



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Document à accès immédiat

# Analyse de l'exposition des enjeux de Roche Plate (plateau de l'école) aux instabilités gravitaires en provenance du rempart du Maïdo

Rapport final

**BRGM/RP-71466-FR**

Version 0 du 11 mai 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

**Benoit Le Moigne avec la collaboration de Jean-Dominique Barnichon**

<b>Vérificateur :</b>	
Nom :	Anthony Rey
Fonction :	Ingénieur géotechnicien – Directeur régional - Corse
Date :	89 3 Cliquez ou appuyez ici pour entrer une
Signature :	

<b>Approbateur :</b>	
Nom :	Kévin Samyn
Fonction :	Directeur régional - La Réunion
Date :	11/05/2022
Signature :	



PRÉFET  
DE LA RÉGION  
RÉUNION

Liberté  
Égalité  
Fraternité

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM  
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

## Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

## Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



**Mots clés :** Risque naturel ; chute de blocs ; éboulement ; fissure ; modélisation ; trajectographie ; incendie ; Maïdo ; Roche Plate ; Saint-Paul ; La Réunion (974)

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

**Benoit Le Moigne avec la collaboration de Jean-Dominique Barnichon (2022)** – Analyse de l'exposition des enjeux de Roche Plate (plateau de l'école) aux instabilités gravitaires en provenance du rempart du Maïdo. Rapport final V0. BRGM/RP-71466-FR, 95 p.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.  
IM003-MT008-P2-21/09/2021

## Synthèse

Le rempart du Maïdo haut de près de 1 000 m domine l'îlet de Roche Plate – Plateau de l'école (Mafate) habité de quelques dizaines de personnes. Cette paroi est affectée de fractures subparallèles découpant des compartiments rocheux de quelques dizaines de m<sup>3</sup> à plusieurs centaines de milliers m<sup>3</sup>. La chute des instabilités délimités par les fissures les plus proches de la crête est redoutée à court terme (années à venir).

Suite à un incendie ayant affecté le site du Maïdo en novembre 2020, des témoignages d'ouverture de fissures ont déclenché une gestion de crise où une rupture imminente d'un compartiment de plusieurs centaines de m<sup>3</sup> était redoutée. En cas de chute, la probabilité de propagation jusqu'au enjeux bâtis et notamment une école élémentaire estimée par des méthodes empiriques et une modélisation de trajectographie 2D était qualifiée de moyenne à forte (seuil JTC-1).

Au regard de ces résultats, la ville de Saint-Paul a décidé par arrêté municipal la délocalisation de l'école et d'interdire l'accueil du public au sein des gîtes situés dans une zone où une forte probabilité d'atteinte a été qualifiée.

Dans ce contexte, la DEAL de la Réunion a sollicité le BRGM pour préciser l'exposition des enjeux du Plateau de l'école de Roche Plate aux éboulements rocheux et plus globalement pour la mise en place d'un protocole de suivi des instabilités rocheuses du sommet du rempart du Maïdo. L'exposition des enjeux en tête (usagers des belvédères touristiques) est traitée dans des expertises précédentes.

L'inventaire des événements historiques constituant le socle de cette étude s'est majoritairement appuyé sur un pointé des blocs sur une orthophotographie haute résolution acquise spécifiquement.

Le scénario de référence considéré dans cette étude a été la chute du compartiment rocheux de plusieurs centaines de m<sup>3</sup> sur lequel des déplacements avaient été signalés. Ces conditions admettent une modélisation des propagations sous la forme de chutes isolées des volumes fragmentés (hypothèse retenue d'un volume unitaire de l'ordre de 10 m<sup>3</sup>). Celles-ci ont été réalisées avec deux logiciels de trajectographie 3D, à savoir Rockyfor3D® et RocPro3D®. Ces logiciels font appel, à quelques nuances près, aux mêmes concepts physiques. Les mêmes hypothèses d'entrée ont été considérées pour chacun d'eux. Ces modélisations ponctuelles ont été calibrées principalement par des modélisations à l'échelle de l'ensemble du site avec les blocs pointés sur orthophotographies et secondairement par comparaison aux enveloppes de propagation indiquées par les méthodes empiriques. Le scénario d'un éboulement en masse n'a pas été traité dans cette étude.

Les résultats obtenus au moyen de différentes approches sont globalement cohérents entre eux sauf avec la modélisation de trajectographie 2D réalisée en phase de gestion de crise qui *a posteriori* paraît sécuritaire. Ces résultats avaient été jugés satisfaisants dans l'optique de fournir une qualification rapide de l'exposition des enjeux. Ils étaient en effet cohérents avec les estimations des emprises des propagations potentielles des recommandations nationales. Mais n'avaient pu être calibrés aussi finement, faute d'un inventaire des blocs disponible au moment de ces calculs. En raison de la faible représentation de paroi de très grande hauteur dans les bases de données des outils servant à la qualification des probabilités d'atteinte, les valeurs

d'angles de ligne d'énergie obtenues sont maintenant considérées comme pessimistes au regard de la réalité des trajectoires pouvant se développer sur le site du Maïdo.

Les probabilités de propagation réévaluées en cas d'éboulement du compartiment jugé en situation d'instabilité imminente lors de la phase de gestion de crise en novembre 2020 (compartiment n°2 dans le présent rapport), amènent à considérer le gîte du Bronchard dans une zone de probabilité d'atteinte moyenne. Les gîtes Thiburce et Chez Juliette, la maison forestière ainsi que le groupe d'habitation plus au nord se situent quant à eux dans une zone de propagation faible. Enfin, l'école, le dispensaire et le Gîte Judex se trouvent en dehors de la zone de probabilité d'atteinte de blocs (Figure 1).

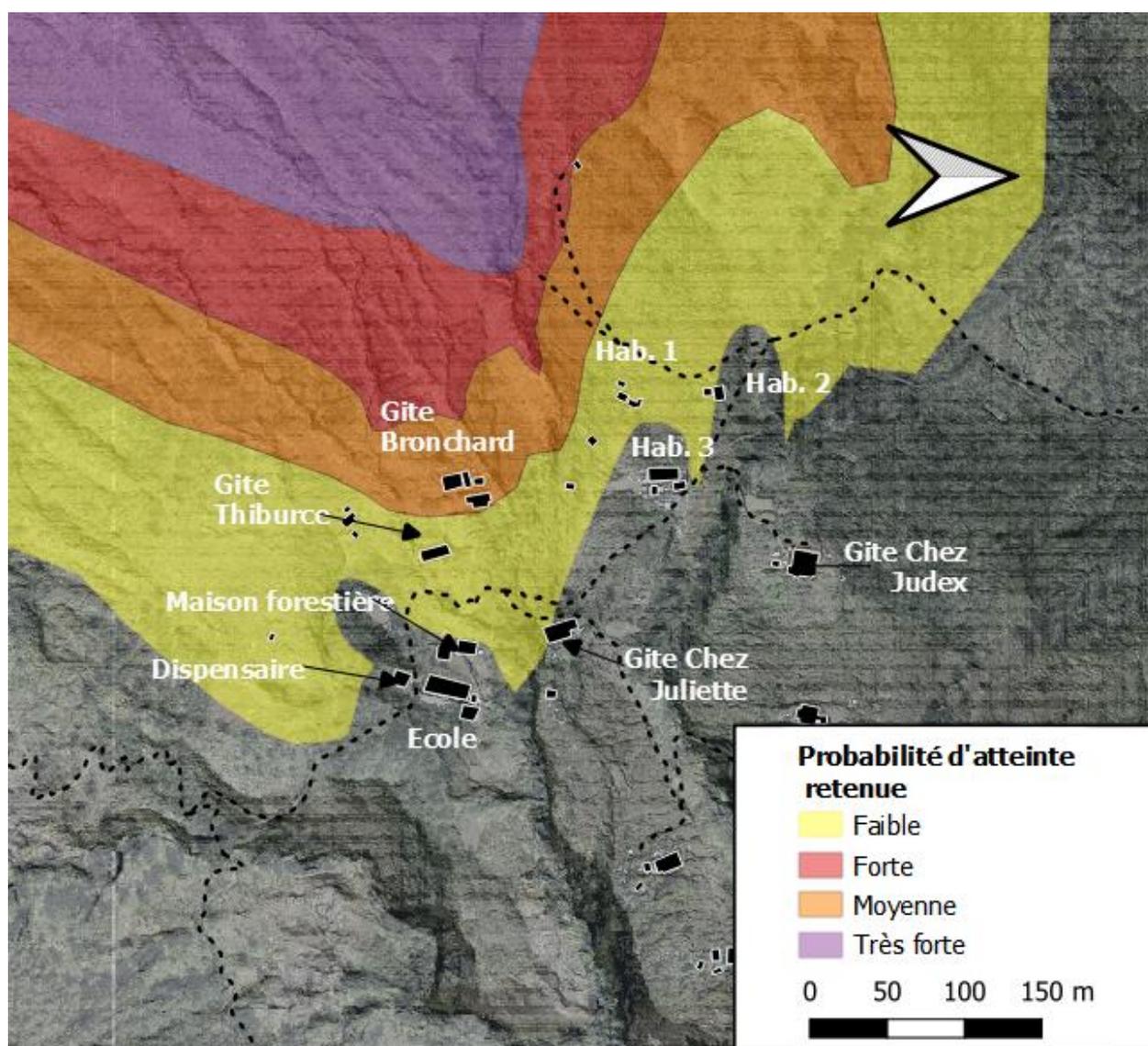


Figure 1 : Probabilité d'atteinte retenue sur la zone d'étude en cas de chute du compartiment n° 2

Aujourd'hui, après 2 saisons cycloniques, il peut être considéré que la probabilité de rupture du compartiment signalé comme instable est revenue à son niveau d'avant l'incendie de novembre 2020. Aussi, la gestion différenciée répondant à cette menace spécifique peut être désormais réévaluée sachant que la stabilité de 18 compartiments en bordure de la crête reste toute aussi préoccupante.

Les modèles déployés apportent aussi une nouvelle connaissance permettant de préciser le zonage de l'aléa chute de blocs/éboulement sur l'ensemble du secteur de Roche Plate – Ecole à partir de l'ensemble des instabilités de la crête (zones de départ les plus défavorables) et non plus seulement depuis le compartiment jugé instable en phase de gestion de crise (Figure 2). La traduction de ces résultats avec les récents critères du guide méthodologique de caractérisation de l'aléa rocheux dans le cadre d'un PPR ou d'un PAC (MEZAP, 2021) aboutit à un zonage proche de celui défini en 2011 à dire d'expert dans les études de hiérarchisation des risques de mouvements de terrain dans le cirque de Mafate.

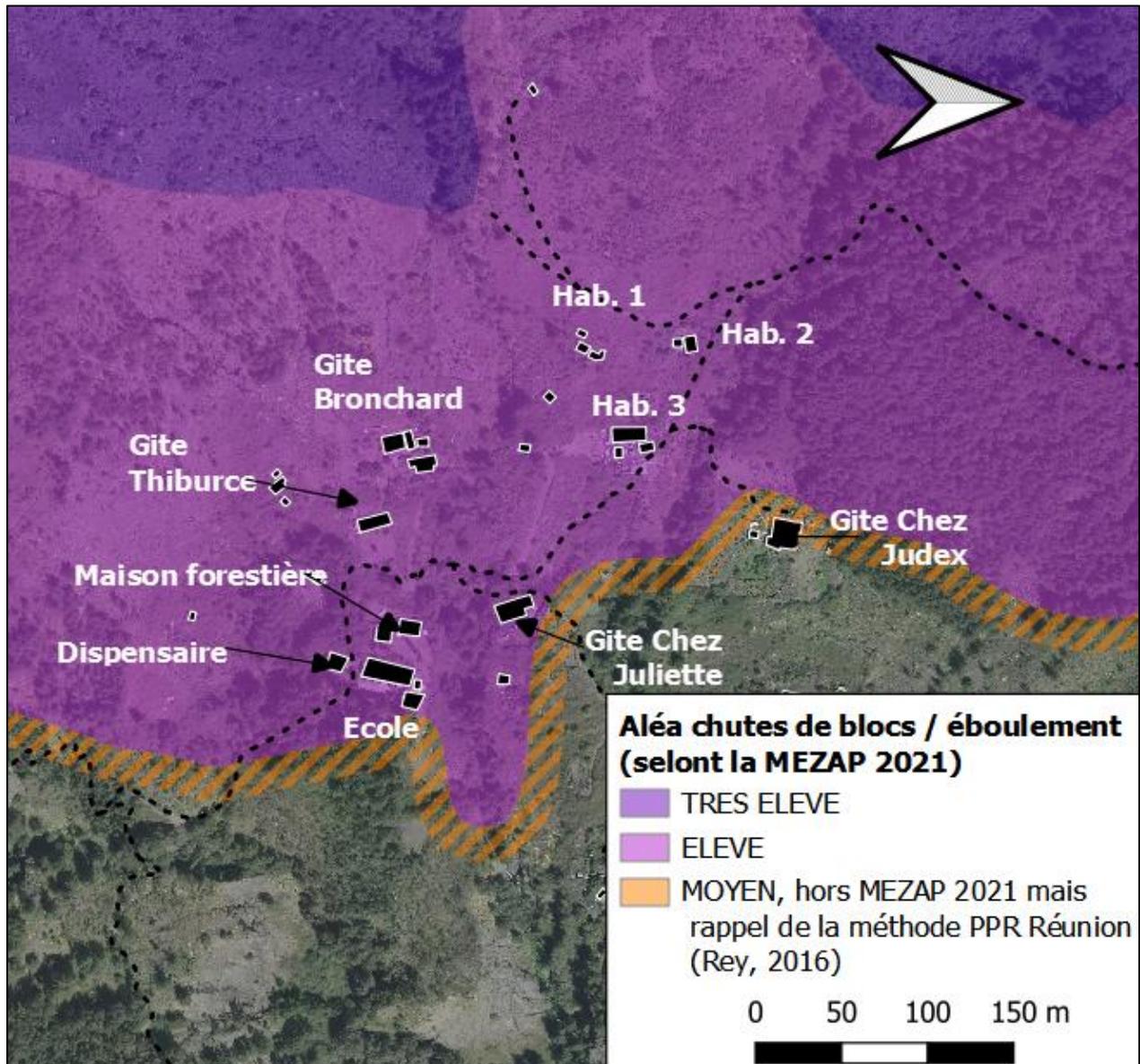


Figure 2 : Zonage de l'aléa chute de blocs / éboulement selon les critères MEZAP, 2021

Au regard de cette nouvelle connaissance, une analyse préliminaire coût/bénéfice de stratégies de sécurisation éventuelle est donnée en conclusion de ce rapport. Les solutions comparées sont l'acceptation du risque et la surveillance des instabilités en tête, la délocalisation des enjeux, la mise en place de parades passives et la suppression des instabilités en crête.

Bien que la présente analyse de trajectographie relativise l'exposition des enjeux en pied de versant face à la chute de compartiment rocheux, l'exposition des enjeux face à des éboulements

Analyse de l'exposition des enjeux de Roche Plate (plateau de l'école) aux instabilités gravitaires en provenance du rempart du Maïdo

en grande masse dont les propagations sont généralement plus longues et donc plus élevée. La surveillance des instabilités rocheuses du sommet du rempart est pour cela nécessaire. Le programme de suivi en cours de ces instabilités est rappelé en fin de rapport.

## Sommaire

1. Cadre et objectif	11
2. Contexte	13
2.1. Localisation et indentification des enjeux	13
2.2. Contexte géomorphologique	14
2.3. Rappel des connaissances sur les aléas mouvements de terrain du site du Maïdo	15
3. Historique	20
3.1. Historique ancien	20
3.2. Activité depuis l'incendie de novembre 2020	21
3.3. Episode érosif et lave torrentielle de mars 2021	25
3.4. Inventaires des atteintes de blocs en pied de rempart	27
4. Evaluation de la probabilité de propagation	29
4.1. Approche empirique : Méthode des lignes d'énergies	29
4.1.1. Application de la méthode des lignes d'énergie à un profil 2D	29
4.1.2. Application de l'outil d'aide à la cartographie de la propagation des chutes de blocs	35
4.2. Approches prospectives : Modélisations de trajectographie 2D et 3D	36
4.2.1. Scénario de référence : zone de départ et blocs de référence	36
4.2.2. Modélisation de trajectographie 2D	37
a) Topographie	37
b) Paramètres « sols » considérés dans les simulations	37
c) Scénario de référence : zone de départ et blocs de référence	38
d) Résultats des modélisations de trajectographie 2D	38
4.3. Modélisations de trajectographie 3D	40
4.4. Synthèse des résultats des analyses de propagation des instabilités rocheuses issus du compartiment 2	51
5. Apport de l'étude pour la caractérisation de l'aléa chutes de blocs sur le secteur	56
5.1. Scénario de de référence	56
5.1.1. Zones de départs	56
a) Crête des belvédères	56
b) Arrête du Piton Maïdo	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
5.2. Probabilité de propagation, d'atteinte et aléa chutes de blocs / éboulement résultant à l'échelle du secteur de roche plate	59
6. Solution de mise en sécurité des enjeux	66
6.1. Solution 0 : Acceptation du risque	66
6.2. Solution 1 : évitement	66
6.3. Solution 2 : Parades passives	67
6.4. Solution 3 : Suppression de compartiments instables en paroi	69
6.5. Analyse préliminaire cout /bénéfices / inconvénients des solutions de sécurisation	71
7. Rappel du Programme de surveillance des instabilités rocheuses	72
7.1. Suivi des écaillles rocheuses	72
7.2. Suivi saisonnier des compartiments à la bordure du rempart par photogrammétrie	73
7.3. Instrumentation des compartiments en bordure de rempart	73

## Liste des figures

Figure 1 : Probabilité d'atteinte retenue sur la zone d'étude en cas de chute du compartiment n° 2.4

Figure 2 : Zonage de l'aléa chute de blocs / éboulement selon les critères MEZAP, 2021 .....5

Figure 3 – Localisation de la zone d'étude (scan25 –IGN®). .....	13
Figure 4 – Configuration du rempart du Maïdo et localisation des principaux enjeux. ....	14
Figure 5 – Extrait de la carte géologique au 1/100 000 (BRGM, LGSR, 2006) au droit du Maïdo. ..	15
Figure 6 – Schéma conceptuel de la structuration du rempart du Maïdo et de l'extension en profondeur des fissures de décompression (Cruchet, 2003). .....	16
Figure 7 – Localisation des compartiments totalement désolidarisés en crête du rempart du Maïdo sur le MNT très haute résolution acquis en 2021. ....	17
Figure 8 – Localisation des compartiments totalement désolidarisés en crête du rempart du Maïdo (en vert) avec les mêmes index que ceux de la Figure 7 et schématisation des ensembles lithologiques aux abords de la crête des Belvédères .....	18
Figure 9 – Exemple de compartiment instable (compartiment n°3 sur les Figure 7 et Figure 8). .....	18
Figure 10 – Zonage des aléas mouvements de terrains d'après l'étude de hiérarchisation des risques de mouvements de terrain dans le Cirque de Mafate (2011) <sup>5</sup> . ....	19
Figure 11 – Localisation des zone de pierriers au pied du rempart de Maïdo et estimation des périodes de mise en place à partir des orthophotographies disponibles. ....	21
Figure 12 – Concentration de couloirs d'éboulement récemment activés au niveau de la zone incendiée. ....	22
Figure 13 – Atteintes récentes de blocs en pied de rempart. ....	22
Figure 14 – Découpages de compartiments rocheux sur la zone des antennes et localisation du témoignage d'aggravation supposée de l'ouverture d'une fissure entre le 9 et le 13/11/2020, compartiment 1 et 2 (cercles verts) localisés sur la Figure 7. ....	23
Figure 15 – Un des six extensomètres à lecture visuelle installés en urgence sur la zone où l'ouverture d'une fissure a été signalée et à ses abords et schéma de principe de ces équipements. ....	24
Figure 16 – En haut à gauche et à droite : Gite Bronchard impacté à son angle sud-ouest (amont) par des matériaux vraisemblablement charriés par une lave torrentielle ; En bas à gauche petit-pont endommagé par les laves torrentielles. ....	25
Figure 17 – Différence du Modèle numérique de surface du 03/09/2021 avec le Modèle Numérique de Surface de 2017 (IGN) et principaux constats d'évolution. ....	26
Figure 18 – Localisation des blocs, des pierriers et zone de ravinements pointés sur l'orthophotographie BRGM du 03/09/2021. ....	28
Figure 19 – Principe de la ligne d'énergie. ....	30
Figure 20 – Profil du rempart du Maïdo (en haut) et profil type AA30 (au milieu) et D (en bas) .....	31
Figure 21 – a) exemple des profils topographiques reliant la position de départ d'un bloc et sa position d'arrêt et b) ces profils après une homothétie de rapport Hi pour calculer leur aire normalisée An. c) base de données MEZAP de chutes de blocs (points bleus) avec les lois empiriques proposées pour associer des valeur d'angle $\beta$ à différents seuils de passage (probabilité d'atteinte faible, moyenne et élevée). (Colas, et al. 2017). ....	32
Figure 22 – Application des lois empiriques au profil représenté en violet (à gauche) et restitution spatiale des résultats (à droite). ....	34
Figure 23 – Résultats de l'application du logiciel Elana V4 avec les lois empiriques basées sur 3600 évènements. ....	35
Figure 24 – Résultats des modalisations de trajectographie 2D réalisée à l'aide du logiciel Pierre98 (à gauche) et localisation des seuils de probabilité de propagation Faible, Moyenne et Forte définis à partir d'une modélisation de trajectographie 2D avec Pierre98 le long d'un profil (pointillé noir) (à droite). ....	39

Figure 25 : Modèle numérique de terrain utilisés pour les modélisations de trajectographie 3D .....	42
Figure 26 : Types de sols prise en compte sur la zone d'étude dans les calculs de trajectographie 3D avec Rockyfor3D et RocPro3D .....	43
Figure 27 : Comparaison des probabilités de propagation obtenues à partir des modélisations de trajectographie à l'aide du logiciel Rockyfor3D pour des zones de départ à mi-hauteur du rempart (à gauche et des zones de départ au niveau de la crête (à droite).....	45
Figure 28 : Nombre d'arrêts de trajectoire de blocs par maille obtenus avec les logiciels Rockyfor3D (à gauche) et le logiciel RocPro3D (à droite) comparés à l'inventaires des blocs et au pierriers pointés sur la zone.....	48
Figure 29 : Résultats des calculs de probabilité de propagation obtenus avec les logiciels Rockyfor3D (à gauche) et le logiciel RocPro3D (à droite) pour des instabilités issues du compartiment 2 ; ligne pointillé verte : profil en de propagation en ligne directe servant à la comparaison des distances d'atteinte entre approche.....	50
Figure 30 : Définition de la probabilité d'atteinte de l'aléa de référence en un point (MEZAP, 2021). .....	54
Figure 31 : Probabilité d'atteinte retenue sur la zone d'étude en cas de chute du compartiment n° 2 .....	55
Figure 32 : 2 compartiments désolidarisés parmi les 18 constituant les sources sur le secteur de la crête des belvédères des modélisations de trajectographie.....	57
Figure 33 : Arrête du Piton Maïdo constituée d'une alternance de coulées basaltiques d'épaisseur inframétrique à plurimétrique séparées d'interlits scoriacés d'épaisseur équivalente.....	58
Figure 34 : Probabilité de propagation obtenues avec les logiciels Rockyfor3D (à gauche) et le logiciel RocPro3D (à droite) depuis les 18 compartiments désolidarisés de la crête des belvédères et l'arrête du Piton Maïdo .....	61
Figure 35 : Probabilité d'atteinte obtenues avec les logiciels Rockyfor3D (à gauche) et le logiciel RocPro3D (à droite) depuis les 18 compartiments désolidarisés de la crête des belvédères et l'arrête du Piton Maïdo .....	62
Figure 36 : Probabilité d'atteinte de chute de blocs et d'éboulements retenue sur le secteur de Roche-Plate Ecole .....	63
Figure 37 : Définition du niveau de l'aléa de référence par zone homogène (MEZAP, 2021).....	64
Figure 38 : Rappel du zonage de l'aléa de l'aléa mouvement de terrain établi en 2011 dans le cadre de l'étude de hiérarchisation des risques des îlets habités de Mafate (RP-61079-FR).....	65
Figure 39 : Zonage de l'aléa chute de blocs / éboulement selon les critères MEZAP, 2021 .....	65
Figure 40 : Cartographie des hauteurs de passage (percentile à 95%), des énergies et principaux axes de propagation.....	67
Figure 41 : Principe de parade passive pour sécuriser les enjeux bâtis non délocalisés.....	68
Figure 42 : Capteur de type Delta L+ de la marque Feelbat installé en 12 points pour des mesures en continu de l'ouverture de fissures avec une précision de l'ordre du dixième de millimètre et télétransmission des données. ....	73
Figure 43 : Paire de jauges de déplacement installée en 40 points pour des mesures périodiques de l'ouverture de fissures avec une précision de l'ordre du dixième de millimètre. ....	74
Figure 44 : Implantation des extensomètres, jauges de déplacement et du référentiel géodésique mis en place dans le cadre du projet.....	75

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Volumes des blocs identifiés en fonction de l'indice de confiance sur l'origine du rempart .....	27
Tableau 2 : Seuils de probabilité de propagation définis par la Note MEZAP 2021 .....	29
Tableau 3 : Synthèse des distances de propagation avec la méthode des lignes d'énergie estimées avec les lois empiriques de 2017 le long d'un profil .....	33
Tableau 4 : Valeurs des paramètres utilisés dans le logiciel Pierre 98 pour décrire les différents types de sol recoupés par le profil .....	37
Tableau 5: Synthèse des distances de propagation et angles des lignes d'énergie correspondante (Pierre98) .....	38
Tableau 6 : Types de sols et paramètres de rugosité retenus pour la modélisation de trajectographie 3D avec Rockyfor3D .....	44
Tableau 7 : Types de sols et paramètres déterminant pour la modélisation de trajectographie 3D avec RocPro3D .....	44
Tableau 8 : Synthèse des résultats des probabilités de propagations de chutes de blocs issues du compartiment n°2 avec les différentes approches .....	51
Tableau 9 : Analyse comparative de solutions de sécurisation .....	71

## Liste des annexes

### Liste des annexes

Annexe 1 Fiche outil logiciel Pierre98_V2 .....	76
Annexe 2 Plaquette de présentation du logiciel RocPro3D .....	82
Annexe 3 Synthèse des résultats du modèle de trajectographie 3D Rockyfor3D avec des zones de départ depuis la crête .....	87
Annexe 4 Synthèse des résultats du modèle de trajectographie 3D RocPro3D avec des zones de départ depuis la crête .....	90

# 1. Cadre et objectif

Le Maïdo, site touristique emblématique de La Réunion pour le point de vue qu'il offre sur le Cirque de Mafate, attire un public nombreux toute l'année à la bordure d'un rempart de près de 1 000 m de haut. Le rempart du Maïdo domine l'îlet de Roche Plate (Mafate) habité par quelques dizaines de personnes, avec également une école et quelques gîtes qui concentrent les enjeux humains.

La planèze du Maïdo est affectée par des fractures subparallèles au rempart, d'ouvertures variables (quelques centimètres à plus de 1 mètre) et situées de 1 mètre à plusieurs dizaines de mètres de la bordure. En simplifiant, ces discontinuités découpent 2 familles d'instabilités de tailles distinctes :

- Des *écailles rocheuses* découpées par les fissures de décompression à plusieurs dizaines de mètres en recul de la bordure, dont les volumes sont aujourd'hui difficilement évaluables mais pourraient atteindre plusieurs centaines de milliers de m<sup>3</sup> voire plusieurs Mm<sup>3</sup>. Ces instabilités pourraient s'enraciner à plusieurs dizaines de mètres. A défaut d'historique et de suivi adapté, l'échéance d'un écoulement en grande masse ne peut être déterminée ;
- Des *compartiments*, proches de la bordure (quelques mètres), représentent des volumes d'une centaine jusqu'à quelques milliers de m<sup>3</sup>. Ces instabilités paraissent totalement détachées de la paroi et n'être retenues que par leur assise le plus souvent scoriacée. L'éboulement de ces compartiments rocheux sera vraisemblablement initié par une rupture de l'assise ou par un déséquilibre géométrique pouvant être provoqué par l'érosion des niveaux d'assise plus « tendres ». A l'instar des instabilités en grande masse, l'échéance de l'éboulement de ces compartiments est difficile à évaluer mais semble inéluctable à court terme (échéance de quelques années à dizaines d'années).

Les enjeux exposés à ces deux types d'instabilités sont à la fois les personnes fréquentant le site du Maïdo mais également les habitants et touristes de passage à l'Îlet de Roche Plate en contrebas, voire sur les sentiers de randonnées de Mafate passant en pied de rempart et permettant l'accès à l'Îlet de Roche Plate. Sur la plateforme du Maïdo, malgré des barrières et une signalétique limitant l'accès dans la zone où des instabilités sont redoutées, le dépassement par le public du périmètre autorisé est fréquent.

Suite à l'incendie de novembre 2020 ayant affecté le rempart et les terrains en recul, une expertise des risques géologiques<sup>1</sup> a été réalisée sur la base d'observations visuelles de surface. Faute d'un état initial topographique précis, le diagnostic posé s'est appuyé sur des indices minces d'activité et notamment un témoignage d'ouverture de fissure, considéré comme fiable.

Il a dès lors été considéré l'imminence possible de la chute de ce compartiment de plusieurs centaines de m<sup>3</sup>. Des estimations empiriques et des modélisations de propagation 2D de chutes de blocs réalisées depuis le sommet du rempart ont montré la forte exposition des enjeux les plus proches du pied de rempart parmi lesquels 2 gîtes et une école élémentaire.

Sur la base de ces éléments, la municipalité a entrepris la délocalisation de l'école et a fait fermer les gîtes dans la zone indiquée comme fortement exposée aux instabilités redoutées.

---

<sup>1</sup> Le Moigne B., Chaput M., Chevaux S. (2021) – Diagnostic de risques géologiques sur le site touristique du Maïdo et le sentier de La Brèche suite à l'incendie de Novembre 2020. BRGM/ RP-70490-FR. 41 p.

Parallèlement, pour suivre l'activité de la zone où une ouverture de fissure avait été signalée, 6 extensomètres à lecture visuelle ont été installés en novembre 2020. Deux saisons cycloniques après leur installation, aucun déplacement n'était signalé à la précision de mesure (millimétrique).

La gestion de cet événement a rappelé la nécessité de mettre en œuvre un dispositif adapté permettant de suivre l'évolution des instabilités potentielles connues de longue date et menaçant des enjeux forts. Le besoin d'une meilleure connaissance de l'évolution de cette crête de rempart a par ailleurs été exprimé par les services de l'Etat.

Pour cela, La DEAL de la Réunion a missionné le BRGM pour réaliser une étude visant à :

- (volet 1) préciser l'exposition des enjeux en pied de rempart (îlet de Roche Plate) aux menaces identifiées en crête de rempart via notamment des simulations trajectographiques 3D, non plus dans une réflexion de gestion de crise mais dans une logique de choix de gestion /d'aménagement sur le moyen/long terme de la zone ;
- (volet 2) déployer un dispositif de suivi de l'évolution des deux types d'instabilités identifiées au sommet du rempart du Maïdo afin de mieux cerner leur comportement et d'améliorer la connaissance sur la temporalité de la rupture.

Le présent rapport traite spécifiquement du premier point, soit l'analyse de l'exposition des enjeux en pied de rempart aux phénomènes de chute de blocs/éboulement. Dans cette analyse, des approches empiriques et prospectives d'estimation des zones de propagation des instabilités redoutées à court terme ont été déployées (que ce soit pour le compartiment identifié initialement comme présentant un risque de chute imminent, mais aussi pour l'ensemble des instabilités identifiées en crête de rempart). A partir de ces résultats, plusieurs solutions de gestion du risque d'éboulement sont proposées dans l'optique d'améliorer la sécurisation des enjeux de Roche Plate.



## 2.2. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE

Le rempart du Maïdo culminant à 2182 m, à l'ouest du cirque de Mafate fait 950 m de haut avec une pente moyenne régulière de 55°. Ce relief domine l'îlet de Roche Plate et plus particulièrement le plateau de l'École (« Plateau l'École »). Cette zone située directement au pied du rempart forme un cirque très ouvert, parcouru par de nombreux talwegs qui convergent vers la zone habitée. La plupart des constructions est implantée à la côte 1 100 m environ, sur une pente moyenne de l'ordre de 20° à une distance de 400 à 550 m du pied de rempart (Figure 4).

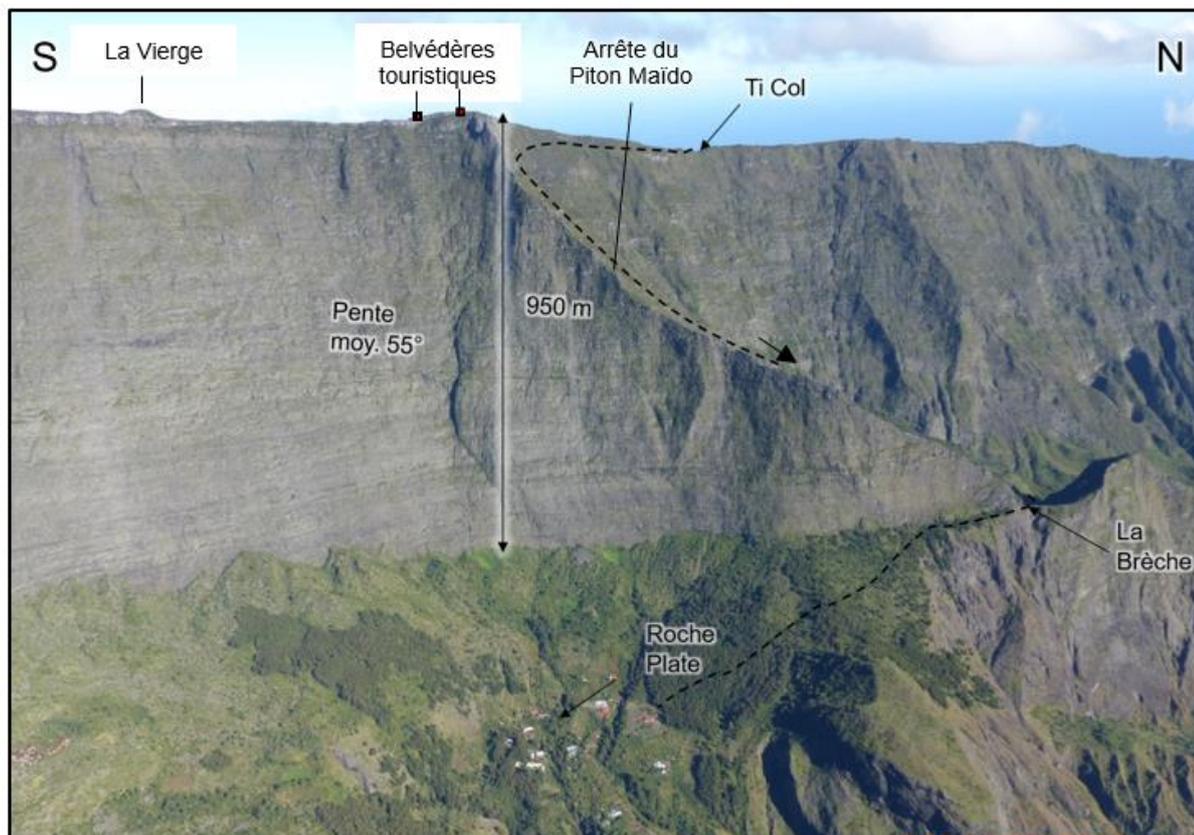


Figure 4 – Configuration du rempart du Maïdo et localisation des principaux enjeux.

D'après la carte géologique au 1/100 000 (BRGM/LGSR, 2006), le rempart du Maïdo est constitué d'un empilement de coulées de lave sur environ 1000 m de hauteur (Figure 5). La partie inférieure du rempart jusqu'à environ 1300 m d'altitude est constituée de coulées de lave basaltiques issues de la phase basique du Piton des Neiges (> 450 ka). Ces coulées sont surmontées de coulées de lave différenciées issues du stade d'évolution tardif de l'édifice (350-220 ka). La partie supérieure du rempart, est formée par la « dalle soudée », de composition mugéaritique, datée à 220 ka, sur une épaisseur de 5 à 20 m. Le belvédère du Maïdo est installé sur cette formation.

Les coulées basaltiques constituant le rempart, au moins dans sa partie supérieure, présentent un pendage amont, c'est-à-dire opposé à celui du rempart.

Dans le secteur de Roche Plate, le substratum est constitué de brèches relativement indurées, à matrice dominante, mises en place lors des phases de démantèlement du cirque.

Le pied de rempart est naturellement couvert d'un éboulis grossier récent sur une largeur de 100 à 200m.



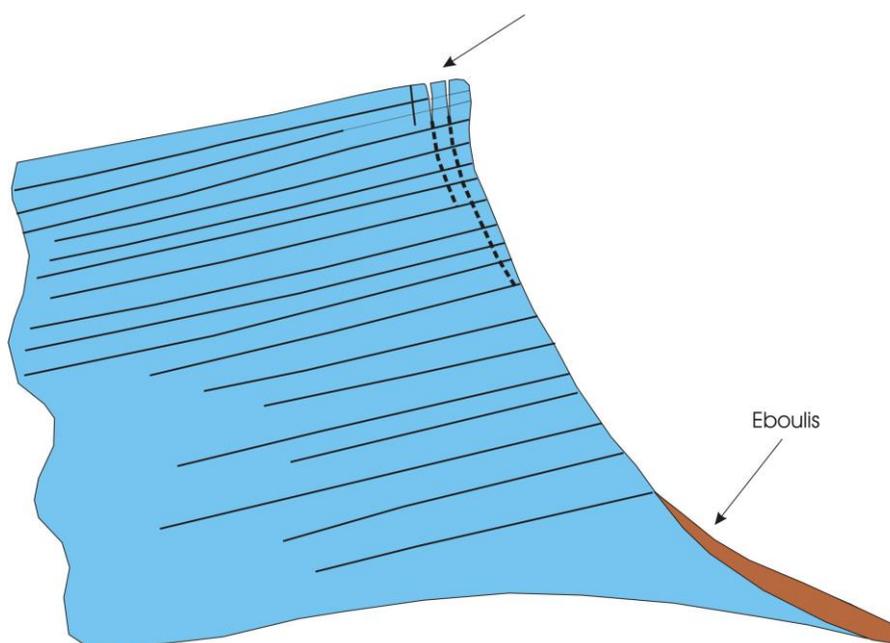


Figure 6 – Schéma conceptuel de la structuration du rempart du Maïdo et de l'extension en profondeur des fissures de décompression (Cruchet, 2003).

Les déformations du rempart du Maïdo ont été étudiées dans le cadre du projet de recherche MvTerre-1 où un suivi par extensomètres a été réalisé entre 2003 et 2007. Cette auscultation n'avait pas montré d'évolution notable de l'ouverture des fissures alors instrumentées durant cette période. Dans la continuité de cette étude, le projet RenovRisk Erosion et une action de la convention BRGM/DEAL d'appui technique à l'élaboration des PPR (nommée « Rempart »), ont permis l'installation de 3 stations sismiques en 2019 pour caractériser le fonctionnement thermomécanique des écaïlles sur lesquelles elles ont été implantées, pour mieux comprendre leur évolution vers la rupture.

L'aléa mouvement de terrain en recul de la crête du rempart lié à ces phénomènes est cartographié dans le Plan de prévention des risques naturels de Saint-Paul (approuvé le 26/10/2016). Il est ainsi cartographié une bande de 100 m en aléa très élevé (zone d'observation des indices d'instabilités,

i.e. fissures ouvertes), puis une bande de 100 m d'aléa élevé mouvements de terrain (MVT) correspondant à 10% de la hauteur du rempart, puis 10 m d'aléa moyen MVT.

Enfin, dans le cadre d'un projet BRGM/DEAL visant à améliorer la qualification de l'aléa recul de rempart dans les PPR, fort des premiers résultats par méthode sismique, une campagne d'écoute sismique au niveau d'une cinquantaine de points a été réalisée en août 2021 sur le site du Maïdo. L'objectif de ces mesures est d'établir une cartographie du degré de désolidarisation des compartiments/écaïlles rocheuses, pour approcher un délai d'occurrence de ces instabilités. Parallèlement, un levé LiDAR très haute résolution (>400 points/m<sup>2</sup>) a été acquis pour délimiter les compartiments en sommet de rempart et implanter les stations sismiques.

En simplifiant, ces discontinuités découpent 2 type d'instabilités de taille distinctes :

- Des écaïlles rocheuses découpées par les fissures de décompression à plusieurs dizaines de mètres en recul de la bordure, dont les volumes sont aujourd'hui difficilement évaluables mais pourraient atteindre plusieurs centaines de milliers de m<sup>3</sup> voire plusieurs millions de m<sup>3</sup>. Ces instabilités pourraient s'enraciner à plusieurs dizaines de mètres. A défaut d'historique et de suivi adapté, l'échéance d'un écoulement en grande masse ne peut être déterminée ;
- Des compartiments, proches de la bordure (quelques mètres), Ces instabilités paraissent totalement détachées de la paroi et n'être retenues que par leur assise le plus souvent scoriacée. L'éboulement de ces compartiments rocheux sera vraisemblablement initié par une rupture de l'assise (sous le poids du compartiment par exemple) ou par un déséquilibre géométrique pouvant être provoqué par une fragilisation de leur assise sous l'effet notamment de l'érosion qui peut se développer dans ces niveaux plus « tendres ». A l'instar des instabilités en grande masse, l'échéance de l'éboulement de ces compartiments est difficile à évaluer mais semble inéluctable à très court terme (échéance de quelques années à dizaines d'années). De la zone de la vierge jusqu'à la zone des antennes, il est identifié **18 compartiments de ce type, présentant des volumes de 40 m<sup>3</sup> jusqu'à 750 m<sup>3</sup>** (Figure 7 à Figure 8).

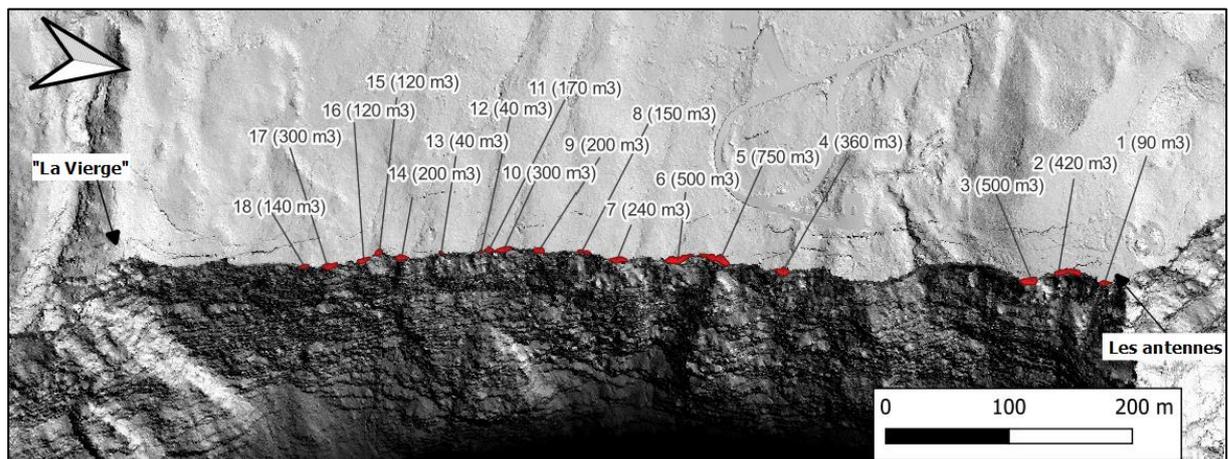


Figure 7 – Localisation des compartiments totalement désolidarisés en crête du rempart du Maïdo sur le MNT très haute résolution acquis en 2021.

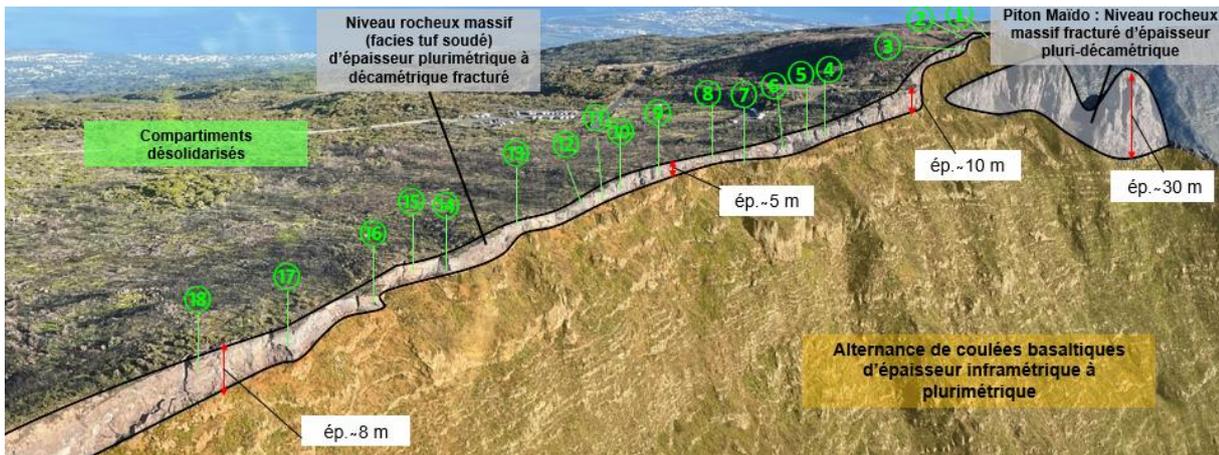


Figure 8 – Localisation des compartiments totalement désolidarisés en crête du rempart du Maïdo (en vert) avec les mêmes index que ceux de la Figure 7 et schématisation des ensembles lithologiques aux abords de la crête des Belvédères

Les phénomènes redoutés à court terme sont des chutes de blocs (quelques  $m^3$ ) et/ou des éboulements d'un ou plusieurs compartiments instables jusqu'à près d'un millier de  $m^3$  (Figure 7 et Figure 9). Dans cette configuration des phénomènes d'éboulement en masse et grande masse (centaines de milliers à millions de  $m^3$ ) sont aussi possibles mais délicat à estimer en terme d'échéance. Classiquement la chute de compartiment de taille réduite (i.e. les 18 relevés en crête), sera plus fréquente que la chute d'un compartiment ou d'un ensemble très volumineux. En effet, les lois fréquence / volume pour ces phénomènes (établies à partir de base de données événementielles) montrent que les volumes les plus conséquents sont les moins fréquents à l'éboulement. Dans le cas présent, comme indiqué précédemment, quelque soient les volumes considérés, l'échéance de rupture et d'éboulement est difficile à évaluer.



Figure 9 – Exemple de compartiment instable (compartiment n°3 sur les Figure 7 et Figure 8).

En pied, le secteur du Plateau l'Ecole est d'après une étude de 2011<sup>4</sup> (Garnier, 2011), dans sa totalité, plus ou moins fortement exposé (aléa au minimum moyen). Cette cartographie considère les phénomènes de chute de blocs, d'éboulement mais également les phénomènes d'érosion et de glissement de terrain. Sur ce secteur il était conseillé autant que possible de bloquer tout développement de l'urbanisation sur l'îlet et de délocaliser les enjeux bâtis en amont de ce secteur (en contrehaut du chemin de randonnée).

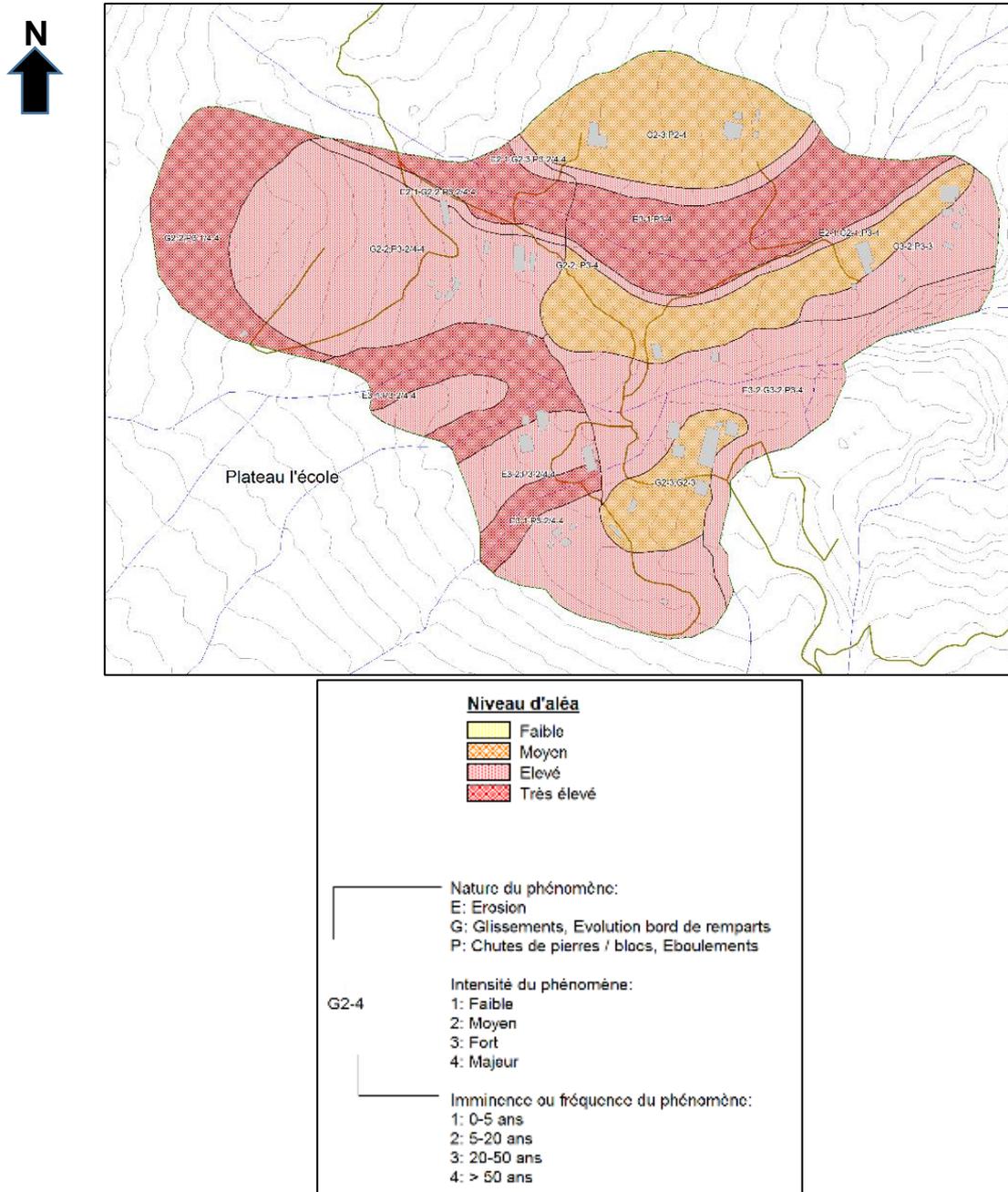


Figure 10 – Zonage des aléas mouvements de terrains d'après l'étude de hiérarchisation des risques de mouvements de terrain dans le Cirque de Mafate (2011)<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> GARNIER C., TAQUET J. (2011) – Hiérarchisation des risques dans le Cirque de Mafate, Saint-Paul (974) – tranche ferme : Ilets de Roche Plate, des Orangers et des Lataniers. Rapport BRGM/RP-59472-FR, 67 p., 47 fig., 2 tab., 4 ann.

## 3. Historique

### 3.1. HISTORIQUE ANCIEN

L'analyse géomorphologique du rempart du Maïdo et du tablier d'éboulis en pied ainsi que le dépouillement des archives et l'interrogation de riverains demeurant à proximité du pied du rempart, dans le cirque de Mafate réalisé dans le cadre du projet MVTerre<sup>5</sup> n'ont pas conclu en l'existence récente d'effondrement en masse au niveau du rempart du Maïdo (moins de 70 ans). Néanmoins des cicatrices ou des couloirs d'éboulement sont régulièrement observés au sein du rempart. Ceci suggère que des événements gravitaires se produisent au sein du rempart, sans qu'ils ne soient forcément recensés (probablement du fait de l'absence d'impact/d'atteinte sur les enjeux).

L'analyse des orthophotographies depuis 2003 (qualité insuffisante des images aériennes plus anciennes) révèle de fréquentes mises en place de pierriers ou d'atteintes regroupées (environ 1 par an) (Figure 11) traduisant une activité élevée de chute de blocs/éboulement au sein de ce versant. Ces événements de volumes de quelques dizaines à milliers de m<sup>3</sup> ne correspondent pas à des effondrements en masse de plusieurs centaines de milliers de m<sup>3</sup>. Sur l'orthophotographie de 1950, deux petites habitations étaient déjà présentes au niveau de l'école de Roche Plate et 40 m en aval du gîte Chez Juliette (cf. localisation Figure 4).

Il n'est ni recensé dans l'historique récent (BdMVT) ni signalé par un riverain vivant dans ce village depuis plus de 70 ans, d'atteinte des habitations par des chutes de blocs. L'habitant de ce village rencontré ainsi que l'agent ONF responsable du secteur confirment néanmoins que les chutes de blocs et des éboulements sont entendus fréquemment sans qu'il soit possible d'être précis dans le type d'évènement survenu que ce soit en terme d'atteinte et de volume mobilisé. Lors des premiers travaux de cartographie de l'aléa MVT à Mafate en 2011, les habitants de Roche Plate nous ont signalé qu'un éboulement rocheux s'est produit à partir du rempart il y a une vingtaine d'années. Les blocs se sont arrêté juste en amont des premières constructions du plateau de l'Ecole<sup>6</sup>.

---

<sup>5</sup> Nédellec JL, M. Cruchet (2008) – "Analyse de la fracturation et suivi des mouvements des remparts du Maïdo et de Mahavel par dispositifs extensométriques" – rapport BRGM RP- 56724-FR – 58 p. – 39 illustrations – 2 annexes

<sup>6</sup> Mompelat J.M., Aubié S, Cruchet M.(2001) Evaluation et cartographie à l'échelle du 1/10 000 de l'aléa « mouvements de terrain » dans le Cirque de Mafate - Rapport BRGM/RP-50782-FR

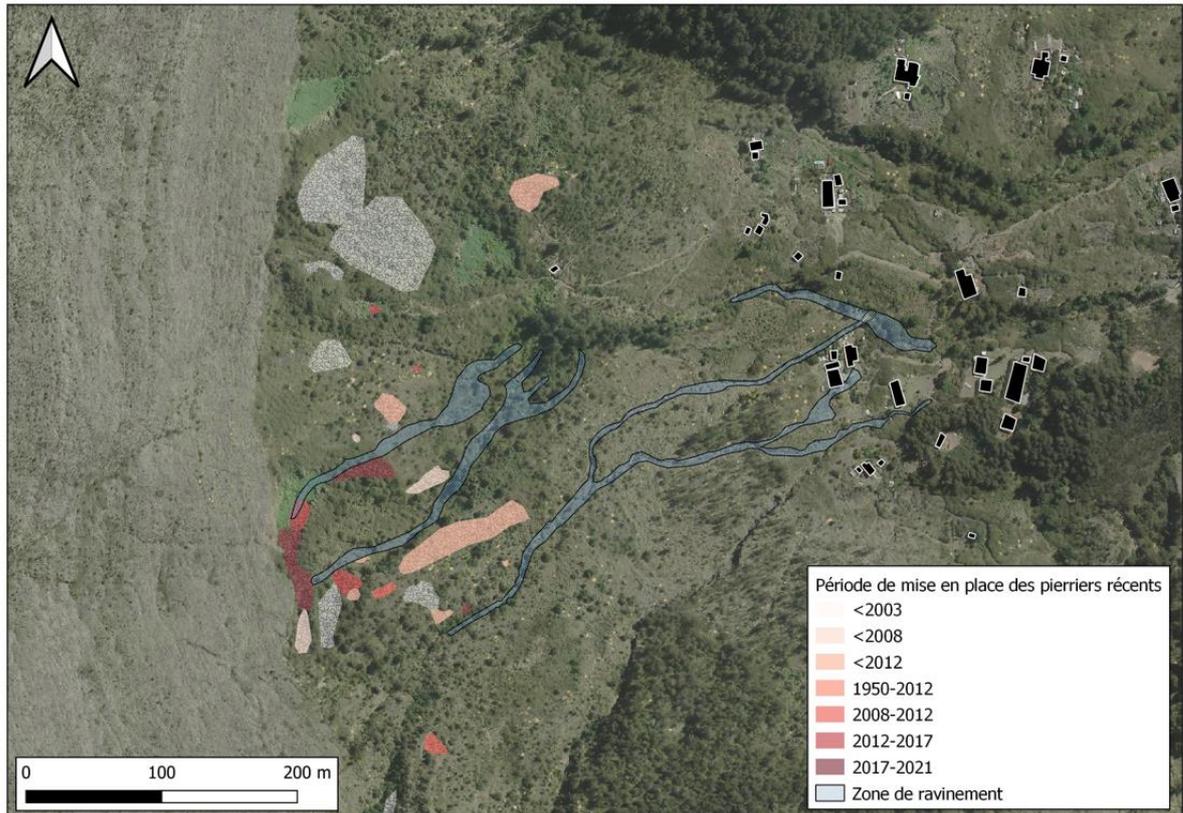


Figure 11 – Localisation des zones de pierriers au pied du rempart de Maïdo et estimation des périodes de mise en place à partir des orthophotographies disponibles.

### 3.2. ACTIVITE DEPUIS L'INCENDIE DE NOVEMBRE 2020

D'après un habitant rencontré, les événements de chutes de blocs auraient été plus fréquemment entendus suite à l'incendie de novembre 2020.

L'aggravation de l'aléa chute de blocs est confirmée par l'apparition de nombreux couloirs de propagation s'initiant au niveau de la crête au droit de la zone incendiée alors que de part et d'autre aucune concentration de traces de propagation n'est visible (Figure 12).

La comparaison du modèle numérique de surface (MNS) produit par photogrammétrie avec les photographies aériennes acquises par drone lors de l'inspection du BRGM du 03/09/2021 avec le MNS de l'IGN de 2017 à résolution de 0,25 m (Figure 17), ne montre pas de dépôt de matériaux en pied de rempart depuis 2017 sur des épaisseurs dépassant la limite de précision altimétrique de l'ordre de 1 m. Les volumes globaux de chaque événement éboulé suite à l'incendie paraissent donc limités (probablement inférieurs à quelques m<sup>3</sup> voire rarement dizaines de m<sup>3</sup>) sans pour autant que leur fréquence soit faible au regard des nombreux couloirs identifiés (Figure 12).

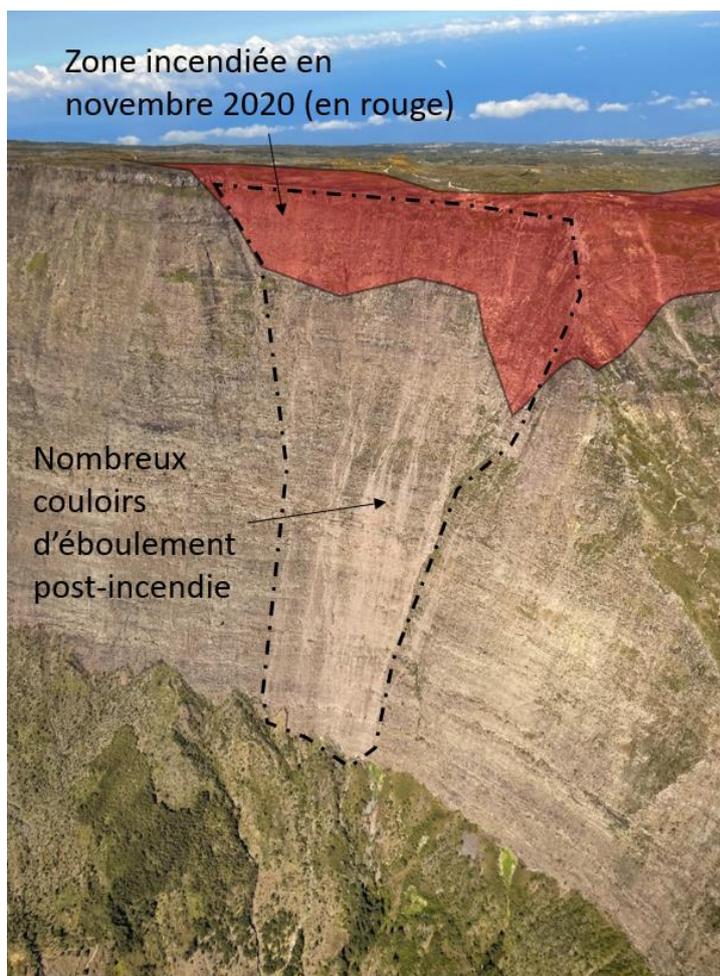


Figure 12 – Concentration de couloirs d'éboulement récemment activés au niveau de la zone incendiée.



Figure 13 – Atteintes récentes de blocs en pied de rempart.

Pour rappel, du 9 au 13/11/2020, plusieurs équipes travaillaient au rétablissement des équipements de télécommunication détruits par l'incendie ayant affecté le site du Maïdo. Deux techniciens de la gendarmerie s'attachant à remplacer les antennes militaires ont signalé au SDIS et à l'ONF le 12 ou le 13/11/2020 avoir constaté une aggravation de l'ouverture d'une fissure qu'ils franchissaient à plusieurs reprises depuis 3 jours sur place (Figure 14). Le compartiment rocheux concerné correspond à celui indexé 2 sur les Figure 7 et Figure 8, d'un volume estimé à plus de 400 m<sup>3</sup>. Selon ce témoignage, cette fissure se serait ouverte d'une dizaine de centimètres et le dénivelé se serait accentué de part et d'autre de la discontinuité (élévation de la bordure côté rempart) pouvant s'expliquer par un basculement du compartiment. Ce sentiment d'aggravation de l'ouverture de la fissure a aussi été exprimé par d'autres techniciens télécoms privés et des agents ONF rencontrés sur le site.



Figure 14 – Découpages de compartiments rocheux sur la zone des antennes et localisation du témoignage d'aggravation supposée de l'ouverture d'une fissure entre le 9 et le 13/11/2020, compartiment 1 et 2 (cercles verts) localisés sur la Figure 7.

A l'appui de ce témoignage, les militaires ont transmis au BRGM des photographies de la zone où cette évolution a été perçue. Ces clichés ont été comparés aux photos du BRGM du 13/11/2020. Les photographies (gendarmerie/BRGM) prises avec des angles de vues et des conditions de lumière différentes sont difficilement comparables, et ne permettent pas de distinguer avec certitude une évolution. Ce témoignage a été considéré comme fiable. Une telle évolution pouvait alors indiquer une initiation du processus de rupture.

Six extensomètres à lecture visuelle (précision de l'ordre du centimètre) ont été installés par le BRGM en urgence suite à l'incendie dans la zone où une ouverture de fissure avait été signalée et ont été ensuite suivis par l'ONF afin d'identifier éventuelle une évolution (Figure 15).

Deux saisons cycloniques après l'installation de ces extensomètres aucune évolution n'a été à ce jour observée *modulo* la précision de la mesure estimée à 2 mm.

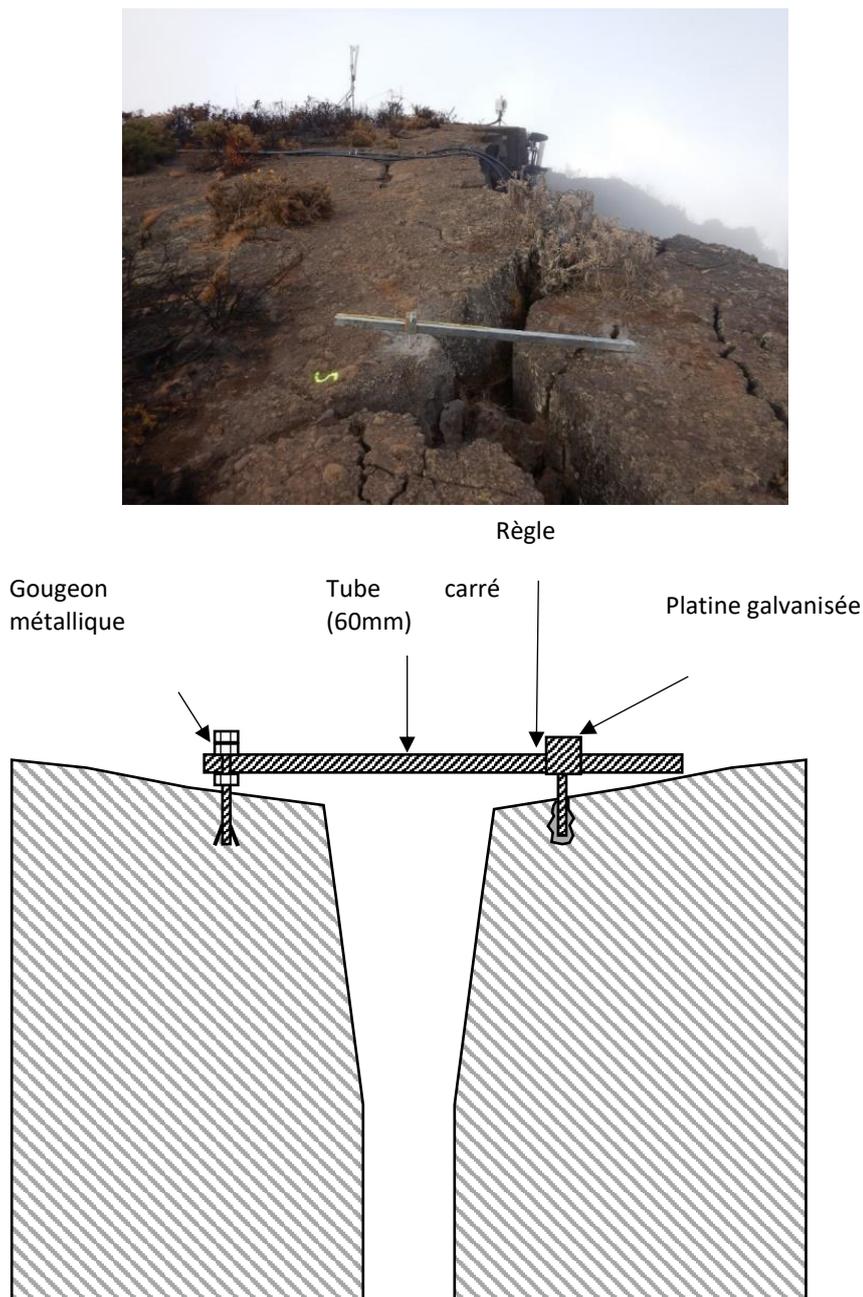


Figure 15 – Un des six extensomètres à lecture visuelle installés en urgence sur la zone où l'ouverture d'une fissure a été signalée et à ses abords et schéma de principe de ces équipements.

### 3.3. EPISODE EROSIF ET LAVE TORRENTIELLE DE MARS 2021

Lors de l'inspection de la zone en pied de rempart effectuée le 03/09/2021, il a été constaté des phénomènes récents de profonds ravinements et des dépôts de lave torrentielle. Le Gîte du Bronchard a été impacté de même qu'un petit pont en bois dont le garde-corps a été emporté.

Un modèle numérique de surface (MNS) avec une résolution de 12 cm a été produit par photogrammétrie avec les photographies aériennes acquises par drone lors de cette inspection. En comparant ce MNS au MNS à 0,25 m produit par l'IGN à partir de la campagne ORTHO de 2017 (Figure 17), on identifie l'incision du tablier d'éboulis par plusieurs axes d'écoulement sur une profondeur de plusieurs mètres (6 m au maximum).

Les riverains indiquent que cet événement est survenu en mars 2021. Les chroniques de pluviométrie sur la zone (station Météo France du Piton Maïdo) montrent en effet un épisode de fortes pluies du 6 au 7 mars 2021, avec des cumuls de 190 mm en 24h et de 66 mm en 1h, correspondant à une intensité importante mais non exceptionnelle (durée de retour supérieure 2 ans d'après les seuils Shypre 2012).

Selon les riverains interrogés, ils n'avaient jamais par le passé observé ce type de phénomène.

Les dépôts de matériaux observés ne correspondent pas à des atteintes d'éboulement. Mais, à défaut de pouvoir être uniquement rattaché à des pluies exceptionnelles, ce phénomène pourrait être expliqué par une disponibilité accrue des matériaux remobilisables en pied de versant. Dans ce cas, cet épisode pourrait également confirmer l'augmentation de l'activité de chute de blocs suite à l'incendie.



Figure 16 – En haut à gauche et à droite : Gîte Bronchard impacté à son angle sud-ouest (amont) par des matériaux vraisemblablement charriés par une lave torrentielle ; En bas à gauche petit-pont endommagé par les laves torrentielles..

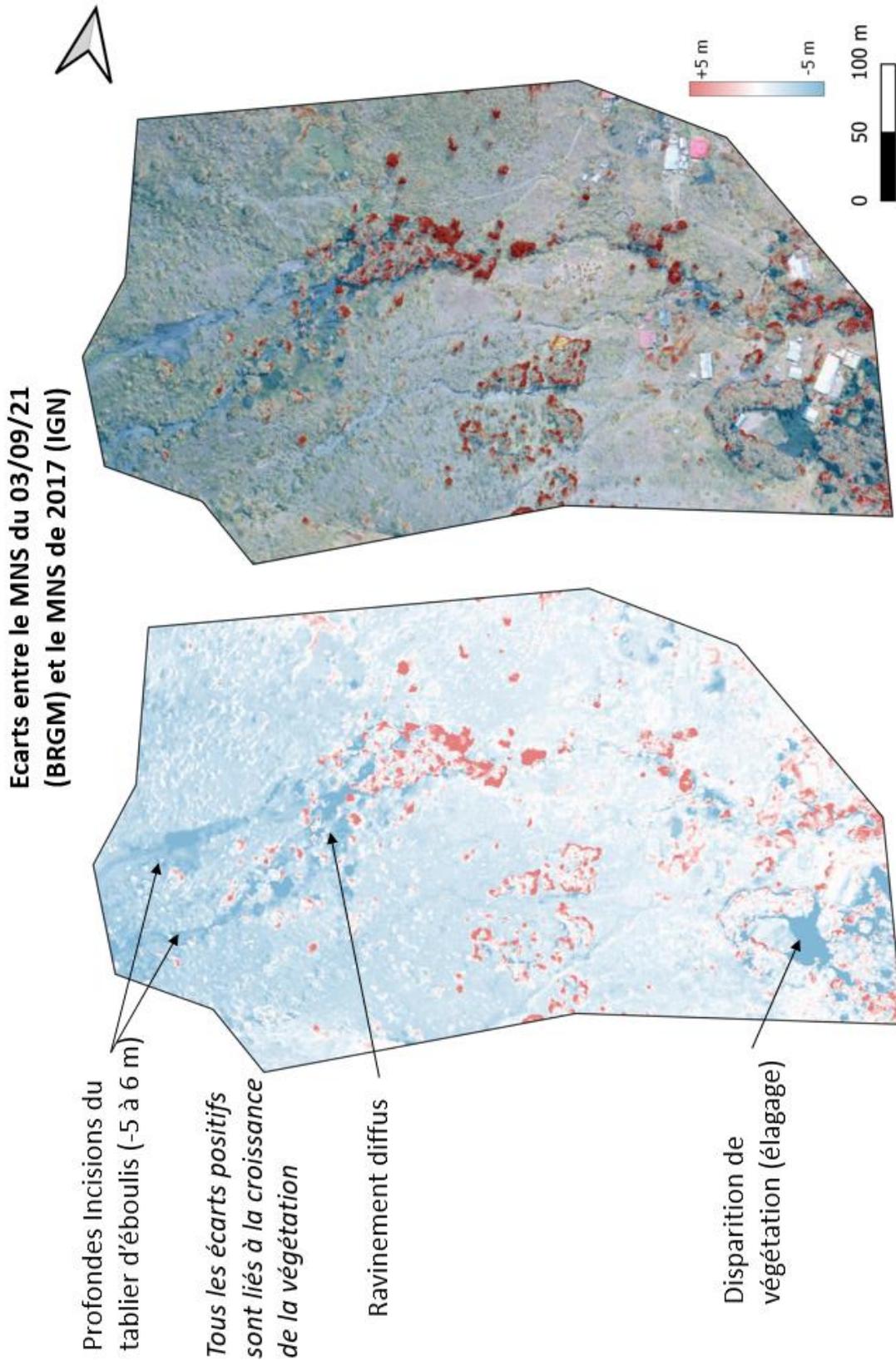


Figure 17 – Différence du Modèle numérique de surface du 03/09/2021 avec le Modèle Numérique de Surface de 2017 (IGN) et principaux constats d'évolution.

### 3.4. INVENTAIRES DES ATTEINTES DE BLOCS EN PIED DE REMPART

Une inspection a été organisée en pied du rempart du Maïdo le 03/09/2021 afin d'inventorier de façon exhaustive les blocs éboulés du rempart pour calibrer les modélisations de trajectographie et définir le/les volumes de référence à considérer dans les modélisations.

Au regard de la nature géologique du substratum, à savoir des brèches d'avalanches de débris correspondant à des dépôts d'anciens éboulements, il est apparu délicat d'identifier clairement les blocs éboulés du rempart dominant de ceux autochtones. De plus, le contexte topographique et la présence d'une végétation arbustive localement dense ont entravé la progression au sein de la zone d'étude.

Au final, l'inventaire des blocs a été réalisé par pointé sur l'orthophotographie haute résolution et sur le MNS produits par le BRGM par photogrammétrie à partir des images aériennes drones acquises lors de cette inspection du 03/09/2021.

Le critère principal d'inventaire des blocs était la surélévation de celui-ci par rapport au terrain naturel avoisinant. Il a été considéré qu'un bloc inclus dans le sol était autochtone et inversement qu'un bloc ressortant totalement de la topographie alentours provenait du rempart. Cette approche reste entachée d'incertitude, notamment parce que des blocs présents dans le substratum de brèche d'avalanche de débris peuvent être révélés par l'érosion préférentielle voire le terrassement des terrains qui l'entourent et inversement vu la hauteur du rempart, des blocs éboulés peuvent s'enfoncer dans le sol en place au regard des très hautes énergies cinétiques. Pour cela, pour chacun des blocs identifiés, un indice de confiance (faible, moyen, élevé) a été attribué pour qualifier la probabilité qu'il soit issu du rempart dominant actuellement. D'autres critères à dire d'expert sont considérés dans la qualification de cet indice de confiance de l'origine des blocs, notamment l'aspect fraîchement cassé et peu émoussé des blocs ou l'orientation de plusieurs blocs suivant une ligne de propagation.

Les blocs au sein des pierriers et dans les zones de ravinement n'ont pas été pointés individuellement. Le relevé des blocs dans les pierriers proches du pied de rempart n'est pas déterminant car les modélisations de trajectographie sont principalement calibrées sur les atteintes distales.

Pour chaque bloc, un volume approximatif a été estimé en fonction de son aire en plan et de son élévation sur le modèle numérique de surface. Suivant cette approche, une forte incertitude persiste pour l'estimation des volumes réduits, notamment ceux inférieurs à 1 m<sup>3</sup>.

Selon ce protocole, 374 blocs ont été inventoriés (83 blocs avec une confiance forte, 227 blocs avec une confiance moyenne, 64 blocs avec une confiance faible, Tableau 1 et Figure 18).

Tableau 1 : Volumes des blocs identifiés en fonction de l'indice de confiance sur l'origine du rempart

	Confiance forte	Confiance moyenne	Confiance faible	Total
Nombre de blocs pointés	83	227	64	374
Volume estimé moyen	2,7 m <sup>3</sup>	1,9 m <sup>3</sup>	2,5 m <sup>3</sup>	2,0 m <sup>3</sup>
Volume estimé médian	1 m <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup>	0,5 m <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup>
Percentile 95% (cela signifie qu'au sein de l'échantillon statistique, seuls 5% des événements dépassent ces valeurs. Ces valeurs sont celles recommandées pour le dimensionnement de parade d'après les guides C2ROP pour la conception des merlons et des écrans d'arrêt)	10 m <sup>3</sup>	8,5 m <sup>3</sup>	18,5 m <sup>3</sup>	8,5 m <sup>3</sup>

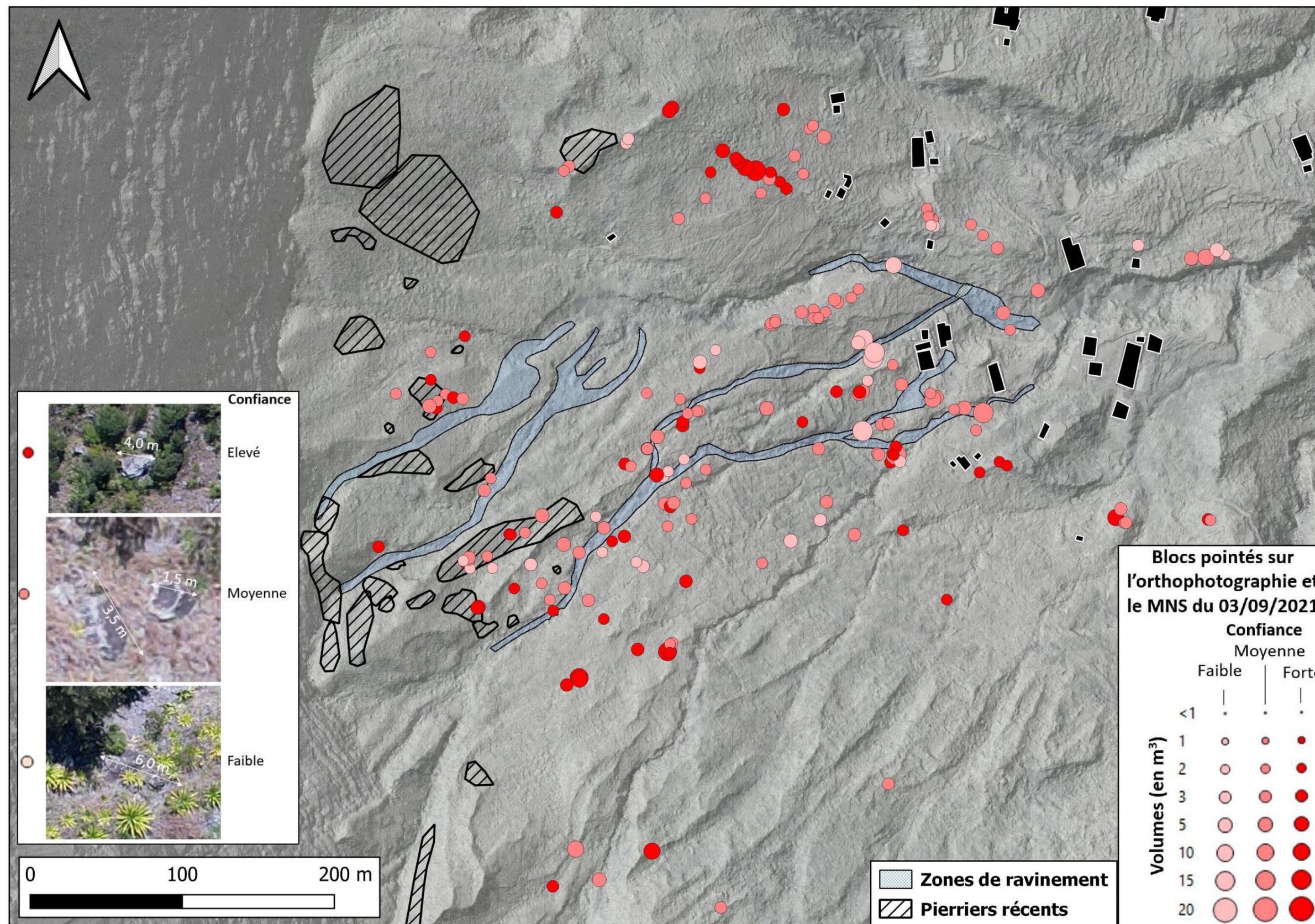


Figure 18 – Localisation des blocs, des pierriers et zone de ravinelements pointés sur l'orthophotographie BRGM du 03/09/2021.

## 4. Evaluation de la probabilité de propagation

La probabilité de propagation est fonction des caractéristiques du versant étudié (pente, présence d'obstacles, nature et état du sol, etc.) et du projectile (forme, dimensions, etc.). La combinaison de ces nombreux paramètres régissant la propagation la rend aléatoire (MEZAP, 2021<sup>7</sup>).

Les méthodes mises en œuvre pour déterminer les probabilités de propagation sont soit : empiriques (à partir de bases de connaissances) soit prospectives, s'appuyant sur des calculs trajectographiques en 2D et 3D.

Les probabilités de propagation et d'atteinte annuelles sont exprimées en fonction des qualificatifs des seuils définis dans la note MEZAP 2021 (Tableau 2). Cette terminologie est retenue dans la présente étude, avec pour les probabilités de propagation les éléments suivants :

Tableau 2 : Seuils de probabilité de propagation définis par la Note MEZAP 2021

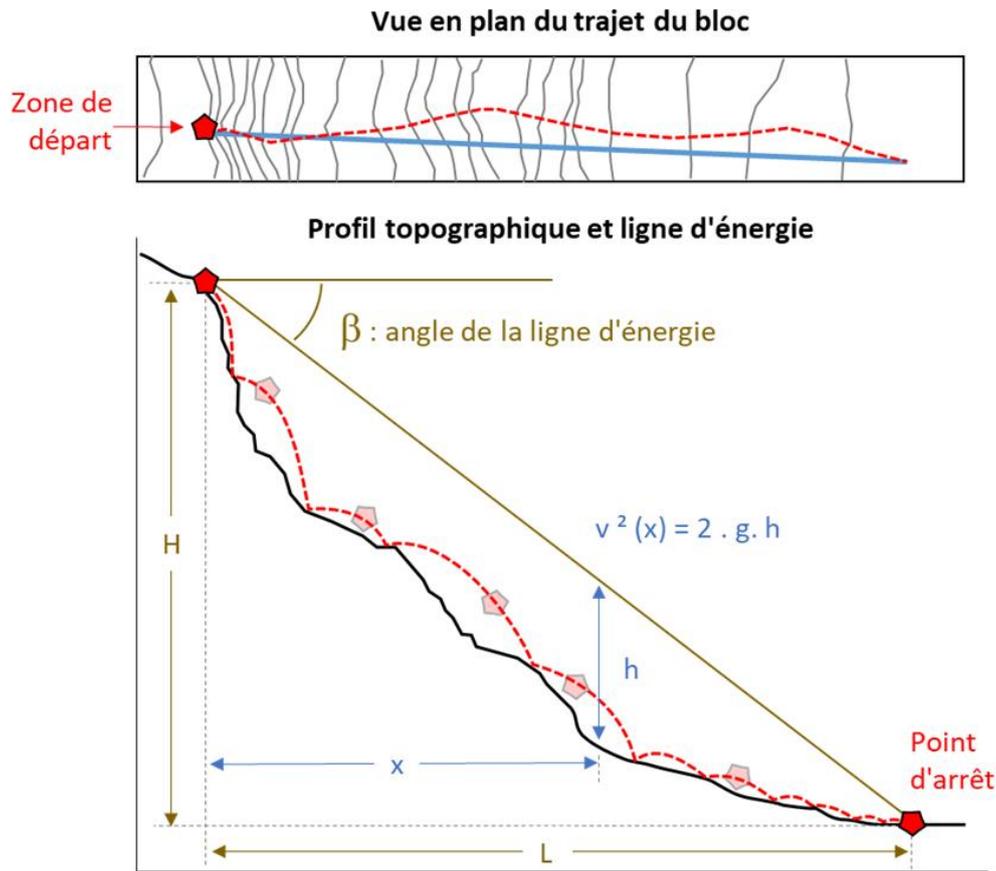
Probabilité de propagation		Qualificatif MEZAP 2021
$<10^{-6}$	$<1/1\ 000\ 000$	Très faible
$10^{-6}$ à $10^{-5}$	$1/1\ 000\ 000$ à $1/100\ 000$	Faible
$10^{-5}$ à $10^{-4}$	$1/100\ 000$ à $1/10\ 000$	Moyenne
$10^{-4}$ à $10^{-3}$	$1/10\ 000$ à $1\ 000$	Forte
$10^{-3}$ à $10^{-2}$	$1/1\ 000$ à $1/100$	Très Forte
$>10^{-2}$	$> 1/100$	Extrêmement forte

### 4.1. APPROCHE EMPIRIQUE : METHODE DES LIGNES D'ENERGIES

#### 4.1.1. Application de la méthode des lignes d'énergie à un profil 2D

La méthode de la « ligne d'énergie » est une méthode empirique développée par HEIM A. en 1932 qui permet d'estimer à partir d'une zone de départ la localisation du point d'arrêt maximal probable d'un projectile. La méthode des lignes d'énergie permet de définir l'extension prévisible des emprises de propagation par le choix de valeurs d'angles d'énergie en fonction notamment de la morphologie des sites étudiés. Les données d'entrée sont uniquement morphologiques définies par un profil en « ligne » directe (Figure 19).

<sup>7</sup> Note technique MEZAP : méthodologie de caractérisation de l'aléa rocheux dans le cadre d'un PPR ou d'un PAC (BRGM, CEREMA, DDTM 06, DDT 38, DDT 73, DDT74, INERIS, INRAE, MTE/DGPR, ONF-RTM, Univ. G. Eiffel)



La méthode de la ligne d'énergie permet d'obtenir une bonne estimation des enveloppes de propagation en cas de chute de blocs isolés, cependant la méthode est uniquement basée sur le profil topographique du versant et ne prend pas strictement en compte :

- Les caractéristiques des blocs (volume, forme...)
- Le mécanisme de rupture ;
- La nature du sol au niveau de la zone de propagation (propriété mécanique et rugosité).

Le guide MEZAP (annexe 3) paru en 2021 propose des plages indicatives de valeurs d'angles en fonction des principaux types de profil topographique des versants. La configuration du rempart du Maïdo, et plus généralement de la plupart des remparts de La Réunion, ne fait pas partie des profils types en raison de la hauteur exceptionnelle de ces parois.

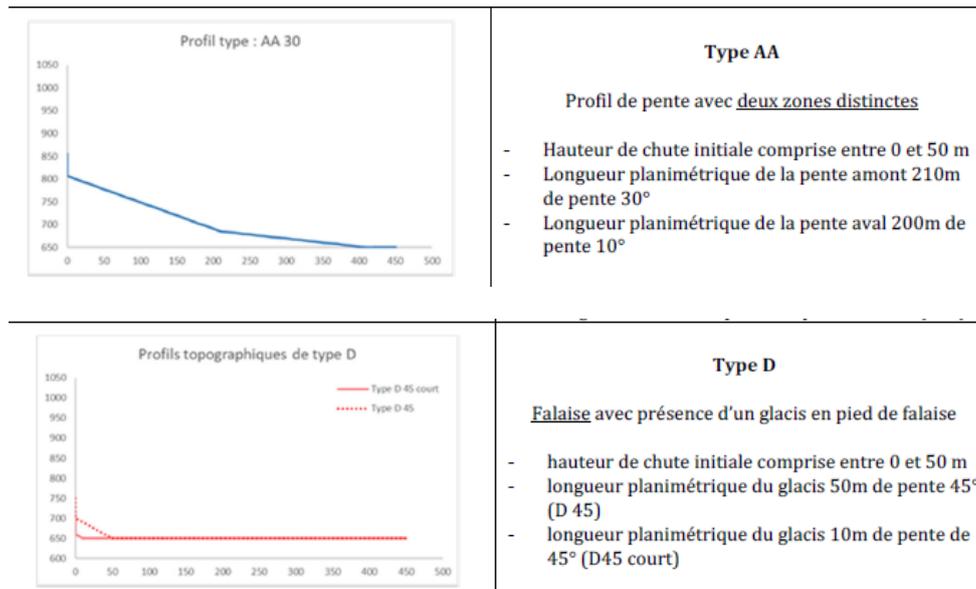
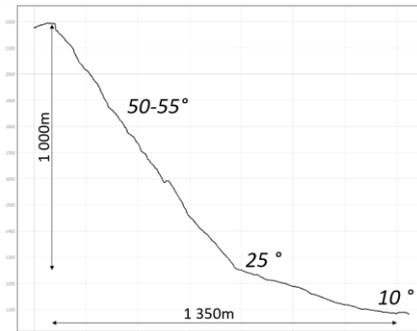


Figure 20 – Profil du rempart du Maïdo (en haut) et profil type AA30 (au milieu) et D (en bas) de la note MEZAP 2021.

Les profils types géomorphologiquement les plus proches présentés dans ce guide sont les profil type AA et D, pour lesquels il est indiqué des plages plausibles d'angles de lignes d'énergie respectivement entre 32 et 43° et entre 48 et 58° (Figure 20). Ces valeurs indicatives sont à considérer avec beaucoup de précaution, car les hauteurs de chute sont très différentes, près de 20 fois supérieures dans le cas du Maïdo comparativement aux profils type du guide MEZAP2021. La transposition des plages de valeurs d'angle de ligne d'énergie pour ces profils type pourrait être inappropriée pour cerner correctement les enveloppes de propagation en pied de rempart, mais resterait en tout état de cause sécuritaire. A titre d'exemple, la limite de 32° n'est pas réaliste sur ce site car elle impacterait l'Îlet de Roche Plate Eglise situé à plus de 1 km du pied de rempart.

Dans le cadre de la caractérisation de l'aléa chute de blocs dans les PPR à la Réunion<sup>8</sup>, dans ce type de configuration de paroi très redressée, il est retenu une limite de propagation correspondant à une ligne d'énergie de 38 à 40°.

La très forte hauteur du rempart dans la configuration du Maïdo, induit des atteintes et des valeurs d'angles de la ligne d'énergie spécifiques à ce type de configuration, qu'il est délicat d'estimer et de comparer à partir des plages d'angles conseillées dans les guides existants.

<sup>8</sup> Rey A. (2016) – PPR multi-aléas des communes de La Réunion. Propositions d'évolutions méthodologiques. Rapport final. BRGM/RP-66346-FR, 167 p., 57 ill., 38 tabl., 5 ann.

Ce type de configuration de grand rempart très redressé sort en quelque sorte du champ d'application de ces recommandations (MEZAP notamment).

L'estimation des probabilités de propagation ont été précisées à partir de la méthode dite des aires normalisées (Colas, et al. 2017<sup>9</sup>). L'analyse de près de 2800 évènements, dont plus de 70 évènements réunionnais (mais aucun dans une configuration comme celle du Maïdo), définis par les couples (Aire normalisée ( $A_n$ ) sous un profil de propagation en ligne directe, ligne d'énergie ( $\beta$ )) a permis de mettre en évidence l'impact de la morphologie de versant sur la distribution des angles d'énergie. Des lois empiriques reliant  $\beta$  et  $A_n$  ont été proposées pour qualifier la probabilité de propagation le long de profil direct (Figure 21).

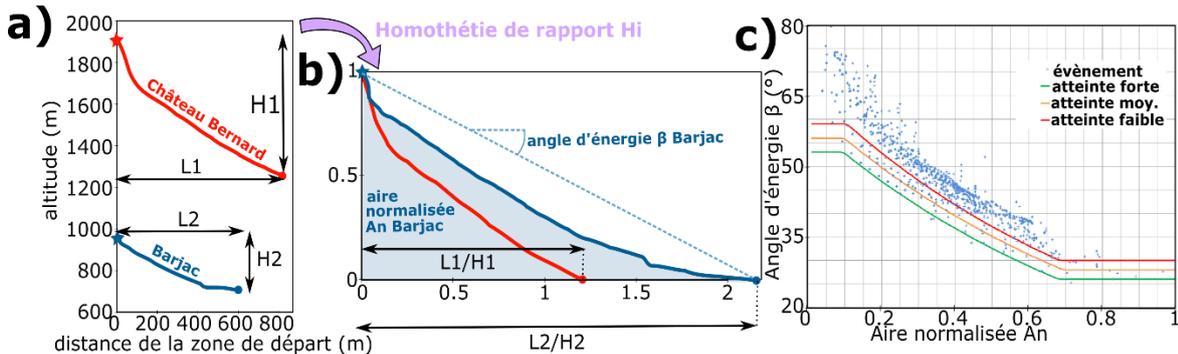


Figure 21 – a) exemple des profils topographiques reliant la position de départ d'un bloc et sa position d'arrêt et b) ces profils après une homothétie de rapport  $H_i$  pour calculer leur aire normalisée  $A_n$ . c) base de données MEZAP de chutes de blocs (points bleus) avec les lois empiriques proposées pour associer des valeurs d'angle  $\beta$  à différents seuils de passage (probabilité d'atteinte faible, moyenne et élevée). (Colas, et al. 2017).

Ces lois ne sont pas pertinentes pour les éboulements où les interactions entre blocs pendant la propagation ne sont pas négligeables car il existe alors une dépendance de la distance de propagation avec le volume de l'éboulement.

L'origine prise pour le profil de propagation en ligne directe passant par les enjeux est située proche du belvédère sud, soit à une centaine de mètres au sud du compartiment 2 de sorte à ne recouper que le versant sous la crête des belvédères où la propagation paraît la plus probable et éviter le versant sous l'arrêt du Piton Maïdo. L'application de ce modèle au profil en ligne directe suivant une ligne de plus grande pente considéré pour le site du Maïdo, passant par les enjeux, montre des plages probables d'atteintes illustrées par les intersections du profil (points violets) avec les lois empiriques dans le diagramme aire normalisée / angle de la ligne d'énergie (Figure 22). La valorisation de cette analyse permet de définir les angles d'énergie pour les différentes plages de probabilité de propagation et d'en déduire les distances correspondantes.

La valorisation de cette analyse permet de définir les angles d'énergie pour les différentes plages de probabilité de propagation et d'en déduire les distances correspondantes (Tableau 3).

<sup>9</sup> Colas B., Faure P., J. Rohmer (2017) – Valorisation des travaux réalisés dans le cadre du GT MEZAP (Année 1). Rapport d'avancement. BRGM/RP-66589-FR

Tableau 3 : Synthèse des distances de propagation avec la méthode des lignes d'énergie estimées avec les lois empiriques de 2017 le long d'un profil

<b>Probabilité de propagation (seuils définis dans MEZAP 2021, cf tableau 2)</b>	Angle de la ligne d'énergie (ALE)	Distance depuis la zone de départ
<b>FORT (<math>10^{-4}</math>)</b>	43°	1242 m
<b>MOYEN (<math>10^{-5}</math>)</b>	39,5°	1389 m
<b>FAIBLE (<math>10^{-6}</math>)</b>	Hors îlet	

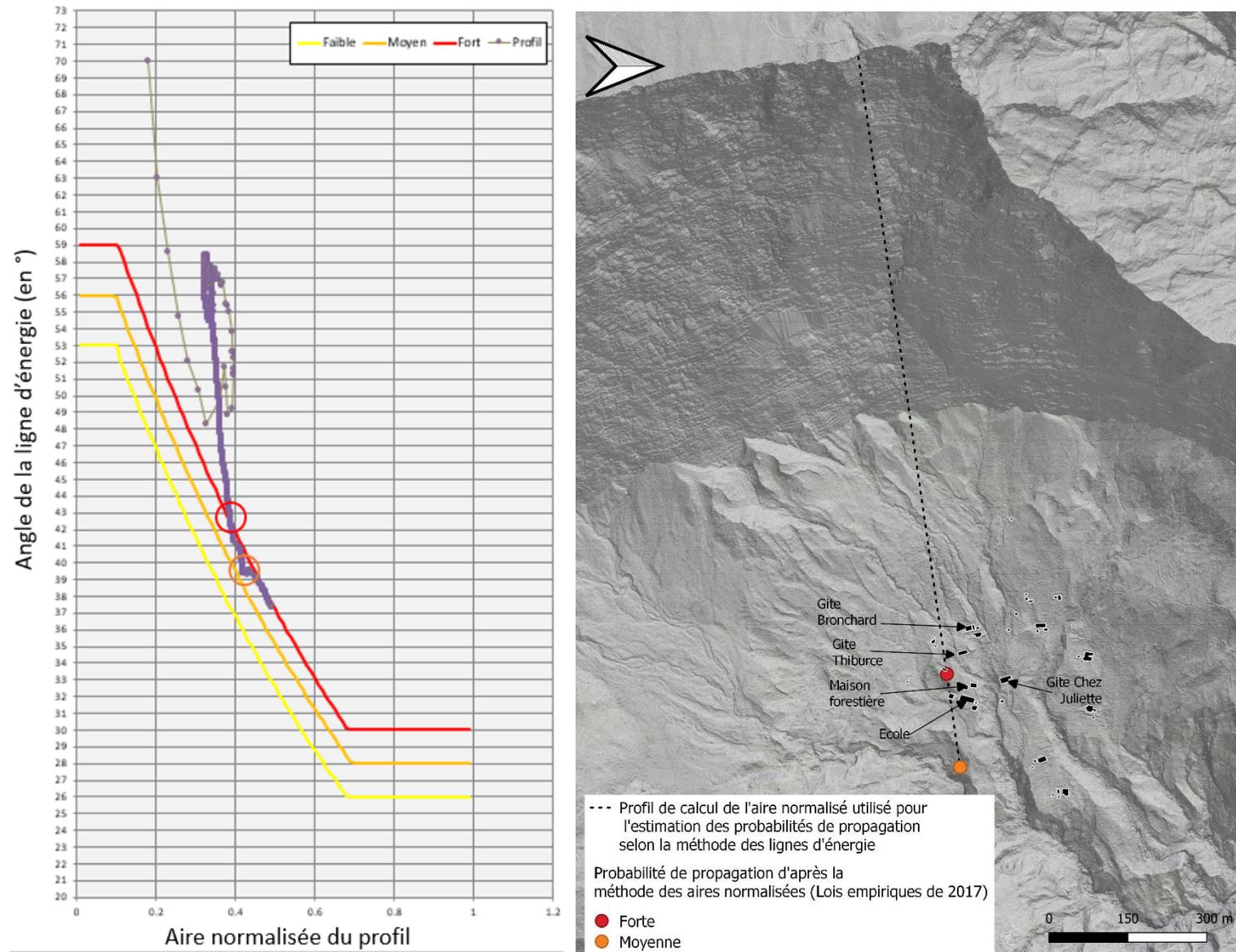


Figure 22 – Application des lois empiriques au profil représenté en violet (à gauche) et restitution spatiale des résultats (à droite).

#### 4.1.2. Application de l'outil d'aide à la cartographie de la propagation des chutes de blocs

L'outil ELANA (Energy Line Angle Normalized Area) (Levy, et al. 2021<sup>10</sup>) a été développé pour utiliser les lois empiriques 2D présentées dans le paragraphe précédent afin de cartographier spatialement la probabilité de propagation des chutes de blocs. ELANA utilise les données topographiques d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), ainsi qu'un raster de même dimension où l'utilisateur déclare les pixels qu'il considère comme zone de départ. La première version de ce logiciel utilisait les lois déterminées à partir de la valorisation de 2800 événements en 2017. En 2021, ces lois ont été ajustées en intégrant un total de 3600 événements. Cette nouvelle méthode conduit à des résultats sensiblement différents que la méthode initiale de 2017.

Les résultats de l'application cartographique de cette méthode à partir des lois empiriques actualisées en 2021 sont présentés sur la figure ci-après (Figure 23) et permettent de définir les 3 enveloppes de propagation (y compris le niveau faible, qui par l'approche profil 2D et à partir de la base de données exploitées en 2017 n'était pas permis, cf. paragraphe précédent).

A partir de cette approche, les enjeux bâtis les plus proches du rempart sont situés en zone de probabilité de propagation moyenne (quelques habitats au nord-ouest) à faible (gîte le Bronchard et gîte Thiburce notamment) alors que les autres enjeux les plus éloignés (comme l'école) ne sont pas concernés.

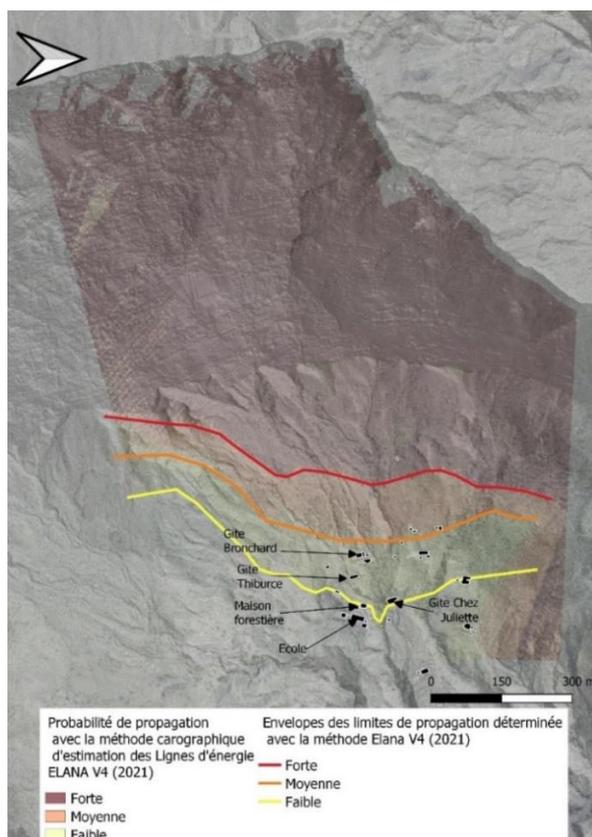


Figure 23 – Résultats de l'application du logiciel Elana V4 avec les lois empiriques basées sur 3600 évènements.

<sup>10</sup> 5<sup>th</sup> RSS Rock Slope Stability, Chambéry, 2021 - LEVY Clara - ELANA: outil d'aide à la cartographie de la propagation en chute de blocs

## 4.2. APPROCHES PROSPECTIVES : MODELISATIONS DE TRAJECTOGRAPHIE 2D ET 3D

La présente analyse de trajectographie 2D est celle produite suite à l'incendie pour définir en situation de gestion de crise l'exposition des enjeux en pied de rempart<sup>11</sup>.

Par rapport à la surface du sol, la trajectoire d'un bloc (évolution dans le temps de sa position et de sa vitesse) est décrite à tout instant par l'un des trois types de mouvement suivants :

- La chute libre dans l'air ;
- Le glissement frottant ou le roulement frottant sur la surface du sol ;
- L'impact sur le sol.

L'impact du bloc sur le sol, caractérisé principalement par une forte dissipation d'énergie, est considéré ici comme un phénomène quasi-instantané en négligeant la profondeur de pénétration dans le sol (il se produit à une position fixe). A partir d'un mouvement de chute libre par exemple, l'impact peut conduire soit à un rebond du bloc qui repart alors dans une nouvelle portion en chute libre, soit à un changement de cinématique (en fonction des paramètres de transition), le bloc partant alors dans une portion en glissement ou roulement sur le sol.

La trajectoire du bloc est donc considérée comme une succession de phases cinématiques (portions de trajectoires en chute libre, ou portions en glissement ou roulement frottant) séparées par des phases purement dissipatives (impacts).

### 4.2.1. Scénario de référence : zone de départ et blocs de référence

Le scénario de référence pour lequel une gestion de crise en novembre de 2020 (cf. § 3.2) avait été déclenchée est la chute du compartiment rocheux n°2 d'un volume estimé à plus de 400 m<sup>3</sup> (Figure 7 et Figure 14).

Ce scénario de référence correspond au scénario de type B de la note MEZAP 2021, à savoir la chute d'un compartiment isolé et une propagation sur des distances longues avec une fragmentation et des trajectoires indépendantes avec des intensités dépendantes des volumes unitaires et non du volume total. La prise en compte des interactions entre blocs n'est pas nécessaire pour ce scénario. Elle le serait pour l'analyse d'éboulement en masse. La modélisation des trajectoires par des chutes de blocs isolés est adaptée.

Au regard de la hauteur du rempart et sa relative régularité topographique, les vitesses de chutes en pied de rempart approcheront les 400 km/h. Dans ces conditions, et compte tenu de la fracturation native de la roche, les masses ébouées se fragmenteront à l'impact sur le talus d'ébouils. Cette fragmentation s'accompagnera d'une dissipation importante de l'énergie cinétique mais engendrera des projections de fragments à des vitesses importantes. La taille des blocs résiduels (après fragmentation) sera significativement plus petite que le volume initial éboulé. En effet, il n'est pas observé en pied de rempart de blocs extrêmement volumineux qui résulterait d'un éboulement en masse. La modélisation de type chute de bloc isolé est donc considérée pertinente dans cette situation.

---

<sup>11</sup> Le Moigne B., Chaput M., Chevaux S. (2021) – Diagnostic de risques géologiques sur le site touristique du Maïdo et le sentier de La Brèche suite à l'incendie de Novembre 2020. BRGM/ RP-70490-FR. 41 p.

Sur la base de l'inventaire de blocs actualisé (§3.4), la modélisation depuis le compartiment n°2 a été réalisée en considérant la chute d'un bloc isolé de 10 m<sup>3</sup>.

Les vitesses horizontales et verticales de départ sont définies comme nulles.

#### 4.2.2. Modélisation de trajectographie 2D

De modélisations de trajectographie sur un profil en 2D ont été réalisés au moyen du logiciel de trajectographie PIERRE98<sup>12</sup>. Il s'agit de définir pour les simulations trajectographiques, le type de bloc pouvant atteindre l'enjeu. L'analyse des événements connus permet d'établir les hypothèses adaptées au secteur (volume, forme, élanement, masse volumique). L'outil (PIERRE98) utilisé ne permet que de simuler la chute de blocs isolés. La propagation d'éboulement avec interactions entre les éléments n'est pas considérée. Une fiche descriptive du logiciel PIERRE98 est transmise en Annexe 1

##### a) Topographie

Les modélisations ont été réalisées à partir des données topographiques issues du modèle numérique de terrain avec une résolution de 0,5 m de la DAC acquis en 2013 sur le secteur de Mafate. Afin d'optimiser les calculs, cette topographie a été sous-échantillonnée à 2 m dans le rempart et à 1 m en pied.

Le profil modélisé est représenté en pointillé noir sur la Figure 24. Ce profil s'étire depuis le compartiment où des signes d'instabilités ont été signalés le long de la ligne de plus grande pente qui passe fortuitement par les enjeux bâtis.

##### b) Paramètres « sols » considérés dans les simulations

Les différentes classes de sols considérées dans le logiciel PIERRE98 sont issues de calages nombreux sur la base d'événements observés, expertisés ainsi qu'à partir de tests de lâchers de blocs grandeur nature. De nombreux événements survenus à La Réunion ces dernières années ont notamment été simulés avec PIERRE98 dans le cadre du projet Gerisbloc (Rey et Colas, JAG 2018) afin de préciser ces caractéristiques et de les adapter au contexte réunionnais.

Toute la paroi du rempart a été considérée comme rocheuse (roche mère). En pied de rempart, un type de sol « éboulis grossier » a été considéré sur une emprise de 170 m correspondant à la largeur du pierrier visible sur les orthophotographies et aux observations de terrain du 03/09/2021. En aval, aux abords de l'Îlet de Roche Plate, un type de sol « sol couvert meuble peu épais » a été retenu pour caractériser les dépôts gravitaires anciens. Les paramètres de sol pris en compte sont les suivants.

Tableau 4 : Valeurs des paramètres utilisés dans le logiciel Pierre 98 pour décrire les différents types de sol recoupés par le profil

Types de sol PIERRE98	Rugosité (s en m)		F0 (kN)	
	Angle variant	smax	F0min	F0max
roche mère	3	0.16	320	970
Eboulis grossier	5	0.27	380	540
couvert meuble peu épais (altérites)	3	0.16	420	520

<sup>12</sup> Mellal A., Hungr O. (1998) – PIERRE© - An interactive software for computer-aided rock fall analyses, University of British Columbia, UBC, Vancouver, Canada

Le rôle de frein à la propagation des instabilités de la végétation n'a pas été prise en compte dans cette configuration en raison de sa faible densité en pied de rempart et de la taille des blocs simulés.

La présence des bâtiments n'est pas non plus considérée.

### c) Scénario de référence : zone de départ et blocs de référence

Les coordonnées de départ du bloc sont prises au centre du compartiment rocheux n°2. Le profil de trajectographie est tracé depuis cette zone de départ suivant une ligne de plus grande pente qui passe fortuitement par les enjeux bâtis.

La modélisation a été réalisée en considérant la chute d'un bloc isolé de 10 m<sup>3</sup> de forme parallélépipédique (3 m x 2,2 m x 2 m ; paramètre shape factor [Mella, 1999] SF = 0,56). Pour la masse volumique des blocs rocheux, une valeur de 2,65 tonnes/m<sup>3</sup> a été considérée.

Les vitesses horizontales et verticales de départ sont définies comme nulles.

### d) Résultats des modélisations de trajectographie 2D

L'absence d'événement bien documenté ou avec des traces de trajectoires complètes sur cette zone a fait défaut à la calibration de ce modèle dans un contexte de paroi de très grande hauteur pour lequel les trajectoires sont mal connues.

La convergence de l'estimation de la probabilité P par simulation Monte-Carlo (tirage au sort) est donnée par la formule suivante :  $N = 1 / (P \times 0.1^2)$  avec N : nombre de simulations nécessaires pour une erreur visée de 10%. Pour viser une probabilité de 10<sup>-6</sup> (faible) il conviendrait de réaliser 100 000 000 lancers. L'outil Pierre98 utilisé ne permet pas de simuler plus de 1 000 lancers à la fois<sup>13</sup>.

Les calculs sont réalisés pour 5000 départs distincts (5 runs de 1 000 lancers). En conséquence, avec 5000 tirs, la probabilité ciblée est de 2 10<sup>-2</sup>. Afin d'estimer des niveaux de probabilités plus faibles, une extrapolation linéaire des distributions d'arrêt des blocs (ligne noire dans le prolongement de la ligne pointillée rouge sur la Figure 24) est proposée<sup>14</sup>. Les valeurs seuils pour les probabilités de propagation (faible, moyenne et forte) sont définies conformément au guide méthodologique MEZAP 2021 (cf Tableau 2). Ces seuils de probabilité de propagation sont spatialisés sur la Figure 24 et les résultats sont fournis ci-après (Tableau 5).

Tableau 5: Synthèse des distances de propagation et angles des lignes d'énergie correspondante (Pierre98)

Probabilité de propagation	Angle de la ligne d'énergie	Distance de propagation
FORT (10 <sup>-4</sup> à 10 <sup>-3</sup> )	43°	1212 m
MOYEN (10 <sup>-5</sup> à 10 <sup>-4</sup> )	42°	1255 m
FAIBLE (10 <sup>-6</sup> à 10 <sup>-5</sup> )	41°	1300 m

<sup>13</sup> Bect J, Ginsbourger D., Li L., Picheny V., Vazquez E., Sequential design of computer experiments for the estimation of a probability of failure - Stat Comput (2012) 22:773–793.

<sup>14</sup> Pour paramétrer la queue de la distribution il est retenu une loi d'extrapolation linéaire. Il est bien noté que la prise en compte d'autres lois (notamment loi de Pareto généralisée GPD) donnerait des résultats différents, a priori légèrement plus pessimistes au regard de simulations réalisées dans différents contextes. Ces extrapolations ont toutefois des limites au regard des irrégularités topographiques du site.

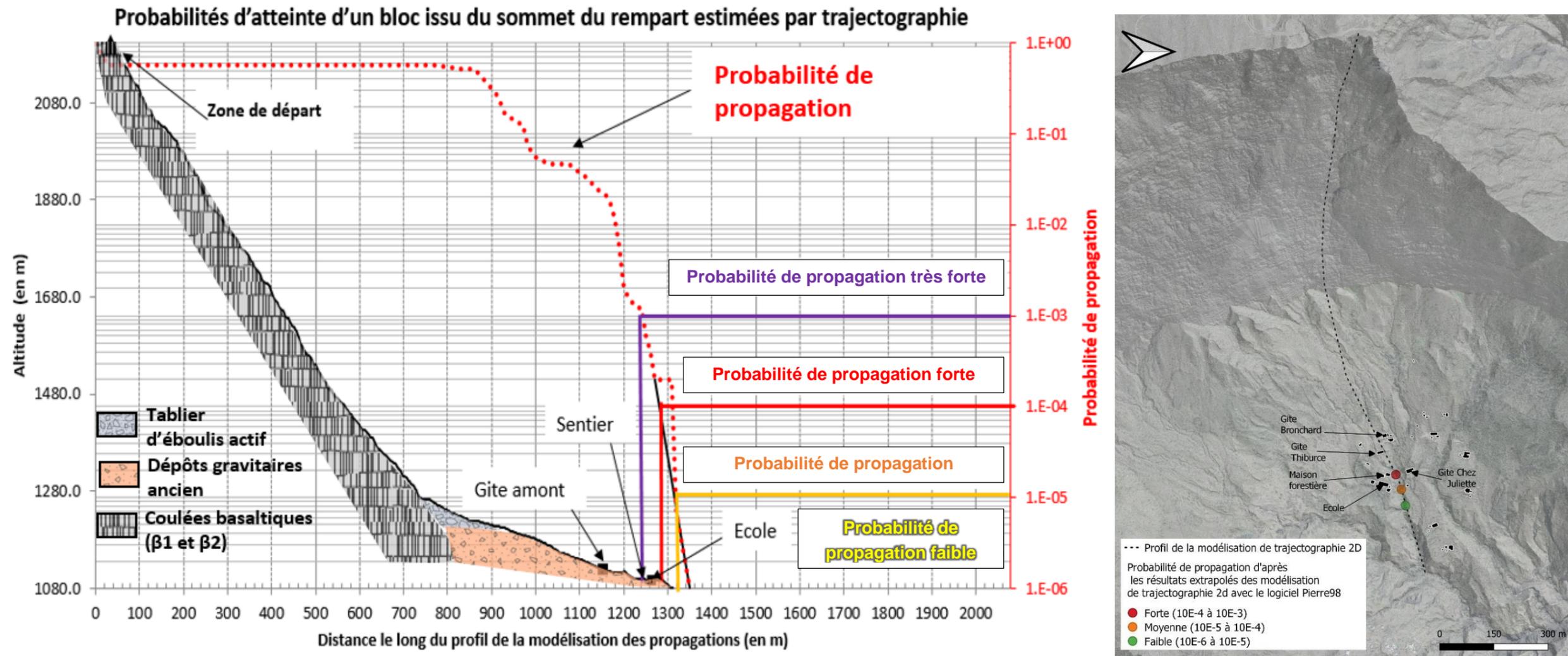


Figure 24 – Résultats des modalisations de trajectographie 2D réalisée à l'aide du logiciel Pierre98 (à gauche) et localisation des seuils de probabilité de propagation Faible, Moyenne et Forte définis à partir d'une modélisation de trajectographie 2D avec Pierre98 le long d'un profil (pointillé noir) (à droite).

### 4.3. MODELISATIONS DE TRAJECTOGRAPHIE 3D

#### a) *Approche et calibrations des paramètres*

A défaut d'événement de chute de blocs dont la trajectoire complète (zone de départ, rebonds, roulement, zone d'arrêt) serait connue ou aurait pu être reconstituée à partir de traces visibles sur le terrain, les modélisations de trajectographie 3D ont été calibrées de sorte à reproduire au mieux les arrêts issus de l'inventaire des blocs pointés sur une orthophotographie haute résolution acquise le 03/09/2021 (cf. §3.4).

La calibration à l'échelle de l'ensemble du site a pour objectif de déterminer les paramètres des modèles du scénario de référence (scénario de gestion de crise), à savoir la chute du compartiment n°2.

Pour cette calibration, les sources considérées sont les plus hautes zones de départ de l'ensemble du versant dominant susceptible de produire ce type d'atteinte, c'est à dire la crête orientée N-S partant de « La Vierge » jusqu'au Piton Maïdo puis l'arrête orientée SO-NE descendant du Piton Maïdo vers la Brèche.

En raison des incertitudes parfois fortes quant à la provenance des blocs inventoriés, il n'a pas été recherché à englober tous les blocs recensés, notamment ceux pointés avec une faible confiance et à une distance importante du rempart. La présence d'alignements d'arrêts de blocs avec une confiance élevée a permis d'ajuster le coefficient de déviation latérale avec Rocpro3D.

Les résultats de l'application cartographique de la méthode d'estimation des probabilités de propagation à partir des aires normalisées des profils topographiques (Elana V4, 2021) ont également servi de référence pour fixer un ordre de grandeur des limites de propagations plausibles. En effet la trajectographie en 2D ou en 3D demeure un outil pour la hiérarchisation de l'aléa de propagation, et le couplage des méthodes lignes d'énergie, trajectographie est encouragé dans la note MEZAP 2021. Cette approche de calage est jugée sécuritaire dans la mesure où les limites de propagations obtenues avec la méthode Elana sont jugées englobantes.

L'absence d'impact de blocs historiques sur les enjeux bâtis, confirmés par le témoignage d'un habitant de longue date du secteur sont des indications déterminantes considérées pour calibrer les modélisations de propagation.

Les trajectoires individuelles et notamment les paramètres de déviation latérale et verticale ont aussi été ajustées par comparaison aux couloirs visibles sur la paroi et par analogie avec des événements ou des purges dans des contextes de parois élevées.

#### b) *Outils logiciels utilisés*

Les calculs trajectographiques 3D ont été réalisés avec deux logiciels :

- Rockyfor3D <sup>15</sup> développé par ecorisQ (association Franco-Suisse : IRSTEA et EPFL, <http://www.ecorisq.org>) ;

---

<sup>15</sup> Dorren L.K.A., Berger F., 2012. Rockyfor3D (v5.1) à coeur ouvert – Description complète du modèle 3D de chutes de blocs. Publication d'ecorisQ ([www.ecorisq.org](http://www.ecorisq.org)):

- RocPro3D développé par J.D. Barnichon ([http://www.rocpro3d.com/rocpro3d\\_fr.php](http://www.rocpro3d.com/rocpro3d_fr.php) et présentation du logiciel en Annexe 2).

Rockyfor3D est un modèle de simulation en trois dimensions (3D) qui calcule les trajectoires des blocs individuelles lors de leur chute. Ce modèle associe des algorithmes déterministes basés sur des données physiques avec des approches stochastiques, ce qui fait de Rockyfor3D ce que l'on appelle un modèle probabiliste de trajectographie. Rockyfor3D simule la trajectoire d'un bloc en 3D (représentation vectorielle), en calculant des séquences de chute libre dans l'air et de rebonds sur la surface de la pente, et d'impacts contre des arbres le cas échéant. Le roulement est représenté par une séquence de micro rebonds et le glissement des blocs n'est pas modélisé. L'angle de déviation après un rebond sur la surface de la pente est déterminé par la topographie, par la direction de chute du bloc avant le rebond et par sa vitesse. Ce paramètre n'est pas accessible à l'utilisateur. A l'exception des dimensions des blocs, Rockyfor3D utilise des variables probabilistes.

Le logiciel RocPro3D, utilise des principes voisins de Rockyfor3D, mais intègre en plus les mouvements de glissement ou de roulement dans la trajectoire du bloc. Les variables liées aux paramètres initiaux des blocs et aux paramètres des sols (interactions et transitions de mouvement) sont formulées par des lois de probabilité qu'il est possible de moduler voire de désactiver.

En pratique, il est délicat de calibrer les modèles avec des logiciels différents pour obtenir des résultats identiques d'un scénario donné. Par ailleurs, le logiciel RocPro3D intégrant des mécanismes de propagation plus complexes et un plus grand nombre de variables probabilistes, les temps calculs sont significativement plus longs qu'avec le logiciel Rockyfor3D.

Les modélisations réalisées pour déterminer des probabilités de propagation « faible » nécessite de générer plusieurs millions de lancés. Ces calculs nécessitent des ressources informatiques importantes.

Il est rappelé que la convergence de l'estimation de la probabilité P par simulation Monte-Carlo (tirage au sort) est donnée par la formule suivante:  $N = 1 / (P \times 0.1^2)$  avec N : nombre de simulations nécessaires pour une erreur visée de 10%. Pour viser une probabilité de  $10^{-6}$  (faible), il conviendrait ainsi de réaliser 100 000 000 lancés.

#### *c) Données d'entrées des modèles*

##### Topographie

Les mêmes données topographiques ont été utilisées pour les modélisations de trajectographies avec les logiciels Rockyfor3D et RocPro3D.

Il s'agit du modèle numérique de terrain de 2013 acquis par technique LiDAR par la DAC Réunion avec une résolution de 0,5 m. D'après le manuel utilisateur de Rockyfor3D la résolution optimisée se situe entre 2 et 10 m. Au vu de l'emprise de la zone de propagation, le MNT a été sous-échantillonné avec une résolution de 5 m pour optimiser les temps de calculs sans affecter la qualité des résultats.

La zone modélisée s'étend sur l'ensemble du rempart et sur les terrains en pied jusqu'à une distance de 1300 m du pied de rempart sur un linéaire (longueur de crête) d'environ 1 600 m, de 700 m au sud de la zone des antennes (Piton Maïdo) se prolongeant vers le Nord sur 900 m le long de l'arrête du Piton Maïdo (Figure 25).

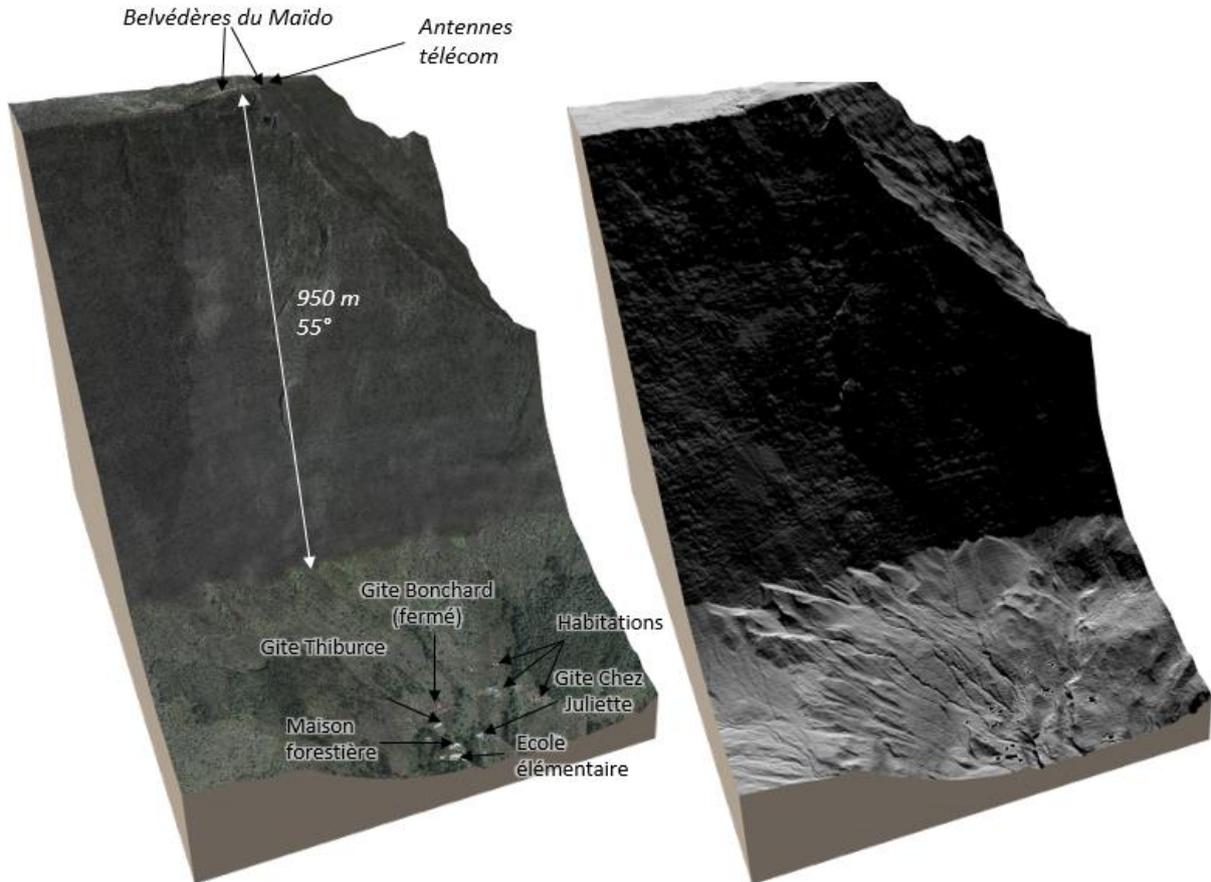


Figure 25 : Modèle numérique de terrain utilisés pour les modélisations de trajectographie 3D

### Type de sols

De la même manière que pour le modèle de trajectographie 2D, 3 types de sols ont été distingués dans les modèles 3D (Figure 26).

Toute la paroi du rempart a été considérée comme rocheuse (roche mère). En pied de rempart, un type de sol « éboulis grossier ou éboulis meuble » a été considéré sur une emprise de 170 m correspondant à la largeur du pierrier visible sur les orthophotographies et aux observations de terrain du 03/09/2021, dont l'emprise a été précisée à partir de la carte des pentes (pente moyenne de 25 à 40°). En aval, aux abords de l'îlet de Roche Plate, un type de sol « sol couvert meuble peu épais » a été retenu.

Le rôle de frein à la propagation des instabilités de la végétation n'a pas été pris en compte dans cette configuration en raison de sa faible densité en pied de rempart et de la taille des blocs simulés. Toutefois les modèles étant calibrés à partir des atteintes réelles influencées par la végétation, le rôle de la végétation est *de facto* intégré aux modélisations. La présence des bâtiments n'est pas non plus considérée.

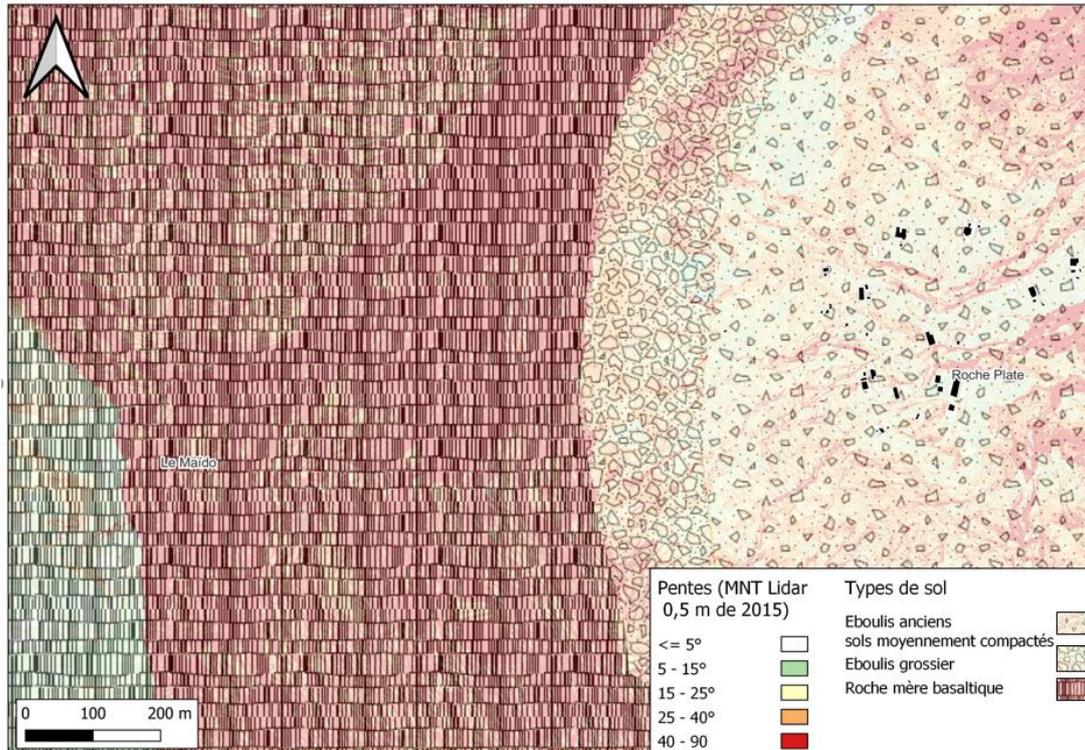
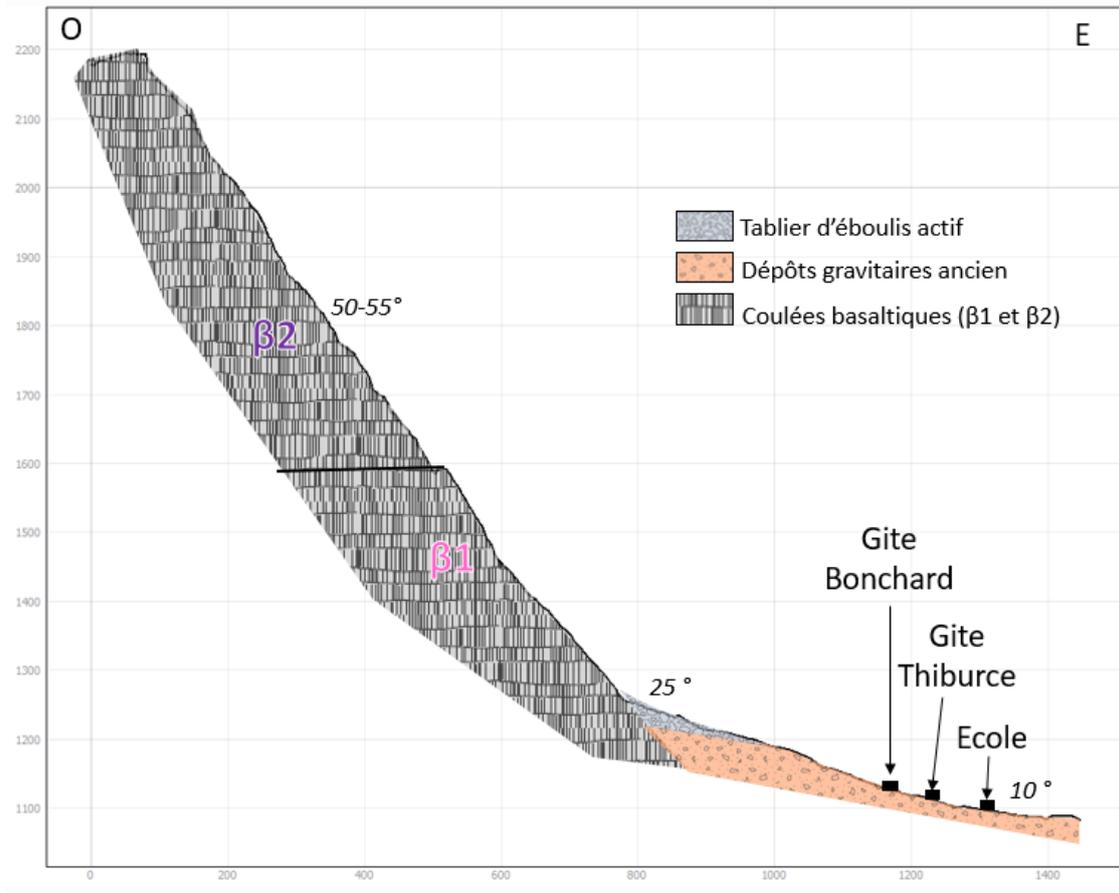


Figure 26 : Types de sols prise en compte sur la zone d'étude dans les calculs de trajectographie 3D avec Rockyfor3D et RocPro3D

### Avec Rockyfor3D

Avec Rockyfor3D, le type de sol (soiltype) représente l'élasticité de la surface. Le logiciel intègre 8 types de sols (types de couverture de surface/sous-sols) préconfigurés. Dans le modèle, ces types de sols sont directement reliés à des gammes de valeurs Rn (= coefficient de restitution normal).

Les types de sols considérés sur la base d'une reconnaissance de terrains sont les suivants :

- Roche mère basaltique dans le rempart (type 6) ;
- Éboulis grossier ( $\varnothing > \sim 10$  cm) (type 4) sur une bande de 150 à 190 depuis le pied du rempart ;
- Piste forestière, éboulis ancien correspondant aux brèches d'avalanche de débris considérées comme le substratum en fond de cirque sur l'ensemble de la zone de la modélisation, (type 3).

La rugosité de la surface est définie par trois classes de probabilité de dimensions appelées Rg70, Rg20, et Rg10 (Tableau 6). Chacune de ces classes est représentée par une carte raster et correspond à la hauteur en m d'un obstacle représentatif rencontré par un projectile dans respectivement 70%, 20% et 10% des cas lors d'un rebond dans une zone homogène sur la pente étudiée. La gamme des valeurs de rugosité varie de 0 à 100 m.

Tableau 6 : Types de sols et paramètres de rugosité retenus pour la modélisation de trajectographie 3D avec Rockyfor3D

SOIL TYPE	Rg70	Rg20	Rg10
6 : Roche mère basaltique	0	0	0.1
4 : Tablier d'éboulis grossier (tablier d'éboulis actif)	0.2	1	1.5
3 : Dépôts gravitaires anciens et sol moyennement compactés	0.2	0.5	0.7

### Avec RocPro3D

Pour faciliter le paramétrage, le logiciel propose 6 types de sols prédéfinis. Les paramètres sont ensuite ajustés pour correspondre au mieux aux atteintes connues. Les variables sur lesquelles les ajustements ont été faits sont les coefficients de restitution et les angles de déviation latérale et verticale. Les paramètres retenus par type sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 7). Les calculs ont été réalisés en considérant une distribution gaussienne de ces paramètres.

Tableau 7 : Types de sols et paramètres déterminant pour la modélisation de trajectographie 3D avec RocPro3D

Type de sols	Coeff Restitution normale (Rn)	Coeff Restitution tangentielle (Rt)	Valeur k du modèle Rn(Vn) (m/s)	Coeff. frottement	Lim de transitions
Rocher sain	0.52	0.85	50	0.45	2-25°
Eboulis récent meuble	0.38	0.80	9	0.4	4-20°
Eboulis ancien compact	0.33	0.80	9	0.6	4-20°

Les paramètres d'entrée de ce modèle et leurs distributions statistiques sont également fournis en Annexe 3.

d) Sources des modèles de calibration

Bien que des chutes de blocs et des éboulements peuvent se déclencher sur l'ensemble du rempart, les propagations les plus longues sont théoriquement celles issues des zones de départ les plus élevées (d'après la loi de conservation de l'énergie et d'une énergie potentielle maximale pour les particules les plus hautes). On note en effet des limites de propagation 20-30 m plus à l'aval pour les zones de départ situées en sommet de rempart en comparaison de celles à mi-hauteur du rempart (Figure 27). Cet écart reste toutefois limité car les modèles de trajectographie utilisés dans cette étude intègrent un facteur de réduction du coefficient normal de restitution au fur et à mesure que la vitesse d'impact augmente en considérant un mécanisme de rebond moins élastique provoqué par une fracturation croissante du bloc et une formation de cratères à la surface de la pente, à des vitesses normales plus élevées. Ce facteur est fixe dans le logiciel Rockyfor3D et est modifiable dans le logiciel RocPro3D.

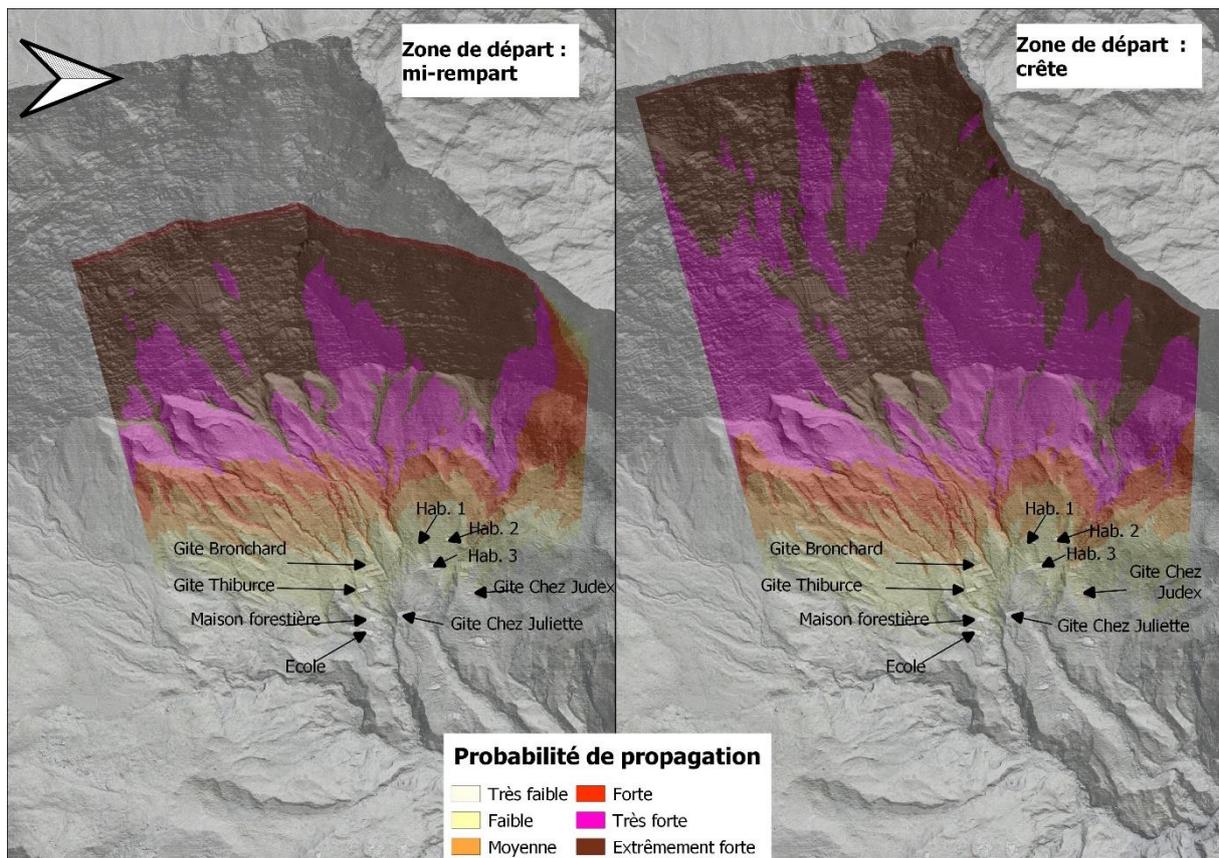


Figure 27 : Comparaison des probabilités de propagation obtenues à partir des modélisations de trajectographie à l'aide du logiciel Rockyfor3D pour des zones de départ à mi-hauteur du rempart (à gauche) et des zones de départ au niveau de la crête (à droite)

La prise en compte de zone de départ au sommet du rempart est cohérente avec la présence à ce niveau des dépôts massifs (tufs soudés) d'épaisseur plurimétrique à décimétrique découpées par des diaclases et des fissures de décompression. Celles-ci délimitent des compartiments de quelques dizaines de m<sup>3</sup> à quelques centaines de m<sup>3</sup>. Il est admis que les distances de propagation par des éboulements jusqu'à quelques milliers de m<sup>3</sup> sont sensiblement les mêmes que pour des chutes de blocs isolés. Pour des volumes d'éboulement supérieurs, les interactions entre blocs peuvent générer des propagation plus longues.

Le scénario de référence pour la calibration des paramètres est la chute d'un de ces compartiments depuis le sommet du rempart avec fragmentation et propagation sous la forme de blocs isolés sur le tablier d'éboulis. Les vitesses horizontales et verticales de départ sont définies comme nulles.

Ces zones de départ correspondent (en planimétrie) au linéaire en crête de rempart depuis la bordure de la crête partant du relief de la Vierge à 700 m au sud des belvédères du Maïdo et suivant la crête du Piton Maïdo sur 900 m vers le nord.

Le volume de référence retenu sur la base de l'inventaire des blocs en pied de versant est de **10 m<sup>3</sup>**. Ce volume unitaire est également cohérent avec les volumes et l'état de fracturation des 18 compartiments identifiés en crête.

Ces zones de départ sont matérialisées dans le modèle Rockyfor3D par une bande de 10 m de large en plan correspondant à 597 cellules de 5x5 m du modèle. Avec ce logiciel, les blocs modélisés sont des éléments parallélépipédiques. Cette forme correspondant le mieux aux blocs observés. La masse volumique des blocs retenue est de 2 650 kg.m<sup>-3</sup>. Les dimensions retenues pour les blocs simulés sont 3m x 2m x 1,67m avec des variations de dimensions de +/- 50%, soit des volumes de blocs variant entre 5,6 et 13,5 m<sup>3</sup> avec un volume moyen de 10 m<sup>3</sup>.

Avec le logiciel RocPro3D, les zones de départ modélisées sont linéiques immédiatement sous la crête du rempart. Les blocs considérés sont des éléments cylindriques. La masse volumique des blocs retenue est de 2 650 kg.m<sup>-3</sup>. Les dimensions retenues pour les blocs simulés sont un diamètre de 2,9 m et un élanement (d/h) de 2, avec des variations +/- 50% sur le volume, soit des volumes de blocs variant entre 4,7 et 14,4 m<sup>3</sup> et un volume moyen de 9,6 m<sup>3</sup>.

**Un scénario d'éboulement en masse ou grande masse n'est pas modélisé.** L'occurrence d'un tel phénomène à moyen terme/long terme, en tout état de cause au cours du siècle à venir est plus incertaine. L'auscultation sur le long terme des déformations du rempart devrait permettre de préciser les conditions d'occurrence d'une telle instabilité. Un tel phénomène n'est en tout état de cause pas modélisable avec les outils de trajectographies utilisés dans cette étude. Cela nécessiterait d'autres modèles prenant notamment en compte les interactions entre les éléments lors de la propagation. Ce sujet fait l'objet d'une étude à part entière en cours, réalisée par le BRGM en partenariat avec la DEAL de la Réunion.

Avec le logiciel Rockyfor3D il a été simulé 1 000 000 départs par cellule, soit un total de 597.10<sup>6</sup> départs.

Avec le logiciel RocPro3D, il a été simulé 100.10<sup>6</sup> départs, soit plus de 60 000 blocs/ml de crête. Ce nombre de lancés correspond a priori au nombre de simulations nécessaires pour une probabilité visée de 10<sup>-6</sup> (cf. page 36). Les calculs de RocPro3D intégrant des mécanismes de propagation plus complexes que le logiciel Rockyfor3D, ils nécessitent de ce fait un temps de calcul plus long (28 heures dans le cas présent avec RocPro3D pour 100 millions de blocs). Il a ainsi été choisi de limiter les modélisations RocPro3D à 100.10<sup>6</sup> départs. Dans les faits, ce nombre de simulation a permis d'aboutir à la qualification de probabilité d'atteinte jusqu'à une limite inférieure de 3.10<sup>-6</sup>, soit proche de la limite inférieure de qualification de la probabilité de propagation faible.

#### e) *Résultat des modèles de calibration*

Les résultats de ces modélisations exprimés en nombre d'arrêts par maille sont confrontés visuellement aux pointés des blocs et des pierriers ( §3.4) (Figure 28)

Les densités d'arrêts de trajectoires sont sensiblement différentes entre les modèles Rockyfor3D et RocPro3D en raison notamment d'un nombre de simulations 6 fois plus élevé avec Rockyfor3D.

Le modèle Rockyfor3D avec les paramètres retenus reproduit la majorité des arrêts au niveau des blocs recensés avec un niveau de confiance élevée et l'ensemble des pierriers. La calibration des paramètres avec le logiciel RocPro3D est moins satisfaisante. Les zones de

concentration de blocs pointés ne sont pas systématiquement restituées par ce modèle. Ces derniers résultats paraissent sous-évaluer les distances de propagation. Néanmoins, le modèle RocPro3d permet de simuler quelques blocs éloignés dont les arrêts ne sont pas reproduits avec le Rockyfor3D.

Quelques atteintes de blocs pointés avec un niveau de confiance élevée au sud de la zone habitée ne sont pas reproduites par les modèles. Celles-ci pourraient avoir été engendrées par des zones sources situées plus au sud.

Les résultats des deux modèles sont logiquement cohérents avec les estimations de probabilité de propagation obtenus avec l'application cartographique de la méthode de la ligne d'énergie associée aux aires normalisées des profils simulés (Elana, cf. §4.1.2). Les modélisations de trajectographie 3D permettent toutefois d'identifier quelques axes de propagation plus préjudiciables et inversement de faire ressortir des zones évitées par les trajectoires de blocs.

Les incisions au sein du cône d'éboulis actif et du cône ancien participent à concentrer les trajectoires de blocs et limitent progressivement les divagations latérales des blocs éboulés.

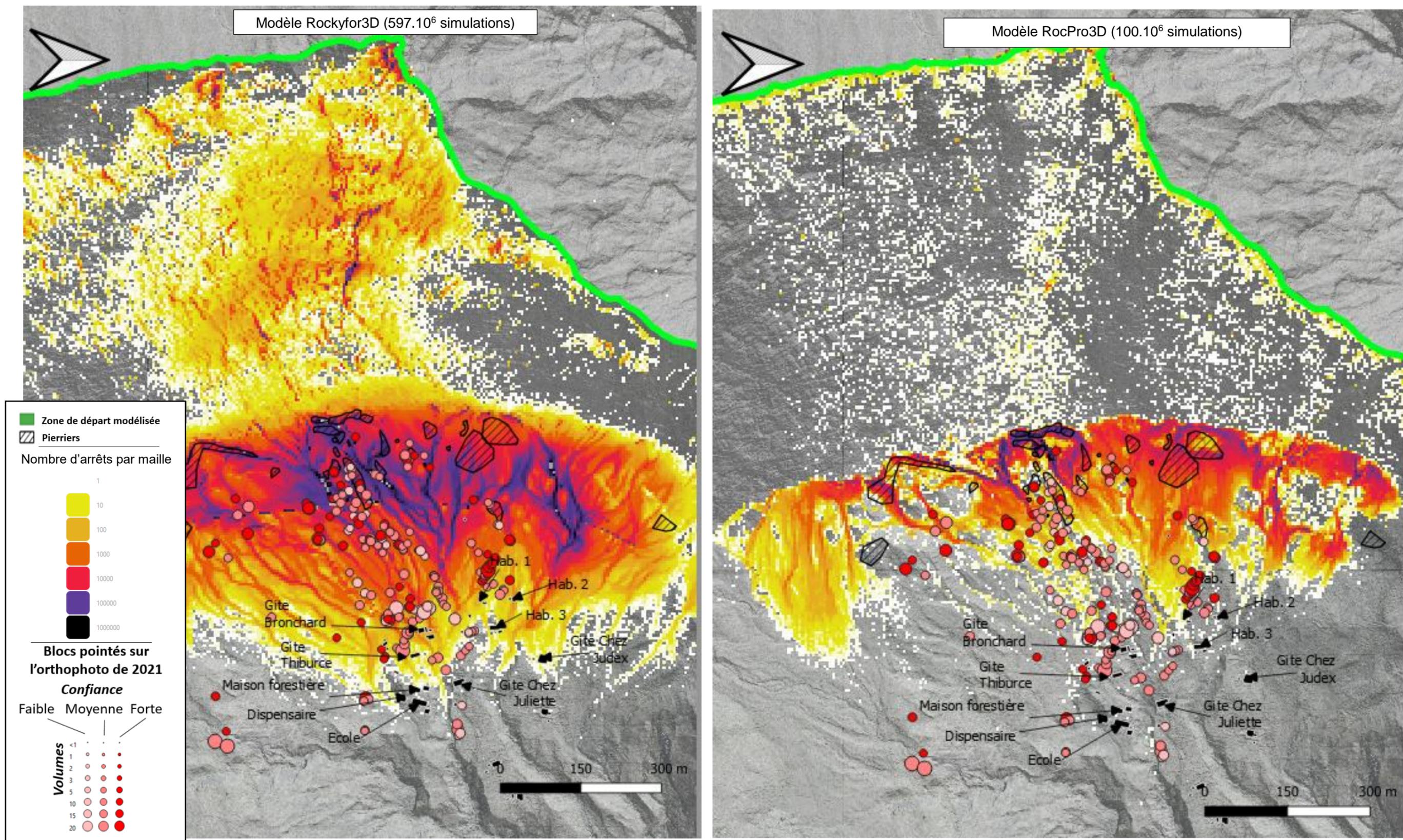


Figure 28 : Nombre d'arrêts de trajectoire de blocs par maille obtenus avec les logiciels Rockyfor3D (à gauche) et le logiciel RocPro3D (à droite) comparés à l'inventaires des blocs et au pierriers pointés sur la zone

f) *Modélisation de la trajectographie du compartiment n°2*

Afin de préciser les résultats obtenus par le BRGM (Le Moigne, 2021) lors de la phase de gestion de crise et in fine réévaluer les mesures prises par les autorités, une modélisation de la trajectographie des blocs issus de la rupture du compartiment n°2 a été réalisée à l'aide des modèles 3D calibrés. Les hypothèses d'entrées sont celles définies précédemment à partir des modèles de calibration couvrant l'ensemble du secteur (4.3c)).

La source de cette modélisation est le compartiment n°2, de 24 ml, représenté par 6 cellules sources de 5x5m.

Les volumes et les dimensions des blocs simulés sont les mêmes que ceux des modèles de calibration, à savoir un volume unitaire moyen d'avoisinant 10m<sup>3</sup> (4.3d).

Les résultats de ces modélisations sont présentés sur la Figure 28.

La probabilité de propagation ( $P_p$ ) est déterminée par les logiciels avec le calcul suivant :

$$P_p : N_p / (N_{srcell} \times N_{sim})$$

Tel que :

- $N_p$  : Nombre de passage de trajectoire de blocs
- $N_{srcell}$  : Nombre de cellule sources ayant engendrées un ou plusieurs passages sur la cellule
- $N_{sim}$  : Nombre de simulation par cellule

Les modèles de trajectographie des instabilités issues du compartiment n°2 montrent que les trajectoires dans le rempart sont déviées vers le sud par le versant sud de la crête du Piton Maïdo.

Les écarts en terme de distance de propagation en pied observées entre les 2 modèles au stade de la calibration, sont dans le cas de la modélisation des instabilités issues du compartiment n°2 exacerbées. Les probabilités d'atteintes obtenues avec le modèle RocpPro3D semblent manifestement sous-évaluées car ne restituant que très partiellement les atteintes blocs observées.

Le couloir de propagation préférentiel mis en évidence par le modèle de trajectographie Rockyfor3d correspond bien à une zone où de nombreux blocs ont été pointés lors des observations de terrain et à l'aide des orthophotographies.

La déviation latérale sur le modèle Rockyfor3D (paramètre non modifiable par l'utilisateur), paraît toutefois exagérée. Ce biais pourrait avoir pour effet de minimiser les distances et les probabilités de propagation calculées.

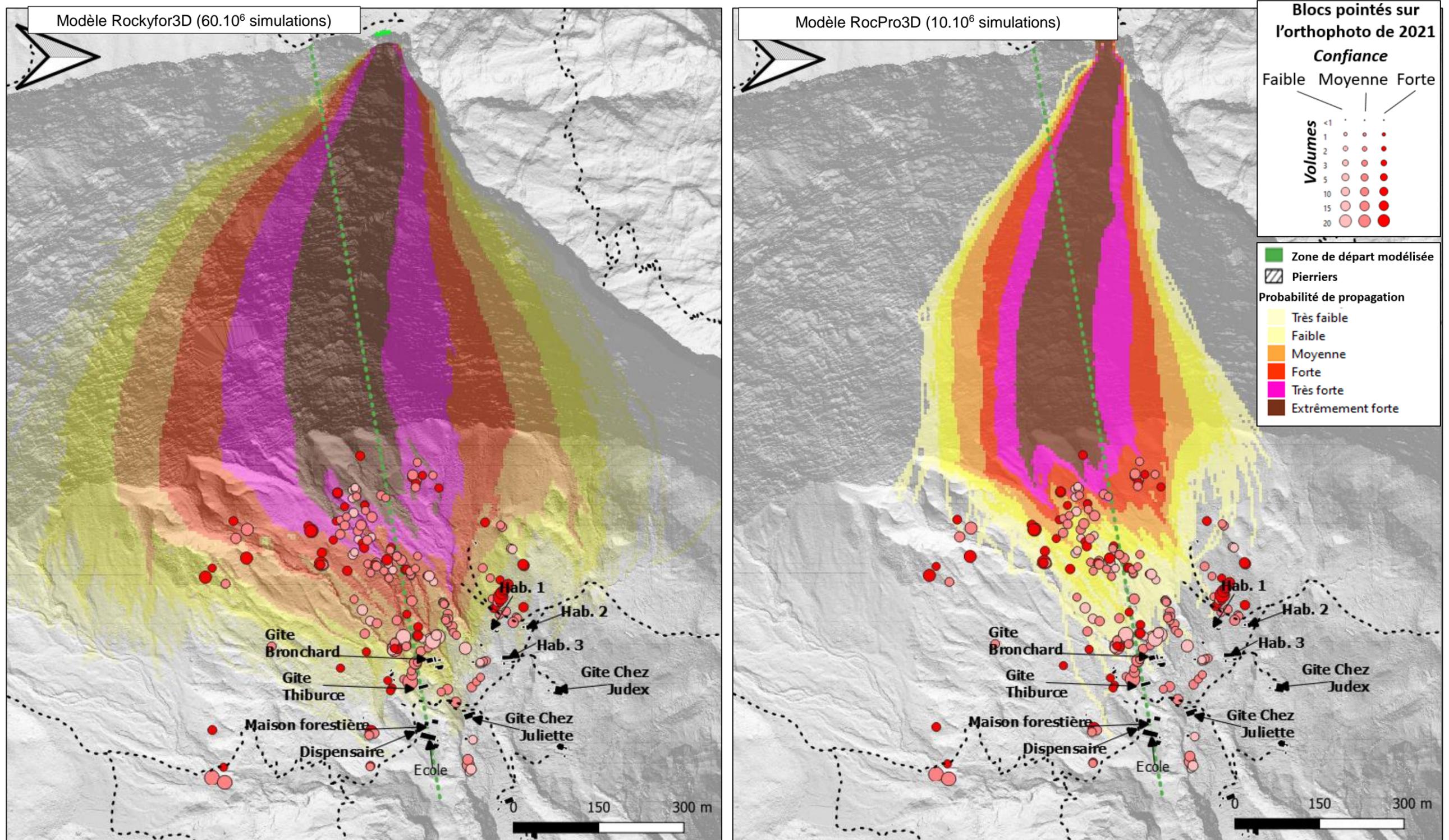


Figure 29 : Résultats des calculs de probabilité de propagation obtenus avec les logiciels Rockyfor3D (à gauche) et le logiciel RocPro3D (à droite) pour des instabilités issues du compartiment 2 ; ligne pointillé verte : profil en de propagation en ligne directe servant à la comparaison des distances d'atteinte entre approche

#### 4.4. SYNTHÈSE DES RESULTATS DES ANALYSES DE PROPAGATION DES INSTABILITES ROCHEUSES ISSUS DU COMPARTIMENT 2

Les résultats des limites de propagation obtenus par les différentes approches déployées dans cette étude sont présentés ci-dessous (Tableau 8) :

Tableau 8 : Synthèse des résultats des probabilités de propagations de chutes de blocs issues du compartiment n°2 avec les différentes approches

Méthodes		Critères PPR La Réunion (d'après MEZAP 2014)		Plages plausibles Annexe 3 MEZAP 2021 (type AA30 ou D)		ALE <sup>16</sup> profil 2D Lois 2017		ALE cartographique Lois 2021 (ELANA)		Trajectographie 2D Pierre98		Trajectographie 3D Rockyfor3D*		Trajectographie 3D RocPro3D*	
		ALE	Dist.	ALE	Dist.	ALE	Dist.	ALE	Dist.	ALE	Dist.	ALE	Dist.	ALE	Dist.
Probabilité de propagation	FORTE (10 <sup>-4</sup> )					43°	1242 m	48°	910 m	43°	1212 m	46°	1065 m	49°	873 m
	MOYENNE (10 <sup>-5</sup> )					39.5°	1389 m	46°	1052 m	42°	1255 m	45°	1106 m	48°	921 m
	FAIBLE (10 <sup>-6</sup> )	38 à 40°	1310 m à 1570 m (soit tout le plateau de l'Ecole)	AA : 32 à 43°	1 800 m à 1173 m	-	-	43°	1173 m	41°	1300	42°	1230 m	44°	1100

\*Les valeurs ALE et de distance de propagation sont celles mesurées depuis la crête suivant le même profil en ligne directe (Figure 22) passant par les enjeux afin de pouvoir comparer les différentes approches.

<sup>16</sup> ALE : Angle de la ligne d'énergie



Les modélisations de trajectographie 2D (cf. § 4.2) fournissent des résultats plus pessimistes que ceux fournis par les modélisations de trajectographie 3D. Ces calculs réalisés en phase de gestion de crise n'ont pas été calibrés aussi finement, faute d'un inventaire des blocs disponible au moment de ces calculs. Néanmoins, ces résultats avaient été jugés satisfaisants dans l'optique de fournir une qualification rapide de l'exposition des enjeux. Ils étaient en effet cohérents avec les estimations des emprises des propagation potentielles définies avec la méthode dite des « aires-normalisées » suivant un profil en 2D (cf. § 4.1.1). Cette méthode est celle recommandée dans le guide MEZAP en préalable à une étude de trajectographie détaillée.

Que ce soit le code ELANA basé sur une base d'évènements de plus de 3600 cas ou la méthode dite des aires normalisées appliquées à un profil donné, basé également sur des évènements connus, ces derniers n'intègrent pas de telle configuration de paroi de près de 1000 m de haut où le mode de propagation après l'impact en pied de rempart est très spécifique et propre à ce type de configuration. En effet, les vitesses de chute sont extrêmes favorisant la fragmentation des blocs à l'impact avec une forte dissipation de l'énergie limitant vraisemblablement les propagations sur de longues distances à l'aval du pied de rempart.

Ce mode de propagation, mal connu car rarement observé dans de telles configurations, est peu documenté et vraisemblablement ne constitue qu'une infime partie des évènements ayant servi à établir la méthode des aires normalisées, déployée dans le code ELANA du BRGM. La transposition des valeurs d'angles de ligne d'énergie issues de cette méthode est donc très certainement pessimiste (angle faible et distance depuis le pied de rempart forte) au regard de la réalité des trajectoires pouvant se développer sur le site du Maïdo.

Les résultats de modélisations de trajectographie 3D indiquent aussi des distances de propagation moins importantes que les distances définies par les valeurs indicatives d'angle de ligne d'énergie prises en compte dans les plans de prévention des risques à La Réunion (38 à 40°). Ces distances de propagation sont en revanche cohérentes avec les recommandations MEZAP 2021, même si elles se situent dans la plage basse des propagations plausibles (distances courtes et angle de ligne d'énergie fort). Il convient de noter que ces valeurs indicatives de propagation ont été déterminées pour des versants de beaucoup plus faible hauteur que le rempart du Maïdo (50 m max considéré dans MEZAP). Dans cette configuration de rempart, de fortes dissipations d'énergie se produisent à l'impact en pied de rempart, alors que pour des versants de faible hauteur, cette forme de dissipation d'énergie est proportionnellement moins importante, favorisant ainsi la propagation vers l'aval et donc des valeurs d'angles de ligne d'énergie plus faibles. Ce facteur de diminution des coefficients de restitution d'énergie en fonction de la vitesse sont pris en compte par les outils de trajectographie 2D et 3D qui semblent donc plus « réalistes » si correctement calé, pour reproduire et simuler les trajectoires de blocs de détachant de grands remparts.

Les résultats des modélisations de trajectographie 3D sont cohérentes avec ceux de l'application cartographique de la méthode des aires normalisées (Elana) établie à partir des lois empiriques de 2021. Les modélisations réalisées avec le logiciel Rockyfor3D sont légèrement plus pessimistes, tandis que celles obtenues avec le modèle RocPro3D sont plus optimistes (distances de propagation moins longues). Un nombre important de blocs pointés se trouvent dans une zone de probabilité faible voire très faible. Les modélisations réalisées avec le logiciel RocPro3D avec les paramètres retenus semblent globalement minimiser les distances de propagation, mais paradoxalement permettent de restituer quelques trajectoires longues cohérentes avec des blocs observés sur site mais dont les arrêts ne sont pas simulés avec le modèle Rockyfor3D. Les résultats combinés de ces deux modèles permettent de reproduire la quasi-totalité des blocs pointés

**Au regard des incertitudes inhérentes à chacun des modèles, aux hypothèses d'entrée et à leur calibration, il est proposé de retenir systématiquement les enveloppes de propagation les plus pessimistes de chacun des modèles. Les enveloppes de probabilité de propagation très faible (sauf trajectoires jugées aberrantes) sont considérées au même titre que la probabilité de propagation faible.**

Ces limites retenues sont aussi ajustées à dire d'expert afin d'englober les blocs pointés sur les orthophotographies. Ces ajustements ne modifient pas de manière significative les enveloppes de propagation avec des écarts de l'ordre de la dizaine de mètres au plus.

Dans le scénario « post-incendie de novembre 2020 » où les témoignages d'accentuation notable de l'ouverture des fissures en arrière du compartiment n°2 avaient été considérés comme fiables, un départ dans l'année était redouté (notion d'imminence). Sur cette base, la probabilité de départ annuelle (Pd) (indice d'activité au sens de MEZAP) serait de 1. Cette qualification de l'activité du rempart est déterminante dans l'estimation de la probabilité d'atteinte puis de l'aléa.

Ainsi, en application des recommandations du guide MEZAP 2021 la probabilité d'atteinte sera équivalente à la probabilité de propagation.

**Prob. d'atteinte = Prob. de départ \* Prob. de propagation** (Pa = Pd x Pp)

		Probabilité de propagation					
		Très faible 10 <sup>-6</sup>	Faible 10 <sup>-5</sup>	Moyenne 10 <sup>-4</sup>	Forte 10 <sup>-3</sup>	Très forte 10 <sup>-2</sup>	Extrêmement forte
Probabilité de départ (Indice d'activité)	Faible (1 / 100 ans) 10 <sup>-2</sup>	Très faible			Faible	Moyenne	Forte
	Moyen (1 / 10 ans) 10 <sup>-1</sup>	Très faible		Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	Fort (1 / an) 1	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte	Très forte

Figure 30 : Définition de la probabilité d'atteinte de l'aléa de référence en un point (MEZAP, 2021).

Les probabilités d'atteinte retenues synthétisant les résultats des différentes approches sont présentées sur la Figure 31.

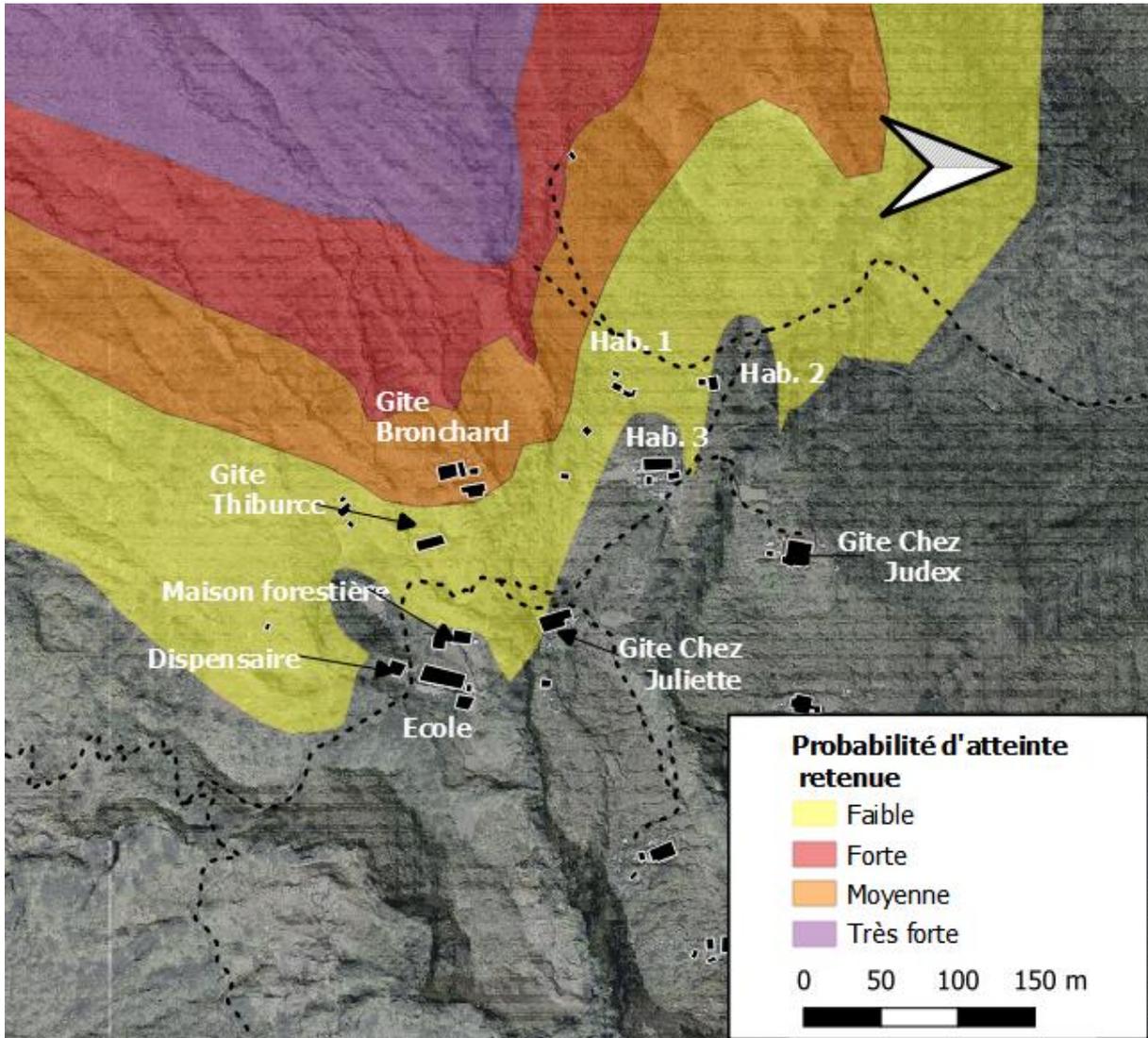


Figure 31 : Probabilité d'atteinte retenue sur la zone d'étude en cas de chute du compartiment n° 2

A partir de ce croisement (Figure 31), l'Ecole, le Dispensaire et le Gite Chez Judex se trouvent totalement en dehors de la zone d'atteinte de blocs liés à l'instabilité du compartiment n°2. La maison Forestière, le Gite Chez Juliette et l'habitation 2 et l'habitation 3 se trouvent quant à elles à la bordure immédiate de la probabilité d'atteinte faible. Le gite et Thiburcc et l'habitation 1 se trouvent dans une zone de probabilité d'atteinte faible. Et enfin le gite Brochard se trouve dans une zone de probabilité d'atteinte moyenne.

## 5. Apport de l'étude pour la caractérisation de l'aléa chutes de blocs sur le secteur

La rupture du compartiment n°2 redoutée à très court terme sur la base de témoignages de de déstabilisation ne s'est pas produite à ce jour. Le suivi mis en œuvre n'a pas révélé depuis ce signalement d'évolution perceptible de ce compartiment. **Aujourd'hui, après 2 saisons cycloniques, il peut être considéré que la probabilité de rupture du compartiment n°2 est revenue à son niveau d'avant l'incendie de novembre 2020. Aussi la gestion différenciée répondant à cette menace spécifique peut être désormais questionnée.**

Les modèles déployés pour préciser l'aléa chute de blocs / éboulement du compartiment n°2 de la crête du rempart du Maïdo apportent une nouvelle connaissance qui montre l'intérêt d'intégrer l'ensemble des instabilités redoutées dans les modélisations de trajectographie afin de préciser la caractérisation de l'aléa chutes de blocs / éboulement sur l'ensemble du secteur de Roche Plate - Ecole.

Un nouveau zonage de l'aléa chute de blocs/éboulement suivant la méthodologie définie dans le guide MEZAP 2021 et les critères usuellement retenus dans l'élaboration des PPR à la Réunion, avec comme période de référence **le siècle à venir**, sur le secteur de Roche Plate est aussi proposé à ce chapitre. Pour cela, l'inventaire des instabilités rocheuses du rempart du Maïdo, réalisées au préalable est valorisé et les modèles 3D calibrés déployés.

### 5.1. SCENARIO DE DE REFERENCE

#### 5.1.1. Zones de départs

Les modélisations montrent une convergence des trajectoires en direction de la zone habitée du Plateau de l'Ecole. Tout le rempart compris entre le secteur dit de « La Vierge », 700 m au sud des belvédères, jusqu'à 800 m sur l'arête reliant le Piton Maïdo et la Brèche, est susceptible de générer des trajectoires en direction de la zone habitée du Plateau de l'Ecole.

Pour cela les zones sources considérées sont les zones de départ les plus hautes, c'est-à-dire celles situées au niveau de la crête entre « La Vierge » et les antennes (crête des Belvédères) et l'arête du Piton Maïdo sur 800 m depuis ce dernier.

Une inspection héliportée de la zone a été réalisée le 18 mars 2022 dans la matinée afin de caractériser sur la base d'observation visuelle les scénarios de référence pour les zones de départs distinguées.

Les caractéristiques des sources sont différenciées pour les zones de départ de la crête des belvédères et celles de l'arête du Maïdo, compte tenu de structurations lithologiques et d'indices d'activité distincts.

#### a) Crête des belvédères

Les zones de départ considérées au niveau de la crête des belvédères sont les 18 compartiments totalement désolidarisés du massif identifiés à l'aide des données LiDAR d'août 2021 (Figure 7 et Figure 8).

Les volumes de référence modélisés sont les mêmes que ceux modélisés pour les modèles de calibration (§4.3d)).

A défaut de connaissance quant à l'évolution de la stabilité de ces compartiments et d'inventaire exhaustif de l'activité du versant, il n'est pas possible de distinguer la probabilité de départ de chacune de ces instabilités. Au vu, du degré de désolidarisation de ces compartiments, des indices d'activités marqués (§3.2) au sein du rempart et en pied, et de la présence potentielle de nombreuses autres instabilités dans le versant abrupt, il est ici retenu de l'ordre d'une rupture du bloc de référence par an et pour un linéaire de 100 m de zone de départ, soit selon la MEZAP une **probabilité de départ annuelle (Pd) de 1**.

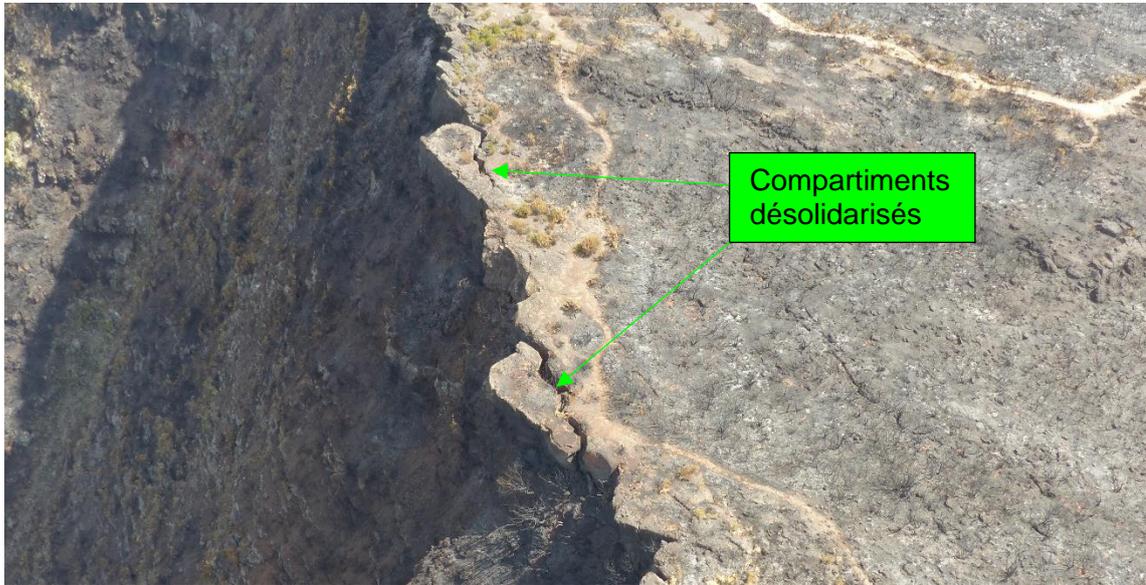


Figure 32 : 2 compartiments désolidarisés parmi les 18 constituant les sources sur le secteur de la crête des belvédères des modélisations de trajectographie

## b) Arrête du Piton Maïdo

L'arrête en aval du Piton Maïdo est dans son ensemble constituée d'une alternance régulière de coulées basaltiques d'épaisseur inframétrique à plurimétrique affectées d'une fracturation verticale (diaclasses) et séparées par des interlits scoriacés d'épaisseur équivalente (Figure 33).



Figure 33 : Arrête du Piton Maïdo constituée d'une alternance de coulées basaltiques d'épaisseur inframétrique à plurimétrique séparées d'interlits scoriacés d'épaisseur équivalente

Sur la base de cette appréciation visuelle des instabilités type susceptibles de se produire dans cette configuration, les dimensions et le volume du bloc de référence considérés sont : H : 2m x L : 1,3m x P : 1m soit  $2,6\text{m}^3$  (+/-50% variation sur les dimensions)

Cette configuration est propice à démantèlement naturel lié à :

- la fracturation naturelle des coulées basaltiques due à leur mode de refroidissement (prismation et formation de joints) ;
- la décompression du massif par « appel au vide » ;
- au développement de sous-cavage lié à la friabilité des scories comparée aux coulées plus massives par érosion différentielle.

Malgré ce contexte de forte prédisposition aux chutes de blocs, il n'est pas identifié d'activité récente manifeste au sein du versant sud de l'arrête du Piton Maïdo, ni d'atteinte notable en pied. La végétation dense et mature jusqu'à pied de ce versant pourrait indiquer une moindre activité par rapport au rempart sous la crête des Belvédères, au pied duquel la végétation tenue semble malmenée par de fréquentes atteintes rocheuses.

Dans cette configuration, à défaut de pouvoir disposer d'un inventaire des instabilités affectant la zone pour quantifier son activité, il est ici retenu une rupture possible de l'ordre d'un bloc correspondant au scénario de référence tous les 2 ans pour un linéaire de 100 m de zone de départ, soit selon la MEZAP une **probabilité de départ annuelle (Pd) de 0,5**.

## 5.2. PROBABILITE DE PROPAGATION, D'ATTEINTE ET ALEA CHUTES DE BLOCS / EBOULEMENT RESULTANT A L'ECHELLE DU SECTEUR DE ROCHE PLATE

Les modèles déployés avec 2 outils et calibrés à partir d'un recensement de blocs éboulés à l'échelle de toute la zone apportent une nouvelle connaissance permettant de préciser le zonage de l'aléa chute de blocs/éboulement sur l'ensemble du secteur de Roche Plate – Ecole

La probabilité de propagation forte est moins éloignée du pied de rempart avec le modèle RocPro3D qu'avec Rockyfor3D (Figure 34).

Il apparaît que les thalwegs profonds de 4-5 m au sud de la maison forestière et de l'école et l'encaissement plus profond (20 m) au nord concentrent les trajectoires. Cela permet de réduire la probabilité de propagation jusqu'à ces enjeux. La maison forestière et l'école se trouveraient aussi selon le modèle Rockyfor3D dans une zone de très faible probabilité d'atteinte.

Un couloir proche de l'habitation 1 est révélé par le modèle RocPro3D et est moins marqué avec Rockyfor3D.

Les résultats avec le logiciel Rockyfor3D montrent des rebonds/projections en paroi avec des trajectoires aériennes possibles jusqu'à 80 m du pied de rempart et même jusqu'à 160 m dans la partie sud de la zone étudiée. Ensuite les trajectoires sont globalement basses ponctuées de rebonds de hauteur limitée (1-3m).

Le modèle RocPro3D indique des trajectoires aériennes après rebonds en paroi jusqu'à une distance de 50 à 120 m du pied. Puis les trajectoires sont majoritairement basses correspondant à des phases de roulement de rebonds successifs de hauteur limités (1-3 m). Ce modèle génère aussi quelques projections hautes et tendues très longues (jusqu'à 450 m du pied) issus de rebonds sur la base rocheuse de la paroi. Ces trajectoires marginales semblent aberrantes au regard des retours d'expérience d'évènement et de suivi de purge de ce type de contexte. Ce biais semble lié à une sous-évaluation du facteur de diminution des coefficients de restitution en fonction de la vitesse pour le sol « roche mère ». Ce paramètre traduit les phénomènes de dissipation de l'énergie par fragmentation et déformation plastique croissante avec la vitesse d'impact. Ces trajectoires marginales semblant peu cohérentes ne remettent pas en cause les résultats globaux du modèle, elles n'ont par contre pas été considérées dans le tracé des enveloppes de probabilité de propagation (Figure 34).

Les modélisations de trajectographie ont été réalisées indépendamment pour chacun des 18 compartiments et en considérant une zone de départ unique pour l'arrête du Piton Maïdo. Il ressort que chacune de ces zones de départ est susceptible d'affecter les enjeux bâtis (probabilité non nulle).

Le calcul de la probabilité d'atteinte ( $P_a$ ), défini comme le produit des probabilités de départ ( $P_d$ ) et de propagation ( $P_p$ ), amène ici avec une hypothèse d'une  $P_d$  de 0,5 des instabilités issues de l'arrête du Piton Maïdo contre une  $P_d$  de 1 pour celles provenant de la crête des belvédères, à légèrement réduire la probabilité d'atteinte au nord de Roche Plate (groupement d'habitations 1 à 3 et Gite chez Judex) (Figure 35).

Le calcul de la probabilité d'atteinte ( $P_a$ ) est défini comme le produit des probabilités de départ ( $P_d$ ) et de propagation ( $P_p$ ). En considérant l'hypothèse d'une  $P_d$  de 0,5 des instabilités issues de l'arrête du Piton Maïdo contre une  $P_d$  de 1 pour celles correspondant aux compartiments instables de la crête, la probabilité d'atteinte résultante est donnée par la formule suivante :

$$Pa = \frac{NtrajC1 * PdC1 + \dots + NtrajC18 * PdC18 + NtrajArr * PdArr}{CellsrcC1 * NbsimC1 + \dots + CellsrcC18 * NbsimC18 + CellsrcArr * NbsimArr}$$

Avec :

*NbtrajC1... NbtrajC18 : nombre de trajectoires passant par la cellule issue respectivement des compartiments 1 à 18.*

*NbtrajArr : nombre de trajectoires passant par la cellule issue de la zone de départ considérée au niveau de l'arrêt.*

*PdC1... PdC18 : Probabilité de départ estimée respectivement au niveau des compartiments 1 à 18 (Pd1 à Pd18 = 1).*

*PdArr : probabilité de départ estimée au niveau de l'arrêt (PdArr= 0,5).*

*Cellsrc1... Cellsrc18 : Nombre de cellules sources dont sont issues les trajectoires des zones de départ correspondant respectivement aux compartiments 1 à 18 et atteignant la cellule pour laquelle la probabilité d'atteinte est calculée*

*CellsrcArr : Nombre de cellules sources dont sont issues les trajectoires au niveau de l'arrêt et atteignant la cellule pour laquelle la probabilité d'atteinte est calculée*

*NbsimC1 ... NbsimC18 : Nombre de simulations (lancés) par cellule de départ au niveau respectivement des compartiments 1 à 18.*

*NbsimArr : Nombre de simulations (lancés) par cellule de départ depuis l'arrêt.*

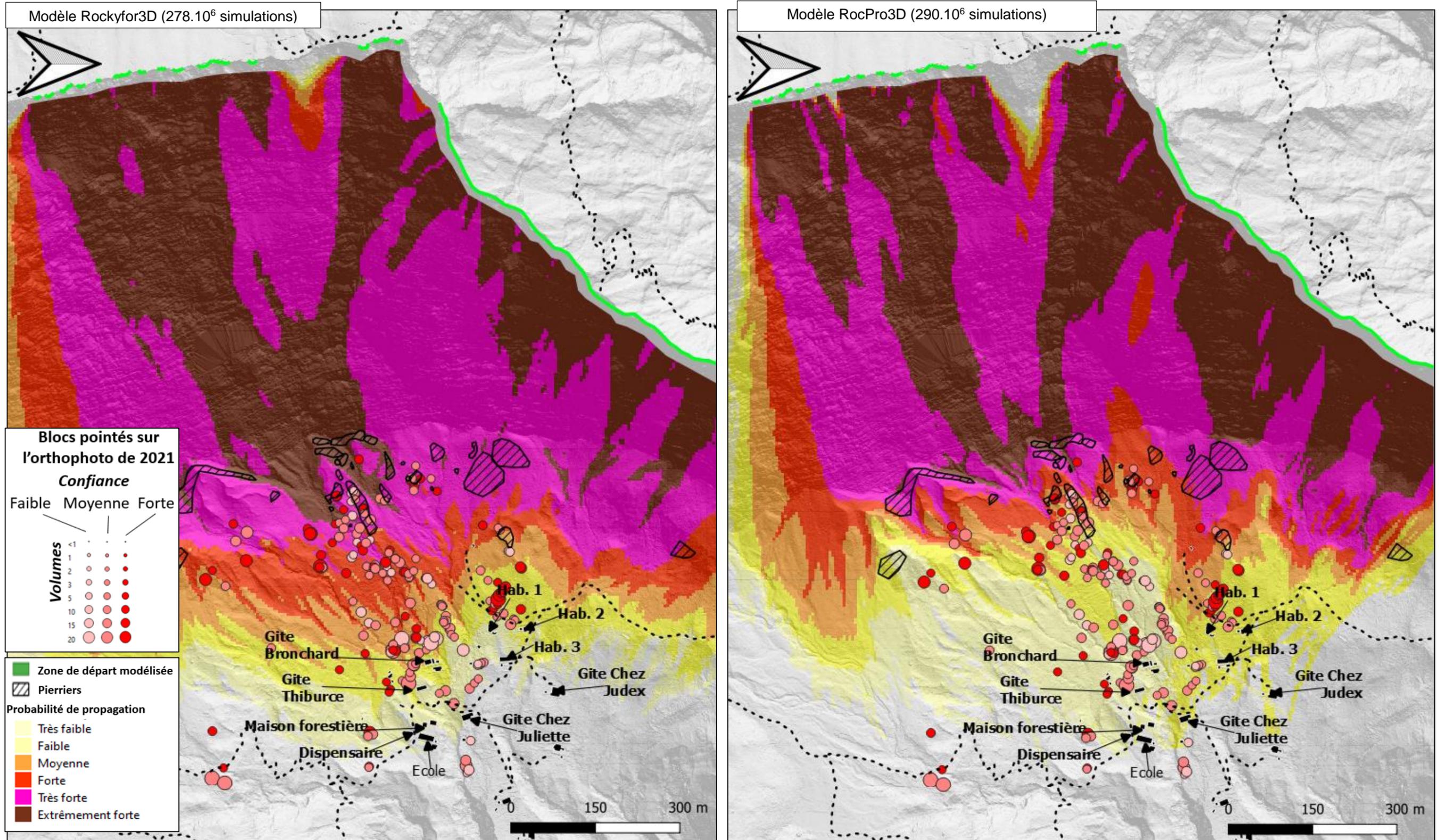


Figure 34 : Probabilité de propagation obtenues avec les logiciels Rockyfor3D (à gauche) et le logiciel RocPro3D (à droite) depuis les 18 compartiments désolidarisés de la crête des belvédères et l'arrête du Piton Maïdo

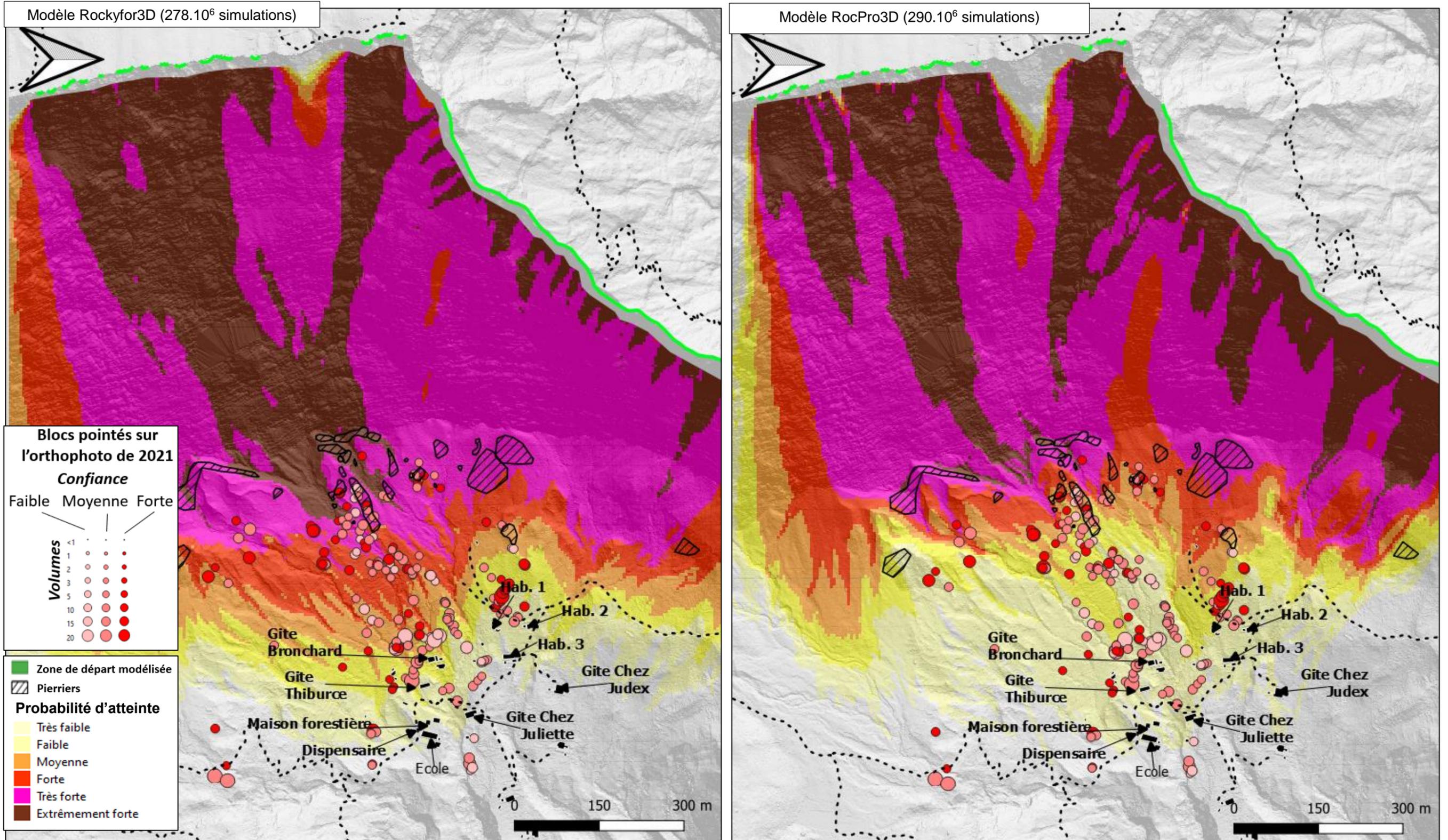


Figure 35 : Probabilité d'atteinte obtenues avec les logiciels Rockyfor3D (à gauche) et le logiciel RocPro3D (à droite) depuis les 18 compartiments désolidarisés de la crête des belvédères et l'arrête du Piton Maïdo

Au regard des incertitudes inhérentes à chacun des modèles, aux hypothèses d'entrée et à leur calibration, il est proposé de retenir systématiquement les enveloppes de propagation les plus pessimistes de chacun des modèles. Les enveloppes de probabilité de propagation très faible (sauf trajectoires jugées aberrantes) sont considérées au même titre que la probabilité de propagation faible. Quelques trajectoires marginales en direction du Gîte Chez Judex considérées comme non réalistes, n'ont pas été retenue dans le zonage final de la probabilité de propagation (Figure 36).

Ces limites retenues sont aussi ajustées à dire d'expert afin d'englober les blocs pointés sur les orthophotographies. Ces ajustements modifient les enveloppes de propagation avec des écarts de l'ordre de 20 m au plus.

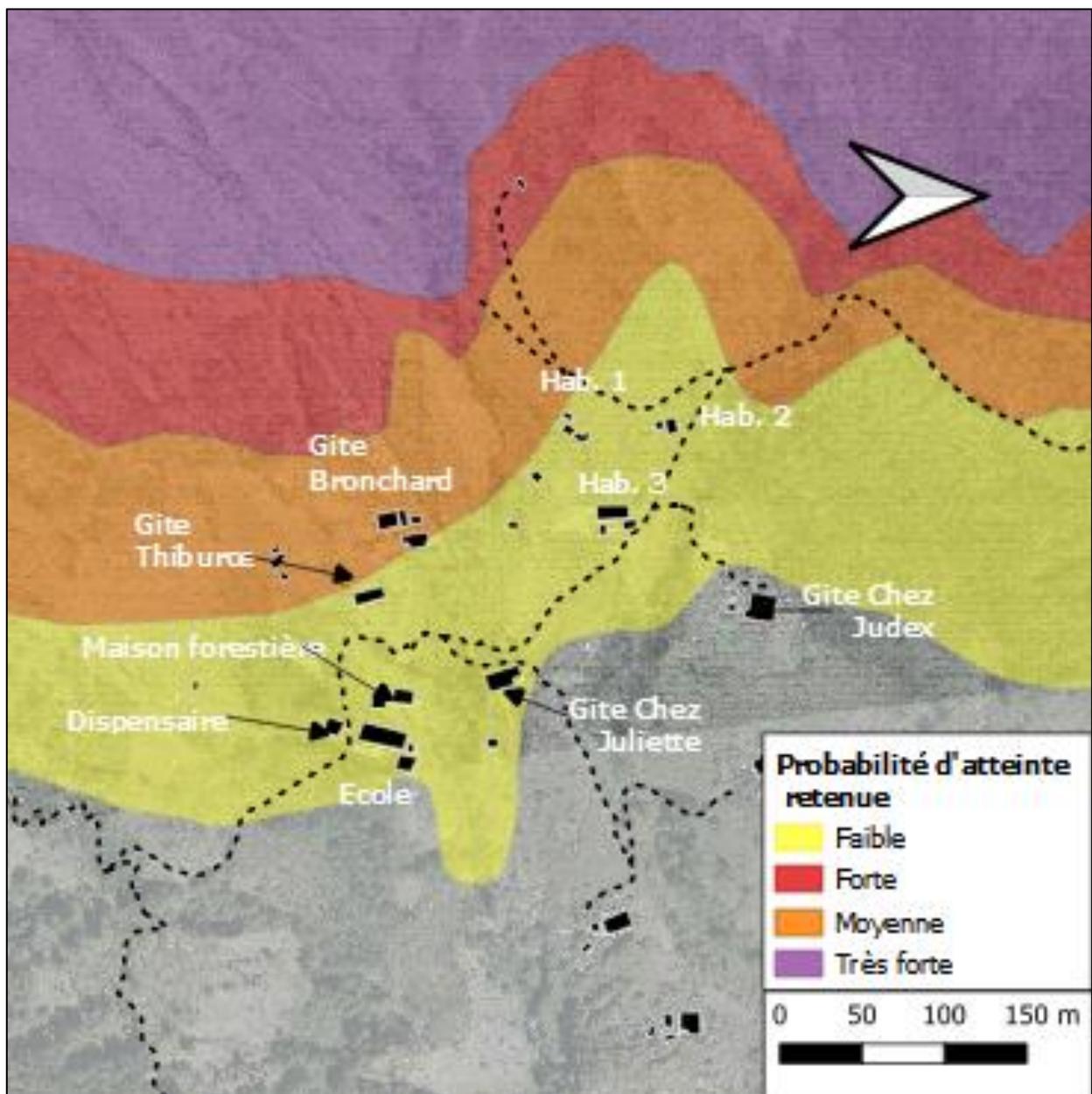


Figure 36 : Probabilité d'atteinte de chute de blocs et d'éboulements retenue sur le secteur de Roche-Plate Ecole

Au sens du guide MEZAP 2021, l'aléa rocheux est ensuite déterminé par croisement de la probabilité d'atteinte ainsi définie avec l'indice d'intensité correspondant au volume du bloc de l'aléa de référence considéré (ici 10 m<sup>3</sup> considéré / intensité forte ; cf. Figure 37). Dans le cas présent, jusqu'à la limite de la probabilité d'atteinte faible retenue (seuil à 10<sup>-6</sup>), l'aléa est considéré comme fort. Pour une intensité forte (bloc supérieur à 1 m<sup>3</sup>) le résultat en terme d'aléa rocheux sera équivalent vu les niveaux de probabilité d'atteinte retenus (faible à moyenne en l'occurrence).

La MEZAP 2021 ne retient pas systématiquement le principe de gradation des aléas appliqué jusqu'à présent dans les PPR multirisques à La Réunion (Rey, 2016) traduisant la décroissance de l'intensité et/ou de la probabilité du phénomène avec l'éloignement des zones sources. C'est notamment le cas pour les zones exposées à des intensités fortes à très fortes où l'aléa est considéré comme fort à très fort jusqu'à la limite de probabilité d'atteinte faible (seuil à 1.10<sup>-6</sup>), puis au-delà comme nul à négligeable. Dans le cas présent (taille des blocs de référence supérieur à 1m<sup>3</sup> donc intensité forte considérée), la traduction en aléa suivant le guide MEZAP induit un aléa fort à très fort dans toutes les zones concernées par une enveloppe d'atteinte. Ainsi, pour traduire l'incertitude dans les zones atteintes au-delà des zones d'aléa fort considérées, notamment pour d'éventuels projections / éclats aux trajectoires parfois importantes (Figure 39), un bandeau indicatif de 20 m d'aléa moyen est matérialisé à la bordure de l'aléa fort.

		Indice d'intensité				
		V ≤ 0.05 m <sup>3</sup>	V ≤ 0.25 m <sup>3</sup>	0.25 < V ≤ 1 m <sup>3</sup>	1 < V ≤ 10 m <sup>3</sup>	V > 10 m <sup>3</sup>
		Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort
Probabilité d'atteinte	Très faible 10 <sup>-6</sup>	Nul à négligeable	Nul à négligeable	Nul à négligeable	Nul à négligeable	Nul à négligeable
	Faible 10 <sup>-5</sup>	Faible	Faible	Moyen	Fort	Fort
	Moyenne 10 <sup>-4</sup>	Faible	Faible	Moyen	Fort	Fort
	Forte 10 <sup>-3</sup>	Faible	Moyen	Fort	Fort	Très fort
	Très forte	Moyen	Fort	Fort	Très fort	Très fort

Figure 37 : Définition du niveau de l'aléa de référence par zone homogène (MEZAP, 2021)

Ce zonage indicatif de l'aléa rocheux (chute de blocs et éboulement) établi selon la MEZAP 2021 aboutit à une cartographie cohérente avec celle définie en 2011 à dire d'expert dans les études de hiérarchisation des risques de mouvements de terrain dans le cirque de Mafate (Figure 38). La zone de l'école, auparavant en aléa moyen serait surclassée avec cette nouvelle connaissance et matrice d'aléa, en aléa fort. De la même manière, l'aléa serait majoré sur le secteur entre le Gîte Juliette et l'habitation 3, passant d'un aléa moyen à fort.

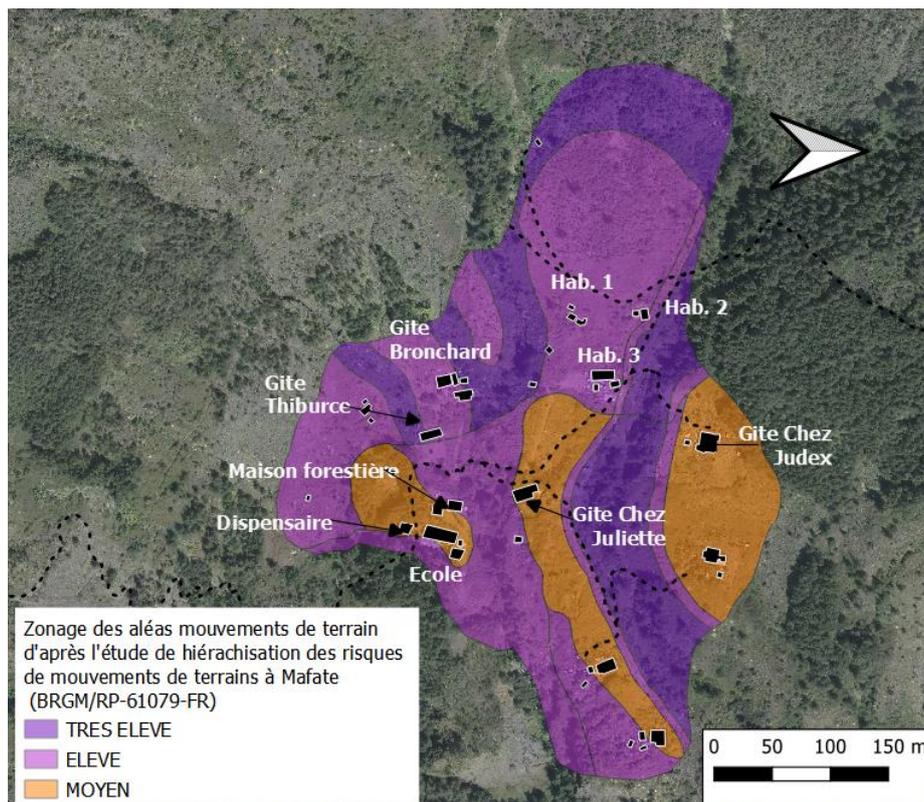


Figure 38 : Rappel du zonage de l'aléa de l'aléa mouvements de terrain établi en 2011 dans le cadre de l'étude de hiérarchisation des risques des îlets habités de Mafate (RP-61079-FR)

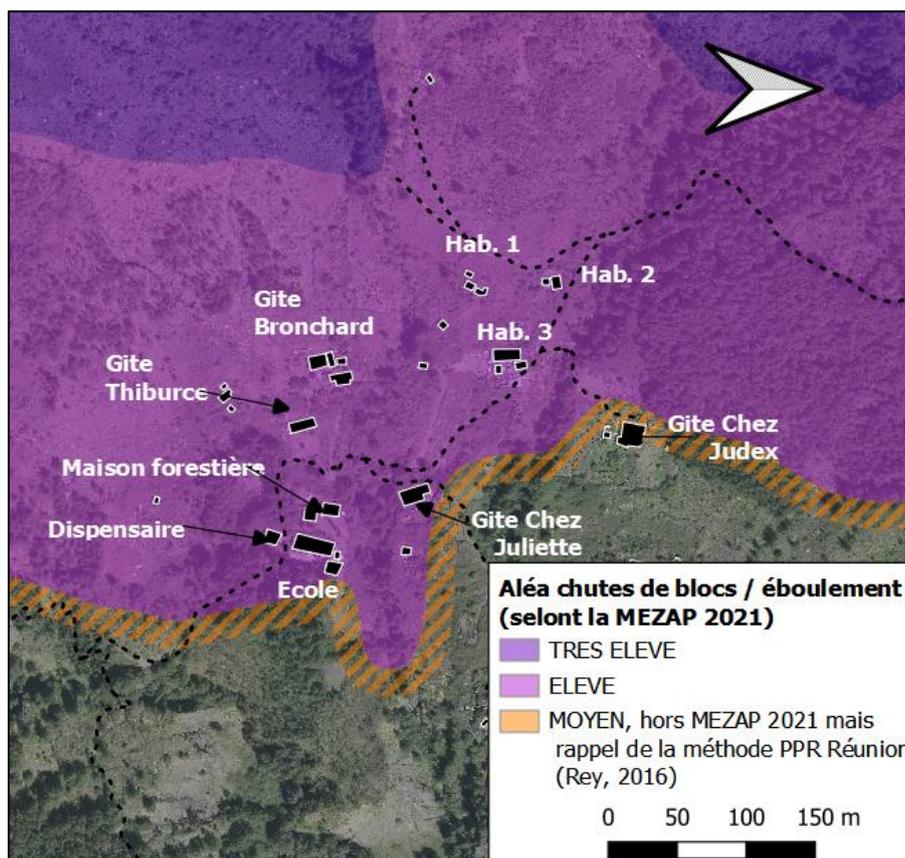


Figure 39 : Zonage de l'aléa chute de blocs / éboulement selon les critères MEZAP, 2021

## 6. Solution de mise en sécurité des enjeux

**Etant considéré un retour à un niveau de risques en lien avec la déstabilisation redoutée du compartiment n°2 équivalent à celui précédent l'incendie, les solutions de mise en sécurité des enjeux concernent l'ensemble des menaces liées aux instabilités identifiées au sein du rempart.**

Au vu de l'étendue des zones de départ menaçant les enjeux en pied, il ne paraît en aucun cas réaliste de venir conforter activement et durablement les instabilités redoutées, d'autant plus que d'autres menaces peuvent être présentes dans le rempart, en contrebas de la crête, générant un risque probablement équivalent pour les habitants de Roche Plate, sans qu'il soit possible de les identifier précisément à ce stade et de les sécuriser. Au vu des résultats de l'analyse de l'exposition des enjeux aux chutes de blocs (§5), plusieurs stratégies de sécurisation sont envisageables.

### 6.1. SOLUTION 0 : ACCEPTATION DU RISQUE

Considérant que les enjeux sont exposés aux aléas gravitaires au même titre que d'autres habitations à La Réunion, les risques pourraient être acceptés par la collectivité, le gestionnaire du site et les habitants. En parallèle la poursuite de la surveillance des instabilités gravitaires en tête du rempart pourrait permettre de prévenir d'une instabilité de grande ampleur et de la mise en sécurité de la population exposée (cf. § 5.5).

### 6.2. SOLUTION 1 : EVITEMENT

La délocalisation des enjeux exposés tel que cela était recommandé dans l'étude de hiérarchisation des risques dans le cirque de Mafate (Garnier, 2011)<sup>17</sup> reste une approche pertinente pour écarter définitivement les enjeux des menaces gravitaires redoutées y compris des éboulements de plus grande ampleur que ceux considérés dans cette analyse. L'identification des enjeux à délocaliser relève de choix des acteurs/décideurs de ce territoire en fonction de l'importance des enjeux et du niveau d'exposition défini dans cette étude.

Ces réflexions avaient déjà été entamées pour certains enjeux (Gîte du Bronchard et Thiburce) déjà fermés depuis plusieurs années.

Depuis l'évacuation en urgence de l'école élémentaire vers l'Îlet de Roche Plate Eglise, un projet de construction d'un nouveau bâtiment sur cet îlet (délocalisation définitive) est en cours.

Subsisteraient donc les habitations ne recevant pas du public dans une zone de probabilité d'atteinte faible (mais en aléa fort) et le gîte Juliette dans une zone de probabilité d'atteinte faible des chutes de blocs et éboulements (également en aléa fort au sens de MEZAP 2021).

Les contraintes d'accès au cirque augmentent considérablement le coût de la reconstruction d'habitation équivalente. Cette solution implique aussi *a priori* la déconstruction des enjeux délocalisés. Toutefois, comparativement à des solutions de sécurisation lourdes pour lutter efficacement contre les menaces potentielles étudiées dans le présent rapport les coûts de

---

<sup>17</sup> GARNIER C., TAQUET J. (2011) – Hiérarchisation des risques dans le Cirque de Mafate, Saint-Paul (974) – tranche ferme : Îlets de Roche Plate, des Orangers et des Lataniers. Rapport BRGM/RP-59472-FR, 67 p., 47 fig., 2 tab., 4 ann.

relocalisation ponctuelle restent du même ordre de grandeur mais offre l'avantage d'une sécurisation définitive.

L'acceptabilité et l'impact social associés à cette mesure pourraient être également forts et seraient le cas échéant à évaluer dans l'optique d'une prise de décision.

### 6.3. SOLUTION 2 : PARADES PASSIVES

Cela consiste en la mise en œuvre de parades passives visant à intercepter ou dévier les trajectoires avant l'atteinte des enjeux. L'implantation et le dimensionnement de ces parades sont dépendants de la configuration des terrains conditionnant les axes de propagation, de l'énergie de la hauteur de passage des blocs modélisés (Figure 40) .

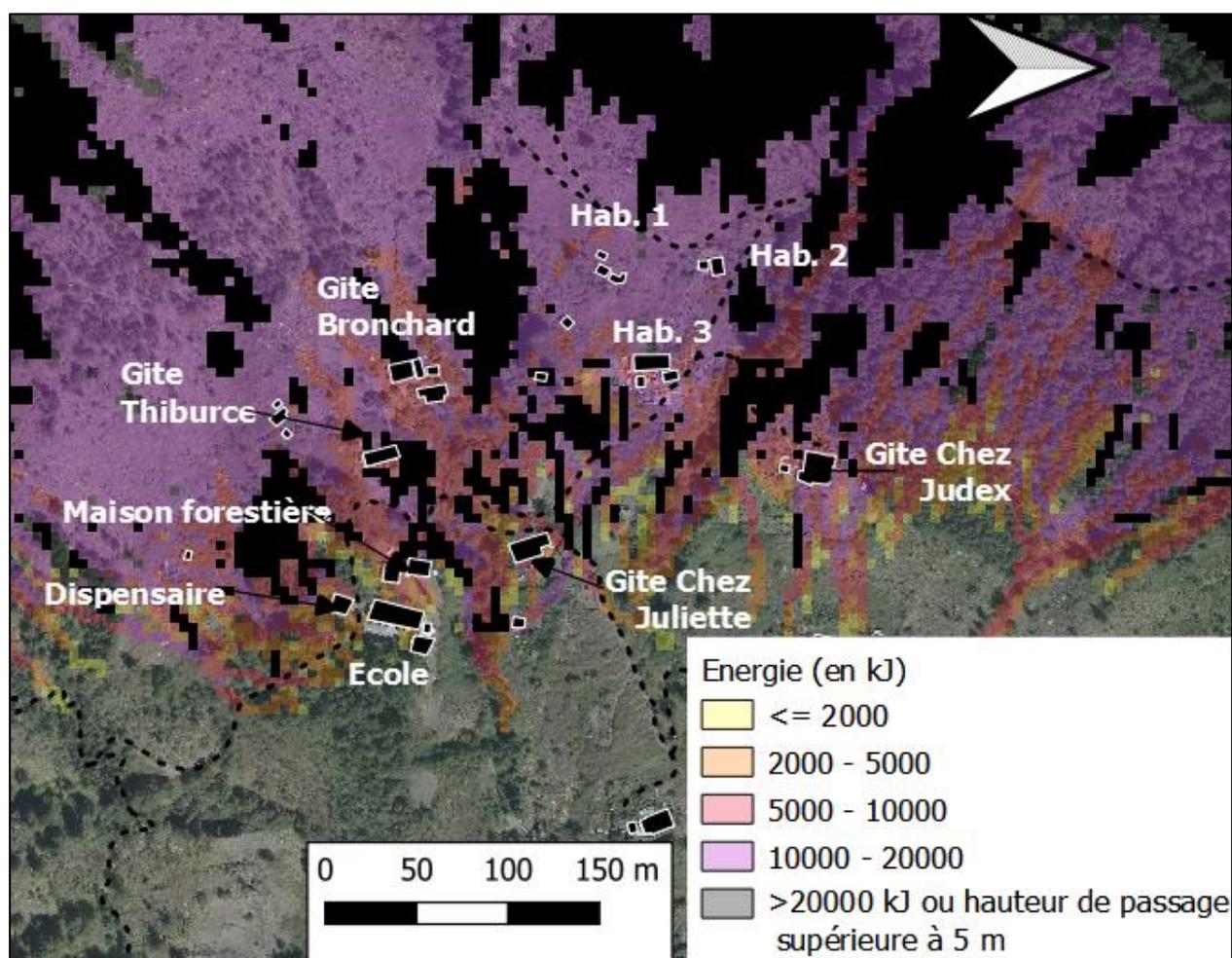


Figure 40 : Cartographie des hauteurs de passage (percentile à 95%), des énergies et principaux axes de propagation

Sur cette base, en considérant que le gite du Bronchard est déjà fermé et ne représente plus un enjeu à sécuriser, des positionnements d'écrans d'arrêt possibles sont proposés en Figure 41. Ces ouvrages sont implantés sur des zones de roulement de blocs avec des hauteurs de passage inférieures à 4-5 m. Là où les énergies restent inférieures à 20 000 kJ, la mise en œuvre de merlons en terre renforcés permettrait d'intercepter les blocs en fin de course. Les écrans de filets possédant des capacités d'interception classiquement limitées à 5000 kJ ne suffiraient pas dans

une telle configuration et ces derniers sont en tout état de cause déconseillés pour sécuriser durablement des habitations (à l'instar des recommandations du cotech n°2, DGPR, 2015). Les merlons pourraient ne pas être disposés en travers de la pente, mais de façon oblique afin de dévier les blocs vers les thalwegs ou des zones hors enjeux à préserver. La hauteur minimale de ces ouvrages devrait être de 5 m afin de conserver une revanche supérieure à 1 x le rayon du bloc<sup>18</sup>. Ces parades sont inadaptées pour contenir les produits d'éboulement plus volumineux que ceux du scénario de référence de cette étude, par exemple un éboulement en masse.

La réalisation d'un merlon avec les matériaux du site sera délicate en raison de l'absence de voie d'accès pour des véhicules terrestres, les moyens de terrassement devront nécessairement être héliportés. Aussi, seules des mini-pelles légères (inférieures à 1 tonne) pourraient être transportées sur ce site. Au regard de la taille des blocs du substratum bréchique à mobiliser, la création d'une fosse et d'un merlon de protection ne paraît pas réalisable avec ce type d'engin. Une solution alternative consisterait à héliporter des engins de terrassement plus lourds démontés et de les remonter sur le site. Cette opération serait logistiquement complexe à mettre en œuvre.

Ces ouvrages devront faire l'objet d'un dimensionnement spécifique qui pourra s'appuyer sur les résultats de cette analyse de trajectographie et sur les recommandations du guide C2ROP<sup>19</sup>.

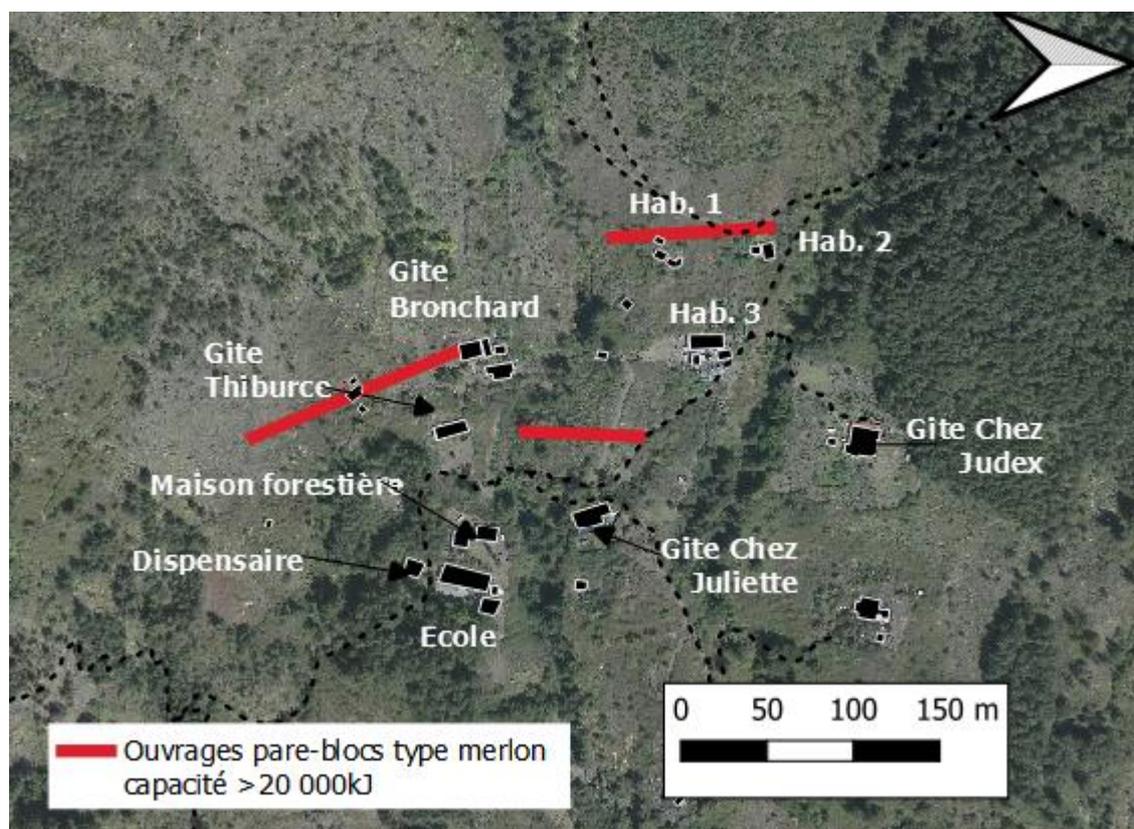


Figure 41 : Principe de parade passive pour sécuriser les enjeux bâtis non délocalisés

<sup>18</sup> Projet national C2ROP. Recommandations pour la conception, le suivi de réalisation et l'exploitation des dispositifs de protection par merlons pare-blocs (Cerema, 2020)

<sup>19</sup> Projet national C2ROP. Recommandations pour la conception, le suivi de réalisation et l'exploitation des dispositifs de protection par merlons pare-blocs (Cerema, 2020)

#### **6.4. SOLUTION 3 : SUPPRESSION DE COMPARTIMENTS INSTABLES EN PAROI**

Il s'agira en premier lieu de la purge des 18 compartiments désolidarisés présents en crête entre le Piton Maïdo et la Vierge susceptibles d'entraîner les trajectoires les plus longues et menaçantes pour les enjeux bâtis.

Les masses à purger seront préalablement fragmentées afin de réduire les volumes de chutes.

Le déclenchement provoqué et contrôlé permettra de garantir l'absence de personnes dans la zone de possible propagation aux moments de ces chutes.

L'atteinte des enjeux bâtis sera possible selon les niveaux de probabilité d'atteinte définis préalablement dans cette étude et en fonction des choix pris pour ces derniers (délocalisation définitive ou non).

Malgré ces purges des compartiments dont le délai de rupture est considéré comme étant le plus court, de nouvelles instabilités pourraient se développer en recul de ces zones de purges, mais aussi partout ailleurs dans le versant. Même si les départs depuis la crête sont les plus pénalisants, des départs plus bas dans le rempart pourraient aussi impacter les enjeux. Aussi, l'exposition des enjeux en pied traduit par le niveau d'aléa chute de blocs et éboulements resterait inchangée après ces travaux de sécurisation.

Cette solution de traitement ponctuelle permettrait principalement de sécuriser les enjeux en tête (randonneurs fréquentant la crête du site touristique principalement). La zone touristique n'est concernée que par 5 compartiments instables. En cas de purge, les modélisations de trajectographie de ces 5 compartiments indépendamment indiquent une probabilité d'atteinte des enjeux bâtis de Roche Plate inférieure à  $1.10^{-5}$  soit faible mais non nulle, hormis le gîte Bronchard (plus exposé).



## 6.5. ANALYSE PRELIMINAIRE COUT /BENEFICES / INCONVENIENTS DES SOLUTIONS DE SECURISATION

Les différentes solutions de sécurisation abordées dans cette étude sont comparées dans Tableau 9. Cette étude n'oriente pas vers une ou des solutions en particulier. Il appartiendra aux acteurs de ce territoire de réfléchir à une stratégie de sécurisation à partir des solutions proposées qui peuvent aussi être couplées.

Tableau 9 : Analyse comparative de solutions de sécurisation

Solutions de sécurisation	Cout estimé durée estimé	Avantage	Inconvénients
<b>Solution 0 : Acceptation de ce niveau d'exposition et suivi des instabilités en tête</b>	-	- Impact humain et social limité (sauf si crainte des habitants de rester vivre sur ce site)	- Maintien d'une situation d'habitations exposées - Crainte possible des habitants
<b>Solution 1 : Evacuation des enjeux les plus exposés</b>	Cout de la démolition / reconstruction ~200k€ par maison ~500k€ pour l'école	- Réduction définitive du risque	- Impact humain et social pour les habitants concernés => nécessite une solution de repli sur une autre concession moins exposée
<b>Solution 2 : Merlon de protection renforcé en terre</b> 3 ouvrages de 130, 70, et 90 m et de 5 m de hauteur	700-800 k€  >6 mois	- Efficacité de la parade - Entretien limité - Matériaux disponible localement - Végétalisable/Intégration paysagère après plusieurs années - Réduction de l'aléa lave torrentielle - Capacité résiduelle après impact maintenue	- Temps d'exécution très long en raison de moyens de terrassement qui seront limités du fait l'inaccessibilité - Nuisance pendant l'exécution des travaux - Impacts environnementaux potentiellement élevés - Impact paysager fort pendant les travaux et persistant mais végétalisable - Incidence hydraulique à évaluer - Efficacité incertaine pour des atteintes de bloc supérieur à 5-10m <sup>3</sup>
<b>Solution 3 : Suppression des compartiments instables après fragmentation</b> (au coussin, vérin, ou à l'explosif) et évacuation temporaire des habitants  5 compartiments au niveau de la zone touristique  18 compartiments menaçants les enjeux bâtis en pied	50 k€ 15 -20 jours  180 k€ 4 mois	- Efficacité - Rapidité d'exécution  - Sécurisation des enjeux en tête	- Effet de décompression (apparition de nouveaux compartiments instables en arrière à moyen terme (plusieurs décennies). - Impact écologique et paysager à évaluer avec le Parc/ONF (modification à terme en cas de suppression de compartiment en crête, de la plateforme très fréquentée sur le site touristique - Nécessité d'évacuation des habitants le temps des travaux - Risque d'atteinte des enjeux en pied - Solution ponctuelle ne permettant pas de sécuriser l'îlet de Roche Plate face aux autres menaces du rempart

## 7. Rappel du Programme de surveillance des instabilités rocheuses

La gestion de crise suite à l'incendie de novembre 2020 a rappelé la nécessité de mise en œuvre d'un dispositif adapté permettant de suivre l'évolution des instabilités potentielles connues de longue date et menaçant des enjeux forts en pied et en recul de la bordure. Le besoin d'une meilleure connaissance de l'évolution de cette crête de rempart a par ailleurs été exprimé par les services de l'Etat à cette occasion.

Bien que la présente analyse de trajectographie relativise l'exposition des enjeux en pied de versant face à la chute de compartiment rocheux, l'exposition des enjeux face à des éboulements en grande masse dont les propagations sont généralement plus longues est donc plus élevée.

La poursuite du programme de surveillance des instabilités rocheuses du Maïdo paraît aussi nécessaire afin de :

- Suivre l'évolution des compartiments rocheux dont la stabilité est engagée à court terme, au regard des probabilités d'atteinte non négligeables des enjeux bâtis en pied de versant, des incertitudes de l'analyse de trajectographie et de l'exposition des usagers du site touristique bien que l'accès à ces compartiments soit formellement interdit ;
- Suivre l'évolution des écaillles rocheuses, qui en cas de rupture menacerait d'avantage les enjeux en pied de versant ainsi que les zones accessibles au public en tête ;
- Améliorer la compréhension de ce type d'instabilités pour une meilleure prise en compte dans la gestion des risques à La Réunion.

Le protocole de suivi de ces instabilités est défini dans le cadre du volet 2 de ce projet. Il s'attache à la surveillance distincte des écaillles rocheuses sur le long terme (§7.1) et au suivi des compartiments en limite de stabilité à la bordure du rempart à l'échelle saisonnière par photogrammétrie et relevé de jauges de déplacement (§7.2) et en continu via un réseau d'extensomètres en fissures (§7.3).

### 7.1. SUIVI DES ECAILLLES ROCHEUSES

Au regard de l'inertie supposée importante des écaillles rocheuses et des mouvements probablement lents et de faibles intensités, le suivi de ces instabilités ne peut donc s'inscrire que sur une longue période (plusieurs années à décennies). Aussi, afin de garantir la pérennité du suivi, les relevés topographiques sont rattachés à un référentiel spatial local avec 6 points de références implantées sur une zone réputée stable à plus 150 m de la bordure du rempart. Ce référentiel a été implanté le 02/12/2021. Ainsi, même en cas de longue interruption, le suivi pourra être repris.

L'ensemble des points (référence (6) et contrôle (16)) sont relevés avec une précision millimétrique (tachéomètre + post-traitement) tous les 4 mois (avril/aout/décembre) pendant 2 ans (soit 6 levés) (Figure 44, triangles et carrés mauves). Ces relevés serviront à identifier des déplacements relatifs des écaillles rocheuses et à géoréférencer précisément des levés photogrammétriques de la bordure du rempart. Les calculs de distance 3D entre les points de référence et les points de contrôle permettront de quantifier avec une précision millimétrique les éventuels déplacements des écaillles rocheuses.

## 7.2. SUIVI SAISONNIER DES COMPARTIMENTS A LA BORDURE DU REMPART PAR PHOTOGRAMMETRIE

Compte-tenu d'une couverture végétale naturellement peu développée sur le site, *a fortiori* suite à l'incendie, la topographique de la bordure du rempart sera acquise par technique de photogrammétrie. Cette étude s'appuiera sur les données acquises par l'équipe PIMANT de la Région Réunion. L'expérimentation de cette méthode présente un enjeu pour la mise au point d'une solution opérationnelle de suivi à bas coût du site sur le long terme.

Un levé photogrammétrique sera réalisé tous les 4 mois (août/décembre/avril) pendant 2 ans (6 levés) pour quantifier régulièrement l'évolution des compartiments à la bordure du rempart au droit des belvédères touristiques et pour suivre l'éventuelle érosion des assises scoriacées.

A chaque intervention une acquisition de prises de vue obliques et nadirales de la bordure du rempart sera réalisée avec production d'un modèle numérique de surface par photogrammétrie. Chaque levé fera l'objet d'une quantification des évolutions par rapport à la précédente acquisition et par rapport à l'état initial constitué par le levé Lidar très haute résolution acquis en Aout 2021 dans le cadre du projet Rempart en partenariat avec la DEAL sur ce site. Les évolutions feront l'objet d'une analyse et d'une interprétation. Un compte-rendu des observations et mesures sera dressé à l'issue de chaque intervention.

Il convient de noter qu'une absence totale de déplacement décelables sur la durée du projet reste possible. A l'issue du projet, la fréquence du suivi sera ainsi réévaluée.

## 7.3. INSTRUMENTATION DES COMPARTIMENTS EN BORDURE DE REMPART

La fréquence annuelle du suivi topographique pourrait en revanche s'avérer insuffisante pour caractériser l'évolution des compartiments proches de la bordure, susceptible d'être rapide, voire brutale. Douze capteurs de type extensomètres avec télétransmission (Figure 42) ont été installés en mars et avril 2022 pour un suivi en continu de 5 compartiments dont la stabilité est jugée précaire à très court terme et susceptible de porter atteinte aux personnes fréquentant le site touristique (Figure 44, cercles jaunes).



Figure 42 : Capteur de type Delta L+ de la marque Feelbat installé en 12 points pour des mesures en continu de l'ouverture de fissures avec une précision de l'ordre du dixième de millimètre et télétransmission des données.

Des jauges d'ouverture ont été installées à proximité immédiate des 12 extensomètres afin de sécuriser le suivi de ces points de part et d'autre de fissure (Figure 43). 28 autres jauges ont été installées au niveau d'autres compartiments désolidarisés le long de la crête, de la zone des antennes au secteur de la vierge. Il est prévu dans le cadre de ce projet des mesures tous les 4 mois pendant 2 ans (Figure 44, losanges verts). Ce dispositif permet de surveiller les 15 compartiments les plus volumineux



*Figure 43 : Paire de jauges de déplacement installée en 40 points pour des mesures périodiques de l'ouverture de fissures avec une précision de l'ordre du dixième de millimètre.*

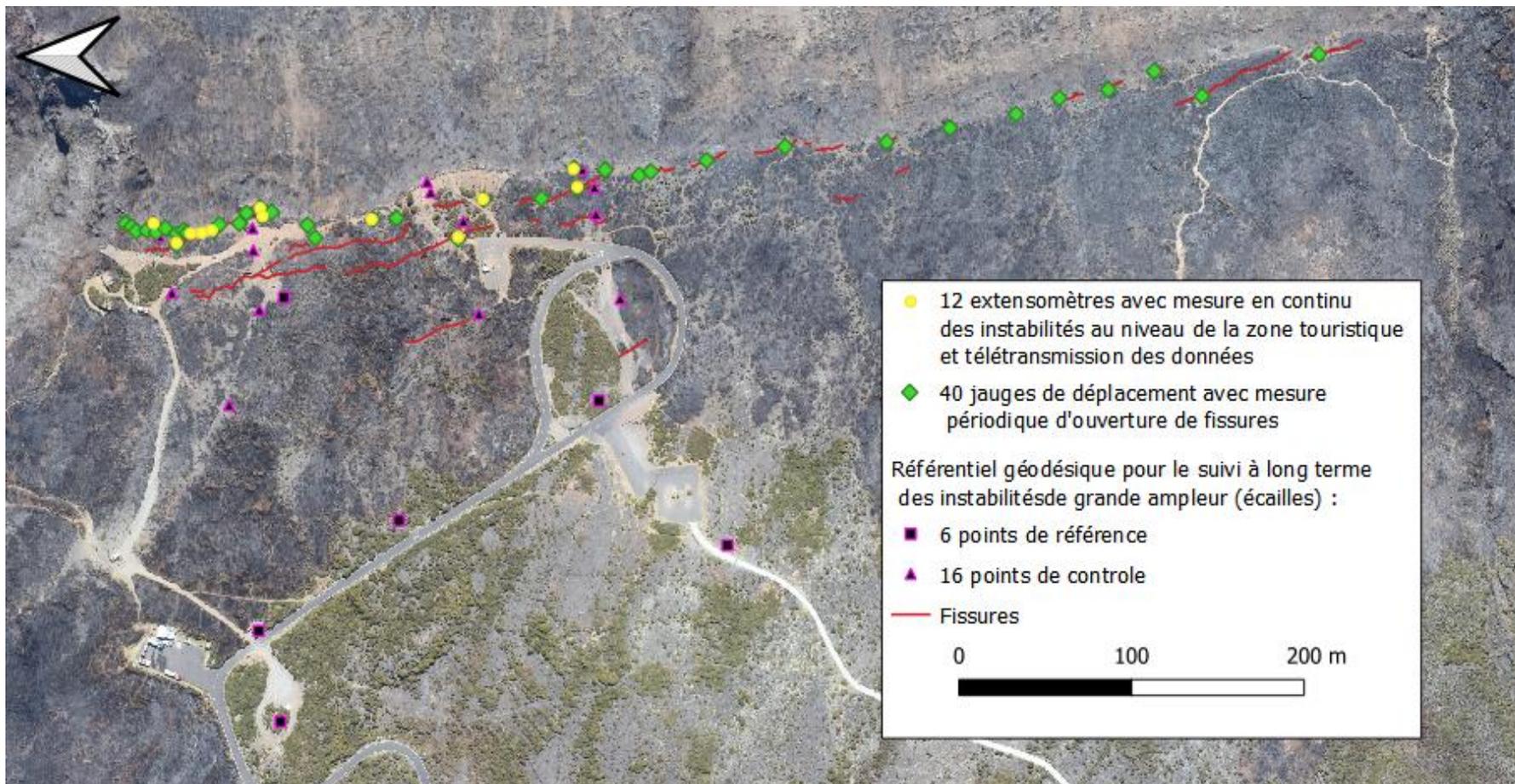
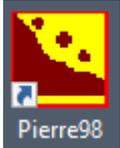


Figure 44 : Implantation des extensomètres, jauges de déplacement et du référentiel géodésique mis en place dans le cadre du projet (les extensomètres (ronds jaunes) sont systématiquement couplés à des jauges de déplacement)

## Annexe 1

### **Fiche outil logiciel Pierre98\_V2**



## Propagation de blocs rocheux en versant

### Trajectographie

PIERRE98© est un logiciel de simulation de trajectoires de chutes de blocs. Le modèle numérique est basé sur des concepts mécaniques rigoureux matérialisant les interactions sol-bloc notamment et sur des retours d'expérience d'observations in-situ.

#### Caractéristiques du modèle

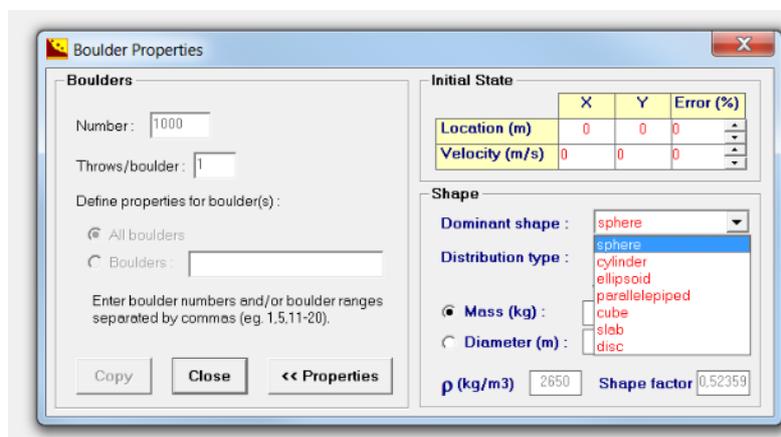
Les simulations de trajectoires de chutes de blocs intègrent les aspects suivants:

- ✓ Analyse en 2D selon profil topographique
- ✓ Paramètres de bloc (masse et forme)
- ✓ Paramètres de sol (rugosité, frottement, restitution)
- ✓ Différents modes de mouvement du bloc
- ✓ Intégration d'un modèle d'impact en plasticité pour définition des coefficients de restitution normal et tangentiel
- ✓ Analyse probabiliste des résultats à partir de variation des paramètres d'entrée des calculs suivant des fonctions de densité de probabilité

#### Paramètres de bloc

La définition des blocs au départ se fait sur 3 paramètres principaux :

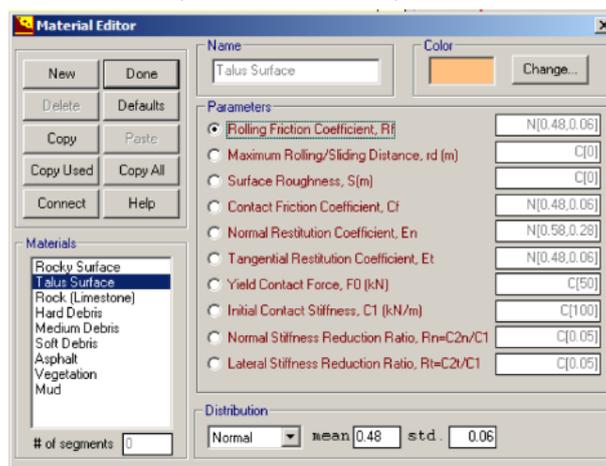
- ✓ Masse ponctuelle, diamètre équivalent et densité de matériau
- ✓ Prise en compte des formes de blocs selon 7 formes dominantes : sphère, cylindre, ellipsoïde, parallélépipède, cube, dalle, disque. Le coefficient de forme peut être rentré manuellement
- ✓ Position et vitesse du bloc au départ



#### Paramètres de sols

Sauf cas particulier la définition des types de sols le long des profils est contraint. Il est couramment distingué 7 sols dont les principaux paramètres de frottement et de restitution sont les suivants :

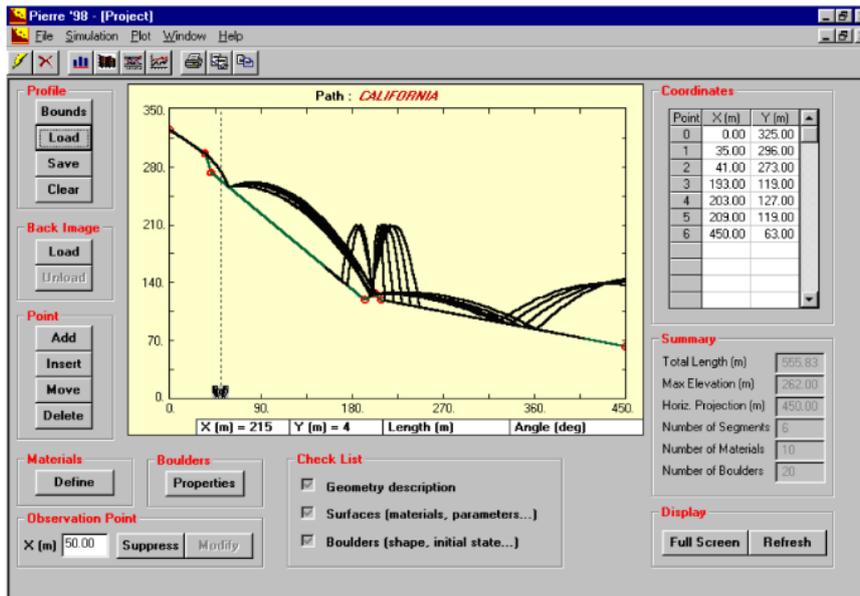
n° sol	Type de sol	Coefficient de frottement dynamique Rf (s.u.)	Coefficient de frottement Cf (s.u.)	Coefficient de restitution normal En (s.u.)	Coefficient de restitution tangentiel Et (s.u.)
1	autres (1)	-	-	-	-
2	sol fin (2)	0.6	1	0.3	0.7
3	piste, éboulis fin (3)	0.65	1	0.37	0.73
4	éboulis grossier (4)	0.65	0.7	0.35	0.8
5	couvert fin (5)	0.6	1	0.6	0.8
6	roche (6)	0.55	0.8	0.7	0.9
7	route goudronnée (7)	0.58	0.58	0.4	0.58



## Modes de mouvement

Les modes de mouvements considérés pour la propagation des blocs sont :

- ✓ Vol libre, sans perte de moment : trajectoire parabolique, résistance de l'air négligée
- ✓ Glissement / roulement : perte d'énergie par frottement (statique et/ou dynamique)
- ✓ Rebond : modélisation à l'impact des pertes d'énergie suivant le modèle de Falchetta
- ✓ Transition entre différents modes : rebond → roulement / roulement / glissement vers rebond



## Analyse probabiliste de propagation

La formule  $N=1/(P \times 0.1^2)$  indique le nombre théorique de simulations nécessaires pour estimer un événement à la probabilité d'occurrence  $P$  avec une erreur visée de 10% (convergence de l'estimation de la probabilité  $P$  par simulation Monte-Carlo).

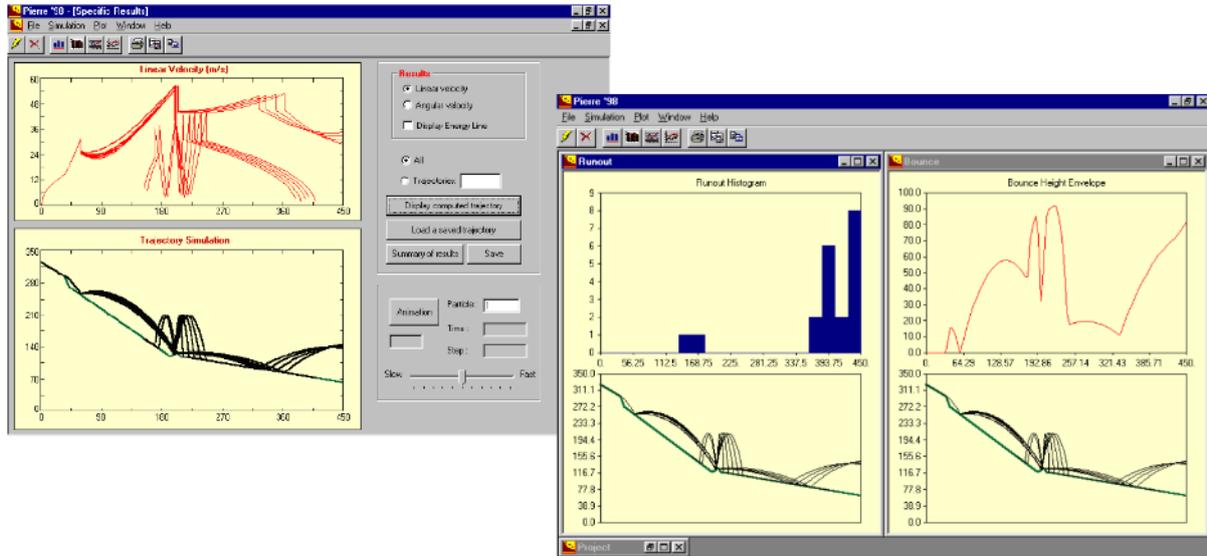
Ceci impliquerait la réalisation d'au moins 10 000, 1 000 000 et 100 000 000 simulations de trajectoires pour estimer les distances d'arrêt pour des probabilités d'atteinte de  $P=10^{-2}$ ,  $P=10^{-4}$  et  $P=10^{-6}$ , respectivement.

A l'heure actuelle, la réalisation de 1 000 000 simulations de trajectoires (ou plus) avec est trop gourmande en temps de calcul pour être envisagée dans le cadre d'une étude de cas appliquée.

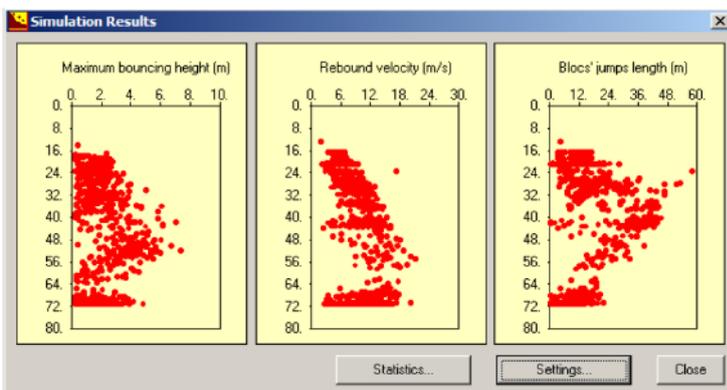
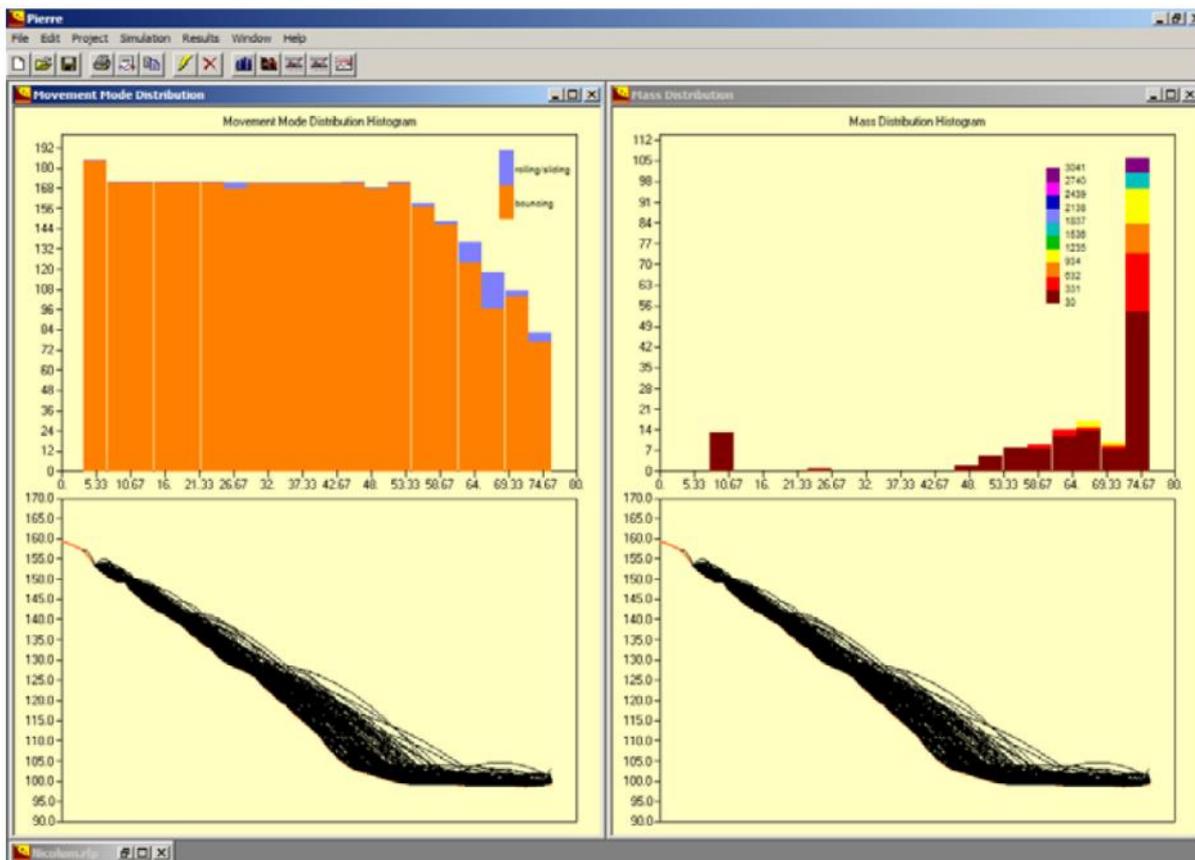
Il est couramment réalisé entre 5 000 et 10 000 simulations de trajectoires avec Pierre98, ce qui constitue un nombre de simulations nécessaire pour évaluer les distances d'arrêt pour une probabilité d'atteinte de  $P=10^{-2}$ . Ce nombre de simulation permet également d'estimer l'ordre de grandeur de probabilité d'atteinte de l'ordre de  $10^{-4}$  (1 bloc sur 10000).

Pour des raisons pragmatiques, l'estimation des distances d'arrêt pour des probabilités d'atteinte de  $10^{-4}$  à  $10^{-6}$  est menée par extrapolation linéaire de l'évolution de la probabilité d'atteinte en fonction de la distance d'arrêt.

La validité de cette démarche a été confirmée pour une dizaines de sites aux profils topographiques très différents. Les tests menés ont consisté à modéliser la queue de distribution des probabilités d'atteinte par une loi de Pareto généralisée pour extrapoler les distances d'arrêt pour des petites probabilités. Les deux approches (extrapolation linéaire et loi de Pareto généralisée) conduisent à une estimation des distances d'arrêt à  $P=10^{-6}$  assez proches, la démarche utilisant la loi de Pareto généralisée étant généralement la plus pessimiste.



Analyse de l'exposition des enjeux de Roche Plate (plateau de l'école) aux instabilités gravitaires en provenance du rempart du Maïdo



The 'Graph Statistics' window displays a table of statistical data for three parameters. The 'number of jumps' is 1155.

	min	max	$\mu$	$\sigma$	$\gamma_1$	$\gamma_2$
Maximum height (m)	0.250	7.401	1.533	1.306	1.332	1.439
Initial Velocity (m/s)	2.000	21.103	7.538	4.170	0.471	-0.610
Jump Length (m)	0.503	57.815	12.784	10.978	1.358	1.063

Buttons for 'Read data...', 'OK', and 'Cancel' are visible at the bottom.

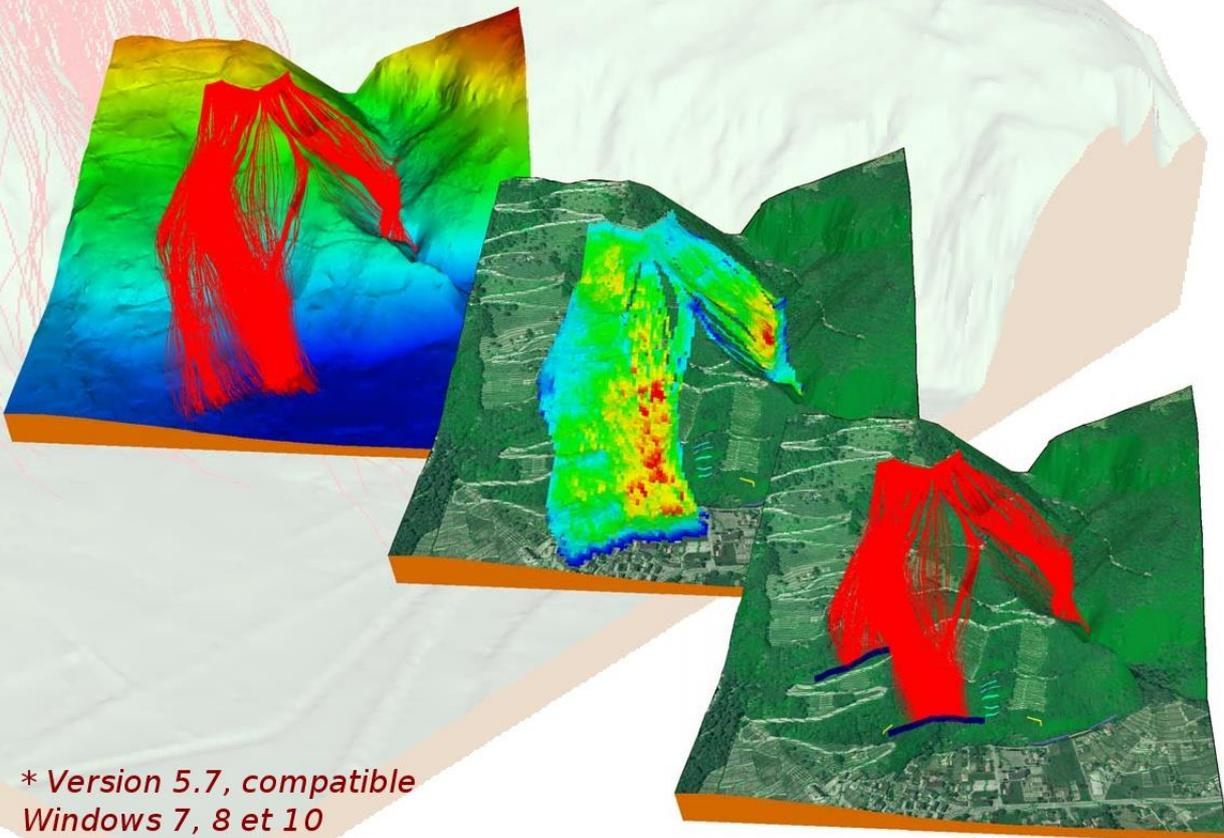
## Annexe 2

# Plaquette de présentation du logiciel RocPro3D



**RocPro3D**  
L'outil professionnel pour  
la simulation trajectométrique  
des chutes de blocs en 3 dimensions

- Utilisation très intuitive*
- Puissance et rapidité des calculs*
- Visualisation 3D conviviale*
- Outils d'analyse et outils statistiques intégrés*
- Aide à la réalisation de cartes de risques*
- Implantation et dimensionnement d'ouvrages de protection*
- Export des résultats vers les SIG*



*\* Version 5.7, compatible  
Windows 7, 8 et 10  
(32 et 64 bits)*

## CONCEPT

### Modèle physique

- Choix d'une formulation à bloc rigide (intégration de la masse et de la rotation du bloc dans les calculs), ou à masse concentrée

### Cinématique du roulement/glisement

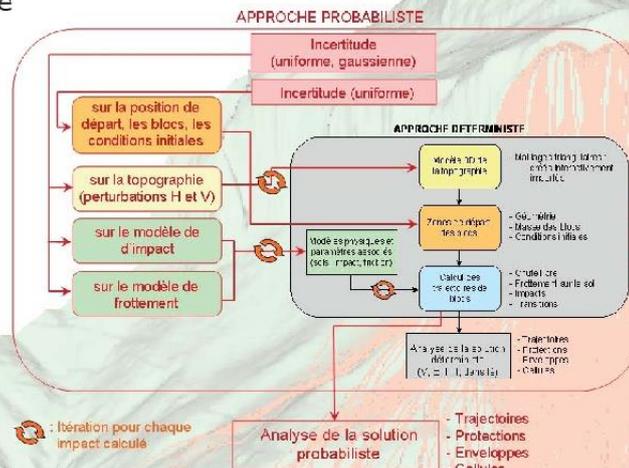
- Modèle de roulement frottant (bloc rigide) ou de glissement frottant (masse concentrée), intégré numériquement sur le MNT au moyen d'un algorithme stable et précis

### Modèle physique de l'impact

- Effets de la rotation du bloc (bloc rigide)
- Rn standard (constant) ou dépendant de la vitesse

### Choix du mode de calcul

- Mode déterministe
- Mode probabiliste, avec choix de variables équiprobables ou gaussiennes



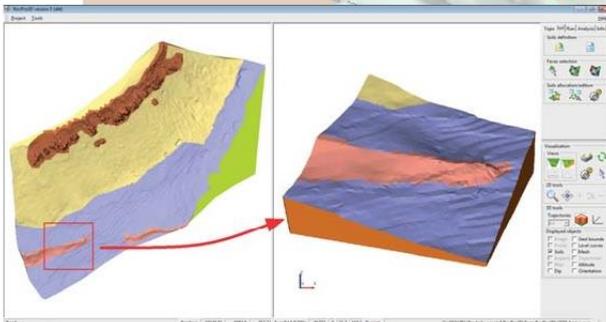
## CREATION DU MODELE DE TERRAIN

### Création des points du maillage

- Par import de fichiers de points (format DXF, TXT, CSV, DEM), de courbes de niveaux (format DXF). La superposition d'images est possible
- Par digitalisation des courbes de niveau d'une carte scannée, car **RocPro3D** gère parfaitement les maillages triangulaires irréguliers
- Par saisie d'un profil 2D de points (X, Z), auquel une largeur (Y) est ensuite ajoutée

### Construction du maillage

- Par triangulation de Delaunay, ou par triangulation de grille pour les MNT à répartition régulière de points
- Par import de maillages triangulaires quelconques (format PLY, 3DS, STL)



**RocPro3D** permet également de créer un nouveau projet par extraction d'une zone d'un projet existant, tout en conservant le positionnement et les paramètres

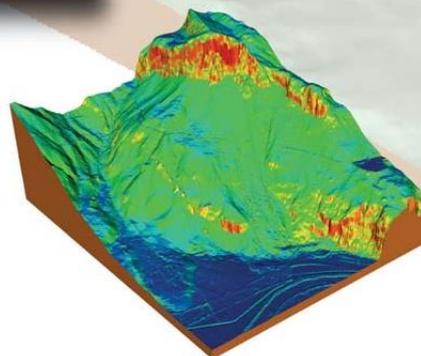
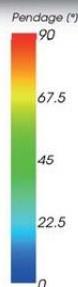
## CREATION DES SOLS

### Attribution des sols sur le MNT

- Définition aisée des sols sur le MNT grâce à une sélection multimodes des faces : sélection par faces individuelles, par zones, par intervalles (altitude, pendage, etc.)

### Caractéristiques physiques des sols

- Au moyen d'une fenêtre intuitive, les paramètres de chaque sol (coef. de restitution énergétique, coef. de glissement/roulement, vitesses et angles limites pour les transitions de phase, et incertitudes associées) sont aisément modifiables. Pour faciliter son utilisation, **RocPro3D** propose 6 types de sols pré-définis



La visualisation des pentages (avec échelle couleur) peut fournir une aide très utile pour positionner les sols

## CALCULS

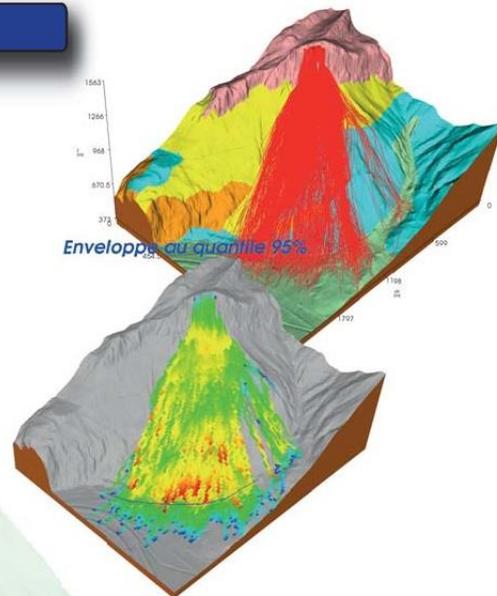
### Source des blocs

- Création de sources linéaires ou surfaciques
- Aucune limite sur le nombre des sources
- Saisie des paramètres des blocs (nombre, masse volumique, forme, taille, conditions de départ, incertitudes associées)

### Choix de la stratégie de calcul

- **Calcul classique**, avec visualisation des trajectoires, aisément réalisable jusqu'à 20 000 blocs
- **Calcul massif**, sans limite sur le nombre de blocs pouvant être calculés (**1 million**, voire plus), permettant l'analyse par cartes de paramètres et par statistique des protections

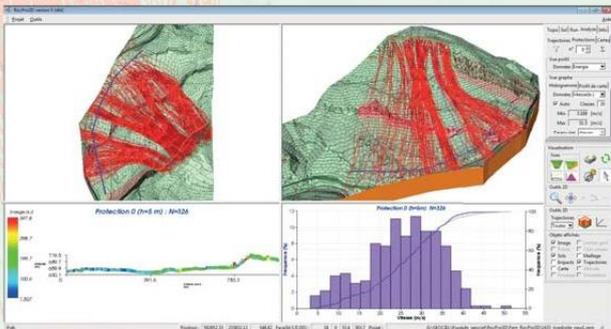
*Pour des performances accrues, les calculs sont exécutés en parallèle sur tous les processeurs de l'ordinateur (le temps de calcul est divisé par le nombre de processeurs)*



## ANALYSE DES RESULTATS

Pour l'analyse des résultats, **RocPro3D** propose quatre vues principales, toutes interactives et modulables :

- La vue 2D et la vue 3D, avec les données à chaque point d'impact (coordonnées XYZ, sol, angles et vitesses avant et après rebond)
- La vue des profils verticaux des trajectoires et des ouvrages de protection, avec le choix du paramètre à étudier (énergie, vitesse, hauteur ou temps)
- La vue des graphes et des histogrammes pour l'analyse statistique



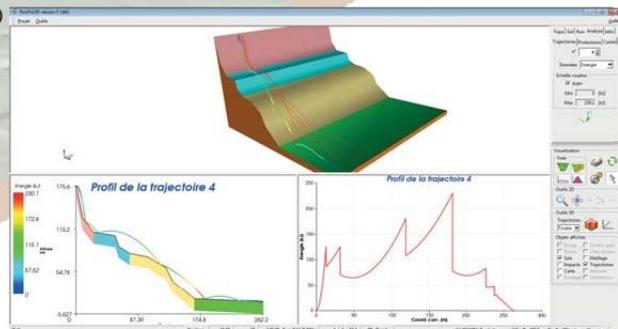
## TRAJECTOIRES

### Visualisation des trajectoires

- Visualisation des trajectoires sur la vue 2D et la vue 3D
- Visualisation des trajectoires selon un profil vertical, avec représentation du MNT, des sols et des protections
- Possibilité de choisir les trajectoires à afficher (une ou toutes, passant par-dessus la protection, etc.)

### Outils d'analyse

- Coloration de la trajectoire suivant la variation du paramètre choisi (énergie, vitesse, hauteur ou temps de parcours du bloc)
- Diagramme de l'évolution de l'énergie, de la vitesse, de la hauteur et du temps de parcours le long de la trajectoire
- Export des données calculées



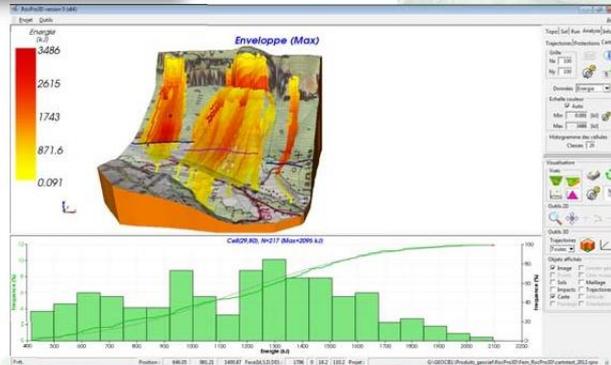
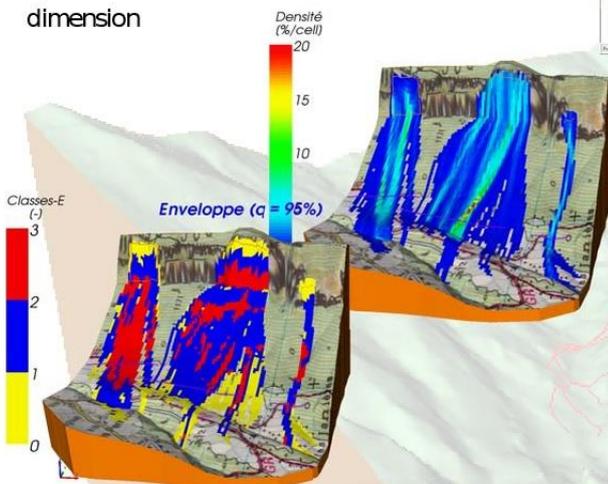
## CARTES

### Cartes disponibles

- Energies
- Classes d'énergie (carte de risque)
- Hauteurs
- Vitesses et temps de parcours
- Densités de trajectoires
- Impacts et points d'arrêt

### Définition de la grille

- Spécification du nombre de cellules et de leur dimension



### Paramètres statistiques des cartes

- Choix du paramètre analysé dans chaque cellule : maximum, moyenne, limite de confiance (%), quantile (%), normalité (test permettant de juger si la population des cellules suit une loi normale, et par conséquent si la moyenne et les limites de confiance ont un sens)

### Analyse statistique des cellules

- Pour chaque cellule de la grille, analyse possible de la moyenne, de l'écart-type et de la médiane, avec histogramme et courbes de fréquence cumulées

## OUVRAGES DE PROTECTION

### Création

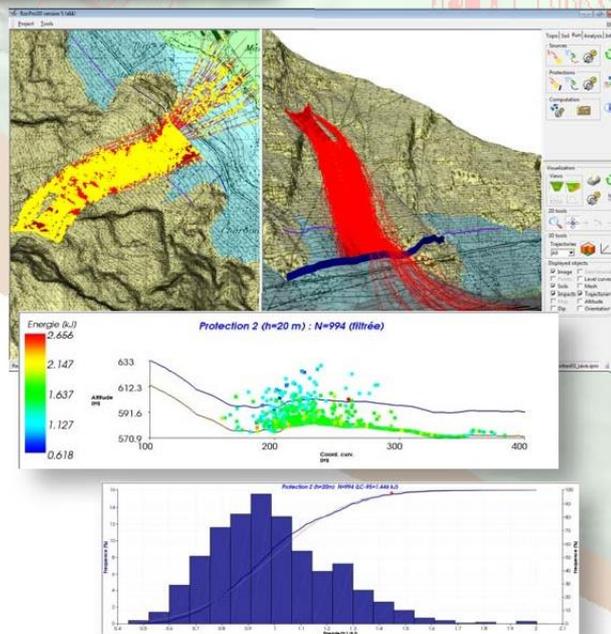
- Possibilité de créer des protections **factives** (collecteur de données), des **filets** ou des **merlons**
- Aucune limite sur le nombre de protections

### Impact des blocs dans la protection

- Affichage des impacts dans la protection, avec l'énergie, la vitesse, la hauteur et le temps de parcours correspondants (échelle de couleur)

### Analyse statistique (énergie, vitesse, hauteur, temps de parcours des blocs)

- Pour chaque protection, calcul des valeurs statistiques des impacts (moyenne, max, limites de confiance, quantiles, test de Kolmogorov-Smirnov) et affichage de l'histogramme et des courbes de fréquence cumulées
- Possibilité d'affiner l'analyse statistique en appliquant des filtres sur les données de la protection (source, section, type d'impact)



## Annexe 3

# **Synthèse des résultats du modèle de trajectographie 3D Rockyfor3D avec des zones de départ depuis la crête**

Rockyfor3D v5.2.15 - Simulations completed on Tue Nov 09 11:08:41 2021

simulation started on Fri Nov 05 15:02:11 2021

simulation settings:

- rock volume variation = +/- 50
- nr. of simulations per source cell = 1000000
- nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 597000000
- additional initial fallheight = 0.000000 m
- Simulation without forest and without nets

Overall simulated block volumes:

- min = 5.600000 m3
- mean = 10.000000 m3
- max = 13.500000 m3

Overall simulated energy values:

- maximum of the mean energy values = 89270.600000 kj
- maximum energy value = 273662720.000000 kj

Statistics on Energy Line Angles recalculated from simulated trajectories:

EL_angle[°]	frequency[-]	frequency[%]
0.00	3790.00	0.00
1.00	27902.00	0.00
2.00	26241.00	0.00
3.00	12479.00	0.00
4.00	20600.00	0.00
5.00	6433.00	0.00
6.00	4368.00	0.00
7.00	201489.00	0.03
8.00	250024.00	0.04
9.00	17808.00	0.00
10.00	990.00	0.00
11.00	108.00	0.00
12.00	535345.00	0.09
13.00	86644.00	0.01
14.00	289147.00	0.05
15.00	13731.00	0.00
16.00	15125.00	0.00
17.00	118722.00	0.02
18.00	51433.00	0.01
19.00	70722.00	0.01
20.00	17550.00	0.00
21.00	19802.00	0.00
22.00	551639.00	0.09
23.00	258770.00	0.04
24.00	11564.00	0.00
25.00	67379.00	0.01
26.00	88281.00	0.01
27.00	34260.00	0.01
28.00	271239.00	0.05
29.00	298605.00	0.05
30.00	526374.00	0.09
31.00	441428.00	0.07
32.00	283032.00	0.05
33.00	1022509.00	0.17
34.00	747048.00	0.13
35.00	6088804.00	1.02
36.00	7871664.00	1.32

37.0020165754.00	3.39
38.0019930704.00	3.35
39.0028272676.00	4.76
40.0062090520.00	10.44
41.0098457680.00	16.56
42.00103497376.00	17.41
43.00113781408.00	19.14
44.0062009148.00	10.43
45.0037507852.00	6.31
46.0017862160.00	3.00
47.00 7989453.00	1.34
48.00 1998963.00	0.34
49.00 652489.00	0.11

## Annexe 4

### **Synthèse des résultats du modèle de trajectographie 3D RocPro3D avec des zones de départ depuis la crête**

RocPro3D Version 6.0.0  
Simulation saved on : 2022/01/20

DTM features

- Number of points = 289771
- Number of cells = 578432

Soils properties

[SOIL]

Id Soil name

0 Eboulis meuble

- Rn(Vn), with K = 9.000000

DETERMINISTIC PARAMETERS:

RNCoef RTCoef  
0.330000 0.800000

FCoef  
0.600000

LimSlidAngle LimSlidAngleObtuse  
4.000000 20.000000

No forest considered

PROBABILISTIC PARAMETERS (Normal distr.):

RCoefStD RCoefLimVel RCoefResStD  
0.004800 10.000000 0.001600

LateralStD LateralLimVel LateralResStD  
6.250000 10.000000 3.125000

FlatteningStD FlatteningLimVel FlatteningResStD  
1.000000 10.000000 2.000000

FCoefStD FCoefLimVel FCoefResStD  
0.036000 10.000000 0.030000

[SOIL]

Id Soil name

1 Eboulis compact

- Rn(Vn), with K = 9.143500

DETERMINISTIC PARAMETERS:

RNCoef RTCoef  
0.380000 0.800000

FCoef  
0.550000

LimSlidAngle LimSlidAngleObtuse  
4.000000 20.000000

No forest considered

PROBABILISTIC PARAMETERS (Normal distr.):

RCoefStD RCoefLimVel RCoefResStD  
0.016000 10.000000 0.012000

LateralStD LateralLimVel LateralResStD  
7.500000 10.000000 3.750000

FlatteningStD FlatteningLimVel FlatteningResStD

1.000000 10.000000 2.000000  
 FCoefStD FCoefLimVel FCoefResStD  
 0.045000 10.000000 0.030000

[SOIL]

Id Soil name  
 2 Rocher sain  
 - Rn(Vn), with K = 50.000000

DETERMINISTIC PARAMETERS:

RNCoef RTCoef  
 0.520000 0.850000  
 FCoef  
 0.450000  
 LimSlidAngle LimSlidAngleObtuse  
 2.000000 25.000000

No forest considered

PROBABILISTIC PARAMETERS (Normal distr.):

RCoefStD RCoefLimVel RCoefResStD  
 0.011000 10.000000 0.005500  
 LateralStD LateralLimVel LateralResStD  
 10.000000 10.000000 5.000000  
 FlatteningStD FlatteningLimVel FlatteningResStD  
 1.000000 10.000000 2.000000  
 FCoefStD FCoefLimVel FCoefResStD  
 0.036000 10.000000 0.030000

[Sources properties

[SOURCELINE]

Id NumBlock  
 0 47773572  
 Source type: Lineic  
 Block info:  
 Mass Rho DiskDiam DiskSlenderness  
 25380.000000 2650.000000 2.900000 2.000000  
 Initial condition: Velocity  
 XVel YVel ZVel RVel  
 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000  
 Probabilistic parameters:  
 MassVar  
 50.000000

[SOURCELINE]

Id NumBlock  
 1 44637660  
 Source type: Lineic  
 Block info:  
 Mass Rho DiskDiam DiskSlenderness  
 25380.000000 2650.000000 2.900000 2.000000

Initial condition: Velocity

XVel	YVel	ZVel	RVel
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Probabilistic parameters:

MassVar  
50.000000

[SOURCELINE]

Id	NumBlock
2	7610035

Source type: Lineic

Block info:

Mass	Rho	DiskDiam	DiskSlenderness	
25380.000000		2650.000000	2.900000	2.000000

Initial condition: Velocity

XVel	YVel	ZVel	RVel
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Probabilistic parameters:

MassVar  
50.000000

CPU properties

- Multi-threaded (12 processors used)

Computation strategy

- Massive computation with:
  - Cell size L = 5.000000 [m]
  - Simple envelopes

Rolling/sliding trajectories computation

- Local accuracy of numerical integration = 0.010000

Blocks reference point for trajectories height data

- Center of mass point

Simulation type

- Rigid Block formulation
- No forest cover
- Probabilistic computation on the following variables :
  - Soil properties :
    - Independent restitution coefficients (Rn, Rt)
    - Lateral deviation
    - Rebounds flattening
    - Friction coefficient
  - Blocks parameters :
    - Mass
- Pseudo-random generated numbers (seed = 1612568392199763700)

Results

- Total number of computed blocks = 100021267
- Total number of computed impacts = 683724859
- Spent CPU time [hh:mm:ss.ss] = 28:02:47.00



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction régionale La Réunion**

5, rue Sainte Anne  
CS 51016  
97404 Saint-Denis Cedex  
Tél. : 02 62 21 22 14

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**