

Programme ARAI II Érodibilité des talus de Polynésie française : analyse morphologique 2D et 3D par reconstitution stéréophotogrammétrique

Rapport final

BRGM/RP- 58965-FR

Septembre 2010

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2008

Thomas Dewez, Aude Nachbaur, Olivier Sedan

Avec la collaboration de

Christophe Rivière et Olivier Cerdan

Vérificateur :

Nom : C. Mathon

Date : 29 septembre 2010



Approbateur :

Nom : H. Modaressi

Date :

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots-clés : Érodibilité, Talus, Altérite, « mamu », Scories, Photogrammétrie, Polynésie Française.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Dewez T, Nachbaur A et Sedan O. (2010) – Programme ARAI II. Érodibilité des talus de Polynésie française : analyse morphologique 2D et 3D par reconstitution stéréophotogrammétrique. Rapport final. BRGM/RP-58965-FR, 149 p., 73 fig., 9 tab., 4 ann.

Synthèse

La Polynésie française est soumise à un climat tropical humide se traduisant par des précipitations moyennes annuelles pouvant localement atteindre 4 000 mm dans les zones côtières de Tahiti. Ces précipitations, associées à des températures chaudes toute l'année, favorisent l'altération du substratum volcanique des îles, provoquant ainsi la création du « Mamu », nom polynésien des altérites. Dans les zones escarpées, les précipitations importantes entraînent une érosion accélérée des talus non protégés, qui dégradent leur tenue mécanique (ravinement, écroulement...) jusqu'à entraîner des instabilités profondes.

L'étude proposée vise à répondre à plusieurs objectifs concernant l'érodibilité des talus en « mamu », très répandus en Polynésie Française :

- analyser le processus érosif de ces talus ;
- quantifier le départ de matière solide ;
- estimer l'incertitude induite par les mesures.

On a donc procédé à :

- un état des lieux de la problématique de l'érosion des talus ;
- la remise à jour d'un inventaire de 17 talus réalisé par le Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie (LTPP) en 1991, sur l'île de Tahiti ;
- la mise au point d'un protocole expérimental d'observation et de mesure de l'érosion de portion de talus, à différente échelle de temps, en distinguant deux types d'observations : (i) des observations qualitatives, et (ii) des mesures quantitatives d'érosion, éventuellement couplées à des mesures intensité/hauteurs cumulées de pluie.

Le profil des 17 talus a été mesuré par stéréo-photogrammétrie en janvier 2009, soit 18 ans après leur description initiale faite en 1991 par le LTPP. Entre ces deux dates, l'érosion de chaque talus a été quantifiée par deux grandeurs différentes, un indicateur de la section érodée (le coefficient de diffusivité) et un indicateur ponctuel de l'érosion le long d'un profil de talus (le taux d'érosion). Ces deux indicateurs, l'un intégral, l'autre différentiel, sont pourvus d'une estimation de l'erreur.

Ces mesures ont permis d'obtenir une grandeur quantitative du recul, indication précieuse très peu disponible dans la littérature. Malgré l'échantillon limité, il semble que nous puissions observer que, quel que soit le talus considéré, au-delà de vingt ans d'existence, la surface érodée (exprimée par le coefficient de diffusivité), tend vers une valeur constante, qui a été évaluée ici à $0,022 \text{ m}^2/\text{an}$ avec un intervalle de confiance à 95 % compris entre $0,007 \text{ m}^2/\text{an}$ et $0,038 \text{ m}^2/\text{an}$. Cette grandeur se rapproche des coefficients de diffusivité appliqués aux escarpements géologiques pour en évaluer l'érosion à long terme (plusieurs centaines ou milliers d'année). Localement,

au sein d'un même talus, les observations expérimentales permettent d'avancer que le taux d'érosion annuel, a une plage de variation possible entre 5,3 et 56,4 mm/an, selon la lithologie et la géométrie.

Pour explorer les processus d'érosion à un pas de temps plus fin, un talus expérimental fraîchement aménagé de moins de 6 mois avant le début de l'expérience a été suivi dans le quartier de Pamatai Huaiti, commune de Faa'a. Le talus d'environ huit mètres de hauteur, a deux sections séparées par une rupture de pente à 6 m de hauteur. La lithologie du talus est dominée par du mamu III-IV brun rouge avec localement des poches de scories de dimensions métriques et des bancs de lave altérée en boule. Des campagnes de photos ont été réalisées mensuellement en vue d'une exploitation stéréophotogrammétrique en trois dimensions. L'analyse de l'érosion du talus a utilisé les techniques suivantes : comparaison visuelle des photos brutes, extraction de modèles numériques de surface (MNS) et l'analyse visuelle et numérique de la colorimétrie des orthophotos.

Les différences de modèles numériques de surface sont capables de détecter toute érosion de plus de 12 mm d'épaisseur avec un niveau de confiance de 99,9 %. Ces différences révèlent que le taux d'érosion moyen du talus est de 15,2 mm/an. Plus de 80 % de l'érosion observée en 8 mois affecte les zones de scories, dont le taux d'érosion annuel propre s'élève à 83,0 mm/an (plus de cinq fois le taux moyen). Les zones de lave altérées en boules comptent pour le restant de l'érosion et le mamu n'est pas affectée par de l'érosion de manière détectable par différence de MNS. La comparaison visuelle des orthophotos révèle néanmoins que le mamu est lui aussi affecté par une altération de surface car le réseau de fracture qui le parcourt est devenu bien visible. Enfin, la mise en relation des époques où l'érosion des scories et laves altérées s'est produite avec la pluviométrie journalière, révèle que ce n'est pas la quantité de précipitation qui explique le déclenchement de l'érosion, mais un regain de pluviométrie après une période plus sèche.

Finalement, ces analyses morphologiques ont nettement mis en évidence deux processus de dégradation : un processus de dégradation par dessiccation affectant les parties très altérées et un processus de dégradation « en masse » initié dans les parties les moins altérées, et notamment les zones scoriacées. La variabilité de faciès des formations très altérées implique qu'à l'échelle d'un talus, on ne puisse dissocier aussi simplement ces deux problématiques d'ampleur très différente. Effectivement, au sein d'un même talus, l'hétérogénéité de faciès et la présence d'horizons peu cohésifs s'est avéré être un critère favorable au processus de dégradation en masse, ce qu'a permis de montrer à leur manière, chacun des deux protocoles. Ce mode de dégradation peut conduire à des vitesses de recul plus élevées (mais moins linéaires dans le temps), d'après ce qui a été observé sur la poche de scories du talus de Pamatai et sur les talus 123 et 66 du LTPP. L'érosion s'initierait préférentiellement dans les horizons où la cohésion est faible (ou le devient par lessivage de la matrice fine dans une lithologie grenue), entraînant ensuite, par sous-cavage principalement, le recul des autres faciès. Le point remarquable est que ces hétérogénéités lithologiques, défavorables à l'érosion, sont attendues dans les parties les moins altérées où la structure de la roche mère est la plus reconnaissable.

Afin d'approfondir la connaissance des processus de dégradation et notamment leur évolution temporelle, il serait pertinent de poursuivre le suivi mensuel photogrammétrique du talus de Pamatai, pour analyser notamment l'évolution du phénomène de dessiccation. En effet, le développement du réseau de fissures observé au cours d'une année sur les profils à partir d'une orthophoto haute résolution montre que la dégradation du talus ne fait que commencer. La poursuite de ce suivi permettrait notamment d'appréhender la non-linéarité des processus de dégradation selon les faciès lithologiques.

Finalement, l'influence significative de la lithologie mis en évidence ici, incite à approfondir la connaissance des phénomènes de dégradation des caractéristiques géomécaniques de ces faciès, ce qui n'a pas été le sujet de cette étude. Il reste donc à proposer des protocoles de mesures à cet effet, faisant intervenir des méthodes intrusives légères, permettant *a minima* de comparer l'état initial et l'état final des paramètres géomécaniques. Si les méthodes d'investigation doivent donner des indications sur les caractéristiques de la surface, l'évolution des caractéristiques géomécaniques en profondeur (dans la masse du talus) reste un volet d'investigation clé, puisqu'elle intervient probablement sur la non-linéarité des dégradations via notamment la vitesse d'altération des formations altérées.

La variabilité lithologique du substrat volcanique polynésien à l'échelle métrique ne permet pas de faire de préconisation générique d'aménagement. L'expérience a montré que le taux d'érosion était très variable d'une zone à l'autre sur un même talus. Il ressort de l'étude pluri-décennale que les taux d'érosion se stabilisent en général autour de 21 mm/an mais ce avec une forte variabilité qui dépend de la nature du faciès initial de la roche mère.

En conséquence, la mise en œuvre de parades (béton projeté, végétalisation...) pour limiter les effets indésirables de l'évolution des talus (recul, stabilité, transport solide), passe par un diagnostic préalable de la nature lithologique des terrains qu'il recoupe et de la géométrie de ces formations.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Érodibilité des talus de Polynésie Française et le protocole proposé	15
2.1. CONTEXTE DES TALUS EN POLYNÉSIE FRANÇAISE	15
2.2. ÉTAT DES LIEUX DE LA PROBLÉMATIQUE.....	16
2.2.1. Études existantes	16
2.2.2. Une base de données de talus, constituée par le LTTP en 1991.....	17
2.3. SUIVI MORPHOLOGIQUE DE LA DÉGRADATION DES TALUS PROPOSÉ EN 2009.....	20
3. Technique de reconstitution stéréophotogrammétrique	23
3.1. INTRODUCTION	23
3.2. FORMATION D'UN MODÈLE EN TROIS DIMENSIONS.....	24
3.2.1. Principe.....	24
3.2.2. Orientation interne	24
3.2.3. Orientation relative	28
3.2.4. Orientation absolue	28
3.2.5. Qualité de l'orientation	30
3.3. ACQUISITION DES PHOTOS SUR LE TERRAIN	32
3.3.1. Disposition des prises de vue.....	32
3.3.2. Pérennisation du référentiel cartographique.....	33
3.3.3. Conditions d'éclairage du talus.....	34
3.4. CONCLUSION	35
4. Quantification 2D de l'érodibilité, sur une échelle de temps pluriannuelle	37
4.1. CATALOGUE DES 17 TALUS SÉLECTIONNES	37
4.1.1. Localisation.....	37
4.1.2. Description des talus	39
4.2. QUANTIFICATION 2D DU REcul.....	43
4.2.1. Reconstruction des profils 2D.....	43
4.2.2. Quantification du recul.....	47
4.3. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	52

4.3.1. Une mesure du recul des talus	52
4.3.2. Des processus érosifs qui se distinguent.....	55
5. Définition et mise en oeuvre d'un protocole expérimental pour un suivi mensuel de l'érodibilité en 3D.....	59
5.1. PRÉSENTATION DU TALUS EXPÉRIMENTAL DE PAMATAI HUAITI	59
5.1.1. Situation générale du talus.....	59
5.1.2. Description lithologique du talus	60
5.2. ACQUISITION PHOTOGRAPHIQUE EN VUE D'UNE RECONSTITUTION STÉRÉOPHOTOGRAMMÉTRIQUE 3D.....	62
5.2.1. Protocole des prises de vues	62
5.2.2. Base de données photographique	64
5.2.3. Protocole de prise de vue	66
5.3. SÉLECTION DES COUPLES PHOTOGRAPHIQUES PERTINENTS	67
5.3.1. Sélection des périodes érosives significatives, appuyées par les données pluviométriques	67
5.3.2. Sélection d'une portion de talus représentative, centrée sur la zone scoriacée.....	71
5.4. COMPARAISON DES MNS	72
5.4.1. Reconstruction des MNS	72
5.4.2. Des différences brutes à la carte d'érosion.....	73
5.4.3. Quantification de l'érosion et analyse des résultats	78
5.5. COMPARAISON DES ORTHOPHOTOGRAPHIES.....	80
5.5.1. Interprétation visuelle.....	80
5.5.2. Comparaison numérique de la colorimétrie	83
5.5.3. Conclusion sur l'interprétation des orthophotos	91
5.6. CONCLUSION	92
6. Interprétations géotechniques et perspectives.....	93
6.1. QUANTIFICATION DU RECU L ANNUEL MOYEN.....	93
6.2. INFLUENCE DE LA LITHOLOGIE SUR LES PROCESSUS DE DÉGRADATION	93
6.2.1. Influence de l'hétérogénéité de faciès lithostratigraphique à une échelle de temps pluriannuelle.....	94
6.2.2. Suivi de la dégradation plurimensuelle de deux types de faciès.....	Erreur ! Signet non défini.
6.3. SYNTHÈSE ET PERSPECTIVE	98
6.3.1. Synthèse géotechnique.....	98

6.3.2. Perspectives géotechniques.....	100
6.3.3. Perspectives réglementaires	101
7. Conclusions	103
8. Bibliographie.....	105

Liste des Figures

Figure 1 : Terrassements du lotissement des Hauts de Outumaoro à Faa'a (sur le versant au dessus de l'université).....	16
Figure 2 : Carte de localisation des 24 talus anthropiques (croix rouges) représentatifs répertoriés dans l'étude de Simoneau et Espada (1991).	18
Figure 3 : Vue des faisceaux perspectifs du talus de Pamatai convergent vers la caméra 2 (en rouge).	23
Figure 4 : Groupe de deux faisceaux perspectifs reliant les même points du talus de Pamatai aux cameras 2 et 3 (en rouge).	24
Figure 5 : Principe de l'orientation interne et relative	25
Figure 6 : Calibration d'un appareil photo avec Photomodeler.	25
Figure 7 : Mise en pratique des prises de vue de la cible plane de calibration Photomodeler.	26
Figure 8 : Certificat de calibration de Photomodeler pour le Pentax K200D – 21 mm utilisé pour le suivi mensuel de talus.....	27
Figure 9 : Certificat de calibration de Photomodeler pour le Canon 350D – 20 mm utilisé pour le suivi mensuel de talus.....	27
Figure 10 : Disposition des points homologues qu'il faut rechercher pour calculer l'orientation relative.....	28
Figure 11 : Orientation relative des prises de vue pour la reconstruction du talus de Pamatai Hauti (cf. chapitre 5).....	29
Figure 12 : Matériel mis en œuvre pour mesurer la morphologie des talus.	29
Figure 13 : Exemple de cible permettant de repérer précisément des points homologues entre points de vue différents.....	31
Figure 14 : Influence de l'angle de convergence entre deux points de vue sur l'erreur de position d'un point.....	31
Figure 15 : Exemple de trois photos convergentes du talus de Pamatai Hauti (voir disposition Figure 16).	32
Figure 16 : Disposition relative des points de vue correspondant aux photos de la Figure 15.....	32
Figure 17 : Schéma de prise de vue qui satisfait à la fois les besoins pour l'orientation relative des couples de photos (CS1, CS2, CS3) et des conditions de corrélation optimales entre CS1 et M1.....	33

Figure 18 :	Comparaison de deux panoramas du talus de Pamatai en mars 2009 et juillet 2009.	34
Figure 19 :	Schéma conceptuel des cas de figures rencontrés pour la comparaison des 24 talus représentatifs du LTPP.	37
Figure 20 :	Carte des 24 talus type sélectionnés par le LTPP (Simoneau et Espada, 1991) tels qu'ils ont été retrouvés lors de la mission de janvier-février 2009.	39
Figure 21 :	Croquis descriptif du talus 14 (extrait des fiches descriptives de la Phase 1 (Simoneau et Espada, 1991).	40
Figure 22 :	Lithologie détaillée de 4 des 17 talus, d'après les schémas descriptifs du LTPP.	41
Figure 23 :	Exemple de mesure d'érosion en 2D sur le talus 003.	44
Figure 24 :	Schéma de comparaison possible en 2D entre les profils de talus mesurés par le LTPP en 1991 et par photogrammétrie en 2009, étant donnée que l'origine du profil de talus n'est pas explicite dans l'étude de Simoneau et Espada (1991).	45
Figure 25 :	Aire érodée en fonction de la hauteur sur laquelle l'aire érodée a été évaluée.	47
Figure 26 :	Figures originales de l'article de Hanks et al.(1984) montrant un profil typique d'escarpement ainsi que l'archétype d'une ancienne falaise bordant le Lac Bonneville (Utah, USA), il y a 14 500 ans.	48
Figure 27 :	Exemple d'escarpement diffus (brèche et scories) face au talus n° 142 (lotissement Aute III, commune de Pirae).	50
Figure 28 :	Coefficient de diffusivité des 17 talus en fonction de la classe de matériau de l'affleurement.	51
Figure 29 :	Taux d'érosion médians des différents talus en fonction de leur classe de matériau.	52
Figure 30 :	Distribution cumulée empirique (en anglais Empirical Cumulated Distribution Function = ECDF) des coefficients de diffusivité.	53
Figure 31 :	Distribution cumulée empirique (en anglais Empirical Cumulated Distribution Function = ECDF) des taux d'érosion médian.	54
Figure 32 :	Précision lithologique sur les 2 talus les plus érodés.	56
Figure 33 :	Profil actuel du talus 11, dont le taux d'érosion n'est pas particulièrement élevé, mais dont la présence d'un paléosol sous-cave la tête de talus, sans qu'aucune déstabilisation n'ait encore eu lieu.	57
Figure 34 :	Localisation du talus test de Pamatai (noté RefPamataiHuaiti) dans le quart inférieur droit de l'image.	60
Figure 35 :	Photo panoramique du talus test de Pamatai Huaiti (février 2009) sélectionné pour le levé mensuel.	60
Figure 36 :	Poches de scories et couches cendreuses.	61
Figure 37 :	Détail d'un scorie (scorie est féminin).	62
Figure 38 :	Exemple de trois photos panoramiques contiguës, prises le 13 août 2009, et documentant l'évolution du talus de Pamatai Huaiti sur la commune de Faa'a.	63
Figure 39 :	Points marqués sur la mire et sur la cane pour identifier respectivement une échelle (longueur de la mire : 4 m), une direction horizontale (ici E-W) et la verticale.	64

Figure 40 :	Comparaison qualitative entre le 13 août et le 22 octobre 2009.	68
Figure 41 :	Comparaison qualitative entre le 30 décembre 2009 et le 11 février 2010, c'est-à-dire les mesures encadrant le passage du cyclone Oli sur la Polynésie.....	69
Figure 42 :	Pluviométrie à la station MétéoFrance de Faa'a, entre le 1 ^{er} février 2009 et le 31 mars 2010.....	70
Figure 43 :	Situation et croquis lithologique de la zone étudiée en détail sur le talus de Pamatai.....	72
Figure 44 :	Représentation 3D et comparaison visuelle des MNS du talus en août 2009 et avril 2010.....	73
Figure 45 :	Différences topographiques brutes entre août 2009 (époque 06) et avril 2010 (époque 14).....	74
Figure 46 :	Distribution aléatoire de 1500 points (points noirs) dans des zones sans érosion.	75
Figure 47 :	Distribution des différences topographiques échantillonnées aléatoirement dans les domaines sans érosion (voir Figure 46).....	75
Figure 48 :	Carte de correction à appliquer au MNS d'avril 2010 pour retirer le biais de calage avec le MNS d'août 2009.	76
Figure 49 :	Différences topographiques corrigées entre les MNS d'avril 2010 et août 2009.....	76
Figure 50 :	Carte des épaisseurs érodées sur le talus de Pamatai entre le 13 août 2009 et le 22 avril 2010 (soit 252 jours).	77
Figure 51 :	Carte d'érosion et de lithologie.....	79
Figure 52 :	Histogrammes des épaisseurs maximales, aires et volumes des zones érodées entre août 2009 et avril 2010.	79
Figure 53 :	Distribution cumulées inverses des épaisseurs, aires et volumes.	80
Figure 54 :	Orthophoto du talus en août 2009 (a) avril 2010 (b).	81
Figure 55 :	Départ de matériaux en tête de talus.....	82
Figure 56 :	Départ de matériaux dans une poche de scorie.	82
Figure 57 :	Réseau de fissures révélé par comparaison visuelle des orthophotos dans les zones où les différences topographiques sont trop subtiles pour se manifester dans les différences de MNS.	83
Figure 58 :	Différence des couleurs des orthophotos.....	84
Figure 59 :	Vue de détail des différences d'orthophotos (avril 2010 moins août 2009).	85
Figure 60 :	Profils colorimétriques dans la bande verte des deux orthophotos le long de l'axe rouge sur l'orthophoto d'avril 2010.....	85
Figure 61 :	Histogramme des bandes colorimétriques des deux orthophotos (06 : août 2009 ; 14 : avril 2010).	86
Figure 62 :	Composante de teinte (Hue) des orthophotos dans l'espace colorimétrique HSV.....	87
Figure 63 :	Composante de Saturation des orthophotos dans l'espace HSV.	87
Figure 64 :	Composantes de valeur des orthophotos dans l'espace HSV.	88
Figure 65 :	Détail des orthophotos dans une zone de mamu lisse.	88

Figure 66 :	Différence absolue de la composante Valeur de l'espace HSV, entre août 2009 et avril 2010.....	89
Figure 67 :	Différences absolues de la composante valeur (HSV) des orthophotos d'août 2009 et avril 2010.	90
Figure 68 :	Vue de détail de la grille de valeur corrigée en regard d'une zone effectivement érodée.	90
Figure 69 :	Contraste de processus érosif selon la nature lithologique du talus.	95
Figure 70 :	Réseau de fissures de dessiccation sur les zones de Mamu III et IV.	96
Figure 71 :	Variation de faciès et de cohésion des couches de laves.	97
Figure 72 :	Classe d'érodabilité (Extrait de Simoneau et Espada, Phase 1 et 2, 1991).....	99

Liste des tableaux

Tableau 1 :	« Classification provisoire » d'érodibilité des talus, d'après Simoneau et Espada (1991).....	19
Tableau 2 :	Caractéristiques synthétiques du Mamu, extrait du rapport BRGM/RP-54835-FR.....	20
Tableau 3 :	Caractéristique des 24 talus types, suite à l'investigation de terrain de 2009.	38
Tableau 4 :	Synthèse des lithologies rencontrées par talus (cases cochées avec un « x »). ...	42
Tableau 5 :	Répartition des talus par lithologie.....	43
Tableau 6 :	Caractéristiques expérimentales évaluées par le LTPP en 1991 sur les 17 talus nous concernant (extrait de Simoneau et Espada, 1991).....	43
Tableau 7 :	Résultat de mesure de l'érosion des 17 talus.	46
Tableau 8 :	Localisation du clou de référence sur la zone de scories.	63
Tableau 9 :	Synthèse des photos du talus de Pamatai Huaiti centrée sur la zone à scories. ...	66

Liste des annexes

Annexe 1	Description du mode opératoire des visites de talus et présentation de la fiche descriptive utilisée par le LTPP (Source : Simoneau et Espada, 1991)	107
Annexe 2	Exemple de schéma descriptif d'un talus (Source : Simoneau et Espada, 1991)	119
Annexe 3	Photographies des 17 talus, lors de l'investigation de 2009.....	123
Annexe 4	Comparaison 2D entre les profils mesurés en 1991 par le LTPP et ceux mesurés en 2009 par le BRGM	139

1. Introduction

La Polynésie française est soumise à un climat tropical humide se traduisant par des précipitations moyennes annuelles pouvant localement atteindre 4 000 mm dans les zones côtières de Tahiti. Ces précipitations, associées à des températures chaudes toute l'année, favorisent l'altération du substratum volcanique des îles, provoquant ainsi la création du « Mamu », nom polynésien des altérites.

Dans les zones escarpées (naturelles ou aménagées), les précipitations importantes entraînent une érosion accélérée des talus non protégés, s'initiant par des ravinements. Les dégradations de la géométrie du profil et des caractéristiques géomécaniques peuvent aller jusqu'à entraîner des instabilités d'ampleur, de type glissement. Par ailleurs, la forte pression urbaine sur l'île de Tahiti conduit à la création de lotissements dans des reliefs escarpés, à l'aide de terrassement taillé en déblais dans la roche volcanique altérée (Mamu). Les talus sont généralement terrassés avec une pente raide (~ 68°) par tranche de 6 m de hauteur au maximum. Cette géométrie, particulièrement raide, permet à la fois de maximiser la surface horizontale disponible pour bâtir et de limiter l'effet érosif des pluies du fait de la faible longueur d'écoulement du talus. Confronté à cette problématique d'urbanisation, le Service de l'Urbanisme souhaite améliorer la connaissance du processus d'érodibilité de ces talus dans l'objectif d'aboutir à des dispositions réglementaires adaptées à cette problématique.

Dans ce contexte de développement urbain, au début des années 1990, le Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie (LTPP) s'est intéressé à l'érodibilité de ces talus de terrassement. L'approche choisie à l'époque consistait à établir un inventaire des talus types rencontrés dans la zone urbaine de Tahiti. La typologie qui s'en est suivie tient compte du type de matériaux constituant le talus et de ses caractéristiques géométriques des talus (profil, orientation, altitude). 166 talus ont ainsi été renseignés dans une base de données (Simoneau et Espada, 1991). Un sous-échantillon de 24 d'entre eux, jugés représentatifs, a bénéficié en complément de tests géotechniques.

Le BRGM a proposé, dans le cadre du programme ARAI II, une approche complémentaire, basée sur une analyse morphologique de la dégradation de ces talus, à partir d'une reconstitution 3D par stéréophotogrammétrie. Deux protocoles complémentaires ont été mis en place à cet effet, à des échelles de temps différentes :

- une analyse des mécanismes et une quantification du recul des talus sur plusieurs années, à partir de l'évolution du profil 2D d'une vingtaine de talus entre 1991 et 2009. Cette comparaison se base sur les données Simoneau et Espada (1991) ;
- un suivi mensuel d'un talus en 3D, pendant une année, pour comprendre les mécanismes et quantifier les processus de dégradation des différents faciès au sein d'un même talus. Fraichement taillé, le talus de Pamatai Huaiti sélectionné à cet effet est situé sur la commune de Faa'a, en contrebas du lotissement de Pamatai Hill. Son aménagement récent, remonte aux environs de septembre 2008 et le suivi s'est déroulé de février 2009 à avril 2010.

2. Érodibilité des talus de Polynésie Française et le protocole proposé

2.1. CONTEXTE DES TALUS EN POLYNÉSIE FRANÇAISE

La Polynésie française est soumise à un climat tropical humide se traduisant par des précipitations moyennes annuelles pouvant atteindre localement 4 000 mm dans les zones côtières de Tahiti. Ces précipitations, associées à des températures chaudes toute l'année, favorisent l'altération du substratum volcanique des îles, provoquant ainsi la création du « Mamu », nom polynésien des altérites.

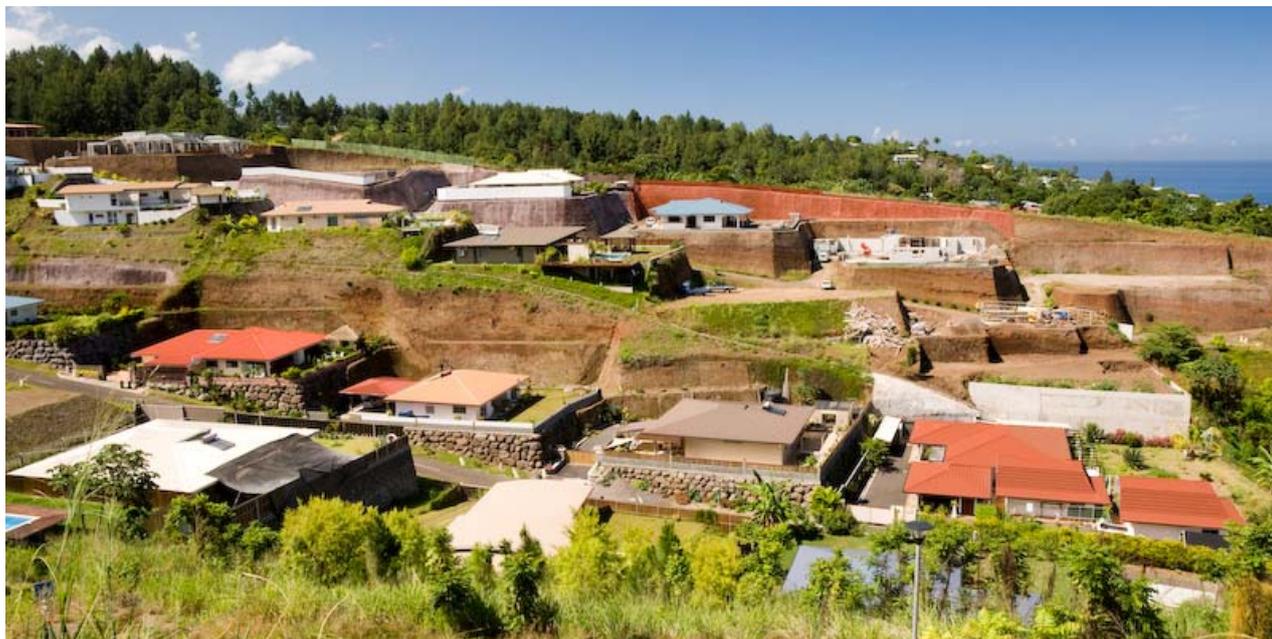
Dans les zones escarpées (naturelles ou aménagées), ces précipitations importantes entraînent une érosion accélérée des talus non protégés. Les effets principaux sont les suivants :

- ravinement des talus ;
- recul du talus, pouvant à terme être très significatif ;
- difficultés de développement d'une végétation pérenne protectrice ;
- entraînement importants de « terres » vers l'aval pouvant conduire à l'obturation des ouvrages hydrauliques, voire au développement de coulées de boues ou de laves torrentielles (sans parler de l'écologie des rivières et des lagons) ;
- dégradation plus profonde des caractéristiques géomécaniques pouvant provoquer des instabilités d'ampleur, de type glissement ou écoulement.

Par ailleurs, la pression urbaine sur l'île de Tahiti conduit les promoteurs immobiliers à installer des lotissements de plus en plus haut sur les crêtes et les versants dominant la plaine littorale. Étant donné les reliefs particulièrement raides et la nature peu résistante du substratum, les lotissements sont construits en terrasses déblayant la roche volcanique altérée. Chaque parcelle correspond alors à une surface plane délimitée par des talus (Figure 1).

Les talus sont généralement terrassés avec une pente habituelle de 5/2 (~68°), voire parfois 5/3 (58°) par tranche de 6 m de hauteur au maximum. Cette géométrie, particulièrement raide, permet à la fois de maximiser la surface horizontale disponible pour bâtir et de limiter l'effet érosif des pluies du fait de la faible longueur d'écoulement du talus.

Les terrains achetés comprennent la partie plane ainsi que le talus aval de la parcelle jusqu'à son pied, en limite de la propriété voisine. L'érosion des talus concerne donc la population à double titre : d'une part la perte de terrain horizontal déjà limité, mais aussi la mise en danger éventuelle de la parcelle en contrebas.



*Figure 1 : Terrassements du lotissement des Hauts de Outumaoro à Faa'a
(sur le versant au-dessus de l'université).*

Le versant est taillé en marche d'escalier dans la roche volcanique altérée pour permettre la construction de maisons sur des parcelles horizontales.

C'est dans ce contexte que le Service de l'Urbanisme souhaite caractériser l'érodibilité des talus taillés dans le « Mamu » (roche volcanique altérée).

2.2. ÉTAT DES LIEUX DE LA PROBLÉMATIQUE

2.2.1. Études existantes

Bien qu'il n'y ait pas eu d'action sur l'érodibilité des talus dans le cadre du premier projet ARAI, il en reste néanmoins que cette problématique est une préoccupation réelle des services en charge de l'aménagement de l'espace sur l'île et qui a donc, à ce titre, fait l'objet d'études antérieures. Parmi les études répertoriées par le Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie (LTPP) ou par le BRGM, les plus proches du sujet qui nous concerne sont les suivantes :

- Philiponnat M. (1970). Problèmes routiers de lutte contre l'érosion en zone tropicale. Compte rendu de conférence au Centre Expérimental de recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics.
- Servant J. (1974). Un problème de géographie physique en Polynésie Française : l'érosion. Exemple de Tahiti. Cah. ORSTOM, sér. Sci. HI~, vol. XI, no 314 - 1974 : 203-209.
- Ministère de la Santé, de l'Environnement et de la Recherche scientifique, délégation à l'environnement (1989). Mise au point des techniques de lutte contre

l'érosion et la sédimentation dans les lagons de Polynésie Française. Rapport de première phase d'étude.

- Ministère de la Santé, de l'Environnement et de la Recherche scientifique, délégation à l'environnement (1990). Techniques de lutte contre l'érosion des sols. Synthèse bibliographique. Tahiti, Polynésie Française.
- Simoneau X., Espada J.L. (1991) – « Étude de Talus – Lutte contre l'érosion – Stabilité des pentes. Phase 1 & 2 » – RAP.N°91/336. D90004 – Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie.
- Soroste M., Espada J.L., Simoneau X. (1994) – « Talus – Lutte contre l'érosion – Phase 3 » – PVN°91/583. D90005 – Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie.
- Nédellec J.L, Mathon C. (2006). Programme ARAI – Action 3.1 – Cartographie de l'aléa mouvements de terrain – Caractérisation géotechnique des altérites volcaniques (« mamu ») – rapport final – BRGM/RP-54835-FR. 108 p, 39 illustrations, 20 tableaux, 9 annexes hors texte.

À la lecture de ces différentes études, il apparaît que le problème de l'érosion des sols sur l'île de Tahiti est abordé selon trois axes :

- des études ciblées sur l'étude des processus et des méthodes de remédiation de l'érosion des sols au niveau local, notamment au niveau des terrassements. Ces travaux sont influencés, soit par les recherches menées en Afrique pour les plus anciens, soit par les recherches menées à Hawaï pour les plus récents. Ces études concernent des espaces relativement étendus (e.g. terrassements en vue de la construction d'un lotissement) et les méthodes développées restent peu applicables à la problématique de l'érosion des talus sensu stricto qui présentent des surfaces réduites et surtout des pentes extrêmement prononcées ;
- des études plus générales sur la problématique de l'export de sédiment à l'océan ;
- et enfin, des études centrées sur la caractérisation de l'érodibilité des talus anthropiques, à l'échelle des talus.

Bien que ces différentes composantes revêtent toutes un certain enjeu, dans le cadre du programme ARAI II, nous nous limiterons au troisième point. À ce titre, l'étude de Simoneau et Espada (1991) apparaît précieuse et sera utilisée dans le cadre du protocole proposé ici.

2.2.2. Une base de données de talus, constituée par le LTTP en 1991

De fin 1990 à début 1991, le Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie (LTTP) a entrepris de recenser les caractéristiques quantitatives de talus anthropiques. Une base de données a été mise en place pour gérer ces données. Les paramètres observés sont les suivants : lieu, âge, orientation, géométrie, pluviométrie, drainage, coupe lithologique, environnement, état de surface, érosion. Les Annexe 1 et Annexe 2 présentent la description des fiches de visites et des paramètres qui ont été observés lors de l'étude de 166 talus situés sur les communes de Punaauia, Faa'a, Papeete,

Pirae, Arue et Mahina, dans le nord-ouest de Tahiti-Nui. Les originaux des fiches sont disponibles à la consultation auprès du LTTP.

Cartographie de l'étude de Simoneau et Espada (1991)

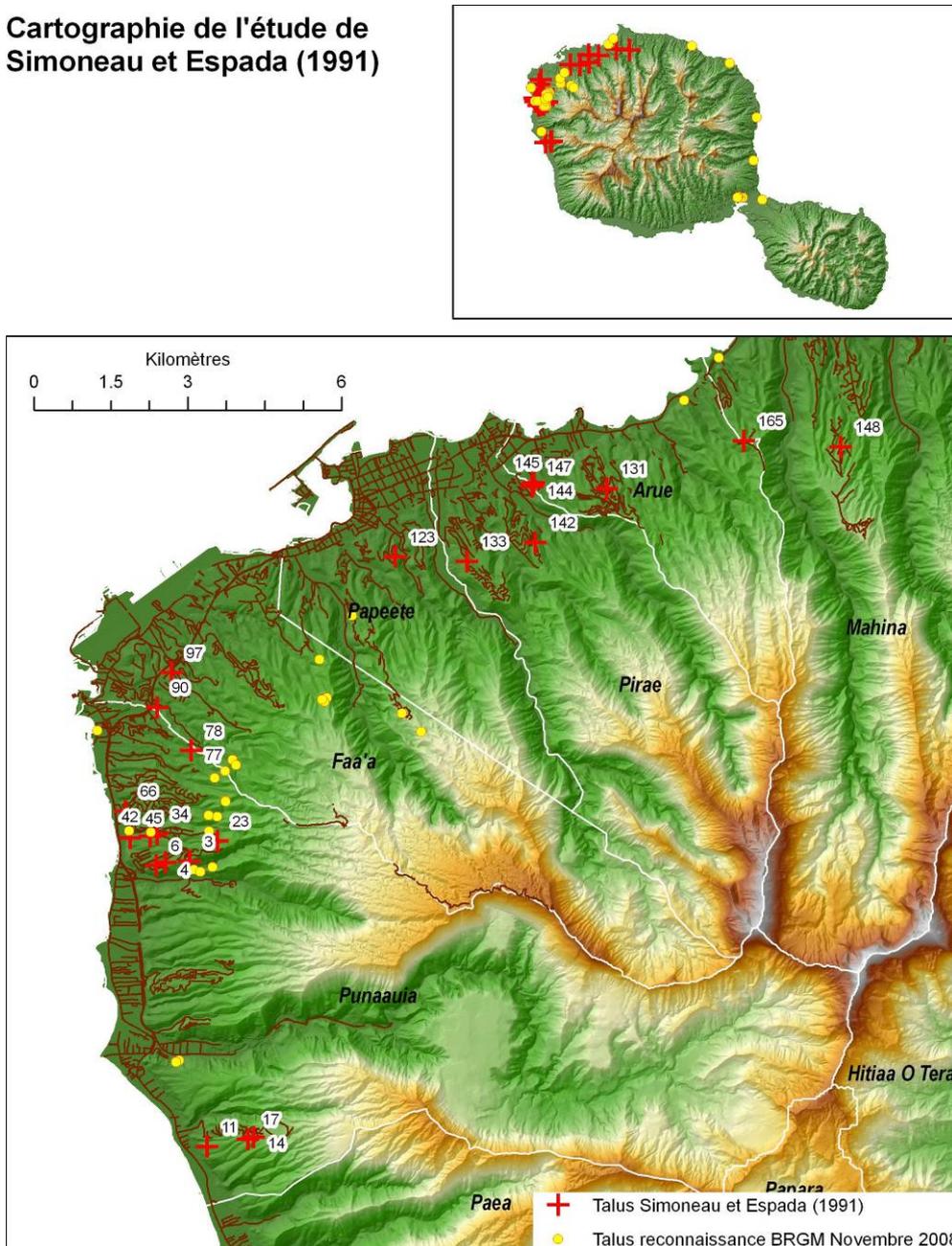


Figure 2 : Carte de localisation des 24 talus anthropiques (croix rouges) représentatifs répertoriés dans l'étude de Simoneau et Espada (1991).

Ils sont tous situés dans le secteur NW de Tahiti-Nui.

Après une analyse statistique de la diversité de paramètres des 166 talus, Simoneau et Espada (1991) ont sélectionné 24 talus (localisés sur la Figure 2) jugés représentatifs de par leur hauteur, angle, nature géologique et conditions d'érosion. C'est sur ce

panel de talus richement décrits, que nous allons concentrer notre étude morphologique, décrite au chapitre 4.

En conclusion de cette étude, Simoneau et Espada (1991) ont proposé finalement une classification préliminaire de l'érodibilité des talus en trois classes principales selon la nature géologique et de une à six sous-classes hiérarchisées entre elles selon un coefficient d'érodibilité (Classification du Tableau 1). Ces coefficients ne sont pas ceux de Wishmeier ; ils ont été proposés de manière empirique par le LTPP, comme une « classification provisoire », de manière à intégrer les résultats des différents essais et les observations de terrain. Cette première étude a permis de montrer l'importance de certains facteurs pour expliquer la présence d'instabilité et d'érosion, comme la nature lithologique, l'orientation du talus ou la présence de végétation.

Une description des altérites polynésiennes (appelée « mamu » et correspondant à la classe B du Tableau 1) selon leur niveau d'altération est rappelée dans le Tableau 2.

Numéro d'ordre	Code	Description	Coefficient d'érodibilité proposé par le LTPP
A Matériaux à caractère rocheux			
1	A1	Lave saine	k = 0.01
		Lahar	k = 0.01
2	A2	Lave bréchique	k = 0.02
3	A3	Lave altérée en boules	k = 0.05
4	A4	Alternance de coulées de laves et scories en bancs de faible épaisseur	k = 0.15
		Scories ou brèches d'épaisseur métrique ou décimétrique	k = 0.20
B Matériaux d'altération cohérent			
5	B1	Mamu I - II gris	k = 0.05
		Tuf induré	k = 0.10
6	B2	Mamu II - III gris	k = 0.15
7	B3	Mamu I - II lité de scories bariolé gris/ocre	k = 0.20
		Mamu II - III brun/rouge	k = 0.25
8	B4	Mamu III brun/rouge	k = 0.27
		Mamu III-IV gris	k = 0.28
9	B5	Mamu II - III et III - IV lité de scories bariolé gris/ocre	k = 0.30
		Mamu IV brun/rouge	k = 0.33
10	B6	Paléosol - Tuf faiblement induré	k = 0.35
C Matériaux remaniés			
11	C1	Remblai de mamu	k = 0.50

Tableau 1 : « Classification provisoire » d'érodibilité des talus, d'après Simoneau et Espada (1991).

	Mamu III-IV		Mamu I-II	
	médiocre	ferme	Mamu II	Mamu I
Description	<p><u>mamu IV</u> : de couleur le plus souvent ocre ou rouge, la structure ayant disparue. On peut y trouver parfois quelques boules moins altérées.</p>  <p><u>mamu III</u> : souvent bariolé, sa structure et sa texture sont encore visibles. Il contient déjà une proportion notable de « pâte » emballant les blocs, et les boules en voie d'altération. Il se désagrège à la main.</p> 		<p><u>mamu II</u> : de couleur gris ou ocre, plus rarement rouge, la structure et la texture y sont bien visibles. Assez cohérent, il a la consistance de la craie. Il contient toujours des panneaux beaucoup moins altérés.</p>  <p><u>mamu I</u> : le plus souvent de couleur grise lorsqu'il provient de lave compacte ou vacuolaire, sa roche mère est bien discernable. Il ne se désagrège pratiquement pas sous la main et contient des boules peu ou pas altérées.</p> 	

Tableau 2 : Caractéristiques synthétiques du Mamu, extrait du rapport BRGM/RP-54835-FR (programme ARAI).

2.3. SUIVI MORPHOLOGIQUE DE LA DÉGRADATION DES TALUS PROPOSÉ EN 2009

La question de l'érodibilité du Mamu a donc été abordée sous un angle géotechnique par le Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie (LTPP) dans les années 1990. L'approche choisie à l'époque consistait à établir un inventaire de talus types rencontrés dans la zone urbaine de Tahiti. La typologie qui s'en est suivie tient compte du type de matériaux constituant le talus (roche volcanique saine, mamu à différents niveaux d'altération et colluvions) et de ses caractéristiques géométriques (profil, orientation, altitude).

Le BRGM a proposé, dans le cadre du programme ARAI II, une approche complémentaire focalisée sur une analyse morphologique de la dégradation de ces

talus. Deux protocoles complémentaires ont ainsi été mis en place à cet effet, permettant de suivre les processus de dégradation sur des échelles de temps différentes :

- une analyse des mécanismes et une quantification du recul des talus sur plusieurs années, à partir de l'évolution du profil 2D d'une vingtaine de talus entre 1991 et 2009 (Chapitre 4) ;
- un suivi mensuel d'un talus en 3D, pendant une année, sur un talus fraîchement taillé pour comprendre les mécanismes et quantifier les processus de dégradation des différents faciès au sein d'un même talus (Chapitre 5).

Les deux protocoles se basent sur des techniques de stéréophotogrammétrie, décrites dans le chapitre 3. Le chapitre 6 confronte les résultats des deux approches et les synthétise, s'appuyant sur une analyse de l'influence des faciès lithologiques des terrains constituant les talus.

3. Technique de reconstitution stéréophotogrammétrique

3.1. INTRODUCTION

La quantification de l'érosion des talus repose ici sur l'utilisation de techniques photogrammétriques. Il s'agit d'utiliser des photos des talus prises depuis plusieurs positions distinctes de manière à en reconstruire numériquement le relief en 3D. Ce chapitre décrit donc les principes de base sur lesquels reposent les mesures effectuées.

La photogrammétrie est une technique de mesure qui ne demande pas de contact avec l'objet mesuré. Elle est facile à mettre en œuvre sur le terrain puisqu'il suffit de disposer d'un appareil photo calibré¹ et de prendre des photos sous des angles différents. On ajoute un certain nombre de contraintes à ces prises de vue pour assurer la qualité des mesures. La photogrammétrie a l'avantage de capturer un état exhaustif d'un objet à un instant donné, contrairement à un levé de géomètre classique. Ceci permet de remesurer l'objet ou certaines de ses caractéristiques qui auraient échappé à un levé initial.

Une photo, d'un point de vue géométrique, consiste à fixer sur un support plan une image du monde réel en trois dimensions par le biais d'une symétrie centrale. Un faisceau de rayons lumineux est projeté sur le capteur numérique de l'appareil photo (souvent aussi appelé caméra) en passant par le centre optique de l'objectif (Figure 3).

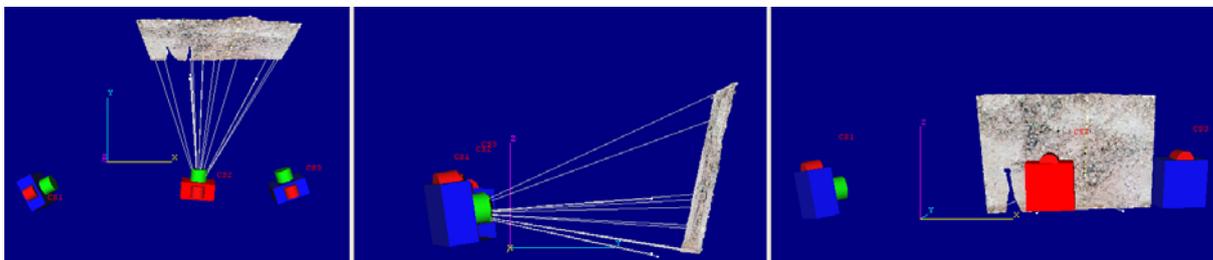


Figure 3 : Vue des faisceaux perspectifs du talus de Pamatai convergent vers la caméra 2 (en rouge).

Panneau gauche : vue en plan ; panneau central : vue en coupe ; panneau droit : vue de face.

La condition minimale et suffisante pour reconstruire un objet en trois dimensions est de le photographier depuis deux points de vue convergents et distincts. Lors de la prise de vue, il se produit un phénomène que l'on appelle la parallaxe qui est uniquement liée au relief de l'objet. Pour pouvoir mesurer cette parallaxe et en déduire son relief, il faut passer par une opération dite d'*orientation* des photos, c'est-à-dire qu'il faut

¹ Calibration : opération qui sert à déterminer les paramètres d'orientation internes d'un appareil photo (distance focale, position du point principale, dimension en mm d'un pixel, distorsion causée par l'objectif...).

retrouver la position relative des points de vue par rapport à l'objet en identifiant manuellement un minimum 6 points homologues². Une fois que l'orientation relative des clichés est résolue, l'identification de points homologues supplémentaires, c'est-à-dire identifiant le même point objet dans les différentes images, permet de reconstruire progressivement le relief de l'objet photographié.

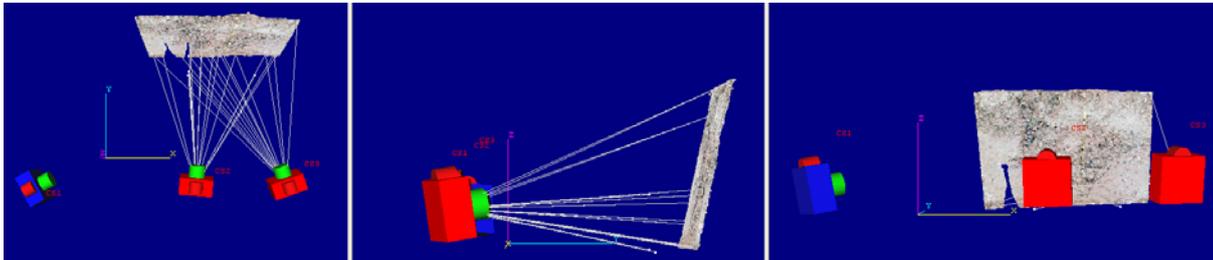


Figure 4 : Groupe de deux faisceaux perspectifs reliant les mêmes points du talus de Pamatai aux cameras 2 et 3 (en rouge).

Les deux caméras sont orientées l'une par rapport à l'autre pour que les faisceaux lumineux se coupe chacun en un et un seul point. Panneau gauche : vue en plan ; panneau central : vue en coupe ; panneau droit : vue de face.

Pour davantage de détails mathématiques sur la photogrammétrie, le lecteur pourra se reporter aux ouvrages de référence (Kraus and Waldhausl, 1998 ; Mikhail *et al.*, 2001 ; Ma *et al.*, 2006).

3.2. FORMATION D'UN MODÈLE EN TROIS DIMENSIONS

3.2.1. Principe

Au départ, on dispose de clichés en deux dimensions d'un objet vu sous des angles différents. La seule opération qu'on peut réaliser avec ces clichés est de mesurer la position de pixels représentant le même détail d'un objet réel. Ce qu'on cherche à obtenir avec ces positions de pixel de point homologues, c'est la position du point dans le monde réel (Figure 5) et pour cela il faut d'abord trouver comment les deux photos ont été prises, d'abord l'une relativement à l'autre, et ensuite, les deux photos par rapport au monde réel. C'est ce qu'on appelle l'orientation. On distingue d'abord l'orientation interne ou intérieure, l'orientation relative, puis l'orientation absolue.

3.2.2. Orientation interne

L'orientation interne ou intérieure consiste à transformer les coordonnées de l'image, mesurées en pixel, en des coordonnées métriques (mm ou m) et à reconstruire ainsi la gerbe de rayons lumineux qui ont impressionné la photo (panneau 1 et 2, Figure 5). La longueur des rayons lumineux ne peut pas être déterminée avec un seul cliché (panneau 2, Figure 5), seul l'écartement des rayons peut l'être. Pour relier la position

² Points homologues : ensemble des points correspondant au même objet, sur plusieurs images stéréoscopiques.

d'un point de l'image à un point du monde réel, il faut disposer d'un second cliché pris sous un angle différent (panneau 3, Figure 5).

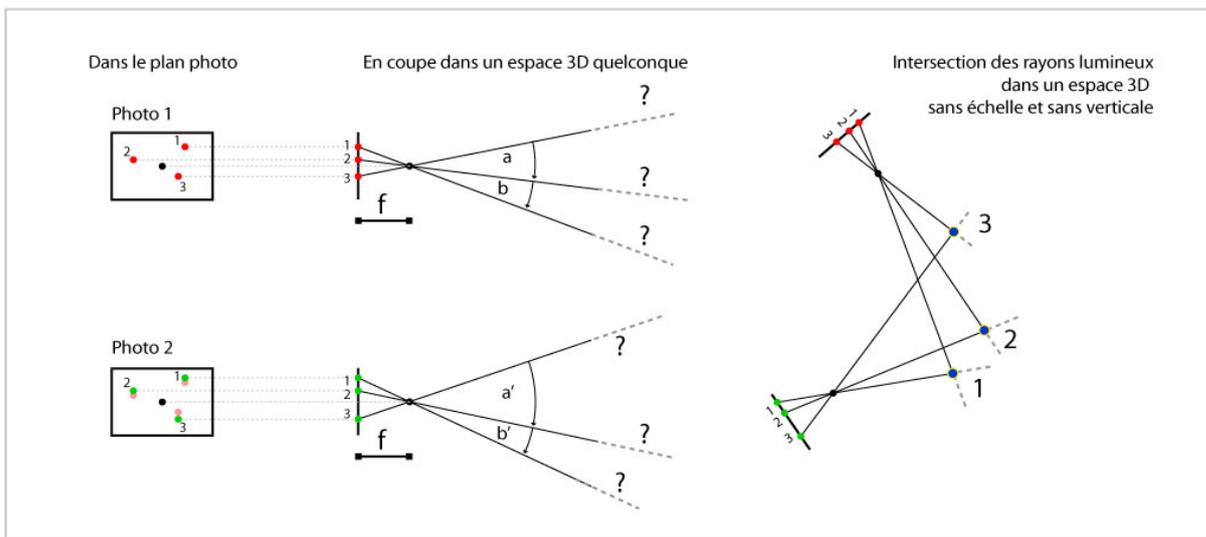


Figure 5 : Principe de l'orientation interne et relative.

Prenons 3 points non alignés vu dans deux photos (en rouge sur la photo 1 et en vert sur la photo 2, les points roses sur la photo 2 indiquent les traces des points homologues dans la photo 1). La distance focale (f) fixe l'écartement angulaire entre les faisceaux perspectifs (les angles a, b, a', b'). C'est l'orientation interne. Pour retrouver les 3 points dans l'espace, il existe une et une seule position relative pour laquelle les rayons perspectifs se croisent respectivement en un seul point (en bleu). C'est l'orientation relative qui résout ce problème.

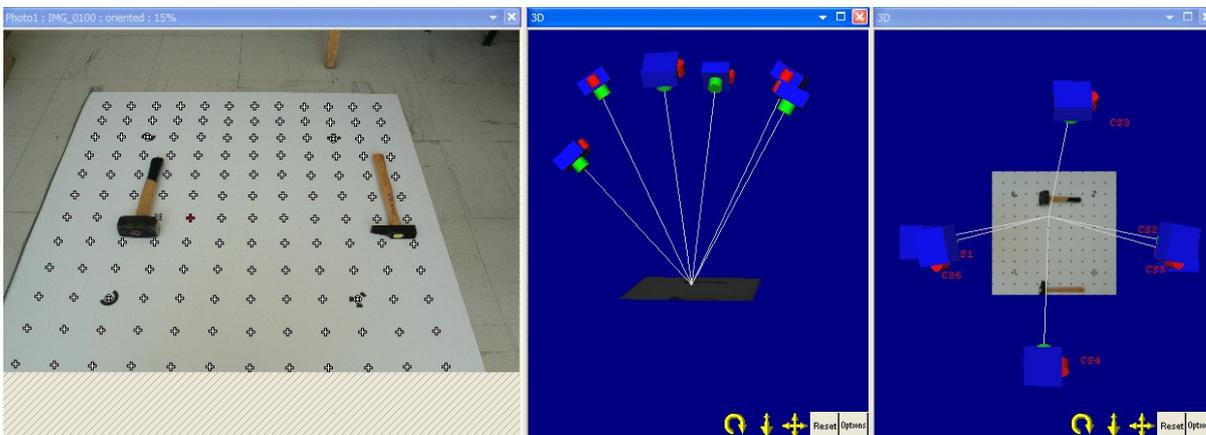


Figure 6 : Calibration d'un appareil photo avec Photomodeler.

Une cible plane couverte de 144 points noirs est prise sur 6 photos depuis 4 points de vue de l'espace. Les marteaux servent à lester la cible et en assurer la planéité. La calibration mesure toutes les distorsions comme provenant de l'objectif c'est pourquoi la cible doit être absolument plane.

En pratique, l'orientation interne consiste à donner une *dimension métrique* aux pixels de l'image, *localiser* la position du *centre de projection* dans le *plan de l'image*, et à tenir compte de la *déformation des rayons lumineux* traversant l'objectif de l'appareil photo.

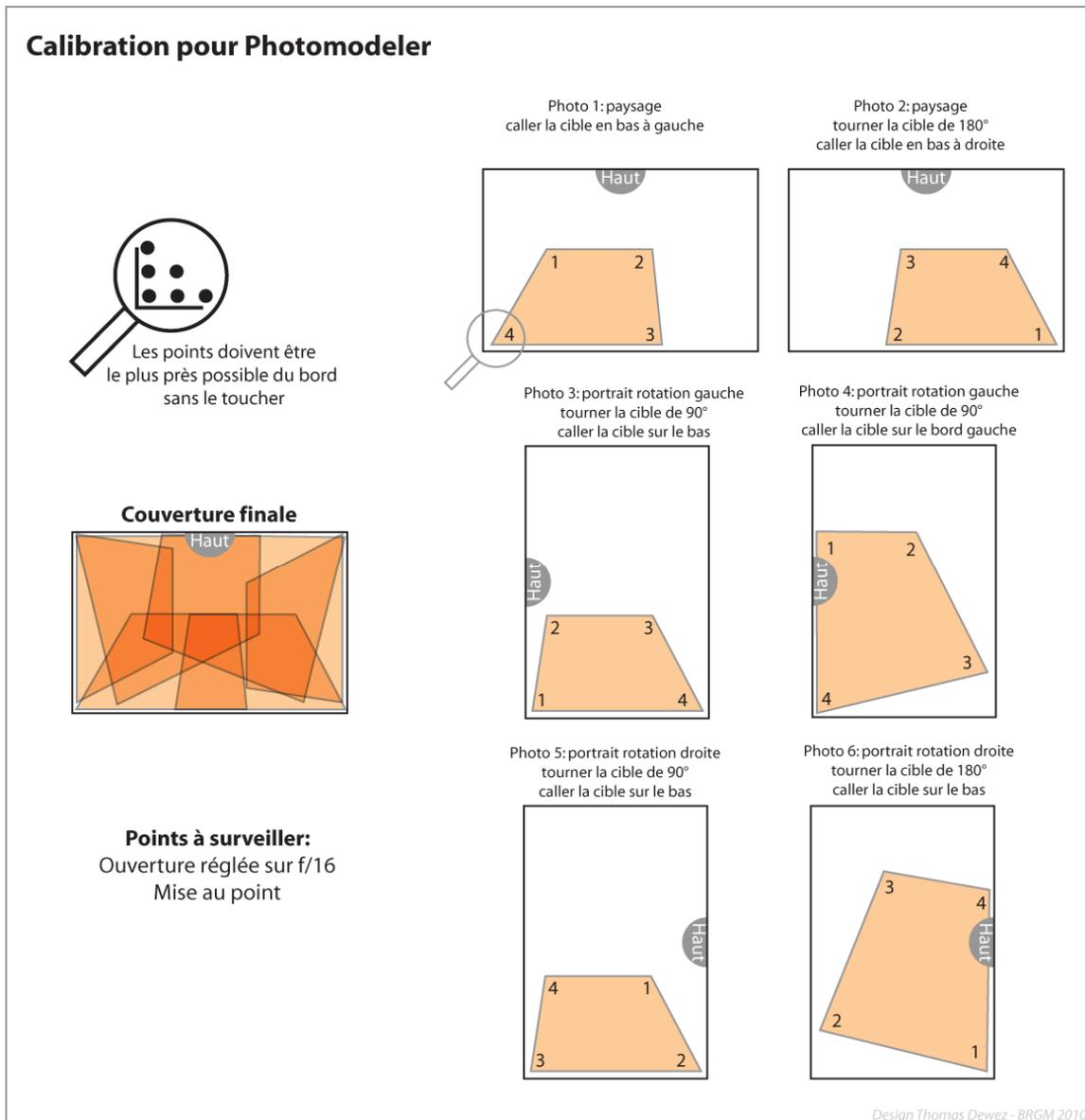


Figure 7 : Mise en pratique des prises de vue de la cible plane de calibration Photomodeler.
Les numéros de 1 à 4 servent à représenter la position des 4 coins de la cible.

Les paramètres d'orientation interne sont estimés lors de la calibration. Cette opération consiste à prendre des photos d'une cible sous des angles différents pour résoudre les paramètres de l'orientation interne. La procédure de calibration de Photomodeler est représentée ici.

Les Figure 8 et Figure 9 montrent les paramètres de calibrations de deux des appareils photo utilisés pour les mesures en Polynésie :

- Canon 350D équipé d'un objectif Canon 20 mm f/2.8 ;
- Pentax K200D équipé d'un objectif 21 mm.

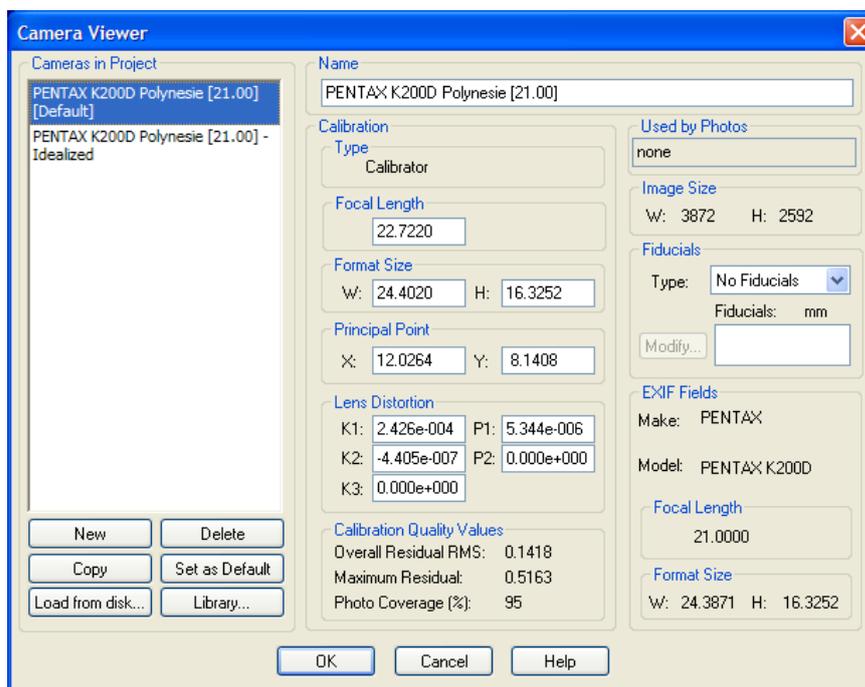


Figure 8 : Certificat de calibration de Photomodeler pour le Pentax K200D – 21 mm utilisé pour le suivi mensuel de talus.

La focale exacte est de 22,711 mm, la taille d'un pixel vaut 6,30 μm (24,042 mm / 3 872 pix).

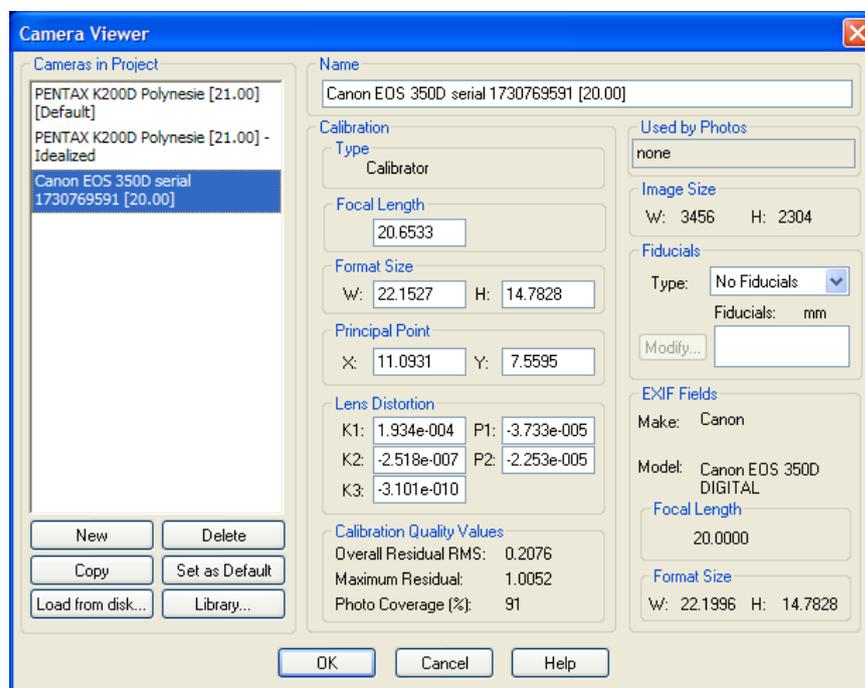


Figure 9 : Certificat de calibration de Photomodeler pour le Canon 350D – 20 mm utilisé pour le suivi mensuel de talus.

La focale exacte est de 20,653 mm et la taille d'un pixel vaut 6,41 μm (22,152 mm / 3 456 pix).

3.2.3. Orientation relative

L'orientation relative est la solution mathématique qui consiste à faire correspondre les faisceaux perspectifs de points homologues deux à deux (panneau 3, Figure 5). Lorsque cette condition est satisfaite l'identification de points homologues dans les photos permet de densifier le modèle 3D de l'objet. La résolution de l'orientation relative nécessite un minimum théorique de trois points de calage non alignés. Photomodeler résout le problème par moindres carrés avec un minimum de 6 points homologues qu'on utilise comme calage.

La qualité de l'orientation relative repose d'abord sur l'identification de points bien reconnaissables et de taille la plus discrète possible ; ceci pour pointer un pixel le plus précisément possible. La qualité dépend ensuite de la distribution des points dans l'image. On cherchera toujours à maximiser l'écartement des points de calage et à les placer dans les coins de la zone vue stéréo (Figure 10) de manière à rendre la solution d'orientation plus robuste.

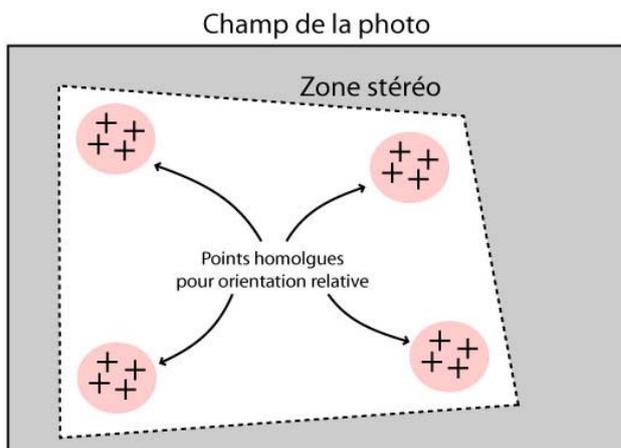


Figure 10 : Disposition des points homologues qu'il faut rechercher pour calculer l'orientation relative.

On désire maximiser l'écartement entre les points et spécifiquement à bien couvrir les coins de la zone vue en stéréo. Il est judicieux de sélectionner plusieurs points dans chaque zone pour minimiser l'influence d'erreurs de pointage aléatoires.

3.2.4. Orientation absolue

L'étape de l'orientation absolue consiste à mettre le modèle 3D en vraie grandeur (mise à échelle), à orienter le repère d'axes dans un référentiel cartographique et à translater le modèle pour que les coordonnées des points soient positionnées dans le référentiel planimétrique. Pour réaliser l'orientation absolue, il faut disposer d'une dimension connue (mise à échelle), d'une direction de référence (orientation planimétrique), d'une verticale ou d'une horizontale et d'un point de coordonnée connue.

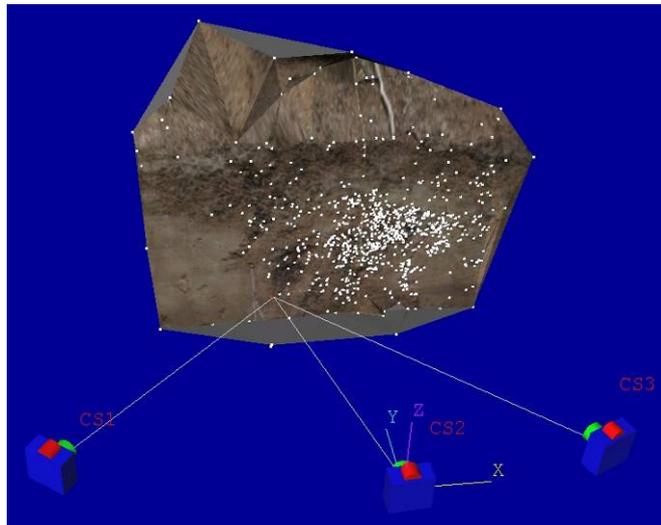


Figure 11 : Orientation relative des prises de vue pour la reconstruction du talus de Pamatai Hauti (cf. chapitre 5).
Voir Figure 15 pour photos originales et Figure 16 pour un croquis de disposition 2D.



Figure 12 : Matériel mis en œuvre pour mesurer la morphologie des talus.
A) Réflexe numérique Canon 350D équipé d'un objectif Canon 20 mm f/2.8. Équipement topographique : B) trépied, cane, corde graduée ; C) mire de nivellement et D) cibles servant de points de liaison entre photos.

Pour l'expérience sur les talus, l'échelle est donnée soit par la cane de topographe surmontée du prisme (panneau B, Figure 12). Placée à la verticale grâce à sa nivelle, elle représente à la fois la verticale locale et une dimension connue de 2 m. On a également utilisé une mire de nivellement posée au sol (panneau B, Figure 12), mais la mesure de longueur distance est légèrement moins précise parce que les extrémités sont plus moins aisées à pointer. Enfin, on a mesuré l'azimut de l'affleurement en prenant la direction de la mire posée au sol, disposée par convention en E-W ou en N-S.

3.2.5. Qualité de l'orientation

La précision d'un modèle 3D va dépendre de :

- la précision de la calibration ;
- la précision de pointage des points homologues ;
- l'angle de convergence entre points de vue ;
- la précision de mesure des paramètres externes (identification des points de calage et précision de leur dimension).

On posera l'hypothèse que la procédure de calibration avec la cible standard plane de Photomodeler a résolu les paramètres avec une précision suffisante. L'imprécision de cette calibration n'est de toute façon pas en mesure d'induire des erreurs significatives dans la mesure du relief des talus, d'une part parce que les distances de prise de vue sont petites, et d'autre part parce que la sensibilité des comparaisons n'est pas suffisamment résolue que pour poser des problèmes. Typiquement dans le cas de la comparaison de profils de talus en 2D, on peut tolérer des erreurs de ± 5 cm, vu la marge d'incertitude sur la position exacte du talus il y a 18 ans. Et une telle incertitude est bien supérieure à l'erreur qui pourrait se produire suite à une inexactitude de calibration. Dans le cas des comparaisons 3D sur le talus de Pamatai, les comparaisons sont finalement réalisées avec le même appareil (Pentax K200D + 21 mm), s'il existait un biais, il resterait au moins constant entre les époques de levé.

La précision de pointage de points homologues va dépendre du contenu de l'image. On cherchera typiquement à reconnaître des points visibles et reconnaissables depuis tous les points de vue. Un bon point de calage est un objet contrasté anguleux ou circulaire dont on peut pointer le centre sans ambiguïté. Dans la nature, ce genre de point est difficilement reconnaissable à l'œil, car l'opérateur se laisse généralement influencer par l'interprétation de l'image et repère assez mal de bons points de calage. C'est la raison pour laquelle on a disposé des cibles artificielles à la surface des talus pour faciliter la mise en correspondance de points spécifiques (Figure 13) et réaliser l'orientation relative.

On parle régulièrement en photogrammétrie du rapport b/h qui qualifie le ratio entre l'écartement des points de vue (b pour ligne de Base) et de la distance à l'objet image (h pour Hauteur). Ce ratio décrit l'angle de convergence entre les axes de visées des appareils photo et joue un rôle important dans la précision des mesures obtenues par photogrammétrie. Pour une même erreur de pointé sur un point homologue, l'erreur positionnelle sera d'autant plus grande que l'angle de convergence entre les axes de

visée est petit (Figure 14). On en déduit donc *a priori* que pour obtenir des mesures précises, il vaut mieux écarter les points de vue.

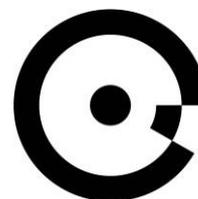


Figure 13 : Exemple de cible permettant de repérer précisément des points homologues entre points de vue différents.

Gauche : ciblette de topographe utilisée sur les talus ; Droite : exemple de ciblette codée générée par Photomodeller.

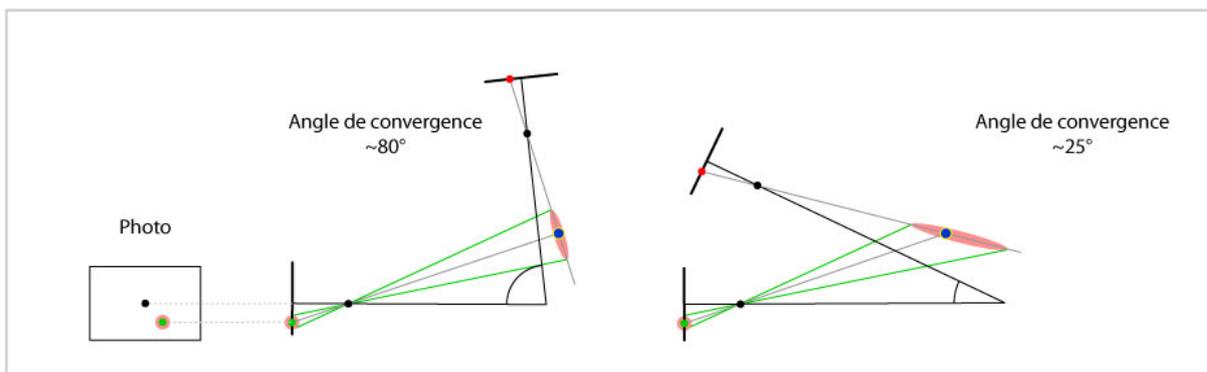


Figure 14 : Influence de l'angle de convergence entre deux points de vue sur l'erreur de position d'un point.

Pour une même imprécision de pointé (petit cercle rose dans l'espace photo), l'erreur positionnelle de ce point dans l'espace est d'autant plus grande que l'angle de convergence entre est petit.

Un grand angle de convergence ($b/h \sim 1$) a cependant un effet négatif. Plus les photos sont différentes, plus il est difficile d'apparier des points homologues avec précision. Pour un appariement optimal, qu'il soit manuel ou automatique, il est important que les photos soient aussi semblables que possibles ($b/h \sim 0,1 - 0,2$).

La stratégie adoptée pour le suivi des talus en 2D est de prendre des photos avec un grand angle de convergence car la restitution des profils est faite manuellement. Le suivi du talus de Pamatai a été réalisé avec des vues à forte et faible convergence (voir ci-après).

3.3. ACQUISITION DES PHOTOS SUR LE TERRAIN

3.3.1. Disposition des prises de vue

En principe, deux photos suffisent à reconstruire les talus. En pratique, l'utilisation d'une troisième photo permet de repérer les points homologues mal appariés (Figure 15). Le dispositif type mis en œuvre pour le suivi temporel du talus de Pamatai est représenté en Figure 16.

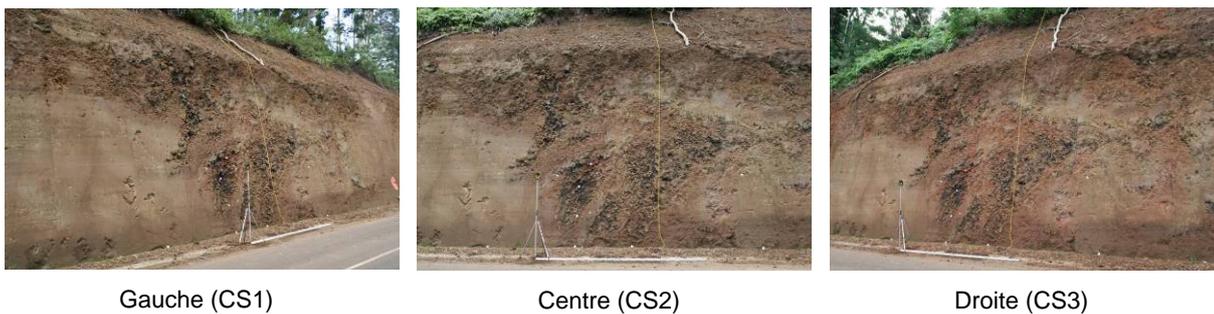


Figure 15 : Exemple de trois photos convergentes du talus de Pamatai Haïti (voir disposition Figure 16).

La dénomination CS, signifiant Camera Station, est celle utilisée dans Photomodeler.

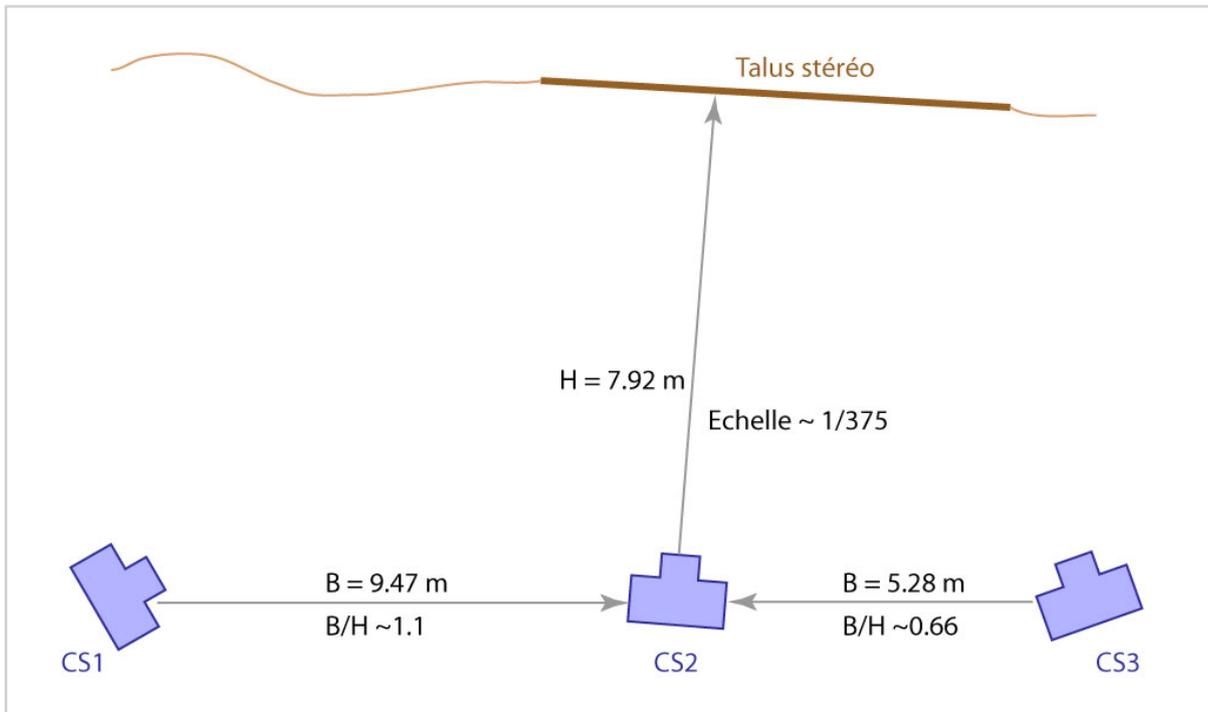


Figure 16 : Disposition relative des points de vue correspondant aux photos de la Figure 15.

CS1, 2, 3 représentent les trois stations de la caméra (CS est l'acronyme de Photomodeler pour Camera Station). L'angle de visée de CS1 fait un angle de 60° avec le talus, CS2 a un angle de $4,5^\circ$ et CS3, $19,5^\circ$. L'écartement de CS2 par rapport au talus définit l'échelle des images (rapport entre la distance au talus - H- et la distance focale -f- de l'objectif : $1/\text{échelle} = f/H$).

Si une des photos est prise perpendiculairement à l'affleurement, elle pourra servir à produire une orthophoto esthétique (ici la position CS2 sur Figure 16 satisfait ce besoin). C'est ce qui a été fait pour le suivi du talus de Pamatai.

Enfin, on pourrait améliorer le dispositif de suivi à Pamatai en positionnant une station supplémentaire (M1) entre CS2 et CS3 (Figure 17), ce qui permettrait d'extraire plusieurs MNS³ pour les couples CS2-CS3 mais également pour CS2-M1 et M1-CS3.

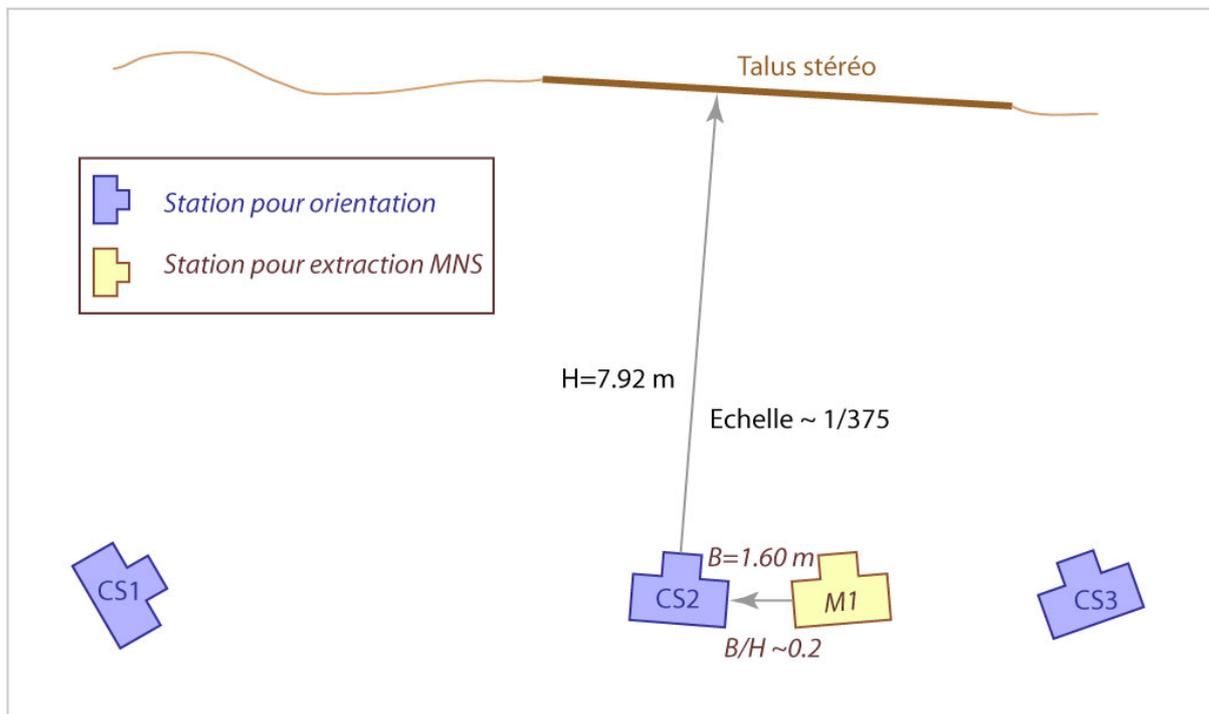


Figure 17 : Schéma de prise de vue qui satisfait à la fois les besoins pour l'orientation relative des couples de photos (CS1, CS2, CS3) et des conditions de corrélation optimales entre CS1 et M1.

La disposition des caméras reflète la disposition exacte des photos prises sur le talus de Pamatai.

3.3.2. Pérennisation du référentiel cartographique

Le suivi de l'évolution d'une surface naturelle demande de reproduire le même schéma d'acquisition de manière standardisée. Le positionnement des points de vue est très important pour conserver une géométrie de prise de vue identique. C'est la raison pour laquelle des clous de géomètre ont été installés en bordure de route pour localiser avec précision les stations.

Les clous resteront en place tant que la chaussée ne sera pas modifiée. Si cela survenait, on perdrait le référentiel local et les acquisitions suivantes seraient moins

³ MNS : Modèle Numérique de Surface qui se distingue du Modèle Numérique de Terrain (terrain nu).

bien replacées dans le référentiel de départ. Il est donc judicieux de lever la position absolue des clous au GPS différentiel avec une précision centimétrique, de manière à pouvoir réimplanter des points de référence en cas de nécessité.

Si on cherchait à améliorer la précision des comparaisons, l'installation de quatre piliers en béton face à l'affleurement permettrait d'occuper exactement le même point de vue et de reprendre le même axe de visée pour garantir une parfaite répétitivité des prises de vue. Cette étude étant purement expérimentale, il n'a pas été jugé nécessaire de recourir à des moyens aussi lourds pour un test dont l'issue était incertaine. Et puisque les points de vue sont situés en bordure de route, l'installation de piliers en béton est dangereuse.

3.3.3. Conditions d'éclairage du talus

Pour le suivi de l'érosion à partir des orthophotos (décrit dans le chapitre suivant), on souhaite que le seul signal visible dans les images soit celui de l'érosion. La comparaison des orthophotos a montré que tous changements d'état de surface (colonisation du talus par les mousses ou changement d'éclairage) nuisaient à la comparaison visuelle et numérique. On veillera donc particulièrement à standardiser les conditions d'éclairage du talus et choisir un moment où le soleil ne brille pas directement sur l'affleurement, par exemple juste avant le levé ou juste après le coucher du soleil. Dans tous les cas, le moment de la prise de vue devrait rester à peu près constant au fil des mois en accommodant le changement de saison.



Mars 2009



Juillet 2009

Figure 18 : Comparaison de deux panoramas du talus de Pamatai en mars 2009 et juillet 2009. Un éclairage plat et uniforme du talus en mars, délivre des couleurs saturées et facilement reconnaissables. En juillet, l'éclairage du talus par le soleil et les ombres portées ne permettent pas d'identifier facilement les structures et gênent l'interprétation.

3.4. CONCLUSION

L'objet de ce chapitre était de présenter succinctement les principes de la photogrammétrie et quelques recommandations pour les prises de vues pratiques sur le terrain. On retiendra qu'avec trois photos prises avec des angles de visée convergents, le relief d'un objet peut être mesuré. La précision de la restitution dépendra de l'angle de convergence. Une forte convergence produira une restitution précise de la profondeur de l'objet par contre, il est nécessaire de disposer d'une paire d'image avec un faible angle de convergence de manière à pouvoir extraire le relief de l'objet automatiquement.

Cette technique photogrammétrique a été appliquée avec succès pour mesurer des profils de talus en 2D et réaliser le suivi mensuel du talus de Pamatai en 3D.

4. Quantification 2D de l'érodibilité, sur une échelle de temps pluriannuelle

4.1. CATALOGUE DES 17 TALUS SÉLECTIONNES

4.1.1. Localisation

Les 24 talus représentatifs sélectionnés et renseignés par le LTPP en 1991 ont été revisités et remesurés lors d'une mission en janvier-février 2009 dans le but de suivre leur évolution, en comparant leur situation initiale à celle 18 ans après. Le schéma logique en Figure 19 aide à comprendre les différents cas de figure rencontrés.

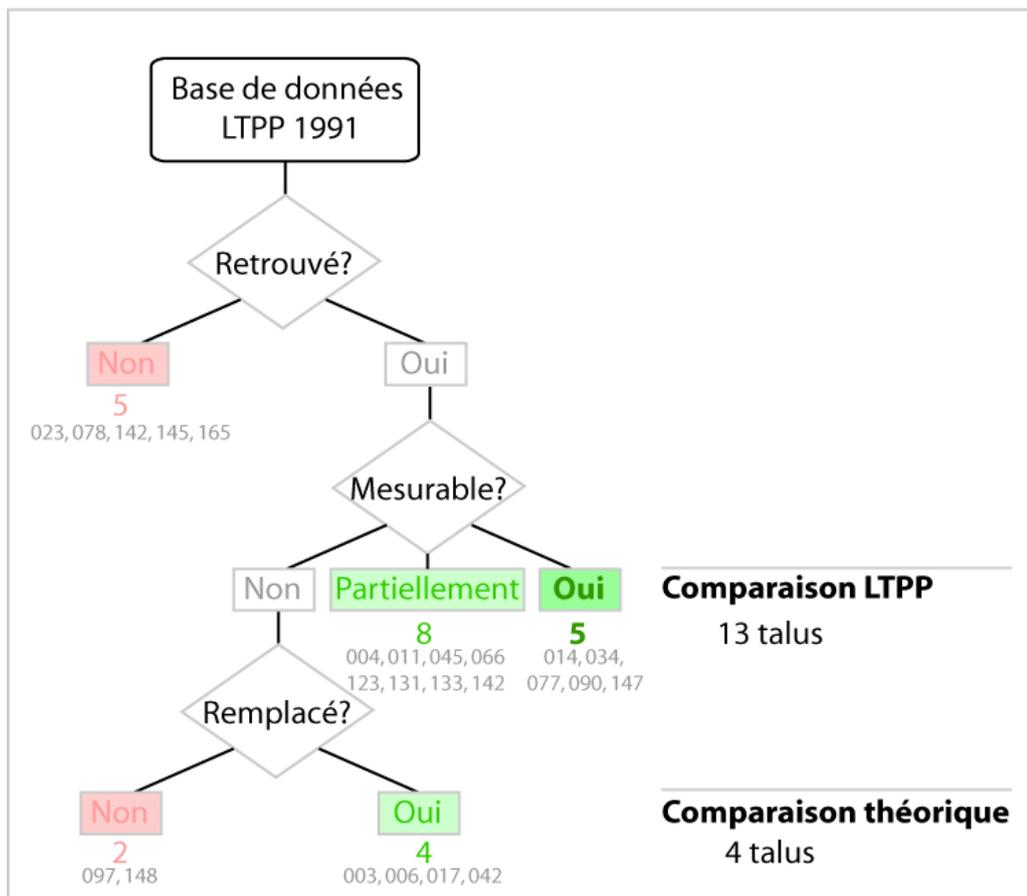


Figure 19 : Schéma conceptuel des cas de figures rencontrés pour la comparaison des 24 talus représentatifs du LTPP.

On cherche d'abord à retrouver le talus, à voir si l'affleurement est toujours visible (soit parce qu'il aurait été gunité, recouvert de végétation ou de treillis). Et ensuite, en cas de couverture totale du talus, on a cherché un talus de morphologie et substrat équivalent pouvant lui être substitué. Les chiffres en indice donnent le nombre de talus correspondant à chaque catégorie et leur identifiant (voir localisation Figure 20).

Talus	Lithologie	Commune	Lieu	Visite	Lat Long (WGS 84)	Z	Utile	Remarque
3	Mamu III-IV brun rouge	Punaauia	Lot Taapuna	04/02/09	-17.59923 -149.59918	235 m	oui	remplacé par homologue car original muré
4	Paléosol	Punaauia	Lot Taapuna	04/02/09	-17.59915 -149.60412	161 m	oui	partiellement végétalisé
6	Mamu I-II gris	Punaauia	Lot Taapuna	04/02/09	-17.59962 -149.60537	140 m	oui	remplacé par homologue car original végétalisé
11	Lave saine massive	Punaauia	Lot Temaruata	04/02/09	-17.64955 -149.59673	165 m	oui	partiellement végétalisé
14	Mamu III brun rouge	Punaauia	Lot Temaruata	04/02/09	-17.64945 -149.58817	405 m	oui	modifié en 2001
17	Mamu III-IV lité	Punaauia	Lot Temaruata	04/02/09	-17.64868 -149.58947	384 m	oui	remplacé par homologue car original muré
23	Remblai	Punaauia	Lot Te Tavake	03/02/09			non	pas retrouvé
34	Mamu II-III gris	Punaauia	Lot Te Tavake	03/02/09	-17.59408 -149.60547	129 m	oui	
42	Paléosol	Punaauia	Lot Te Tavaka	03/02/09	-17.59432 -149.60685	114 m	oui	remplacé par homologue car original gunité
45	Lave altérée en boules	Punaauia	Lot Te Tavake	03/02/09	-17.59465 -149.61027	62 m	oui	partiellement végétalisé
66	Lave saine	Punaauia	Lot Lotus Bas	03/02/09	-17.58990 -149.61127	63 m	oui	partiellement végétalisé
77	Mamu III brun rouge	Punaauia	Hauts de Outumaoro	04/02/09	-17.57938 -149.59900	180 m	oui	
78	Mamu III brun rouge	Punaauia	Hauts de Outumaoro	04/02/09			non	pas retrouvé
90	Lave scoriacée	Faaa	RDO Bretelle Piafau	29/01/09	-17.57158 -149.60518	63 m	oui	modifié après 1991 (date inconnue)
97	Mamu III-IV brun rouge	Faaa	RDO Pun-PPT	29/01/09			non	gunité sans remplacement possible
123	Lave saine bréchiq	Papeete	Route ente la mission et hauts de Tira	30/01/09	-17.54538 -149.56103	73 m	oui	partiellement végétalisé
131	Mamu I-II gris	Arue	Centre des jeunes adolescents d'Erima	30/01/09	-17.53368 -149.52198	158 m	oui	partiellement végétalisé
133	Mamu I-II lité	Pirae	Lot Vetea 1	30/01/09	-17.54648 -149.54780	139 m	oui	partiellement végétalisé et caché par filet
142	Brèche scories	Pirae	Lot Aute III	06/02/09	-17.54307 -149.53547	165 m	oui	partiellement végétalisé
144	Mamu I-II gris + remblai de mamu	Arue	Complexe Fei-Pi Salle Omnisport	30/01/09			non	pas retrouvé
145	Brèche scories	Arue	Complexe Fei-Pi Salle Omnisport	30/01/09			non	pas retrouvé
147	Mamu III brun rouge	Arue	Complexe Fei-Pi Parking Club House	30/01/09	-17.53330 -149.53567	42 m	oui	modifié après 1991 (date inconnue)
148	Mamu III-IV brun rouge	Mahina	Lot Alizés 5 Mahinarama	30/01/09			non	complètement végétalisé
165	Paléosol tufs meubles	Mahina	Cité Jay	30/01/09			non	propriété privée

Tableau 3 : Caractéristique des 24 talus types, suite à l'investigation de terrain de 2009.

Leur localisation est reporté sur la Figure 20. On a choisi d'utiliser tous les talus qui sont mesurables (tous les cas surlignés en vert de la Figure 19).

Sur les 24 talus initiaux, 5 n'ont pu être retrouvés et 2 n'ont pu être remplacés par un talus analogue à proximité (Figure 20, Tableau 3). Finalement, 13 talus pourront être comparés au moins partiellement avec les talus originaux de 1991, tandis que 4 talus seront comparés à un profil théorique taillé à 5/2, **ce qui porte à 17 le nombre de talus étudié.**

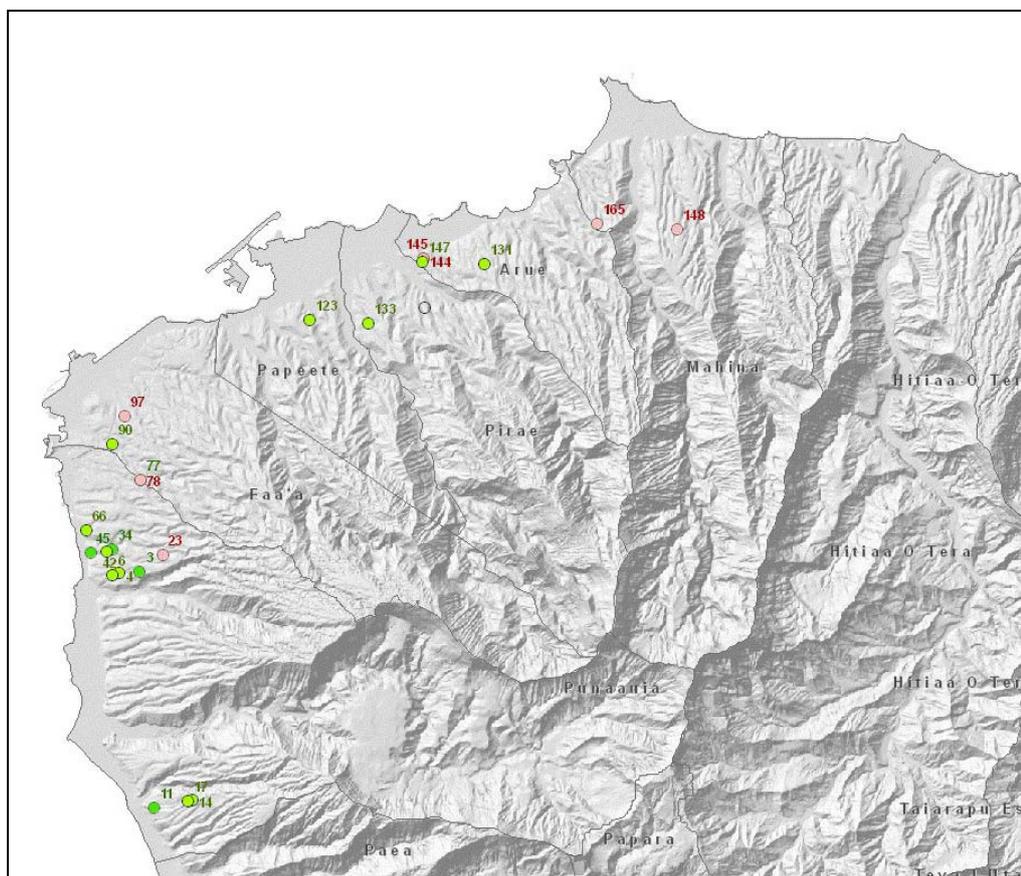


Figure 20 : Carte des 24 talus type sélectionnés par le LTPP (Simoneau et Espada, 1991) tels qu'ils ont été retrouvés lors de la mission de janvier-février 2009.

Les disques verts foncés correspondent aux talus qui ont pu être retrouvés.
Les disques verts clairs sont les talus retrouvés, mais pour lesquels les mesures sont partielles (p. ex. à cause de la végétalisation). Les disques roses correspondent aux talus qui n'ont pu être retrouvés.

4.1.2. Description des talus

Une photographie récente de chacun des 17 talus est présentée en Annexe 3.

Géométrie des talus

La méthode choisie par le LTPP en 1991 pour caractériser la géométrie des talus était de choisir une section représentative et d'en mesurer le profil au moyen d'une règle de 3 m de longueur et d'un clinomètre. Chaque tronçon de ce profil est ainsi décrit par une longueur, une inclinaison (exprimée en grade) et une nature lithologique ainsi que

d'autres données descriptives. Ce sont des informations qui nous ont permis de reconstituer le profil des talus en 1991.

Description lithologique

La description lithologique est donc issue des observations de terrain. Le LTPP a ensuite attribué à chaque talus une lithologie dominante, mais les schémas descriptifs (comme celui en Figure 21) conservent le détail des variations lithologiques et géométriques, observées le long du profil.

Pour les 17 talus étudiés en 2009, la lithologie dominante renseignée par le LTPP en 1991 est reprise dans le Tableau 4 (case rosée). Cependant, l'étude photogrammétrique de 2009 se concentre parfois sur une portion de profil dont la lithologie ne correspond pas à celle attribuée par le LTPP à l'ensemble du profil (exemple sur 4 des 17 talus en Figure 22). Nous nous sommes basés sur les croquis descriptifs LTPP pour assigner la lithologie plus particulièrement concernée par l'étude, ce que synthétise le Tableau 4. Le Tableau 5 récapitule le nombre de talus par type de formation dans le panel étudié.

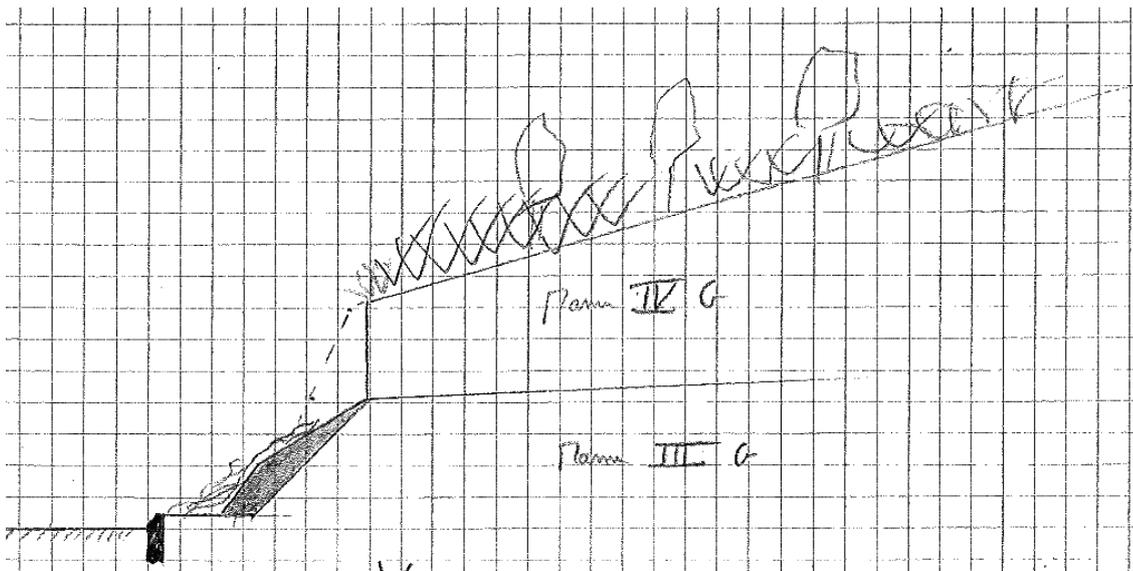


Figure 21 : Croquis descriptif du talus 14
(extrait des fiches descriptives de la Phase 1 - Simoneau et Espada, 1991).

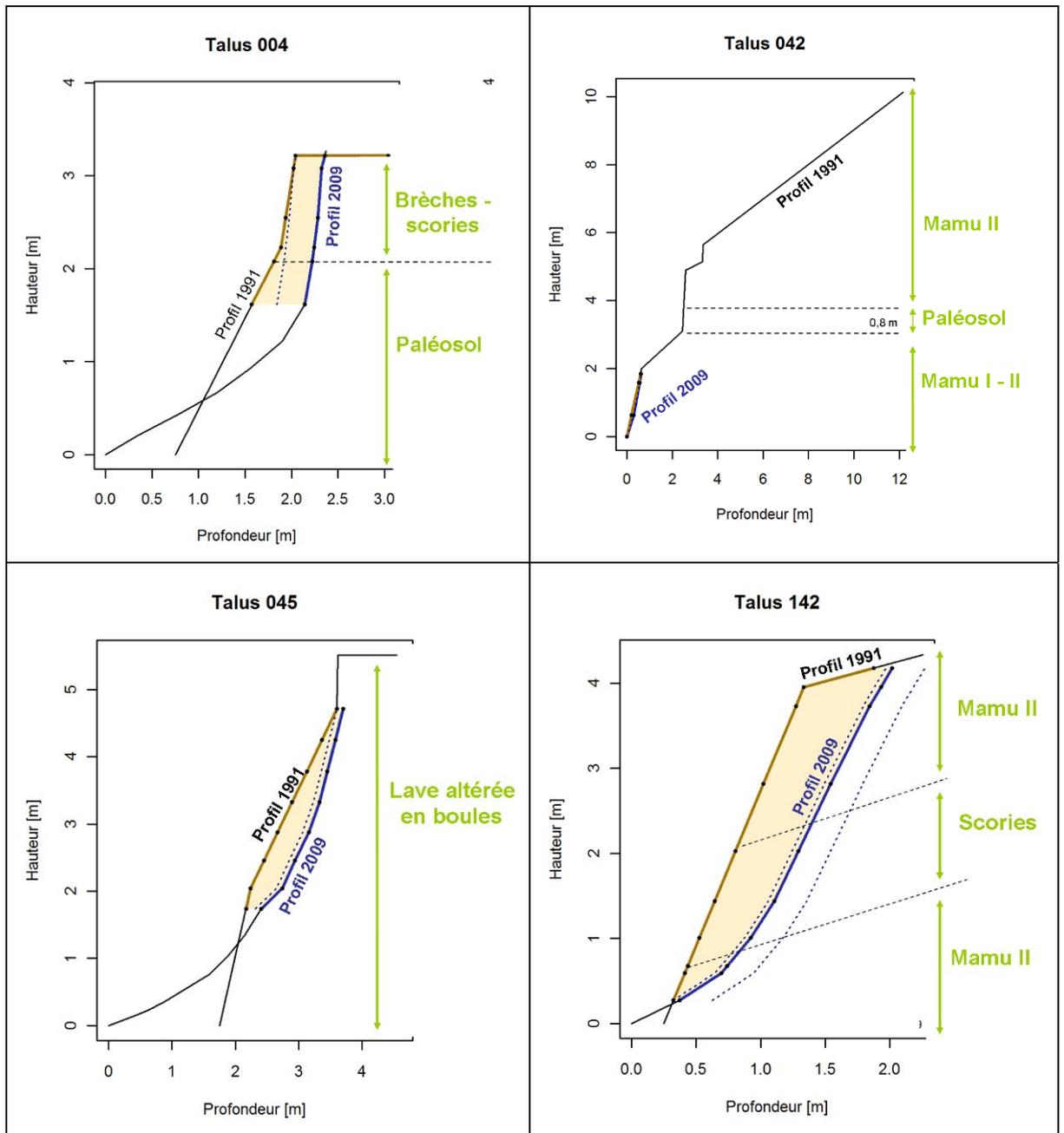


Figure 22 : Lithologie détaillée de 4 des 17 talus, d'après les schémas descriptifs du LTPP.

N° talus	Lithologie											Lithologie représentative pour BRGM	Modification de l'estimation LTPP	Cause du changement de lithologie représentative
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1			
3								x		x		B4		
4				x						x		A4	*	pas vu paléosol
6								x		x		B1		
11	x			x		x				x		A1		
14								x	x			B4		
17									x			B5		
34												B2		
42				x						x		B1	*	paléosol pas mesuré
45			x									A3		
66	x											A1		
77												B4		
90	x			x								A1	*	profil mesuré dans lave saine uniquement
123		x								x		A2		
131												B1		
133												B3		
142				x								B2	*	profil dominé par mamu 2-3
147										x		B3		

- lithologie présente dans l'affleurement
- lithologie mesurée en 2009
- lithologie représentative LTPP
- lithologie représentative des mesures 2009

Tableau 4 : Synthèse des lithologies rencontrées par talus (cases cochées avec un « x »).

Pour les talus à plusieurs lithologies, le LTPP a choisi de retenir une seule lithologie représentative (case rosée), qui n'est pas forcément identique à la lithologie mesurée par photogrammétrie en 2009 (case hachurée).

Renseignements géotechniques

En 1991, le LTPP avait fait faire des analyses géotechniques plus poussées sur ces 17 talus, en vue d'identifier et d'estimer leurs caractéristiques physiques et mécaniques. Les essais laboratoires sont nombreux (teneur en eau, granulométrie, limite d'Atterberg, essai au bleu de méthylène, pourcentage de matière organique, poids spécifique apparent, poids spécifique des grains, porosité, résistance à la compression simple...). Les essais in-situ ont consisté en des évaluations de la cohésion non drainée (au pénétromètre de poche), des essais d'érodibilité au jet sous pression (essai au Karcher) et des essais expérimentaux de projections de produit pour des traitements de surface. Le Tableau 6 reprend les principaux résultats expérimentaux

sur les 17 talus étudiés ici. Notons que les caractéristiques mécaniques des talus à caractère rocheux (classe A du LTPP) n'ont souvent pas pu être autant renseignées à cause de la difficulté d'échantillonnage.

	Lithologie dominante renseignée par le LTPP en 1991	Lithologie dominante concernée par l'étude 2009	
« Matériaux à caractère rocheux – CLASSE A »	Lave saine	2	3
	Lave altérée en boule	1	1
	Lave bréchique	1	1
	Alternance de coulée de lave et scories / brèches	2	1
	TOTAL	6	6
« Matériaux d'altération cohérent – CLASSE B »	Mamu I-II	2	3
	Mamu II-III	3	4
	Mamu III ou Mamu III - IV	4	4
	Paléosol	2	0
	TOTAL	11	11

Tableau 5 : Répartition des talus par lithologie.

Les prélèvements ont été effectués sur la lithologie dominante renseignée par le LTPP.

Talus	Lithologie (d'après LTPP)	Age en 1991 (an)	Orientation du talus		Hauteur		Classification		Porosité (%)	Matière organique (%)	Rc (bar)	Coefficient Hazen Cu (D60/D10)	Poids spécifique		Cohésion non drainée	
			Grade (sens horaire)	Orientation	Totale en 1991 (m)	Comparée en 2009 (m)	LTPP (1991)	RTR					sec (kN/m3)	humide (kN/m3)	à la surface (bar)	à 10 cm de profondeur (bar)
3	Mamu III-IV brun rouge	9	375	NNW	3,6	3,3	B4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Paléosol	9	180	SSE	3,2	1,6	C1	A3	69,5	8,7	1,17	24,5	8,57	14	4,5	3,5
6	Mamu I-II gris	9	180	SSE	7,5	4,3	B1	B6	-	4,6	-	914	-	-	4,5	4,5
11	Lave saine massive	9	310	W	9,1	5	A1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	Mamu III brun/rouge	7	290	W	1,7	1,8	B4	A2	67,2	3,7	0,54	12,5	9,75	14,28	3	5
17	Mamu III-IV lité de scories	7	280	WSW	2,7	2,3	B5	A3	65,2	5	-	33	10,79	16,32	3	6
34	Mamu II-III gris	5	330	WNW	5,1	2,7	B2	A1 - A2	58,9	5,4	3,17	17	11,89	16,77	6	6
42	Paléosol	5	235	SSW	5,7	1,8	B6	A3	69,8	11,3	-	24	8,19	11,71	-	-
45	Lave altérée en boules	5	160	SE	5,5	3	A3	-	-	-	-	-	-	-	6	6
66	Lave saine massive	22	380	NNW	5,7	4,5	A1	-	-	-	-	-	-	-	6	6
77	Mamu III brun/rouge	19	370	NNW	4,3	4,3	B4	A1	58,3	2,1	13,25	70	12,33	15,89	5	6
90	Lave scoriacée	8	330	WNW	6	5,9	A4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
123	Lave saine bréchique	3	60	NE	10,5	5,1	A2	-	-	-	-	-	-	-	5	6
131	Mamu I-II gris	20	10	N	9,3	1,7	B1	B5	53,95	2,5	-	280	13,18	16,71	6	6
133	Mamu II-III lité de scories	23	0	N	8,3	3	B3	A1-A2	57,5	3,1	-	12	12,57	16,96	6	6
142	Brèches-scories	19	280	WSW	4	3,9	A4	B6	78,4	-	-	245	6,29	7,51	6	6
147	Mamu III brun/rouge	6	370	NNW	12,7	4,9	B4	A1 - A2	65,6	5,9	1,66	28,5	10,25	15,8	3	4

Tableau 6 : Caractéristiques expérimentales évaluées par le LTPP en 1991 sur les 17 talus nous concernant (extrait de Simoneau et Espada, 1991).

4.2. QUANTIFICATION 2D DU RECUL

4.2.1. Reconstruction des profils 2D

La méthode choisie par le LTPP pour décrire la géométrie des talus était de choisir une section représentative et d'en mesurer le profil au moyen d'une règle de 3 m de

longueur et d'un clinomètre. Cette technique est d'une simplicité et d'une robustesse remarquable, pour la description de talus récent mais s'adapte difficilement à des talus dont la morphologie a évolué.

En 2009, les 17 talus ont été photographiés et restitués par stéréophotogrammétrie, dont les principes ont été décrits au chapitre précédent. Les profils 2D ont ensuite été comparés à ceux décrits par Simoneau et Espada en 1991. Ces deux profils 1991/2009 sont représentés en Annexe 4 pour chacun des 17 talus.

A partir de cela, l'érosion est évaluée d'une part, par l'aire du polygone compris entre le profil de 2009 et celui de 1991, représentant la roche nue en excluant les pieds de talus quand ils sont masqués par des dépôts de colluvions (zone d'accrétion plutôt qu'érosion). D'autre part, on discrétise les profils par une série de nœuds à des hauteurs successives pour lesquelles on calcule l'écartement respectif entre profils. La quantification de l'érosion se fait donc de deux manières : globalement par une aire (Figure 23 panneau gauche) et discrétisée en une série de mesures linéaires (Figure 23, panneau droit).

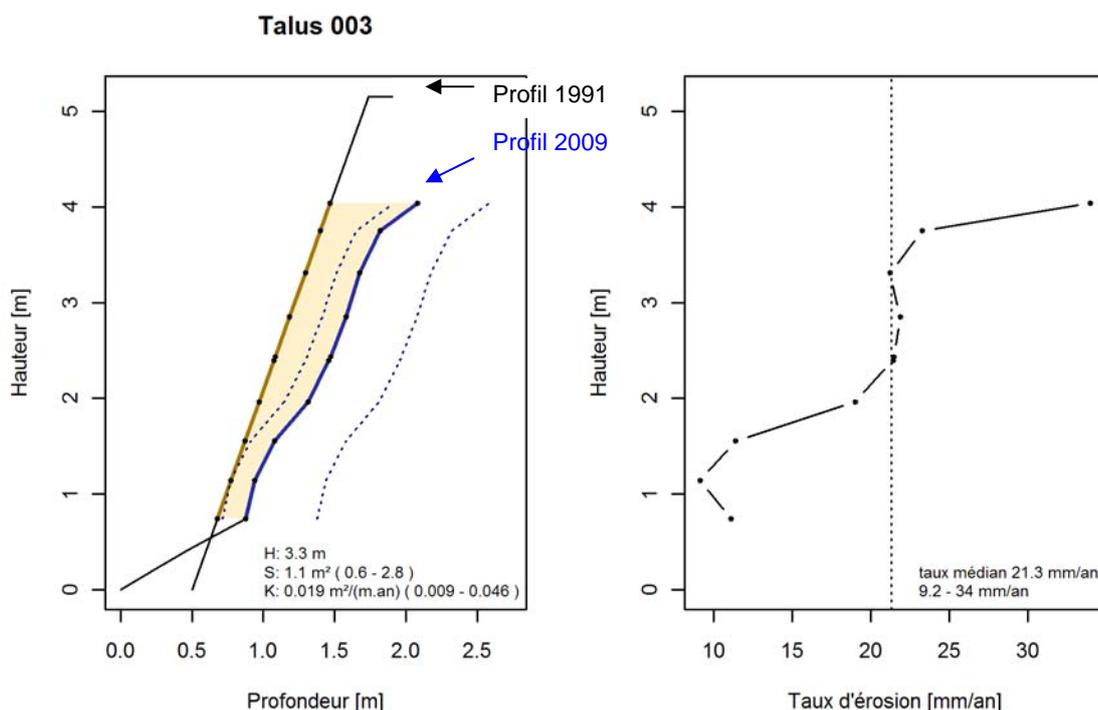


Figure 23 : Exemple de mesure d'érosion en 2D sur le talus 003.

À gauche, on mesure la surface du polygone compris entre les deux profils pour la zone où affleure la roche nue (trait gras). H : Hauteur du polygone ; S : surface probable du polygone d'érosion, avec estimation minimale et maximale représentées en pointillés (voir Figure 24) ; K : coefficient de diffusivité exprimant le rapport de la surface du polygone à la hauteur et au nombre d'année d'érosion. À droite, profil du taux d'érosion mesuré point à point le long du profil. L'intervalle noté sur le graphe indique le taux minimum et maximum observé le long du profil.

La comparaison des profils est entachée d'une incertitude du fait que l'origine des profils initiaux ne soit pas connue. Tous les profils restitués photogrammétriquement sont relatifs à la bordure de la route alors que les profils décrits par Simoneau et

Espada (1991) n'ont pas d'origine explicite. Comme l'estimation de l'aire érodée et du taux d'érosion dépend de la position de l'origine du système, on a fait trois hypothèses. La première correspond au cas minimisant l'aire (cas 1, Figure 24) : on suppose que le point le plus saillant du profil de 2009 est identique à celui de 1991. La seconde hypothèse détermine l'aire la plus probable (cas 2, Figure 24) : l'origine du système est estimée graphiquement à partir du croquis du talus venant des fiches de description de Simoneau et Espada (1991). Enfin, la troisième hypothèse donne une aire maximale (cas 3, Figure 24) en supposant que le pied du talus de 2009 (incluant le coin colluvial) coïncide avec le pied abrupt de 1991, c'est-à-dire que le talus de 1991 se trouvait directement à l'aplomb de la bordure de la route.

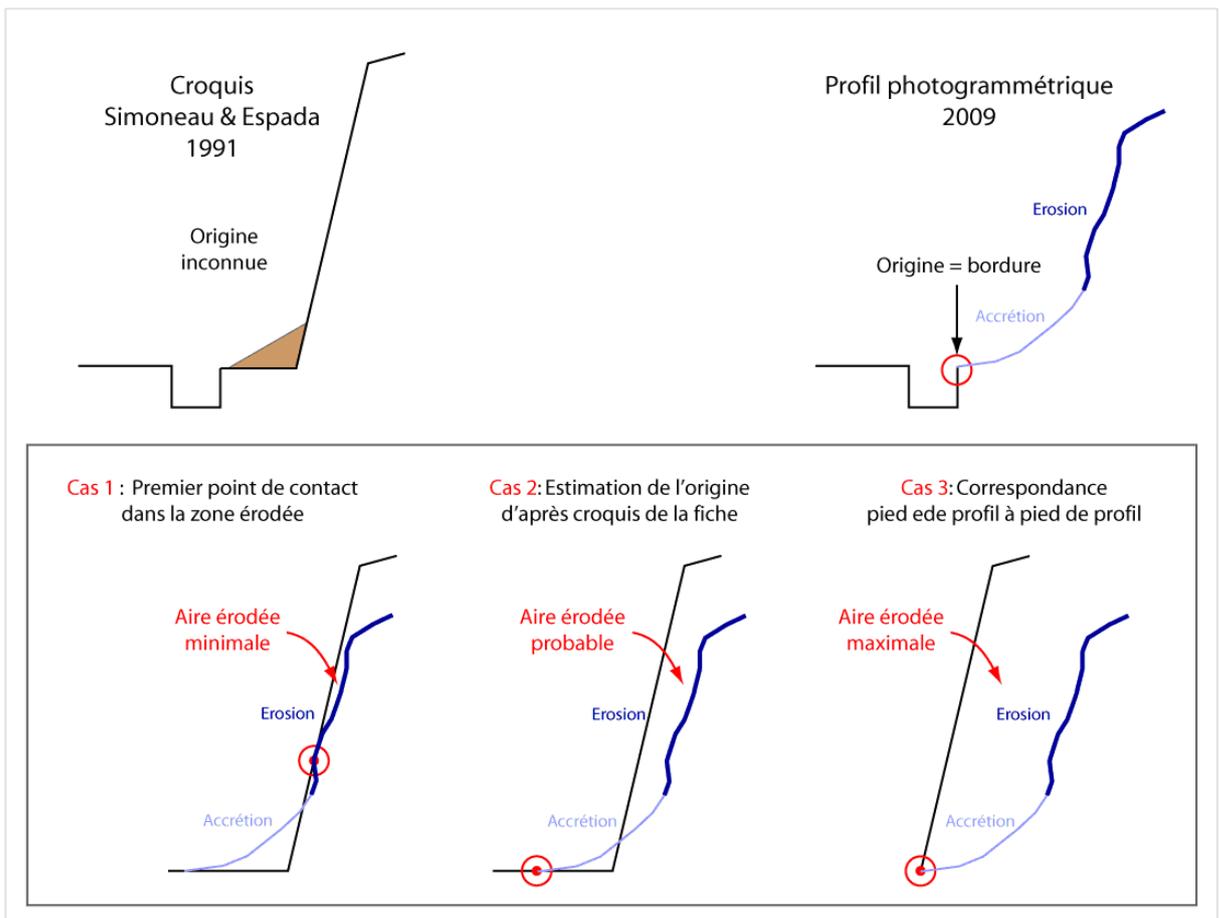


Figure 24 : Schéma de comparaison possible en 2D entre les profils de talus mesurés par le LTTP en 1991 et par photogrammétrie en 2009, étant donnée que l'origine du profil de talus n'est pas explicite dans l'étude de Simoneau et Espada (1991).

Chaque talus a fait l'objet d'une représentation graphique identique à la Figure 23 (Annexe 4). Le synthétise les résultats obtenus.

ID talus	Lithologie (LTPP, 1991)	Classe de matériaux (LTPP, 1991)	Classe retenue en 2009 (gras=changement)	Hauteur comparée en 2009 (m)	Section minimale (m ²)	Section probable (m ²)	Section maximale (m ²)	Kappa minimum (m ² /an)	Kappa probable (m ² /an)	Kappa maximum (m ² /an)	Taux d'érosion minimum (mm/an)	Taux d'érosion médian (mm/an)	Taux d'érosion maximum (mm/an)
3	3-4 rouge	B4	B4	3.30	0.56	1.10	2.75	0.009	0.019	0.046	9.2	21.3	34.0
4	paléosol	C1	A4	1.60	0.13	0.61	1.82	0.004	0.021	0.063	16.9	19.8	38.0
6	1-2 gris	B1	B1	4.31	0.14	0.44	4.10	0.002	0.006	0.053	3.9	6.3	105.7
11	lave saine massive	A1	A1	5.03	1.46	2.56	6.34	0.016	0.028	0.070	12.2	32.5	38.2
14	3 rouge	B4	B4	1.83	0.82	1.07	2.16	0.025	0.033	0.066	7.5	23.2	58.4
17	3-4 lité	B5	B5	2.34	0.65	0.71	3.64	0.015	0.017	0.086	1.5	17.3	33.7
34	2-3 gris	B2	B2	2.71	0.13	0.55	2.59	0.003	0.011	0.053	8.7	10.7	23.9
42	paléosol	B6	B1	1.84	0.10	0.10	0.10	0.003	0.003	0.003	0.0	2.0	4.9
45	lave altérée en boule	A3	A3	2.98	0.82	1.10	6.32	0.015	0.021	0.118	5.3	23.9	27.9
66	lave saine massive	A1	A1	4.48	5.29	5.29	5.29	0.066	0.066	0.066	0.0	76.7	114.9
77	3-4 brun rouge	B4	B4	4.34	2.14	2.14	2.14	0.027	0.027	0.027	0.0	27.3	39.5
90	lave scoriacée	A4	A1	5.67	0.72	0.76	0.85	0.007	0.007	0.008	0.43	9.35	24.12
123	lave saine bréchique	A2	A2	5.14	8.12	8.12	8.12	0.088	0.088	0.088	0.0	86.7	169.9
131	1-2 gris	B1	B1	1.73	0.22	0.36	0.02	0.007	0.012	0.001	4.7	9.2	18.5
133	1-2 lité de scories	B3	B3	3.87	2.38	2.38	3.35	0.034	0.034	0.048	0.1	36.6	56.7
142	brèches scories	A4	B2	3.91	1.58	1.77	2.75	0.022	0.025	0.039	2.7	23.9	33.2
147	3 rouge	B4	B4	4.90	0.11	0.21	0.52	0.001	0.002	0.006	1.1	8.4	23.0

Tableau 7 : Résultat de mesure de l'érosion des 17 talus.

Le coefficient kappa correspond à la section d'érosion annuelle rapportée à la hauteur du profil. Les taux d'érosion minimum, maximum et médian sont calculés pour la section érodée la plus probable.

4.2.2. Quantification du recul

À partir de ces profils, l'érosion doit ensuite être quantifiée sur chaque talus. Dans un premier temps, nous avons calculé la section érodée entre les deux profils en autorisant une marge d'erreur sur l'origine des profils (Tableau 7). Ces sections ont ensuite été rapportées à la hauteur du profil comparé et au nombre d'années écoulées entre les deux profils pour normaliser les sections érodées et les rendre comparables. En complément, le taux de recul des talus a été extrait à plusieurs hauteurs le long des profils de manière à évaluer la variabilité verticale de l'érosion pour la section érodée la plus probable.

Section érodée

La section érodée la plus probable varie de 0,09 m² à 8,12 m² avec une valeur médiane de 1,07 m² (Figure 25). Pour 15 des 17 talus, les sections érodées restent inférieures à 3 m² (Figure 25). La Figure 25 montre qu'il existe trois types de talus, ceux dont la section érodée est linéairement dépendante de la hauteur de la section érodée et ceux dont la hauteur affecte énormément la section érodée (talus 066 et 123) ou très peu (talus 006, 147, 090). Les talus 066 et 123 sont taillés dans la lave saine et lave bréchique respectivement. À l'inverse, les talus 006, 090 et 147, taillés dans du mamu I (006 et 147), ou de la lave saine (090), sont très peu érodés malgré un profil d'érosion mesuré sur plus de 4,30 m de hauteur.

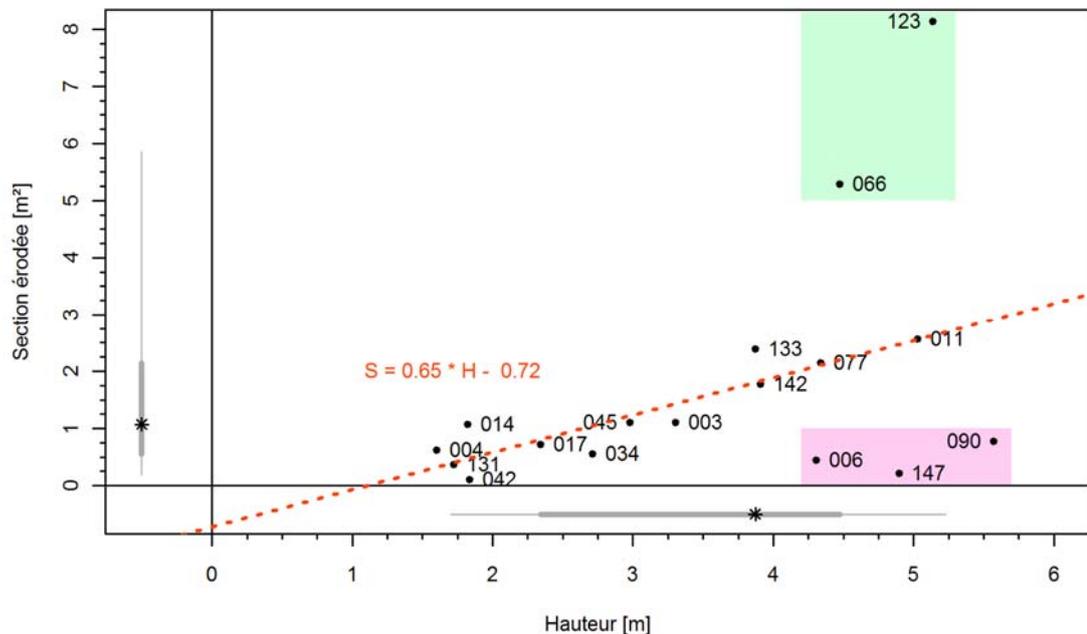


Figure 25 : Aire érodée en fonction de la hauteur sur laquelle l'aire érodée a été évaluée.

Les quantiles des deux variables sont figurés dans la marge (ligne fine de 5 % à 95 %, ligne grasse de 25 % à 75 %, étoile = médiane). Pour la majorité des talus, il existe une relation linéaire entre l'aire érodée et la hauteur sur laquelle elle a été estimée. Deux groupes se singularisent par ailleurs. En vert, les talus sont beaucoup plus érodés que leur hauteur ne le suggère, les talus en rose, le sont beaucoup moins.

Analogie avec les modèles diffusifs d'escarpements

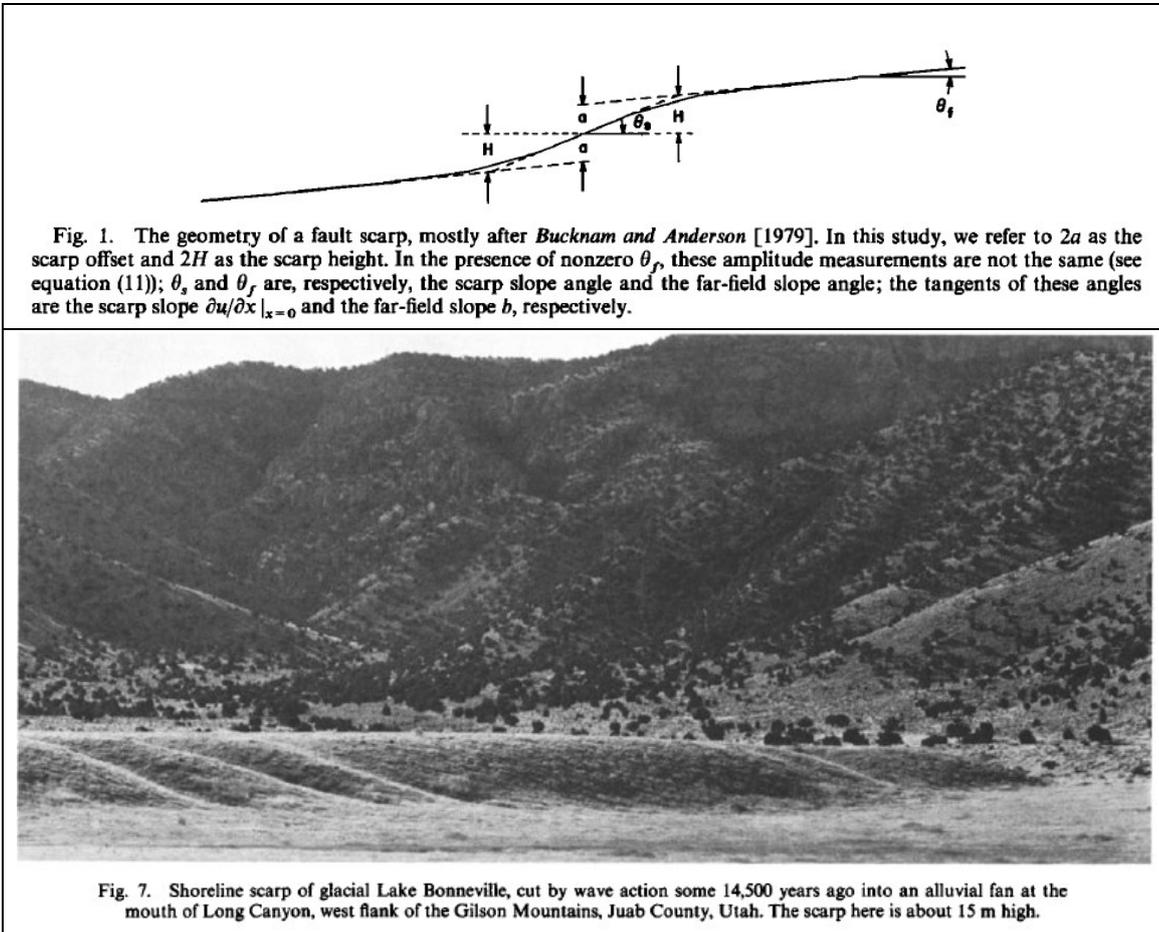


Figure 26 : Figures originales de l'article de Hanks et al.(1984) montrant un profil typique d'escarpement ainsi que l'archétype d'une ancienne falaise bordant le Lac Bonneville (Utah, USA), il y a 14 500 ans.

L'évolution des paysages et la compréhension des processus d'érosion en géomorphologie a vu se développer un modèle diffusif d'évolution des escarpements au début des années 1980 (Hanks et al., 1984). L'idée des chercheurs qui ont développé ce concept part du constat qu'un profil topographique mesuré perpendiculairement à un escarpement érodé ressemble à une sorte de S aplati (Figure 26), c'est-à-dire une forme obtenue mathématiquement par une fonction d'erreur (« error function ») et qui, en physique, décrit les phénomènes de diffusion. En s'appuyant sur cette analogie, ils montrent qu'un escarpement va évoluer de manière anti-symétrique de part et d'autre d'un point d'équilibre et que le flux de matière est proportionnel à la courbure du profil. Ainsi, le modèle prédit que la tête du talus où la courbure (c'est-à-dire le changement de pente entre celle de la risberme et celle du talus à proprement parlé) est importante va s'éroder beaucoup plus vite que le versant abrupt et plan. De la même manière, la matière détachée en haut du talus va

s'accumuler plus vite en pied de talus, à proximité du point pivot qu'à une distance plus grande. Au fil du temps, le taux d'évolution du talus va s'amortir.

Le taux d'évolution du profil (en érosion ou en accrétion) dépend strictement de la courbure du profil moyennant un coefficient de proportionnalité désigné par la lettre κ (kappa). Ce coefficient de proportionnalité κ décrit le taux annuel d'évolution de la section et s'exprime en m^2/an . Hanks *et al.* (1984) expliquent que ce coefficient doit être calibré sur des escarpements d'âge connu et qu'une fois calculé, il n'est valide que pour un type de matériau homogène et dans une seule situation climatique donnée. Enfin, ils ajoutent que ce modèle d'évolution des escarpements n'est valide que dans les cas où il y a conservation de la matière de part et d'autre du point pivot de l'escarpement (Figure 27). Il n'est donc pas question d'appliquer un modèle diffusif à un escarpement où une érosion fluviale viendrait, par exemple, retirer le matériau accumulé en pied de talus. Si c'était le cas, le taux de transfert de matière ne serait plus strictement proportionnel à la courbure mais serait plus élevé.

Ce modèle diffusif a été exploré par bon nombre de géomorphologues désireux de d'identifier les processus qui façonnent le paysage (p. ex. Martin et Chruch, 1997 ; ou Carretier *et al.*, 2008), tels que les séismes induisant des ruptures co-sismiques à la surface du sol, ou la mer qui érode les falaises. On utilise généralement ce modèle diffusif pour déterminer l'âge d'escarpements érodés.

L'application d'un modèle diffusif aux talus polynésiens permettrait de mettre en perspective l'évolution morphologique des roches volcaniques saines et mamutisées dans un contexte climatique tropical très humide face aux études géomorphologiques des escarpements d'environnement secs à hyperarides. Cette opportunité scientifique semble applicable (voir exemple Figure 27), mais aucun des talus anthropiques de cette étude ne satisfait l'hypothèse de conservation de la matière car les pieds de talus sont nettoyés artificiellement par les services d'entretien ou bien alors la matière est exportée dans les caniveaux d'évacuation des eaux pluviales.

On retiendra des études de talus diffusifs que **le taux d'érosion est modulée par un coefficient de diffusivité exprimé en m^2/an qui peut servir à décrire la sensibilité d'un talus à l'érosion diffuse**. Ce coefficient de diffusivité est calculé pour les 17 talus et comparé par lithologie représentative de l'affleurement (Figure 28).

D'après ces observations (Figure 28), **il n'existe pas de corrélation évidente entre la classe de matériaux ou le type de matériau et la valeur du coefficient de diffusivité (surface érodée)**. Deux talus se singularisent, les talus 066 et 123, par un coefficient de diffusivité probable supérieur à $0,066 m^2/an$ (Figure 28). Remarquons également que les coefficients de diffusivité des talus 045 et 017 sont associés à une incertitude significative. Celle-ci provient d'une erreur possible sur l'origine des profils érodés venant de la présence d'une zone d'accrétion large de plus de 1 m en pied de talus.

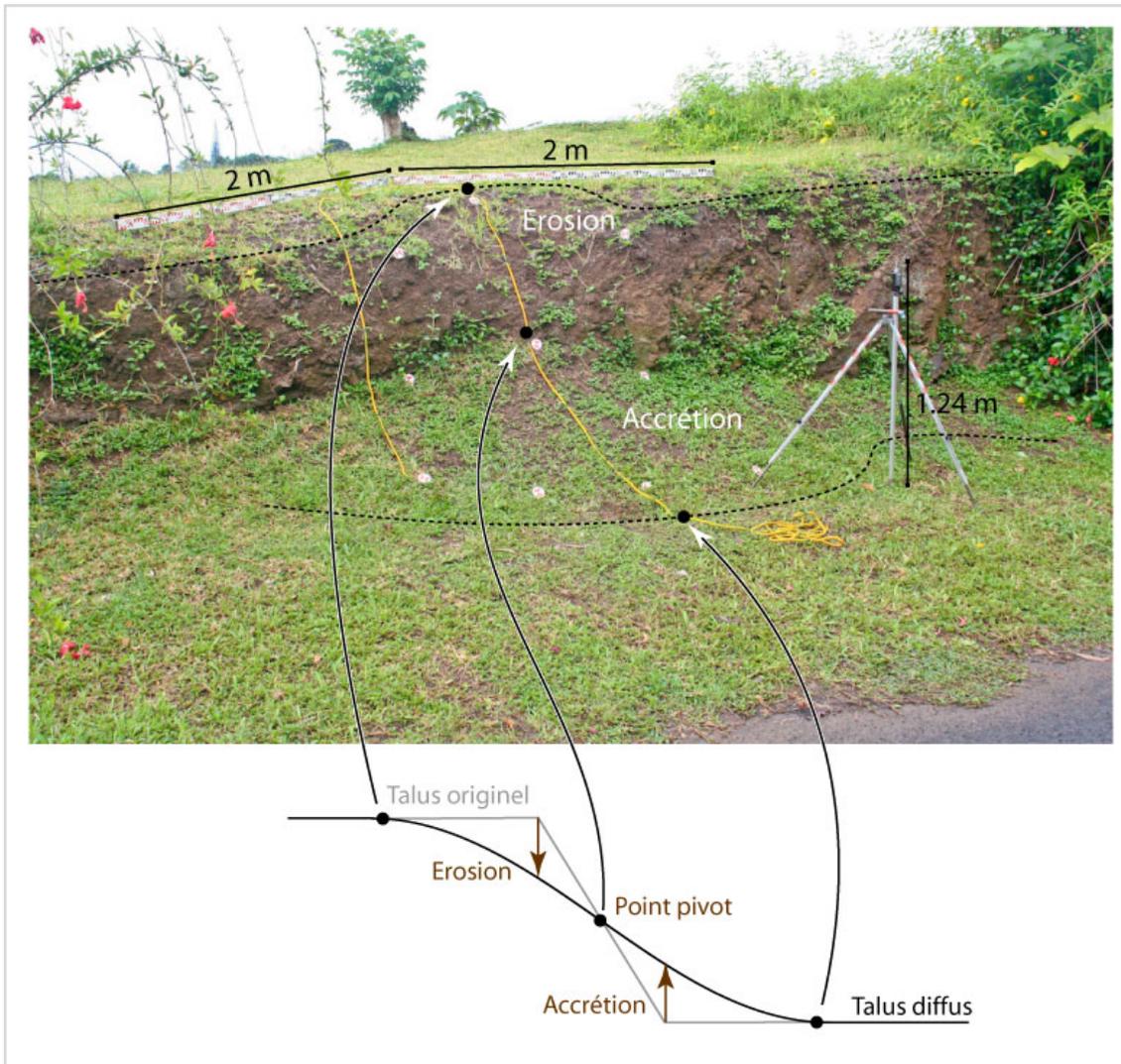


Figure 27 : Exemple d'escarpement diffus (brèche et scories) face au talus n° 142 (lotissement Aute III, commune de Pirae).

Le profil diffus est matérialisé par la corde jaune. Les trois points indiquent les points caractéristiques du profil diffus sur le terrain. Le point pivot se situe à la transition entre érosion et accrétion sur la surface originelle du talus.

À titre de comparaison, Martin & Church (1997) ont estimé à $0,2 \text{ m}^2/\text{an}$ le coefficient de diffusivité associé aux glissements de terrain en Colombie Britannique (Canada), alors que la reptation de sol (« creep » en anglais) a un coefficient caractéristique de $0,0002 \text{ m}^2/\text{an}$. Les coefficients estimés pour les talus polynésiens se retrouvent dans cette fourchette.

La représentativité quantitative de ces valeurs est discutée dans le § 4.3.1.

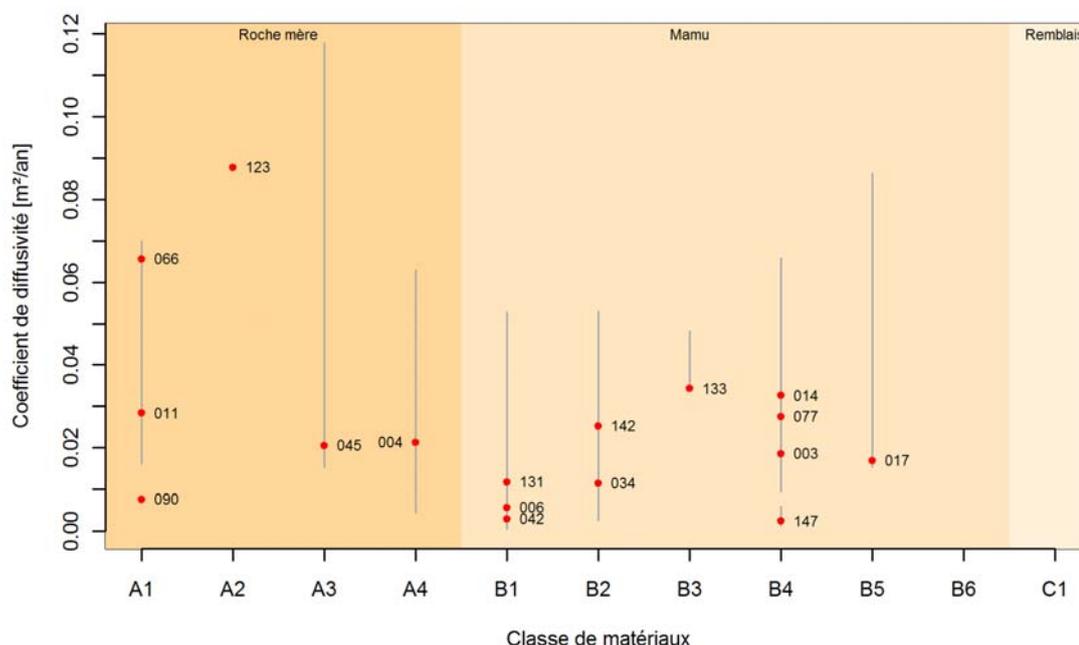


Figure 28 : Coefficient de diffusivité des 17 talus en fonction de la classe de matériau de l'affleurement.

Les points rouges sont les coefficients calculés sur base de la section érodée la plus probable (voir définition Figure 24), les barres grises indiquent les variations possibles du coefficient de diffusivité en fonction de la section érodée maximale et minimale possible. Les indices à côté des points indiquent le numéro de talus.

Taux d'érosion discrétisés sur la hauteur du talus

Au-delà de l'examen de la section érodée des talus, le taux d'érosion, ou taux de recul, a également été calculé à différentes hauteurs pour en examiner la variabilité (Figure 29). Le taux d'érosion permet d'accéder à une mesure ponctuelle de l'érosion plutôt que de n'en considérer que l'intégrale qui est représentée par le coefficient de diffusivité. La comparaison des taux d'érosion a été effectuée pour la section érodée la plus probable (cas 2 de la Figure 24). Chaque talus est ensuite caractérisé par le taux de recul médian ainsi que les taux minimum et maximum rencontrés le long du profil. On trouve un taux d'érosion minimum de 0 mm/an là où les deux profils se touchent.

Ces taux d'érosion médians conduisent au même classement des talus que celui donné par les coefficients de diffusivité. L'intérêt de cette nouvelle représentation réside dans la plage de variation observée le long de chaque profil, précisant le mode d'érosion. Ainsi, la Figure 29 aurait tendance à montrer que les taux d'érosion peuvent être beaucoup plus variables pour les talus taillés dans la roche mère (classe A) que dans les talus en mamu (classe B). La variabilité de la classe A provient essentiellement des talus 066 et 123.

La représentativité quantitative de ces valeurs est discutée dans le § 4.3.1.

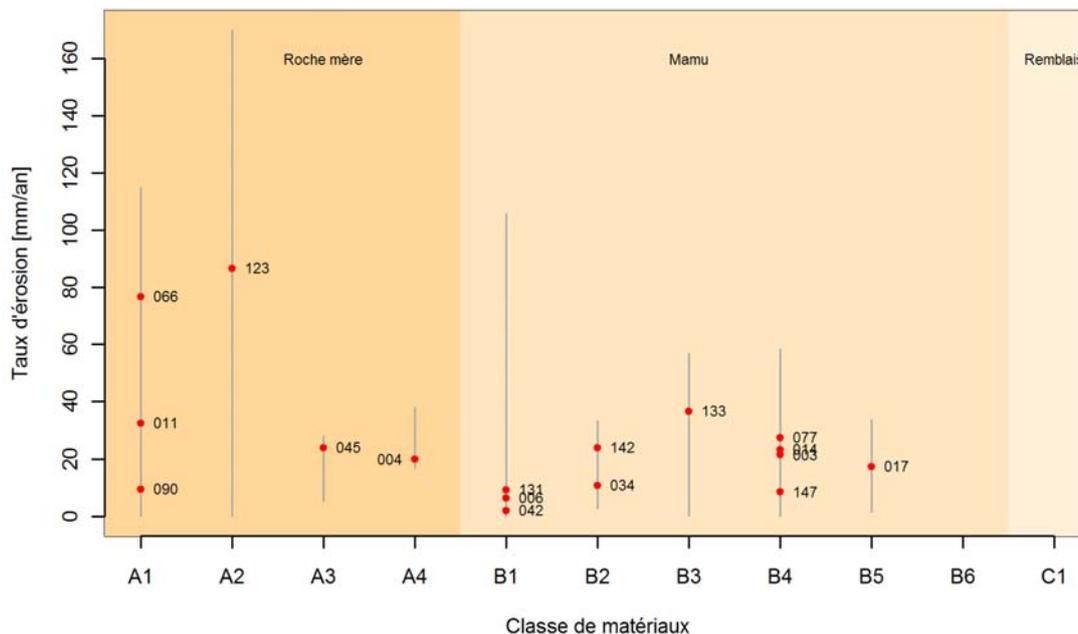


Figure 29 : Taux d'érosion médians des différents talus en fonction de leur classe de matériau. La classe se réfère à la classification retenue en 2009 et reprise dans le Tableau 7. Les points rouges sont les taux d'érosion médian observés pour chaque talus, la barre grise indique la variabilité de l'érosion observée le long des profils de chaque talus. La variabilité du taux d'érosion est la plus forte dans le talus taillés dans la roche mère.

4.3. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

4.3.1. Une mesure du recul des talus

À partir du panel des talus dont on a pu suivre l'évolution morphologique sur une vingtaine d'années, il ressort que deux grandeurs se sont avérées pertinentes pour décrire la sensibilité d'un talus à l'érosion diffuse :

- **le coefficient de diffusivité** (exprimé en m^2/an), qui correspond à la surface de la section érodée du talus (normalisée par la hauteur de la zone) ;
- **le taux d'érosion** (exprimé en m/an), qui permet d'accéder à une mesure ponctuelle de l'érosion le long d'un profil, plutôt que de n'en considérer que l'intégrale.

La description statistique des échantillons observés est disponible en Figure 30 et en Figure 31. Il s'agit de la distribution cumulée empirique (en anglais Empirical Cumulated Distribution Function = ECDF), permettant de synthétiser les informations observées et de mettre en évidence les tendances sans faire d'hypothèses *a priori* sur la loi statistique. Si les mesures le permettent, une loi de répartition statistique peut ensuite être proposée.

Une surface érodée moyenne exprimée par le coefficient de diffusivité

D'après les observations précédentes (cf. Figure 28), **il n'existe pas de corrélation évidente entre la classe de matériaux ou le type de matériau et la valeur du coefficient de diffusivité (surface érodée).**

La Figure 30 montre que le coefficient de diffusivité médian du panel des 17 talus observés est de $0,020 \text{ m}^2/\text{an}$ et que les trois quarts (75 %) d'entre eux, ont un coefficient de diffusivité compris entre $0,005 \text{ m}^2/\text{an}$ et $0,034 \text{ m}^2/\text{an}$. Cette valeur d'intégrale est robuste puisqu'elle représente la surface de la section érodée du talus normalisée par la hauteur de la zone comparée et le temps écoulé entre les comparaisons. **Malgré l'échantillon limité, il semble que nous puissions observer que quelques soit le talus considéré, au-delà de vingt ans d'existence, cette surface érodée tend vers une valeur constante.**

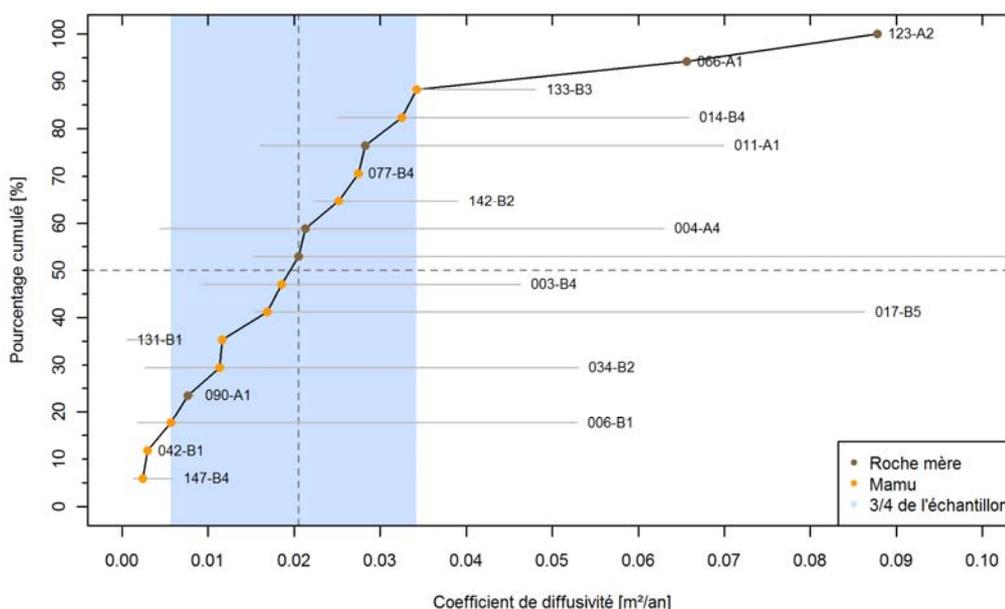


Figure 30 : Distribution cumulée empirique (en anglais *Empirical Cumulated Distribution Function = ECDF*) des coefficients de diffusivité.

À partir de l'observation de l'échantillon, l'hypothèse de loi normale la plus acceptable en termes de représentativité, est celle calculée à partir d'un panel de 13 individus, sans tenir compte des valeurs d'érosion les plus élevées (talus 66 et 123) et les plus faibles (talus 147, 42, 90 et 6). Ainsi, **la valeur de recul qui semble caractéristique quelques soit le talus considéré, au-delà de vingt ans d'existence, serait de $0,022 \text{ m}^2/\text{an}$** , avec un intervalle de confiance à 95 % compris entre $0,007 \text{ m}^2/\text{an}$ et $0,038 \text{ m}^2/\text{an}$.

Rappelons à titre de comparaison que Martin & Church (1997) ont estimé à $0,2 \text{ m}^2/\text{an}$ le coefficient de diffusivité associé aux glissements de terrain en Colombie Britannique (Canada), alors que la reptation de sol (« creep » en anglais) a un coefficient

caractéristique de 0,0002 m²/an. Les coefficients estimés pour les talus polynésiens se trouvent dans cette fourchette.

Nous ne disposons pas de suffisamment d'individus pour distinguer raisonnablement d'autres valeurs représentatives de coefficient de diffusivité, qui pourraient cependant s'avérer pertinentes. Nous traiterons ces valeurs extrêmes de manière qualitative dans le § 4.3.2.

Une plage de variation du recul exprimée par le taux d'érosion

Le taux d'érosion permet d'accéder à une mesure ponctuelle de l'érosion plutôt que de n'en considérer que l'intégrale, représentée par le coefficient de diffusivité.

La Figure 31 représente la distribution de l'ensemble des taux d'érosion mesurés le long des 17 profils (une dizaine d'observation par talus). La médiane de cette distribution est de 21,8 mm/an et les trois quarts (75 %) des valeurs sont comprises entre 5,3 et 56,4 mm/an.

Cet intervalle de valeur exprime la variabilité des taux d'érosion observés le long des 17 talus observés, due à la variabilité de la géométrie et des lithologies recoupées. Contrairement au coefficient de diffusivité, le taux d'érosion ne peut se réduire à une valeur moyenne qui n'aurait pas de signification particulière. **Gardons donc comme valeur représentative du taux d'érosion, une plage de variation possible entre 5,3 et 56,4 mm/an, selon la lithologie et la géométrie.**

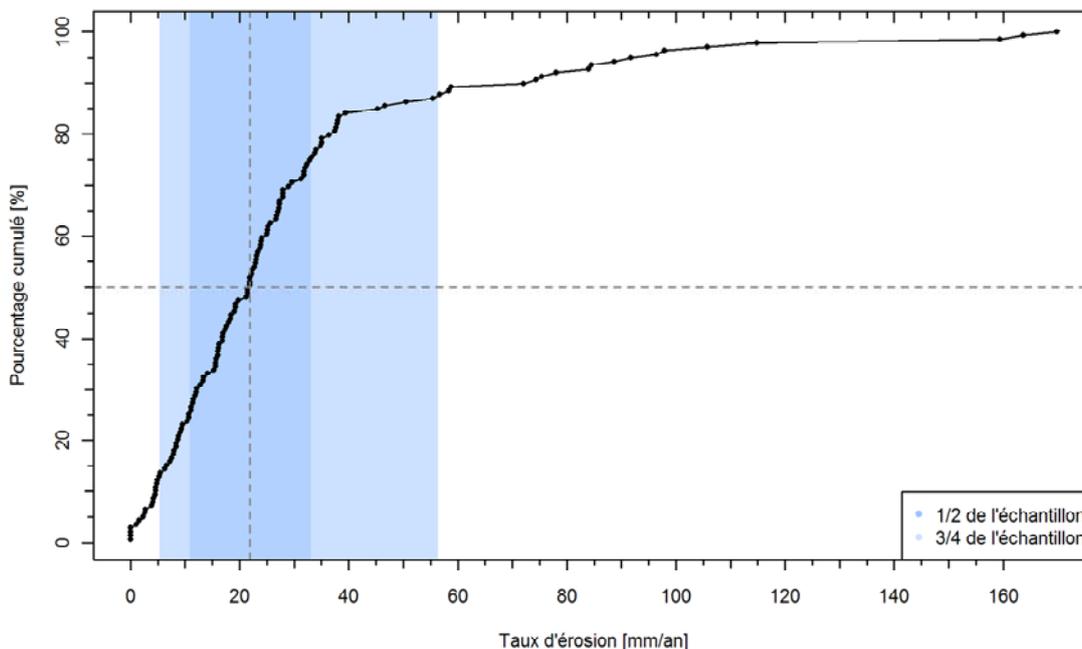


Figure 31 : Distribution cumulée empirique (en anglais Empirical Cumulated Distribution Function = ECDF) des taux d'érosion médian.

4.3.2. Des processus érosifs qui se distinguent

Le coefficient de diffusivité des talus 66 et 123 se distingue nettement des autres, par des valeurs de recul supérieures à 0,066 m²/an. Cependant, ces deux valeurs isolées peuvent très facilement être non représentatives ou attribuables à des paramètres ponctuels imprévisibles. Avant de considérer ces valeurs comme aberrantes, nous avons cherché à vérifier que cette particularité ne puisse pas néanmoins s'expliquer par d'autres facteurs, comme lithologiques.

Les informations géotechniques, que le LTPP a rassemblé en 1991, et qui sont synthétisées dans le Tableau 6, ne permettent pas d'expliquer ces écarts de valeurs ; aucune corrélation évidente n'apparaît. Cependant l'absence de représentativité d'un prélèvement ponctuel au vu de l'hétérogénéité de ces talus, sachant que nous ne disposons que de profil 2D permet de douter de l'exploitabilité de ces données pour notre analyse. De plus, les caractéristiques mécaniques des talus à caractère rocheux (classe A du LTPP) n'ont souvent pas pu être autant renseignées que celles des talus mamutisés (classe B) alors que c'est précisément ces talus rocheux qui se distinguent dans notre étude. Les valeurs géotechniques, pourtant précieuses que conserve la base de données, ne sont pas exploitables dans le cadre de cette étude.

D'après les informations disponibles à l'échelle de cette étude, les 2 valeurs d'érosion qui se distinguent concernent des talus qui ont comme point commun et particularité :

- d'être taillé dans de la lave saine (classe A du LTPP) et de n'être donc pas des talus mamutisés à proprement parlé ;
- d'avoir une forte variabilité du taux d'érosion le long du profil de talus (cf. ampleur des plages de données de la Figure 29), c'est-à-dire qu'il existe un point, dans la pente, dont le recul est particulièrement plus important que les autres.

Cette variabilité du taux d'érosion le long du profil peut avoir différentes explications. Les informations des schémas et fiches descriptives du LTPP (reprises en Figure 32), étayées par les observations de terrain, nous apprennent que :

- le talus 66 est constitué d'une « lave saine massive », *a priori* homogène sans hétérogénéité apparente de faciès. Cependant, en 1991, un éboulement en masse était schématisé pouvant participer à justifier ces valeurs de recul importantes ;
- le talus 123 est taillé dans une lave « bréchique » recoupée par un paléosol. Il est probable que l'érosion de cette couche moins indurées ait pu sous-caver les couches supérieures.

Indépendamment de la représentativité limitée que constituent deux valeurs, il est probable que l'hétérogénéité de faciès et la présence de formation à faible cohésion (paléosol, scories...), soit un critère favorable à l'érosion. Il est effectivement logique que l'érosion différentielle des couches les moins indurées soit ensuite à même de déstabiliser les couches supérieures, par sous-cavage par exemple, comme l'avait également souligné le LTPP. Ceci implique qu'on ne puisse dissocier aussi simplement les problématiques d'éboulement et d'érosion, d'ampleur très différente *a priori*, puisque l'érosion de certaines couches peut entraîner ensuite l'instabilité d'autres.

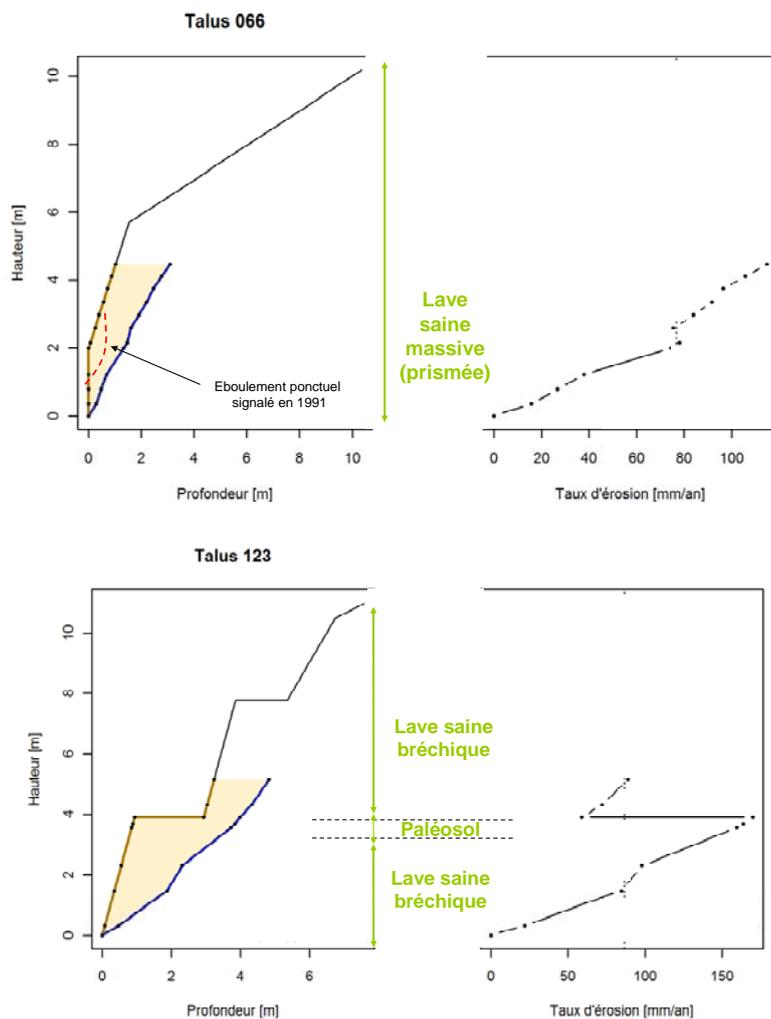


Figure 32 : Précision lithologique sur les 2 talus les plus érodés.

Cependant, notons quand même, que les talus 142 et 11, qui présentent également une lithologie hétérogène, ont des taux d'érosion et coefficient de diffusivité qui restent limités. Ceci peut illustrer la non-linéarité temporelle des processus érosifs, notamment des éboulements par sous-cavage, qui n'auraient pas encore eu lieu au moment de la mesure. Ainsi, l'illustre la Figure 33, le sous-cavage initié par l'érosion du paléosol présent au milieu du profil du talus 11, n'est pas encore suffisant pour déstabiliser la tête de talus, ce qui ne saurait tarder.

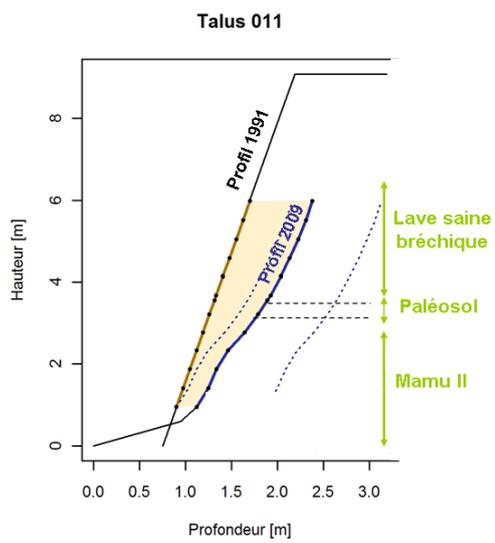


Figure 33 : Profil actuel du talus 11, dont le taux d'érosion n'est pas particulièrement élevé. Un paléosol sous-cave la tête de talus, sans qu'aucune déstabilisation n'ait encore eu lieu.

5. Définition et mise en oeuvre d'un protocole expérimental pour un suivi mensuel de l'érodibilité en 3D

L'influence d'une hétérogénéité lithologique sur les vitesses d'érosion a été mise en évidence dans le chapitre précédent, sur une échelle d'une vingtaine d'année. Dès lors, le suivi mensuel d'un talus s'avère donc précieux pour comprendre les mécanismes et quantifier les processus de dégradation des différents faciès au sein d'un même talus.

5.1. PRÉSENTATION DU TALUS EXPÉRIMENTAL DE PAMATAI HUAITI

Le choix de ce talus repose sur sa fraîcheur et le type de matériaux dans lequel il a été taillé. Il s'agit de mamu III-IV brun ferme, un matériau assez répandu à Tahiti et pour lequel se posent des questions de stabilité.

5.1.1. Situation générale du talus

Le talus de Pamatai Huaiti est situé le long de la route montant au lotissement de Pamatai, commune de Faa'a, environ 200 m avant le laboratoire de géophysique (LDG CEA) (Figure 35). Son aménagement récent remonte aux environs de septembre 2008.

Le talus de Pamatai Huaiti fait une centaine de mètres de longueur pour 8 mètres environ de hauteur. Les 6 mètres inférieurs du talus sont taillés à 5/1 (Figure 35) alors que les deux mètres sommitaux sont taillés avec une pente plus faible. Le pied du talus se trouve directement au niveau de la route sans rigole d'évacuation des eaux pluviales ou de capture des sédiments. De la végétation arborée et arbustive se situe en tête de talus à plus de deux mètres de la transition 5/1 et pente plus faible, ce qui laisse le sommet du talus exposé au ravinement (Figure 35).

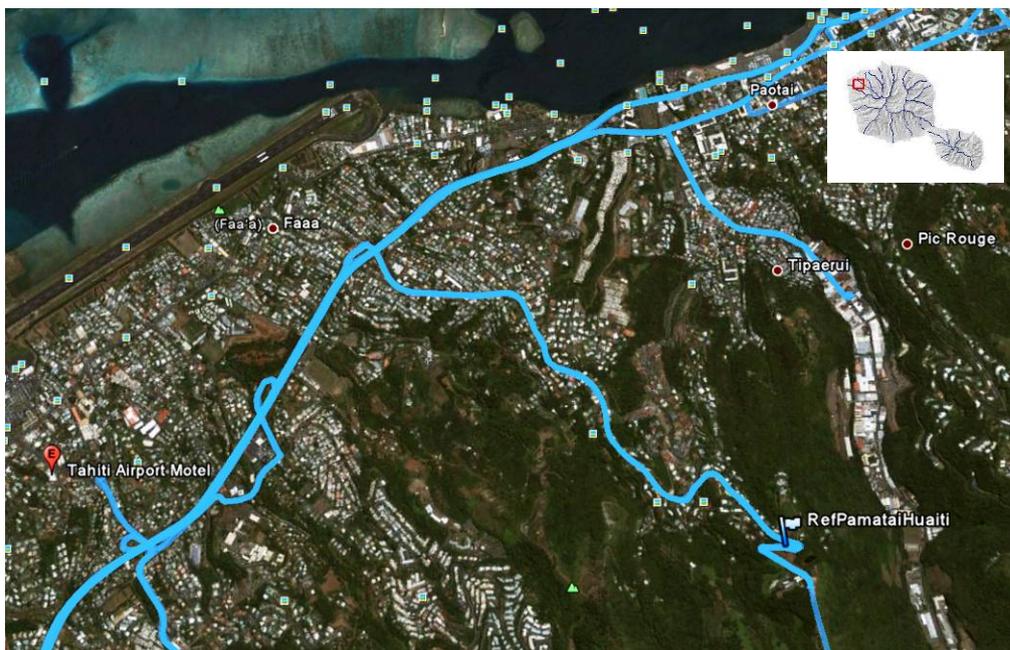


Figure 34 : Localisation du talus test de Pamatai (noté RefPamataiHuaiti) dans le quart inférieur droit de l'image.

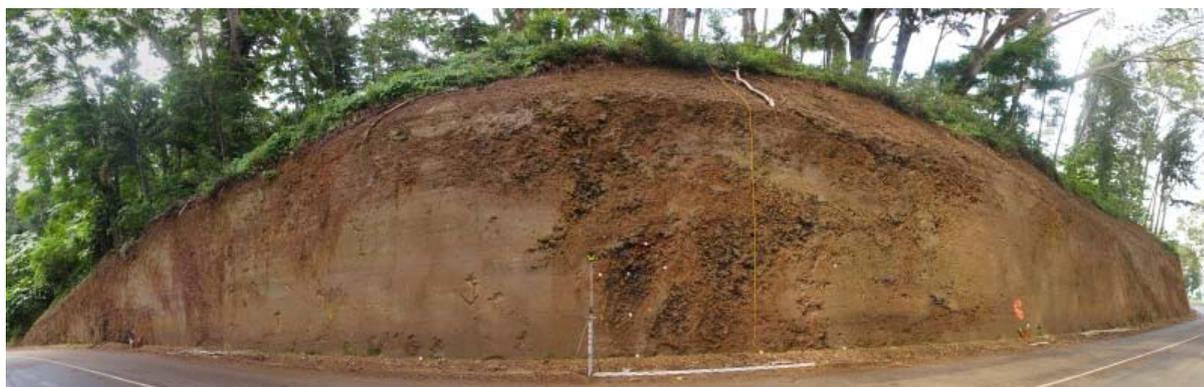


Figure 35 : Photo panoramique du talus test de Pamatai Huaiti (février 2009) sélectionné pour le levé mensuel.

Le talus est creusé dans du mamu III-IV brun ferme avec des poches de scories de taille métrique. La cane verticale est déployée à 2 m de hauteur. Le talus fait face au nord. La mire de 4 m posée au sol est orientée E-W avec la cane située à l'est (le montage des photos du panoramique donne une impression de virage alors que la route est en ligne droite à cet endroit).

5.1.2. Description lithologique du talus

Le talus est constitué de Mamu III – IV (cf. description générale du Tableau 2, étant donné le peu de texture et de structure reconnaissable de la roche mère, ce qui le classe dans la catégorie B4 du LTPP (cf. Tableau 1).

D'après les résultats du programme ARAI, le mamu III-IV, correspondant aux niveaux les plus évolués des altérites polynésiennes, est essentiellement composé de limons

assez plastiques, présentant une cohésion en place non négligeable (en moyenne entre 40 et 60 kPa) et un angle de frottement interne important ($\phi' = 35^\circ$), hérités de la roche mère. La forte cohésion du matériau est confirmée par les observations de terrain.

Le mamu est un matériau relativement peu perméable ($k_{moy} = 10^{-7}$ m/s dans la matrice). Il existe une pseudo « perméabilité de fissures » au droit des discontinuités héritées de la roche mère. Ces fissures, bien que nettement moins perméables que dans la roche mère fracturée, favorisent les circulations d'eau souterraines dans le massif.

Au sein de cette formation mamutisée, des hétérogénéités plus locales interviennent. Notamment, un secteur scoriacé, sous forme de poche, se distingue nettement (cf. Figure 36). Il se situe au milieu du talus, sur une surface de plusieurs mètres carrés qui recoupe de talus verticalement. Les scories et « boules » peu altérées ont des tailles centimétriques voire décimétriques (Figure 37). Des couches cendreuseuses d'une dizaine de centimètres d'épaisseur, sont également observables. Ce secteur où la structure de la coulée massive d'origine est très reconnaissable, correspond à une zone où le degré d'altération est très peu avancé (mamu I-II), se distinguant ainsi du degré d'altération de l'ensemble du talus.



Figure 36 : Poches de scories et couches cendreuseuses.



Figure 37 : Détail d'une scorie.

5.2. ACQUISITION PHOTOGRAPHIQUE EN VUE D'UNE RECONSTITUTION STÉRÉOPHOTOGRAMMÉTRIQUE 3D

Le principe général de la méthode stéréophotogrammétrique a été décrit dans le chapitre 3.

5.2.1. Protocole des prises de vues

Le suivi du talus a demandé la mise en place d'un réseau de sept points de vue contigus répartis tous les 5 à 10 m environ le long du bord nord de la route. L'espacement a été décidé de manière à offrir un recouvrement important entre les photos panoramiques (Figure 38) prises de points de vue adjacents. Un clou de topographe a été implanté dans la route pour réinstaller systématiquement le trépied photo à l'aplomb du même point de vue.

Une série de cibles rouges et blanches (dont la plupart sont visibles sur la Figure 39) ont été disposés sur la surface du talus autour de la poche de scorie pour assurer la manifester des points artificiels facilitant la mise en correspondance de points homologue et la reconstruction du modèle 3D. La cane de géomètre est installée sur un clou de géomètre enfoncé dans la route, au pied de talus. La position du clou a été localisée au GPS et servira de référence (Tableau 8). Une mire de nivellement de 4 mètres de long disposée au pied de la cane et orientée vers l'ouest. On l'aligne sur un second clou de topographe lui aussi au pied de l'affleurement (Figure 39). Ainsi, la mire sert à mettre à le modèle photogrammétrique à l'échelle et à orienter l'affleurement (axe X si mire orientée en E-W). Le centre du réflecteur placé sur la cane et le pied de la cane servent à marquer la verticale locale (Figure 39). Des points marqués sur la cane désignent la verticale (axe Z ; cocher axe dominant).



Figure 38 : Exemple de trois photos panoramiques contigües, prises le 13 août 2009, et documentant l'évolution du talus de Pamatai Huaiti sur la commune de Faa'a.

Les stations de prises de vues sont espacées d'environ 5 à 10 m (le montage des photos du panoramique donne cette impression de virage alors que la route est en ligne droite à cet endroit).

Talus	Lat	Long	X	Y	Z
Pamatai Huaiti (clou sous la cane)	-17.56515	-149.57442	226718.5	8056046.1	296 m

Tableau 8 : Localisation du clou de référence sur la zone de scories.

Ces coordonnées sont déterminées au GPS portable de précision métrique.

Enfin sur la partie centrale de l'affleurement, là où l'érosion a été présumée la plus active, une série de 10 cibles a été disposée aussi largement que possible pour permettre un recalage aisé des photos d'une campagne (cf. Figure 39). Comme ces cibles sont placées librement à chaque déploiement, elles ne sont pas utilisées pour une comparaison diachronique, mais uniquement pour faciliter la construction d'un seul modèle stéréoscopique.



Figure 39 : Points marqués sur la mire et sur la cane pour identifier respectivement une échelle (longueur de la mire : 4 m), une direction horizontale (ici E-W) et la verticale.

Le clou d'arpentage situé aux extrémités de la mire matérialise de manière pérenne la direction de l'affleurement.

5.2.2. Base de données photographique

Le suivi du talus de Pamatai Huaiti est réalisé tous les mois par les agents du Service de l'Urbanisme et de l'Aménagement. Le premier levé a eu lieu le 2 février 2009. Les dates suivantes ont été choisies par les agents chargés du suivi.

Trois appareils photos ont été utilisés successivement lors de la réalisation du suivi (voir 3.3). L'appareil employé définitivement pour le suivi à partir de juillet 2009 est un Pentax K200D équipé d'un objectif de 21 mm à focale fixe.

Chaque campagne photographique mensuelle donne lieu à la prise d'une trentaine de photos. Elles sont assemblées en 7 photos panoramiques contiguës pour permettre une vue synoptique du talus.

Cette base de donnée permet de conserver une archive photographique standardisée du talus au fil du temps et donc la mémoire de la morphologie exacte à chaque prise de vue.

Dans cette base de données photographique de plus de trois cents photos, on a d'abord cherché à valider les apports qualitatifs et quantitatifs du suivi photogrammétrique d'un talus. L'exploitation a donc été poussée aussi loin que possible avec un échantillon de 3 stations et 7 époques de mesure.

<i>dt</i>	<i>T0 + dt (j)</i>	<i>Date de prise de vue</i>	<i>Appareil photo</i>	<i>Vignette</i>
0	0	2 février 2009	Canon 350D + 20 mm	
37	37	11 mars 2009	Pentax *ist DS + 18- 55 mm	
42	79	22 avril 2009	Pentax *ist DS + 18- 55 mm	
82	161	13 juillet 2009	Pentax K200D + 21 mm	
31	192	13 août 2009	Pentax K200D + 21 mm	
70	262	22 octobre 2009	Pentax K200D + 21 mm	

<i>dt</i>	<i>T0 + dt (j)</i>	<i>Date de prise de vue</i>	<i>Appareil photo</i>	<i>Vignette</i>
40	302	1 décembre 2009	Pentax K200D + 21 mm	
29	331	30 décembre 2009	Pentax K200D + 21 mm	
42	373	10 février 2010	Pentax K200D + 21 mm	
31	404	13 mars 2010	Pentax K200D + 21 mm	
40	444	22 avril 2010	Pentax K200D + 21 mm	

Tableau 9 : Synthèse des photos du talus de Pamatai Huaiti centrée sur la zone à scories.

dt : intervalle de temps (en jours) entre prises de vue consécutives,

T0+dt : temps écoulé en jours depuis le début du suivi.

5.2.3. Protocole de prise de vue

Le protocole standardisé préconise de prendre toutes les photos en mode paysage (c'est-à-dire que l'appareil est tenu horizontalement) pour maximiser l'extension latérale de la zone de talus photographiée. Le moment de la prise de vue est important

car si le soleil brille directement sur le talus, il est très difficile de comparer la photo avec les périodes antérieures ou postérieures (voir par exemple en juillet 2009, Tableau 9). On a donc préféré prendre les photos au petit matin, juste avant le levé du soleil. Enfin, l'acquisition systématique des photos avec un Pentax K200D équipé d'un objectif à focale fixe de 21 mm améliore l'exploitation quantitative de ces photos. L'usage de différents appareils photos pour une comparaison stéréophotogrammétrique quantitative est susceptible d'induire des erreurs géométriques non uniformes liées au capteur.

Cette approche ciblée a conduit à proposer des améliorations au protocole de suivi et de le stabiliser des août 2009 pour une acquisition systématique. À partir d'août, les prises de vues deviennent donc normalisées et optimales. **La chronique des photos qui permettent une comparaison quantitative des photos s'échelonne donc d'août 2009 à avril 2010.**

5.3. SÉLECTION DES COUPLES PHOTOGRAPHIQUES PERTINENTS

La première étape consiste à examiner les changements détectables à l'œil nu, entre les photos de la base de données. Cette analyse qualitative a pour objectif de sélectionner le couple de photographie le plus pertinent pour caler un protocole de traitement qui permettent de suivre et mesurer les processus de dégradations de talus et connaître les possibilités et les limites de l'exercice. Ceci permettra d'identifier dans un second temps, les perspectives techniques envisageables.

5.3.1. Sélection des périodes érosives significatives, appuyées par les données pluviométriques

L'examen qualitatif des photos révèle que le départ de matériau le plus massif a eu lieu sur la zone scoriacée, en tête de talus, sous la forme de ravinement entre août et octobre 2009 (Figure 40). Le second événement volumineux a eu lieu, dans les poches de scories, entre janvier et février 2010 (Figure 41). Les périodes intermédiaires ou postérieures ne connaissent que des changements marginaux.

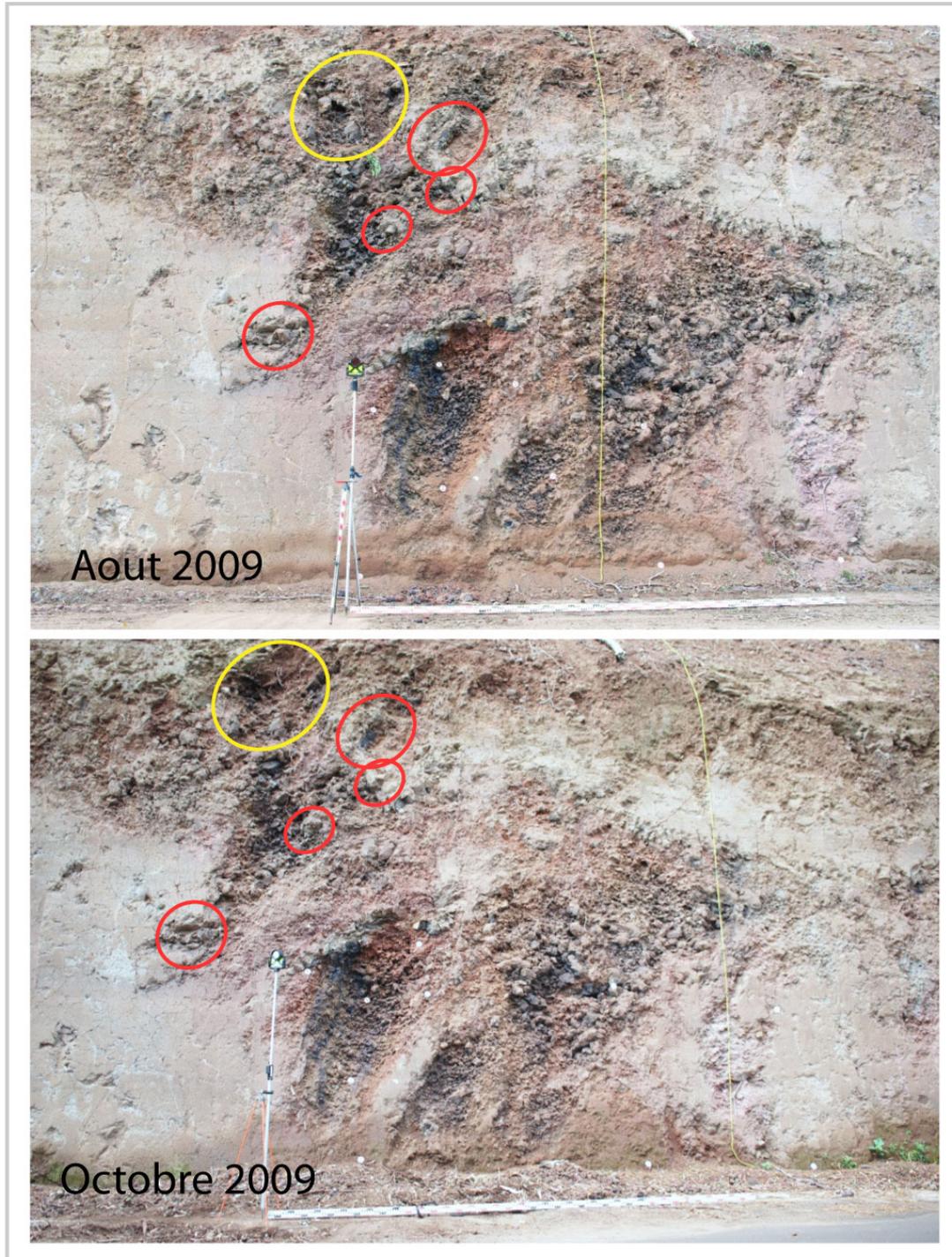


Figure 40 : Comparaison qualitative entre le 13 août et le 22 octobre 2009.
L'ellipse jaune surligne une zone de départ de matériau en tête de talus qui initie la formation d'une ravine.
Les ellipses rouge surlignent des départs de petits blocs.



Figure 41 : Comparaison qualitative entre le 30 décembre 2009 et le 11 février 2010, c'est-à-dire les mesures encadrant le passage du cyclone Oli sur la Polynésie.
L'ellipse jaune surligne une zone de départ de matériau dans les poches de scories.
Les ellipses rouges surlignent des départs de petits blocs.

L'interprétation qualitative des photos permet de mettre en évidence des époques d'érosion plus fortes que d'autres. Pour tenter de comprendre la date des périodes les plus érosives, l'influence de la pluviométrie a été analysée.

La période de suivi photographique encadre la saison des pluies qui connaît, à Tahiti, son maximum entre janvier et mars 2010. Il faut noter que sur la période d'observation, le cyclone Oli est passé à proximité de Tahiti début février 2010.

Les données pluviométriques journalières ont été obtenue à la station MétéoFrance de Faa'a, située à 200 m du talus de Pamatai Huaiti, dans le jardin du laboratoire de Géophysique (Figure 42).

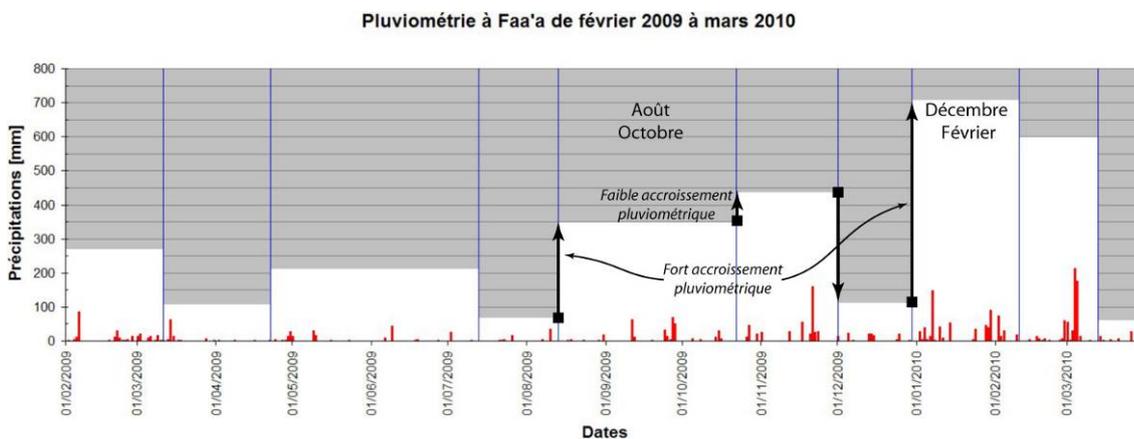


Figure 42 : Pluviométrie à la station MétéoFrance de Faa'a, entre le 1^{er} février 2009 et le 31 mars 2010.

La station est située à 200 m du talus. Les barres rouges indiquent les pluies journalières, les barres bleues, la pluie cumulée dans l'intervalle de prise de vue. Les barres bleues figurent les dates de prise de vue. Le cyclone Oli a touché la Polynésie autour du 1^{er} février 2010, mais celui-ci n'est pas visible par un pic de pluviométrie journalière.

La corrélation entre les quantités de précipitation et l'érosion du talus est assez difficile à établir. Pour la période août/octobre où l'érosion la plus massive a eu lieu en tête de talus, il est tombé 346 mm de pluie. Il ne s'est passé ensuite qu'une petite chute de bloc entre le 22 octobre et le premier décembre, alors qu'il a plu 436 mm soit 25 % de précipitation en plus, et que le pic de pluie sur cette période est deux fois plus intense.

Sur la seconde période d'activité d'érosion, en janvier/février, il a plu 706 mm, avec un pic de pluie équivalent à décembre 2009 (mais non lié au cyclone Oli). Le volume de scories érodé est également relativement important, sans qu'on puisse le quantifier.

Manifestement la seule quantité de précipitation n'est pas suffisante pour expliquer les quantités de matériau érodé. Or en géomorphologie, il existe le concept de système géomorphologique à détachement limité, c'est-à-dire un système dont l'érosion est contrôlée par la quantité de matériau disponible à l'érosion et non par la quantité d'eau qui coule dessus. Si on admet qu'un talus se comporte comme cela, il apparaît que les périodes d'août/octobre et janvier/février suivent toutes deux des époques plus sèches. Pour août à octobre, l'époque précédente n'a vu que 68 mm de pluie (Figure 42), soit seulement 20 % des précipitations qui ont suivi et qui ont déclenché l'érosion en tête

de talus. La période janvier/février est également précédée d'un mois à faible pluviosité (110 mm soit 15 %).

À l'inverse, il se produit très peu d'évènements sur la période octobre/décembre et février/mars qui ont un niveau de précipitation proche de celui de la période qui les précède (Figure 42). Donc on peut supposer que tout le matériau qui devait être érodé était déjà tombé.

Le lien entre érosion et quantité de précipitation ou intensité de ces précipitations n'est pas évident. Il semblerait que ce ne soit pas la quantité de précipitation ni l'intensité des pics de pluie qui expliquent l'érosion, mais plutôt l'existence d'une période relativement sèche suivie d'une période plus humide. La période sèche préparerait le détachement de matériau et les premières pluies enlèveraient ce matériau. La survenance de pluie n'induirait plus guère de changement par la suite.

Étant donnée la concentration des événements sur des époques d'érosion relativement plus fortes que d'autres, probablement en relation avec la succession d'événements de sécheresse et de pluie, **il est dans un premier temps proposé de se concentrer sur les couples de photos où les différences sont les plus marquées : août 2009 / avril 2010**, ce qui permettra de tester ensuite la pertinence d'analyser les prises de vues intermédiaires...

5.3.2. Sélection d'une portion de talus représentative, centrée sur la zone scoriacée

Entre août 2009 et avril 2010, l'examen qualitatif des photos révèle finalement que la dégradation du talus est localisée sur la zone scoriacée. *A contrario*, le reste du talus ne révèle aucun signe de dégradation particulier ; l'ensemble semble se comporter d'une manière homogène, sans dégradation observable à l'œil nu. L'hétérogénéité scoriacée est une particularité dans le processus de dégradation de ce talus, qu'il reste donc important d'étudier.

Ainsi, afin de caler la méthode de traitement numérique, nous avons défini une zone d'étude, ciblée sur la zone scoriacée, intégrant également des faciès de mamu III – IV, et de lave saine et altérée en boules. Cette zone est représentative des lithologies rencontrées sur l'ensemble du talus (Figure 43). Ses dimensions sont d'environ 10 m de large par 5 m de haut et imagent la partie du talus taillée avec un gradient d'environ 5/2.

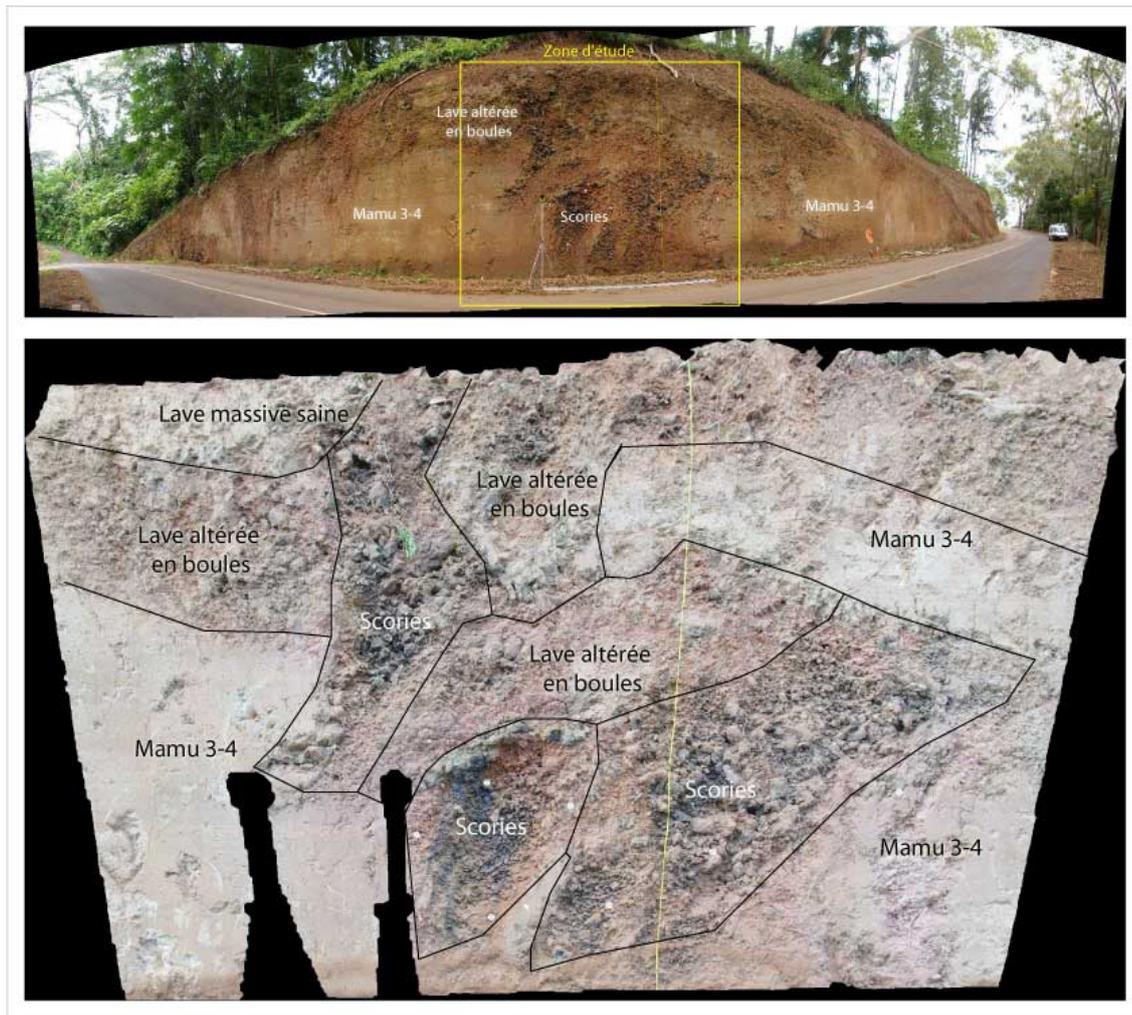


Figure 43 : Situation et croquis lithologique de la zone étudiée en détail sur le talus de Pamatai.

5.4. COMPARAISON DES MNS

5.4.1. Reconstruction des MNS

Deux nuages de points ont été extraits avec Photomodeler Scanner pour les campagnes photographiques d'août 2009 et avril 2010 (Figure 44) au départ de 3 photos chacune. Le pas d'extraction des nuages de points est de 25 mm. Les nuages ont ensuite été importés sous ArcGIS et transformés en Modèles Numériques de Surface raster via un interpolateur du plus proche voisin naturel. Cet algorithme permet de pondérer la valeur interpolée par une fonction du voisinage.

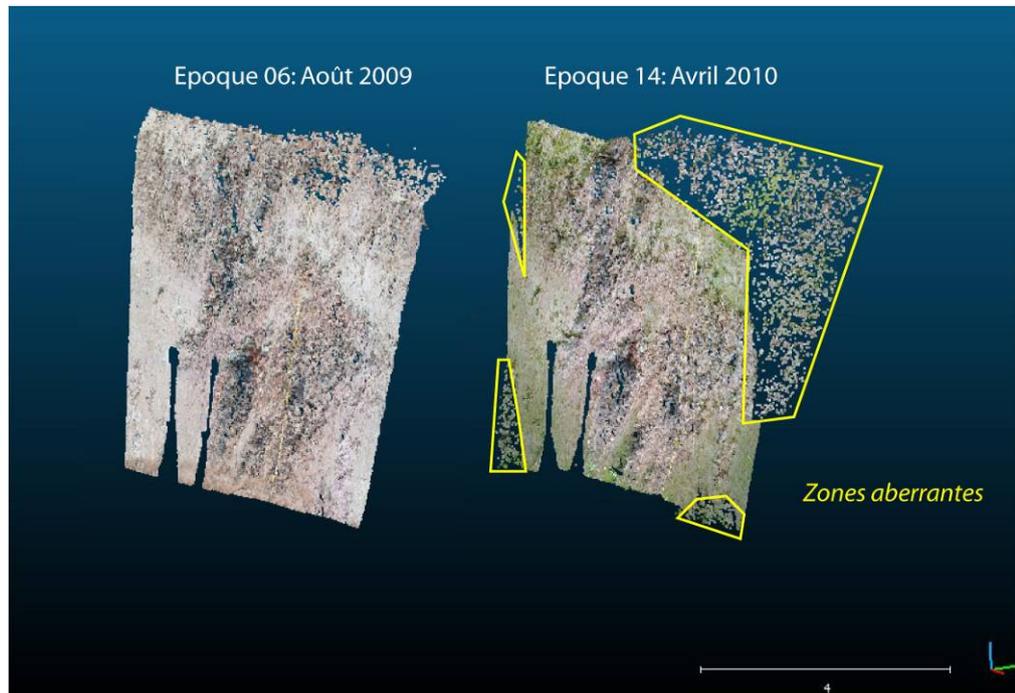


Figure 44 : Représentation 3D et comparaison visuelle des MNS du talus en août 2009 et avril 2010.

Des zones aberrantes apparaissent (entourées en jaune) sur le MNS d'avril 2010. Elles ont été exclues de l'analyse.

5.4.2. Des différences brutes à la carte d'érosion

L'érosion se détecte en calculant la différence entre les MNS de deux époques distinctes. Sur la Figure 45, on voit nettement ressortir les zones affectées par un départ de matériaux.

Pour caractériser l'érosion d'un point de vue quantitatif, on traite les différences de MNS comme suit :

- exclusion des zones à différences aberrantes ;
- identification et correction de biais éventuels ;
- caractérisation du seuil de détection ;
- quantification de l'érosion.

Les différences de MNS (Figure 45) font ressortir plusieurs points : d'abord, des valeurs très négatives apparaissent dans les coins supérieurs, et très positives dans les coins inférieurs. Ce sont des artefacts de mesures liés à des erreurs de corrélation venant de Photomodeler. On peut en juger en visualisant les nuages de point simultanément (Figure 44). Ces zones ont été exclues de la comparaison.

Epoques 14 - 06

Différences topographiques

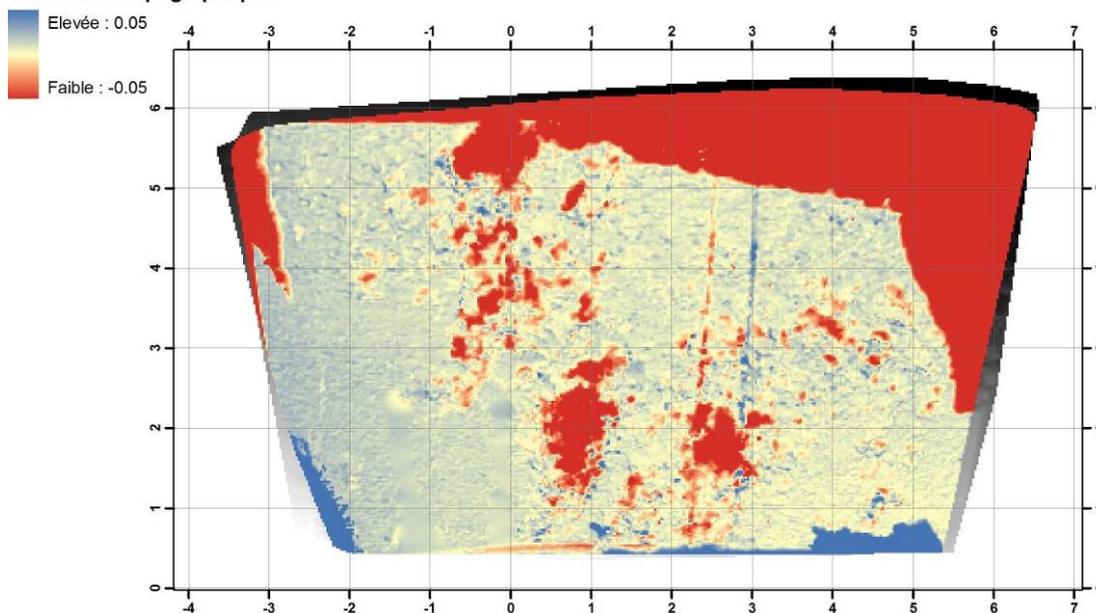


Figure 45 : Différences topographiques brutes entre août 2009 (époque 06) et avril 2010 (époque 14).

On remarque nettement l'érosion de tâches localisées dans les zones à scories. On remarque également une dérive des différences (globalement bleutées à gauche, et jaune neutre vers la droite). Ceci dénote d'un effet résiduel de calage entre les deux modèles numériques de surface. Ce biais est assez faible, d'une ampleur de 2 cm environ. Le carroyage est étiqueté en mètres.

Traitement des erreurs de co-registation

L'analyse des différences entre deux MNS met en évidence des erreurs de co-registation (Figure 45). Elles se manifestent par une teinte différente de celle attribuée aux différences nulles. Ici, on voit que la grille de différence possède une légère teinte bleue vers la gauche de l'image (Figure 45). Le MNS d'avril 2010 est légèrement en avant de celui d'août 2009. Il s'agit de corriger ce biais avant de calculer l'érosion du talus. Pour ce faire on extrait un échantillon de 1 500 points aléatoirement distribués dans une zone qui n'a pas été affectée par de l'érosion. On vérifie cette assertion en détail grâce aux orthophotos qui ne montrent pas d'érosion dans ces secteurs (Figure 46). On prend en compte un très grand nombre de points pour éviter tout effet d'échantillonnage malencontreux.

Les valeurs de différence mesurées au droit des points échantillonnés sont représentées sous forme de distribution (histogrammes et distributions cumulées, Figure 47).

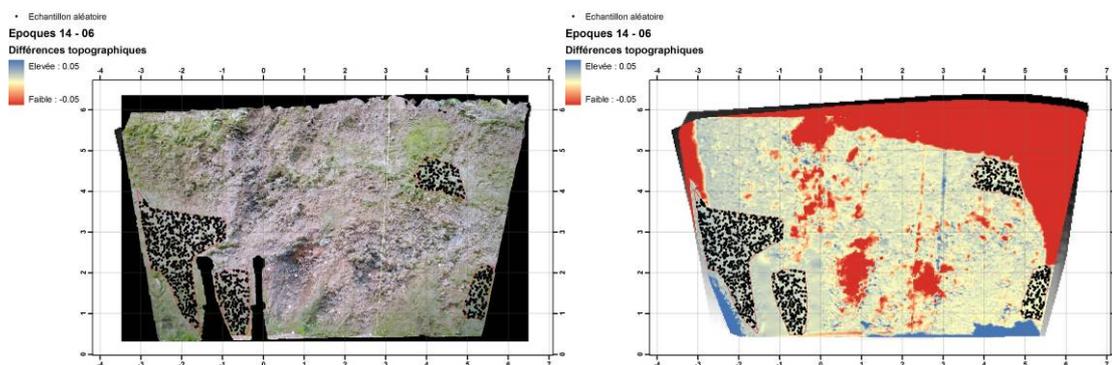


Figure 46 : Distribution aléatoire de 1500 points (points noirs) dans des zones sans érosion. Cette absence d'érosion a été vérifiée en comparant visuellement les ortho-photos (à gauche) et en validant le choix sur les différences de MNS (à droite). Le carroyage est étiqueté en mètres.

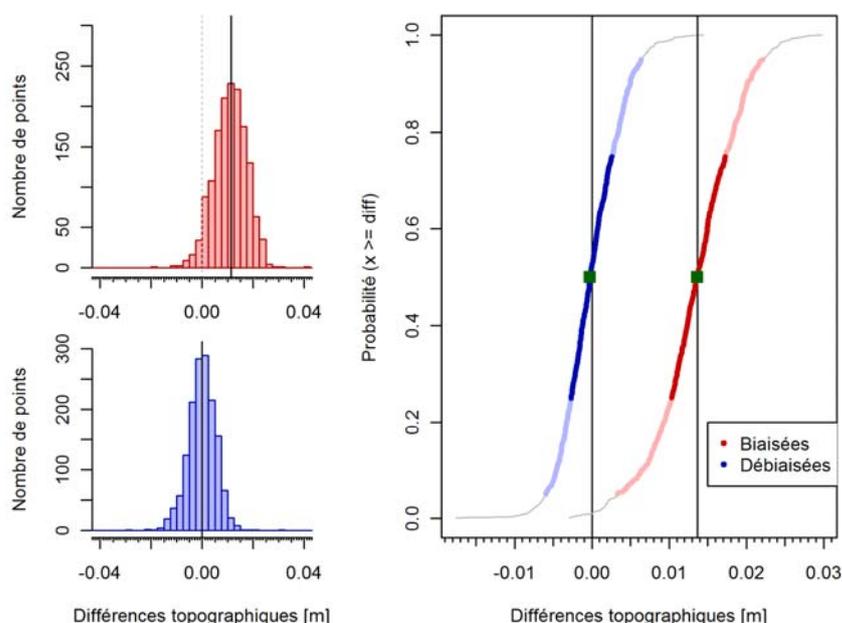


Figure 47 : Distribution des différences topographiques échantillonnées aléatoirement dans les domaines sans érosion (voir Figure 46).

En rouge, différences topographiques brutes. En bleu, différence topographiques corrigées en soustrayant un plan de tendance. Les caractéristiques des distributions sont figurées : couleurs claires (rose ou bleue) = données comprises en 5 % et 95 % de l'échantillon ; couleurs sombres (rouge ou bleue) = écart interquartile. La suppression d'une surface de tendance recentre la distribution sur 0 (1 sigma = 3.9 mm), avec 50 % des données comprises entre - 2,7 mm et + 2,6 mm et 95 % des données comprises entre - 5,9 mm et + 6,4 mm.

Il apparaît (Figure 47) que les différences au droit des 1 500 points de l'échantillon sont biaisées. Au lieu d'avoir une valeur médiane proche de 0 mm, la médiane de l'échantillon est de + 11,3 mm. On voit également sur la Figure 45 qu'il existe une légère tendance avec des différences de plus en plus positives vers la gauche (couleur bleutée, Figure 45). Le modèle spatial le plus simple pour corriger ce biais est l'ajustement d'un plan à travers les différences topographiques échantillonnées. La distribution des résidus par rapport à ce plan montre que la correction est efficace et recentre bien la distribution de différences corrigées (Figure 47).

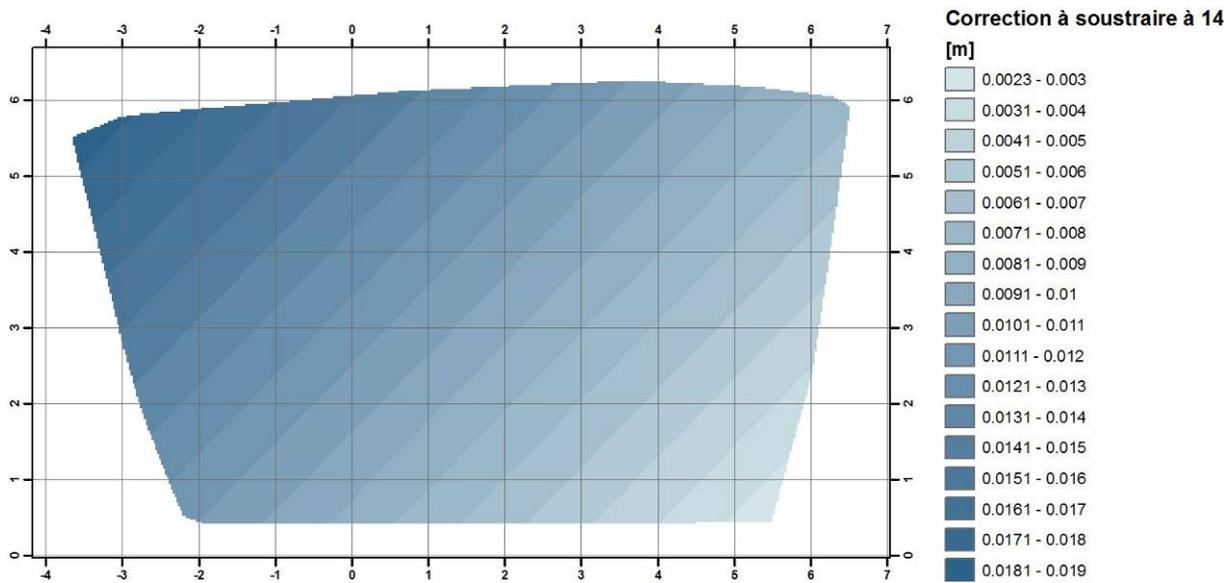


Figure 48 : Carte de correction à appliquer au MNS d'avril 2010 pour retirer le biais de calage avec le MNS d'août 2009.

L'équation du plan de correction vaut $C = -0,001158 * X + 0,001124 * Y + 0,008369$. On doit retirer cette valeur au MNS brut pour obtenir une grille de différence non biaisée. Le carroyage est étiqueté en mètres.

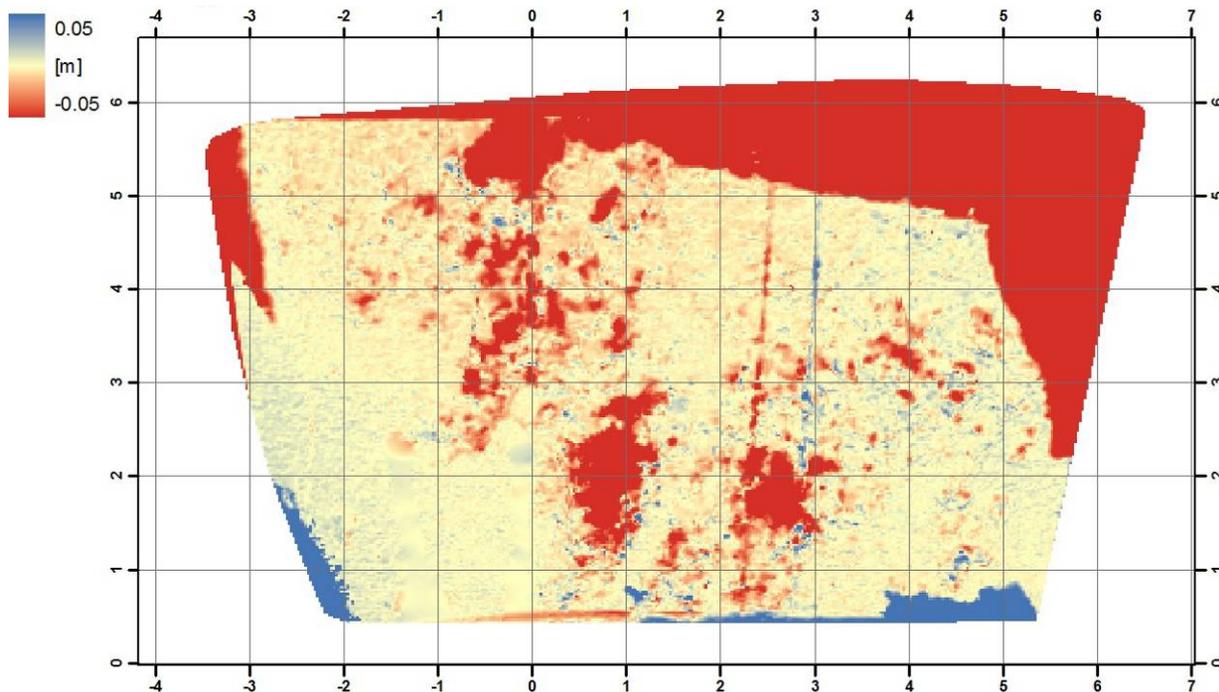


Figure 49 : Différences topographiques corrigées entre les MNS d'avril 2010 et août 2009.

Les zones sans différence significatives sont maintenant jaunes et non plus teintées en bleu comme sur la Figure 45, notamment dans le coin inférieur droit. Le carroyage est étiqueté en mètres.

Les différences topographiques brutes sont donc corrigées grâce à un plan de tendance montré en Figure 48. La grille de différence corrigée (Figure 49) est correcte

dans la mesure où les zones qui n'ont pas été affectées par de l'érosion ont maintenant des valeurs de différence nulle (Figure 47 et Figure 49).

Caractérisation du seuil de détection

Une fois corrigées des biais, les différences doivent encore être seuillées pour identifier les zones où l'érosion s'est produite effectivement. Pour ça, il faut déterminer le seuil de détection, soit la valeur à partir de laquelle les différences topographiques calculées sont significativement plus grandes que le bruit de mesure.

On utilise à nouveau la distribution statistique du bruit de mesure donnée par les 1 500 points échantillonnés plus haut (Figure 47). Puisque la distribution du bruit de mesure est quasi-normale (Figure 47), on utilise les propriétés de la distribution normale pour prédire à partir de quelle valeur la différence devient trop grande pour être toujours du bruit.

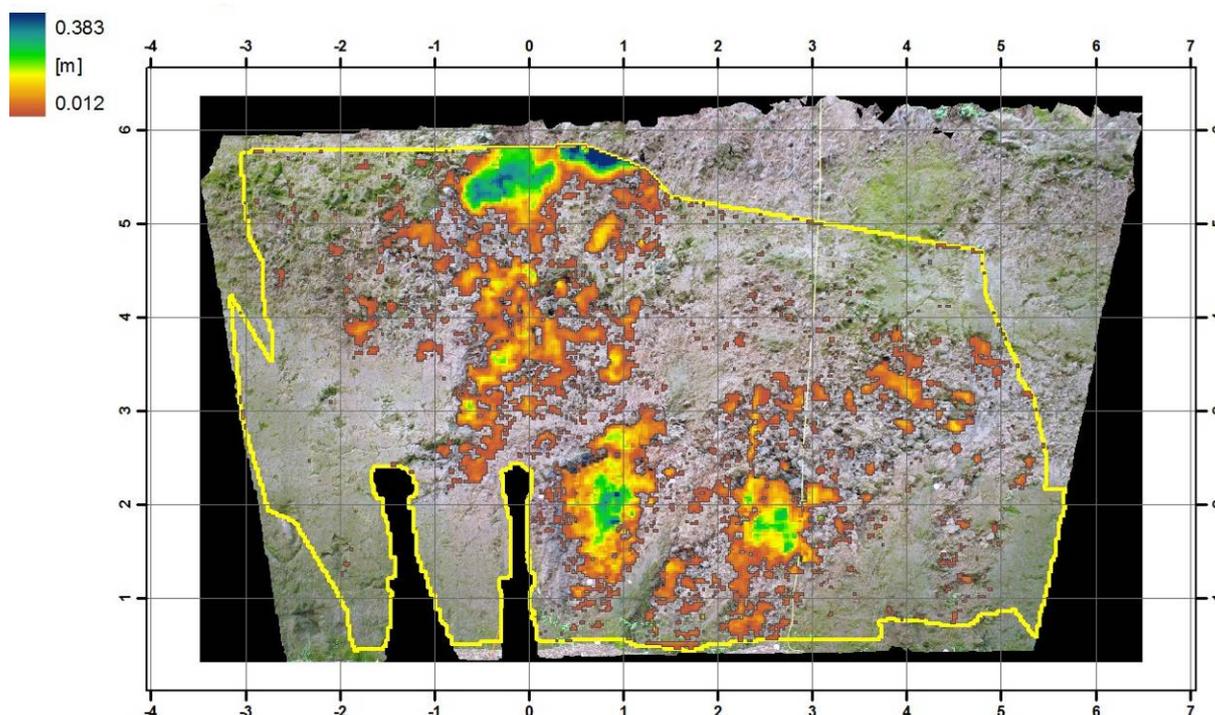


Figure 50 : Carte des épaisseurs érodées sur le talus de Pamatai entre le 13 août 2009 et le 22 avril 2010 (soit 252 jours).

La zone d'analyses est délimitée en jaune et mesure 37,42 m². Les zones érodées ont une épaisseur allant de 12 mm à 38 cm. Elles totalisent un volume de 0,399 m³ pour une surface érodée de 7,998 m² (21 % de la surface analysée). Le taux d'érosion moyen sur la zone érodée est de 72,3 mm/an ; par contre si on rapporte le volume érodé à la surface totale de la zone étudié (contour jaune), on obtient un taux de recul moyen de 15,2 mm/an.

Le bruit de mesure correspond à une distribution normale de moyenne égale à 0 et d'écart-type valant 3,9 mm. Sur un secteur non érodé, la valeur de différence qui n'a qu'une chance sur 1 000 de se produire par hasard vaut - 12,1 mm. Donc si on observe une différence topographique égale ou inférieure à - 12,1 mm, ce n'est

probablement pas du bruit. **On considère donc que le seuil de détection des profondeurs érodées sur la différence avril-août est de 12,1 mm.**

En masquant sur la grille de différence corrigée les valeurs supérieures à -12,1 mm, on isole les zones où l'érosion est significative (Figure 50).

5.4.3. Quantification de l'érosion et analyse des résultats

La différence de MNS représentée en Figure 50, représente l'érosion du talus sur 252 jours.

La zone d'étude a une surface de 37,423 m²; la surface érodée est de 7,998 m² et le volume érodé est de 0,399 m³. Pour mettre ces quantités en perspective, on peut les rapporter de différentes manières. La surface érodée représente 21 % de la surface totale de l'affleurement, ce qui montre qu'elle est focalisée sur quelques zones. Le retrait moyen sur les zones érodées pendant la période d'observation est de 49,9 mm (c'est-à-dire 0,399 m³ / 7,998m²). Le taux annuel d'érosion est de 72,3 mm/an (c'est-à-dire 0,399 m³ / 7,998m² x 365 j / 252 j), si on ne le mesure que sur les zones érodées. Si par contre, on considère le talus dans son ensemble, qui est la manière d'aborder les talus en 2D, on cherchera à rapporter le taux d'érosion mesuré à l'ensemble de la surface du talus, ce qui donne un taux moyen annuel d'érosion de 15,2 mm/an (0,399m³ / 37,423 m² x 365 j / 252 j).

L'érosion se produit sur un ensemble de 671 polygones distincts dont 165 se situent totalement ou partiellement sur les poches scoriacées (Figure 51). Ces 165 polygones d'érosion comptent pour 0,356 m³, soit 89 % du volume total érodé et pour 84 % (6,216 m²) de la surface totale érodée. On peut donc conclure que le signal d'érosion mesuré sur 252 jours est massivement dominé par le matériau le moins cohésif. Le taux d'érosion annuel propre aux scories est de 83 mm/an.

Les dimensions des zones d'érosion couvrent deux ordres de grandeur d'épaisseur maximale (de 10⁻² à 10⁰ m), un peu plus de trois ordres de grandeur en surface (de 10⁻³ à 10⁰ m²) et quatre ordres de grandeurs en volume (de 10⁻⁵ à 10⁻¹ m³) (Figure 52). Les événements les plus fréquents sont les plus petits objets. Il n'existe pas de taille optimale d'objet.

Pour ce qui concerne les contributions à l'érosion, les quatre plus gros objets ont une épaisseur supérieure à 10 cm, une aire proche de 1 m² et un volume de l'ordre de 100 litres (Figure 53).

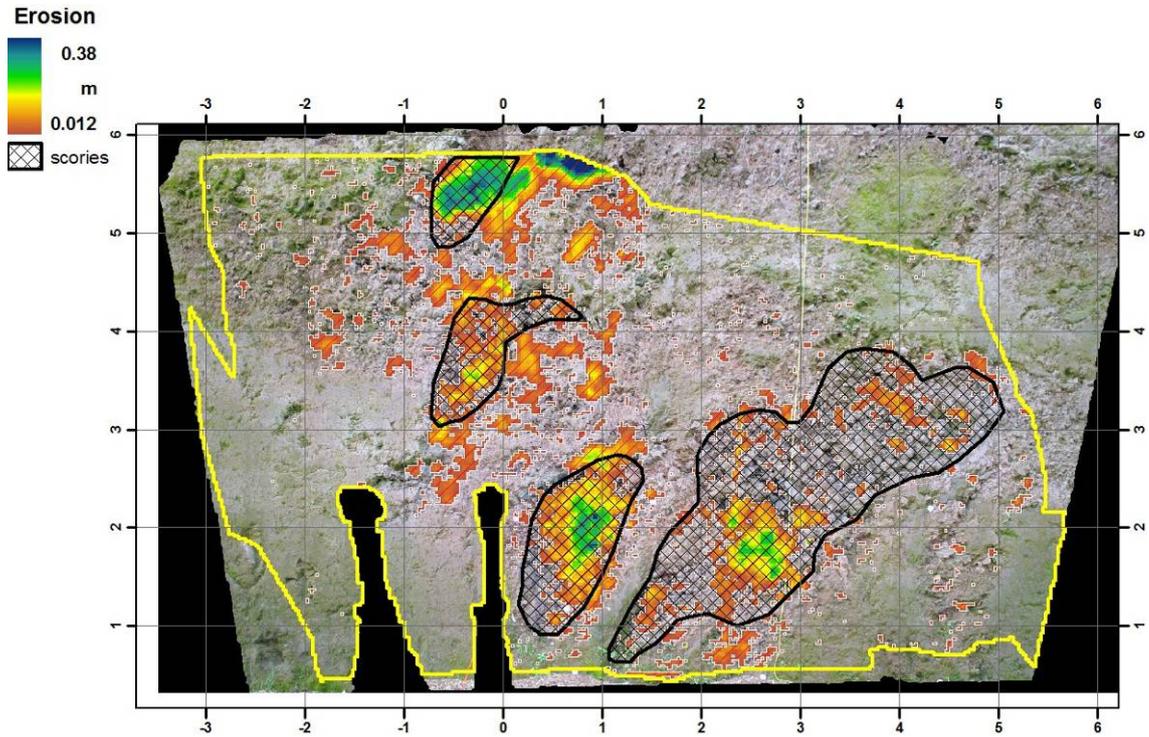


Figure 51 : Carte d'érosion et de lithologie.

La lithologie a été levée sur orthophoto d'avril 2010 indépendamment des mesures d'érosion. L'érosion associée aux poches de scories compte pour 0,356 m³, soit 89 % du volume érodé.

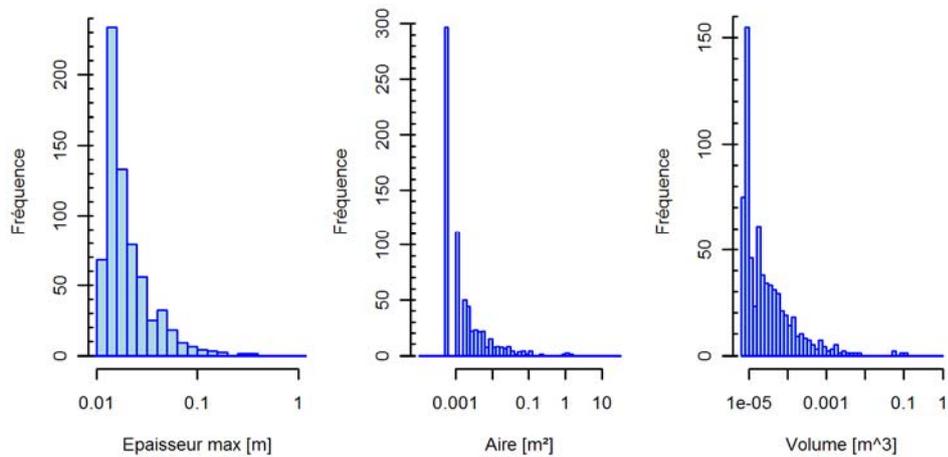


Figure 52 : Histogrammes des épaisseurs maximales, aires et volumes des zones érodées entre août 2009 et avril 2010.

La classe la plus représentée est celle des petits évènements.
L'abscisse logarithmique montre que la croissance des dimensions n'est pas du tout linéaire.

Enfin, la poche d'érosion la plus profonde se trouve en tête de versant dans un début de talweg creusé dans les scories. La faible cohésion des scories combinée au ruissellement des eaux de surface va probablement entraîner le creusement d'un

talweg. On peut également supposer que le départ des scories à proximité de cette ravine en formation va affaiblir les zones en surplomb et s'accélérer avec le temps.

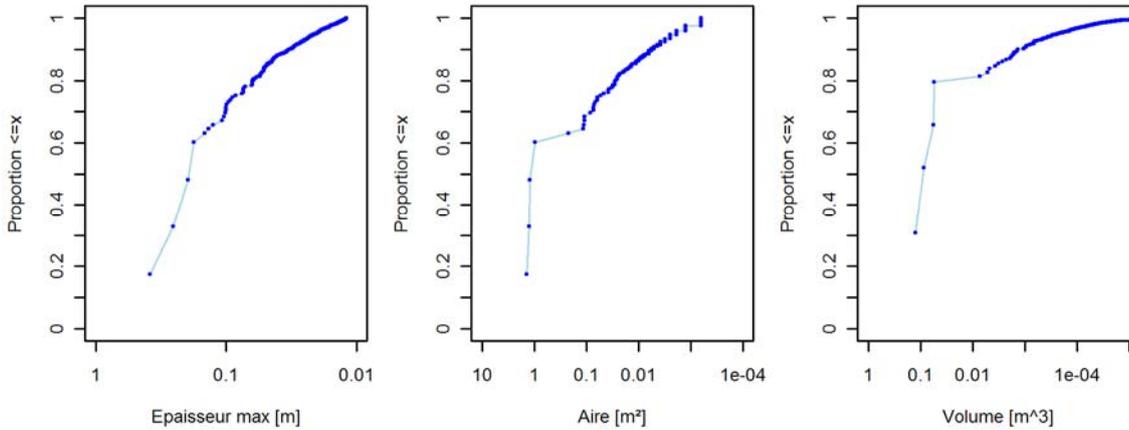


Figure 53 : Distribution cumulées inverses des épaisseurs, aires et volumes.
Ces graphes représentent la sensibilité des mesures par rapport au phénomène d'érosion.

5.5. COMPARAISON DES ORTHOPHOTOGRAPHIES

Suite à l'extraction des modèles numériques de surface, on a produit des orthophotos de l'affleurement aux deux époques correspondantes. Des orthophotos sont des photos qui sont métriquement correctes, c'est-à-dire corrigée de la déformation de l'objectif et du changement local de l'échelle induit par un axe de visée oblique à la surface et par le relief de l'objet photographié. Les orthophotos sont superposables au pixel près ce qui est utile pour appliquer des traitements numériques automatisés. Avant de se lancer dans le traitement numérique des photos (cf. § 5.5.2.), on a procédé à une rapide description visuelle (cf. 5.5.1.).

5.5.1. Interprétation visuelle

Le premier élément qui apparaît en comparant les deux orthophotos (Figure 54), c'est le changement de couleur du talus entre les deux époques. Des mousses ont colonisé la paroi entre août 2009 et avril 2010. Elles sont principalement localisées sur les secteurs de mamu III – IV très lisses. L'absence de mousse sur certaines zones de l'ortho d'avril 2010 peut donc soit traduire l'érodibilité de ces zones (la mousse n'a pas eu le temps de se développer) ou simplement refléter un substrat peu propice à cette espèce végétale. Ainsi, la présence de mousse sur la paroi du talus a donc un rôle contradictoire dans le suivi de la dégradation des talus :

- son absence permet de souligner les départs de matériaux, ce qui facilite l'analyse visuelle des données ;
- sa présence entraîne une variation de luminosité qui perturbe le traitement numérique, comme on le détaillera dans le § 5.5.2.

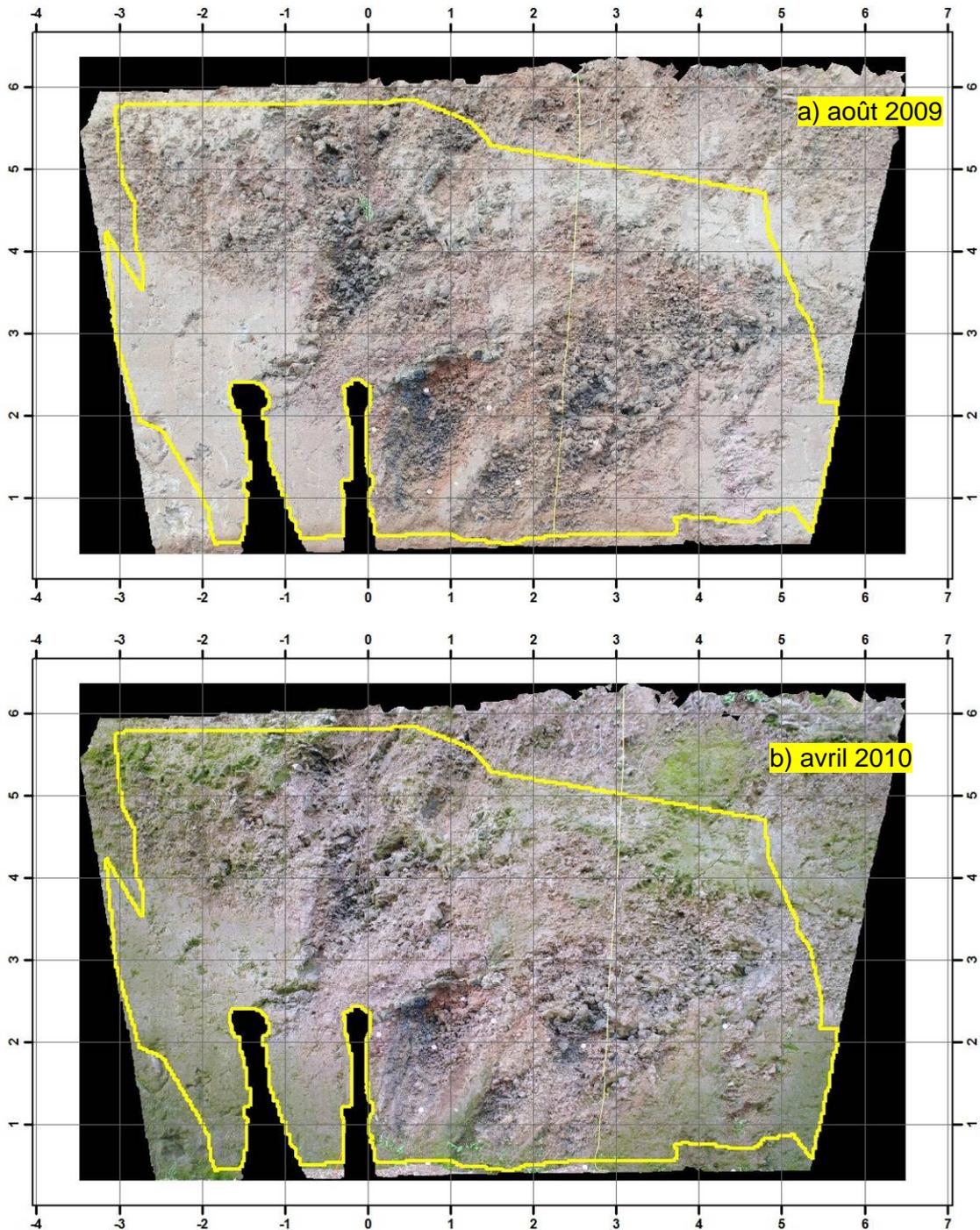


Figure 54 : Orthophoto du talus en août 2009 (a) avril 2010 (b).

Le trait jaune délimite la zone d'intérêt utilisée pour la comparaison des MNS.

Les graduations des figures sont exprimées en mètres à partir du clou de topographe situé sous la cane.

L'examen détaillé des orthophotos d'une résolution de 5 x 5 mm révèle différentes caractéristiques (Figure 55, Figure 56, Figure 57).

En tête de versant, le départ de blocs massifs (Figure 55), le plus épais ayant une épaisseur de 38 cm, montre l'initiation d'une ravine. On voit également le départ de blocs prédécoupés par des joints (entre les coordonnées $x = 0,5$ m et 1 m ; $y = 4,5$ m et 5 m).

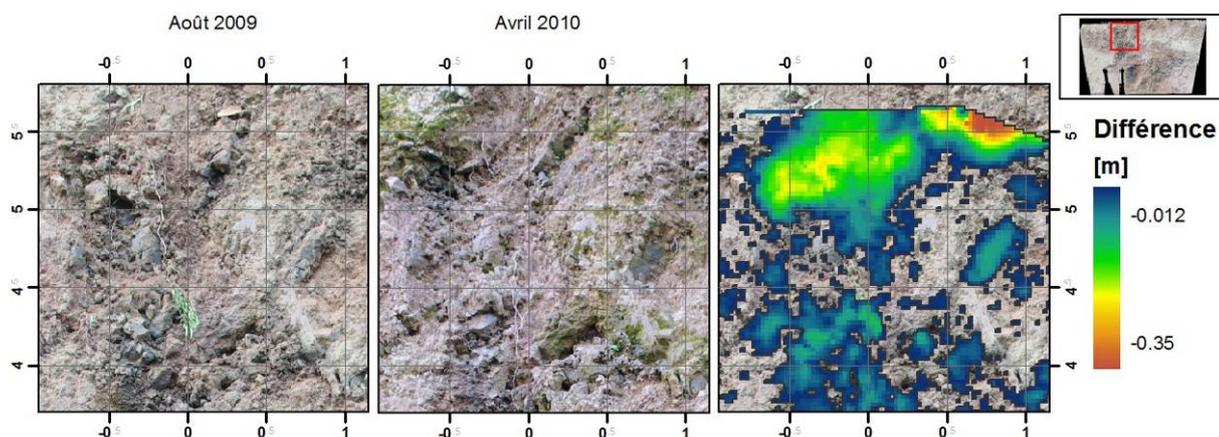


Figure 55 : Départ de matériaux en tête de talus.

Le départ de matériaux le plus marqué a créé un début de thalweg. Sur le troisième volet, les différences de MNS (cf. chapitre 5.4) traduisent la quantité d'érosion pour comparaison (voir plus loin). Les coordonnées sont exprimées en mètres à partir du clou de topographe situé sous la cane.

En bas de versant, une poche de scorie se vide progressivement de son matériau (Figure 56). Les orthophotos sont de peu d'utilité dans ce cas puisque l'ensemble de la poche de scorie a changé de morphologie.

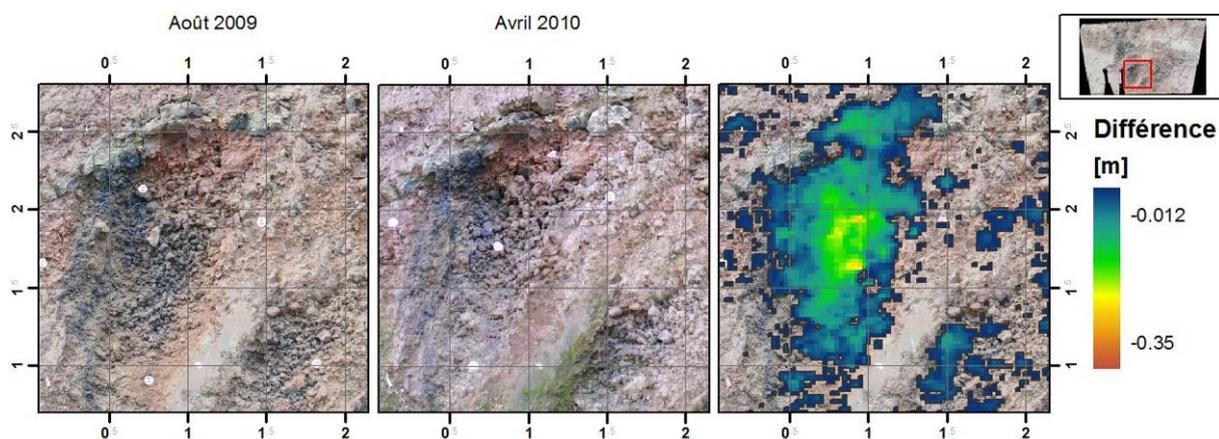


Figure 56 : Départ de matériaux dans une poche de scorie.

Sur la troisième image, les différences de MNS (cf. chapitre 5.4) traduisent la quantité d'érosion. Les coordonnées des vignettes sont indiquées en mètre et se rapportent au système de référence local du talus.

Enfin, de manière beaucoup plus subtile, les zones lisses de mamu III-IV sont également affectées par l'exposition à l'air libre (Figure 57). La présence de mousse dans les anfractuosités souligne la présence d'un réseau de fissures. **Ces fissures ont été élargies après la saison humide (avril 2010) alors qu'elles étaient difficilement décelables en août 2009. Ce genre d'érosion n'impliquant que**

quelques grains de faible épaisseur est indétectable par différence de MNS (Figure 57) et ne devient que grâce à la comparaison d'orthophotos à haute résolution. L'accroissement de ces fissures sous l'effet de l'humidité va probablement déboucher sur un départ de matériaux de plus en plus rapide. On assiste ici à l'initiation du processus.

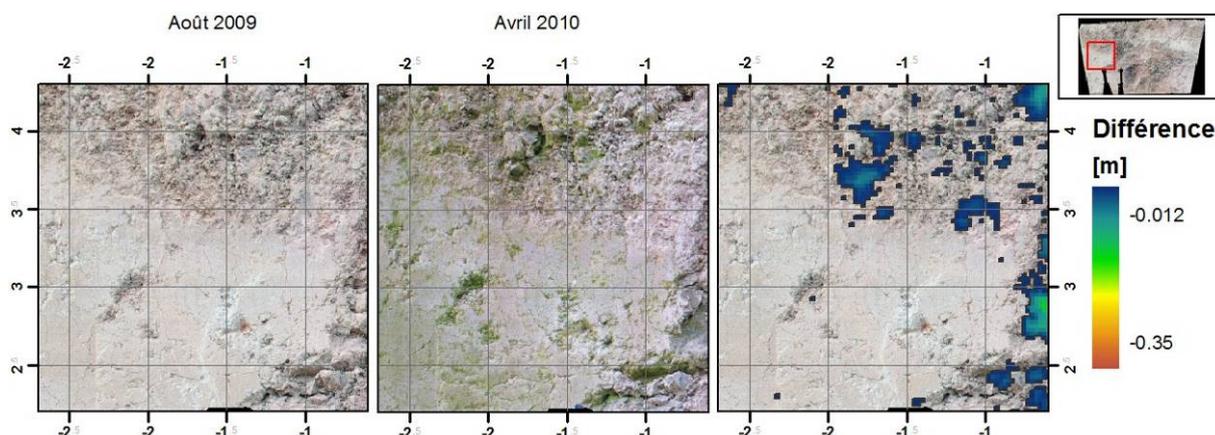


Figure 57 : Réseau de fissures révélé par comparaison visuelle des orthophotos dans les zones où les différences topographiques sont trop subtiles pour se manifester dans les différences de MNS.

Les coordonnées des vignettes sont indiquées en mètre et se rapportent au système de référence local du talus.

5.5.2. Comparaison numérique de la colorimétrie

L'analyse numérique des images peut, dans certaines circonstances, compléter l'analyse visuelle car elle est appliquée avec les mêmes règles de traitement sur l'ensemble de la photo. Elle est donc susceptible de mettre en exergue des endroits qui pourraient avoir échappé à l'analyse visuelle.

L'analyse numérique consiste à détecter les changements colorimétriques entre deux orthophotos. Un changement colorimétrique peut provenir de plusieurs causes :

- exposition différentes de l'image (impact global sur l'image) ;
- changement d'éclairage de la scène (impact global et local causé par le micro-relief de l'objet) ;
- changement de la nature de la scène (par érosion et par tout autre processus).

La détection de l'érosion sur les orthophotos repose sur l'hypothèse que l'érosion se traduit par un changement significatif de couleur à l'endroit érodé et que ce changement peut être isolé des autres causes de changement évoquées ci-dessus. En supposant que ces hypothèses soient vérifiées, on cherchera donc, par seuillage, à délimiter des zones où les différences colorimétriques sont plus importantes que des variations simplement fortuites ou liées à des phénomènes sans intérêt ici.

Comparaison dans l'espace RGB

Une orthophoto est une matrice à trois bandes dont chaque bande enregistre l'intensité de la lumière réfléchiée par un objet dans le rouge, le vert et le bleu. Pour détecter un changement, le traitement le plus simple consiste donc à calculer une différence d'orthophoto, bande de couleur par bande couleur (Figure 59). Les différences de couleur nulles se traduisent par du noir, alors que les différences non nulles sont colorées. Plus les couleurs sont claires, plus les changements colorimétriques sont importants. Les couleurs neutres (du gris foncé au blanc) traduisent un changement intervenant sur les trois composantes colorées ensemble, alors qu'un changement teinté démontre une variation sur une seule des composantes colorées.

À première vue, les changements les plus forts (couleurs claires) sont localisés dans les zones à scories (Figure 59). Les changements les plus graduels (couleurs roses/violettes) se situent dans les zones lisses à mamu (Figure 59).

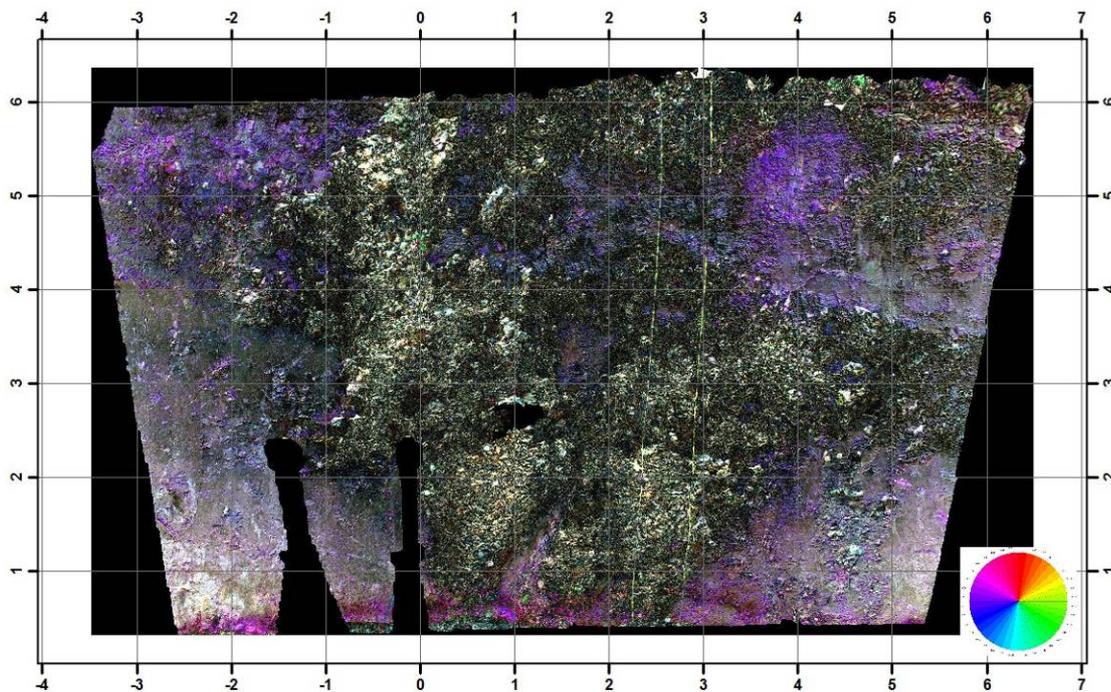


Figure 58 : Différence des couleurs des orthophotos.

(Les écarts ont été étirés pour mieux faire apparaître les structures). Les teintes dans les jaunes/blancs correspondent à des départs de bloc. La couleur de la figure correspond aux couleurs complémentaires des orthophotos (couleur diamétralement opposée sur la roue des couleurs en vignette). Les teintes roses/violettes sont les complémentaires du vert de la mousse.

La dominante colorée de l'image de différence reflète la couleur complémentaire de celle responsable du changement (voir vignette Figure 59). La présence de mousse verte en avril 2010 induit un changement dans la bande verte entre les deux images, ce qui se traduit par une teinte rose/violette dans l'image de différence. On va donc chercher à caractériser les différences liées à l'érosion et exclure les variations colorimétriques liées à la végétation.

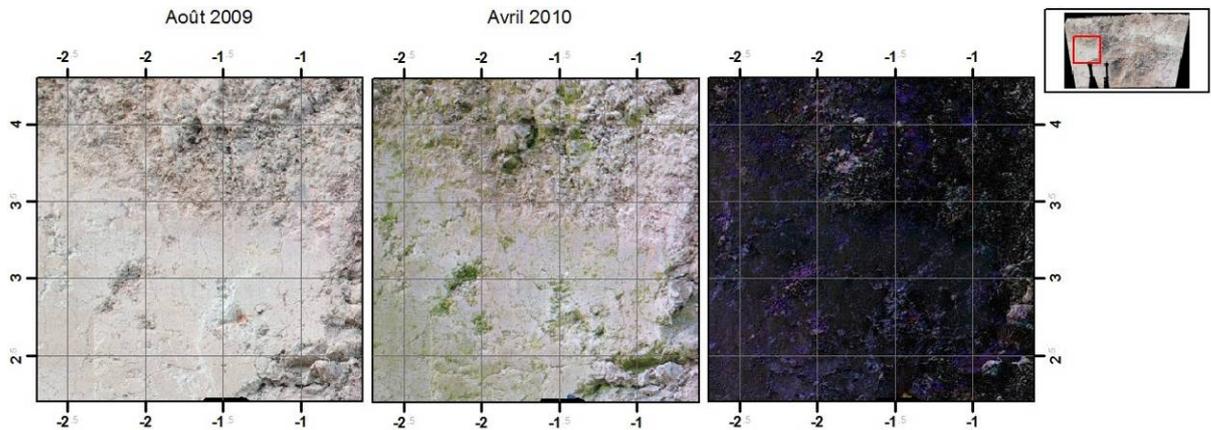


Figure 59 : Vue de détail des différences d'orthophotos (avril 2010 moins août 2009).

Le noir indique les zones sans changement, les teintes plus claires marquent la grandeur du changement. Les changements de teintes vers le magenta traduit la présence de mousse sur l'orthophoto d'avril 2010.

La présence de mousse sur la paroi complique la comparaison parce que la couleur de la paroi change et que le niveau de gris est également transformé. Un profil vertical du talus ne représentant que la bande verte des deux orthophotos (Figure 60) montre que la variation de couleur et de niveau de gris n'est pas uniforme spatialement. Le pied de l'affleurement (hauteur inférieure à 2 m, Figure 60) en avril 2010 est plus sombre (courbe rouge) qu'en août 2009 (courbe bleue). La différence des deux profils (courbe verte) reste généralement sous la barre des 50 unités pour le haut du talus, alors qu'elle se rapproche de 100 unités en pied de talus. Ces différences reflètent uniquement la présence de mousse et non pas une érosion particulière.

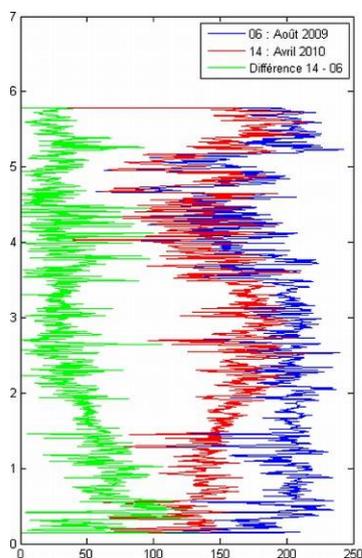


Figure 60 : Profils colorimétriques dans la bande verte des deux orthophotos le long de l'axe rouge sur l'orthophoto d'avril 2010.

Le graphe montre que les différences colorimétriques (dans la bande verte des images RGB) sont parfois substantielles (proches de 100), particulièrement en pied de talus. Ces différences reflètent uniquement la présence de mousse et non pas une érosion particulière.

Les variations de forte amplitude à haute fréquence représentent probablement la signature de pixels érodés, mais l'augmentation progressive du niveau moyen de différence, rend un seuillage impossible à mettre en œuvre.

On a exploré le domaine colorimétrique des deux images pour repérer des différences globales (Figure 61). La Figure 61 montre que l'ortho d'août 2009 est globalement claire avec un maximum de pixel vers le niveau 200 (gris clair) sur les trois bandes. En comparaison, la distribution des pixels d'avril 2010 montre un niveau plus faible, vers 160, et un étalement plus important. La dynamique de couleur est donc plus grande en avril 2010, le niveau est globalement plus sombre et la bande verte est celle qui est la plus pointue. Cette particularité signe la dominante colorée déjà repérée plus haut.

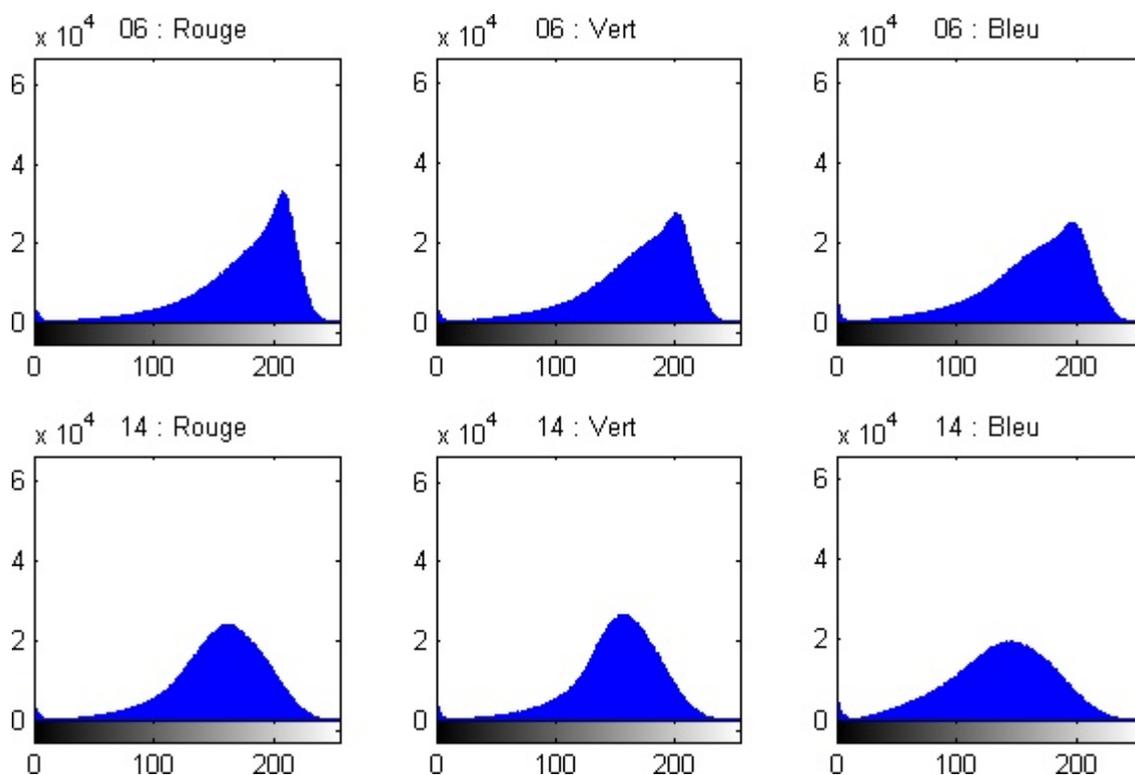


Figure 61 : Histogramme des bandes colorimétriques des deux orthophotos (06 : août 2009 ; 14 : avril 2010).

Les distributions des valeurs sont plus pointues en août 2009, et plus étalées en avril 2010. Le mode est plus clair en août qu'en avril. Ces différences de distribution se traduisent par une différence colorimétrique qui n'est pas significative.

Comparaison dans l'espace HSV

La dominante colorée des différences de couleurs dans l'espace RGB, suggère qu'il vaudrait mieux éviter de travailler dans un espace colorimétrique permettant d'isoler les teintes des autres composantes de la couleur. L'espace colorimétrique HSV (Hue/Saturation/Value) est particulièrement utile à cette fin. Plutôt que de représenter une couleur quelconque par un mélange de composante rouge, verte et bleue, on décrit une couleur en fonction de sa teinte – hue en anglais (Figure 62), de sa

saturation (c'est-à-dire si la couleur est pâle ou clinquante) et de sa valeur (c'est-à-dire si la couleur est sombre ou claire, on parle aussi de niveau de gris). En transformant une image dans l'espace HSV, on isole le niveau de gris de l'image et on se rend indépendant de la teinte.

Le changement de teinte (Figure 62) est manifestement lié à la croissance de la mousse entre les deux époques de mesure. Ce processus n'a pas d'intérêt pour la problématique qui nous occupe, nous éviterons de traiter les variations de teintes plus avant.

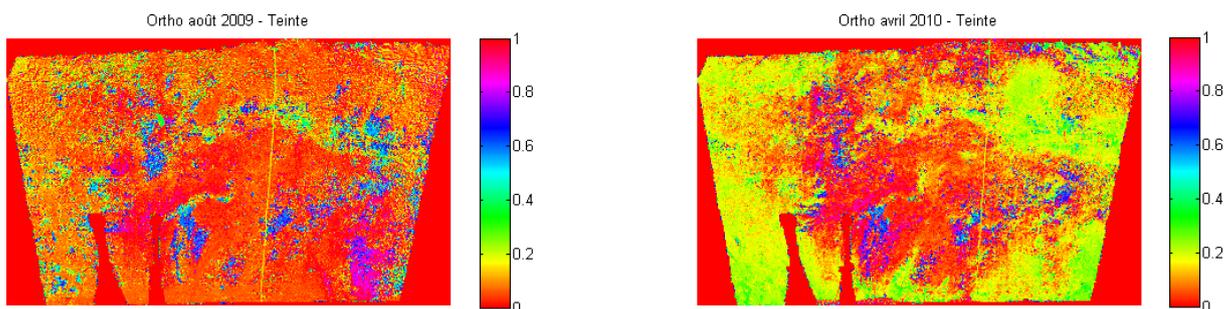


Figure 62 : Composante de teinte (Hue) des orthophotos dans l'espace colorimétrique HSV.
Les couleurs sont criardes puisqu'elles ne sont pas modulées par la composante de saturation (S), ou celle de valeur (V). La différence de teinte entre août 2009 et avril 2010 saute immédiatement aux yeux. La mousse change la teinte du mamu III-IV en teinte vert-jaune.

La saturation des orthophotos (Figure 63) est légèrement différente et sans doute aussi associée à la présence de la mousse. Il est difficile d'utiliser intuitivement cette information de saturation.

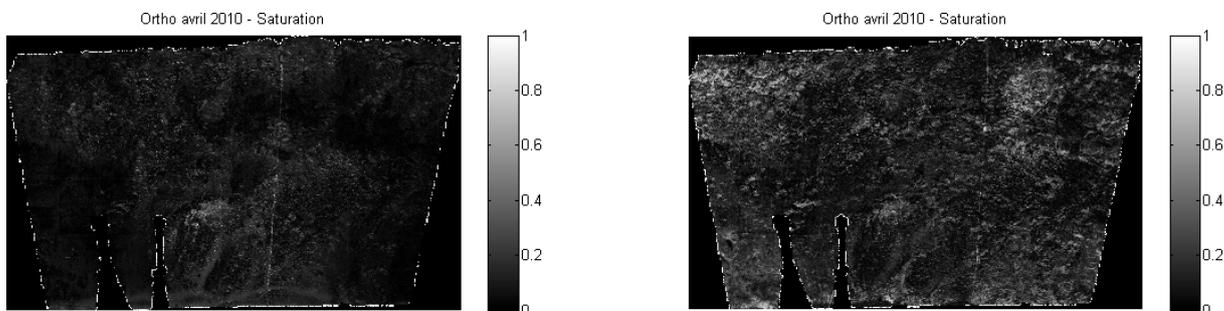


Figure 63 : Composante de Saturation des orthophotos dans l'espace HSV.
Le niveau de gris représente si les teintes de la photo sont très clinquantes (gris clair) ou très pâles (noir).

La composante de valeur V des orthophotos dans l'espace HSV (Figure 64) paraît plus facilement exploitable. Bien qu'on perçoive encore l'influence de la mousse se développant sur les parties de mamu massif, les changements locaux de niveau de gris permettent également de bien détecter les changements de texture de l'affleurement. Ces changements de texture sont liés au départ de matériau.

L'interprétation visuelle des changements est fortement influencée par la perception des couleurs et des textures. Comme seule l'information de texture est significative pour l'érosion, on peut construire une image synthétique qui utilise la composante H et S

d'août 2009 et la composante V d'avril 2010. De cette manière, l'œil ne perçoit plus que les changements de texture de la surface dans un contexte coloré identique (Figure 65). Sur l'exemple présenté en Figure 65, la valeur révèle le développement du réseau de fissure dans le mamu lisse et l'altération progressive de la surface.

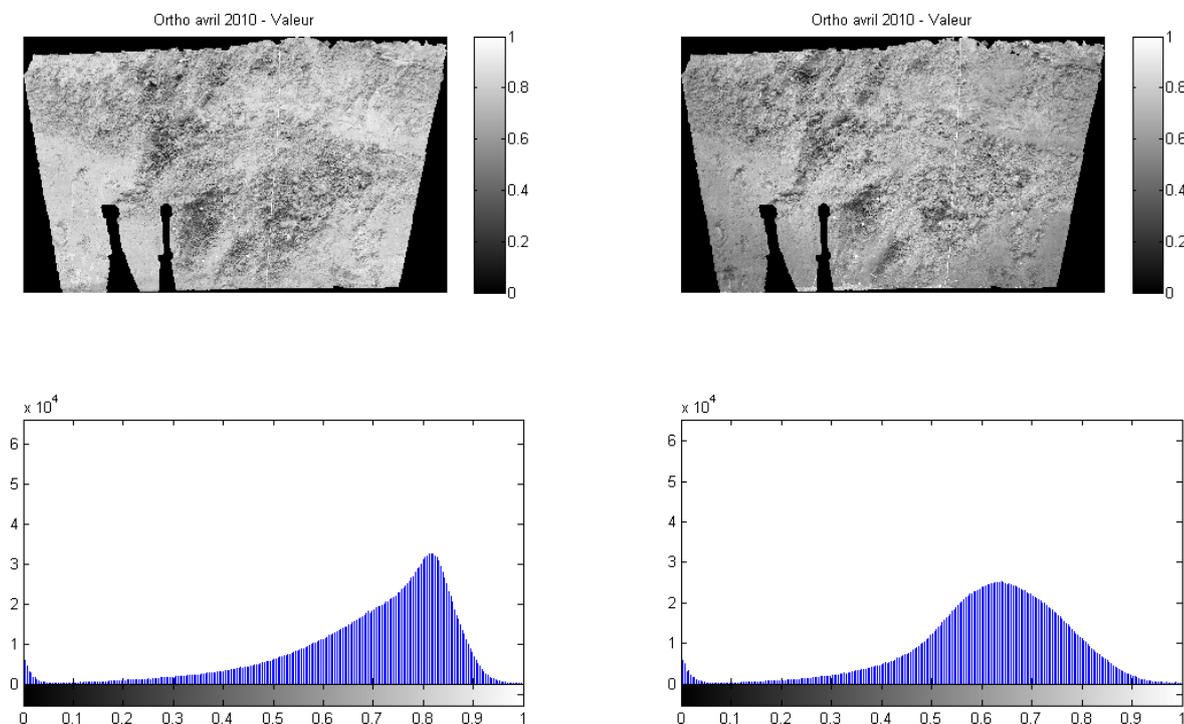


Figure 64 : Composantes de valeur des orthophotos dans l'espace HSV.

La valeur représente le niveau de gris des orthophotos. Les histogrammes montrent que l'orthophoto d'août 2009 est globalement plus claire que celle d'avril 2010. La classe la plus représentée a une valeur de 0,8 plutôt que ~ 0,65. L'étalement des valeurs est globalement plus claire.

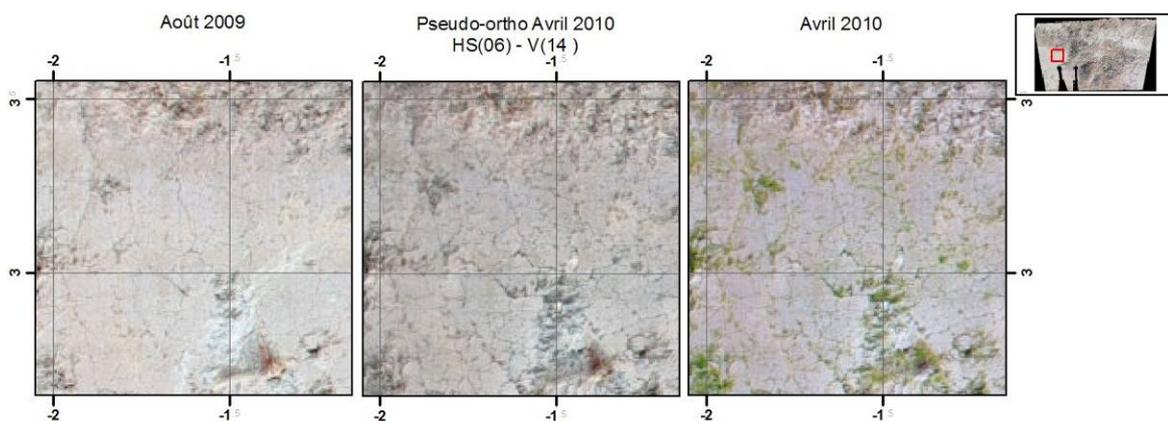


Figure 65 : Détail des orthophotos dans une zone de mamu lisse.

La pseudo-orthophoto, présentée au centre, a été construite en utilisant les composantes H et S de l'ortho d'août 2009 (sixième campagne de photo d'où la dénomination HS(06)) et la composante V de l'ortho d'avril 2010 (quatorzième campagne de photo, d'où la dénomination V(14)). Sur cet extrait on voit apparaître clairement le réseau de fissure du mamu sans être gêné par l'apparition de teintes vertes liées à la mousse verte et qui attirent inmanquablement le regard.

La valeur V semble donc être une signature colorimétrique intéressante pour caractériser le changement dans l'image. On a différencié les composantes de changement entre août 2009 et avril 2010 (Figure 66).

Différence de valeur (HSV)

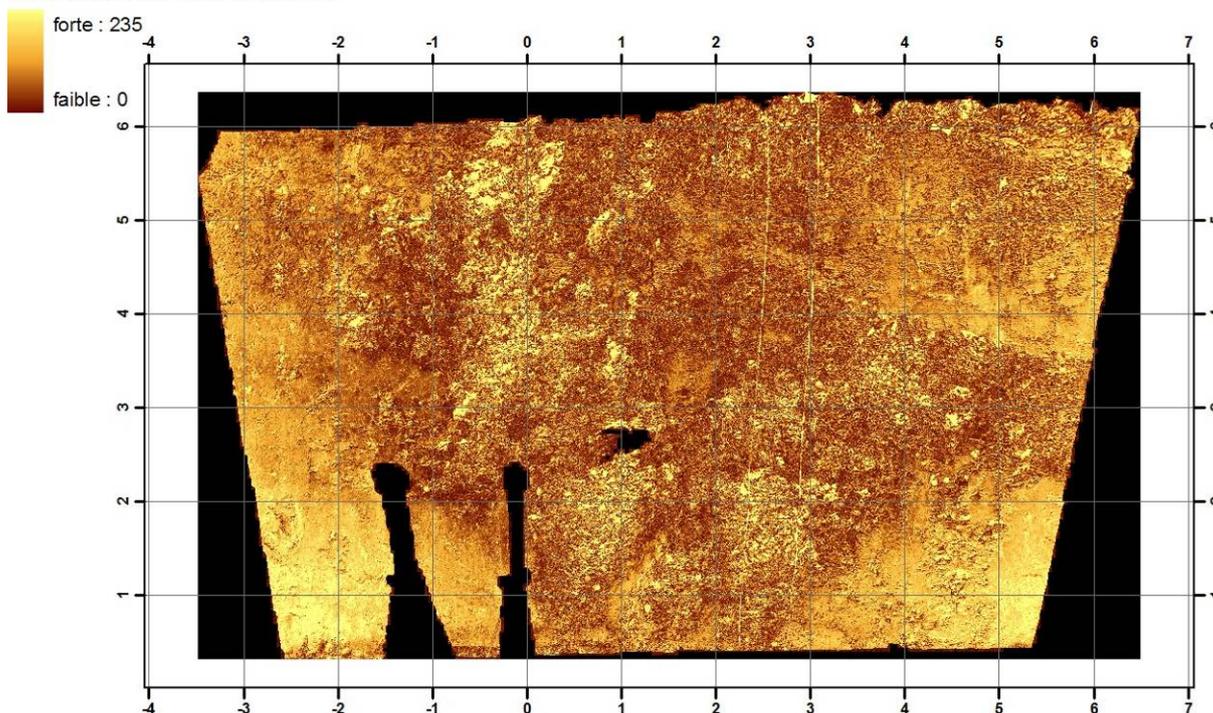


Figure 66 : Différence absolue de la composante Valeur de l'espace HSV, entre août 2009 et avril 2010.

Les pixels sans changement de valeur sont colorés en brun sombre, les pixels à fort changement de valeur sont colorés en jaune. On voit ressortir des groupes de pixels jaunes sur fond brun qui témoignent de matériau érodé. Le pied de talus cependant est largement coloré en jaune alors que le mamu y est resté inchangé. C'est une fois encore la signature de la mousse se développant sur la paroi.

Pour s'affranchir de cette dérive de valeur, on a échantillonné une série de 1500 points au hasard sur l'ensemble de la zone. On a éliminé les points tombant dans les polygones d'érosion avérée par différence de MNS (voir section suivante) et retiré également de l'échantillon les points tombant hors de la zone d'intérêt (zones noires). On a ensuite ajusté une surface polynomiale de degré 3 pour modéliser la tendance de la dérive d'arrière plan.

Pour enfin identifier les zones érodées, il faut seuiller la grille de différence de valeurs corrigées. Le seuil qualifie ou rejette les pixels selon qu'on considère qu'ils sont effectivement érodés ou non. Le choix du seuil est arbitraire et a été choisi en comparant les différences des zones érodées de celle qui sont restées intactes. Toutes les différences de valeur supérieures à 35 sont qualifiées.

Un tel seuil produit 34 440 zones d'érosion, sur une surface totale de 3,85 m². Parmi les pixels retenus, 17 819 sont des pixels isolés dont on peut douter de la validité. Si

on les exclut de la sélection, il reste 16 621 polygones d'érosion pour une surface totale de 3,40 m².

Différences absolues de valeurs corrigées

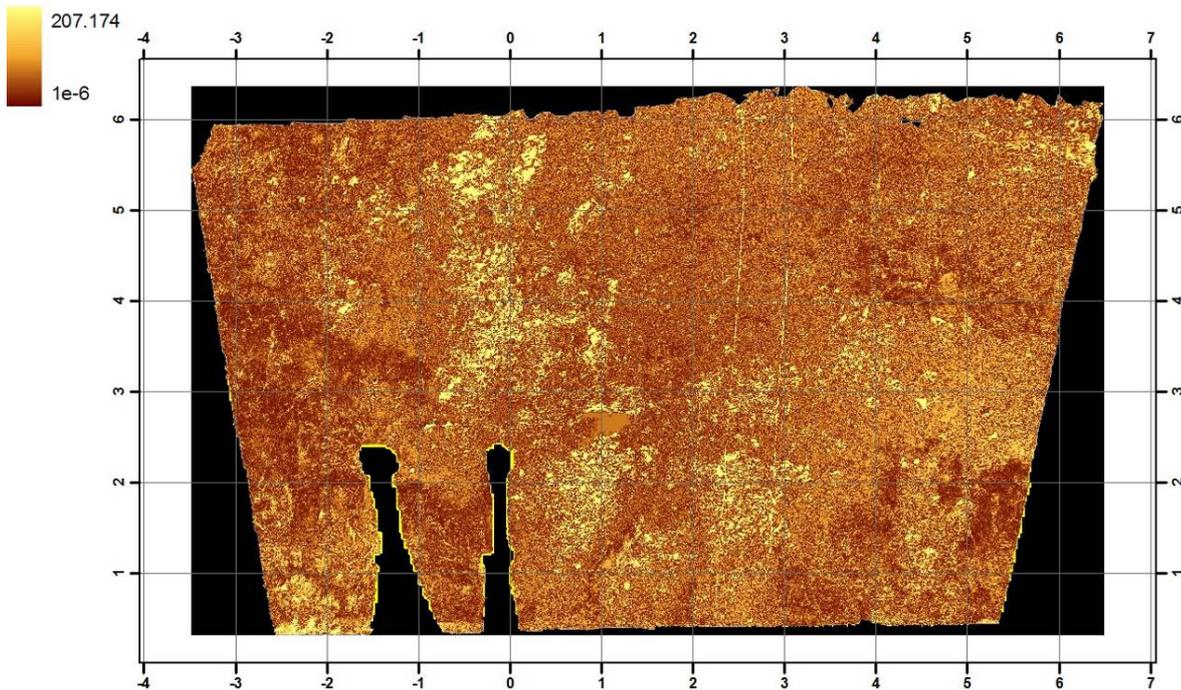


Figure 67 : Différences absolues de la composante valeur (HSV) des orthophotos d'août 2009 et avril 2010.

Comparées à la Figure 66, les zones de mamu lisse apparaissent maintenant avec des différences proches de 0 (brun sombre), ce qui est logique puisque qu'aucune érosion remarquable à l'échelle de la figure ne s'y est produite. Les poches d'érosion jaune claire y sont préservées.

Différences absolues de valeurs corrigées

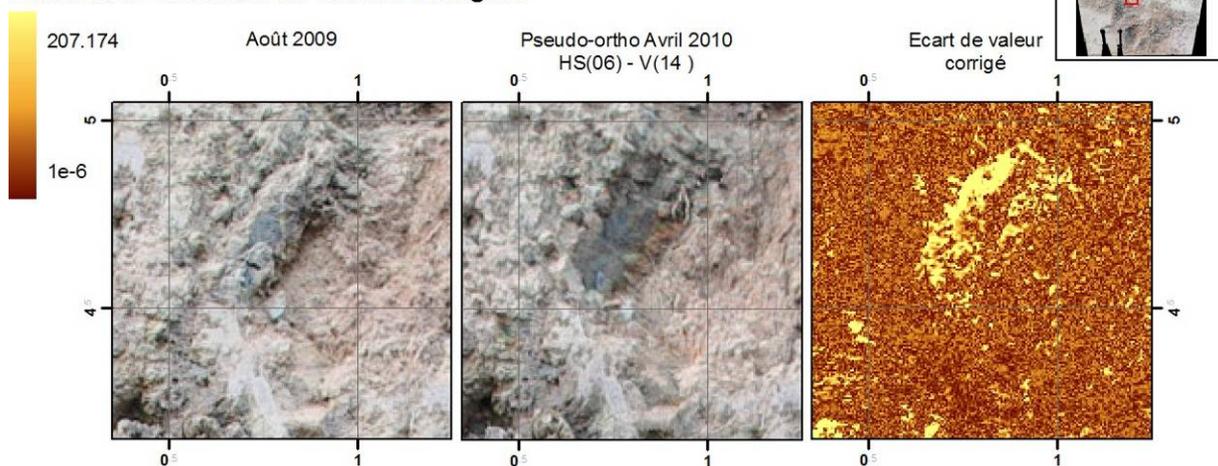


Figure 68 : Vue de détail de la grille de valeur corrigée en regard d'une zone effectivement érodée.

Le départ du bloc se traduit localement par une forte différence de valeur, mais la totalité de la surface impactée par l'érosion n'est pas extraite.

5.5.3. Conclusion sur l'interprétation des orthophotos

La comparaison numérique des orthophotos est une tâche rendue difficile par le changement de couleur de l'affleurement qui n'est pas uniquement lié à l'érosion. L'analyse dans l'espace colorimétrique RGB ne conduit pas à un résultat utilisable en pratique. La transformation des orthophotos dans l'espace colorimétrique HSV est beaucoup plus efficace autant pour l'examen qualitatif des images que pour la détection automatique de changement.

Les différences de la composante « valeur » de l'espace HSV est la plus efficace pour extraire les zones d'érosion à partir d'une paire d'orthophotos. Un croisement avec une autre technique est cependant nécessaire pour valider la qualité de la détection de changement.

L'examen d'un cas type d'érosion de bloc montre que le changement de valeur (de l'espace HSV) ne dépeint pas la totalité des zones érodées car il suffit que le matériau révélé par érosion ait la même valeur que le matériau s'y trouvant antérieurement pour que la différence soit petite et indétectable numériquement. L'œil humain analyse la scène et reconnaît des objets parmi des pixels adjacents, c'est grâce à cette faculté que notre cerveau peut reconnaître les objets qui ont disparu. Les propriétés de ces objets ne sont pas uniquement liées à une couleur unique mais aussi à un assemblage de couleur et à leur propriété de forme. Cette tâche reste paradoxalement difficile à réaliser en vision par ordinateur, alors qu'elle est intuitive pour un être humain.

Pour résumer, l'analyse visuelle des orthophotos permet de reconnaître la nature du matériau affecté par l'érosion à une échelle spatiale très fine, plus fine que la différence de MNS. Un survol visuel révèle les zones où le talus a été affecté mais sans pouvoir apporter de quantification précise des volumes érodés. Ainsi, un examen détaillé des zones apparemment épargnées par l'érosion révèle un départ de matériau le long de fissures à peine visible et indétectable par différence de MNS.

L'analyse numérique des orthophotos a l'avantage de :

- cartographier de manière univoque l'ensemble des zones affectées par des changements, ce qui n'est guère possible de mener systématiquement avec une détection visuelle ;
- montrer la nature du matériau soumis à l'érosion et de se prêter à de la photo-interprétation de l'affleurement ;
- détecter des zones érodées échappant à la comparaison des MNS, faute d'une résolution et d'une sensibilité suffisante. Même si la résolution planimétrique du MNS, actuellement de 25 mm contre 5 mm pour l'orthophoto, pourrait être améliorée jusqu'à environ 15 mm, la qualité de la corrélation des pixels contrôlant la sensibilité au changement ne sera pas forcément meilleure. Cette capacité de détection limitée concerne particulièrement l'intégralité des fissures affectant la partie mamutisée.

5.6. CONCLUSION

Le suivi photographique mensuel du talus de Pamatai, mis en place à partir de février 2009, a permis de reconstruire le talus en 3D et d'en mesurer l'érosion. Une comparaison des deux époques de mesure les plus pertinentes, août 2009 et avril 2010 (avant et après la saison des pluies), ciblée sur une zone contenant du mamu III-IV, des laves altérées en boules et des poches de scories, a permis de tester un panel de techniques de comparaison : photos brutes en comparaison visuelle, orthophoto comparaison visuelle, orthophoto comparaison numérique et différence de MNS, et de proposer un protocole d'exploitation numérique des photos adaptés au suivi quantitatif de l'érosion des talus.

L'érosion qui a été observée sur un intervalle de 8 mois a montré que les phénomènes d'érosion étaient non-linéaires. Ils semblent être associés à des périodes de regain de précipitation et non à une quantité de pluie particulière. La poursuite de l'analyse des photos intermédiaires n'apportera pas d'information supplémentaire.

L'exploitation des orthophotos et MNS de talus, décrite dans ce chapitre, a montré leur potentiel comme outils qualitatifs et quantitatifs. La reconstitution 3D du talus a plus concrètement permis :

- de mettre en évidence les différences de processus de dégradation au sein d'un même talus, selon les types de faciès ;
- de proposer un protocole de suivi quantitatif du processus d'érosion, par exploitation numérique des photos par différence de MNS, associé à un seuil de détection des profondeurs érodées de 12,1 mm ;
- de mettre en évidence la non-linéarité des phénomènes de dégradation, concentrée sur certaines périodes de l'année ;
- d'obtenir une vitesse de recul moyenne des zones scoriacée correspondant au premier stade d'érosion du talus et donc, d'obtenir un indicateur quantitatif sur la non-linéarité des processus érosifs, si l'exercice se poursuivait ;
- de mettre en évidence que cette vitesse d'érosion est pour l'instant uniquement conditionnée par la morphologie et la granulométrie de la zone scoriacée.

Maintenant que ces processus érosifs sont quantifiés et positionnés, une interprétation géotechnique est menée dans le chapitre suivant.

6. Interprétations et perspectives

6.1. QUANTIFICATION DU REcul ANNUEL MOYEN

Quel que soit l'indicateur, disposer de grandeur quantitative de recul est une indication précieuse.

À partir du panel des talus dont on a pu suivre l'évolution morphologique sur une vingtaine d'année, il ressort que deux grandeurs se sont avérées pertinentes pour décrire la sensibilité d'un talus à l'érosion diffuse :

- le coefficient de diffusivité (exprimé en m^2/an), qui correspond à la surface de la section érodée du talus (normalisée par la hauteur de la zone) ;
- le taux d'érosion (exprimé en m/an), qui permet d'accéder à une mesure ponctuelle de l'érosion le long d'un profil, plutôt que de n'en considérer que l'intégrale.

Malgré l'échantillon limité, il semble que nous puissions observer que **quel que soit le talus considéré, au-delà de vingt ans d'existence, la surface érodée exprimée par le coefficient de diffusivité, tend vers une valeur constante. La valeur de recul moyen mis en évidence ici, serait de $0,022 m^2/an$ avec un intervalle de confiance à 95 % compris entre $0,007 m^2/an$ et $0,038 m^2/an$.**

D'autre part, il a été mis en évidence que l'hétérogénéité lithographique au sein d'un même talus influence les processus érosifs. À ce sujet, les observations expérimentales permettent d'avancer que le **taux d'érosion annuel a une plage de variation possible entre 5,3 et 56,4 mm/an, selon la lithologie et la géométrie.**

À titre de comparaison, d'après le cubage effectué par reconstitution 3D, le taux d'érosion moyen a été estimé à $15,2 mm/an$ sur le talus de Pamatai. Cependant, l'ordre de grandeur soit le même, il reste difficile de comparer ces grandeurs puisque les vitesses de dégradation ne sont pas linéaires dans le temps. Ici, l'analyse 3D donne accès à un taux d'érosion sur une année particulière qui se trouve correspondre aux premières années du talus, alors que l'analyse 2D donne accès à un taux d'érosion moyen estimé sur une vingtaine d'années, pour des talus déjà anciens au départ (âge entre 2 et 23 ans en 1991). Sur le talus de Pamatai, nous ne disposons d'aucun moyen d'extrapoler cette valeur de vitesse, excepté de supposer qu'elle est maximale au début pour les secteurs scoriacés avant d'atteindre un pseudo équilibre.

6.2. INFLUENCE DE LA LITHOLOGIE SUR LES PROCESSUS DE DÉGRADATION

Plus que la lithologie, c'est l'hétérogénéité lithologique au sein d'un même talus, qui semble intervenir sur la quantité et le mode de dégradation du talus, quelle que soit l'échelle de temps étudiée :

- sur l'analyse 2D, la vitesse de recul annuel de chaque talus serait accentuée par la présence marquée d'hétérogénéité ;
- sur l'analyse 3D, au sein d'un même talus, les processus de dégradation mensuels, sont nettement dépendants de la lithologie.

L'influence de la lithologie montre, de ce fait, les limites de l'analyse sur un profil 2D, puisque la variabilité latérale d'un talus (typiquement celui de Pamatai-Huaiti) est difficilement intégrable.

6.2.1. Influence de l'hétérogénéité de faciès lithostratigraphique à une échelle de temps pluriannuelle

Le taux d'érosion des talus 66 et 123 se distingue nettement des autres, par des valeurs de recul supérieures à 0,066 m²/an.

Ces deux talus qui ont comme particularité d'être taillé dans de la roche mère encore peu altérée (classe A du LTPP), auraient subi une érosion différentielle probablement due à une hétérogénéité lithologique, accentuant le recul. C'est-à-dire qu'il existe un point, dans la pente, dont le recul est particulièrement plus important que les autres, comme en témoigne la variabilité de leurs taux d'érosion. Ceci implique qu'on ne puisse dissocier aussi simplement les problématiques d'éboulement et d'érosion, d'ampleur très différente *a priori*, puisque l'érosion de certaines couches peut entraîner ensuite l'instabilité d'autres.

Indépendamment de la représentativité limitée des deux valeurs, il est donc probable que l'hétérogénéité de faciès et la présence de formation à faible cohésion (paléosol, scories...), soit un critère favorable à l'érosion. Il est effectivement logique que l'érosion différentielle des couches les moins indurées soit ensuite à même de déstabiliser les couches supérieures, par sous-cavage par exemple, comme l'avait également souligné le LTPP.

6.2.2. Influence de la lithologie sur les processus de dégradation mensuels

Au sein du talus de Pamatai, nous pouvons distinguer deux processus d'érosion nettement distincts selon les faciès lithologiques concernés : les secteurs mamutisés (de type Mamu III-IV) et les secteurs scoriacés. La Figure 69 illustre ce contraste de processus érosif.



Figure 69 : Contraste de processus érosif selon la nature lithologique du talus.

Sur les secteurs de mamu III-IV (Classe B du LTPP)

Le talus est constitué de Mamu III – IV, étant donné le peu de texture et de structure reconnaissable de la roche mère, ce qui le classe dans la catégorie B4 du LTPP (cf. Tableau 1). Une description des altérites polynésiennes selon leur niveau d'altération est rappelée dans le Tableau 2.

D'après les résultats du programme ARAI, le mamu III-IV, correspondant aux niveaux les plus évolués des altérites polynésiennes, est essentiellement composé de limons assez plastiques, présentant une cohésion en place non négligeable (en moyenne entre 40 et 60 kPa) et un angle de frottement interne important ($\phi' = 35^\circ$), hérités de la roche mère. Le caractère cohérent du matériau est confirmé par les observations de terrain.

Sur ces secteurs mamutisés homogènes se développe un réseau de fissures, indétectable par différence de MNS mais visible sur les orthophotos haute résolution. On assiste sans doute ici à l'initiation du processus de dessiccation. La résolution du

MNS nous donne une indication sur les caractéristiques géométriques maximum de ces fissures à la date de l'étude (inférieures à 25 mm de largeur). Ces fissures, qui peuvent atteindre cependant des largeurs millimétriques, ont tendance à s'élargir et à s'accroître davantage en fin de saison humide.

La Figure 70 précise l'allure de ces dégradations. Nous pouvons ainsi observer :

- un réseau à double structures :
 - un réseau de fissures principales avec une direction subverticale, d'une longueur de plusieurs dizaines de centimètres, entaillées sur une profondeur qui paraît significative (plusieurs centimètres),
 - un réseau secondaire, globalement orthogonal au premier. Ces fissures ont des longueurs centimétriques et paraissent faiblement entaillées ;



Figure 70 : Réseau de fissures de dessiccation sur les zones de Mamu III et IV.

- un développement de mousse le long des fissures (principalement dans le réseau secondaire, moins entaillé) ;

- des racines qui favorisent le départ de matériaux volumineux (fissure principale à gauche de la figure 70) ;
- des blocs diédriques, plus volumineux qui se détachent de la paroi. Ils sont découpés par le réseau de fissures principal et d'autres plans structuraux subverticaux, (hérités de la roche mère ?), qui s'observent nettement le long de la fissure gauche de la Figure 70. En haut à gauche, un nouveau bloc semble être prêt à se détacher, avec l'apparition d'une fissure mécanique par effet gravitaire.

Sur les secteurs scoriacés (Classe A du LTPP)

L'observation des orthophotos montre que les zones scoriacées sont les plus rapidement érodées. Le sommet du talus commence à s'éroder sous la forme d'un ravinement très prononcé puisqu'il atteint des profondeurs spectaculaires de 38 cm.

Ce secteur soumis aux départs de matériaux les plus volumineux, ne correspond pas, vraisemblablement à du mamu massif, mais à une zone où le degré d'altération est très peu avancé. La Figure 71 met en évidence des scories et des « boules » non altérées de tailles centimétriques voire décimétriques, sans matrice.



Figure 71 : Variation de faciès et de cohésion au sein des laves scoriacées.

Des couches cendreuse d'une dizaine de centimètres d'épaisseur, sont également visibles. Le processus d'« érosion », bien que le nom semble peu adapté pour des départs rocheux de ce type, pourrait consister en un lessivage de la matrice fine (issue de l'altération) laissant sans cohésion des blocs rocheux de toutes tailles (scories ou

autres). Le rôle de la matrice fine dans la cohésion de l'ensemble est observable en Figure 71 où la stratification des coulées et la présence d'une matrice fine soulignée par la végétation est nette à gauche alors qu'à droite la coulée est pratiquement pulvérulente. Ces hétérogénéités spatiales pourraient être liées à la nature de la matrice et notamment à sa teneur en argile.

L'emprise de la zone érodée est évidemment contrainte par l'emprise de la zone scoriacée initiale et des lithologies environnantes. La granulométrie moyenne des scories doit également pouvoir intervenir dans l'ampleur de ces déstabilisations. Sur ces secteurs, les mécanismes identifiés sont des sous-cavages à l'échelle du grain d'abord (scorie, boules...), puis du talus ensuite. En effet, une déstabilisation localisée entraînera celle des voisins, jusqu'à une déstabilisation plus massive.

6.3. SYNTHÈSE ET PERSPECTIVE

6.3.1. Synthèse géotechnique

Processus de dégradation

Finalement, ces analyses morphologiques ont nettement mis en évidence deux processus de dégradation : un processus de dégradation par dessiccation affectant les parties mamutisées et un processus de dégradation « en masse » initié dans les parties les moins altérées, et notamment les zones scoriacées. La variabilité de faciès des formations mamutisées implique qu'à l'échelle d'un talus, on ne puisse dissocier aussi simplement ces deux problématiques d'ampleur très différente.

Le processus de dessiccation affectant les talus mamutisés, serait préférentiellement associé à une vitesse de recul moyenne de 0,022 m²/an avec un intervalle de confiance à 95 % compris entre 0,007 m²/an et 0,038 m²/an.

Le processus de recul en masse pourrait être associé à des valeurs beaucoup plus importantes, d'après ce qui a été observé sur la poche de scories du talus de Pamatai et sur les talus 123 et 66 du LTPP. Au sein d'un même talus, l'hétérogénéité de faciès et la présence d'horizons peu cohésifs, s'est avéré être un critère accentuant les vitesses de dégradation, ce qu'a permis de montrer à leur manière, chacun des deux protocoles. L'érosion s'initierait préférentiellement dans les horizons où la cohésion est faible (ou le devient par lessivage de la matrice fine dans une lithologie grenue), entraînant ensuite l'érosion des autres faciès. Citons les secteurs scoriacés, tuf, lave altérée en boule ou paléosols. **Le point remarquable est que ces hétérogénéités lithologiques défavorables à l'érosion, sont attendues dans les parties les moins altérées où la structure de la roche mère est la plus reconnaissable.**

Au cours de son étude géotechnique, le LTPP avait également mis en évidence d'autres points que nous rappelons ici :

- l'érosion est favorisée pour les talus orientés SE à NW (150 à 350 grades) ;
- la végétation préserve le sol de l'érosion ;

- le développement de la végétation est fortement influencé par l'inclinaison du talus et la nature du sol (structure, pourcentage d'élément fin et par conséquent degrés d'altération). Le coefficient de Hazen, caractérisant la granulométrie, renseigne correctement sur ce développement végétal, qui préserve de l'érosion.

Classement de l'érodibilité des talus mamutisés (LTPP, 1991)

Dans le cadre de cette étude, nous ne pouvons distinguer les processus de dégradation selon le niveau d'altération des talus mamutisés.

Sur les talus mamutisés, outre le classement à partir de la lithologie (cf. Tableau 1) le LTPP avait également synthétisé l'érodibilité en trois classes :

- érodabilité élevée type de sols.....	: $K \geq 0,30$ $Cu \leq 25$ Paléosol, Mamu III à IV brun, Mamu II à III gris, Tufs
- érodabilité moyenne type de sols.....	: $0,30 > K \geq 0,20$ $25 \leq Cu \leq 80$ Mamu III à IV brun
- érodabilité faible type de sols.....	: $K \leq 0,05$ $Cu \geq 120$ Mamu I-II gris, Brèches

Figure 72 : Classe d'érodabilité (Extrait de Simoneau et Espada, Phase 1 et 2, 1991).
Cu : coefficient de Hazen, K : facteur d'érodibilité de Wishmeier.

Le facteur d'érodibilité K est donné par l'abaque de Wishmeier, à partir de la teneur en matières organiques et l'analyse granulométrique, valeurs issues des essais labo.

En parallèle, les essais *in-situ* d'érodabilité entrepris par le LTPP, au jet sous pression (essai au Karcher) avaient fait apparaître deux types de talus, qu'il paraît intéressant de rappeler :

- certains talus, très érodables en surface mais résistants en profondeur, soumis à la dessiccation ;
- certains talus sur lesquels se forme avec le temps une « peau colmatante » peu érodable (végétale en général, par l'intermédiaire de mousse mêlée à des dépôts très fins de ruissellement).

Ces essais confirmaient que les remblais de mamu et les paléosols étaient les sols les plus érodables, les mamu I-II les moins érodables. La très grande érodibilité des paléosols a été soulignée à de nombreuses reprises.

6.3.2. Perspectives géotechniques

Poursuivre le suivi mensuel photogrammétrique du talus de Pamatai

L'analyse du couple de photo, ciblée sur la zone scoriacée entre août 2009 et avril 2010, a permis de mettre en évidence des processus de dégradation distinct ; vu la non-linéarité de ces phénomènes et la résolution possible des dispositifs numériques, la poursuite de l'analyse des photos intermédiaires n'apportera pas d'information supplémentaire.

À l'inverse, le développement du phénomène de dessiccation a été observée au cours d'une année sur les profils mamutisés, bien que la dégradation n'a pu être quantifiée, au vu de la taille limitée des fissures. Afin d'améliorer la connaissance de ce processus et notamment son évolution temporelle, il serait pertinent de poursuivre le suivi mensuel photogrammétrique du talus de Pamatai, pour repérer notamment l'évolution du développement du réseau de fissures. Il serait notamment intéressant et « facile » de repérer à partir de quand les fissures sont identifiables sur le MNS ou au moins localiser et quantifier le volume des dièdres rocheux qui se détachent à la faveur de ces fissures. La poursuite de ce suivi permettrait d'appréhender la non-linéarité des processus de dégradation selon les faciès lithologiques.

Au vu de ce qui a été observé, le pas de temps du suivi photographique et surtout la géométrie du protocole d'acquisition devront être adaptée au phénomène recherché et surtout à la résolution du MNS (< 10 mm par exemple ?). La zone de suivi au sein du talus et son étendue devra être redéfinie. D'un point de vue pratique, afin d'assurer la pérennité du dispositif, la position des clous doit être relevée avec précision.

Suivi de la dégradation des caractéristiques mécaniques

D'autre part, l'influence significative de la lithologie mis en évidence ici, incite à approfondir la connaissance des phénomènes de dégradation des caractéristiques géomécaniques de ces faciès. Il reste donc à proposer des protocoles de mesures à cet effet, faisant intervenir des méthodes intrusives légères (non destructives à destructives), permettant a minima de comparer l'état initial et l'état final des paramètres géomécaniques.

Les méthodes d'investigation doivent donner des indications sur les caractéristiques de la surface autant que de la profondeur.

Dans un premier temps, le suivi de la dégradation des caractéristiques mécaniques de surface est plus facilement accessible avec des méthodes légères non destructives. Le LTPP avait, par exemple, donné une estimation de la cohésion non drainée à l'aide d'un pénétromètre de poche. Il pourrait être également profitable de caractériser plus finement le réseau de fissures, par familles de fissures (profondeur, ouverture, longueur, escarpement des bords, description de la végétation...) et de comparer cet état à plusieurs dates. Ceci permettrait notamment

d'affiner le rôle ou la signification de la mousse, par exemple (stabilisateur ou catalyseur de la fissuration ?).

En parallèle, **l'évolution des caractéristiques géomécaniques avec la profondeur (dans la masse du talus) reste un volet d'investigation clé**, puisqu'elle intervient probablement sur la non-linéarité des dégradations via notamment la vitesse d'altération des formations mamutisées. À ce sujet, soulignons les essais *in-situ* d'érodibilité entrepris par le LTPP, au jet sous pression (essai au Karcher), qui permettent de tester, sur le terrain, l'érodibilité réelle en surface et dans la masse, en tenant compte de l'état de surface et de fracturation du matériau.

Le rôle des écoulements mériterait d'être approfondi, notamment à l'échelle des processus de dessiccation. Il est en effet probable que le transport de matériaux lié à un écoulement intervienne dans le développement des fissures, bien que cela n'ait pu être mis en évidence explicitement ici. Mais, est-ce les hétérogénéités internes de la structure de la roche mère qui expliqueraient principalement ces contrastes de perméabilité ou seulement les écoulements superficiels pluviométriques ? En effet, bien que le mamu soit un matériau relativement peu perméable ($k_{\text{moy}} = 10^{-7}$ m/s dans la matrice), il existe une pseudo « perméabilité de fissures » au droit des discontinuités héritées de la roche mère. Ces fissures, bien que nettement moins perméables que dans la roche mère fracturée, favorisent les circulations d'eau souterraines dans le massif.

6.3.3. Perspectives réglementaires

Les deux types de suivi ont clairement montré l'influence de l'hétérogénéité de structure et de texture (notamment le changement latéral de granulométrie et de cohésion) sur l'érosion. Cette hétérogénéité (surtout au sein d'une même unité lithologique), semble donc être un point clé pour l'initiation et le développement d'instabilité et/ou de la dégradation des talus. On comprend ainsi toute la difficulté de pouvoir caractériser l'érodibilité d'un talus par des tests réalisés sur des prélèvements ponctuels ou des profils 2D. Il convient donc d'adapter les profils de terrassement à ces hétérogénéités et d'adopter des moyens de terrassement aisément modulables.

Ainsi, notamment, les faciès scoriacés et autres lithologies sans cohésion mettent en péril la pérennité du talus dans sa globalité ; la conception d'un terrassement doit donc intégrer des traitements préventifs sur ces secteurs en priorité.

Sur une échelle de temps mensuelle, l'interprétation qualitative des photos a permis de mettre en évidence des époques d'érosion relativement plus fortes que d'autres, au cours d'une année. Le lien entre érosion et quantité de précipitation n'est pas évident. Cependant, il semblerait que l'existence d'une période relativement sèche suivie d'une période plus humide puisse favoriser l'érosion : la période sèche préparerait le détachement de matériau que les premières pluies enlèveraient. La survenance de pluie n'induirait plus guère de changement par la suite. **Ainsi, le contrôle des eaux de ruissellement est une mesure préventive contre l'érosion (drainage en tête et en pied de talus).**

7. Conclusions

Dans la continuité de l'analyse géotechnique menée par le LTPP en 1991, le BRGM a proposé une analyse morphologique de la dégradation des talus, basée sur une technique de stéréophotogrammétrie. Les deux protocoles complémentaires mis en place à cet effet, s'intéressent à des échelles de temps différentes de dégradation des talus, pluriannuelle et plurimensuelle et ont pour principal objectif de quantifier le recul.

Finalement, ces analyses morphologiques ont nettement mis en évidence deux processus de dégradation : un processus de dégradation par dessiccation affectant les parties mamutisées et un processus de dégradation « en masse » initié dans les parties les moins altérées, et notamment les zones scoriacées. La variabilité de faciès des formations mamutisées implique qu'à l'échelle d'un talus, on ne puisse dissocier aussi simplement ces deux problématiques d'ampleur très différente.

Les protocoles de mesures développés ici ont permis d'obtenir une grandeur quantitative du recul, indication précieuse très peu disponible dans la littérature. Malgré l'échantillon limité, il semble que nous puissions observer que, quel que soit le talus considéré, au-delà de vingt ans d'existence, la surface érodée (exprimée par le coefficient de diffusivité), tend vers une valeur constante, qui a été évaluée ici à $0,022 \text{ m}^2/\text{an}$ avec un intervalle de confiance à 95 % compris entre $0,007 \text{ m}^2/\text{an}$ et $0,038 \text{ m}^2/\text{an}$. Cette grandeur se rapproche des coefficients de diffusivité appliqués aux escarpements géologiques pour en évaluer l'érosion à long terme (plusieurs centaines ou milliers d'année). Localement, au sein d'un même talus, les observations expérimentales permettent d'avancer que le taux d'érosion annuel, a une plage de variation possible entre 5,3 et 56,4 mm/an, selon la lithologie et la géométrie.

Effectivement, au sein d'un même talus, l'hétérogénéité de faciès et la présence d'horizons peu cohérents s'est avéré être un critère favorable au processus de dégradation en masse, ce qu'a permis de montrer, à leur manière, chacun des deux protocoles. Ce mode de dégradation peut conduire à des vitesses de recul plus élevées (mais moins linéaires dans le temps), d'après ce qui a été observé sur la poche de scories du talus de Pamatai et sur les talus 123 et 66 du LTPP. L'érosion s'initierait préférentiellement dans les horizons où la cohésion est faible (ou le devient par lessivage de la matrice fine dans une lithologie grenue), entraînant ensuite, par sous-cavage principalement, le recul des autres faciès. Citons les secteurs scoriacés, tuf, lave altérée en boule ou paléosols. Le point remarquable est que ces hétérogénéités lithologiques, défavorables à l'érosion, sont attendues dans les parties les moins altérées où la structure de la roche mère est la plus reconnaissable.

La reconstitution 3D du talus de Pamatai sur les deux époques de mesure les plus pertinentes, août 2009 et avril 2010 (avant et après la saison des pluies), a permis de tester un panel de techniques numériques de comparaison : orthophoto comparaison visuelle, orthophoto comparaison numérique et MNS, et de proposer un protocole d'exploitation numérique des photos adaptés au suivi quantitatif du processus.

Le seuil de détection des épaisseurs érodées à partir de la comparaison des modèles numériques de surface (MNS) est de 12 mm : toute érosion supérieure à ce seuil est détectée avec une confiance de 99,9 %. En complément, l'analyse numérique des orthophoto a l'avantage de montrer des zones érodées non détectable par différence de MNS, faute de résolution suffisante et d'extraire automatiquement ces zones. Il a été montré que la transformation des orthophotos dans l'espace colorimétrique HSV était beaucoup plus efficace pour détecter les zones d'érosion que dans l'espace colorimétrique RGB par défaut. Pour s'affranchir des artefacts de couleur liés à la végétation, on a généré une orthophoto synthétique multi-date en utilisant les couches de teinte (H) et saturation (S) de la première époque et la couche de valeur (V) de la seconde.

Afin d'approfondir la connaissance des processus de dégradation et notamment leur évolution temporelle, il serait pertinent de poursuivre le suivi mensuel photogrammétrique du talus de Pamatai, pour analyser notamment l'évolution du phénomène de dessiccation. En effet, le développement du réseau de fissures observé au cours d'une année sur les profils mamutisés à partir d'une orthophoto haute résolution montre que la dégradation du talus ne fait que commencer. La poursuite de ce suivi permettrait notamment d'appréhender la non-linéarité des processus de dégradation selon les faciès lithologiques.

Finalement, l'influence significative de la lithologie mis en évidence ici, incite à approfondir la connaissance des phénomènes de dégradation des caractéristiques géomécaniques de ces faciès, ce qui n'a pas été le sujet de cette étude. Il reste donc à proposer des protocoles de mesures à cet effet, faisant intervenir des méthodes intrusives légères, permettant *a minima* de comparer l'état initial et l'état final des paramètres géomécaniques. Si les méthodes d'investigation doivent donner des indications sur les caractéristiques de la surface, l'évolution des caractéristiques géomécaniques en profondeur (dans la masse du talus) reste un volet d'investigation clé, puisqu'elle intervient probablement sur la non-linéarité des dégradations via notamment la vitesse d'altération des formations mamutisées.

En termes opérationnels, la variabilité lithologique du substrat volcanique polynésien à l'échelle métrique ne permet pas de faire de préconisation générique d'aménagement. L'expérience a montré que le taux d'érosion était très variable d'une zone à l'autre sur un même talus. Il ressort de l'étude pluri-décennale que les taux d'érosion se stabilisent en général autour de 21 mm/an, mais ce avec une forte variabilité qui dépend de la nature du faciès initial de la roche mère.

En conséquence, la mise en œuvre de parades (béton projeté, végétalisation...) pour limiter les effets indésirables de l'évolution des talus (recul, stabilité, transport solide), passe par un diagnostic préalable de la nature lithologique des terrains qu'il recoupe et de la géométrie de ces formations.

8. Bibliographie

Hanks T.C, Bucknam R.C, Lajoie K.R. and Wallace R.E. (1984) - Modification of wave-cut and faulting-controlled landforms, *Journal of Geophysical Research* 89, p. 5771-5790.

Kraus K., Waldhausl P. (1998) - Manuel de photogrammétrie principes et procédés fondamentaux. Hermès Science, Paris.

Lembezat C., Mompelat J.M., Wong-Fat S. (2003) - Programme ARAI. Rapport d'avancement à fin 2003 au terme de la première année d'activité. Rapport BRGM/RP-52929-FR. 132 p., 64 illustrations, 3 annexes hors texte.

Ma Y., Soatto S., Kosecka J., Shankar Sastry S. (2006) - An invitation to 3D vision, First ed. Springer, New York, USA.

Martin Y., Church M. (1997) - Diffusion in landscape development models : on the nature of basic transport relations, *Earth Surface Processes and Landforms*, 22-3, p. 273-279.

Mikhail E.M., Bethel J.S., McGlone J.C. (2001) - Introduction to modern photogrammetry. John Wiley and sons, London.

Ministère de la Santé, de l'Environnement et de la Recherche scientifique, délégation à l'environnement (1990) - Techniques de lutte contre l'érosion des sols. Synthèse bibliographique. Tahiti, Polynésie Française.

Philippinat M. (1970) - Problèmes routiers de lutte contre l'érosion en zone tropicale. Compte rendu de conférence au Centre Expérimental de recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics.

Servant J. (1974) - Un problème de géographie physique en Polynésie Française : l'érosion. Exemple de Tahiti. *Cah. ORSTOM*, sér. Sci. HI-., vol. XI, no 314 - 1974 : p. 203-209.

Ministère de la Santé, de l'Environnement et de la Recherche scientifique, délégation à l'environnement (1989) - Mise au point des techniques de lutte contre l'érosion et la sédimentation dans les lagons de Polynésie Française. Rapport de première phase d'étude.

Nearing M.A. (1997) - A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss. *Soil Science of America Journal*, 61, p. 917-919

Nédellec J.L, Mathon C. (2006) - Programme ARAI – Action 3.1 – Cartographie de l'aléa mouvements de terrain – Caractérisation géotechnique des altérites volcaniques

(« mamu ») – rapport final – BRGM/RP-54835-FR 108 p, 39 illustrations, 20 tableaux, 9 annexes hors texte.

Simoneau X., Espada J.L. (1991) - « Étude de Talus – Lutte contre l'érosion – Stabilité des pentes Phase 1 & 2 » – RAP.N°91/336. D90004 – Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie.

Soroste M., Espada J.L, Simoneau X. (1994) - « Talus – Lutte contre l'érosion – Phase 3 » – PV N° 91/583. D90005 – Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie.

Wischmeier W.H., Smith D.D. (1978) - Predicting Rainfall-Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Agricultural Handbook No. 537. US Department of Agriculture, Washington, DC.

Annexe 1

Description du mode opératoire des visites de talus et présentation de la fiche descriptive utilisée par le LTTP (Source : Simoneau et Espada, 1991)

Annexe 2

Exemple de schéma descriptif d'un talus (source : Simoneau et Espada, 1991)

Annexe 3

Photographies des 17 talus, lors de l'investigation de 2009

Annexe 4

Comparaison 2D entre les profils mesurés en 1991 par le LTPP et ceux mesurés en 2009 par le BRGM



Centre scientifique et technique
Service risques naturels et sécurité du stockage du CO2
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34