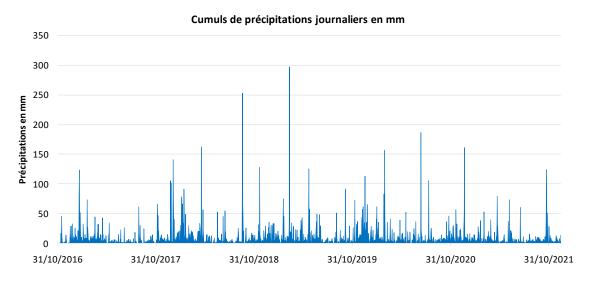


Figure 9: Cumuls de précipitations journaliers en mm entre le 31 octobre 2016 et le 16 décembre 2021

La base de données recense 14 événements dont les cumuls de précipitations journaliers excèdent 100mm (Tableau 1) auxquels nous pouvons ajouter la période de fin avril 2019 où 10 jours de pluie consécutifs ont été enregistrés.

A l'exception des événements survenus en septembre 2018, novembre 2018 et août 2020, les événements pluvieux identifiés ont pu être identifiés sur la station météorologique de Fa'a ét dans la presse¹.

^{1&}quot;14 février - COMMUNIQUÉ MÉTÉOROLOGIQUE : Temps très perturbé ce week-end" 2024, "Fortes pluies : de nombreux dégâts recensés à la Presqu'île" 2024, K 2019, "INTEMPERIES | Tags | TAHITI INFOS, Les Informations de Tahiti" 2024, Samoyeau 2018, "Météo : attention aux fortes pluies et aux orages" 2020, "Pluies diluviennes sur les îles de la Société: les habitants sur le qui-vive" 2020, "Quelles sont les conséquences



Année	Mois	Période	Cumuls journalier maximal	Corroboré
2017	Janvier	Entre le 18 et le 20	124,4 mm	Oui
2018	Janvier	Entre le 25 décembre 2017 et 05 janvier 2018	141,9 mm	Oui
	Avril	Entre le 18 et le 20	163.2 mm	Oui
	Septembre	Entre le 17 et le 20	253.9 mm	Non
	Novembre	Le 21	128.8 mm	Non
2019	Mars	Les 11 et 12 mars	298 mm	Oui
	Avril	10 jours de pluie entre le 21 et le 30	44 mm	Oui
	Mai	Entre le 22 et le 25	126.1 mm	Oui
	Décembre	Entre le 15 et le 18	113.9 mm	Oui
2020	Février	Entre le 26 février et le 1 ^{er} mars	157.5 mm	Oui
	Juillet	Les 13 et 14	187.5 mm	Alerte aux orages émise
	Août	Les 10 et 11	106.3 mm	Non
	Décembre	Entre le 20 et le 23	162.2 mm	Oui
2021	Octobre	Entre le 23 et le 25	125 mm	Oui

Tableau 1: Evénements pluvieux majeurs entre le 31 octobre 2016 et le 16 décembre 2021

Cependant, les valeurs absolues de précipitations n'ont pu être vérifiées. Les cumuls, tel que celui enregistré en févier 2019 (presque 300 mm) peuvent être surestimés. Les quantités de précipitations ne seront donc pas considérées; nous nous baserons sur la variation relative des précipitations pour indiquer la survenue d'un événement pluvieux. Nous conservons le seuil de 100mm pour caractériser un événement majeur.

de la pluie ?" 2019, "Tahiti : des maisons inondées et l'aéroport fermé quelques heures après de fortes pluies" 2019, ("Vigilance météorologique - Un terrain inondé à Tautira" 2019), "Vigilance orange pour fortes pluies à Tahiti" 2019, "Vigilance orange pour les fortes pluies aux îles du vent" 2021.



4. RESULTATS DE L'ANALYSE SMART

Les résultats de l'analyse des déformations SMART sont présentés ci-après en exploitant la synthèse SMART REVIEW sur l'ensemble de la zone analysée et en détaillant la cinématique des déformations sur le quartier de Raimatea à l'aide de SMART MONITOR.

4.1. Résultats sur l'ensemble de la zone analyse

4.1.1. Cohérence

La cohérence de l'analyse interférométrique indique que la frange littorale ainsi que les principaux secteurs urbanisés sont très cohérents (cohérence supérieure à 50%). A l'inverse, les pentes topographiques opposées à la visée du satellite (pentes orientées au sud-ouest) et les secteurs avec une forte couverture arborée, présentent des cohérences plus faibles voire nulle.

Sur les secteurs avec absence totale de cohérence, l'analyse des déformations ne peut être menée sur la période 2016 - 2021.



Figure 10: Cohérence SMART entre octobre 2016 et décembre 2021

4.1.2. Déformations

Les déformations cumulées sur la période Octobre 2016 à décembre 2021 varient entre - 27 mm à Taharoa pour les secteurs en subsidence ou mouvement vers le sud-ouest et +14 mm à Nuurehia et Matahiva pour les secteurs en surrection ou en mouvement vers le nord-est.



Les déformations cumulées moyennes sont de +0.16mm sur les 5 ans.

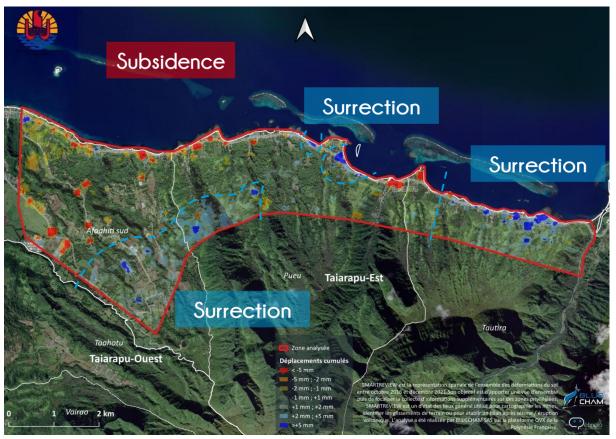


Figure 11: Déplacements cumulés en mm entre octobre 2016 et décembre 2021

4.1.2.1. Secteurs en surrection et/ou mouvement vers le nord-est

La répartition géographique montre une concentration des secteurs en surrection et/ou mouvement vers le nord-est sur le littoral entre la Pointe Pihaa et le Mouillage Cook, ainsi que sur les contreforts des Plateaux de Fareteupoo et de Marumarutua jusqu'aux hautes vallées de la Temaaroa et de la Temaamure et de part et d'autre de la pointe Faraari. Localisés sur la côte, ces secteurs sont très circonscrits dans l'espace et de forme ovale ou ronde, de quelques centaines de mètres de diamètre. Sur les flancs des plateaux, ces secteurs sont plus diffus et occupent une superficie un peu plus étalée.

4.1.2.2. Secteurs en subsidence et/ou mouvement vers le sud-ouest

Les secteurs en subsidence sont souvent très localisés par poche le long de la côte à partir de la pointe Pihaa jusqu'à Atihiva et sur le Plateau à Afaahiti. Ces poches sont également de formes ovales ou circulaires de quelques centaines de mètres de diamètres.

Sur le littoral entre Atihiva et Pahua, la subsidence est plus continue, variant entre -1 et -5mm avec localement des valeurs supérieures à -5mm. Ce secteur est seulement troué par une zone localisée en surrection ou mouvement vers les nord-est au PK3 à Pahua.

4.1.3. Vélocité moyenne

La vélocité moyenne sur l'ensemble de la zone entre octobre 2016 et décembre 2021 varie entre -5mm/an (exploitation agricole au sud du domaine Croisie) et +2mm/an à Matahiva.

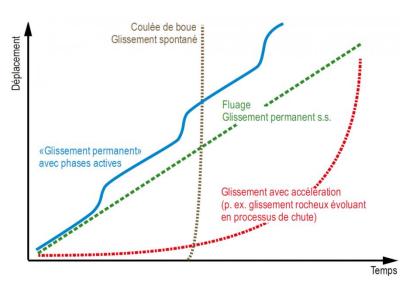




Figure 12: Vélocité moyenne en mm/an entre octobre 2016 et décembre 2021

Entre +/- 1mm et +/-5mm de déformations par an, les dommages sur les infrastructures peuvent être les suivants ("Glissements et coulées de boue : informations techniques pour les ingénieurs" 2024):

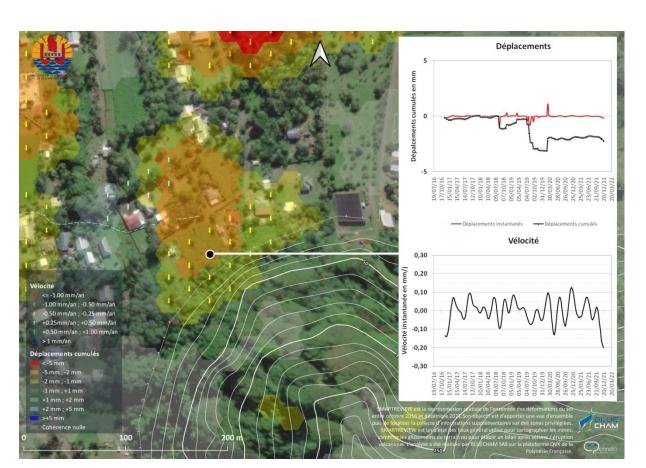
- <u>Bâtiment</u>: Dommages faibles au bâtiment, formation de petites fissures selon le type de construction et de fondation
- Terrain: légers tassements et soulèvements du sol, déplacements
- Conduites enterrées : dommages négligeables



Cependant, les mouvements des sols sont rarement uniformes et varient temporairement et localement parfois jusqu'à des valeurs significatives (figure 13).

Figure 13: Types de mouvement du sol en fonction des variations de déplacements dans le temps (Source: OFEV, 2016)





4.1.3.1. Exemple 1 : Vallée de Pueu - Secteur 3 (GPS_491)

Figure 14: Déplacements et vélocités mesurées sur le secteur 3 (GPS_491) Vallée de Pueu

L'exemple sur le secteur 3 GPS_491 dans la vallée de Pueu (Figures 14 et 15) correspond à un mouvement permanent initié en 2018 avec phases actives et marqué par un mouvement probable de subsidence. La zone s'est déplacée en moyenne de -2 mm sur 5 ans, avec un mouvement maximal de -4,3mm.

Les déplacements dans le temps ne sont pas linéaires et la vélocité montre des phases d'accélération temporaire pouvant atteindre +/-0,1mm par jour (équivalent à 36,5mm/an).

Le secteur se trouve en aval d'un pied de versant montrant un possible déplacement du sol (végétation penchée) vers le bas (photo figure 15). Le mouvement semble s'entendre vers le piémont qui est une zone relativement plate.





Figure 15: Photo terrain GPS 491 (source GEOLITHE)



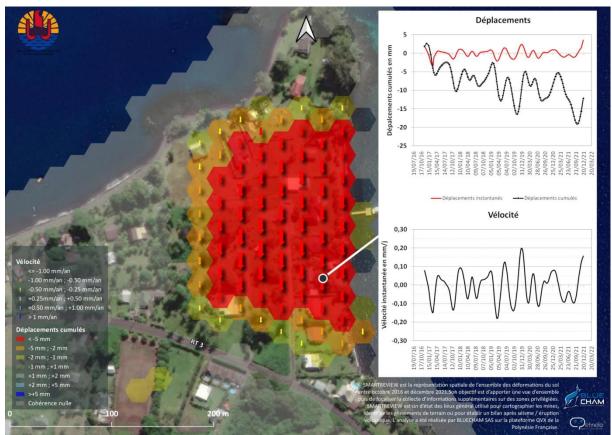


Figure 16: Déplacements et vélocités mesurées sur la Pointe Pihaa

La zone littorale de la Pointe Pihaa montre une zone de subsidence régulière à oscillations saisonnière dont le déplacement maximal mesuré est de -16,6mm et un déplacement moyen sur la zone de l'ordre de -8 mm.



La vélocité moyenne est mesurée à -1,6mm/an (avec un maximum à -3,2mm/an). Cependant, la vélocité accélère au grès des oscillations saisonnières et peut atteindre temporairement +/-0,2 mm par jour.

4.1.3.3. Exemple 3 : fluage à Pahua (PK 3 - Afaahiti, GPS_330)



Figure 17: Photo terrain GPS 330 (source GEOLITHE)

Le versant directement au sud de la route du littoral à Pahua (PK3à Afaahiti) présente sur la végétation des indices d'un fluage du versant en direction de l'aval (en direction nord – nord-est) (Figure 17).

Les mesures de déformations indiquent un mouvement permanent avec phases actives. Le déplacement moyen mesuré est de 5 mm entre 2016 et 2021, avec un maximum de 10 mm et une vélocité maximale de +1,6 mm/an. Également, des accélérations temporaires sont observées pouvant atteindre +/-0,2 mm par jour. Le mouvement prend naissance sur le versant et se propage également sur la zone de piémont

plane en aval.

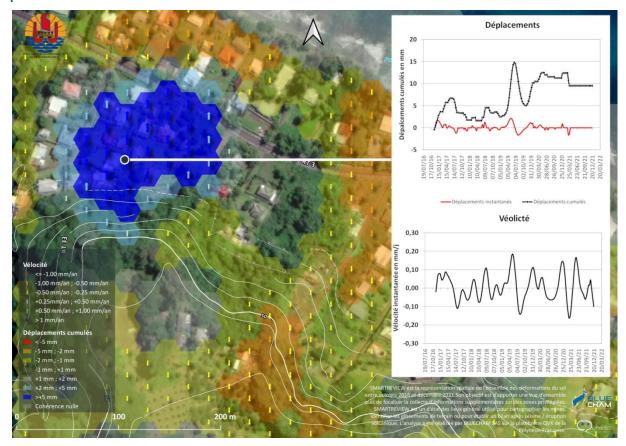


Figure 18: Déplacements et vélocités mesurées sur le fluage à Pahua - Afaahiti



4.1.4. Risque d'instabilité

La détermination de l'instabilité des sols repose sur l'analyse temporelle de l'évolution des déformations théorisée par Fukuzono (1985) et observée sur les mouvements de terrain de type glissements, glissements-coulées, fluages, effondrements pouvant évoluer vers des glissements à forte cinématique (Lacroix, Handwerger, and Bièvre 2020). Ce schéma distingue 3 phases :

- La phase d'initiation (1st Creep) qui correspond au démarrage du mouvement par une accélération soudaine puis transitionne vers ;
- La phase secondaire (2^{nd} Creep) de mouvement continu dans le temps, et suivi de ;
- La phase d'accélération (3rd Creep) dont l'intensité de l'accélération peut entrainer une instabilité du sol allant jusqu'au mouvement brutal ou glissements à forte cinématique.

La troisième phase peut ainsi être suivie d'une rupture brutale de la surface du sol (la déformation va tendre vers l'infini) ou se stabiliser vers une nouvelle phase secondaire (cas fréquent des mouvements réguliers à phase saisonnière).

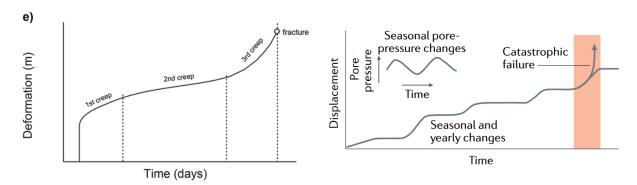


Figure 19: A gauche, schéma théorique de l'évolution des déformations de terrain tiré de (Royán, Abellán, and Vilaplana 2015), à droite succession de phases secondaires dans les mouvement réguliers, tiré de (Lacroix, Handwerger, and Bièvre 2020)

L'analyse d'instabilité SMART (paramètre BURST_P) analyse en chaque temps de la série temporelle et pour chaque maille de l'analyse la possible survenue de la phase d'accélération ayant un potentiel instable (dont l'accélération peut tendre vers l'infini). Pour une même zone, la phase d'accélération avec un potentiel instable peut survenir plusieurs fois dans le temps et ne pas entrainer d'événement brutal (absence ou insuffisance de pluie pour emballer le processus par exemple).

Cette analyse, rétrospective, permet de mettre en évidence les secteurs instables pouvant évoluer vers des mouvements rapides. En temps réel, cette analyse permet de prévoir la survenue de périodes instables et de les localiser (SMART PREDICT). Plus le nombre de phase instable est élevé, plus le risque de survenue d'un événement à forte cinématique est élevé.

Entre 2016 et 2021, 55 secteurs instables (figure 20) ont été identifiées sur l'ensemble de la zone analysée. Chacun de ces secteurs fait l'objet d'une fiche détaillée présentée en Annexe 1 de ce document.



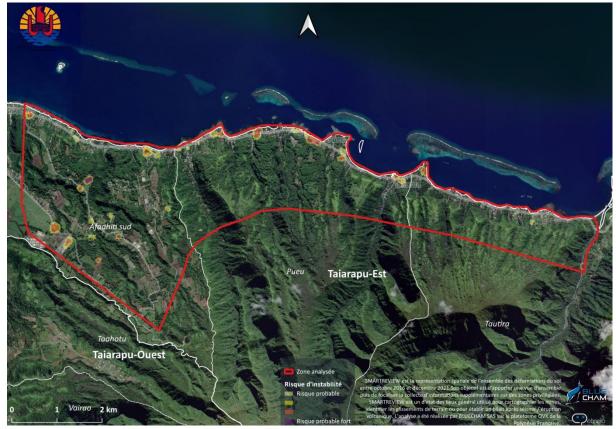


Figure 20: Risque d'instabilité des sols entre octobre 2016 et décembre 2021

4.2. Analyse détaillée sur le secteur de Raimatea

4.2.1. Synthèse des déformations observées

Sur le quartier de Raimatea, le cumul des déformations entre Octobre 2016 et décembre 2021 fait apparaître 3 zones distinctes (figure 21):

- 1. Le versant de Raimatea présentant un mouvement en surrection ou vers le nord-est de +2.00 mm en moyenne (+5 mm au maximum) et une vélocité moyenne de +0.55mm/an en moyenne (+1.3 mm/an maximum);
- Le lotissement Vaiana à l'ouest présentant un mouvement en subsidence ou vers le sud-ouest de -5.4 mm en moyenne (-10 mm au maximum) et une vélocité moyenne de -0.51mm/an en moyenne (-1.4 mm/an maximum);
- 3. Nuutae à l'est présentant un mouvement en subsidence ou vers le sud-ouest de -2.5 mm en moyenne (-8 mm au maximum) et une vélocité moyenne de -0.38 mm/an en moyenne (-1.4 mm/an maximum).

En amont de Raimatea, en bordure du Plateau Marumarutua, une zone localisée de subsidence (ou de mouvement vers le sud-ouest) de -3,7 mm en moyenne (-13 mm maximum) est identifiée. Les vélocités sont faibles : -0,27 mm/an en moyenne et -1,65 mm/an au maximum.

L'analyse a détecté plusieurs périodes d'instabilité entre octobre 2016 et décembre 2021, mais centrées sur le lotissement Vaiana (zone la plus instable) et Nuutae. Entre les deux, le bas quartier de Raimatea a présenté également des périodes d'instabilités mais semble périphérique des deux précédentes zones.



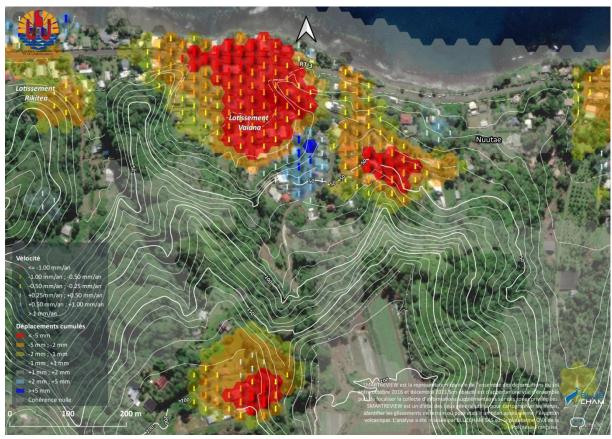


Figure 21: Déplacements cumulés et vélocités moyennes entre 2016 et 2021



Figure 22: Détection des instabilités entre 2016 et 2021



4.2.2. Analyse temporelle

Afin d'analyser la cinématique des mouvements sur le secteur de Raiamtea, des profils temporels des déformations (instantanées et cumulées) ont été réalisés sur 10 points de la zone, notés de A à J (figure 23).



Figure 23: Localisation des profils temporels

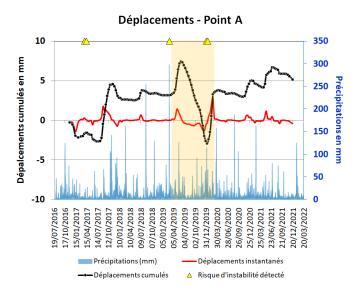
Le profil A présente une signature d'un mouvement phasé avec un artefact significatif en forme de "N" que l'on retrouve, de manière plus ou moins marquée, sur les profils B, C, D, E, H, et J (figure 25). Cet artefact débute fin mars 2019 par une accélération du mouvement soit en surrection, soit vers le nord-est, qui accélère au cours du mois de mars pour atteindre un paroxysme début juin 2019. La vélocité atteint +0,12 mm/j entre le 7 avril et le 1er mai 2019.

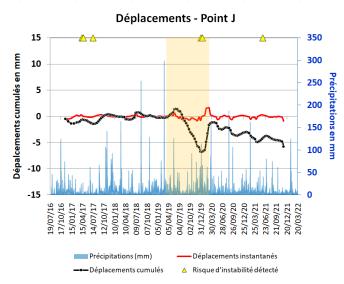
Puis, le mouvement s'inverse (subsidence ou vers le sud-ouest) jusqu'en début janvier 2020. La vélocité est moindre, variant entre -0.03 et -0.04mm/j, mais atteignant -0,11 mm/j entre le 3 et le 15 décembre.

Enfin, le mouvement s'inverse de nouveau (soit en surrection, soit vers le nord-est) entre début janvier et avril 2020. Les vélocités sont élevées et atteignent +0.23mm/j fin février 2020.

Cette signature s'apparente à un mouvement de phase d'accélération aboutissant à une instabilité du sol. Celle-ci, modifiant la porosité et la pression du sol a ensuite entrainé une phase de tassement telle que décrite par Lacroix, Handwerger, and Bièvre (2020, figure 24).







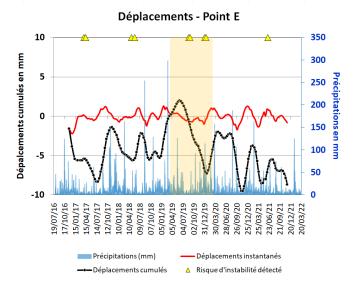


Figure 25: Profils temporels caractéristiques

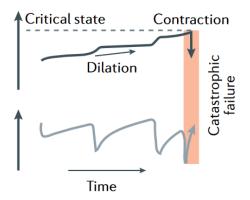


Figure 24 : Effets de la modification de la porosité et de la pression du sol lors de phase d'accélération

Ensuite, le mouvement phasé régulier en surrection ou vers le nord-est reprend jusqu'à la fin des mesures.

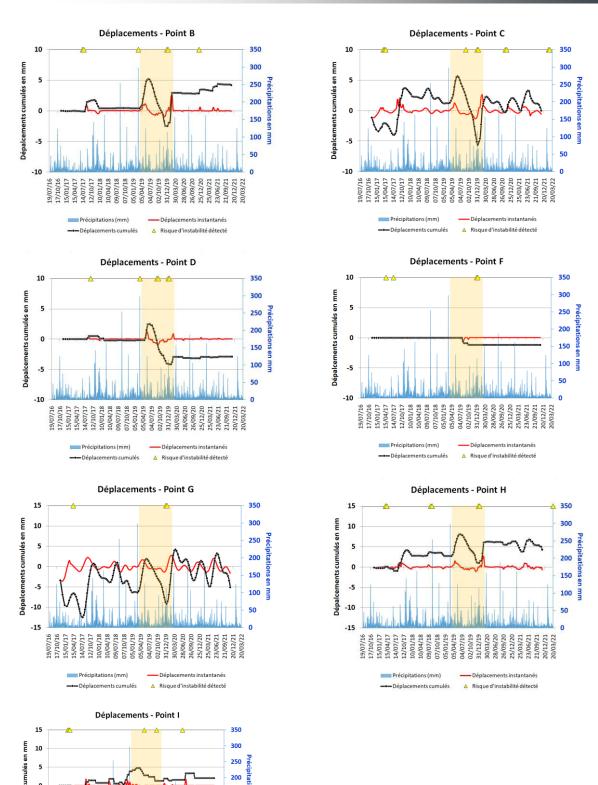
Egalement, l'analyse a détecté des périodes d'instabilité dès la fin mars 2019, puis de nouveau en décrmbre 2019.

Le profil temporel J (figure 25) sur le lotissement Vaiana, présente la même signature en N à la même période, suivant une période de stabilité. Contrairement à Raimatea, le mouvement régulier phasé consécutif est en subsidence (ou vers le sud-ouest).

L'intensité de l'artefact est moindre mais semble être à l'origine du mouvement en subsidence consécutif.

Enfin, le profil E présente une variation assez importante, globalement en subsidence (ou vers le sud-ouest), perturbée par des phases rapide en sens opposé. La signature en N est plus étallée et semble intervenir plus précocément.





150 100

-10 -15

Figure 26: Profils temporels



4.2.2.1. Schématisation du mouvement sur Raimatea

Afin de représenter de manière schématique les mouvements observés entre mars 2019 et avril 2020, nous avons modélisé l'évolution du profil topographique (figure 27) en fonction des déformations observées. Pour cela, nous avons additionné les déformations à l'altitude et à la distance à l'origine (soit un mouvement en surrection ou vers le nord pour les valeurs positives et en subsidence ou vers le sud pour les valeurs négatives). Les valeurs de déformations sont exagérées cent fois (x100) pour être visibles (figure 28).

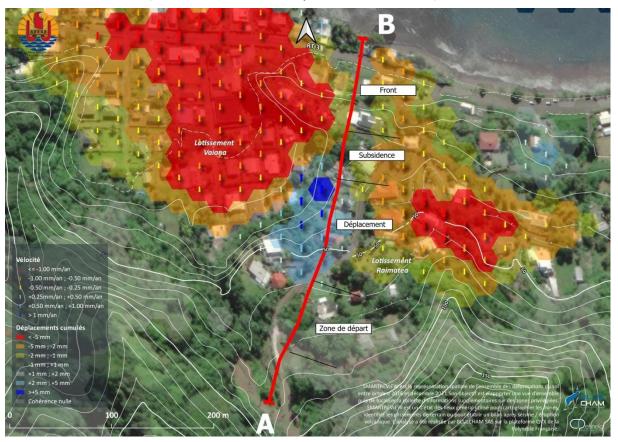


Figure 27: Profil topographique

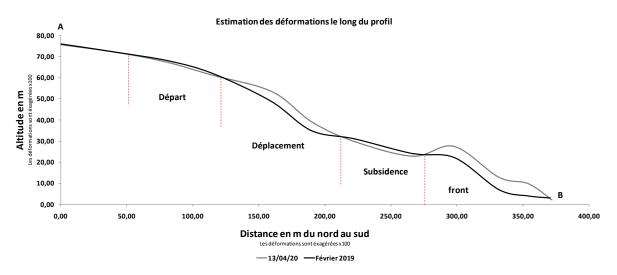


Figure 28: évolution du profil topographique entre mars 2019 et avril 2020 sur Raimatea



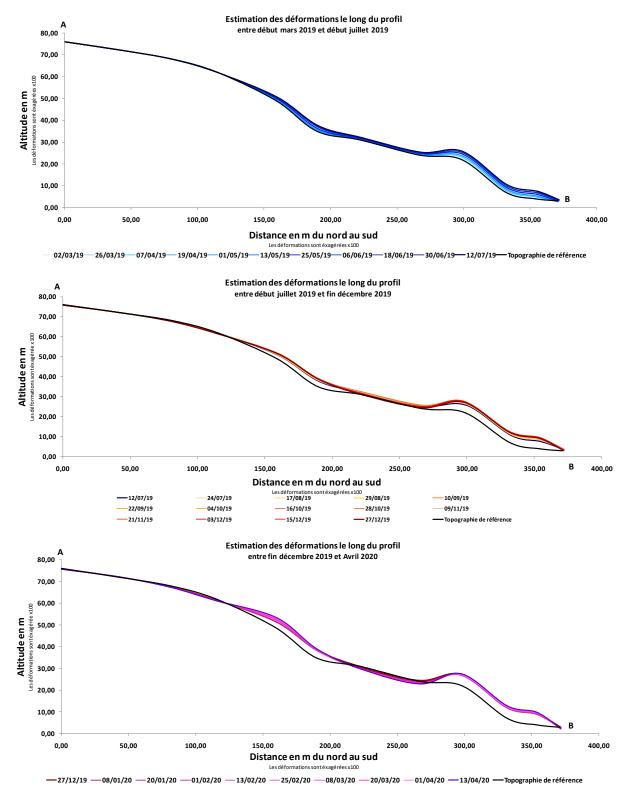


Figure 29 : Evolution du profil temporel en fonction des étapes du mouvement observé en 2019. En haut, entre mars et Juillet 2019 ; au centre, entre Juillet et novembre 2019 et en bas, entre novembre 2019 et avril 2020.

Même si cette représentation n'est pas une représentation exacte de la réalité, elle permet de mettre en évidence quatre sections distinctes du mouvement de l'amont vers l'aval :



- Une première zone présentant une légère subsidence (ou vers le sud-ouest) d'une soixantaine de mètres, localisée directement en amont des dernières maisons du lotissement, au niveau du ruisseau s'écoulant vers Vaiana;
- 2. Une section de déplacement d'un peu moins de 100 m soit en surrection ou plus probablement en direction de l'aval (soit vers le nord nord-est);
- 3. Une section en subsidence (ou vers le sud-ouest) de 50 m environ ;
- 4. Et enfin une section de déplacement de presque 150 m soit en surrection ou plus probablement en direction de l'aval (soit vers le nord nord-est) au pied du versant de Raimatea (notée front).

Lors des étapes temporelles identifiées précédemment, le déplacement en direction du nord - nord-est affecte les secteurs 2, 3 et 4, de manière plus prononcée sur les sections 2 et 4 que sur la section 3 (Figure 29, en haut) entre mars et juillet 2019.

Ensuite, la section 4 au pied du versant, subit un mouvement plus marqué en subsidence pouvant correspondre au tassement du sol précédemment glissé. La subsidence affecte également, mais de manière moins marquée, les sections 2 et 3. Également la subsidence commence à être perceptible en section 1.

Enfin, à partir de décembre 2019, le mouvement vers le nord – nord-est (ou en surrection) reprend sur les sections 2 et 4, de manière plus marquée sur la section 2. Dans le même temps, la subsidence s'accentue sur la section 3 ainsi que sur la section 1.

Sur la base de ces observations, nous pouvons supposer que la zone de départ du glissement se situe probablement sur la section 1 : la mise en mouvement des sections en aval dilatant le sol a créé les conditions favorables à un affaissement. Le glissement est ensuite composite, avec deux secteurs en mouvement vers le nord – nord-est (ou également en surrection), la seconde correspondant au front de la zone glissée en pied de versant. Ces deux sections sont séparées par une zone en subsidence (ou tassement) pouvant être le résultat de la mise en fluage du sol du glissement, mais sans exclure totalement une origine structurelle (failles).

Une analyse similaire a été réalisée sur un profil en travers entre le lotissement Vaiana et Nuutae (figure 30, 31 et 32).

Lors du mouvement principal de 2019, les secteurs de Vaiana et Raimatea présentent globalement un déplacement en surrection ou vers le nord - nord-est. Plus à l'est, sur Nuutae, le mouvement est globalement de type subsidence.

Dans le détail, les mouvements se révèlent plus complexes :

- En début de période (mars à juillet 2019), le lotissement de Vaiana connait une mouvement de type subsidence qui s'inverse rapidement en un mouvement de surrection (ou vers le nord nord-est);
- Au même moment, le secteur de Raimatea présente un mouvement marqué en surrection ou vers le nord - nord-est alors que le déplacement, de même nature, est très faible sur Nuutae;
- Entre juillet et décembre 2019, l'ensemble du profil présente un mouvement en subsidence, plus marqué sur le secteur du lotissement Vaiana;
- Après décembre 2019, le mouvement de surrection reprend sur les secteurs du lotissement Vaiana et Raimatea. Le mouvement est beaucoup plus important sur le lotissement de Vaiana que sur le versant de Raimatea. Dans la même période, le secteur vers Nuutae montre toujours un mouvement de subsidence.



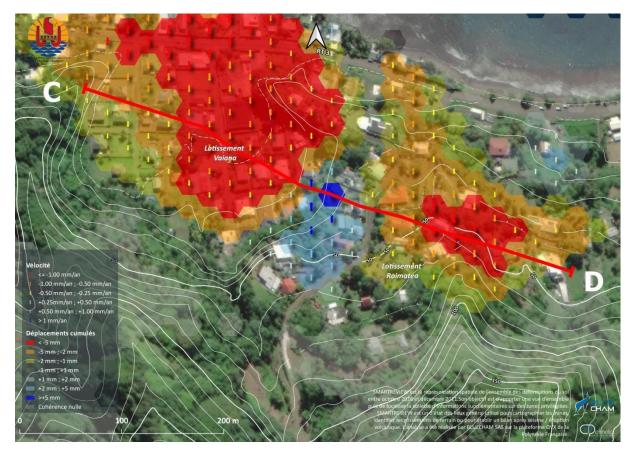


Figure 30: Profil topographique entre Vaiana et raimatea

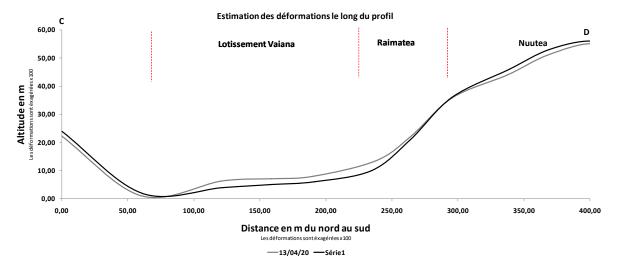


Figure 31: évolution du profil topographique entre mars 2019 et avril 2020 entre le lotissement Vaiana et Raimatea



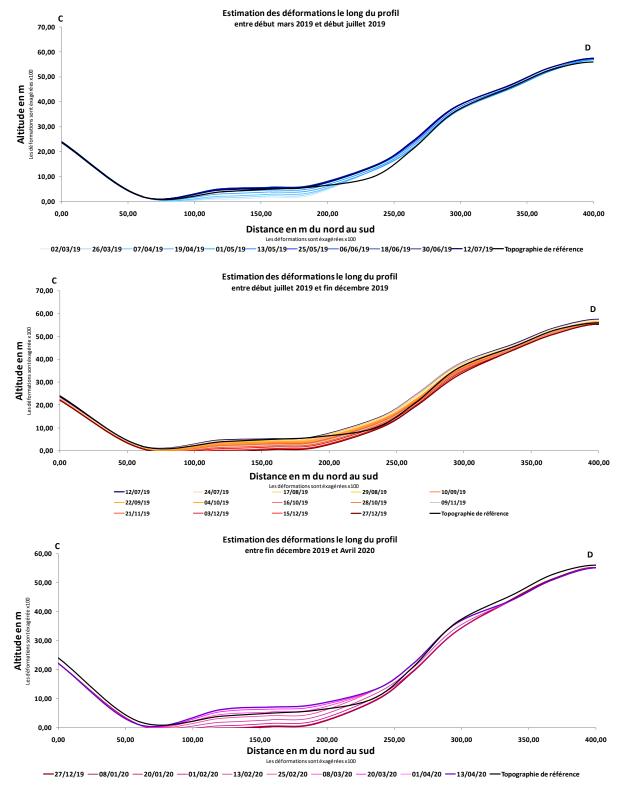


Figure 32: Evolution du profil temporel en fonction des étapes du mouvement observé en 2019. En haut, entre mars et Juillet 2019; au centre, entre Juillet et novembre 2019 et en bas, entre novembre 2019 et avril 2020 entre le lotissement Vaiana et Raimatea.



4.2.2.1. Synthèse des mouvements entre octobre 2016 et décembre 2021

L'analyse des profils topographiques sur l'ensemble de la période d'octobre 2016 à décembre 2021 (figure 33) indique :

- Même si le mouvement observé en mai 2019 sur le versant de Raimatea perdure de manière phasé jusqu'en 2021, le profil résultant est très similaire à celui observé dès début 2020. Le mouvement des sols sur la période mai 2019 à avril 2020 semble donc le principal contributeur aux déformations observées sur la zone durant la période 2016 - 2021;
- Le profil en travers montre quant à lui que la subsidence sur le lotissement de Vaiana, initié en 2019, déforme de manière significative la zone du lotissement après l'événement de 2019 jusqu'à fin 2021.
- Enfin, sur Nuutae, le mouvement de subsidence se continue mais de manière beaucoup moins significative que sur le lotissement Vainana.

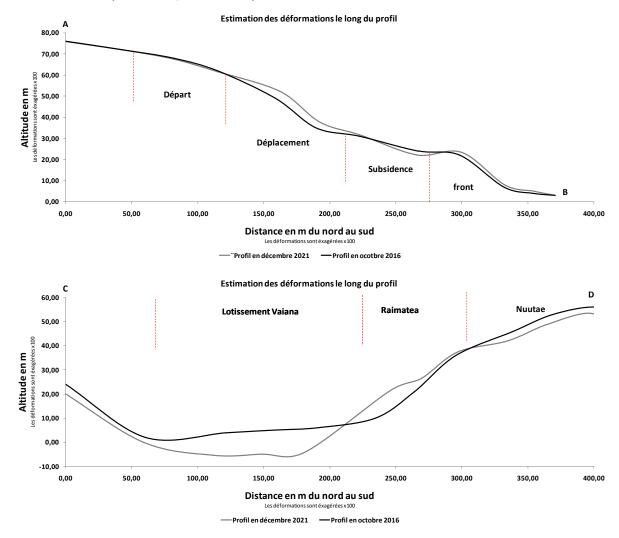


Figure 33 : Evolution du profil topographique sur Raimatea et entre Viana et Nuutae entre octobre 2016 et décembre 2021.



4.2.2.2. Relation avec les précipitations

Une relation directe entre l'occurrence d'événements pluvieux marquants et la cinématique des mouvements en 2019 sur le secteur de Raimatea peut être établie. En effet, nous pouvons noter que la survenue de pics de précipitations est suivie par une augmentation de la vélocité (positive dans le cas du fluage sur Raimatea) comme indiqué sur la figure 34, sur le point de mesure A.

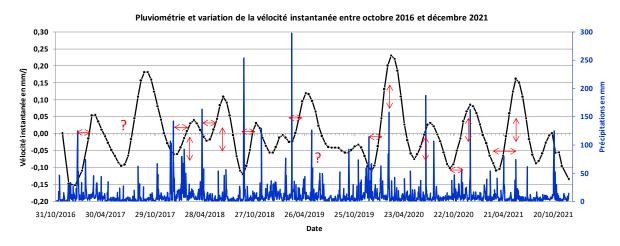


Figure 34 : Relations entre pluviométrie et vélocité (profil temporel A).

Un schéma récurent peut être observé: un pic de précipitation entraine une augmentation de la vélocité après une période d'inertie de quelques jours. Lorsque la vélocité augmente suite à ces événements, celle-ci peut être alimentée par des précipitations en cours d'événement. Cependant, l'augmentation de la vélocité est parfois décorrélée des précipitations comme en 2017 (marqué par un point d'interrogation) ou les précipitations n'entrainent quant à elles pas d'augmentation de la vélocité comme en 2019.

Concernant l'événement de mai 2019 en particulier, la phase d'accélération débute fin mars et est consécutive d'un événement pluvieux intervenu les 11 et 12 mars 2019. Cette phase d'accélération a pu être alimentée par l'occurrence d'événements pluvieux rapprochés, entrainant et amplifiant le mouvement. Ainsi, il a plu sans discontinuer entre le 21 et le 30 avril, avec des cumuls importants même s'ils n'étaient pas majeurs. C'est à cette période que la vélocité maximale est atteinte. Le mouvement sera ensuite entretenu en mai par l'occurrence d'un troisième événement pluvieux entre le 22 et le 25 mai.

Année	Mois	Période	Cumuls journalier maximal	Corroboré
2019	Mars	Les 11 et 12 mars	298 mm	Oui
	Avril	10 jours de pluie entre le 21 et le 30	44 mm	Oui
	Mai	Entre le 22 et le 25	126.1 mm	Oui
	Décembre	Entre le 15 et le 18	113.9 mm	Oui

Tableau 2: Evénements pluvieux majeurs en 2019



Il est à noter également que l'événement pluvieux du 15 au 18 décembre 2019 a pu jouer un rôle sur l'inversion du mouvement début janvier.

Une analyse similaire a été menée sur 23 profils (noté 20 à 43 sur la figure 35) correspondant à des zones de mouvement présentant un risque d'instabilité.



Figure 35 : Profils analysés entre pluviométrie et vélocité (profil en annexe)

Les constations réalisées sur le secteur de Raimatea peuvent être formulée pour l'ensemble des profils analysés indépendamment que le mouvement soit en subsidence ou en surrection :

- L'augmentation de la vélocité (mouvement de surrection ou tendant vers la surrection) peut être globalement corrélée à l'occurrence d'événements pluvieux importants;
- Un décalage dans le temps peut être constaté entre le pic de précipitation et l'augmentation de la vélocité, de quelques jours à quelques semaines;
- Si les précipitations perdurent durant la phase d'augmentation de la vélocité, cellesci semblent favoriser une intensification de la vélocité (accélération);
- Les mouvements de subsidence ne semblent pas corrélés aux précipitations ;
- L'intensité de la réponse varie en fonction des sites, probablement en fonction de la pente, du substrat et de la géologie locale;
- Cependant, certaines augmentations de la vélocité sont parfois non reliées à un événement pluvieux. C'est le cas pour l'augmentation de vélocité observée fin 2017 sur Raimatea, qui est observée sur de nombreux profils et qui ne semble pas corrélé à un événement pluvieux.

Il est probable donc qu'un temps d'inertie sépare l'initialisation de la phase d'accélération et l'événement pluvieux à son origine, lié à la circulation de l'eau dans le sol. Et l'occurrence d'événements pluvieux rapprochés, semble entrainer l'accélération du mouvement dès lors qu'il est initié.

4.2.1. Variation spatiale du mouvement observé en 2019



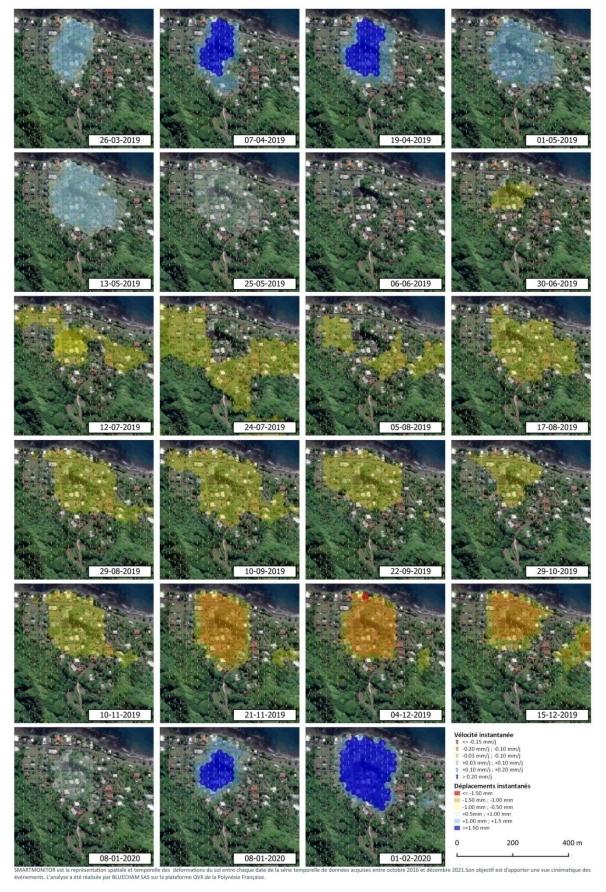


Figure 36: Variations spatiales des déformations entre mars 2019 et février 2020



L'analyse spatio-temporelle des mouvements observés en 2019 montre que :

- 1. Le déplacement vers le nord nord-est (ou de surrection), débute fin mars 2019 sur une langue allongée du lotissement Vaiana jusqu'à la mer;
- 2. Ce mouvement s'accentue en avril en remontant d'abord la vallée le long du ruisseau :
- 3. Puis il se propage sur le secteur de Raimatea à partir de la mi-avril jusqu'à fin mai ;
- 4. En juin, le mouvement s'inverse. D'abord localisé à la zone amont du lotissement Vaiana et de l'éperon terminal du versant de Raimatea, la subsidence se propage de manière diffuse sur l'ensemble de la zone et des versants autour. Ce mouvement peut être la résultante de plusieurs facteurs tels que l'assèchement des sols suite aux pluies et des phénomènes de tassement de secteurs ayant glissés, mais il est difficile de spatialement identifier des morphologies significatives;
- 5. A partir d'octobre, la subsidence se concentre sur la zone de mouvement initiée en mars et le mouvement s'accentue à partir de la mi-novembre jusqu'à fin décembre ;
- 6. Enfin, à partir de janvier 2020, le déplacement vers le nord nord-est (ou de surrection) reprend à partir du cœur du lotissement Vaiana pour s'élargir ensuite sur Raimatea.

L'analyse spatio-temporelle permet de proposer, sur la base des déformations observées lors de l'initiation du mouvement en mars – avril 2019 une extension possible de l'ensemble de la zone en mouvement (figure 37). Celle-ci englobe une grande partie du lotissement Vaiana, le lotissement Raimatea jusqu'au ruisseau bordant les dernières maisons du lotissement et pouvant correspondre à la tête de glissement. En effet, la réponse aux événements pluvieux de mars, avril et mai 2019 démarre sur le lotissement Vaiana avant de se propager vers Raimatea en mai. Il semble dès lors que l'ensemble de la zone constitue une seule et même zone de mouvement.



Figure 37: Extension proposée de la zone en mouvement



L'organisation de la zone en mouvement fait apparaître 3 zones (figure 38):

- Deux secteurs en subsidence (Vaiana et partie est du lotissement Raimatea ;
- Une zone centrale en surrection.

Il est à noter que les observations des désordres les plus caractéristiques sur le secteur se situent sur la zone en surrection et le secteur en subsidence à l'est de Raimatea, majoritairement au contact entre ces deux zones. Soumises à des contraintes opposées, ces secteurs vont être affectés, en fonction de la nature des sols et de la topographie (pente), par des mouvements superposés (tel que le fluage) au mouvement principal (subsidence / surrection). Sur le versant de Raimatea, la nature du sédiment (notamment les déblais/remblais et colluvions dont la cohésion diminue en fonction de leur teneur en eau (Géolithe 2022)) et la pente pouvant entrainer des fluages.

Le mouvement est globalement lent: 0.51mm/an en moyenne et -1.4 mm/an maximum sur Vaiana, et +0.55mm/an en moyenne et +1.3 mm/an maximum sur Raimatea. Il est donc généralement peu perceptible (en deçà des vélocités causant des désordres significatifs). La zone aval, sur le secteur du lotissement de Vaiana, le glissement est dominé par la subsidence sur l'ensemble de la période (à l'exception de 2019). En amont, sur Raimatea, il est dominé par un mouvement soit en surrection/gonflement ou en déplacement horizontal vers le nord – nord-est.

Il apparait dès lors probable que la zone Vaiana - Raimatea constitue une zone de glissement dont les origines ne sont pas uniquement liées à la nature du substrat superficiel mais dont les causes pourraient être géologiques et/ou structurales. Les caractéristiques doivent néanmoins être précisées par des investigations géophysiques et de terrain.



Figure 38: Structure de la zone en mouvement



Aussi, il n'est pas exclu que des phases d'accélération des déplacements, pouvant être importantes, surviennent lors de l'occurrence et de la répétition d'événements pluvieux sur des périodes courtes. Et un mouvement de forte cinématique ne peut être écarté au vu des nombreuses alertes d'instabilité détectées par l'analyse SMART. En effet, des vitesses instantanées de 0.23mm/jour ont été mesurées. Soutenues sur plusieurs semaines, ce type de mouvement est susceptible d'entrainer des dommages importants aux batiments et aux conduites ("Glissements et coulées de boue : informations techniques pour les ingénieurs" 2024).

5. PRECONISATIONS

- L'analyse SMART met en évidence les mouvements du sol en surrection (ou vers le nord-est) et en subsidence (ou vers le sud-ouest);
- Les mouvements mesurés sont compris entre -5mm/an et +2mm/an, susceptibles d'entrainer des dommages faibles aux bâtiments, la formation de petites fissures selon le type de construction et de fondation, de légers tassements et soulèvements du sol, déplacements du terrain;
- L'analyse SMART met en évidence 55 sites où les mouvements du sol sont susceptibles d'entrainer une instabilité (mouvement brutal ou de plus importante vélocité);
- Sur le lotissement de Raimatea, l'analyse fait apparaître une zone en mouvement englobant le lotissement Vaiana et le lotissement Raimatea :
 - Le mouvement est composite : sur le lotissement Vaiana et à l'est de Raimatea, le mouvement est dominé par la subsidence, ces deux secteurs sont séparés par une zone dominée par la surrection;
 - Les dommages constatés en 2019 sont localisés majoritairement sur le pourtour de cette zone centrale en surrection, au contact des secteurs en subsidence;
 - Le fluage observé peut donc être un épiphénomène résultant de la combinaison des mouvements sur l'ensemble de la zone.
- L'augmentation de la vélocité apparait corrélée dans une grande majorité des cas avec l'occurrence d'événement pluvieux majeurs.
- L'analyse SMART ne permet pas de déterminer le type et la structure profonde de la zone en mouvement même si elle permet de proposer une première extension et modalité du phénomène observé. Une analyse complémentaire (géomorphologique, géophysique, tomographique) doit être menée pour en déterminer la nature exacte.
- Les mouvements observés sont continus et phasés sur le secteur de Raimatea. Ils se continuent sur le secteur fin 2021. D'autres secteurs instables présentent également les caractéristiques de mouvements phasés continu, tant en subsidence qu'en glissement. Le suivi continu et régulier des déformations des sols permettra de:
 - o Renforcer la connaissance de la cinématique des zones en mouvement ;
 - Préciser l'extension des secteurs affectés;
 - Détecter de manière précoce, l'évolution, la propagation, voire l'apparition des déplacements.
- Cette analyse pourrait être réitérée sur d'autres secteurs d'intérêt de la DCA et intégrer la boite à outil à disposition de ses services pour la caractérisation des aléas mouvements de terrain et subsidence littorale.
- L'identification de secteurs instables et la possibilité d'occurrence de mouvement à forte cinématique nécessitent la surveillance en « temps réel » des mouvements du sol



et de disposer d'un outil permettant de prévoir la possible occurrence de tels phénomènes.

6. REFERENCES

- "14 février COMMUNIQUÉ MÉTÉOROLOGIQUE: Temps très perturbé ce week-end." 2024. Les services de l'État en Polynésie française. Accessed August 5. https://www.polynesie-française.pref.gouv.fr/Actualites/Archives/20192/14-fevrier-COMMUNIQUE-METEOROLOGIQUE-Temps-tres-perturbe-ce-week-end.
- "Base de données cartographique vectorielle (BD CARTO PF) data.gouv.fr." 2024. Accessed September 28. https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-de-donnees-cartographique-vectorielle/.
- Bernon, N, and C Garnier. 2023. Appuis Techniques Relatifs Aux Aléas Naturels En Polynésie Française. Rapport final V1. BRGM/RP-72966-FR. BRGM.
- "Fortes pluies : de nombreux dégâts recensés à la Presqu'île." 2024. TAHITI INFOS, les informations de Tahiti. Accessed August 5. https://www.tahiti-infos.com/Fortes-pluies-de-nombreux-degats-recenses-a-la-Presqu-ile_a181116.html.
- Fukuzono Teruki. 1985. "A Method to Predict the Time of Slope Failure Caused by Rainfall Using the Inverse Number of Velocity of Surface Displacement." *Landslides* 22 (2): 8-13_1. doi:10.3313/jls1964.22.2_8.
- Géolithe. 2022. "Précision Des Aléas Mouvements de Terrain Fiche Analytique N°19."
- GINGER CEBTP. 2023. ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DU GLISSEMENT DE QUARTIER RAIMATEA PK 6, Afaahiti. Étude géotechnique préalable et diagnostic géotechnique RAPPORT N° 23/0509.
- "Glissements et coulées de boue : informations techniques pour les ingénieurs." 2024. *Protection dangers naturels*. Accessed August 5. https://www.protection-dangers-naturels.ch/specialiste/dangers-naturels/glissements.html.
- Hersbach, Hans, Bill Bell, Paul Berrisford, Shoji Hirahara, András Horányi, Joaquín Muñoz-Sabater, Julien Nicolas, et al. 2020. "The ERA5 Global Reanalysis." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146 (730): 1999-2049. doi:10.1002/qj.3803.
- "INTEMPERIES | Tags | TAHITI INFOS, Les Informations de Tahiti." 2024. Accessed August 6. https://www.tahiti-infos.com/tags/INTEMPERIES/.
- K, M. 2019. "Fortes pluies : routes et commerces inondés · TNTV Tahiti Nui Télévision." TNTV Tahiti Nui Télévision. https://www.tntv.pf/tntvnews/polynesie/societe/fortes-pluies-routes-et-commerces-inondes/.
- Lacroix, Pascal, Alexander Handwerger, and Grégory Bièvre. 2020. "Life and Death of Slow-Moving Landslides." *Nature Reviews Earth & Environment* 1 (July). doi:10.1038/s43017-020-0072-8.
- "Météo: attention aux fortes pluies et aux orages." 2020. *Polynésie la 1ère*. https://la1ere.francetvinfo.fr/polynesie/tahiti/meteo-attention-aux-fortes-pluies-aux-orages-853338.html.
- "Pluies diluviennes sur les îles de la Société: les habitants sur le qui-vive." 2020. *Polynésie la 1ère*. https://la1ere.francetvinfo.fr/polynesie/tahiti/pluies-diluviennes-iles-societe-habitants-qui-vive-805687.html.
- "POLYNESIE FRANCAISE, GÉOLOGIE." 2024. Accessed September 22. http://sphaera.cartographie.ird.fr/carte_r2.php?num=1960.



- "POLYNESIE FRANCAISE, GÉOMORPHOLOGIE." 2024. Accessed September 22. http://sphaera.cartographie.ird.fr/carte_r2.php?num=1893.
- "POLYNESIE FRANCAISE, PÉDOLOGIE." 2024. Accessed September 22. http://sphaera.cartographie.ird.fr/carte_r2.php?num=1889.
- "Quelles sont les conséquences de la pluie?" 2019. *Polynésie la 1ère.* https://la1ere.francetvinfo.fr/polynesie/tahiti/quelles-sont-consequences-pluie-689620.html.
- Royán, Manuel J., Antonio Abellán, and Joan Manuel Vilaplana. 2015. "Progressive Failure Leading to the 3 December 2013 Rockfall at Puigcercós Scarp (Catalonia, Spain)." *Landslides* 12 (3): 585–595. doi:10.1007/s10346-015-0573-6.
- Samoyeau, Antoine. 2018. "La pluie perturbe les transmissions de l'OPT Radio1 Tahiti." https://www.radio1.pf/la-pluie-perturbe-les-transmissions-de-lopt/.
- Schmidt, Kersten, Jens Reimann, Núria Tous Ramon, and Marco Schwerdt. 2018. "Geometric Accuracy of Sentinel-1A and 1B Derived from SAR Raw Data with GPS Surveyed Corner Reflector Positions." Remote Sensing 10 (4): 523. doi:10.3390/rs10040523.
- "SentiWiki." 2024. Accessed August 5. https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentiwiki.
- "Tahiti : des maisons inondées et l'aéroport fermé quelques heures après de fortes pluies." 2019. Nouvelle-Calédonie la 1ère. https://la1ere.francetvinfo.fr/nouvellecaledonie/tahiti-maisons-inondees-aeroport-ferme-quelques-heures-apres-fortes-pluies-784859.html.
- USGS. 2024. "Earthquake Hazards Program." Accessed August 5. https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/.
- "Vigilance météorologique Un terrain inondé à Tautira." 2019. *Polynésie la 1ère.* https://la1ere.francetvinfo.fr/polynesie/tahiti/tautira/vigilance-meteorologique-terrain-inonde-tautira-715175.html.
- "Vigilance orange pour fortes pluies à Tahiti." 2019. Nouvelle-Calédonie la 1ère. https://la1ere.francetvinfo.fr/nouvellecaledonie/vigilance-orange-fortes-pluies-tahiti-785019.html.
- "Vigilance orange pour les fortes pluies aux îles du vent." 2021. *Polynésie la 1ère*. https://la1ere.francetvinfo.fr/polynesie/tahiti/polynesie-francaise/vigilance-orange-pour-les-fortes-pluies-aux-iles-du-vent-1136029.html.