



PPR multi-aléas des communes de La Réunion Propositions d'évolutions méthodologiques

Rapport final

BRGM/RP-66346-FR
Novembre 2016



PPR multi-aléas des communes de La Réunion Propositions d'évolutions méthodologiques

Rapport final

BRGM/RP-66346-FR
Novembre 2016

Étude réalisée dans le cadre d'une convention de recherche et développement partagés DEAL-BRGM

A. REY
Avec la collaboration de
O. BIELEN (DEAL)

Vérificateur :
Nom : C. Garnier
Fonction : Ingénieur Géotechnicien
Date : 18/10/2016
Signature : 

Approbateur :
Nom : S. Bès de Berc
Fonction : Directrice BRGM Réunion
Date : 13/02/2017
Signature : 
Séverine BÈS DE BERC
Directrice
BRGM Réunion



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



Mots-clés : PPR, chute de blocs, éboulement, glissement de terrain, mouvement de terrain, érosion, ravinement, aléa, zonage réglementaire, Réunion (974).

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

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.

Synthèse

La méthodologie d'élaboration des cartes d'aléas « mouvements de terrain » (MVT) s'appuie sur les directives du guide national (1999¹) à partir d'une approche couplant l'analyse cartographique SIG à partir des données numériques disponibles et l'analyse naturaliste d'identification des indices géomorphologiques de terrain sans recours à des modélisations et/ou sondages systématiques. La méthodologie employée sur le territoire réunionnais pour la cartographie des aléas MVT est décrite dans le guide d'élaboration des PPR à La Réunion (DEAL de La Réunion, Août 2012) et dans la note de présentation des PPR approuvés.

Afin d'améliorer la compréhension par les usagers (particuliers, services instructeurs en collectivité, aménageurs) de la méthodologie employée pour la caractérisation des aléas MVT (chute de blocs, glissement de terrain et érosion) dans les procédures PPR des communes de La Réunion, chaque méthode de caractérisation des aléas est décrite avec la proposition d'outils d'aide à la cartographie. Ces outils intègrent les récentes évolutions à l'échelle nationale, adaptées au contexte réunionnais. Ces outils se traduisent par l'élaboration de grilles de qualification des aléas intégrant les notions de probabilité d'occurrence et d'intensité pour chaque aléa MVT étudié.

Ces précisions méthodologiques sont d'ores et déjà intégrées dans la plupart des procédures PPR en cours, puis progressivement certaines évolutions proposées dans le présent rapport seront évaluées en concertation avec les services de la DEAL avant d'être intégrées.

Par ailleurs, étant donné les difficultés de compréhension des principes d'inconstructibilité voire de certaines prescriptions envisagées dans la traduction réglementaire de l'aléa moyen MVT, la présente étude dresse un état des lieux des pratiques à l'échelon national (métropole et autres territoires d'outre-mer) mais également local (évolutions des pratiques depuis les premières procédures PPR à La Réunion) et définit des perspectives d'évolution.

L'analyse effectuée, en concertation avec les services de la DEAL, confirme une possibilité d'ouverture vers un principe de constructibilité sous prescriptions pour les terrains classés en aléa moyen MVT. Cette ouverture (traduite par la zone B2u dans le zonage réglementaire des PPR) est conditionnée principalement par la capacité de sécurisation pour les secteurs jugés à enjeux. Elle intègre des prescriptions au niveau du règlement des PPR, notamment la nécessité pour les personnes concernées dans le cadre de leur démarche au titre du code de l'urbanisme (demande de permis de construire notamment) de réaliser une étude géotechnique préalable afin de définir les conditions de réalisation du projet.

Comme pour la méthodologie décrite pour la caractérisation des aléas, cette ouverture vers le principe de constructibilité des terrains classés en aléa moyen MVT est mise en œuvre progressivement dans les procédures PPR en cours.

¹ Plans de prévention des risques naturels (PPR) – Risques de mouvements de terrain – Guide méthodologique. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement et Ministère de l'équipement des transports et du logement. 1999.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Eléments de contexte.....	13
2.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET MORPHOLOGIQUE	13
2.2. CONTEXTE CLIMATIQUE	14
2.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE	16
2.3.1. L'histoire sous-marine	16
2.3.2. L'histoire géologique du Piton des Neiges.....	16
2.3.3. Le massif du Piton de la Fournaise	18
2.4. RAPPEL DE L'HISTORICITE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN ET DE L'EXPOSITION FACE A CES PHENOMENES DE LA REUNION.....	19
3. Aléas MVT – notions générales	23
3.1. DEFINITIONS	23
3.2. TYPES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN CONSIDERES	24
3.3. REGLES GENERALES DE CARTOGRAPHIE DES ALEAS MVT.....	24
3.3.1. Principes généraux	24
3.3.2. Méthodologie générale de qualification de l'aléa MVT	25
4. Caractérisation de l'aléa MVT : chute de blocs – éboulement	28
4.1. DESCRIPTION DU PHENOMENE.....	28
4.2. METHODOLOGIE DE CARTOGRAPHIE DE L'ALEA CHUTE DE BLOCS.....	33
4.2.1. Problématique de recul de rempart	33
4.2.2. Les terrains situés en pied de paroi exposés aux propagations de blocs – aléa « rocheux »	45
5. Caractérisation de l'aléa MVT : glissement de terrain	67
5.1. DESCRIPTION DU PHENOMENE.....	67
5.2. METHODOLOGIE DE CARTOGRAPHIE DE L'ALEA GLISSEMENT	70
5.2.1. Consignes nationales.....	70
5.2.2. Elaboration d'une grille complémentaire d'aide à la cartographie.....	73
6. Caractérisation de l'aléa MVT : érosion	87
6.1. DESCRIPTION DU PHENOMENE.....	87
6.1.1. Les érosions de berge	88

6.1.2. Le ravinement.....	88
6.2. METHODOLOGIE DE CARTOGRAPHIE DE L'ALEA EROSION	90
6.2.1. Probabilité d'occurrence	90
6.2.2. Intensité.....	93
6.2.3. Elaboration d'une grille complémentaire d'aide à la cartographie	95
7. Qualification de l'aléa MVT.....	99
7.1. METHODE DE QUALIFICATION ACTUELLE DE L'ALEA MVT	99
7.2. EVOLUTION DANS LA QUALIFICATION DE L'ALEA MVT.....	100
7.2.1. Règles actuellement appliquées à La Réunion et difficultés afférentes.....	101
7.2.2. Que disent les guides nationaux ?	101
7.2.3. Que disent les récentes réflexions du « cotech n°1 » (2014) analysées par la DGPR (2015) ?.....	101
7.2.4. Propositions d'améliorations pour les PPR de La Réunion	102
8. Prise en compte des ouvrages de protection existants.....	103
8.1. CONSIGNES NATIONALES.....	103
8.2. APPLICATION PROPOSEE	105
8.2.1. Contexte de La Réunion.....	105
8.2.2. Principes méthodologiques retenus.....	106
9. Traduction réglementaire de l'aléa moyen MVT	109
9.1. PRINCIPES REGLEMENTAIRES.....	109
9.2. RAPPEL DE LA PROBLEMATIQUE DE LA TRADUCTION REGLEMENTAIRE DE L'ALEA MOYEN MVT	110
9.2.1. De 2004 jusque mi-2011	110
9.2.2. De mi-2011 à mi-2015	110
9.2.3. Evolutions mises en œuvre sur les PPR soumis à la concertation en 2015	113
9.2.4. Problèmes rencontrés	113
9.3. RAPPEL DES PRATIQUES ET CONSIGNES NATIONALES.....	115
9.3.1. Pratiques dans les autres territoires	115
9.3.2. Consignes nationales	117
9.4. EVOLUTION REGLEMENTAIRE PROPOSEE.....	118
9.4.1. Principe	118
9.4.2. Application.....	119
10. Conclusions	125
11. Bibliographie.....	141

Liste des figures

Illustration 1 : Carte de localisation de l'île de La Réunion dans l'Océan Indien. (Source : ©Géoportail ; Carte en relief de l'île de La Réunion (Source : ©IGN)	13
Illustration 2 : Représentation des deux massifs volcaniques de La Réunion	14
Illustration 3 : Carte des précipitations (source : Météo France).....	15
Illustration 4 : Ages des différentes formations du Piton de la Fournaise (Source : Centre de Recherche Volcanologique de La Réunion).....	19
Illustration 5 : Répartition des mouvements de terrain enregistrés dans BDMVT (par type et par commune) – août 2016	21
Illustration 6 : Terminologie de l'aléa rocheux en fonction des volumes mobilisés (LCPC, 2004, repris dans le guide à paraître MEZAP, 2014)	28
Illustration 7 : Chute d'un bloc isolé	29
Illustration 8 : Eboulement	29
Illustration 9 : Exemple d'éboulement se développant dans les falaises constituées d'empilements de coulées de lave : éboulement à La Passerelle à Saint-Joseph en juillet 2016 (source : EDF).....	30
Illustration 10 : Configurations et mécanismes de chutes de blocs (Dussauge-Peissier, 2002)	31
Illustration 11 : Chute de bloc, environ 50 tonnes, sur la RN2 à Basse-Vallée Saint-Joseph, le 4/09/201032	
Illustration 12 : Eboulement en grande masse (20 - 30 000 m ³) sur la Route du Littoral – juin 1980.....	32
Illustration 13 : Exemple d'effondrement en crête d'un grand versant avec des habitations exposées en recul – Secteur d'Ilet à Cordes à Cilaos (cliché de 2014)	33
Illustration 14 : Schéma de principe de la méthode de caractérisation des aléas en recul de rempart (Guide PPR Réunion, DEAL, 2012).....	34
Illustration 15 : Schéma de principe de la méthode de caractérisation des aléas MVT proposée pour les terrains situés en recul de rempart	36
Illustration 16 : Illustration de l'évolution méthodologique dans la cartographie des aléas MVT en recul de rempart – secteur de Sans Souci à Saint-Paul (en trait noir l'application de l'ancienne méthodologie : 1 ^{ère} bande = aléa élevé, 2 ^{ème} bande = aléa moyen)	41
Illustration 17 : Vue générale du rempart sous le secteur habité de Sans Souci à Saint-Paul.....	43
Illustration 18 : Eboulement impactant la Route du Littoral en mars 2006.....	45
Illustration 19 : Coupe schématique interprétative du rempart de Mahavel (Nédellec et Cruchet, 2008) ..	51
Illustration 20 : Illustration de la méthodologie de cartographie des aléas MVT pour les phénomènes de grande ampleur type éboulement en masse – Secteur de Mahavel à Saint-Joseph (isolignes 10 m issues du MNT de l'IGN©).....	52
Illustration 21 : Vue générale du rempart de Mahavel au droit de la zone de décrochement (cliché de 2002, Nédellec et Cruchet, 2008)	52
Illustration 22 : Exemple de chute de blocs proche de zones habitées (Rey, 2016)	53
Illustration 23 : Valeur limite de pente issue d'un MNT identifiant la présence de zone de départ potentielle (Berger, 2009)	55
Illustration 24 : Répartition en fréquence d'évènement des tailles de blocs éboulés mobilisés et des valeurs d'angle de la ligne d'énergie observées sur des évènements recensés à La Réunion (57 cas).....	58
Illustration 25 : Profil topographique A de l'illustration suivante	60

Illustration 26 : Illustration de la méthodologie de cartographie des aléas MVT pour les phénomènes de chutes de blocs – versant dominant le secteur de Petite Plaine à la Plaine des Grèques – Saint-Joseph (fond orthophoto de l'IGN©, isolignes 10 m issues du MNT de l'IGN©)(en trait noir les contours de l'ancienne cartographie des aléas MVT avec les niveaux d'aléa retenus (PPR approuvé en 2005))	61
Illustration 27 : Principe de la ligne d'énergie et du « shadow angle » (ou angle d'ombrage) (MEZAP, 2014)	62
Illustration 28 : Profil topographique B de l'illustration suivante = zone d'aléa moyen MVT	65
Illustration 29 : Taille des blocs observés dans les pentes	65
Illustration 30 : Illustration de la méthodologie de cartographie des aléas MVT pour les phénomènes de chutes de blocs de type remobilisation de blocs dans les pentes – Macabit - Bellemène - Saint-Paul (fond orthophoto de l'IGN©, isolignes 10 m issues du MNT de l'IGN©)	66
Illustration 31 : Représentations schématiques des principaux types de glissement (source : ©BRGM, http://www.georisques.gouv.fr/)	67
Illustration 32 : Représentation schématique du glissement-coulée (exemple de Montauban, 1993).....	68
Illustration 33 : Glissement de terrain observé sur la RD3 en 2009 à Saint-Joseph.....	69
Illustration 34 : Glissement de terrain suite au cyclone Béisja (2014) à Grand Ilet (Salazie)	69
Illustration 35 : Corrélation entre les différentes lithologies et les valeurs de résistivité (couche 0 à 5m) issues de la campagne de géophysique héliportée de Mayotte (projet GéoMayotte, 2010) (Deparis, Tardy, 2014)	75
Illustration 36 : Revue bibliographique des résistivités électriques en fonction des formations géologiques en milieu volcanique insulaire à partir des données de Descloitre et al., 1997; Savin et al., 2001; Join et al., 2005; Finizola et al., 2006; Gomer-Otiz et al., 2007; Pryet et al., 2012; Vittecoq et al., 2014 - (Dumont, M., [en cours], Caractérisation des structures hydrogéologiques sur l'île de la Réunion à partir des données de géophysique héliportée [Thèse] : Université de La Réunion, BRGM.)	75
Illustration 37 : Caractéristiques lithologiques et géotechniques des altérites de La Réunion (Cochery R., Garnier C., Taquet J., 2011)	77
Illustration 38 : Illustration de la méthodologie de cartographie des aléas MVT pour les phénomènes de glissement de terrain – Trois -Frères – Sainte-Suzanne (fond orthophoto de l'IGN©, isolignes 10 m issues du MNT de l'IGN©)	83
Illustration 39 : Coulée de boue au Cap Lelièvre à Saint-Leu – évènement du 5 février 2012 (cliché BRGM)	84
Illustration 40 : Illustration de la méthodologie de cartographie des aléas MVT pour les phénomènes de coulée de boue – Cap Lelièvre – Saint-Leu (fond orthophoto de l'IGN©, isolignes 10 m issues du MNT de l'IGN©)	85
Illustration 41 : Aléa érosif total (Chevalier et al., 2002)	87
Illustration 42 : Erosion active (badlands) à Marla – cirque de Mafate (Saint-Paul)	89
Illustration 43 : Erosion de berge lors d'une crue de la Rivière des Pluies entraînant les maisons implantées en rive droite – Sainte Marie (2002)	90
Illustration 44 : Cartographie de l'Indice de Développement des Réseaux (IDPR, BRGM 2011).....	93
Illustration 45 : Schéma de principe de la qualification de l'aléa MVT pour les érosions de berges (Guide PPR Réunion, DEAL, 2012).....	94
Illustration 46 : Illustration de la méthodologie de cartographie des aléas MVT pour les phénomènes de ravinement – Cap La Houssaye - Saint-Paul (fond orthophoto de l'IGN©, isolignes 10 m issues du MNT de l'IGN©)	97

Illustration 47 : Logigramme proposé par le MEDDE en 2015 définissant les conditions nécessaires pour une constructibilité à l'aval d'un ouvrage de protection existant	103
Illustration 48 : Tableau de qualification de l'efficacité des ouvrages de protection dans l'optique d'une possibilité de construction à l'aval (groupe de travail CoTech n°2)	105
Illustration 49 : Exemple de traduction réglementaire de l'aléa moyen MVT (carte d'aléa MVT à gauche et zonage réglementaire à droite)	123
Illustration 50 : Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β	151
Illustration 51 : Valeurs de seuillage des angles géométriques pouvant être utilisés pour l'aide à l'expertise et la réalisation d'une pré-cartographie de l'aléa chutes de pierres et de blocs (MEZAP, 2014)	151
Illustration 52 : Exemples de modulations des intervalles d'angles de la méthode des cônes en fonction des profils de pente pouvant être rencontrés (MEZAP, 2014)	152
Illustration 53 : Tableau comparatif des seuils de zonage d'aléa dans les précédentes études trajectographiques réalisées (NB : l'ADRGT et SAGE sont en fait le même bureau d'étude)	155
Illustration 54 : Proposition de seuillage par le Cemagref pour les classes des probabilités d'atteinte	155
Illustration 55 : Qualification des niveaux de probabilité d'atteinte à partir des résultats obtenus avec un logiciel de trajectographie (Annexe 6 – § 1.1.5 des recommandations MEZAP à paraître)	156
Illustration 56 : Extrait de la conclusion du rapport d'étude « Altérites – Phase 2 » à propos de la classification de l'aléa glissement de terrain dans des secteurs composés d'altérites ...	160
Illustration 57 : Superposition de la carte géologique de La Réunion au 1/100 000 (BRGM, 2006) et des affleurements altéritiques recensés dans l'étude (phase 1)	161

Liste des tableaux

Tableau 1 : Pluies les plus intenses enregistrées à La Réunion	14
Tableau 2 : Type de phénomène rencontrés en fonction des catégories de terrain	24
Tableau 3 : Echelle qualitative de probabilité d'occurrence (LCPC, guide technique sur les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux, 2004)	26
Tableau 4 : Principe de grille de qualification des aléas	27
Tableau 5 : Définition de l'aléa MVT en recul de rempart	39
Tableau 6 : Valeur d'angle de la ligne d'énergie des principaux évènements historiques de grande ampleur	46
Tableau 7 : Définition de l'aléa MVT pour les éboulements de grande ampleur	49
Tableau 8 : Définition de l'indice d'intensité de l'aléa rocheux en fonction du volume avec correspondance des potentiels de dommage (MEZAP, 2014)	54
Tableau 9 : Définition de l'indice d'activité de l'aléa rocheux ou probabilité de départ (MEZAP, 2014)	55
Tableau 10 : Qualification des niveaux de probabilité d'atteinte à partir des résultats de simulations trajectographiques (projet Interreg IIC – Falaises de 2001, repris dans MEZAP)	57
Tableau 11 : Définition de la probabilité d'occurrence de l'aléa rocheux de référence en un point (issue de MEZAP, 2014)	57
Tableau 12 : Définition du niveau de l'aléa rocheux de référence (issue de MEZAP, 2014)	57

Tableau 13 : Définition de l'indice d'activité de l'aléa rocheux (remobilisation de blocs dans les pentes) – critères non cumulatifs	63
Tableau 14 : Définition de la probabilité d'atteinte l'aléa rocheux (remobilisation de blocs dans les pentes)63	
Tableau 15 : Définition de la probabilité d'occurrence de l'aléa rocheux de référence en un point (remobilisation de blocs dans les pentes) avec β la valeur de l'angle de la ligne d'énergie64	
Tableau 16 : Définition du niveau de l'aléa rocheux (remobilisation de blocs dans les pentes)	64
Tableau 17 : Définition de la probabilité d'occurrence d'un glissement de terrain (cotech 1)	71
Tableau 18 : Définition de l'intensité d'un glissement de terrain (cotech 1)	71
Tableau 19 : Grille de qualification de l'aléa glissement de terrain (cotech 1)	71
Tableau 20 : Définition de la probabilité d'occurrence d'une coulée de boue (cotech 1)	72
Tableau 21 : Définition de l'intensité d'une coulée de boue (cotech 1)	72
Tableau 22 : Grille de qualification de l'aléa coulée de boue (cotech 1)	72
Tableau 23 : Proposition de classification des principales formations géologiques de La Réunion selon leur aspect.....	74
Tableau 24 : Définition de la probabilité d'occurrence d'un glissement de terrain, d'une coulée de boue	79
Tableau 25 : Définition de l'intensité d'un glissement de terrain	79
Tableau 26 : Définition de l'intensité d'une coulée de boue	80
Tableau 27 : Définition du niveau de l'aléa MVT (glissement de terrain)	80
Tableau 28 : Définition du niveau de l'aléa MVT (coulée de boue)	80
Tableau 29 : Exemple de définition du niveau de l'aléa MVT (glissement de terrain) à partir du coefficient de sécurité de calculs de stabilité de pente dans des contextes d'altérites	82
Tableau 30 : Relation entre infiltration et ruissellement en fonction de l'IDPR	92
Tableau 31 : Définition de la probabilité d'occurrence d'un phénomène d'érosion de berges	95
Tableau 32 : Définition de la probabilité d'occurrence d'un phénomène de ravinement	95
Tableau 33 : Définition de l'intensité d'un phénomène érosif (ravinement et érosion de berges)	96
Tableau 34 : Définition du niveau de l'aléa MVT (érosion).....	96
Tableau 35 : Codification des aléas mouvements de terrain selon l'intensité	100
Tableau 36 : Caractérisation du niveau d'aléa mouvements de terrain en fonction de l'intensité du phénomène	100
Tableau 37 : Définition du niveau d'aléa MVT résultant en fonction des différents aléas caractérisés ...	102
Tableau 38 : Proposition de regroupement des altérites de La Réunion et principales caractéristiques géotechniques.....	159

Liste des annexes

Annexe 1 Carte géologique de La Réunion (1/100 000) - 2006.....	145
Annexe 2 Méthode des cônes	149
Annexe 3 Qualification des seuils de probabilité d'atteinte	153
Annexe 4 Principaux résultats de l'étude « Altérites – Phase 2 »	157
Annexe 5 Méthode C2PN (Roudnitska – ONF – RTM – avril 2014)	163

1. Introduction

Le premier PPR (Plan de Prévention des Risques) approuvé à La Réunion date de 2001 (Sainte-Marie, PPR intégrant l'aléa inondation par débordement de cours d'eau). Depuis cette date de nombreux PPR inondation ont été approuvés sur le territoire réunionnais. Depuis le début des années 2000, les premières cartes d'aléas mouvements de terrain (MVT², intégrant les glissements de terrain, les chutes de blocs et l'érosion) ont été élaborées par le BRGM puis progressivement intégrées dans les procédures PPR (approbation des premiers PPR intégrant les mouvements de terrain en 2005 avec les PPR de Salazie et de Saint-Joseph). Actuellement, et d'une manière générale depuis la procédure de révision du PPR de Saint-Denis lancée en 2007 (approuvé en 2012), la DEAL de La Réunion, service instructeur des PPR, s'inscrit dans une démarche d'élaboration des PPR intégrant simultanément les aléas mouvements de terrain et inondation dans des procédures PPR dits « multi-aléas ». En parallèle, les aléas littoraux (recul du trait de côte et submersion marine) sont établis par le BRGM suivant des méthodologies spécifiques et intégrées dans d'autres procédures PPR, indépendantes des PPR multi-aléas.

Dans le cadre des procédures d'élaboration des PPR multi-aléas, la DEAL sollicite le BRGM depuis plusieurs années, dans une démarche partenariale pour mener à bien les procédures PPR jugées prioritaires par le corps préfectoral, afin de doter progressivement chaque commune du territoire réunionnais d'un PPR approuvé.

La méthodologie d'élaboration des cartes d'aléas MVT s'appuie sur les directives du guide national (1999³) sur la base d'une approche couplant l'analyse cartographique SIG à partir des données numériques disponibles et l'analyse naturaliste d'identification des indices géomorphologiques de terrain sans recours à des modélisations et/ou sondages systématiques. La méthodologie employée sur le territoire réunionnais pour la cartographie des aléas MVT est décrite dans le guide d'élaboration des PPR à La Réunion (DEAL de La Réunion, Août 2012) et dans la note de présentation des PPR approuvés. Celle-ci, basée sur une approche dite « à dire d'expert » pose fréquemment question par les citoyens concernés, notamment lors des phases d'enquête publique, et/ou par les services des collectivités locales lors des phases de concertation et d'échanges sur les cartes d'aléas :

- ↳ **Afin d'améliorer la compréhension de la méthodologie employée pour la caractérisation des aléas MVT, l'objectif de la présente étude consiste à décrire les critères techniques spécifiques pour les différents types et niveaux d'aléas retenus dans les zonages des PPR.**

Par ailleurs, lors des phases d'échanges avec les collectivités locales au sujet de la traduction réglementaire des aléas, des difficultés apparaissent pour la compréhension et la prise en compte de certains principes d'inconstructibilité voire de certaines prescriptions envisagées dans les projets de règlement. L'aléa moyen MVT concentre les débats car historiquement à La Réunion ce niveau d'aléa était traduit en zone rouge R2 dans les zonages réglementaires des

² Par souci de simplification, dans la suite du rapport la notion de mouvements de terrain sera désignée par l'abréviation MVT.

³ Plans de prévention des risques naturels (PPR) – Risques de mouvements de terrain – Guide méthodologique. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement et Ministère de l'équipement des transports et du logement. 1999.

premiers PPR approuvés sur le territoire, zone dotée d'un principe d'inconstructibilité. Hors, ces zones s'inscrivent souvent dans des projets d'urbanisation à plus ou moins court terme malgré l'exposition aux aléas. Dans un contexte insulaire où le prix des terrains croît d'année en année et où la rareté des terrains aménageables se fait de plus en plus pesante, les difficultés de compréhension de l'outil PPR s'expliquent entre autres par le contraste entre, les principes d'élaboration d'un PPR d'une part (échelle communale et période de référence longue), et la dynamique d'aménagement d'un territoire d'autre part (échelle parcellaire pour les particuliers, voire quartier pour les communes et pour des horizons à brève échéance : quelques années voire dizaines d'années).

- ↳ **Afin d'améliorer l'acceptabilité des PPR par les usagers (citoyens et services instructeurs des actes d'urbanisme des mairies), l'objectif de la présente étude consiste à proposer des évolutions méthodologiques en matière de transcription réglementaire dans les zones d'aléas moyen MVT, notamment la prise en compte des enjeux et la capacité de sécurisation.**

Les récents résultats des groupes de travail (« CoTechs ») à l'échelle nationale dans la perspective de la révision des guides méthodologiques relatifs à l'élaboration des PPR en montagne et notamment pour le risque mouvements de terrain (cf. courrier du MEDDE du 30 septembre 2015 intégrant notamment les synthèses des différents groupes de travail) ainsi que l'analyse des pratiques dans d'autres territoires exposés aux mouvements de terrain, que ce soit pour la caractérisation des aléas et pour leur traduction réglementaire dans l'outil PPR, sont intégrés à la présente étude.

Les paragraphes suivants (à partir du chapitre 4) ont pour but de décrire les principales évolutions et précisions méthodologiques proposées pour la caractérisation des aléas MVT et leur traduction réglementaire. Certaines de ces évolutions proposées) sont progressivement intégrées dans le cadre des PPR « multi-aléas » des communes de La Réunion en cours d'élaboration (notamment celles concernant la caractérisation des aléas MVT en recul de rempart et la traduction réglementaire de l'aléa moyen MVT, intégrées depuis 2015).

2. Eléments de contexte

2.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET MORPHOLOGIQUE

Isolée en plein Océan Indien, l'île de La Réunion, qui compte un des volcans les plus actifs du monde, est située à 300 km au nord du Tropique du Capricorne et 700 km à l'Est de Madagascar, par 21° de latitude sud et 55°30' de longitude est. D'une superficie de 2 500 km², l'île de La Réunion a une forme elliptique de 70 x 50 km allongée suivant la direction NW-SE. Il s'agit là de la partie émergée d'un édifice gigantesque d'environ 7 000 mètres de hauteur, essentiellement sous-marin et dont seuls 3 % du volume émergent.

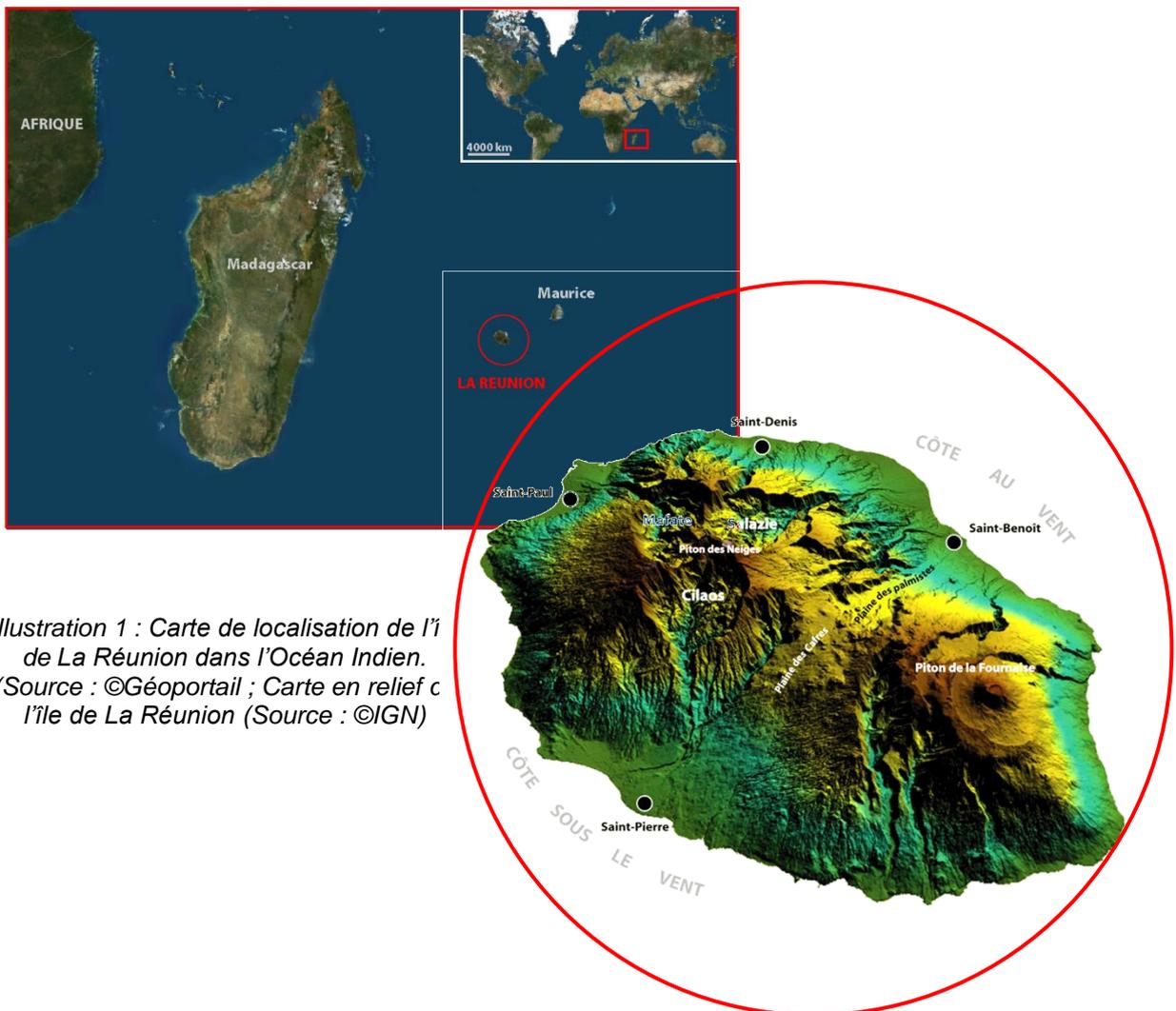


Illustration 1 : Carte de localisation de l'île de La Réunion dans l'Océan Indien.
(Source : ©Géoportail ; Carte en relief de l'île de La Réunion (Source : ©IGN))

Sa population actuelle est de 845 000 habitants (INSEE au 1^{er} janvier 2014) avec une densité moyenne d'environ 340 habitants au km². Les contrastes de densité de population sont très importants et 80 % des habitants vivent sur une bande côtière allant de l'océan jusqu'à approximativement 400 m d'altitude. Les zones inhabitées couvrent près de la moitié de la superficie de l'île. Cette variabilité de peuplement s'explique par des causes essentiellement topographiques et climatiques.

L'île est constituée de deux massifs volcaniques (cf. Illustration 2) avec le plus ancien, le Piton des Neiges qui culmine à plus de 3 070 m, éteint depuis environ 12 000 ans ; et le plus récent, le Piton de la Fournaise, construit sur le flanc sud-est du Piton des Neiges, qui est actuellement l'un des volcans les plus actifs sur Terre.

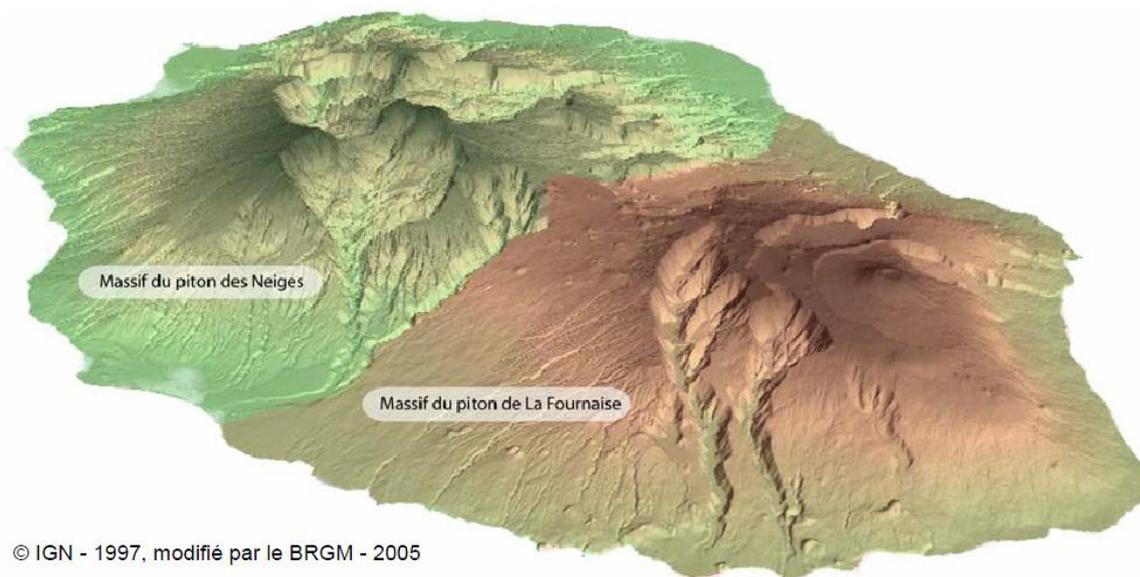


Illustration 2 : Représentation des deux massifs volcaniques de La Réunion

2.2. CONTEXTE CLIMATIQUE

L'île de La Réunion détient les records mondiaux de pluviométrie cumulée pour des durées allant de 12 h (1100 mm) à 15 jours (6 000 mm), avec la plupart d'entre eux enregistrés à la station du Cratère Commerson (commune de Saint-Joseph). Les valeurs de pluies les plus importantes relevées à La Réunion suivant les différentes durées sont présentées sur le Tableau 1.

Durée	Quantité (mm)	Nom du poste (Altitude en mètres)	Date de début de l'épisode	Record mondial (mm) et lieu
1 heure	262	Cilaos (Alt : 1197 m)	29/02/1964 (cyclone GISELLE)	305 (USA)
3 heures	422	Mare à Vieille Place (Alt : 870 m)	04/02/1998	Pas d'info
6 heures	690	Mare à Vieille Place (Alt : 870 m)	04/02/1998	Pas d'info
12 heures	1 144	Foc-Foc (Alt : 2290 m)	07/01/1966 (cyclone DENISE)	Record mondial
24 heures	1 825	Foc-Foc (Alt : 2290 m)	07/01/1966 (cyclone DENISE)	Record mondial
48 heures	2 489	Commerson (Alt : 2310 m)	26/02/2007 (cyclone GAMEDE)	2 493 (Inde)
72 heures	3 930	Commerson (Alt : 2310 m)	24/02/2007 (cyclone GAMEDE)	Record mondial
96 heures	4 936	Commerson (Alt : 2310 m)	24/02/2007 (cyclone GAMEDE)	Record mondial
10 jours	5 678	Commerson (Alt : 2310 m)	18/01/1980 (cyclone HYACINTHE)	Record mondial
15 jours	6 083	Commerson (Alt : 2310 m)	14/01/1980 (cyclone HYACINTHE)	Record mondial
1 mois	6 177	Commerson (Alt : 2310 m)	Janvier 1980	9 300 (Inde)
12 mois	15 931	Hauts de Sainte-Rose (Alt : 820 m)	Année 1995	26 470 (Inde)

Tableau 1 : Pluies les plus intenses enregistrées à La Réunion

(source : <http://pluiesextremes.meteo.fr/lareunion/Records-mondiaux.html>)

La Réunion est soumise à une variation temporelle des pluies. On distingue deux saisons :

- la saison des pluies, de décembre à avril,
- la saison sèche, de mai à novembre.

Pendant la saison sèche, les températures sont douces et les pluies peu abondantes. Sur la côte ouest, la pluviométrie des mois de juillet à octobre est très faible voire quasi nulle (moins de 100 mm mensuels). A l'Est, la pluviométrie reste tout de même importante et varie entre 100 mm à 300 mm par mois, notamment au niveau du volcan où la moyenne du mois le plus sec atteint 700 mm environ.

L'augmentation des précipitations pendant la saison des pluies est importante : à l'Ouest, la pluviométrie moyenne mensuelle se situe entre au moins 100 mm et 300 mm (sauf sur le littoral). Les températures sont plus élevées.

Selon les cartes d'isohyètes mensuelles de Météo France pour la période de 1970 à 2009, statistiquement le mois de février est le mois le plus arrosé sur l'ensemble de l'île.

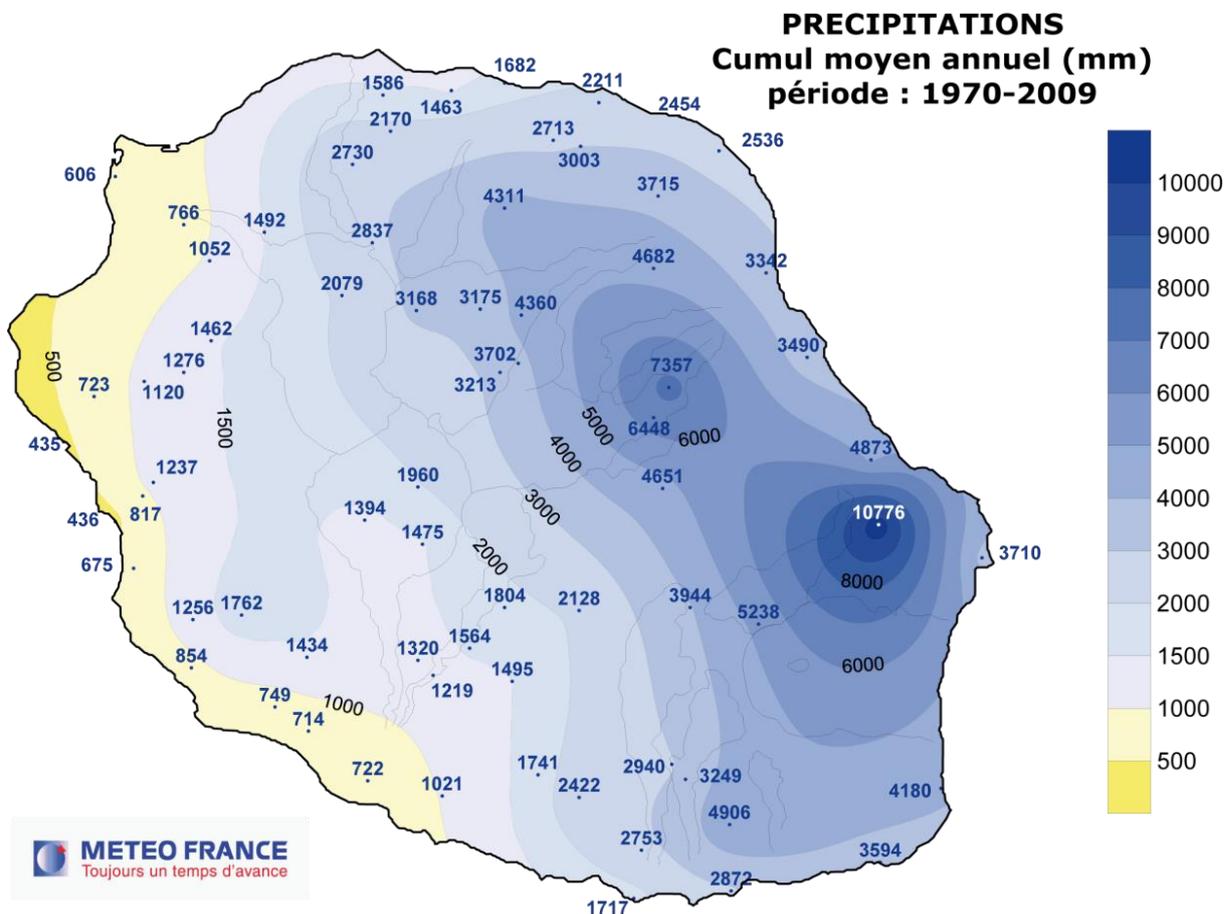


Illustration 3 : Carte des précipitations (source : Météo France)

La pluviométrie joue un rôle essentiel dans les dynamiques d'érosion de l'île et plus particulièrement dans le déclenchement des mouvements de terrain.

2.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Extrait du Kit Pédagogique Sciences de la Terre : « Connaissance géologique de la Réunion », BRGM, 2006. La carte géologique est présentée en Annexe 1.

L'essentiel de l'histoire géologique de La Réunion est aujourd'hui contrainte par des datations effectuées par la méthode K-Ar sur roche totale, phénocristaux et mésostase (McDougall, 1971 ; Chevallier et Bachelery, 1981; Gillot et Nativel, 1982 ; Kieffer *et al.*, 1993 ; Raïs *et al.*, 1996 ; Kluska, 1997). Un certain nombre de datations par la méthode ^{14}C ont été publiées par Gérard et Stieljes (1979), Delibrias *et al.* (1983) et Deniel *et al.* (1992). Plusieurs échantillons ont aussi été datés par U-Th par Deniel (1988) et Deniel *et al.* (1992). Il s'ajoute à ces âges publiés une trentaine d'âges acquis dans le cadre de ce projet de recherche sur les mouvements de terrains de grande ampleur à La Réunion.

L'étude cartographique réalisée permet d'affiner ce schéma notamment en reprecisant les périodes d'activités du Massif du Piton des Neiges et la mise en place des événements bréchiques.

2.3.1. L'histoire sous-marine

L'île de La Réunion est bâtie sur un plancher océanique d'âge crétacé ne signifiant pas qu'elle est datée du même âge. Les roches les plus anciennes à l'affleurement, situées dans le fond des cirques du Piton des Neiges, sont trop altérées et métamorphisées (zéolitisées) pour être datées. En fait, les datations radiochronologiques des roches les plus anciennes non altérées indiquent un âge pliocène (2,1 Ma). Celles-ci ont été échantillonnées dans le Massif de la Montagne à l'ouest de Saint-Denis (Mc Dougall, 1971).

2.3.2. L'histoire géologique du Piton des Neiges

Au terme des nombreuses études géochronologiques, pétrologiques et géochimiques qui les ont accompagnées, deux grandes phases d'édification ont été distinguées : un stade dit "océanitique" entre plus de 2 Ma et 450 ka ; lui succède, après une période de calme éruptif, un stade différencié entre 340 et 29 ka.

Cette histoire reste l'objet d'un important débat. En effet, de volumineux dépôts d'avalanche de débris ont été mis en évidence tant en mer qu'à terre. Ces avalanches de débris ont des volumes de plusieurs dizaines de kilomètres cubes et ont été responsables de la destruction de pans entiers du volcan qu'il est impossible à ce jour de reconstituer.

- **Stade précoce antérieur à 450 ka : construction de l'essentiel du volcan bouclier**

Il s'agit là de la phase d'émersion et de construction de l'essentiel du volcan bouclier. Les laves émises pendant ce stade sont des océanites (basaltes à olivine cumulative), des basaltes à olivine et des basaltes aphyriques.

Les formations correspondantes forment les niveaux stratigraphiques les plus bas du volcan et se trouvent sur les planchers des trois principaux cirques (Upton et Wadsworth, 1969). Elles sont constituées par une séquence de laves et de brèches traversées par une grande quantité de filons dont la concentration augmente vers la région centrale du volcan. Leur mise en place est aérienne (présence de laves cordées de type pahoehoe observées). Les océanites culminent actuellement à plus de 2000 m d'altitude dans le secteur des trois Salazes vers le

plateau du Kerval et sur la montée menant au sommet du Piton des Neiges à hauteur du Plateau du petit Matarum.

Ce stade est, depuis le début des années 1970, classiquement subdivisé en deux périodes majeures sans qu'il soit toujours possible de les distinguer sur le terrain.

- **Océanites anciennes (antérieures à 2,1 Ma)**

Si l'on excepte un premier stade d'activité volcanique sous-marine dont la durée exacte est inconnue, les plus vieilles formations volcaniques du massif correspondent à la « série des océanites anciennes » encore dénommée « série des brèches primitives » en raison de la nature des matériaux hétérogènes qui la constitue. Cette série qui constitue le substratum du Piton des Neiges est principalement rencontrée dans le fond des cirques, à la faveur des coupes naturelles réalisées par les différentes rivières et ravines. On y distingue des coulées de laves et des brèches. Les laves sont essentiellement représentées par des océanites qui, bien que très altérées et fortement zéolitisées, laissent encore deviner quelques figures caractéristiques (cordes, structures en tubes, ...).

Au-dessus de ces laves, se superposent plusieurs passées bréchiques de nature et d'origine variées, en alternance avec d'autres coulées de basaltes à olivine cumulative. Les plus fréquentes sont des brèches de remaniement qui sont nées du démantèlement des reliefs sous l'effet de la gravité.

Ces formations du cœur du volcan ont été fortement zéolitisées et n'ont pour l'instant pas pu faire l'objet de datations géochronologiques. C'est ce qui les distingue des océanites récentes.

- **Océanites récentes (2,1 Ma à 450 000 ans)**

Pendant cette phase se manifeste une activité effusive caractérisée par l'émission de laves fluides. Ces laves émises à l'air libre et représentant une épaisseur totale de plusieurs centaines de mètres sont des océanites mais également des basaltes à olivine et des basaltes aphyriques. Ils se distinguent essentiellement de la « série des océanites anciennes » par une plus faible altération qui permet d'observer de nombreuses figures souvent très bien conservées (cordes, tubes, tunnels de lave...). Au cours de cette période d'activité, le massif du Piton des Neiges prend une forme circulaire en bouclier qui correspond à un vaste dôme surbaissé d'un diamètre moyen de 50 km et d'une hauteur supérieure à 2000 m.

Enfin, entre 0,58 et 0,45 Ma se mettent en place les océanites affleurant sur les parois des cirques et en périphérie du volcan (Crête des Orangers, Grand Bassin, Massif de la Montagne).

- **Stade intermédiaire entre 450 et 340 ka**

Ce stade est caractérisé par une activité volcanique faible qui correspond à la transition entre le stade océanitique et le stade différencié.

- **Stade différencié entre 340 et 29 ka (fin de l'activité volcanique)**

Le stade différencié correspond au troisième et dernier stade d'édification du Massif du Piton des Neiges. Il correspond à l'édification d'un vaste stratovolcan. Kluska (1997) l'a subdivisé en plusieurs phases :

- 1 - de 340 à 210 ka. Cette phase, dont le centre d'activité principal se situe au niveau du Rond du Bras Rouge, correspond à l'édification du stratovolcan proprement dit. Durant la phase d'édification, les laves évoluent des roches « pintades » vers les premiers stades de production de produits pyroclastiques (« Dalle soudée » ; Kieffer,

1990 ; Kieffer *et al.*, 1993). Cette activité affecte exclusivement les flancs ouest et sud-ouest. C'est pendant cette phase que se construit la proto-vallée de la rivière du Mât.

- 2 - de 210 à 180 ka. Cette phase qui débute vers 210 ka et se poursuit pendant 30 ka (Kluska, 1997) est marquée par la formation d'importants produits pyroclastiques (ignimbrites) canalisés vers l'est du massif. Durant cette phase, l'érosion devient plus importante que la production volcanique.
- 3 - de 180 à 140 ka. Durant cette phase, la production volcanique est très faible et l'érosion du massif prédomine. Les paléo-cirques se creusent et s'élargissent
- 4 - de 140 à 70 ka. L'essentiel de la partie centrale du Piton des Neiges actuel se construit par la mise en place d'importantes quantités de laves « pintades ». Le volcan gagne plus de 800 m d'altitude (Kluska, 1997) et les roches « pintades » se mettent en place dans les proto-cirques de Mafate, de Salazie et de Cilaos.
- 5 - de 70 à 35 ka. L'activité volcanique devient sporadique et de plus en plus explosive. Elle met en place des laves différenciées.
- 6 - de 35 à 29 ka. Le Piton des Neiges atteint une altitude maximale de 3400 m (Kluska, 1997). Depuis 29 ka le massif du Piton des Neiges n'a pas connu d'activité volcanique et subit une intense érosion.

2.3.3. Le massif du Piton de la Fournaise

Avec une activité moyenne de plus d'une éruption par an, le Piton de la Fournaise est l'un des volcans les plus actifs de la planète.

L'émergence du volcan commence il y a plus de 500 000 ans sur les pentes sud-est du Piton des Neiges. Depuis lors, son activité volcanique, principalement effusive, n'a cessé de façonner au fil des millénaires le paysage sud de La Réunion.

Une première caldeira est apparue il y a environ 290 000 ans (Institut de Physique du Globe de Paris (juin 1993) - Les observatoires volcanologiques français).

L'activité est alors caractérisée par des coulées de lave et des produits scoriacés.

Suite au déplacement du centre éruptif vers l'est, il regroupe des formations de la série des Remparts, du Morne Langevin, de la série de la Plaine des Sables ainsi que la série actuelle.

L'édifice de la Fournaise est structuré par plusieurs accidents tectoniques emboîtés, concentriques par rapport au centre éruptif, qui sont à l'origine de la formation de plusieurs caldeiras.

La dernière caldeira s'est formée vers 4700 ans. Cette formation résulte de la coalescence de petites caldeiras d'effondrement liées à des réservoirs magmatiques sous-jacents et par glissements des flancs du volcan, tel le Grand Brûlé à l'est. Des zones radiales de faiblesse, ou « rift zone », orientées sud-est et nord-est se prolongent au-delà des « remparts » de l'Enclos. Elles sont à l'origine des coulées historiques dites hors Enclos telles celles de 1977 à Piton Ste Rose et de 1986 à St Philippe. (Institut de Physique du Globe de Paris, Les observatoires volcanologiques français, juin 1993).

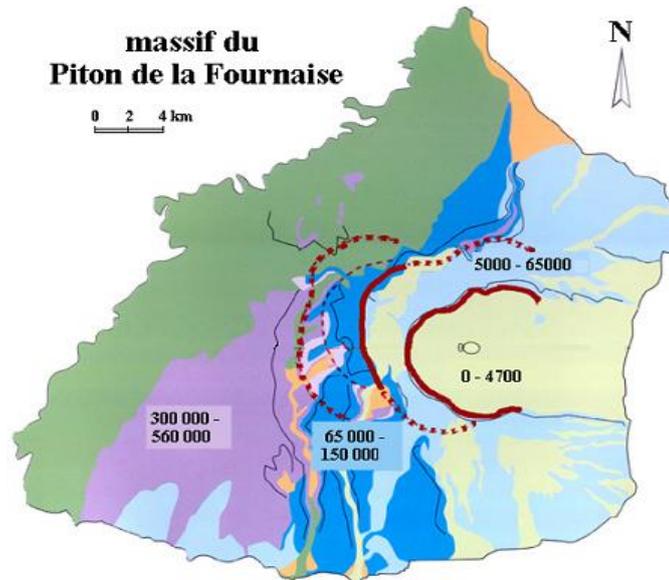


Illustration 4 : Ages des différentes formations du Piton de la Fournaise (Source : Centre de Recherche Volcanologique de La Réunion)

2.4. RAPPEL DE L'HISTORICITE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN ET DE L'EXPOSITION FACE A CES PHENOMENES DE LA REUNION

La Réunion est le département français le plus exposé aux risques naturels. Ceci s'explique par son relief jeune très marqué, par la nature des formations géologiques, son exposition au milieu tropical océanique et cyclonique, la fréquence élevée de son activité volcanique et une sismicité faible mais fréquente.

Dans le département, dix risques naturels majeurs sont recensés dont les mouvements de terrain. Il s'agit également des cyclones et tempêtes, des inondations, des éruptions volcaniques, des feux de forêt, des séismes et des fortes houles, marées de tempête et tsunamis.

A partir des archives connues, depuis plus d'un siècle, l'île de La Réunion a connu plusieurs événements majeurs ayant entraîné de nombreux décès et dégâts matériels, généralement liés au passage de tempêtes, de cyclones tropicaux ou lors de fortes pluies. Les phénomènes de mouvements de terrain font partie des principaux phénomènes historiques majeurs connus, avec à titre d'exemple :

- 1875 – Glissement catastrophique de « Grand sable » à Salazie – 63 personnes ensevelies (18 millions de m³ mobilisés) ;
- Mai 1965 – Effondrement en masse de 35 à 50 millions de m³ à Mahavel, évacuation des habitants de Roche Plate ;
- Janvier 1980 (cyclone Hyacinthe) – Glissement de terrain à Grand Ilet entraînant le décès de 25 personnes et de nombreux dégâts
- Juin 1980 – Éboulement de plusieurs milliers à dizaine de milliers de m³ sur la route du littoral, à l'entrée de Saint-Denis (PR2) provoquant le décès de 3 personnes ;
- Mars 2002 – Éboulement en falaise à la Rivière des Pluies créant un barrage et une retenue naturelle – 500 000 m³, 3 victimes liées à la rupture du barrage ;

- Mars 2006 – Éboulement sur la route du Littoral (PR11+900) de 30 000 m³, 2 victimes et fermeture de la route durant plusieurs semaines ;
- Janvier 2014 (cyclone Béchisa) – Eboulement de 10 à 15 000 m³ à Ilet à Cordes (Cilaos), coupure de route et évacuation définitive d'habitations isolées et Glissement d'environ 250 à 300 000 m³ à Grand Ilet.

A ces évènements historiques, des phénomènes actifs parmi les plus importants connus en France et en Europe (en termes de volume de matériaux mobilisé et d'occupation humaine sur les terrains concernés) sont présents et suivis sur le territoire de La Réunion. Il s'agit des glissements de grande ampleur de Grand Ilet et de Mare à Poule d'Eau dans le cirque de Salazie, où des volumes de plusieurs centaines de millions de m³ glissent avec des vitesses de déplacement pouvant atteindre par endroit 1 m / an et engendrant par conséquent de nombreux dégâts sur les infrastructures concernées (routes et bâtis). Ces phénomènes actifs ont fait l'objet de nombreuses études et de projets de recherche dont le récent projet MvTerre 2 piloté par le BRGM (cofinancement PO FEDER 2007-2013, FIDOM, Région Réunion et BRGM).

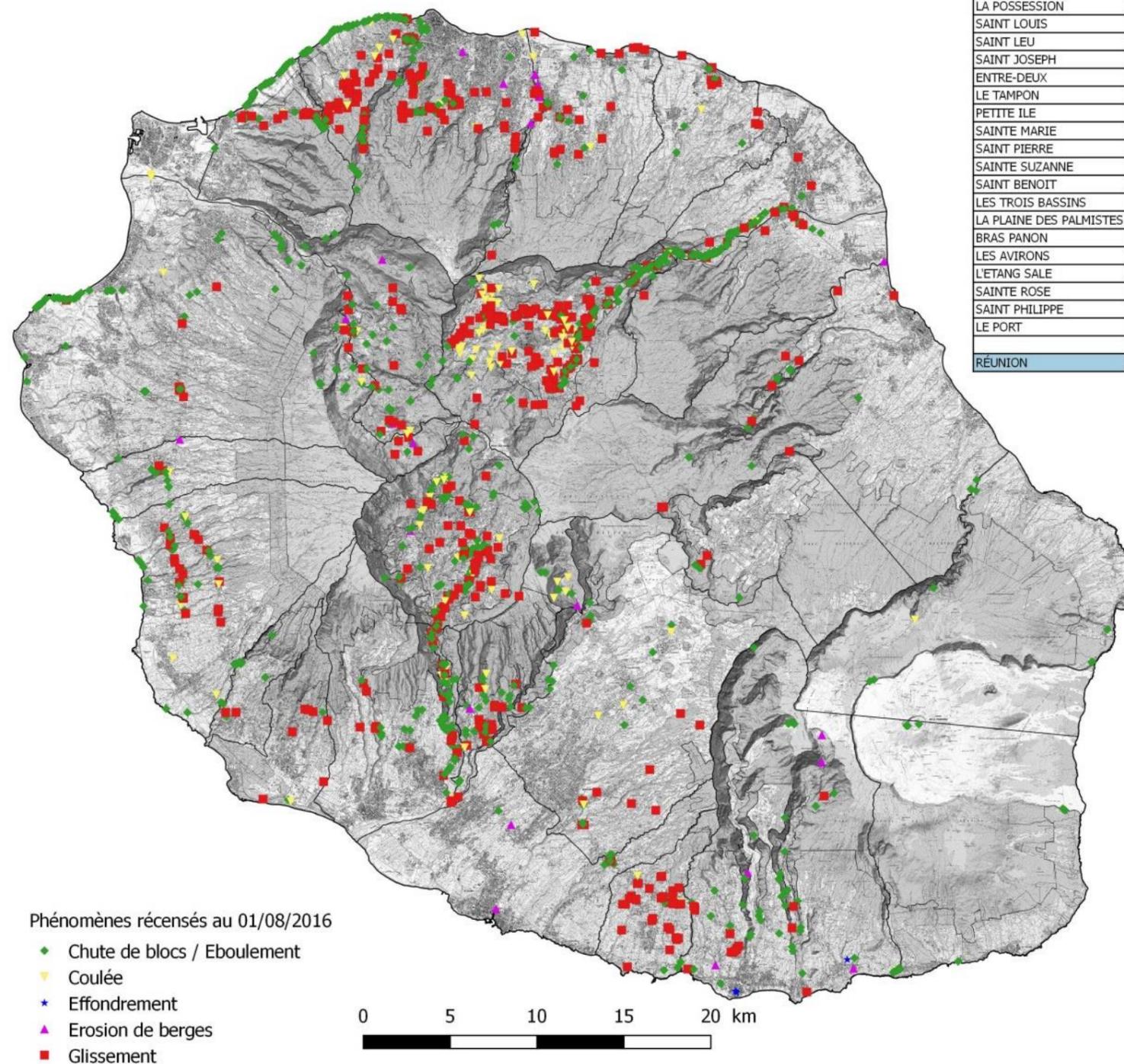
La connaissance historique des évènements qui se produisent sur le territoire est également issue de l'analyse d'archives, notamment des revues de presse (comme celle que tenait la Direction Départementale de l'Équipement (DDE) jusqu'à la fin des années 1990 : « *nom de la commune* dans la tourmente »), des articles de journaux et de la base de données nationale sur les mouvements de terrain gérée à l'échelle nationale par le BRGM (BDMVT, <http://www.georisques.gouv.fr/>).

Les arrêtés de catastrophes naturelles recensés par commune (24 communes à l'échelle du territoire réunionnais) illustrent également les évènements historiques avec une intensité significative ayant affecté le territoire. L'analyse du nombre d'arrêtés « CATNAT » pris depuis 1990 montre que certaines communes font l'objet de la prise d'un arrêté en moyenne tous les 2 ans (tous phénomènes confondus).

A titre d'illustration de l'exposition du territoire réunionnais aux phénomènes de mouvements de terrain, l'analyse statistique des données enregistrées dans la BDMVT à ce jour (2406 mouvements de terrain enregistrés au 1^{er} août 2016 à partir d'archives et d'évènements connus depuis 1718) montre la répartition présentée sur l'illustration 5 suivante (par commune et par type de phénomène) :

Ces divers éléments montrent et confirment la forte exposition du territoire réunionnais aux phénomènes de mouvements de terrain.

Comme indiqué dans le guide d'élaboration des PPR à La Réunion (DEAL, août 2012), étant donné le dynamisme de la démographie du territoire (845 000 habitants estimé au 1^{er} janvier 2014 selon l'Insee, une population doublée en 40 ans et une projection de l'ordre de 1 M d'ici 2030) qui pousse à une urbanisation rapide, associée aux contraintes d'occupation du territoire liées à la morphologie de l'île, de nombreuses personnes sont exposées aux phénomènes d'inondation et de mouvements de terrain (plus de 100 000 personnes). Étant donnée cette forte vulnérabilité, la mise en place des plans de prévention des risques (PPR) est nécessaire afin de limiter les conséquences négatives potentielles des futures catastrophes naturelles, en s'appuyant sur les connaissances disponibles et en réglementant l'urbanisme et la construction sur le territoire réunionnais.



Commune	Glissement	Chute de blocs / Eboulement	Coulée	Effondrement	Erosion de berges	Total évènements
SALAZIE	279	396	49	0	0	724
SAINT DENIS	109	190	11	0	5	315
SAINT ANDRE	12	241	2	0	0	255
CILAOS	59	100	18	2	1	180
SAINT PAUL	17	118	5	0	1	141
LA POSSESSION	27	102	4	0	4	137
SAINT LOUIS	20	107	7	0	3	137
SAINT LEU	25	57	6	0	0	88
SAINT JOSEPH	15	62	1	3	5	86
ENTRE-DEUX	22	40	9	0	2	73
LE TAMPON	10	31	4	0	0	45
PETITE ILE	33	9	2	0	0	44
SAINTE MARIE	19	14	3	0	3	39
SAINT PIERRE	2	19	0	0	2	23
SAINTE SUZANNE	11	10	1	0	0	22
SAINT BENOIT	6	14	0	0	0	20
LES TROIS BASSINS	2	15	1	0	1	19
LA PLAINE DES PALMISTES	7	5	0	0	0	12
BRAS PANON	6	4	0	0	1	11
LES AVIRONS	2	8	0	0	0	10
L'ETANG SALE	6	2	1	0	0	9
SAINTE ROSE	0	8	1	0	0	9
SAINT PHILIPPE	0	6	0	0	0	6
LE PORT	0	0	1	0	0	1
RÉUNION	689	1558	126	5	28	2406

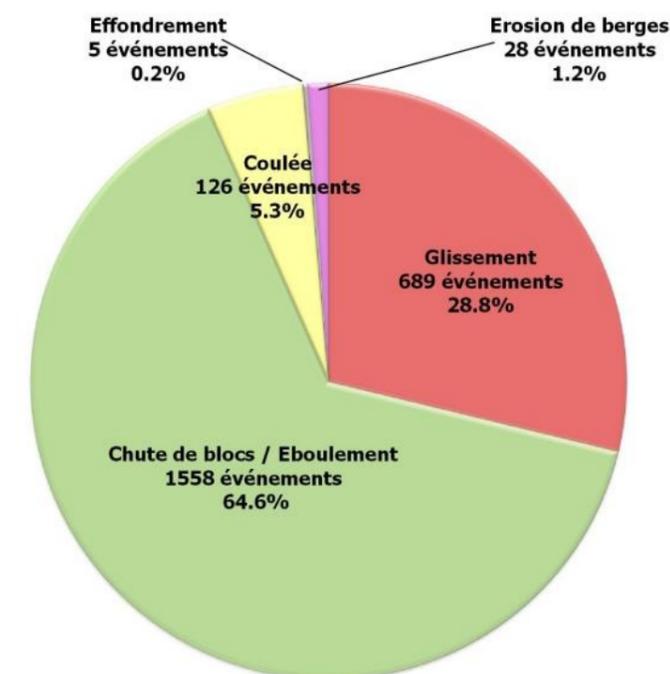


Illustration 5 : Répartition des mouvements de terrain enregistrés dans BDMVT (par type et par commune) – août 2016

3. Aléas MVT – notions générales

3.1. DEFINITIONS

La **notion d'aléa** est complexe et de multiples définitions ont été proposées. La définition la plus couramment utilisée est la suivante :

« L'aléa traduit, en un point donné, la probabilité d'occurrence d'un phénomène naturel de nature et d'intensité définies pour une période de retour donnée ».

Une définition récente (Fell et al., 2008⁴), spécifique à l'aléa mouvements de terrain mérite également d'être citée au regard notamment de la notion de dommage intégrée à la définition de l'aléa :

« Condition (ou circonstance) susceptible de provoquer des dommages. La description (ou caractérisation) de l'aléa mouvement de pente doit inclure la localisation, le volume (ou la surface), la classification, la vitesse du mouvement potentiel et sa probabilité d'occurrence dans une période de temps donnée. »

La définition de l'aléa impose de connaître, sur l'ensemble de la zone étudiée, **l'intensité et la probabilité d'occurrence** (ou d'apparition) des phénomènes naturels.

L'**intensité** d'un phénomène peut être appréciée de manière variable en fonction de sa nature même : volume des éléments pour une chute de blocs, importance des déformations du sol pour un glissement de terrain, importance du volume érodé pour une érosion de berge, etc... L'importance des dommages causés par des phénomènes passés ou l'échelle des parades nécessaires pour se prémunir du phénomène redouté peuvent également être prise en compte dans l'évaluation de l'intensité des aléas MVT.

La **probabilité d'occurrence** est la traduction de la probabilité qu'un phénomène se produise. Elle est définie soit par la présence du phénomène (historique et/ou actif) sur la zone géographique étudiée soit par la probabilité d'apparition du phénomène sur la période de référence donnée en fonction de la configuration de la zone géographique étudiée. Cette probabilité d'occurrence est fonction de la présence ou non de facteurs déterminants propres à chaque phénomène étudié (facteurs de prédisposition) et de facteurs non permanents (ou aggravants).

Le guide PPR spécifique aux mouvements de terrains (M.A.T.E. et M.E.T.L., 1999), fort du constat qu'il est très délicat de qualifier un phénomène d'instabilité de pentes par une notion de fréquence (contrairement aux phénomènes d'inondations, de houle ou de vent), accepte que le critère d'intensité ou de gravité permette à lui seul de qualifier l'aléa MVT.

La carte d'aléa est établie en fonction d'un aléa de référence, qui dans le cadre du PPR s'exprime généralement à partir d'une **période de référence (ou de retour) donnée**. Dans le cadre des PPR, cette période de référence donnée est le siècle à venir (**100 ans**), qui correspond approximativement à la durée de vie d'une habitation.

⁴ Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. Robin Fell, Jordi Corominas, Christophe Bonnard, Leonardo Cascini, Eric Leroi, William Z. Savage on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes.

3.2. TYPES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN CONSIDERES

La description des aléas MVT et les principes méthodologiques de caractérisation et de cartographie qui en découlent sont décrits dans le guide d'élaboration des plans de prévention des risques naturels à La Réunion (DEAL, 2012) et détaillée dans les notes de présentation des PPR de chaque commune du territoire réunionnais faisant l'objet d'une procédure PPR multi-aléas.

D'une manière générale, un mouvement de terrain est une manifestation du déplacement gravitaire de masses de terrain déstabilisées sous l'effet de sollicitations naturelles (pluviométrie anormalement forte...) et/ou anthropiques (terrassement, déboisement, exploitation de matériaux ou de nappes aquifères,...).

Sont distingués classiquement 6 types de mouvements de terrain : chutes de pierres et blocs, glissements de terrain, coulées de boue et laves torrentielles, érosion, affaissements et effondrements (liés à des cavités souterraines), fluage (déformation lente de couches plastiques en profondeur). Ces types de phénomène sont ceux retenus dans le guide méthodologique d'élaboration des PPR mouvements de terrain (M.A.T.E. et M.E.T.L., 1999).

Les types de mouvements de terrain étudiés et cartographiés dans les PPR des communes de La Réunion sont :

- **les chutes de pierres ou de blocs et les éboulements (symbole P) ;**
- **les glissements de terrain et coulées de boue associées (G) ;**
- **les érosions de berge (E) ;**
- **le ravinement, l'érosion des sols (E).**

Vis-à-vis des principales formations géologiques rencontrées à La Réunion, on peut identifier trois principales catégories de terrain, pour lesquelles les types de phénomènes naturels à risques associés et les critères d'évaluation d'aléas varient sensiblement :

Type de terrain	Exemple de formations géologiques	Phénomène naturel associé
Roche	Basalte, trachyte, lahars ...	Chute de blocs / Eboulements
Roche altérée et terrains meubles indurés	Tufs, altérites peu évoluées, alluvions indurées ...	Chute de blocs / Eboulements à Glissement de terrain Erosion / ravinement
Terrain meuble	Remblais, alluvions, colluvions, éboulis, altérites évoluées, formation de plage ...	Glissement de terrain Coulée de boue / lave torrentielle Erosion / ravinement

Tableau 2 : Type de phénomène rencontrés en fonction des catégories de terrain

3.3. REGLES GENERALES DE CARTOGRAPHIE DES ALEAS MVT

3.3.1. Principes généraux

Chaque zone distinguée sur les cartes d'aléas est matérialisée par une limite et une couleur traduisant la nature du ou des phénomènes naturels intéressant la zone et le degré d'aléa.

De nombreuses zones, dans lesquelles aucun phénomène actif n'a été décelé, sont cependant décrites comme étant exposées à un aléa de mouvement de terrain plus ou moins fort. Le zonage traduit un contexte topographique ou géologique dans lequel une modification des conditions actuelles peut se traduire par l'apparition de phénomènes. Les modifications peuvent être très variables tant par leur nature que par leur importance. Les causes les plus fréquemment observées sont les terrassements, les rejets d'eau et les épisodes météorologiques exceptionnels.

Dans la majorité des cas, l'évolution des phénomènes naturels est continue, la transition entre les divers degrés d'aléa est donc théoriquement linéaire. Lorsque les conditions naturelles - notamment la topographie - n'imposent pas de variations particulières, les zones d'aléas élevés, moyen et faible sont « emboîtées ». Il existe donc, dans ce cas, pour une zone d'aléa élevée donnée, une zone d'aléa moyen et une zone d'aléa faible à modéré qui traduisent la décroissance de l'intensité et/ou de la probabilité du phénomène avec l'éloignement des zones sources (**principe de gradation des aléas**).

Les zones caractérisées par une configuration morphologique, géologique similaire et exposées à une situation climatique relativement proche (facteurs de prédisposition et non permanent similaires) sont généralement cartographiées de la même manière (niveau d'aléa analogue) sous réserve qu'aucun phénomène historique connu ou facteur aggravant toujours possible ne puisse remettre en cause le niveau d'aléa considéré (**principe de similitude**).

D'une manière générale et conformément aux recommandations émises par le Ministère à travers notamment les guides méthodologiques, dans le cadre des procédures PPR des communes de La Réunion, les cartes d'aléas sont produites au **1/5000^{ème}** (1 cm sur la carte représente 50 m dans la réalité, impliquant une précision des limites cartographiques de l'ordre de 5 m : « épaisseur du trait »), notamment dans les secteurs concentrant les enjeux (bâties, routes, infrastructures, etc.). Ponctuellement, dans les secteurs inhabités où les enjeux sont moindres voire inexistantes en terme d'urbanisation future à échéance de quelques années voire dizaines d'années, des cartes d'aléas sont élaborés au 1/10 000^{ème}.

3.3.2. Méthodologie générale de qualification de l'aléa MVT

Les propositions d'évolution, d'adaptation de la méthode de caractérisation des aléas MVT pour les 3 principaux phénomènes étudiés sont présentés et détaillés dans les chapitres suivants (4 à 7).

La méthodologie générale de qualification de l'aléa MVT (quel que soit l'aléa considéré), s'appuie sur l'évaluation de la probabilité d'occurrence du phénomène et de son intensité potentielle, sur la période de référence considérée (le siècle à venir pour les procédures PPR).

Probabilité d'occurrence

La prévision de la date de déclenchement d'une instabilité de terrain est très rarement possible car elle dépend de facteurs permanents imparfaitement connus et de facteurs déclenchant non prévisibles avec certitude (pluies, séismes, vibrations, activités humaines, etc.).

En pratique, la probabilité d'occurrence est la plupart du temps estimée de façon qualitative (faible, moyenne, forte, très forte) en évaluant la prédisposition du site à un phénomène donné en fonction des facteurs permanents d'instabilité. Cette probabilité est donnée en fonction d'une échéance (ex : pour les PPR mouvements de terrain, la période de référence est le siècle).

L'évaluation de cette « probabilité » est donc basée sur la détermination des contextes favorable à la manifestation des phénomènes. Pour cela, des facteurs de prédisposition (permanents) et des facteurs non permanents (aggravants ou non) sont déterminés :

- **facteurs de prédisposition (= permanents)**
 - géologie : lithologie, altération, fracturation, épaisseur des faciès, hétérogénéités des formations ;
 - morphologie : pentes, encaissement.
- **facteurs non permanents (= généralement déclenchants, aggravants)**
 - altitude : différence de pluviométrie ;
 - venue d'eau, d'humidité : résurgence, écoulement... ;
 - végétation : présence ou non, culture en terrasse... ;
 - activité humaine : ouvrages de protection, drainage mal adaptés, vibrations, ...
 - séisme
 - ...

La définition et la précision des critères de prédisposition font appel à l'expérience de l'expert en charge de la cartographie de l'aléa MVT, sur les phénomènes naturels à La Réunion, ainsi qu'à un inventaire des phénomènes historiques survenus sur la commune et à proximité immédiate (recherche historique en mairie, enquête auprès des habitants, etc.).

Les relevés de terrain effectués sur le bassin de risque étudié permettent d'identifier les facteurs de prédisposition et de préciser les facteurs potentiellement aggravants afin de définir, ou tout du moins d'estimer la probabilité d'occurrence d'un phénomène dans la période de temps considérée (en l'occurrence le siècle).

Le Tableau 3 présente une proposition d'échelle qualitative de probabilité d'occurrence.

Très élevée (te)	L'occurrence du phénomène est normale. Sa non-occurrence serait exceptionnelle	La probabilité est appréciée en fonction des facteurs déterminants (présence et/ou intensité)
Élevée (e)	L'occurrence du phénomène est plus envisageable que sa non-occurrence	
Modérée (m)	L'occurrence du phénomène est équivalente à sa non-occurrence	
Faible (f)	La non-occurrence du phénomène est plus envisageable que son occurrence	
Très faible (tf)	La non-occurrence du phénomène est normale. Son occurrence serait exceptionnelle	

Tableau 3 : Echelle qualitative de probabilité d'occurrence (LCPC, guide technique sur les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux, 2004)

Intensité

L'évaluation de l'intensité des phénomènes de mouvements de terrain s'appuie sur une approche naturaliste de type expertise, excluant tout recours à des études complémentaires (sondages, essais et modélisations), sauf lorsque celles-ci sont déjà disponibles lors de l'établissement des cartes d'aléas. Les facteurs de base sont le relief et la nature des terrains et donc, plus généralement, la géomorphologie du terrain. En fonction du type de formation

rencontré, les critères vont différer : globalement plus les terrains seront indurés (roche, etc.) et plus la pente devra être importante pour créer des instabilités, et inversement.

Peuvent s'ajouter aux facteurs de prédisposition des facteurs non permanents, variables, qui vont soit augmenter soit diminuer l'exposition d'une zone face à un phénomène mouvement de terrain. Par exemple, la présence d'eau, la présence d'un défrichement intempestif vont augmenter l'exposition d'une zone. A contrario, la présence d'ouvrage de confortement de bonne qualité peut dans certains cas conduire à une diminution de l'exposition.

On doit, par ailleurs, tenir compte de la propagation d'un phénomène de mouvement de terrain :

- plus les masses en mouvement sont importantes et plus leur zone de départ est élevée, plus la zone de propagation potentielle est vaste ;
- plus la pente est importante et plus la zone de propagation sera importante.

De façon pratique, il convient de retenir que le zonage d'intensité distingue des secteurs homogènes où le niveau d'exposition à un aléa a été considéré constant. Cela signifie que des secteurs n'ayant fait l'objet d'aucun témoignage d'instabilité peuvent être considérés comme exposés s'ils présentent une configuration similaire à un ou plusieurs secteurs actifs ou historiquement touchés (notion de potentialité).

Aléa

De façon globale, l'évaluation des aléas repose sur un croisement de la probabilité d'occurrence et de l'intensité du phénomène à l'aide d'une grille de définition. Le résultat est exprimé de façon qualitative :

		Intensité croissante			
		Faible			Très élevée
Probabilité d'occurrence croissante	Faible	Faible			
	↓				
	↓				
	Très élevée				Très élevé

Tableau 4 : Principe de grille de qualification des aléas

Il est à noter que la hiérarchisation (le croisement finalement adopté) de l'aléa, selon ce type de grille, peut être variable d'un phénomène à un autre selon le nombre de classes d'intensité par exemple.

4. Caractérisation de l'alea MVT : chute de blocs – éboulement

Comme précisé au préalable, les phénomènes de chutes de blocs et d'éboulement sont les plus fréquents sur le territoire réunionnais.

4.1. DESCRIPTION DU PHENOMENE

Les chutes de masses rocheuses sont des mouvements rapides, discontinus et brutaux résultant de l'action de la pesanteur et affectant des matériaux rigides et fracturés. En fonction du volume total de matériaux éboulés, on distinguera, à partir notamment de la définition des classes d'instabilités établie dans le guide technique du LCPC (2004) :

- **les chutes de pierres** : mobilisant un petit nombre d'éléments de volumes unitaires inférieurs à quelques décimètres cubes ($< \text{dm}^3 = \text{litre}$) ;
- **les chutes de blocs** : le volume mobilisé lors d'un épisode donné est limité à quelques dizaines de m^3 avec des blocs de volumes unitaires allant de quelques décimètres cubes (litres) à quelques mètres cubes ;
- **les éboulements en masse** : le volume total en jeu atteint jusqu'à $10\,000\ \text{m}^3$;
- **les écroulements ou éboulements en grande masse, catastrophique** : le volume total mobilisé est supérieur à $10\,000\ \text{m}^3$ et peut atteindre plusieurs dizaines de millions de m^3 . La terminologie « avalanche de débris », également utilisée, désigne la propagation d'une masse non cohérente de fragments rocheux, de volume global généralement relativement important.

Ecroulement en grande masse	Ecroulement en masse	Chute de bloc	Chutes de pierres
$10^4\ \text{m}^3$	$10^4\ \text{à}\ 10^2\ \text{m}^3$	$10^2\ \text{à}\ 0.1\ \text{m}^3$	$< 0.1\ \text{m}^3$

Illustration 6 : Terminologie de l'aléa rocheux en fonction des volumes mobilisés (LCPC, 2004, repris dans le guide à paraître MEZAP, 2014)

Les blocs déstabilisés ont une trajectoire plus ou moins autonome. L'extension du phénomène est variable, la distance parcourue par les blocs rocheux étant notamment fonction de la taille et de la forme du ou des élément(s) en jeu, de la morphologie du versant et de l'occupation des sols. L'ampleur du phénomène s'apprécie d'une part à partir du volume mobilisé (volume au départ, importance des blocs après fragmentation éventuelle), d'autre part, par la surface et la topographie de l'aire de réception de la masse éboulée. Dans le cas des éboulements et a fortiori des écroulements, la forte interaction entre les éléments rend la prévision de leurs trajectoires et rebonds complexe.

L'occurrence du phénomène est plus ou moins directement liée à la conjonction de certains paramètres :

- **individualisation de blocs** au sein d'une formation massive fracturée ou d'une formation hétérogène présentant une matrice à grain fin (cas typique au sein des altérites avec altération en « boules ») ;
- **présence de facteurs naturels** favorables à la mobilisation des blocs :
 - action mécanique de l'eau (pression hydrostatique dues à l'infiltration des eaux météoritiques dans les interstices ou les fissures du matériel rocheux) ;
 - présence éventuelle d'une formation sous-jacente plus meuble, déformable ou érodable, induisant des contrastes de compétence (intercalation de niveaux de grats, alternance de niveaux basaltiques massifs et de produits pyroclastiques – scories, cendres – créant des discontinuités stratigraphiques et des comportements mécaniques hétérogènes) ;
 - présence fréquente de discontinuités structurales (diaclasses, joints, intrusions) sur un versant à la topographie sensible et participant au démantèlement de la masse rocheuse ;
 - croissance de la végétation (action du système racinaire dans les fissures).

Les matériaux tombés s'accumulent de façon désordonnée en pied de pente, et forment une morphologie caractéristique en forme de cône d'éboulis, ou en placage de pente plus faible en pied de paroi. On peut observer également des « champs de blocs » (présence de blocs plus ou moins isolés témoignant de l'activité historique).

L'activité chutes de blocs et éboulements est directement tributaire des contextes lithologique et structural (ainsi qu'hydrogéologique). De plus, les remparts et falaises du territoire sont le plus souvent constitués d'un empilement de coulées de laves plus ou moins épaisses et fracturées, fréquemment en alternance avec des niveaux de scories constituant des plans de faiblesse propices à un démantèlement de la masse rocheuse (le sous-cavage accroît considérablement la potentialité de survenue du phénomène du fait de la création de zones en surplomb).

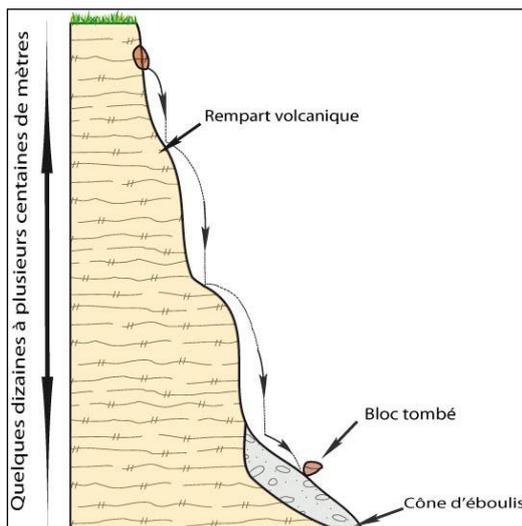


Illustration 7 : Chute d'un bloc isolé

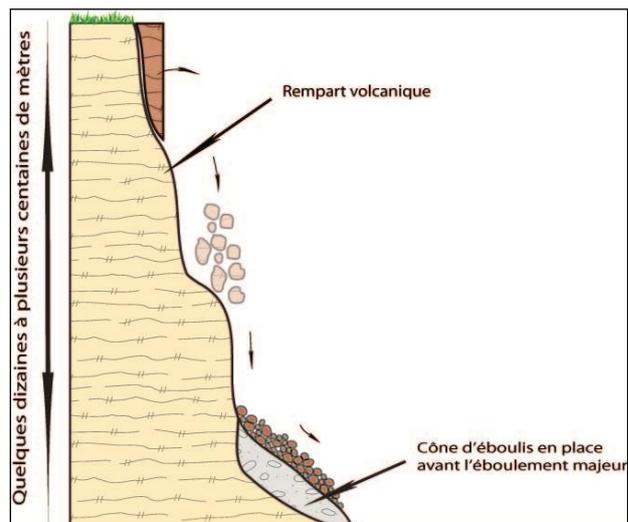


Illustration 8 : Eboulement



Illustration 9 : Exemple d'éboulement se développant dans les falaises constituées d'empilements de coulées de lave : éboulement à La Passerelle à Saint-Joseph en juillet 2016 (source : EDF)

La typologie générale des évènements « chute de blocs » est décrite de façon assez exhaustive sur l'illustration 10. Les principaux mécanismes de rupture observés et affectant les parois de La Réunion sont diverses. On peut citer les principaux mécanismes suivants qui sont guidés par le contexte lithologique et structural des reliefs avec des facteurs de déclenchement divers comme décrit précédemment :

- Rupture de pied ;
- Basculement de dièdre ;
- Rupture de surplomb ;
- Glissement dièdre ou plan.

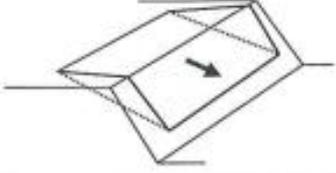
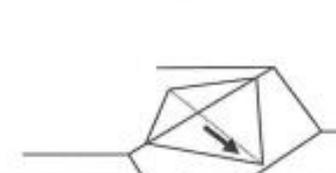
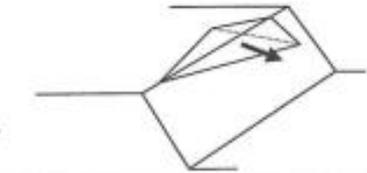
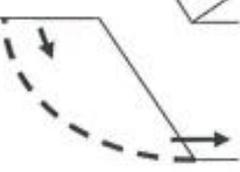
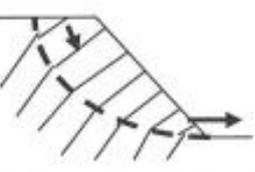
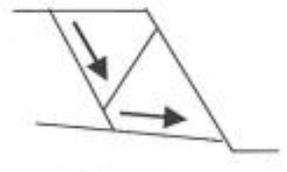
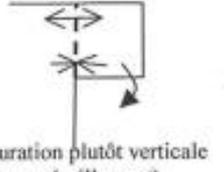
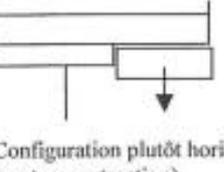
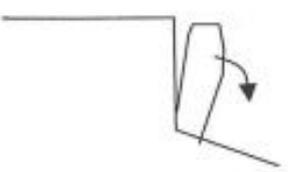
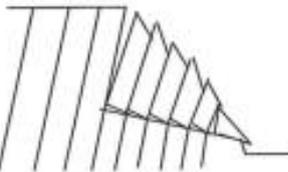
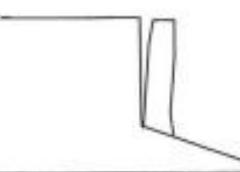
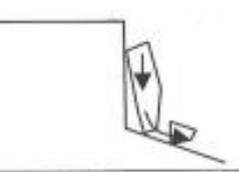
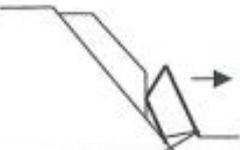
Configurations / mécanismes	Mécanisme d'instabilité
 	Glissement plan Gp
 	Glissement dièdre ou plan Gd
  	Glissements rotationnel et fractionné Gr
 <p data-bbox="395 1070 667 1120">Configuration plutôt verticale (rupture en cisaillement)</p>  <p data-bbox="810 1070 1114 1120">Configuration plutôt horizontale (rupture en traction)</p>	Rupture de surplomb S
 	Basculement de colonne ou de blocs Cb
 	Rupture de colonne en pied Cp
  	Rupture de banc (par flambage ou sur fracture) Bf

Illustration 10 : Configurations et mécanismes de chutes de blocs (Dussauge-Peissier, 2002)



Illustration 11 : Chute de bloc, environ 50 tonnes, sur la RN2 à Basse-Vallée Saint-Joseph, le 4/09/2010

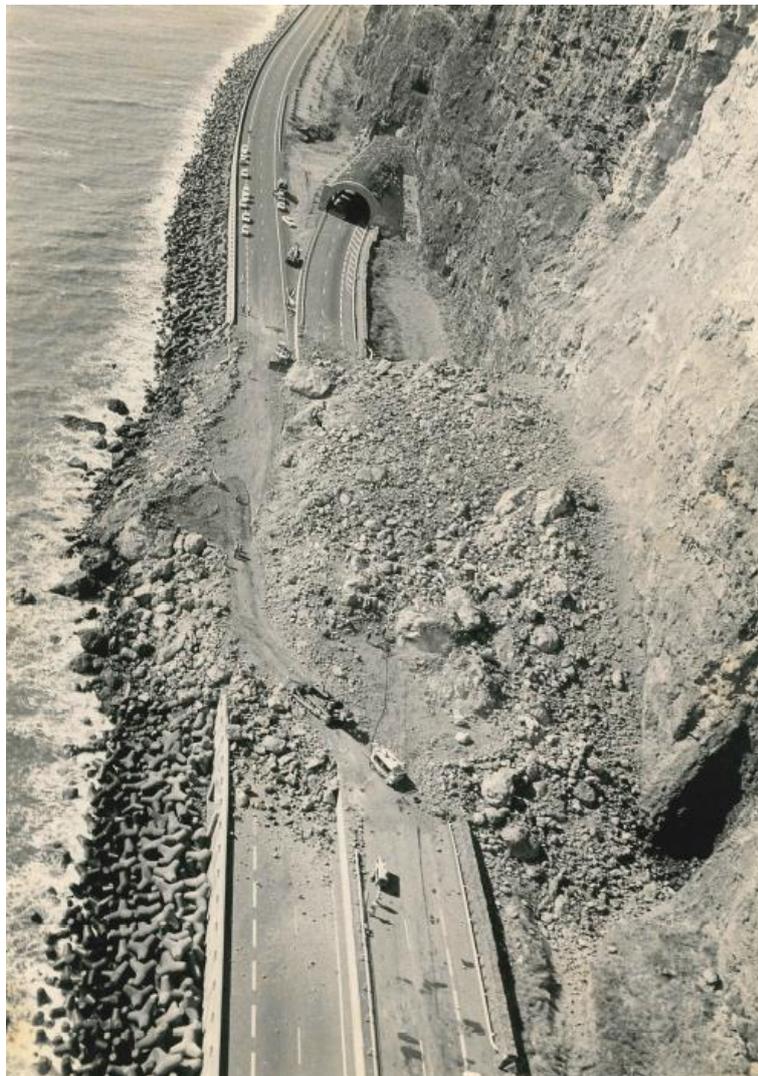


Illustration 12 : Eboulement en grande masse (20 - 30 000 m³) sur la Route du Littoral – juin 1980

4.2. METHODOLOGIE DE CARTOGRAPHIE DE L'ALEA CHUTE DE BLOCS

Deux configurations spécifiques en lien avec l'aléa chute de blocs nécessitent une méthodologie d'évaluation de l'aléa MVT différente dans le cadre de l'élaboration des cartes d'aléas des PPR :

- **Les terrains exposés au risque d'effondrement situés en recul de paroi (problématique communément appelée « recul de rempart ») ;**
- **Les terrains situés en pied de paroi exposés aux propagations de blocs ou aléa « rocheux ».**

4.2.1. Problématique de recul de rempart

La méthodologie de cartographie des aléas MVT dans les configurations de recul de rempart, spécifique au contexte réunionnais, s'appuie sur un retour d'expérience d'évènements connus à La Réunion (cf. rapport BRGM RP-56729-FR de juin 2008⁵). Cette analyse des effondrements en masse montre qu'une fracturation subparallèle à la bordure du rempart se développe en recul avec la majorité des fissures de décompression présente dans une bande de terrain dont la largeur L est de l'ordre de $L=H/10$ (où H est la hauteur du rempart, soit 10 % de la hauteur de la paroi / du rempart), puis plus espacées jusqu'à une limite de l'ordre de $L=H/5$ (soit 20% de la hauteur de la paroi / du rempart).



Illustration 13 : Exemple d'effondrement en crête d'un grand versant avec des habitations exposées en recul – Secteur d'Ilet à Cordes à Cilaos (cliché de 2014)

⁵ Nédellec JL, Cruchet M. – 2008 – Analyse des modes d'effondrement en masse sur plusieurs sites de La Réunion – Rapport BRGM RP-56729-FR. 102p.

D'un point de vue cartographique, la méthodologie utilisée ces dernières années (2008 à 2015) prend en compte, systématiquement, quel que soit la forme et la hauteur des parois de plus de 100 à 150 m de hauteur, l'intégration d'un pourcentage de la hauteur de la paroi considérée ($H/10$) en recul de la crête de cette dernière suivant le même niveau d'aléa MVT (élevé ou très élevé). Une décroissance des aléas MVT en recul suivant des bandes de largeur similaires est ensuite retenue (méthodologie présentée dans le guide PPR Réunion, DEAL, 2012).

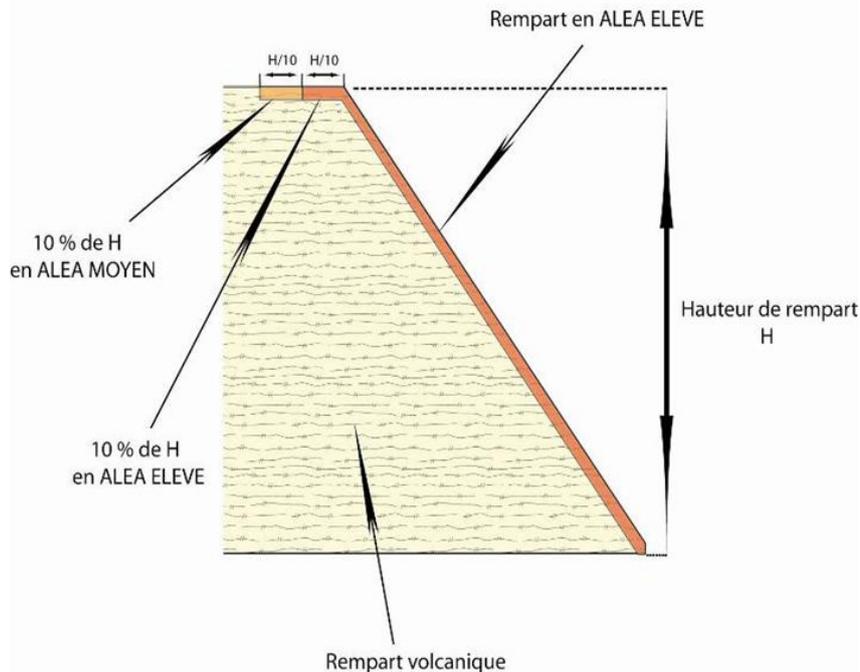


Illustration 14 : Schéma de principe de la méthode de caractérisation des aléas en recul de rempart (Guide PPR Réunion, DEAL, 2012)

Cette méthodologie n'est toutefois pas systématiquement adaptée dans certaines configurations de recul de rempart et induit une incompréhension notamment dans les zones sans évolution historique connue ou dans certains contextes morphologiques de crête de rempart peu propices aux évolutions à court ou moyen terme où les effondrements passés ne sont pas connus à échelle humaine (crête de forme linéaire, éloignement du lit vis-à-vis du pied de rempart limitant le risque de fragilisation en lien avec l'érosion, absence de fracture de décompression visible sur les terrains immédiatement en recul de la crête de paroi).

Le secteur du Bras de Poncho jusqu'à Bois Court au Tampon illustre ce type de configuration où le rempart aval mesure près de 800 m de hauteur sans évolution historique significative connue sur les terrains en recul qui sont densément urbanisés. Dans le cadre des échanges avec la collectivité et les citoyens concernés durant la phase d'élaboration du PPR sur la commune du Tampon, de nombreuses demandes d'explication et de précision ont été formulées et illustrent cette incompréhension par la population concernée.

Dans ce type de configuration, la méthodologie de cartographie des aléas MVT est modifiée afin de limiter l'impact du zonage sur les terrains en recul de rempart tout en conservant un zonage adapté aux évolutions toujours possibles dans ce type de configuration morphologique, sur le siècle à venir. En effet, l'absence d'évolution récente de la crête des remparts ne permet pas d'exclure le risque d'évolutions sur la période de référence du PPR, dont l'occurrence est difficilement évaluable, ce qui justifie le maintien de bandes de précaution en recul immédiat de la crête en lien avec la méthodologie actuelle.

La méthodologie proposée s'appuie sur l'évaluation de la probabilité d'occurrence du phénomène à partir de :

- L'analyse de la configuration morphologique du rempart, de la paroi considérée (présence ou non d'un cours d'eau à la base du rempart et morphologie de ce dernier (extrados de méandre potentiellement plus favorable à des instabilités à la base du rempart par exemple), forme morphologique de la crête du rempart (circulaire ou rectiligne), configuration du rempart (pente, ressaut) ;
- l'analyse comparative des orthophotos IGN disponibles entre 1950 et 2011 (sous réserve de la précision des clichés orthophotos, de points de repères et de calage suffisants) afin de vérifier l'évolution passée de la crête de rempart sur une période la plus longue possible afin, en fonction de la configuration actuelle, d'évaluer les possibilités de recul sur les 100 prochaines années ;
- des observations de terrain afin de vérifier la présence d'indices potentiellement favorables à une évolution à court (quelques années à dizaines d'années) ou moyen terme (plusieurs dizaines d'année), pouvant justifier une adaptation du zonage le cas échéant. La présence de lignes de fracturation ouverte, voire de panneaux affaissés en recul de la crête des parois et remparts étudiés, constituent les principaux indices de surface, en crête de rempart, pouvant témoigner d'une possible évolution (rupture).

L'analyse des résultats des étapes précédentes, permet d'adapter la méthodologie de cartographie des aléas MVT tout en conservant un principe de prévention étant donnée l'évolution toujours possible à l'échelle du siècle à venir. Cette évolution méthodologique intègre les principes cartographiques suivants (depuis la crête de rempart vers les terrains en recul) :

- A. Dans l'hypothèse où l'analyse diachronique des orthophotos et les observations de terrain ne montrent pas de recul de la crête de rempart ni d'indice de terrain laissant présager une évolution à court ou moyen terme (probabilité d'occurrence moyenne) :
- prise en compte d'un **aléa très élevé MVT (P4)** dans les parois et rempart subverticaux de plus de 100 m de hauteur. Les parois de plus faible hauteur pourront être qualifiées en aléa élevé MVT. En fonction de leur morphologie, géologie et des événements historiques connus, un niveau d'aléa très élevé pourra être considéré ;
 - réduction de l'emprise de l'aléa très élevé avec le maintien d'une bande d'aléa très élevé d'environ 5 à 10 m de large afin de couvrir la bande de terrain qui serait directement mobilisée lors d'un événement ponctuel pouvant affecter la crête (premiers terrains mobilisés) ;
 - maintien d'un bandeau équivalent à « H/10 » en **aléa élevé MVT (P3)**, sur la base du principe méthodologique actuel, afin de traduire le recul potentiel sur la période de référence et ainsi conserver, dans la perspective du zonage réglementaire, une bande d'inconstructibilité (aléa très élevé et élevé comprise) de largeur approximativement équivalente à ce ratio de H/10 (simplification de la compréhension pour les citoyens concernés) ;
 - maintien du principe de gradation des aléas avec une bande d'**aléa moyen MVT (P2)** forfaitaire de 10 m de large puis la prise en compte d'un aléa faible en recul (P1) qui n'a pas de traduction réglementaire particulière (= zone blanche dans les PPR de La Réunion).

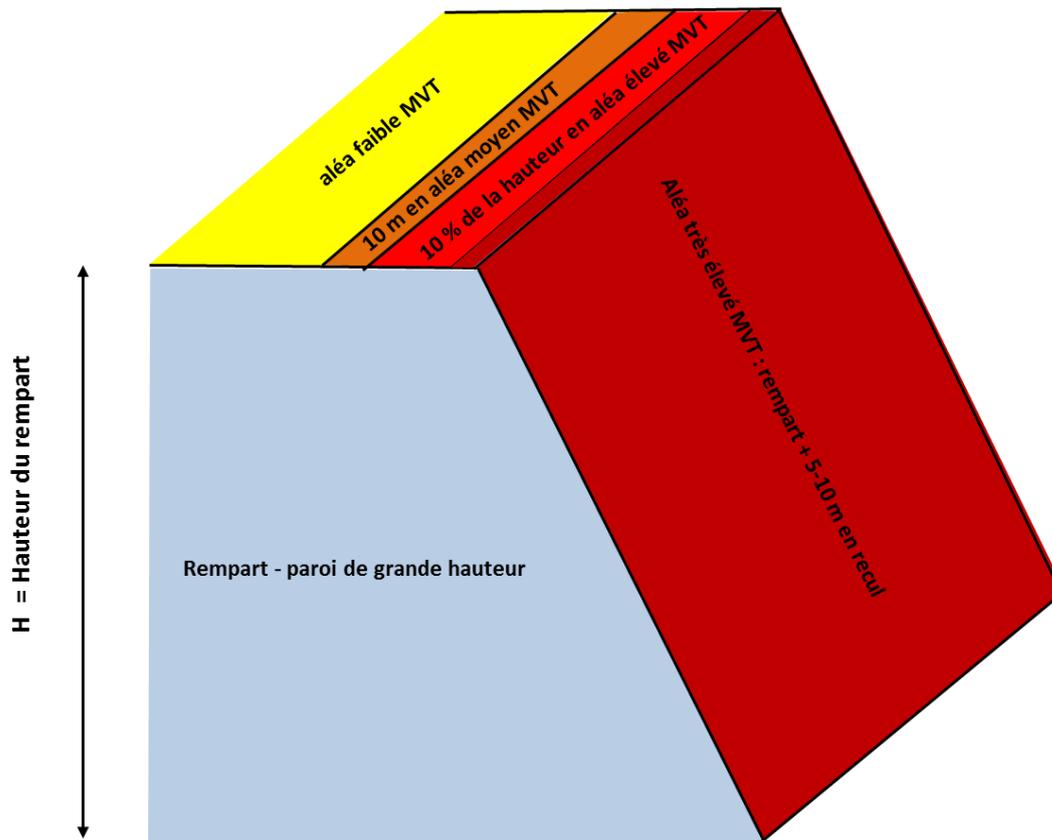


Illustration 15 : Schéma de principe de la méthode de caractérisation des aléas MVT proposée pour les terrains situés en recul de rempart

B. Dans le cas contraire (évolution historique connue et/ou indices de terrain laissant craindre une évolution à court / moyen terme), la méthode de cartographie des aléas MVT en recul de rempart sera adaptée au cas d'espèce en s'appuyant sur les évolutions possibles sur la période de référence (probabilité d'occurrence forte).

Il s'agit des situations de rempart ou de grande paroi (hauteur supérieure à 100 à 150 m) où l'analyse met en évidence les éléments suivants, et où la projection en terme de recul sur la période de référence dépasse l'application de la méthode précédente :

- identification d'une évolution historique significative de la crête de rempart,
- présence d'indice de fracturation en recul de cette dernière,
- forme morphologique du rempart propice à un recul rapide et régulier à court ou moyen terme, avec un impact significatif sur les terrains en recul sur la période de référence.

En dehors des secteurs connus d'éboulement en grande masse où les effondrements en crête de rempart engendrant un recul est fréquent et potentiellement significatif (comme l'évènement catastrophique de Mahavel en 1965 par exemple à Saint-Joseph où un panneau de près de 35 à 50 Mm³ s'est effondré générant un recul de près de 50 m), l'analyse de différents grands versants de La Réunion dans les récentes procédures PPR (Bras de Pontho – Bois Court au Tampon, Rivière des Galets côté Sans soucis à St Paul, encaissement de la Rivière Langevin à Saint-Joseph par exemple), tend à montrer que les évolutions historiques observées en crête de versant (via l'analyse comparatives des orthophotos disponibles de l'IGN (1950 à 2011)), sont ponctuelles et brutales (liées à des éboulements significatifs) mais restent d'une manière générale modérée en terme de terrain mobilisé en recul de crête à l'échelle de la période de

comparaison (de l'ordre de quelques mètres à dizaines de mètres pour les plus significatives). Ces reculs sont d'une manière générale inclus dans la bande d'aléa très élevé voire élevé MVT par application de la méthodologie proposée.

Ainsi, seuls les cas de remparts avec des évolutions passées significatives et potentiellement importantes sur la période de référence considérée, dépassant les limites de l'aléa élevé MVT par application de la méthode présentée sur l'illustration 15, seront étudiés de manière spécifique avec une majoration du zonage de l'aléa très élevé MVT en fonction des possibilités de recul de ces remparts actifs sur le siècle à venir. Dans ce cas de figure, il est proposé de définir l'aléa très élevé suivant une bande équivalente au recul historique constaté sur le siècle précédent.

Afin d'harmoniser les approches de caractérisation des aléas MVT, pour les différents phénomènes étudiés, les propositions méthodologiques pour les problématiques d'effondrement en crête de rempart sont traduites par la grille suivante (cf. Tableau 5).

Pour ce type de phénomène, la qualification de l'aléa MVT est guidée par la probabilité d'occurrence. En cas d'occurrence, ce type de phénomène est brutal avec une intensité jugée très élevée.

			Niveau d'aléa MVT			
Probabilité d'occurrence	Moyenne	<p>Configuration morphologique de l'encaissement rectiligne sans méandre marqué en pied de rempart et sans pentes très fortes au sein de l'encaissement (morphologie homogène)</p> <p>+ pas d'évolution historique connue de la crête du rempart via l'analyse comparative des orthophotos IGN disponibles</p> <p>+ aucun indice de surface en recul de la crête de rempart pouvant témoigner d'une activité dans le siècle à venir (pas de fissures ouvertes, ni de panneaux affaissés)</p>	Faible (P1) au-delà des aléas très élevé à moyen	Moyen (P2) sur une bande forfaitaire de 10 m en recul de l'aléa élevé	Elevé (P3) sur une distance équivalente à H/10 en recul de l'aléa très élevé	Très Elevé (P4) sur 5 à 10 m en recul de la crête du rempart
	Forte	<p>Configuration morphologique de l'encaissement favorable à une évolution sur le siècle à venir avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> ↪ une évolution historique connue et significative de la crête du rempart avec recul constaté <p>ou</p> <ul style="list-style-type: none"> ↪ des indices de surface en recul de la crête de rempart pouvant témoigner d'une activité dans le siècle à venir (par exemple présence de fractures ouvertes et/ou de panneaux affaissés) 				Très Elevé (P4) sur une distance équivalente au recul constaté par le passé ou jusqu'aux indices de surface observés en recul de la crête

Tableau 5 : Définition de l'aléa MVT en recul de rempart

L'évolution méthodologique proposée dans la cartographie des aléas MVT pour les configurations de « recul de rempart » a été mise en œuvre dans différents secteurs de La Réunion dans le cadre de procédures PPR en cours, comme le secteur de Sans Souci à Saint-Paul (cf. Illustration 16).

Sur le secteur présenté (caractérisé par l'absence d'évolution historique connue et d'indices de terrain « défavorables », cas A équivalent à une probabilité d'occurrence faible), la rive gauche de l'encaissement du lit de la Rivière des Galets mesure entre 120 et 300 m de haut approximativement. En termes de cartographie des aléas MVT, selon l'ancienne méthodologie, le zonage au niveau du rempart et des terrains en recul était traduit par un aléa très élevé MVT dans le rempart puis par deux bandes successives en recul d'aléa élevé puis moyen de 15 à 30 m de large en fonction des secteurs.

L'évolution méthodologique pour ce secteur se traduit par une réduction de la bande d'aléa moyen MVT en recul (initialement équivalente à H/10) et à une précision du positionnement de la limite entre l'aléa très élevé et élevé MVT. En définitive, l'emprise des zones d'aléa MVT de niveau moyen à très élevé au droit des terrains en recul immédiat de la crête a été réduite d'environ 5 m à 25 m selon les secteurs.

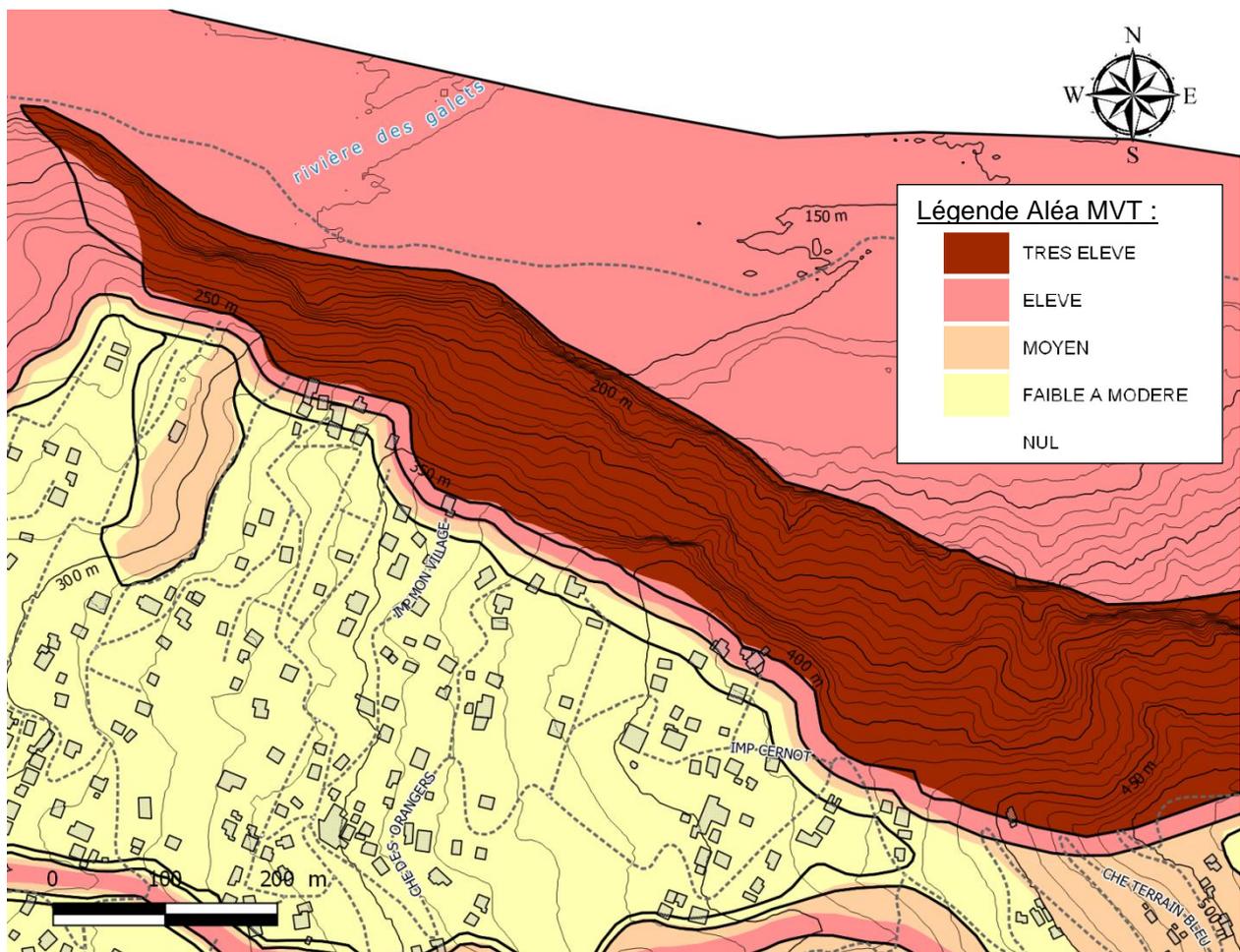


Illustration 16 : Illustration de l'évolution méthodologique dans la cartographie des aléas MVT en recul de rempart – secteur de Sans Souci à Saint-Paul (en trait noir l'application de l'ancienne méthodologie : 1^{ère} bande = aléa élevé, 2^{ème} bande = aléa moyen)



Illustration 17 : Vue générale du rempart sous le secteur habité de Sans Souci à Saint-Paul

4.2.2. Les terrains situés en pied de paroi exposés aux propagations de blocs – aléa « rocheux »

De façon générale, la cartographie de l'aléa MVT pour les terrains exposés aux chutes de blocs (ou aléa « rocheux ») nécessite de définir les volumes de blocs susceptibles de se propager et d'atteindre les enjeux. Ces volumes peuvent être issus de plusieurs types de scénarios :

- départ d'un volume unitaire se propageant vers l'enjeu (**chute de pierres, de blocs**),
- départ d'un volume +/- important (jusque plusieurs centaines de m³ voir quelques milliers : **éboulement en masse voire en grande masse**) se fragmentant lors de sa chute et produisant des volumes plus faibles se propageant vers l'enjeu ou écroulements en grande masse avec propagation spécifique.

L'analyse des deux types de phénomènes permet d'aboutir à la cartographie de l'aléa MVT en retenant le phénomène majorant, que ce soit en termes d'intensité d'aléa et d'étendue spatiale des zones concernées (paroi ou rempart et espaces en pied exposés).

Evènement de grande ampleur

Ce type d'instabilité (de grande ampleur, générant plusieurs dizaines voire centaines de milliers de m³) peut se produire sur le territoire réunionnais comme en atteste l'historique connu (cf. chapitre 2.4). La fréquence de ces phénomènes est variable et délicate à définir avec certitude. A l'échelle de l'île on peut considérer une fréquence de l'ordre de 1 évènement de grande ampleur tous les 5 à 10 ans en moyenne (ce qui est relativement significatif) : on citera notamment les évènements de Grand Sable (Salazie, 1875 – 18 Mm³), Mahavel (Saint-Joseph, 1965 – 35 à 50 Mm³), la Route du Littoral (Saint-Denis, 1980, 2006, plusieurs dizaines de milliers de m³), le Piton d'Enchaing (Salazie, 2001 – 100 000 m³), le Grand éboulis (Saint-Denis, 2002 – 0,5 Mm³), la Route du Littoral (La Possession, 2006 - 25 000 m³), le Bras des Roches Noires (Entre-Deux, 2006 - 2 Mm³), La Rivière Langevin (Saint-Joseph, 2009 – 25 000 m³), Ilet Morin (Salazie, 10 000 m³, 2010).

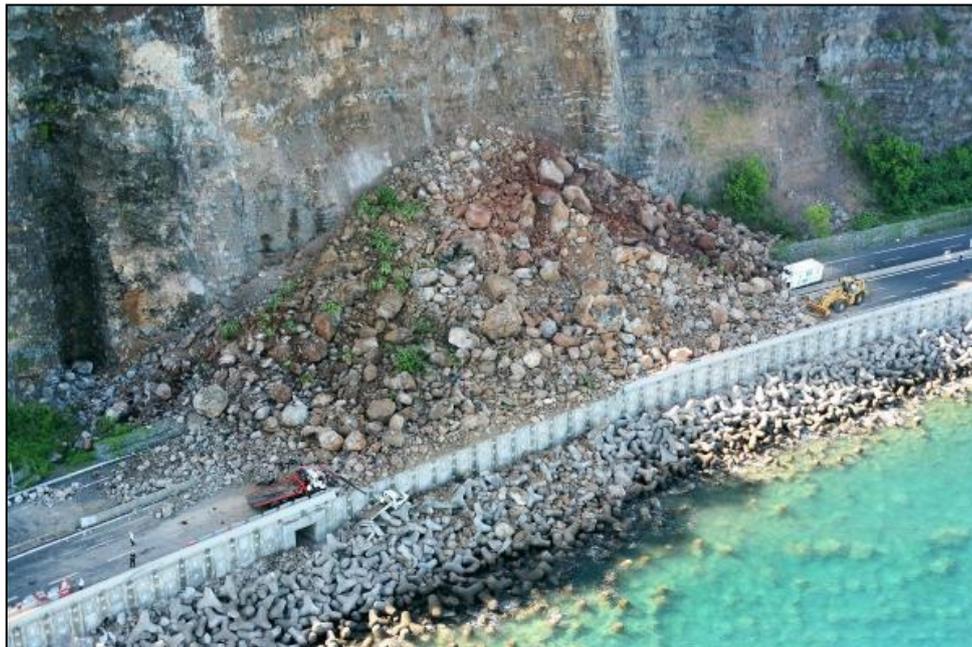


Illustration 18 : Eboulement impactant la Route du Littoral en mars 2006

Les secteurs concernés sont généralement des remparts ou grands versants où les enjeux exposés ne sont pas systématiquement présents en pied (hormis pour le secteur de la falaise de la Route du Littoral ou quelques lieux habités en pied de grandes parois comme le secteur de La Passerelle dans le lit de la Rivière Langevin par exemple). Il est par ailleurs, fréquent que ce genre de rempart concerne des encaissements de ravines fortement incisés et peu larges où les propagations à l'aval sont limitées au lit, « facilitant » ainsi la cartographie des aléas MVT (propagation des éboulements limités par la fosse naturelle que représente le lit de la ravine concernée ou par la proximité du versant opposé).

L'analyse des principaux événements historiques majeurs connus confirme l'incidence de la configuration morphologique à l'aval des remparts affectés de tel phénomène. La présence de terrains plats ou de versants opposés contraint les propagations dans la plupart des secteurs pouvant être affectés par de tels phénomènes. Les événements de Grand Sable et de Mahavel, qui sont les plus volumineux connus (respectivement 18 à près de 50 Mm³), ont toutefois généré une atteinte significative à l'aval, du fait 1) des volumes mobilisés où les mécanismes de propagation en jeu s'apparentent à des phénomènes d'écoulement turbulent, mais surtout 2) d'une configuration morphologique favorable (sans obstacles majeur à l'aval).

L'effondrement de Mahavel a notamment atteint une distance de près de 5 kms jusqu'à l'embouchure avec la Rivière des Remparts.

La valeur d'angle de la ligne d'énergie illustrant ces distances atteintes par les événements majeurs connus, montre l'influence de la morphologie des encaissements concernés sur les conditions de propagation à l'aval.

Evènements historiques	Volume éboulé	Valeur d'angle de la d'énergie (angle avec l'horizontale depuis la zone de départ jusqu'à la zone atteinte la plus éloignée)
Ilet Morin, Salazie, 2010	10 000 m ³	40-41°
Ilet à Diable, Saint-Joseph, 2009	25 000 m ³	41-42°
Route du Littoral, Saint-Denis, 1980	25 000 m ³	61-62°
Grand Eboulis, Saint-Denis, 2002	500 000 m ³	26-27°
Bras des Roches Noires, Entre-Deux, 2006	2 Mm ³	36-37°
Grand Sable, Salazie, 1875	18 Mm ³	24-25°
Mahavel, Saint-Joseph, 1965	35 - 50 Mm ³	19-20°

Tableau 6 : Valeur d'angle de la ligne d'énergie des principaux événements historiques de grande ampleur

L'intégration de tels phénomènes dans la cartographie des aléas MVT des procédures PPR des communes de La Réunion est généralement définie en fonction de l'occurrence de phénomène historique de ce type dans le bassin de risque étudié, à partir de l'analyse de la configuration morphologique actuelle.

Etant donnés les mécanismes de fragmentation et d'interaction entre blocs lors d'éboulement en grande masse, s'apparentant plus à des phénomènes au comportement proche d'un mélange turbulent, les trajectoires des blocs éboulés ne s'individualisent pas et il est délicat de les définir à partir des méthodes usuelles. **La méthodologie de cartographie de l'aléa MVT s'appuie donc sur la prise en compte des phénomènes historiques de grande ampleur, basée principalement sur l'analyse des zones atteintes pour des contextes morphologiques similaires.**

Dans le détail, la prise en compte des phénomènes de grande ampleur aboutit à la démarche suivante dans la cartographie des aléas MVT des PPR des communes de La Réunion :

- prise en compte d'un **aléa très élevé MVT (P4)** dans les parois et remparts subverticaux de plus de 100 m de hauteur. Les parois de plus faible hauteur pourront être qualifiées en aléa élevé MVT. En fonction de leur morphologie, géologie et des évènements historiques connus, un niveau d'aléa très élevé pourra être considéré ;
- selon l'analyse des conditions de propagation des phénomènes historiques de grande ampleur connus dans le bassin de risque étudié, les terrains directement impactés en pied de rempart sont cartographiés également en **aléa très élevé MVT (P4)** (il s'agit généralement du cône d'éboulis actif et/ou présent en pied de versant qui peut atteindre une distance de plusieurs dizaines voire centaines de mètres en pied de rempart). La largeur de cet espace en pied de rempart (ou paroi) est variable, selon les morphologies de paroi et de terrains en pied étudiés (plat ou plus ou moins pentu, avec une ravine délimitant le pied ou non) conditionnant l'emprise des zones atteintes, et est définie à dire d'expert selon l'historique connu et la configuration morphologique du secteur étudié ;
- la gradation des aléas à l'aval est établie en fonction de la configuration morphologique dans le secteur étudié. Dans la plupart des cas la présence de ravines encaissées voire d'un versant sur la rive opposée à faible distance, pouvant également générer des phénomènes de ce type, ne permet pas d'envisager de gradation des aléas dans ces espaces en pied. Pour les quelques cas où la configuration des terrains en pied de rempart (ou paroi) permet d'envisager une exposition progressivement moindre, sans obstacle naturel contraignant la propagation, la gradation des aléas est considérée avec :
 - o un **aléa élevé MVT (P3)** considéré pour les terrains impactés jusqu'au dernier bloc éboulé de volume significatif (1 m³ et plus) ;
 - o puis une bande forfaitaire d'**aléa moyen MVT (P2)** couvrant l'extension maximale de la zone impactée par l'évènement par des blocs de taille restreinte (moins d'1 m³) ou de largeur forfaitaire à défauts d'informations précises sur les phénomènes historiques. La largeur de l'aléa moyen MVT est définie à dire d'expert selon principalement la configuration morphologique du secteur concerné.

Remarque : A titre de comparaison, le guide à paraître MEZAP⁶ propose pour la cartographie de ces phénomènes de grande ampleur d'appliquer la méthode de la ligne d'énergie avec une valeur d'angle minimale comprise entre 25 et 28°, prise depuis la zone de départ, à moduler selon les contextes géologiques et surtout morphologiques, avec un aléa très élevé unique.

⁶ MEZAP : groupe de travail réuni sous l'autorité du MEDDE pour la détermination d'une METHodologie de Zonage de l'Aléa chute de Pierres, piloté par IRSTEA

L'application de telles valeurs à La Réunion induirait des zones soumises à un aléa très élevé MVT disproportionnées, du fait principalement, comme exposé auparavant, de la configuration des profils de propagation (parois/remparts subverticaux et terrains souvent plats ou peu pentus en pied). Cette application n'est pas retenue mais peut être utilisée ponctuellement comme moyen de vérification, d'aide à la cartographie dans les configurations appropriées au regard des phénomènes connus. L'analyse précédente à partir des phénomènes historiques connus (cf. Tableau 6), tend cependant à confirmer cette gamme de valeurs pour les événements les plus volumineux ($> 1\text{Mm}^3$) sans contrainte morphologique majeure à l'aval (cas de Mahavel, de Grand Sable ou encore de Grand Eboulis).

Afin d'harmoniser les approches de caractérisation des aléas MVT, pour les différents phénomènes étudiés, les propositions méthodologiques pour les problématiques d'éboulement de grande ampleur sont traduites par la grille suivante (cf. Tableau 7).

Pour ce type de phénomène, la qualification de l'aléa MVT est guidée par la probabilité d'occurrence, elle-même variable selon les conditions de propagation à l'aval. En cas d'occurrence, ce type de phénomène est brutal avec une intensité jugée très élevée (volume supérieur à $10\,000\text{ m}^3$).

			Phénomène de grande ampleur : Volume > 10 000 m ³
			Intensité = très élevée
Probabilité d'occurrence	Faible	Extension maximale de la zone impactée par un évènement historique (par des pierres, éclats de taille restreinte (moins d'1 m ³)). ou Zone éloignée de l'extension maximale prévisible pour un évènement de grande ampleur sur la période de référence	Moyen (P2) : bande forfaitaire définie à dire d'expert
	Moyenne	Extension maximale de la zone impactée par un évènement historique (par des blocs de plus d'1 m ³)	Elevé (P3) : jusqu'au dernier bloc éboulé (1m³ et plus)
	Elevée	Paroi, rempart de plus de 100 m de hauteur + Terrains en pied de paroi directement exposés aux phénomènes de grande ampleur	Très élevé (P4)

Tableau 7 : Définition de l'aléa MVT pour les éboulements de grande ampleur

Pour illustrer cette méthodologie pour les phénomènes de grande ampleur (recul et propagation à l'aval), le secteur de l'éboulement historique de Mahavel dans le lit de la Rivière des Remparts est présenté (cf. Illustration 20). L'analyse de cet évènement (volume estimé entre 35 et 50 millions de m³ éboulés en 1965) a permis de préciser la cartographie de l'aléa MVT dans le cadre du projet de PPR de la commune de Saint-Joseph (phase d'enquête publique du projet prévue fin 2016), avec notamment :

- un versant haut d'environ 700 m avec une inclinaison de l'ordre de 70° cartographié en aléa très élevé MVT (P4) ;
- le panneau effondré mesurait 700 m de haut sur environ 1000 m de longueur et une épaisseur au sommet estimée à environ 50 m. La configuration géologique des coulées constituant l'ossature du rempart (faible épaisseur des coulées basaltiques intercalées d'épais niveaux scoriacés, pendage vers le vide pouvant atteindre 30°) est très défavorable vis-à-vis de la stabilité du rempart ;
- cet effondrement a atteint la confluence avec la Rivière des Remparts, située approximativement 5 kms à l'aval de la zone de décrochement. Les matériaux éboulés ont été progressivement remobilisés par les crues depuis cet évènement majeur ;
- deux récents effondrements se sont produits dans ce même secteur (5 Mm³ en 1996 et 1 Mm³ en 2001) sans toutefois générer des atteintes à l'aval aussi significative qu'en 1965 ;
- l'analyse de la configuration à l'aval de la zone d'effondrement s'est traduite par une caractérisation en aléa très élevé MVT au droit des zones systématiquement atteintes par les évènements récents ayant affecté le secteur et un aléa élevé MVT jusqu'à la confluence avec le lit de la Rivière des Remparts (extension maximale de l'effondrement de 1965) ;
- Le secteur étant également exposé par les chutes de blocs et éventuels éboulements pouvant prendre naissance dans le rempart formant l'encaissement en rive droite de la Rivière des Remparts, aucune gradation de l'aléa n'a été retenue dans ce secteur.

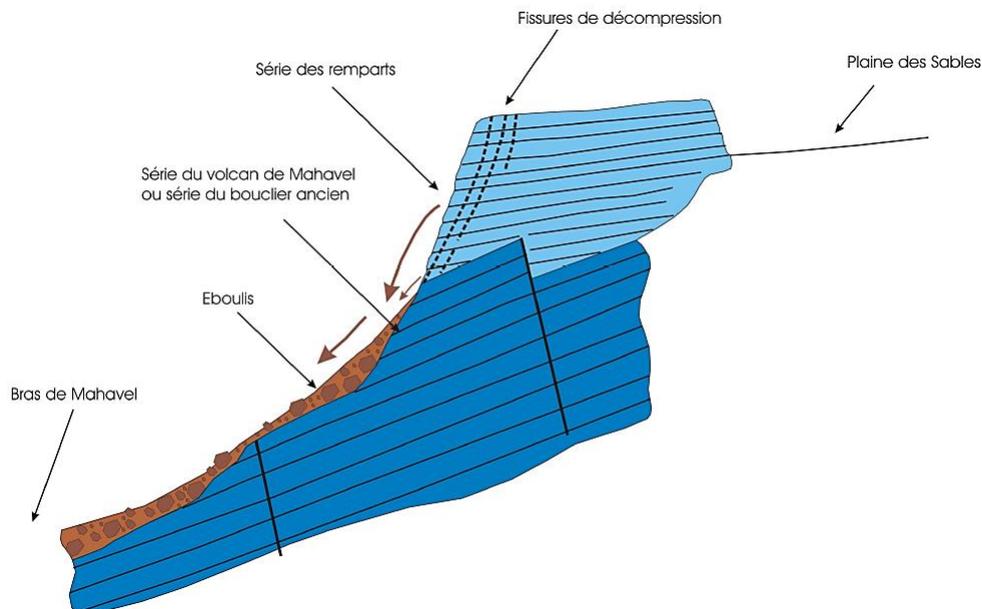


Illustration 19 : Coupe schématique interprétative du rempart de Mahavel (Nédellec et Cruchet, 2008)

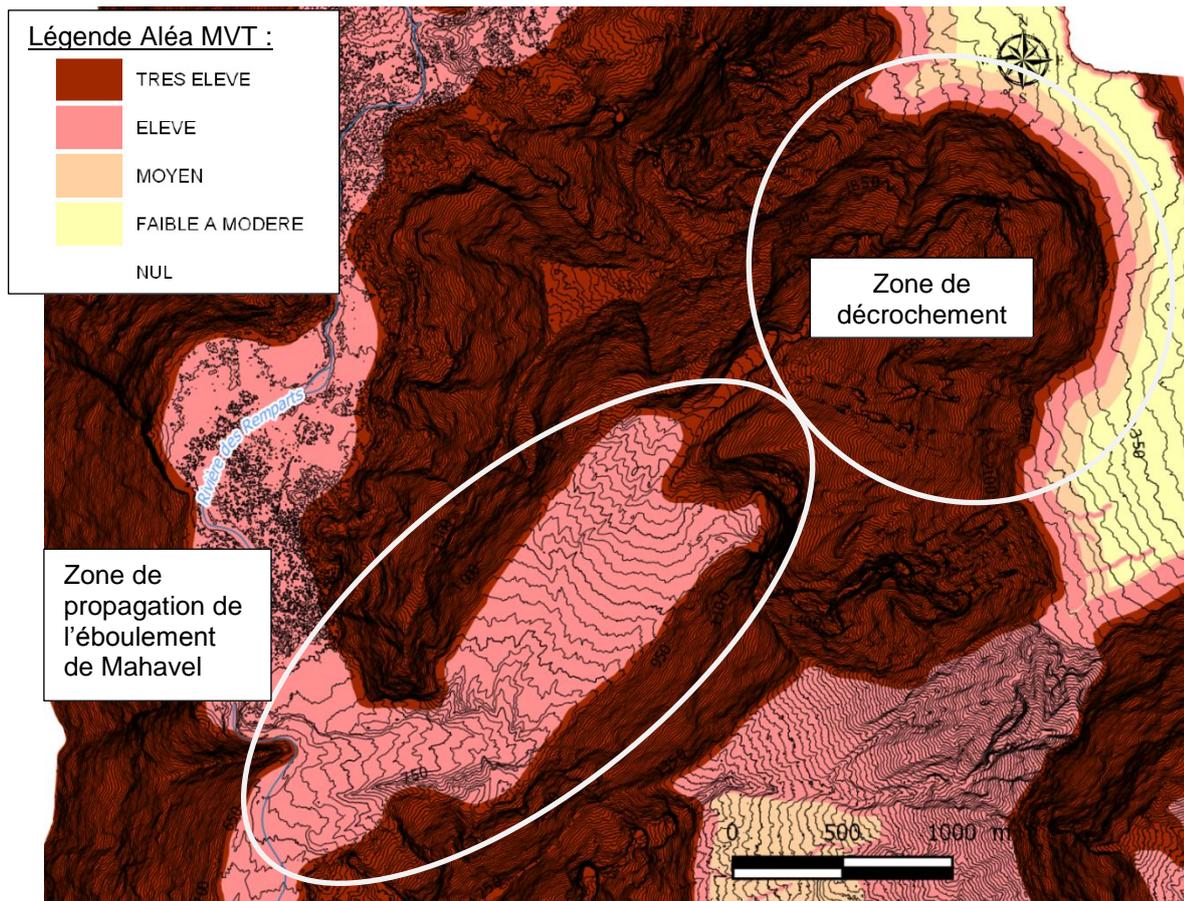


Illustration 20 : Illustration de la méthodologie de cartographie des aléas MVT pour les phénomènes de grande ampleur type éboulement en masse – Secteur de Mahavel à Saint-Joseph (isolignes 10 m issues du MNT de l'IGN©)



Illustration 21 : Vue générale du rempart de Mahavel au droit de la zone de décrochement (cliché de 2002, Nédellec et Cruchet, 2008)

Chute de blocs

La proposition d'évolution de la méthodologie de cartographie de l'aléa « rocheux » dans le cadre des PPR est issue des résultats à paraître du groupe de travail sur l'évaluation de l'aléa « rocheux » dans le cadre d'un PPRn (MEZAP). Cette méthode définit un cadre global d'analyse, théoriquement dédié au zonage de l'aléa chutes de blocs et éboulements.

La cartographie d'aléa de façon générale impose de définir le volume du plus gros bloc susceptible de s'ébouler et de se propager jusqu'aux enjeux, sur la période de référence considérée qui est le siècle (guide PPRn, soit approximativement une durée de vie humaine ou celle d'une habitation). Ce « scénario de référence » est généralement justifié par l'historique connu sur le secteur étudié, mais aussi dépendant de la configuration actuelle du site étudié. Il peut ainsi être d'intensité égale, supérieure ou inférieure au plus gros événement historique connu sur la zone.

Ceci impose d'identifier des zones homogènes de départ, caractérisées par un volume unitaire de bloc (intensité du phénomène, volume après fragmentation) susceptible de se propager dans la pente jusqu'aux enjeux. Ces zones de départ sont guidées par le contexte géologique (fracturation notamment), morphologique (pentes, falaise, surplombs...) et sur la définition de la typologie des phénomènes attendus. Le principe est d'exprimer de façon qualitative, pour chaque zone, la présence ou non de facteurs de prédisposition et de facteurs éventuellement aggravants au départ de blocs.

La méthodologie décrite dans les paragraphes suivants s'appliquent à des cas spécifiques d'enjeux concentrés exposés aux chutes de blocs et nécessitant le recours à des études ponctuelles intégrant des modélisations (simulations trajectographiques) mais aussi pour la cartographie de l'aléa MVT à échelle communale.



Illustration 22 : Exemple de chute de blocs proche de zones habitées (Rey, 2016)

En termes pratiques, l'évaluation de l'aléa chute de blocs (aléa « rocheux ») pour la cartographie de l'aléa MVT des procédures PPR découle de 4 étapes résumées de la sorte :

a) Aléa de rupture

- On définit *ce qui peut être mis en mouvement*. C'est la quantité de roche, exprimée en volume, qui peut être déstabilisée et mise en mouvement. Le moteur de ce mouvement est gravitaire. Ces volumes potentiellement mobilisables décrivent l'intensité attendue des phénomènes, qualifiée par un **indice d'intensité**. Cette intensité est associée à l'endommagement potentiel engendré par une atteinte à des enjeux (ici un bâtiment d'habitation « classique » est pris comme référence pour évaluer cet impact).

↳ D'une manière générale à La Réunion, l'aléa rocheux est caractérisé par des volumes unitaires pouvant atteindre les enjeux sur la période de référence considérée rarement inférieurs au m³ du fait de la nature des formations géologiques composant les parois du territoire. Seuls quelques secteurs spécifiques pourront générer des blocs atteignant les enjeux avec des volumes inférieurs au m³, comme le secteur du Cap La Houssaye – Cap Champagne à Saint-Paul par exemple, où les brèches matérialisant la paroi (issues d'avalanches de débris) se fragmentent lors des impacts et ne génèrent pas de blocs volumineux, ou rarement supérieur au m³ pour les écailles qui peuvent se détacher sans impact en paroi avant d'atteindre le sol.

Dans la cartographie de l'aléa « rocheux » à l'échelle communale (procédures PPR de La Réunion), un volume unitaire supérieur au m³ sera considéré. Les cas spécifiques de volumes unitaires inférieurs seront justifiés au cas par cas notamment dans le cadre d'étude ponctuelle.

<i>Indices d'intensité</i>	<i>Description</i>	<i>Potentiels de dommages</i>
Faible	Le volume unitaire pouvant se propager est inférieur à 0,25 m ³	Pas de dommage au gros œuvre, peu ou pas de dommages aux éléments de façade.
Modérée	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur ou égal à 0,25 m ³ mais inférieur à 1 m ³	Dommage au gros œuvre sans ruine. Intégrité structurelle sollicitée.
Elevée	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur ou égal à 1 m ³ mais inférieur à 10m ³	Dommage important au gros œuvre. Ruine probable. Intégrité structurelle remise en cause.
Très élevée	Le volume unitaire pouvant se propager dépasse 10 m ³	Destruction du gros œuvre. Ruine certaine. Perte de toute intégrité structurelle

Tableau 8 : Définition de l'indice d'intensité de l'aléa rocheux en fonction du volume avec correspondance des potentiels de dommage (MEZAP, 2014)

- On définit ensuite *la fréquence* avec laquelle ce ou ces volumes de roches se mettent en mouvement, à partir notamment des données historiques. Cette fréquence est assimilée au délai dans lequel la chute de bloc ou l'éboulement le plus probable, exprimé de façon qualitative, est susceptible de survenir sur la période de référence considérée (100 ans à venir). Ce paramètre qualifie un **indice d'activité** des zones de départ (ou autrement dit la probabilité de départ).

↳ Dans le cadre des cartographies de l'aléa rocheux à La Réunion, cette fréquence sera variable et établie en fonction notamment de l'historique connu à l'échelle du bassin de risque étudié. **D'une manière générale à La Réunion, cette probabilité de départ sera souvent considérée comme de niveau fort, voire moyen (1 bloc tous les ans à 10 ans) mais rarement de niveau faible** étant donnée la prédisposition des parois

rocheuses de La Réunion à générer des instabilités de ce type et la forte pluviométrie qui intervient dans les déclenchements. L'historique des instabilités en atteste.

Indice d'activité par zone d'homogène	Description
<i>Faible</i>	De l'ordre d'un bloc du scénario de référence tous les 100 ans
<i>Moyen</i>	De l'ordre d'un bloc du scénario de référence tous les 10 ans
<i>Fort</i>	De l'ordre d'un bloc du scénario de référence tous les ans

Tableau 9 : Définition de l'indice d'activité de l'aléa rocheux ou probabilité de départ (MEZAP, 2014)

- Le croisement de ces deux paramètres définit **l'aléa de rupture**. Cette notion est spatialisée en définissant les zones de départs potentiels, guidées essentiellement par la morphologie et en distinguant les compartiments rocheux potentiellement instables repérés sur site des zones de départ dites « diffuses » au sein desquelles chaque instabilité potentielle ne peut pas forcément être repérée individuellement.
- ↪ **Dans le cadre des cartographies de l'aléa rocheux à La Réunion, cette approche de définition de l'aléa de rupture sera principalement consacrée aux zones d'enjeux concentrés en pied de paroi nécessitant une étude spécifique d'évaluation de l'aléa rocheux à l'échelle d'un périmètre d'étude restreint où l'inventaire des menaces est plus aisé. A l'échelle communale, en dehors de ces zones exposées spécifiques, les parois seront considérées comme des zones de départ diffuses auxquelles seront attribuées les indices d'intensité et d'activité définis au préalable ;**
- ↪ La notion de zone de départ peut être définie par différents moyens (reconnaissance de terrain, photo interprétation et utilisation d'un MNT). A l'échelle communale, le recours au support MNT® de l'IGN© produit en 2011 et livré en 2012 (modèle numérique de terrain avec une résolution de 5 m, une précision planimétrique de 50 cm et altimétrique de 20 cm) permet de les identifier plus aisément. Les visites de terrain seront alors consacrées de manière privilégiée aux zones de « doutes » issues de l'analyse du MNT. Il est attesté que la potentielle présence de zone de départ est directement liée à la présence d'escarpements rocheux, donc à la pente du terrain naturel, et que au-delà de certaines valeurs de pente, le relief est favorable à la présence de telles zones (escarpements rocheux, ressauts, falaises...). L'IRSTEA en 2009⁷ a mis en évidence, sur la base de retour d'expériences d'évènements rocheux, une relation entre la présence de zone de départ et la valeur de pente du terrain naturel évaluée à partir de MNT. Cette relation décrit des valeurs limites de pente en fonction de la résolution du MNT au-delà desquelles on peut considérer des zones de départ de chutes de blocs (plus la maille du MNT est grande – MNT « lissé », plus la pente limite est faible) :

$$\alpha = 55^\circ * RES^{-0,075}$$

Avec RES = la résolution du MNT

(Par exemple si la, résolution est de 15x15 m alors RES = 15)

Illustration 23 : Valeur limite de pente issue d'un MNT identifiant la présence de zone de départ potentielle (Berger, 2009)

⁷ F. Berger (Irstea, 2009). Expertise trajectographique en 3 dimensions, de l'aléa chute de pierres et de blocs rocheux, pour l'aide à la réalisation de la révision du PPR de la commune de Veyrier-du-Lac

L'application avec le MNT de La Réunion (résolution de 5 m) donne une valeur d'angle (pente) de 48,7°. Cette valeur d'angle obtenue est ensuite validée sur le terrain afin de confirmer la densité et la pertinence de présence de « zones de départ potentiel » définies, voire pour identifier d'autres zones potentiellement génératrices de blocs dans des secteurs d'imprécision du MNT. Certains versants, comme les pitons, où les pentes maximales dans les flancs peuvent être moindres (de l'ordre de 40°) peuvent également traduire des affleurements rocheux ponctuels pouvant libérer des blocs. L'analyse historique et la vérification de terrain permettent de préciser les zones de départ à considérer.

b) Aléa de propagation – probabilité d'atteinte

- Une fois l'aléa de rupture défini (indice d'intensité et probabilité de départ au droit des différentes zones de départ du territoire étudié), le principe est d'étudier la propagation des éléments rocheux s'ébouyant du versant. Cette analyse est basée sur les retours d'expérience d'évènements passés à partir de la méthode dite des « cônes » (ou de la ligne d'énergie) dont la démarche est définie et encadrée dans le guide MEZAP (cf. Annexe 2 pour le rappel de la méthode des cônes et les principales valeurs d'angle de la ligne d'énergie pouvant être utilisées). Pour les zones d'enjeux concentrés en pied de paroi nécessitant une étude spécifique, l'analyse de l'aléa de propagation sera préférentiellement établie à partir de simulations trajectographiques plus ou moins complexes (2D et/ou 3D), validées ou « corrigées » par la connaissance du terrain. Le résultat permet de définir des **probabilités d'atteintes** de blocs en tous points de la zone étudiée.

↳ Dans le cadre des cartographies de l'aléa rocheux à La Réunion, la configuration des parois (souvent subverticales, avec une valeur de pente issue du MNT de plus de 50° à 60°) et des terrains exposés en pied souvent plats ou peu pentus influencent les conditions de propagation, avec un profil type D (selon MEZAP, cf. Annexe 2). La répartition des blocs en pied est souvent très resserrée avec des valeurs d'angles très fortes (**de l'ordre voire supérieures à 38 - 40° pour les probabilités d'atteinte de niveau fort**), ne justifiant pas systématiquement l'utilisation de plusieurs plages de valeurs comme suggéré dans MEZAP pour qualifier les différents niveaux de probabilité d'atteinte. **L'analyse des phénomènes historiques dans le bassin de risque étudié ou dans des contextes géomorphologiques similaires associée aux observations de terrain (position et taille des blocs éboulés présents dans les zones exposées notamment) est donc essentielle afin de définir la valeur d'angle à considérer pour la cartographie de l'aléa de propagation.**

↳ L'intégration des résultats d'études spécifiques d'évaluation de l'aléa rocheux, à partir notamment de simulations trajectographiques permet d'apporter de la précision dans les cartographies de l'aléa rocheux. Lorsque de telles études sont disponibles, elles sont intégrées sous réserve de leur pertinence. L'étude menée dans le cadre de la sécurisation de l'Illet Furcy à Saint-Louis (Géolithe, 2015-2016) ou encore celle pour le village de La Passerelle à Saint-Joseph (Sage, 2014-2015) ont notamment été valorisées dans les cartographies de l'aléa MVT des procédures PPR des communes respectives. Dans le cadre de la réalisation d'études spécifiques s'appuyant sur des simulations trajectographiques, les recommandations du guide MEZAP (cf. annexe 6 du guide) sont à suivre avec entre autre :

↳ L'utilisation d'un support topographique le plus précis possible et tout en étant adapté aux enjeux. Le recours à des moyens type Lidar est souvent à privilégier complété par des observations de terrain afin de cerner avec précisions les particularités topographiques pouvant modifier les conditions de propagation. En effet à La Réunion dans plusieurs situations il a été noté que la microtopographie jouait un rôle très important dans la propagation des blocs, notamment du fait de

la présence de vires rocheuses (coulées de lave plus massives générant des ressauts topographiques dans la paroi) ou de dykes (filons de roche magmatique très compact) qui peuvent générer des rebonds défavorables voir anarchiques et non mesurables sur une topographie de paroi lissée ;

- ↪ Le recours à un nombre de blocs au départ (« runs ») dans les simulations le plus important possible afin d'estimer les probabilités d'atteinte de l'ordre de 10^{-6} soit 1 000 000 de « tirs ». La qualification de la probabilité d'atteinte sera définie à partir de seuils, comme ceux suggérés dans le guide à paraître MEZAP (cf. Tableau 10) ou toutes autres valeurs justifiées selon les outils et méthodes utilisées voire les avancées scientifiques sur le sujet (cf. Annexe 3).

Niveau de probabilité d'atteinte d'un point	
Faible	$< 10^{-6}$ des blocs atteignent le point
Moyen	$10^{-6} \leq < 10^{-4}$ des blocs atteignent le point
Fort	$10^{-4} \leq < 10^{-2}$ des blocs atteignent le point
Très fort	$10^{-2} \leq$ des blocs atteignent le point

Tableau 10 : Qualification des niveaux de probabilité d'atteinte à partir des résultats de simulations trajectographiques (projet Interreg IIC – Falaises de 2001, repris dans MEZAP)

c) Probabilité d'occurrence

- La **probabilité d'occurrence** résulte du croisement de l'indice d'activité (point b) des zones de départ et des probabilités d'atteinte (point c) déterminés au préalable.

		Probabilité d'atteinte			
		Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Indice d'activité	faible	faible	moyenne	élevée	Très élevée
	moyen	moyenne	moyenne	élevée	Très élevée
	fort	moyenne	élevée	élevée	Très élevée

Tableau 11 : Définition de la probabilité d'occurrence de l'aléa rocheux de référence en un point (issue de MEZAP, 2014)

d) Aléa rocheux « résultant »

- L'**aléa rocheux « résultant »** correspond ensuite au croisement de la probabilité d'occurrence (point c) et de l'intensité du phénomène (point a) déterminés au préalable.

		Intensité			
		$V < 0,25 \text{ m}^3$	$0,25 \text{ m}^3 < V < 1 \text{ m}^3$	$1 \text{ m}^3 < V < 10 \text{ m}^3$	$V > 10 \text{ m}^3$
Probabilité d'occurrence	Faible	Faible (P1)	Moyen (P2)	Elevé (P3)	Elevé (P3)
	Moyenne	Faible (P1)	Moyen (P2)	Elevé (P3)	Elevé (P3)
	Elevée	Moyen (P2)	Elevé (P3)	Elevé (P3)	Très élevé (P4)
	Très élevée	Elevé (P3)	Elevé (P3)	Très élevé (P4)	Très élevé (P4)

Tableau 12 : Définition du niveau de l'aléa rocheux de référence (issue de MEZAP, 2014)

A La Réunion, l'analyse d'un échantillon de 57 évènements de type chute de blocs et éboulements recensés entre la fin des années 1990 et 2016, montre les principaux résultats suivants :

- des blocs éboulés atteignant les zones d'enjeux avec des volumes unitaires de l'ordre voire supérieurs au m³ pour la grande majorité des évènements (classement à partir de la répartition des classes de volume définies dans MEZAP : < 0,25 m³ ; 0,25 à 1 m³ ; 1 à 10 m³ ; > 10 m³)
- configuration du rempart ou de la paroi affectée par la chute de blocs ou l'éboulement très fréquemment redressée avec de fortes valeurs de pente (50 à 60° en moyenne) et des configurations peu propice à la propagation à l'aval ;
- des valeurs d'angle de la ligne d'énergie (angle avec l'horizontale entre la zone de départ et le bloc le plus éloigné) systématiquement supérieure à 40° quel que soit la configuration de la paroi et de la zone de propagation ainsi que la présence ou non de végétation.

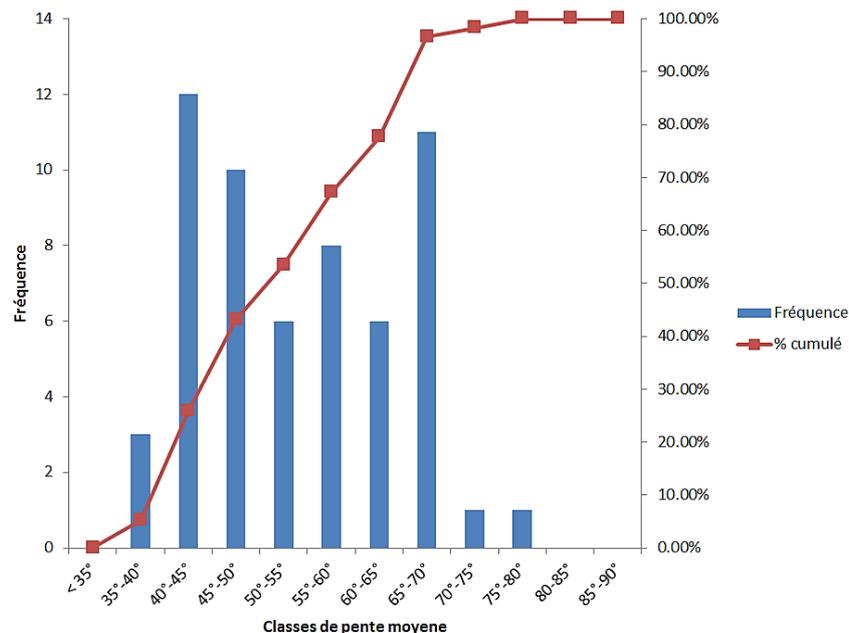
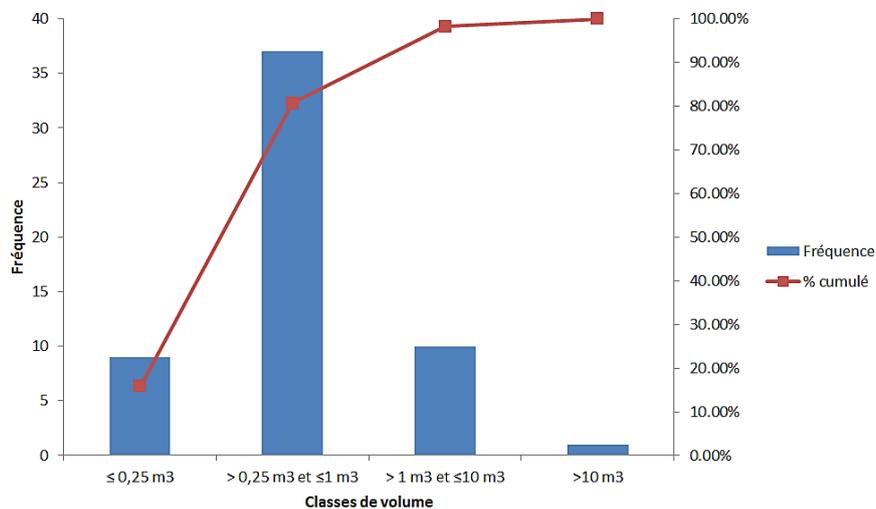


Illustration 24 : Répartition en fréquence d'évènement des tailles de blocs éboulés mobilisés et des valeurs d'angle de la ligne d'énergie observées sur des évènements recensés à La Réunion (57 cas)

A partir de ce retour d'expérience sur les principaux évènements historiques connus (sur globalement les 20 dernières années), dans le cadre des cartographies de l'aléa rocheux s'inscrivant dans les procédures PPR des communes de La Réunion, l'application de la méthodologie « MEZAP » s'effectue de la manière suivante :

- ↳ **méthode conditionnée par l'indice d'intensité**, considéré comme très fréquemment élevé (bloc de plus d'1 m³ susceptible d'atteindre les enjeux sur les 100 prochaines années pour la plupart des parois rocheuses considérées sauf quelques exceptions). **Ainsi, cela implique un aléa rocheux de niveau élevé (P3) en tout point d'atteinte en contrebas, dont l'évaluation de la superficie est définie en fonction de la configuration de la paroi, quel que soit l'indice d'activité de la paroi considérée, avec l'application d'une valeur d'angle de la ligne d'énergie :**
 - ↳ de l'ordre de **38 à 40°** pour les configurations de parois très redressées (pente moyenne de l'ordre de 50° voire plus sur toute la hauteur) avec terrain plat ou faiblement pentu en pied ;
 - ↳ de l'ordre de **32 à 33°** pour les configurations de versants plus propices aux propagations à l'aval des zones de départ (configurations types A à C où des terrains pentus sont présents sous la paroi dominante, cf. Annexe 2).

Afin de maintenir une gradation des aléas MVT dans ces configurations de terrains exposés à l'aléa rocheux, une bande forfaitaire d'**aléa moyen MVT (P2)** est définie à l'aval, de largeur variable définie à dire d'expert selon la configuration de la zone (minimum 10 à 20 m, largeur variable selon la configuration morphologique). Ce niveau d'aléa traduit l'incertitude dans les zones atteintes au-delà des zones d'aléa fort considérées, notamment pour d'éventuels projections / éclats aux trajectoires parfois importantes, voire au-delà de celles des blocs considérés.

Dans les configurations autres (blocs susceptibles de s'ébouler sur la période de référence de moins d'1 m³ ou configuration de la paroi plus propice à la propagation par exemple), la méthode MEZAP sera suivie et appliquée au cas d'espèce pour la cartographie de l'aléa « rocheux ».

Dans toutes les étapes de la méthodologie décrite précédemment, de la définition des zones de départ potentielles à la prise en compte des valeurs d'angles pour qualifier l'aléa de propagation, l'expertise de terrain est privilégiée afin de préciser et de justifier les paramètres considérés dans la cartographie de l'aléa rocheux. Les nombreuses situations où des obstacles naturels à la propagation sont présents en pied de versant (ravine, versant proche en rive opposée) seront notamment intégrées dans l'expertise pour la cartographie de l'aléa rocheux.

Afin d'illustrer l'application de cette évolution méthodologique à un secteur de La Réunion, le versant dominant la Petite Plaine à La Plaine des Grègues à Saint-Joseph est présenté sur l'illustration 26 avec la cartographie de l'aléa MVT actuelle (basée sur cette méthode) et celle de l'ancien PPR :

- Un niveau d'aléa très élevé MVT est considéré dans les versants redressés de plus de 50° (versant orienté Ouest de l'illustration 26) ;
- Une étude spécifique menée sur une parcelle en pied de versant montre la présence de nombreux blocs éboulés arrêtés en pied de versant dont certains de volume de l'ordre de 1 m³ ;
- Le profil A montre la configuration morphologique du versant et des terrains en pied avec une pente aval propice à la propagation. Cela permet de définir les zones d'atteinte

de fortes exposition (aléa élevé MVT) à partir de valeur d'angle de la ligne d'énergie retenue (32°) dont les limites sont précisées ponctuellement en fonction des observations de terrain ;

- Etant donnée l'incertitude sur l'arrêt progressif des blocs en pied de versant, une bande de 20 m en aléa moyen MVT au-delà de l'aléa élevé est conservée.

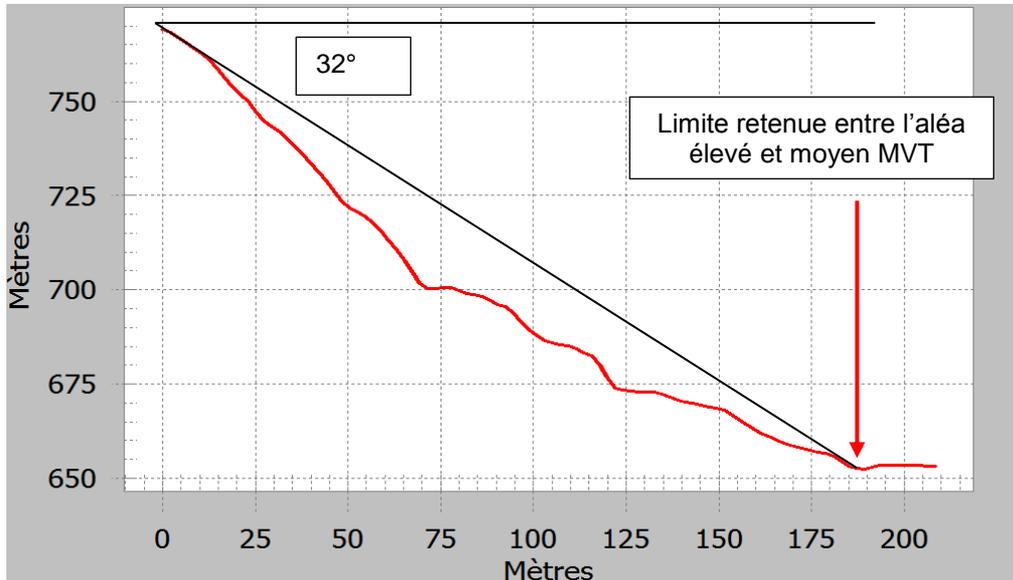


Illustration 25 : Profil topographique A de l'illustration suivante

L'évolution méthodologique pour ce secteur se traduit par une réduction de l'aléa élevé MVT au niveau du versant propice aux chutes de blocs (réduction en pied de versant étant donné les probabilités d'atteinte) et réduction à l'aval de la largeur de l'aléa moyen MVT (réduction de l'incertitude sur l'arrêt progressif des blocs au-delà de la limite de l'aléa élevé MVT).

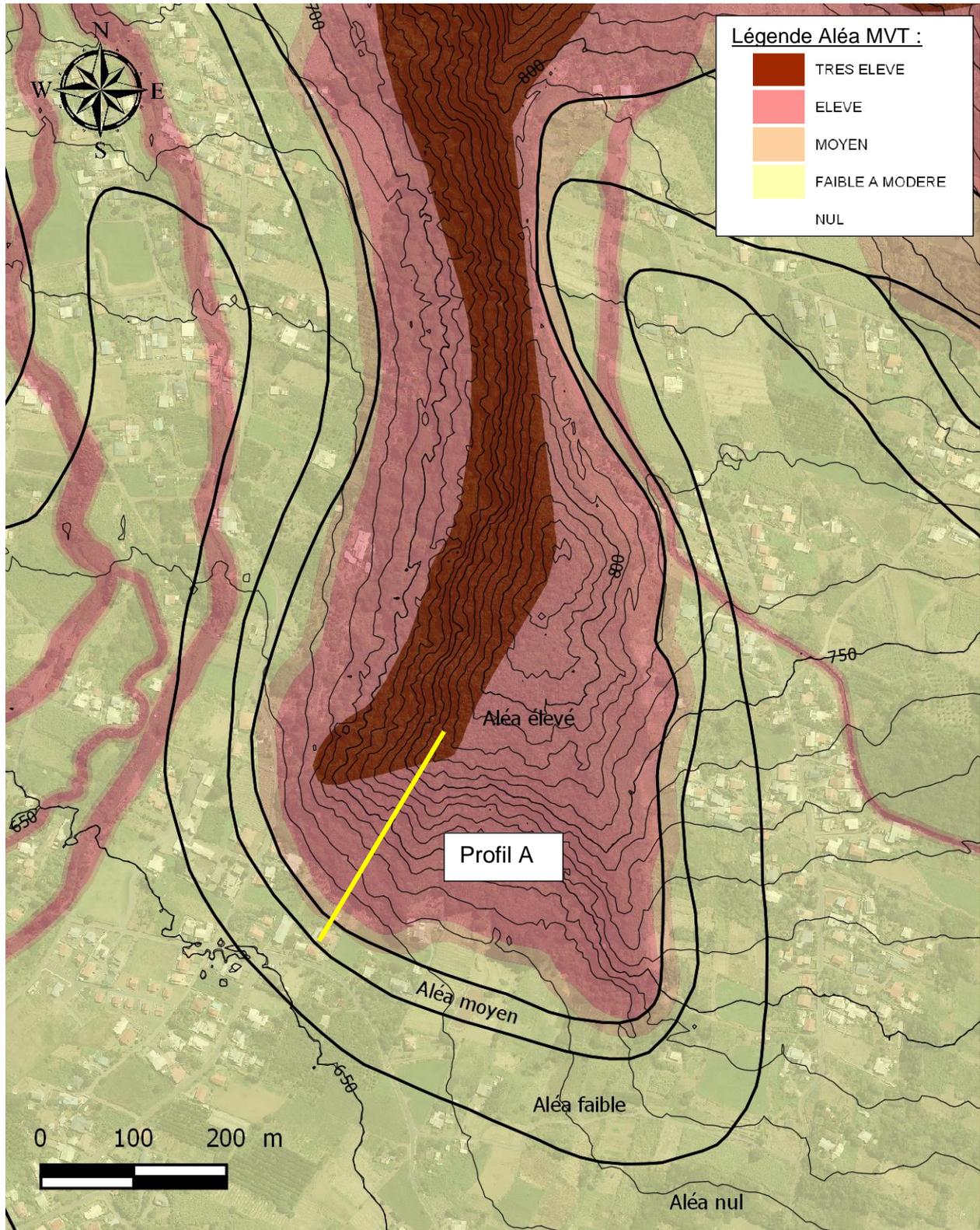


Illustration 26 : Illustration de la méthodologie de cartographie des aléas MVT pour les phénomènes de chutes de blocs – versant dominant le secteur de Petite Plaine à la Plaine des Grèques – Saint-Joseph (fond orthophoto de l'IGN©, isolignes 10 m issues du MNT de l'IGN©)(en trait noir les contours de l'ancienne cartographie des aléas MVT avec les niveaux d'aléa retenus (PPR approuvé en 2005))

Cas particuliers des remobilisations de blocs sur pentes

La méthodologie détaillée décrite précédemment s'applique également pour ces cas particuliers de blocs individualisés présents à la surface de terrains en pente, pouvant être remobilisés sur la période de référence considérée dans les PPR (100 ans à venir).

Les remobilisations de blocs sur pentes sont conditionnées par plusieurs facteurs :

- ↪ la géologie avec la présence de blocs rocheux individualisés dans le versant ;
- ↪ les pentes sur lesquelles les blocs sont posés. Les valeurs « d'angle d'ombrage » (« shadow angle » = intersection entre le pied de falaise (= zone du premier impact) et la pente à l'aval) considérée dans la bibliographie pour évaluer les probabilités de propagation de chute de blocs de falaise dominante peuvent être considérées dans ce cas de figure. Ces valeurs seront majorantes comparativement aux remobilisations de blocs sur pentes du fait de l'absence de chute initiale depuis la falaise dominante et où le bloc remobilisé présente une vitesse au départ relativement faible. Selon les auteurs (cf. MEZAP, annexe 2), **les valeurs d'angles d'ombrage varient entre 22° et 28°, soit approximativement une moyenne de 25°**. Ces valeurs d'angle d'ombrage traduisent la limite au-dessous desquelles les atteintes sont non susceptibles de se produire. Par extrapolation, on peut assimiler cette valeur d'angle d'ombrage (25°) à la valeur de pente au-dessous de laquelle les remobilisations de blocs sont peu probables. La présence d'obstacles, d'une rugosité particulière à la surface des terrains peuvent également influencer cette valeur de pente (en plus ou en moins selon l'analyse du secteur étudié). La présence d'une végétation pérenne et dense de type forêt limitera le risque de remobilisation (présence de nombreux obstacles) et a pour conséquence d'augmenter la valeur de pente à considérer. Une valeur de pente supérieure à 25° (et jusqu'à 48,7°, valeur de pente qui, d'après le MNT de La Réunion (résolution de 5m) caractérise les zones de départ de chutes de blocs) est ainsi considérée comme généralement propice à la remobilisation d'un bloc rocheux présent en surface. **La valeur à considérer au-delà de laquelle les remobilisations de blocs sont jugées possibles sera donc variable (entre 22 et 28°) selon les observations de terrains et l'historique connu ;**
- ↪ la présence de terrains sensibles à l'érosion à la base des blocs ;
- ↪ les facteurs non permanents comme l'activité humaine (terrassment mal maîtrisé dans un versant = facteur aggravant) ou la végétation qui peut limiter les départs spontanés et la propagation dans certaines configurations (jouant souvent le rôle d'obstacles = facteur favorable).

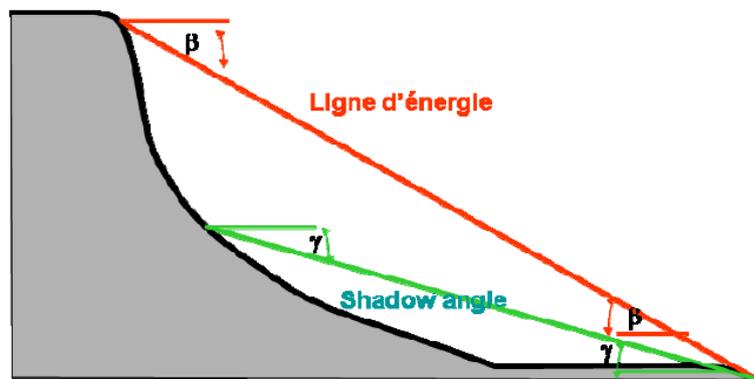


Illustration 27 : Principe de la ligne d'énergie et du « shadow angle » (ou angle d'ombrage) (MEZAP, 2014)

L'application de la méthodologie est ainsi la suivante :

Les observations de terrains permettent de confirmer la présence de blocs rocheux dans le versant étudié et de définir l'indice d'intensité en fonction du volume le plus représentatif des blocs mobilisables dans les pentes du secteur étudié. Ce volume ne sera pas systématiquement le bloc le plus volumineux observé, mais plutôt le bloc le plus volumineux et représentatif de la zone où la remobilisation est jugée possible.

L'indice d'activité est défini en fonction de l'historique connu mais aussi des observations de terrain. La prédisposition du secteur étudié à générer ce type d'instabilité sur la période de référence permettra de définir ce paramètre important de la *probabilité d'occurrence* du phénomène (présence de forêt, d'obstacles naturels type andains, sensibilité à l'érosion, occupation des sols et activité humaine à proximité).

Faible	Présence de forêt pérenne ou d'obstacles naturels dans la pente Faible sensibilité à l'érosion des terrains du versant (terrains indurés, rocheux) Pas d'historique connu / 1 évènement tous les 100 ans / peu de blocs dans le versant et les zones exposées
Moyen	Incertitude sur la présence d'obstacles pérennes (forêt, andains) Sensibilité moyenne à l'érosion des terrains du versant (terrains meubles végétalisés) Historique connu / 1 évènement tous les 10 ans / plusieurs blocs dans le versant et les zones exposées
Fort	Pas d'obstacles dans les pentes Forte sensibilité à l'érosion des terrains du versant (« griffes d'érosion » visibles, terrains meubles en surfaces, non végétalisé) historique connu et fréquent ou 1 évènement tous les 1 ans ou nombreux blocs dans le versant et les zones exposées

Tableau 13 : Définition de l'indice d'activité de l'aléa rocheux (remobilisation de blocs dans les pentes) – critères non cumulatifs

La **probabilité d'occurrence** de l'aléa est ensuite définie par croisement de l'indice d'activité et de la probabilité d'atteinte. La définition de **la probabilité d'atteinte** (ou l'aléa de propagation) s'établit ensuite comme pour l'aléa chute de blocs, avec des valeurs d'angle de la ligne d'énergie considérées à partir des zones de blocs mobilisables sur les pentes. Cela implique de fortes pentes sous les zones potentielles de remobilisation pour permettre une propagation. En cas de remobilisation de blocs dans les pentes, les trajectoires seront principalement « roulantes » à la surface des terrains mais pourront générer des rebonds voire des chutes en cas d'abrupts à l'aval. La probabilité d'atteinte sera définie à partir des valeurs seuils de l'angle de la ligne d'énergie définie dans MEZAP adaptées au contexte réunionnais (cf. chapitre précédents sur les conditions de propagation et l'influence de la morphologie des versants) ou à partir de simulations trajectographiques (cf. Tableau 10). Les valeurs préconisées sont les suivantes :

Valeur seuil de l'angle de la ligne d'énergie (β en degrés°)	Niveau de probabilité d'atteinte d'un point par un bloc remobilisé
$\beta < 32^\circ$ + Pente des terrains $>$ à 20°	faible
$32^\circ < \beta < 35^\circ$	moyen
$\beta > 35^\circ$	fort

Tableau 14 : Définition de la probabilité d'atteinte l'aléa rocheux (remobilisation de blocs dans les pentes)

En dessous de ces valeurs d'angle de la ligne d'énergie (32 à 33°), la propagation est considérée comme limitée à l'emprise des zones de remobilisation (ou de départ, soit aux terrains de pente supérieure à 25° en moyenne) et des terrains directement exposés à l'aval mais moins pentus favorisant l'arrêt progressif des blocs. La valeur de pente des terrains à l'aval passant sous les 20° voire 25° sur une distance significative (au moins 10 à 20 m) traduit généralement cette distance progressive d'arrêt des blocs.

		Probabilité d'atteinte, en cas de remobilisation		
		Faible : $\beta < 32^\circ$ + Pente des terrains $> \text{à } 20^\circ$	Moyenne $32^\circ < \beta < 35^\circ$	Forte $\beta > 35^\circ$
Indice d'activité	faible	faible	moyenne	élevée
	moyen	moyenne	moyenne	élevée
	fort	moyenne	élevée	élevée

Tableau 15 : Définition de la probabilité d'occurrence de l'aléa rocheux de référence en un point (remobilisation de blocs dans les pentes) avec β la valeur de l'angle de la ligne d'énergie

Suivant la même méthodologie que pour l'aléa chute de blocs, le niveau de **l'aléa résultant** est ensuite conditionné par la taille des blocs remobilisables (indice d'intensité) modulée par la superficie du versant concerné afin de tenir compte, dans la notion d'intensité, de l'ampleur de la parade qu'il serait nécessaire de mettre en œuvre pour se prémunir de l'aléa (Guide PPR national, 1999).

A titre d'exemple, un versant de quelques centaines voire milliers de m², avec 30 à 35° de pente moyenne où les propagations seront limitées à l'emprise des zones remobilisables ne sera pas systématiquement cartographié en aléa élevé MVT si les blocs présents en surface sont de l'ordre du m³ dans la mesure où des parades réalisables à l'échelle du versant (à l'échelle de la collectivité) sont possibles. Ainsi, un niveau d'aléa moyen MVT est fréquemment considéré dans les cartographies de l'aléa MVT pour les problématiques de remobilisation de blocs.

		Intensité		
		Volume $< 0,25 \text{ m}^3$	Volume $< 1 \text{ m}^3$	Volume $> 1 \text{ m}^3$
Probabilité d'occurrence	Faible	Faible (P1)	Moyen (P2)	Moyen (P2) si des travaux sont réalisables à l'échelle de la collectivité
				Elevé (P3) sinon
	Moyenne	Faible (P1)	Moyen (P2)	Moyen (P2) si des travaux sont réalisables à l'échelle de la collectivité
				Elevé (P3) sinon
	Elevée	Moyen (P2)	Moyen (P2) si des travaux sont réalisables à l'échelle de la collectivité	Elevé (P3)
			Elevé sinon	

Tableau 16 : Définition du niveau de l'aléa rocheux (remobilisation de blocs dans les pentes)

Afin d'illustrer l'application de la méthode à un secteur de La Réunion, le versant dominant le Tour des Roches, sous le quartier de Macabit à Bellemène Saint-Paul est présenté sur l'illustration 30, avec :

- une faible sensibilité à l'érosion mais présence de nombreux blocs dans le versant = indice d'activité moyen ;
- une pente moyenne de l'ordre de 30° oscillant entre 25 et 35° = probabilité d'atteinte faible à moyenne ;
 - ↳ soit une probabilité d'occurrence moyenne ;
- étant donnée la présence de blocs dans les pentes de plus d'1 m³ = intensité forte mais travaux réalisables à l'échelle du versant (ou de la collectivité) : terrassement des blocs les plus instables associé à une protection passive type merlon par exemple :
 - ↳ le niveau d'aléa moyen MVT est retenu.
- Arrêt progressif des blocs sur les terrains moins pentus à l'aval (sous 20 à 25°) permettant de définir la limite entre l'aléa faible et moyen MVT.

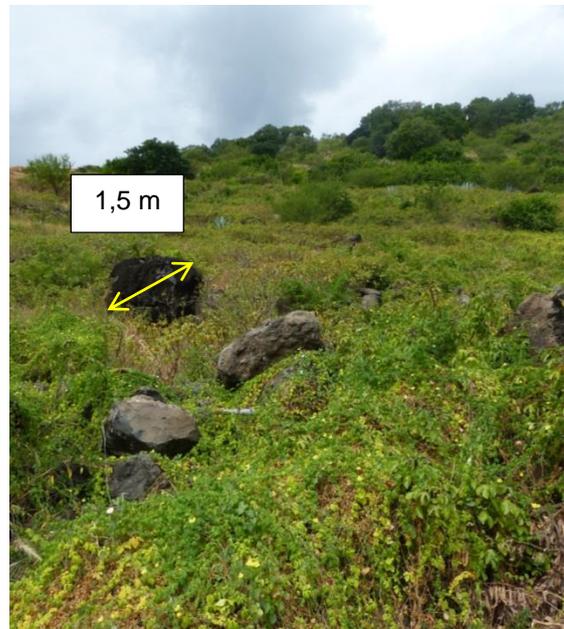
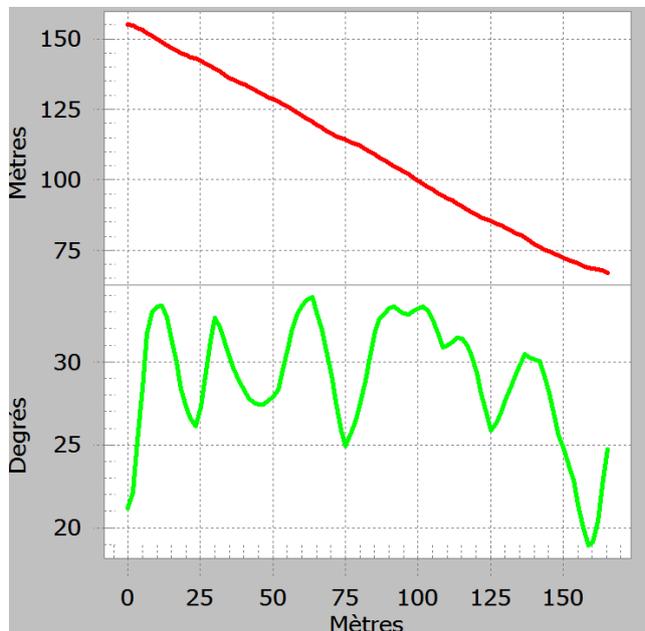


Illustration 28 : Profil topographique B de l'illustration suivante = zone d'aléa moyen MVT

Illustration 29 : Taille des blocs observés dans les pentes

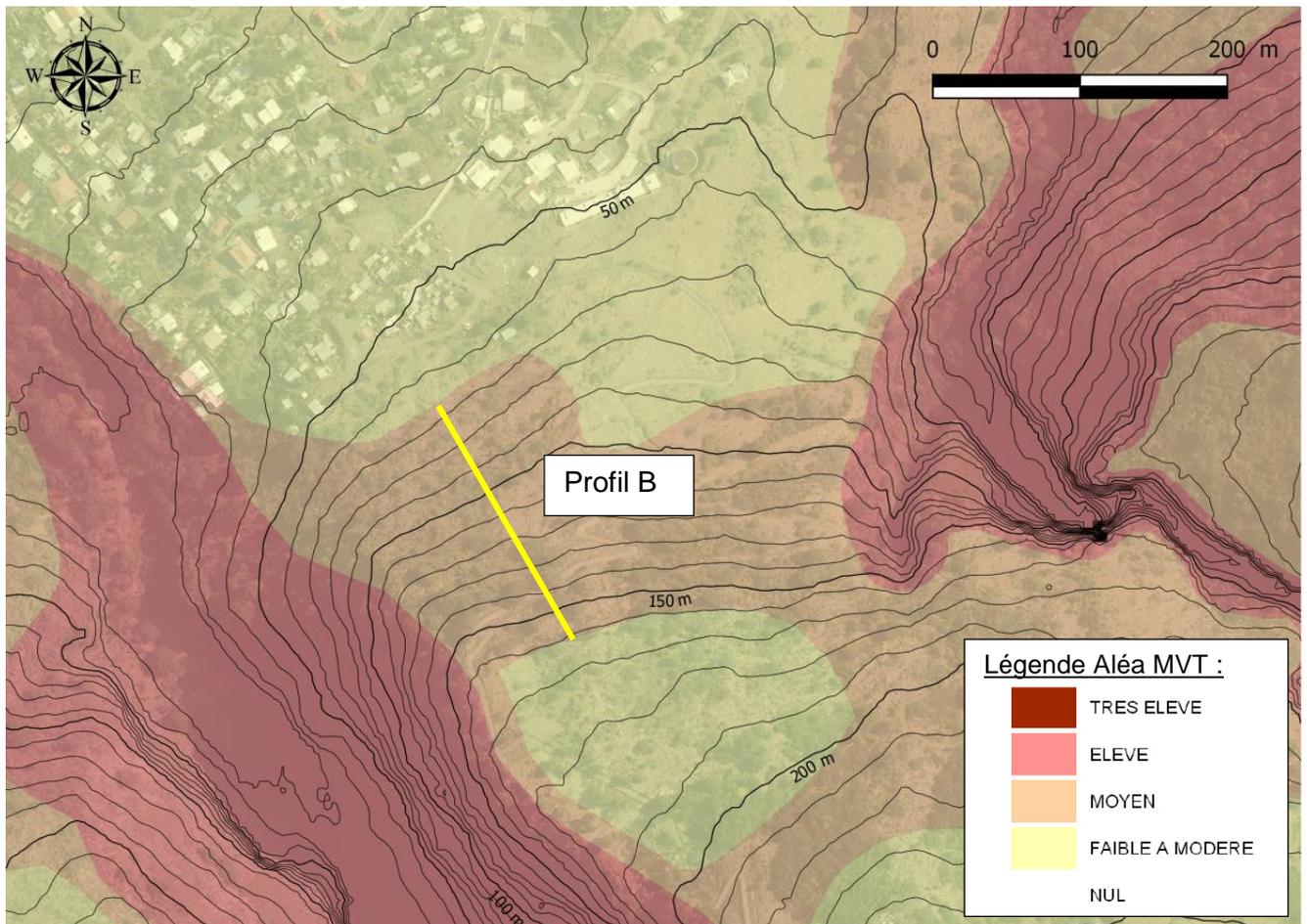


Illustration 30 : Illustration de la méthodologie de cartographie des aléas MVT pour les phénomènes de chutes de blocs de type remobilisation de blocs dans les pentes – Macabit - Bellemène - Saint-Paul (fond orthophoto de l'IGN©, isolignes 10 m issues du MNT de l'IGN©)

5. Caractérisation de l'aléa MVT : glissement de terrain

5.1. DESCRIPTION DU PHENOMENE

Les glissements de terrain sont des déplacements en masse affectant des formations géologiques meubles, sur une surface de rupture et au cours desquels les produits déplacés gardent leur cohérence. La surface de rupture peut être plane (sur une discontinuité lithologique – on parle de glissement-plan) ou courbe (glissement rotationnel); les lois mécaniques de la rupture des matériaux font que cette surface a une forme plus ou moins sphérique en général. Sa profondeur peut varier de l'ordre du mètre (voire moins – glissements superficiels) à quelques dizaines de mètres (voire sensiblement plus pour des phénomènes exceptionnels).

Ce sont généralement des phénomènes lents, mais (en particulier sur une surface plane liée à une discontinuité) ils peuvent s'accélérer (ou se déclencher) brutalement. Ils peuvent aussi évoluer en avalanche de débris ou en coulée de boue, si le matériau contient assez d'eau. La cinématique peut ainsi être très variable, les phénomènes les plus rapides étant généralement les plus destructeurs.

La forme sphérique de la zone de départ donne une morphologie en loupe d'arrachement qui s'observe facilement (tout du moins tant que la végétation n'a pas repris une densité trop importante) dans le paysage. En revanche, la zone renflée en pied de glissement, correspondant à la nouvelle position des matériaux, s'observe moins facilement, entre autre à cause de la facilité avec laquelle les glissements évoluent en coulée de boue ou en avalanche de débris. Le déplacement rotationnel des terrains sur la surface sphérique de glissement provoque une rotation du bloc déplacé.

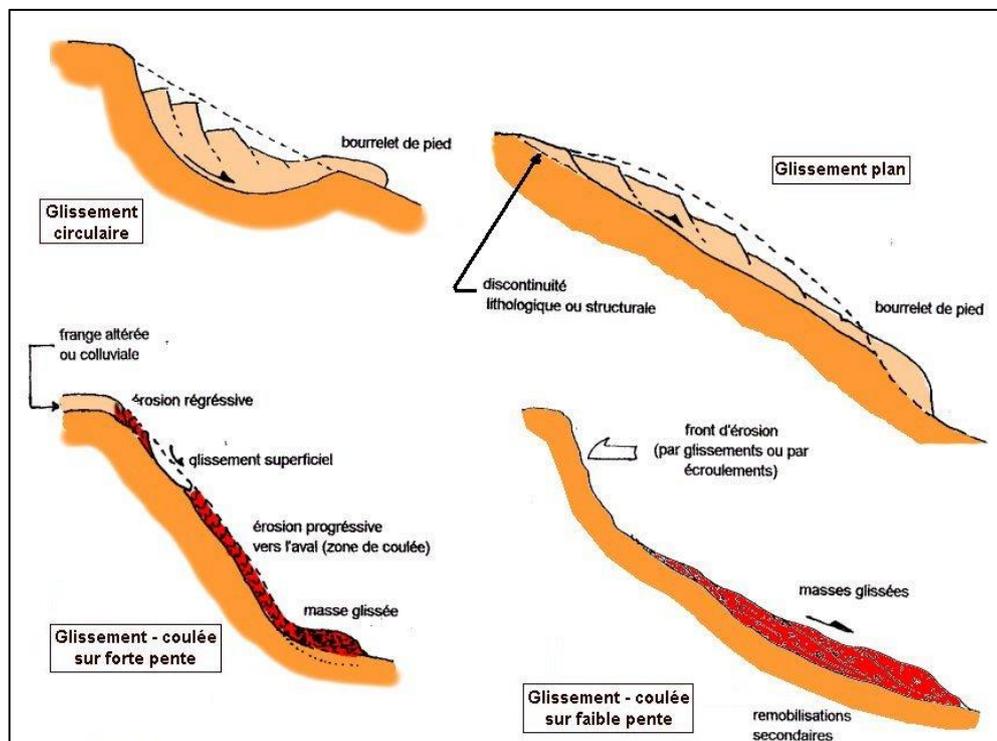


Illustration 31 : Représentations schématiques des principaux types de glissement (source : ©BRGM, <http://www.georisques.gouv.fr/>)

Très souvent, des glissements de terrain sur des fortes pentes ne sont reconnus que lorsque la rupture brutale sur la surface de glissement a provoqué leur évolution en coulée de boue ou en éboulement important. Tant que ces glissements restent lents, ils présentent un risque faible pour les structures (bâtiments et routes). En revanche, la rupture brutale sur les surfaces de glissement peut causer l'éboulement de morceaux de terrains d'un volume important.

Les principaux paramètres intervenant dans le mécanisme de glissement sont :

- **l'eau**, qui représente dans la grande majorité des phénomènes de glissement un élément moteur prépondérant. Les phénomènes d'infiltration (anthropiques ou non), les circulations d'eau en surface (par un phénomène d'entraînement des particules) ou souterraines (développement de surpressions préjudiciables) associées à un épisode pluvieux peuvent notamment contribuer aux instabilités ;
- **la géologie** : l'état d'altération d'un matériau, et par corrélation ses caractéristiques mécaniques, sa perméabilité, conditionnent la pente limite d'équilibre d'un terrain et de fait la probabilité d'occurrence de désordres ;
- **la morphologie** : l'importance de la pente va notamment conditionner la possibilité que puissent survenir, de façon préférentielle, des phénomènes lents (*fluage*, phénomènes superficiels pouvant intéresser des terrains peu pentus) ou au contraire rapides ;
- **la nature et l'importance du couvert végétal**, jouant un rôle dans la stabilité, le déclenchement et la propagation des phénomènes de glissement ; ce rôle pouvant être bénéfique (renforcement de la cohésion des sols par le système racinaire) ou au contraire néfaste (effet de levier par les ligneux sous l'effet du vent pouvant déstabiliser les terrains et favoriser les infiltrations d'eau).

Dans la cartographie de l'aléa glissement de terrain dans les PPR des communes de La Réunion, sont associés également les phénomènes de **coulées de boue** qui correspondent à des mouvements rapides d'une masse de matériaux remaniés, à forte teneur en eau et de consistance plus ou moins visqueuse. Elles sont la conséquence et la prolongation de certains glissements, dans des conditions de large remaniement et de forte saturation en eau, sur des terrains aux pentes généralement relativement fortes. Ces phénomènes, aussi connus sous le nom de **glissements – coulées**, peuvent se propager sur plusieurs dizaines de mètres, voire sensiblement plus en fonction du contexte topographique. L'épaisseur des terrains affectés par ces glissements-coulées peut atteindre la dizaine de mètres, avec pour la plupart des événements de ce type une épaisseur mobilisée de l'ordre de quelques mètres (0,5 à 3 m). Les coulées de boue peuvent atteindre des vitesses de l'ordre de 80 à 90 km/h dans les configurations les plus propices.

L'aléa coulée de boue est cependant peu fréquent sur le territoire de La Réunion (5% des événements enregistrés dans la base BdMVT, cf. Illustration 5).

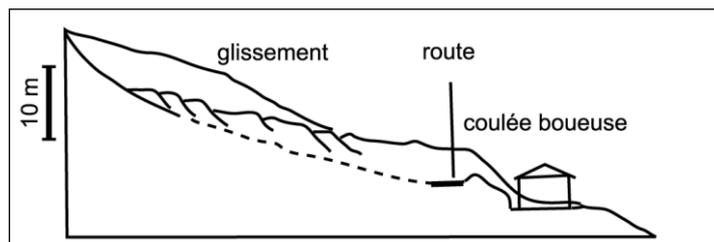


Illustration 32 : Représentation schématique du glissement-coulée (exemple de Montauban, 1993)



Illustration 33 : Glissement de terrain observé sur la RD3 en 2009 à Saint-Joseph



Illustration 34 : Glissement de terrain suite au cyclone Bépisa (2014) à Grand Ilet (Salazie)

5.2. METHODOLOGIE DE CARTOGRAPHIE DE L'ALEA GLISSEMENT

La Réunion est connue pour les glissements actifs de grande ampleur (Grand Ilet, Mare à Poule d'Eau, Ilet à Vidot ou encore Mare à Goyaves dans le cirque de Salazie), parmi les plus importants de France en termes de masses déplacées et de vitesses d'avancement observées.

En dehors de ces phénomènes de grande ampleur, des glissements sur planèzes, superficiels peuvent également se déclencher, généralement après de fortes pluies. Ces glissements, surviennent dans des contextes de formations en place meubles, remaniés où des niveaux argilisés sont rencontrés et souvent après la réalisation de travaux mal maîtrisés (déblaiement dans les pentes sans soutènement, défrichage de grande surface).

Le contexte lithologique des planèzes limite toutefois ce risque étant donné la faible couverture de matériaux meubles généralement observée à la surface des terrains à La Réunion. Les secteurs présentant des formations en place les plus altérées (présence d'altérites, notamment dans les zones où affleurent les océanites et formations différenciées du massif du Piton des Neiges) sont plus exposés au déclenchement de ce type de phénomène.

Ce risque n'est toutefois pas exclu et la présence de formations basaltiques altérées sur de fortes épaisseurs (altérites évoluées notamment) ou de formations meubles (colluvions, alluvions, brèches peu consolidées, voire remblais) à la surface de terrains peut favoriser l'occurrence de glissements de terrain dans un contexte climatique pouvant générer de très fortes pluies qui favoriseront leur déclenchement.

La méthodologie de cartographie de l'aléa MVT relatif aux phénomènes de glissement de terrain – coulées de boue est basée sur une approche à dire d'expert intégrant sur la période de référence considérée (100 ans à venir) :

- La définition de la **probabilité d'occurrence** par le biais de l'identification des facteurs de prédisposition et les potentiels facteurs aggravants (analyse des phénomènes historiques, observations de terrains) ;
- L'évaluation de l'**intensité** du phénomène redouté (analyse de la configuration morphologique, évaluation du niveau de parades pour s'en prémunir).

5.2.1. Consignes nationales

Les récentes réflexions menées dans le cadre de la révision des guides PPR en montagne (Points clés retenus par la DGPR suite aux travaux du comité technique relatif à la détermination des aléas à la place de la modélisation - cotech n°1 notamment) montrent que pour les glissements de terrain et les coulées de boue, il est nécessaire de qualifier l'aléa à partir du croisement des notions de probabilité et d'intensité à l'aide d'une grille de définition de l'aléa principalement qualitative.

Glissements de terrain

L'intégration de résultats de modélisation (approche quantitative) est possible et conseillée lorsque ces derniers sont disponibles.

La notion de probabilité d'occurrence est basée sur l'analyse des paramètres morphologiques (indices de mouvements), des pentes (classes de pentes à définir) et des conditions hydrologiques et hydrogéologiques. L'historique connu est également intégré.

Probabilité d'occurrence	Description
Forte	Glissement actif avec traces de mouvements récents ou Glissement ancien connu ou Glissement potentiel (sans indice), situation hydrologique équivalente à celle d'un glissement actif avec une pente supérieure à la pente limite déterminée par l'expert
	Glissement potentiel (sans indice), situation équivalente à celle d'un glissement actif avec une pente supérieure à la pente limite déterminée par l'expert, absence du facteur hydrologie ou Glissement potentiel (sans indice), situation équivalente à celle d'un glissement actif avec une pente inférieure à la pente limite déterminée par l'expert, facteur hydrologie reconnu
	Pente inférieure à la pente limite déterminée par l'expert

Tableau 17 : Définition de la probabilité d'occurrence d'un glissement de terrain (cotech 1)

La notion d'intensité est basée principalement sur la notion du potentiel de dommages sur des enjeux bâtis (existants ou non), ou sur la notion d'échelle de parade pour s'en prémunir.

Intensité	Description
Très élevée	Glissement n'intéressant pas que les formations superficielles et intéressant une aire géographique importante (~ km ² – échelle d'un versant) – Volume mobilisé très important (de l'ordre de la dizaine de millions de m ³)
Élevée	Glissement n'intéressant pas que les formations superficielles et intéressant une aire géographique comprise entre 1000 m ² et 10000 m ² – Volume mobilisé important (de l'ordre de la dizaine de milliers à la centaine de milliers de m ³) ou Glissement dans les formations superficielles intéressant une aire géographique importante (~ km ² – échelle d'un versant) – Volume mobilisé important (de l'ordre du million de m ³)
	Glissement n'intéressant pas que les formations superficielles et intéressant une aire géographique comprise entre 100 m ² et 1 000 m ² – Volume mobilisé relativement important (de l'ordre du millier à la dizaine de milliers de m ³) ou Glissement dans les formations superficielles intéressant une aire géographique comprise entre 1000 m ² et 10000 m ² – Volume mobilisé relativement important (de l'ordre de la dizaine de milliers de m ³)
Faible	Glissement dans les formations superficielles intéressant une aire géographique comprise entre 100 m ² et 1000 m ² – Volume mobilisé réduit (de l'ordre du millier de m ³)

Tableau 18 : Définition de l'intensité d'un glissement de terrain (cotech 1)

Intensité \ Probabilité d'occurrence	Intensité			
	Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
Faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort
Moyenne	Moyen	Fort	Fort	Très fort
Forte	Moyen	Fort	Très fort	Très fort

Tableau 19 : Grille de qualification de l'aléa glissement de terrain (cotech 1)

Les propositions de critères restent toutefois adaptables à chaque secteur étudié et pas systématiquement quantifiées. Le potentiel de dommages au bâti (intensité) est défini à partir du volume mobilisable lors d'un glissement avec une distinction selon l'épaisseur et la surface mobilisées.

Coulées de boue

La probabilité d'occurrence est basée sur l'analyse des paramètres morphologiques (indices de mouvements et pente) et des paramètres hydrologique/hydrogéologique (présence ou non).

Pour ce type de phénomène, seules des intensités élevée et très élevées sont envisageables en raison des connaissances limitées sur ce type de phénomène (définition de l'intensité en fonction de la surface mobilisable).

A titre de comparaison, en Suisse⁸, l'approche de détermination de l'intensité des coulées de boue intègre l'épaisseur potentielle des matériaux mobilisables et la notion d'épandage de la coulée (hauteur du dépôt pouvant fragiliser, engendrer des dommages sur le bâti). Ces deux paramètres traduisent d'une part l'ampleur du phénomène prévisible et la notion de dommage potentiel, comme préconisé en France.

Probabilité d'occurrence	Description
Forte	Zone de coulée ancienne connue ou Zone de coulée potentielle avec des caractéristiques de pente et d'hydrologie identiques à une zone de coulée ancienne connue
Moyenne	Zone de coulée potentielle avec des caractéristiques hydrologiques identiques à une zone de coulée ancienne connue, pente inférieure à celle de la coulée ancienne connue
Faible	Zone de coulée potentielle avec des caractéristiques de pente favorables à l'apparition du phénomène, absence du facteur hydrologie

Tableau 20 : Définition de la probabilité d'occurrence d'une coulée de boue (cotech 1)

Intensité	Description
Très élevée	Coulée intéressant une aire géographique importante (~ km ² – échelle d'un versant) – Volume mobilisé très important (de l'ordre du million de m ³)
Élevée	Coulée intéressant une aire géographique réduite (~ 1 000 m ²) – Volume mobilisé important (de l'ordre du millier de m ³)

Tableau 21 : Définition de l'intensité d'une coulée de boue (cotech 1)

Probabilité d'occurrence \ Intensité	Intensité	
	Élevée	Très élevée
Faible	Fort	Très fort
Moyenne	Fort	Très fort
Forte	Très fort	Très fort

Tableau 22 : Grille de qualification de l'aléa coulée de boue (cotech 1)

⁸ OFEV (2016). Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain. Aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue.

5.2.2. Elaboration d'une grille complémentaire d'aide à la cartographie

Sur la base des consignes nationales en matière de qualification de l'aléa MVT (pour les glissements de terrain), afin de préciser et de limiter la part de subjectivité de l'approche « à dire d'experts » mise en œuvre dans les PPR « multi-aléas » de La Réunion, une grille d'aide à la cartographie de l'aléa MVT pour les phénomènes de glissements de terrain et de coulée de boue est proposée, intégrant des critères (qualitatif voire quantitatif) pour chacun des facteurs suivants.

- **facteurs de prédisposition, inhérents au milieu :**
 - formations géologiques : classification selon leur nature, caractéristiques mécaniques, état d'altération, fracturation, épaisseur des faciès ;
 - morphologie : définition de classe de pentes et de configurations particulières (présence de talus anthropique par exemple).
- **facteurs non permanents (généralement aggravants) :**
 - indices de glissement de terrain (récents, anciens)
 - altitude : différence de pluviométrie ;
 - venue d'eau : résurgence, écoulement ou ruissellement concentré ;
 - végétation : présence ou non, culture en terrasse, etc. ;
 - activité humaine : ouvrages de protection, rejet d'eau concentré, non contrôlé présence de surcharge non soutenue, etc.

La prise en compte d'évènements historiques sur le secteur étudié est également intégrée dans la qualification de l'aléa MVT.

Formations géologiques

Les formations géologiques rencontrées sur le territoire réunionnais ont été regroupées en 4 classes en fonction de leur aspect (lithologie) et de leurs caractéristiques géotechniques vis-à-vis notamment de la sensibilité au développement de glissement de terrain (matériaux remaniés, meubles, indurés et rocheux). Les formations rocheuses constituent la 4^{ème} classe de matériaux mais n'est pas concernée par les phénomènes type glissement de terrain et coulée de boue. La distinction proposée est indicative afin de qualifier et distinguer clairement 4 grandes classes de matériaux. Cette distinction est basée sur la connaissance des formations géologiques de La Réunion du BRGM (à partir notamment des formations géologiques présentées sur la carte géologique au 1/100 000 de La Réunion (BRGM, 2006). En fonction des caractéristiques géotechniques des affleurements et des formations étudiées au droit des zones étudiées, certaines formations géologiques pourront être considérées dans l'une ou l'autre des classes. C'est notamment le cas des formations de démantèlement de type brèches, dont les caractéristiques mécaniques sont parfois très hétérogènes d'un affleurement à l'autre au sein d'une même zone d'étude.

Les observations de terrains et l'analyse des caractéristiques des formations en place (sur la base de relevés de terrain, de données de sondages quand ils sont disponibles et/ou à partir d'essais de caractérisation) sont essentielles pour justifier le type de classe considéré.

	Aspects	Types
Classe 1	Matériaux remaniés meuble	Colluvions meubles, alluvions lâches, remblais, sables dunaires basaltiques, sables et galets de plage, etc.
Classe 2	Matériaux remaniés à dominante rocheuse	Dépôts de glissement en masse, de coulées de débris, éboulis, brèches sensibles à l'érosion, altérites type III, tufs en épandage meubles et altérés, cendres argilisées
Classe 3	Matériaux raides / indurés	Brèches indurées, altérites type II, tufs altérés et indurés
Classe 4	Matériaux rocheux	Séries de basaltes, tufs soudés (type Maïdo), Ignimbrites, trachytes, syénites, gabbro, altérites type I

Tableau 23 : Proposition de classification des principales formations géologiques de La Réunion selon leur aspect

- **Apport des données de géophysique du projet REUN_EM**

Les résultats du projet REUN_EM⁹ (données électromagnétiques héliportées renseignant sur la résistivité électrique des formations en place sur les 300 premiers mètres de profondeur environ) permettent de préciser le contexte géologique des secteurs d'études. Pour cela, une interprétation des données d'électromagnétisme issues du projet REUN_EM (voire de toute campagne d'électromagnétisme terrestre), couplée aux données géologiques existantes (données géologiques de forage à proximité des sites, issues de la banque de données du sous-sol (BSS), complétées par les informations des cartes géologiques de La Réunion au 1/50 000^{ème} (Billard, 1974) et au 1/100 000^{ème} (BRGM, Université de la Réunion, 2006), peut être menée afin de définir des gammes de valeurs de résistivité sur les terrains à faible profondeur. Cette analyse permet le cas échéant d'établir une corrélation entre les gammes de résistivité et les différentes lithologies en présence au droit des secteurs étudiés que ce soit en subsurface mais aussi en profondeur.

Cette analyse permet ainsi de préciser le type de formations en présence et le choix de la classe de sol à considérer dans l'analyse de l'aléa glissement de terrain.

Cette analyse n'a pas été menée à ce stade à l'échelle de l'île de La Réunion, mais est en réflexion. Différentes références bibliographiques existent sur le sujet et permettent d'établir des corrélations entre les gammes de résistivité et les formations volcaniques. Dans le cadre d'une thèse en cours (Dumont, M., [en cours], Caractérisation des structures hydrogéologiques sur l'île de la Réunion à partir des données de géophysique héliportée [Thèse] : Université de La Réunion, BRGM.), un récapitulatif des résultats de ce type obtenus sur différents territoires volcaniques (La Réunion, Mayotte, Galápagos, Canaries, Grande Comore et Stromboli) a été établi et donne quelques ordres de grandeurs.

- ↳ Les ordres de grandeurs présentés aux Illustration 35 et Illustration 36 restent des gammes de valeurs indicatives qui peuvent varier ponctuellement.

⁹ Projet de cartographie géophysique aéroportée haute résolution de l'île de La Réunion. Les partenaires du projet sont le FEDER, le MESR, la Région Réunion et le BRGM, ainsi que l'Université de La Réunion en tant que partenaire scientifique. Ce projet a permis d'acquérir, à partir d'un lever héliporté, des données électromagnétiques renseignant sur la résistivité électrique des formations en place sur les 300 premiers mètres de profondeur environ. Le rapport public BRGM/RP-63818-FR de décembre 2014 présente les modalités d'acquisition géophysique et les principaux résultats de ce projet (Martelet G., Reninger P.A., Perrin J., Deparis J. - 2014 – Acquisition géophysique héliportée de l'île de La Réunion. BRGM/RP-63818-FR, Rapport final, 90p. 28 fig., 21 tab., 5 ann.)

- ↳ Selon les secteurs à étudier, cette analyse pourra être menée localement afin de préciser les lithologies en présence et leur extension spatiale.

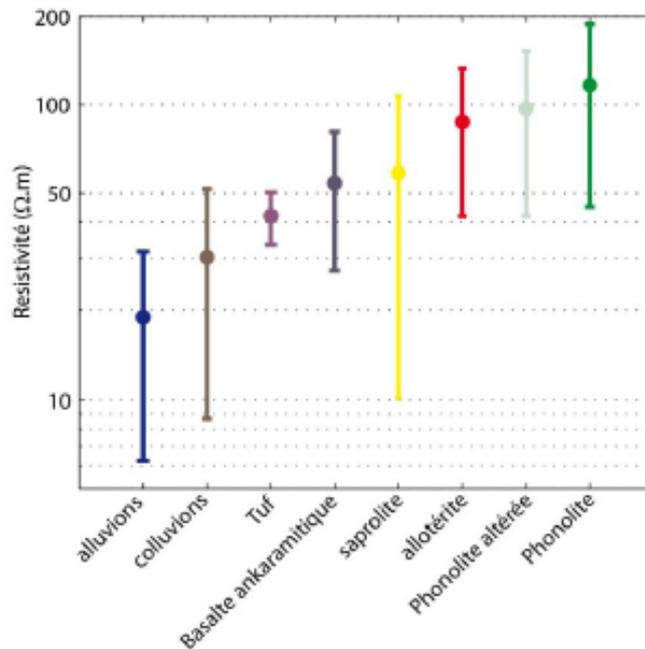


Illustration 35 : Corrélation entre les différentes lithologies et les valeurs de résistivité (couche 0 à 5m) issues de la campagne de géophysique héliportée de Mayotte (projet GéoMayotte, 2010) (Deparis, Tardy, 2014)¹⁰

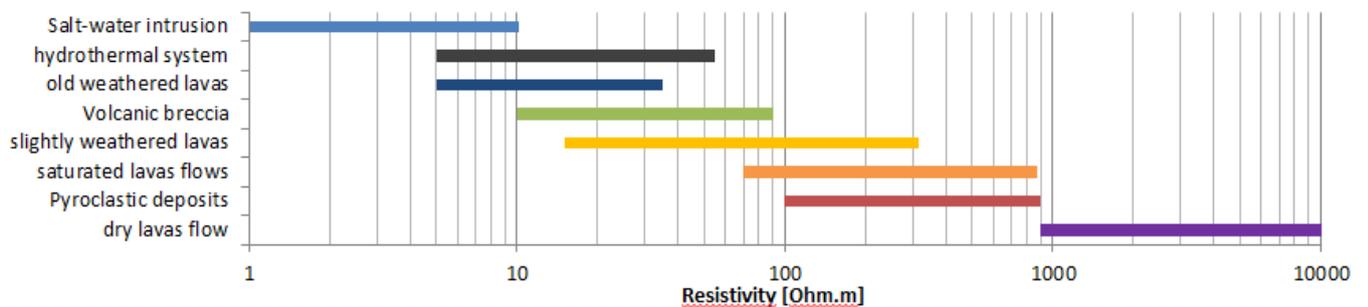


Illustration 36 : Revue bibliographique des résistivités électriques en fonction des formations géologiques en milieu volcanique insulaire à partir des données de Descloitre et al., 1997; Savin et al., 2001; Join et al., 2005; Finizola et al., 2006; Gomer-Otiz et al., 2007; Pryet et al., 2012; Vittecoq et al., 2014 - (Dumont, M., [en cours], Caractérisation des structures hydrogéologiques sur l'île de la Réunion à partir des données de géophysique héliportée [Thèse] : Université de La Réunion, BRGM.)

¹⁰ Deparis J., Tardy D. (2014) – Amélioration de la méthodologie de qualification des aléas mouvements de terrain par les données de résistivité issue de la campagne de géophysique héliportée. Rapport final. BRGM/RP-63462-FR, p.59, fig.30, ann.3, CD.

- **Particularité des altérites**

La classification des altérites est issue du rapport BRGM RP-59742-FR (Cochery R., Garnier C Taquet J., 2011¹¹) qui établit la caractérisation des formations altéritiques de La Réunion. Les altérites sont fréquemment rencontrées sur le territoire réunionnais, avec plus de 320 km² (environ 13 % du territoire) recensés dans le cadre de cette étude (secteur des planèzes Nord, Nord-Est et Sud de l'île principalement). Ces formations sont les principales formations du territoire affectées de glissement de terrain sur les planèzes, lors de fortes pluies.

La distinction des différents faciès d'altérites rencontrés est la suivante (extrait du rapport RP-59742-FR) :

- Les **altérites de type I** correspondent au stade le moins avancé de l'altération de la roche mère, pour lesquelles la sensibilité aux instabilités « rocheuses » (chutes de blocs et éboulements) est globalement plus marquée que vis-à-vis des phénomènes de glissements de terrain. Les caractéristiques de ce matériau se rapprochent plus ou moins de celle d'un basalte non altéré. La densité de fracturation de la matrice rocheuse constitue un paramètre prépondérant, à la fois vis-à-vis de la genèse de chutes de blocs et par rapport à la variabilité des valeurs moyennes.
- Les **altérites de type II** correspondent au stade d'altération intermédiaire de la roche mère. De nombreux « résidus » de roches saines sont encore présents dans le talus (pouvant conduire à un risque de chutes de blocs), mais pour l'essentiel ces niveaux d'altération sont constitués de matériaux fins.
- Les **altérites de type III** correspondent au stade le plus évolué de l'altération en place des roches volcaniques. La structure originelle rocheuse a complètement disparu (d'où une faible sensibilité généralement aux chutes de blocs) et le matériau se présente sous la forme d'une matrice assez plastique de couleur rouge-brun, riche en minéraux silto-argileux. Cette constitution explique que la stabilité de ce type de faciès est étroitement liée au contexte hydrogéologique. L'historicité connue dans ces altérites fait état de glissements de terrain d'ampleur très variable (métriques à kilométriques).

Cette étude a permis de caractériser les altérites d'un point de vue lithologique et géotechnique dans l'optique de préciser les modalités de cartographie de l'aléa MVT intégrant des calculs de stabilité de pentes. Les caractéristiques des trois types d'altérites sont les suivantes :

¹¹ **Cochery R., Garnier C., Taquet J.**, (2011) – Etude de caractérisation des formations altéritiques en vue d'une prise en compte en matière de prévention des risques naturels – Tranche 2 - (974). Rapport BRGM/RP-59742-FR, 142 p., 78 fig., 24 tab., 5 ann

altérite I		Roche fracturée, la texture de la roche mère est encore visible, apparition de l'altération en boue. Moins de la moitié de la roche est décomposée en sol. Roche généralement à patine beige – grise.	$\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$ $\phi' = 35^\circ$ $C' = 50 \text{ kPa}$
altérite II		De nombreux résidus de roches saines sont encore présents, mais plus de 50% de la roche correspond à un sol. La roche, de nature compacte, adopte une couleur brun-orangée.	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\phi' = 30^\circ$ $C' = 20 \text{ kPa}$
altérite III		Matrice assez plastique de couleur rouge-brun, très riche en minéraux silto-argileux	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ $\phi' = 25^\circ$ $C' = 10 \text{ kPa}$

Illustration 37 : Caractéristiques lithologiques et géotechniques des altérites de La Réunion (Cochery R., Garnier C., Taquet J., 2011)

Morphologie

La probabilité d'occurrence des glissements de terrain et des coulées de boue est également liée aux pentes des terrains du secteur étudié. Dans un contexte de formations meubles à indurées, plus la pente est forte plus les terrains présentent une prédisposition importante au déclenchement de ce type d'aléa sur la période de référence considérée au PPR.

Le déclenchement des glissements de terrain et des coulées de boue est étroitement lié à la lithologie (épaisseur, nature des formations superficielles, présence ou non de discontinuité en profondeur) et aux pentes des terrains qui sont conditionnées par la nature des terrains en place. Les informations précises sur la configuration géologique des formations en place ne sont pas disponibles à l'échelle communale (densité de sondages enregistrés en BSS insuffisante pour aboutir à une base de données suffisamment dense à l'échelle de chaque commune de l'île). Les classes de pentes sont donc définies à partir de l'expérience du BRGM (phénomènes passés, pratiques dans d'autres territoires d'outre-mer aux configurations proches voire similaires) et sont variables selon la nature des formations en place pour aboutir aux différents niveaux d'aléas.

Le retour d'expérience à la Réunion montre d'une manière générale les pratiques suivantes dans la définition des classes de pentes (à partir de valeurs réelles ou issues de MNT avec une faible résolution (pas de 5m max)) :

- Pentes faibles : $< 10\text{-}20^\circ$;
- Pentes moyennes : $10\text{-}20^\circ$ à $30\text{-}35^\circ$;
- Pentes fortes : $> 30\text{-}35^\circ$.

Au sein de ces plages de valeurs, des variations sont possibles selon les formations en place afin de qualifier la probabilité d'occurrence des glissements de terrain et des coulées de boue.

Facteurs non permanents (généralement aggravants)

Les relevés de terrains permettent d'identifier ces facteurs pouvant indiquer la présence d'un phénomène mais aussi ceux pouvant favoriser le déclenchement des instabilités de type glissement de terrain ou coulées de boue.

Les principaux indices suivants sont généralement caractéristiques d'un glissement :

- Présence d'une zone « d'arrachement » à l'amont (surface de rupture) ;
- Présence de fissures ;
- Morphologie « chahutée » avec des tassements, des zones de « moutonnement », une végétation désordonnée ;
- Forme de « bourrelet » pouvant caractériser le front d'une zone en glissement.

A ces indices de surface synonymes de glissement ancien ou récent, stabilisé ou non, est également identifiée l'occurrence possible sur la période de référence des facteurs potentiellement déclenchant ou pouvant réactiver un glissement ancien non stabilisé, comme :

- La présence de venue d'eau pouvant traduire la présence d'un contexte hydrogéologique favorable à ce type d'instabilité ;
- Une érosion de surface favorisée par des rejets d'eau ou des écoulements concentrés pouvant déstabiliser les terrains ;
- La présence de l'occupation humaine avec des pratiques de terrassement potentiellement néfaste à la stabilité des terrains (déblais non soutenus, remblais en surcharge non confortés).

A La Réunion, du fait des forts contrastes de pluviométrie entre les régions, avec une pluviométrie plus importante dans les Hauts du territoire plutôt qu'en bordure littorale, l'altitude élevée des terrains des zones étudiée constitue également un facteur potentiellement aggravant.

La présence de facteurs naturels ou d'aménagements favorables à la stabilité des terrains est également identifiée lors des reconnaissances de terrains : présence d'ouvrages pérennes et entretenus, présence de végétation permettant de limiter l'érosion, aménagement en « terrasse » des zones pentues sensibles aux glissements superficiels notamment.

- ↳ La prise en compte de l'action des facteurs non permanents (aggravants ou non) dans le déclenchement d'instabilité type glissement de terrain sur la période de référence du PPR (100 ans à venir) relève de l'expérience et de la précision des observations de terrain effectuées. Leur prise en compte dans l'évaluation de la probabilité d'occurrence du phénomène est justifiée mais ne constitue généralement pas l'élément principal guidant la cartographie de l'aléa MVT à contrario de l'intensité du phénomène.

Proposition de grille d'aide à la cartographie de l'aléa glissement de terrain / coulée de boue

A partir des éléments présentés précédemment, les grilles suivantes sont proposées pour la qualification de l'aléa glissement de terrain dans les PPR des communes de La Réunion :

	Description des facteurs attendus
Elevée	Glissement actif avec traces de mouvements récents ou Glissement ancien non stabilisé / coulée de boue connue non stabilisée ou Glissement potentiel / coulée de boue potentielle : <ul style="list-style-type: none"> • classe « sol » 1 + pente supérieure à 25° + présence de facteurs aggravants • classe « sol » 2 + pente supérieure à 30° + présence de facteurs aggravants • classe « sol » 3 + pente supérieure à 35° + présence de facteurs aggravants
Moyenne	Glissement ancien connu stabilisé / coulée de boue ancienne, avec doute sur l'entretien des aménagements ou non confortés ou Glissement potentiel / coulée de boue potentielle : <ul style="list-style-type: none"> • classe « sol » 1 + 20° < pente < 25° + absence de facteur aggravant prépondérant • classe « sol » 2 + 20° < pente < 30° + absence de facteur aggravant prépondérant • classe « sol » 3 + 25° < pente < 35° + absence de facteur aggravant prépondérant
Faible	Pentes inférieures au seuil définis pour la probabilité d'occurrence moyenne mais non nulles (supérieures à 5°)

Tableau 24 : Définition de la probabilité d'occurrence d'un glissement de terrain, d'une coulée de boue

	Description des facteurs attendus
Très élevé	Parade au cout prohibitif et/ou techniquement impossible Destruction des bâtis de la zone Volume mobilisé très important : plusieurs millions de m ³
Elevé	Parade au cout prohibitif et/ou techniquement impossible Dommage important au bâti (gros œuvre) avec ruine probable dans les 100 ans – réparation très couteuse Surface mobilisée de l'ordre du km ² ou volume mobilisé important de l'ordre de 10 000 à 100 000 m ³
Moyenne	Parade réalisable à l'échelle de la collectivité Dommage au gros œuvre sans ruine probable dans les 100 ans – réparation possible Surface mobilisée de l'ordre du 1 000 à 100 000 m ² ou volume mobilisé relativement important de l'ordre de 1 000 à 10 000 m ³
Faible	Parade réalisable à l'échelle de la parcelle Pas de dommage structurel, gros œuvre très peu touché Surface mobilisée faible, inférieure à 1 000 m ² ou volume mobilisé faible inférieure à 1000 m ³

Tableau 25 : Définition de l'intensité d'un glissement de terrain

Pour l'aléa « coulée de boue », les consignes nationales recommandent la prise en compte des seuls niveaux d'intensité élevé et très élevé. A La Réunion, étant donné les spécificités géologiques (couverture sol peu épaisse), une intensité moyenne est également considérée pour les problématiques fréquemment rencontrées s'apparentant à un ravinement intense mobilisant une épaisseur de matériaux rarement supérieur à 0,50 m.

Description des facteurs attendus	
Très élevé	Parade au cout prohibitif et/ou techniquement impossible Destruction des bâtis de la zone Surface concernée à l'échelle du versant (> km ²) avec épaisseur mobilisable supérieur à 0,5 voire 1 m générant un volume de coulée potentiel très important : > 1 million de m ³
Elevé	Parade au cout prohibitif et/ou techniquement impossible Dommage important au bâti (gros œuvre) avec ruine probable dans les 100 ans – réparation très couteuse Surface concernée significative (>1000 m ²) avec épaisseur mobilisable supérieur à 0,5 voire 1 m générant un volume de coulée potentiel important : > 1 000 m ³
Moyenne	Parade réalisable à l'échelle de la collectivité Dommage au gros œuvre sans ruine probable dans les 100 ans – réparation possible Surface concernée significative (>1000 m ²) avec épaisseur mobilisable réduite (< 0,5 m) générant un volume de coulée potentiel peu important : < 1 000 m ³

Tableau 26 : Définition de l'intensité d'une coulée de boue

		Intensité			
		Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Probabilité d'occurrence	Faible	Faible (G1)	Moyen (G2)	Elévé (G3)	Très élevé (G4)
	Moyenne	Faible (G1)	Moyen (G2)	Elévé (G3)	Très élevé (G4)
	Elevée	Moyen (G2)	Elévé (G3)	Elévé (G3)	Très élevé (G4)

Tableau 27 : Définition du niveau de l'aléa MVT (glissement de terrain)

		Intensité		
		Moyenne	Elevée	Très élevée
Probabilité d'occurrence	Faible	Moyen (G2)	Elévé (G3)	Très élevé (G4)
	Moyenne	Moyen (G2)	Elévé (G3)	Très élevé (G4)
	Elevée	Elévé (G3)	Très élevé (G4)	Très élevé (G4)

Tableau 28 : Définition du niveau de l'aléa MVT (coulée de boue)

Concernant l'aléa MVT « glissement de terrain », à la différence de la grille proposée dans le cadre des réflexions du « cotech 1 » (cf. Tableau 19), il est proposé de conserver un aléa faible et moyen MVT pour des niveaux d'intensité similaires quel que soit la probabilité d'occurrence (hormis pour un niveau élevé) afin de conserver de manière prépondérante la notion de niveau de réalisation des parades dans l'évaluation de l'aléa. Cela se justifie par de faible épaisseur de couverture meuble (moins d'un mètre à quelques mètres avant d'atteindre le substratum rocheux) sur le territoire réunionnais hormis dans certains secteurs où l'altération poussée des formations basaltiques peut favoriser des glissements de plus fortes épaisseurs.

Concernant l'aléa MVT « coulée de boue », les phénomènes historiques sont peu nombreux sur le territoire réunionnais (une centaine enregistrés dans BDMVT) et concernent principalement les cirques (plus de 60% des cas enregistrés) où les formations géologiques en places sont liées à des dépôts gravitaires (formations détritiques sensibles à l'érosion et aux phénomènes de ce type). Les zones d'occurrence de ces phénomènes sont par ailleurs concernées par de très fortes pentes et exposées à d'autres types d'aléa MVT (chute de blocs notamment) avec la prise en compte d'un aléa élevé voire très élevé. D'une manière générale, en dehors de ces territoires spécifiques (Salazie, Cilaos, Mafate), l'aléa coulée de boue est peu présent et non prépondérant vis-à-vis des autres phénomènes gravitaires mais restent possibles ponctuellement lors de conditions climatiques très dégradées notamment dans des secteurs de terrains agricoles où les sols sont plus facilement mobilisables.

- **Apport des calculs de stabilité dans l'évaluation de l'aléa MVT glissement de terrain**

Dans le cadre de calculs de stabilité de pentes effectués sur une zone, les niveaux d'aléa peuvent être également appréciés à partir des coefficients de sécurité obtenus sous réserve de la pertinence des calculs effectués :

- prise en compte des facteurs de prédisposition suivant la configuration la plus défavorable :
 - plan topographique précis, à défaut recours au MNT de l'IGN© de 2012 ;
 - définition du modèle géologique (nature et épaisseurs des formations) ;
 - définition des caractéristiques mécaniques des formations en place à partir de références bibliographiques et idéalement à partir d'essais en laboratoire ;
- pris en compte des facteurs aggravants potentiels pouvant survenir sur la période de référence du PPR (100 ans à venir), notamment les conditions de saturation des terrains en place :
 - Pour ces dernières, le recours à un niveau de nappe statique subaffleurant semble trop pessimiste et défavorable dans l'analyse de la stabilité. Il est généralement préférable (sauf contre-argumentation spécifique) de dégrader les caractéristiques mécaniques des formations en place afin de simuler l'action néfaste de la saturation des terrains sur leur stabilité.

Les observations de terrains devront permettre de préciser autant que possible le modèle défini afin que les simulations tendent à reproduire les conditions les plus défavorables susceptibles de se produire sur la période de référence.

A défaut, les résultats ne peuvent être considérés, ni utilisés dans la cartographie des aléas MVT pour les glissements de terrain.

A titre d'exemple, les coefficients de sécurité suivant sont préconisés dans les contextes d'altérites (cf. Annexe 3, Cochery R., Garnier C Taquet J., 2011) pour la caractérisation des niveaux d'aléa MVT (glissement de terrain) :

niveau d'aléa	Γ_{\min}
nul à très faible	$2 < \Gamma_{\min}$
faible	$1,5 < \Gamma_{\min} < 2$
faible à moyen	$1,4 < \Gamma_{\min} < 1,5$
moyen	$1,25 < \Gamma_{\min} < 1,4$
moyen à fort	$1 < \Gamma_{\min} < 1,25$
Fort	$\Gamma_{\min} < 1$

Tableau 29 : Exemple de définition du niveau de l'aléa MVT (glissement de terrain) à partir du coefficient de sécurité de calculs de stabilité de pente dans des contextes d'altérites

↪ **La surface ou le volume mobilisable et donc la notion d'intensité ne sont toutefois pas intégrés dans cette approche intégrant les calculs de stabilité. De tels coefficients de sécurité issus des calculs de stabilité de pente peuvent ainsi être utilisés, mais plus pour qualifier la probabilité d'occurrence du phénomène de glissement de terrain que le niveau d'aléa en lui-même.**

Afin d'illustrer l'application de la méthode à un secteur de La Réunion, le secteur des Trois Frères à Sainte-Suzanne, où plusieurs glissements historiques (1987 et 1998 notamment) ont affecté les terrains pentus du secteur, est présenté sur l'illustration 38, avec :

- la présence de formations pyroclastiques altérées (tufs en épandage = classe 2) ;
- la présence de pente moyenne de l'ordre de 25° oscillant entre 20 et 30° ;
 - soit une probabilité d'occurrence moyenne ;
- plusieurs glissements de terrain historiques observés dont un (1998) mobilisant près de 3000 m³ d'après les archives ;
- l'intensité est jugée moyenne avec une surface de configuration similaire dans le secteur étudié de l'ordre de plusieurs milliers de m² où les travaux nécessaires pour limiter le risque de glissement seraient réalisables à l'échelle du versant (ou de la collectivité) : drainage du versant, confortement par exemple :
 - le niveau d'aléa moyen MVT est retenu au droit de la zone de prédisposition (déclenchement et propagation).

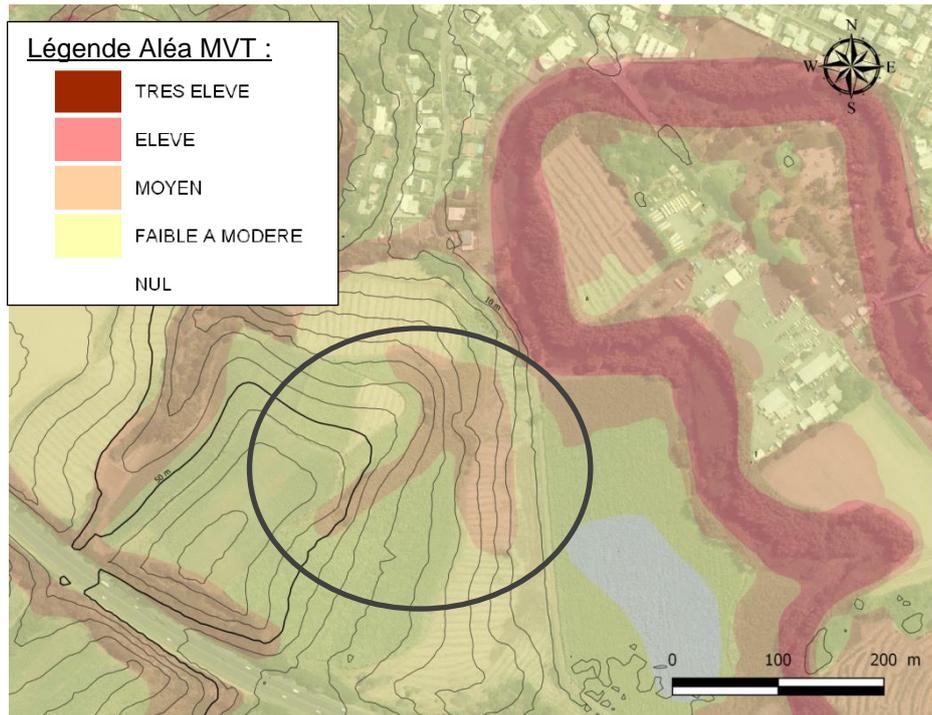


Illustration 38 : Illustration de la méthodologie de cartographie des aléas MVT pour les phénomènes de glissement de terrain – Trois -Frères – Sainte-Suzanne (fond orthophoto de l'IGN©, isolignes 10 m issues du MNT de l'IGN©)

Afin d'illustrer l'application de la méthode à un secteur de La Réunion, le secteur du Cap Lelièvre est présenté l'illustration 40 où le 5 février 2012, suite à de fortes pluies, une coulée de boue a pris naissance dans un champ agricole et impacté les maisons à l'amont de la RD130 dans les hauts de Saint-leu :

- les terrains agricoles n'étaient pas tous plantés lors de l'évènement climatique du 5 février 2012, avec de grandes surfaces de sol mobilisables. Cette situation peut potentiellement se renouveler sur la période de référence = probabilité d'occurrence jugée moyenne ;
- la coulée a mobilisé des terrains agricoles sur une épaisseur faible (quelques dizaines de centimètres maximum, principalement le long des chemins agricoles et au travers des champs labourés) mais sur une vaste surface d'environ 1 km² = intensité moyenne ;
- la coulée de boue impactant les bâtis le long de la RD13, n'ont pas eu un caractère destructeur (dommage important sans ruine) ;
 - ↳ le niveau d'aléa moyen MVT est retenu à l'échelle de toute la zone agricole amont (bassin versant de la coulée de boue et zone d'atterrissement sur la route départementale à l'aval).



Illustration 39 : Coulée de boue au Cap Lelièvre à Saint-Leu – évènement du 5 février 2012 (cliché BRGM)

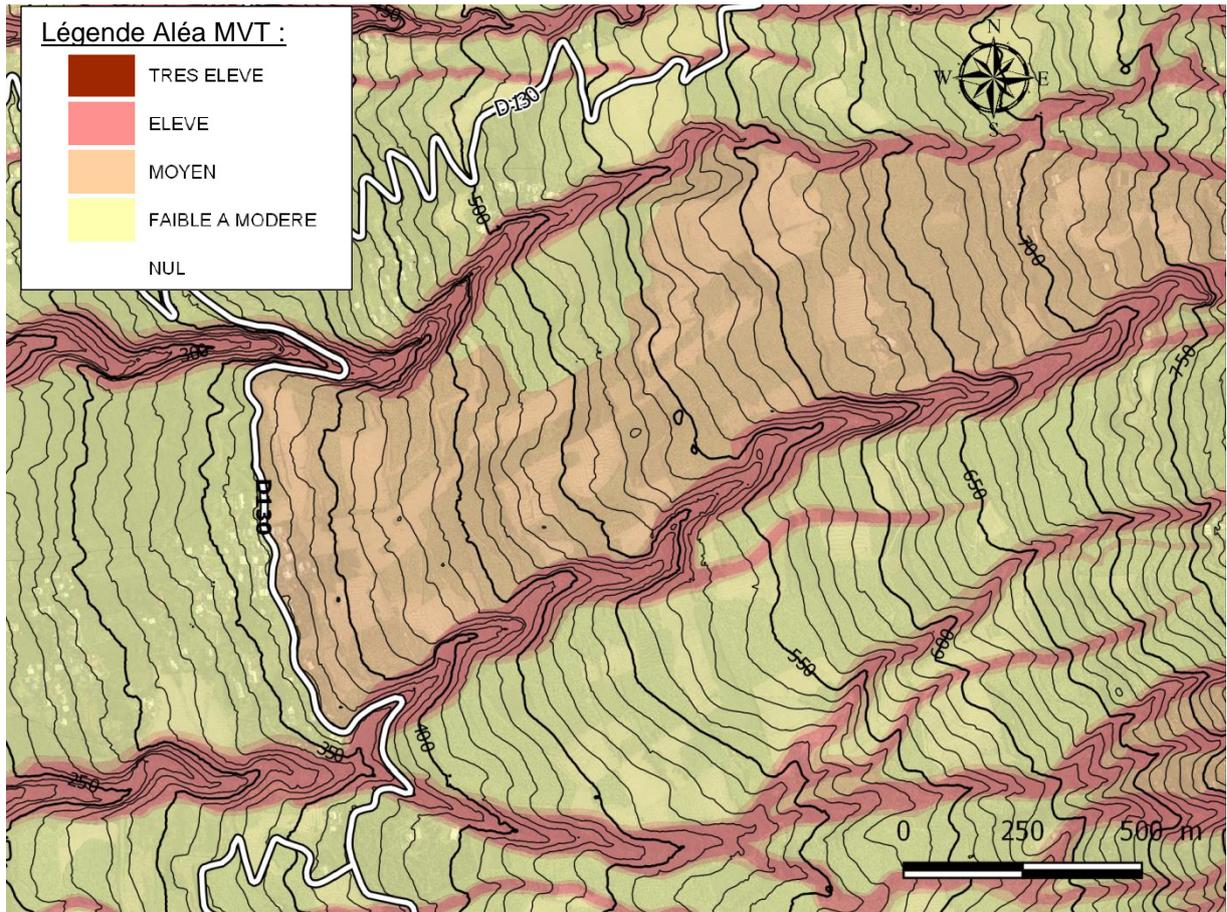


Illustration 40 : Illustration de la méthodologie de cartographie des aléas MVT pour les phénomènes de coulée de boue – Cap Lelièvre – Saint-Leu (fond orthophoto de l'IGN©, isolignes 10 m issues du MNT de l'IGN©)

6. Caractérisation de l'aléa MVT : érosion

6.1. DESCRIPTION DU PHENOMENE

Extrait du rapport BRGM/RP-52031-FR (2002) : Cartographie de l'aléa érosion des sols à La Réunion au 1/100 000 et au 1/50 000¹² :

*Le sol est une ressource naturelle non renouvelable à l'échelle de temps historique, soumis à dégradation par l'érosion. L'île de La Réunion présente une morphologie jeune, marquée par de fortes pentes, se situe dans une région climatique à très fortes précipitations, notamment en période cyclonique, et subit une pression démographique forte entraînant des bouleversements de l'occupation du sol qui aggravent les phénomènes érosifs. **De ce fait, ses sols sont affectés par des phénomènes d'érosion très actifs, correspondant à des départs de matière de l'ordre du millimètre par an en moyenne sur l'ensemble de l'île.** Ce chiffre moyen implique bien sûr des érosions considérablement plus intenses dans des secteurs particulièrement exposés ou lors d'années très pluvieuses ou encore lors du passage d'un météore très actif. Cette érosion a des conséquences agronomiques, économiques et sociales lourdes : de façon directe, destruction de terres agricoles ; de façon indirecte, endommagement de bâtiments ou d'aménagements...*

Cette étude a permis de cartographier l'aléa érosion à l'échelle de l'île en intégrant les différentes composantes pouvant initier cet aléa (relief, la nature du sol, l'occupation du sol, la pluviométrie selon les saisons). L'effet des fortes pluies pouvant survenir lors de la période cyclonique conditionne l'aléa érosion à l'échelle de l'île dont le résultat est illustré sur la figure suivante où les ravines et cirques concentrent l'aléa fort avec un niveau d'aléa faible à moyen par ailleurs.

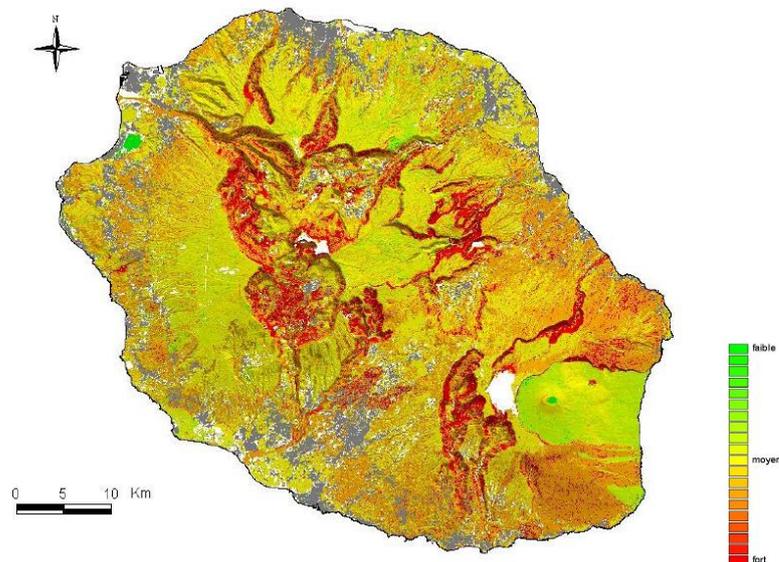


Illustration 41 : Aléa érosif total (Chevalier et al., 2002)

¹² P. Chevalier, Y. De La Torre, A. Hébert et T. Kaufmant, coll. P-F. Chabalier (2002) – Cartographie de l'aléa "érosion des sols" à La Réunion – Phase 2 : Caractérisation et cartographie (1/100 000 à 1/50 000) de l'aléa érosion. Rapport BRGM RP-52031-FR 2002 SGR/REU 22, 67 p., 51 fig., 7 tab., 3 ann.

Les quantités de matériaux transportés par les cours d'eau (transport solide) lors des crues illustrent cette forte érosion se développant sur le territoire et confirment que l'action érosive à La Réunion, au regard des contextes morphologique et climatique est l'une des plus intenses de la planète.

Deux types principaux de phénomènes, liés l'un comme l'autre à l'action mécanique de l'eau, sont distingués dans la qualification de l'aléa érosion dans les procédures PPR des communes de La Réunion :

- ↳ **Les érosions de berges ;**
- ↳ **Le ravinement à la surface des terrains.**

6.1.1. Les érosions de berge

Ce phénomène se manifeste par un « arrachement » ou un éboulement de la berge d'un cours d'eau soumis aux facteurs suivant :

- la force érosive de l'écoulement des eaux sapant le pied des rives et conduisant au glissement ou à l'éboulement de la berge par suppression de la butée qui assurait l'équilibre ;
- l'incision du cours d'eau au fil du temps conduisant également à l'éboulement de la berge (par décompression gravitaire par exemple).

Les phénomènes d'érosion des berges sont présents dans la majorité des ravines des communes de La Réunion. La vulnérabilité des berges à ce type de phénomène est principalement fonction :

- de la constitution géologique de la berge, qui conditionne son érodabilité : berge rocheuse, berge constituée de matériaux cimentés ou meubles, présence de remblais, etc ;
- de sa morphologie (pente) et de sa position vis-à-vis de la dynamique du cours d'eau (intrados / extrados) ;
- dans une moindre mesure de la nature de la ripisylve ;

La dynamique du cours d'eau (la pente du profil en long, l'ampleur de la superficie du bassin versant au point étudié pouvant générer d'importants débits selon le contexte climatique, le transport solide charrié) favorise le déclenchement d'érosion au niveau du lit et des berges.

Ces phénomènes d'érosion de berge concernent de façon plus ou moins généralisée – au moins de façon potentielle – l'ensemble des ravines du réseau hydrographique drainant le territoire réunionnais. Les désordres observés se traduisent par des affouillements, des reculs du sommet de la berge pouvant dégrader les infrastructures présentes.

6.1.2. Le ravinement

Outre les désordres liés aux écoulements de crue, les phénomènes érosifs sont liés au ruissellement des eaux superficielles. Le ravinement qui en résulte peut être localisé, ou diffus sur toute une pente.

L'érosion des sols dépend de plusieurs paramètres qui sont en premier lieu :

- la topographie ;

- la géologie (érodabilité des terrains en place) ;
- l'occupation du sol (notamment présence et densité du couvert végétal) ;
- la sensibilité à la battance. Elle est provoquée par les eaux de pluie qui, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent en emportant des particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux excédentaires apparaît lorsque l'intensité des pluies est supérieure au pouvoir d'absorption du sol.

Les zones touchées sont souvent des terrains en partie dénudés et vallonnés, voire accidentés, qui favorisent de ce fait le développement et la concentration de ruissellements.

Bien que dans le cas général il s'agisse d'un processus lent, avec une abrasion des terrains sur une épaisseur n'excédant pas quelques centimètres par an, l'érosion peut prendre une ampleur sensiblement plus importante (notamment sous l'effet du passage de courants à forte densité de type « lave torrentielle ») et être un phénomène très rapide. Lorsque les matériaux entraînés se concentrent, des coulées de boue peuvent apparaître.

Alors qu'un ruissellement diffus va créer des paysages de « badlands », un ruissellement concentré va créer des ravins encaissés et localisés, et s'accompagne souvent de zones d'alluvionnement (où se déposent les matériaux arrachés par l'érosion).

Cette érosion se développe essentiellement au niveau des parcelles défrichées, là où les pentes sont les plus élevées. Dans le passé, la couverture boisée ou en culture assurait une fixation naturelle des horizons superficiels. Ainsi, les terrains autrefois cultivés en canne à sucre, aujourd'hui en friche, sont en proie à l'érosion. L'érosion des sols, diffuse au départ, peut « dégénérer » et entraîner des glissements plus ou moins superficiels.



Illustration 42 : Erosion active (badlands) à Marla – cirque de Mafate (Saint-Paul)



Illustration 43 : Erosion de berge lors d'une crue de la Rivière des Pluies entraînant les maisons implantées en rive droite – Sainte Marie (2002)

6.2. METHODOLOGIE DE CARTOGRAPHIE DE L'ALEA EROSION

Comme indiqué précédemment, l'érosion se développe sur tout le territoire réunionnais avec une concentration des phénomènes érosifs les plus marqués le long des ravines et dans les cirques.

Les récentes réflexions menées dans le cadre de la révision des guides PPR en montagne (Points clés retenus par la DGPR suite aux travaux du comité technique relatif à la détermination des aléas à la place de la modélisation - cotech n°1 notamment) n'intègre pas les phénomènes d'érosions de berge ni de ravinement sur les sols. Toutefois, par similitude avec la démarche retenue pour l'aléa glissement de terrain, il est retenu de qualifier l'aléa érosion (à échéance 100 ans) à partir du croisement des notions de probabilité et d'intensité à l'aide d'une grille de définition de l'aléa principalement qualitative.

6.2.1. Probabilité d'occurrence

La notion de **probabilité d'occurrence** est définie à partir de l'analyse des phénomènes historiques connus et en intégrant les facteurs de prédisposition et les facteurs non permanents pouvant générer le phénomène sur la période de référence (100 ans) :

Pour l'érosion des berges :

- ↳ de la configuration géomorphologique des berges des cours d'eau et thalweg (indice historique de recul, configuration propice au phénomène = notion de prédisposition) ;
- ↳ de la fréquence et l'importance des crues sur la période de référence (notion de déclenchement).

Les crues constituent le facteur déclenchant des érosions de berges, quelle que soit l'occurrence de ces dernières. Etant donné le contexte climatique de La Réunion, chaque saison des pluies (chaque année) peut générer des crues avec un pouvoir érosif marqué, ce qui induit au niveau des cours d'eau et des berges du lit mobilisé par les crues pouvant

survenir sur la période de référence (100 ans à venir) une probabilité d'occurrence certaine (forte) de l'aléa MVT (érosion de berges). Sur cette période (100 ans), la crue centennale cartographiée dans le cadre de l'établissement de l'aléa inondation des PPR multi-aléas de La Réunion a statistiquement 63,6 % de chance de se produire (crue centennale = 1 chance sur 100 de se produire chaque année).

Ainsi par souci de simplification, il est considéré que la probabilité d'occurrence d'une crue centennale sur les 100 prochaines années est forte et l'aléa MVT (érosion de berges) au droit des zones d'écoulement correspondantes est ainsi cartographié, en fonction de la nature et de la forme des berges, à partir de l'aléa inondation (principe de mise en cohérence entre les deux phénomènes).

L'éloignement des terrains par rapport à l'axe des cours d'eau induit ensuite une **probabilité d'occurrence de l'aléa érosion progressivement plus faible** (notion « d'auréole » autour de la zone de probabilité d'occurrence forte) mais d'intensité potentiellement variable.

Pour les nombreuses ravines du territoire réunionnais observées sur les planèzes, fréquemment encaissées de plusieurs mètres à dizaines de mètres et matérialisées au niveau des encaissements par des formations basaltiques, les reculs de berges historiques sont peu fréquents et méconnus. Dans ces contextes, la problématique de chute de blocs est souvent prédominante dans les encaissements avec comme origine de déstabilisation les phénomènes érosifs par sapement du pied liés à la force érosive des crues. Dans ce cas de figure, la probabilité d'occurrence de l'aléa érosion est jugée élevée au niveau du lit et de l'encaissement jusqu'à quelques mètres en recul du sommet de la berge pour tenir compte de l'impact sur les terrains concernés en cas d'instabilité.

Pour le ravinement :

- ↳ de la nature du sol. Les classes de sol 1 et 2, définies au préalable (cf. chapitre aléa glissement), caractérisent les principales formations sujettes au risque de ravinement du fait de leur sensibilité au ruissellement (terrains meubles à faiblement indurés) ;
- ↳ des pentes (variables selon la nature des lithologies en présence) ;
- ↳ des conditions hydrologiques (intensité et fréquence des précipitations sur le secteur étudié favorisant le déclenchement du phénomène) voire hydrogéologiques (pour les phénomènes de « déboûlés » dans les cirques notamment) ;
- ↳ de l'occupation du sol. La végétation en place limite les risques de concentration des eaux superficielles et donc de ravinement, même sur de fortes pentes. Le ravinement est privilégié sur des terrains pentus « dénudés » et dans les zones de concentration des eaux de ruissellement comme les voiries orientées dans le sens de la pente.

Pour ce phénomène, la probabilité d'occurrence est moins « systématique » et dépend des différents facteurs présentés précédemment pour lesquels des similitudes avec les facteurs décrits pour les phénomènes de glissement de terrain peuvent être considérés. En effet, le ravinement est souvent un des signes précurseurs pouvant favoriser le déclenchement de glissement de plus grande ampleur et vice versa (un secteur affecté d'un glissement ancien sera plus sensible aux phénomènes de ravinement).

Les pratiques agricoles sur les terrains en pentes constituent les principales zones potentielles pouvant subir des érosions marquées en cas de fortes précipitations ; notamment lorsque les pratiques favorisent le ruissellement (champs non planté lors de la saison des pluies par exemple) et/ou la concentration des eaux pluviales (sillon dans le sens de la pente, absence de rejet vers exutoire naturel le long des chemins de cannes par exemple).

Les voiries revêtues, suivant d'important linéaire dans le sens de la pente, constituent également des zones de prédisposition de ce type de phénomène comme l'a illustré le récent passage du cyclone Felleng (2013)¹³ sur la commune du Tampon où de nombreuses voiries ont été endommagées du fait d'un ruissellement concentré sur des routes avec des pentes supérieures à 8 % en moyenne et où les systèmes de gestion des eaux pluviales ont été inopérants.

Les intensités pluviométriques potentielles sur le territoire réunionnais (à l'échelle de la période de référence considérée, soit le siècle à venir) sont tellement importantes, que le déclenchement de ces phénomènes ne nécessitent pas des surfaces significatives ni des pentes trop importantes.

- Intérêt de l'approche IDPR pour le ravinement

L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) est un paramètre qui permet d'approcher de manière qualitative le potentiel d'infiltration des eaux de surface d'un bassin versant, en fonction des formations géologiques en place. La géologie a une influence primordiale sur la morphométrie et le comportement des bassins hydrologiques. La densité de drainage en est un indicateur révélateur. Un bassin formé de matériaux très perméables aura en général une densité de drainage faible. À l'inverse, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des argiles ou des altérites évoluées présentera une densité de drainage élevée. L'IDPR est le moyen de quantifier ce rôle en comparant un réseau théorique indépendant (indice de développement ID, déduit du MNT), au réseau naturel mis en place (de persistance des réseaux PR) ; cet indice présente une métrologie de l'écart constaté entre les deux réseaux.

L'IDPR permet ainsi de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface.

Cet indice, généralement utilisé dans les études hydrogéologiques pour préciser le potentiel d'infiltration des eaux d'un bassin versant, a été déterminé à l'échelle de la Réunion (Aunay et al., 2011, cf. Illustration 44). La relation entre l'infiltration et le ruissellement est déterminé à partir de valeurs seuils de l'IDPR (indice variant de 0 à 2000) :

IDPR	Relation entre infiltration / ruissellement
IDPR < 500	Zone d'infiltration = zone perméable
IDPR > 1500	Zone de ruissellement = peu perméable
500 < IDPR < 1500	Zone d'équilibre entre l'infiltration et le ruissellement (IDPR = 1000)

Tableau 30 : Relation entre infiltration et ruissellement en fonction de l'IDPR

Cet indice peut constituer un paramètre utile d'aide à la décision pour préciser les zones propices au ruissellement dans la perspective de définir la probabilité d'occurrence du ravinement :

- ↳ **Des valeurs d'IDPR élevées (>1500) qualifieront des terrains perméables favorables au ruissellement et donc potentiellement propice au déclenchement de ravinement.**

¹³ E. Chateauminois, A. Desprez, J. Druon, A. Rey (2013) – Passage du cyclone Felleng sur l'île de La Réunion, Compte rendu des observations et désordres du 1^{er} février 2013, Rapport final. Rapport BRGM/RP-62049-FR. 138 p., 7 fig., 2 tabl., 3 ann

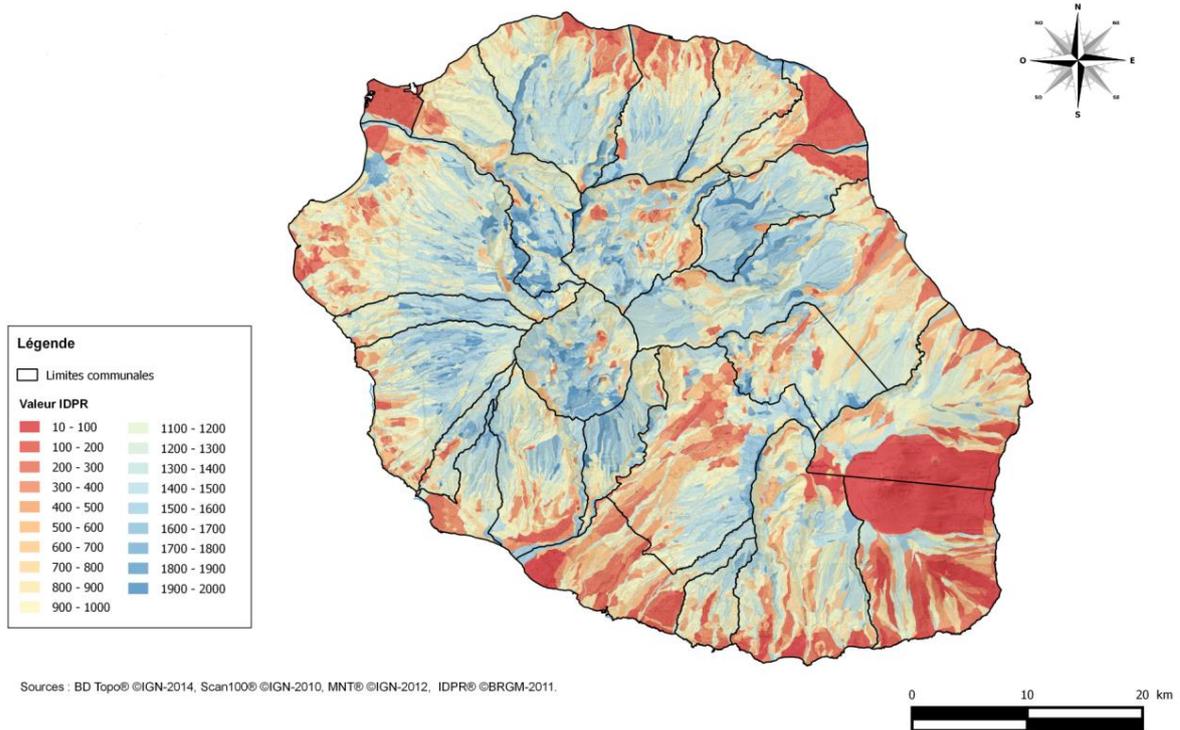


Illustration 44 : Cartographie de l'Indice de Développement des Réseaux (IDPR, BRGM 2011)

6.2.2. Intensité

La notion d'**intensité** est basée principalement sur la notion du potentiel de dommages sur des enjeux bâtis (existants ou non). Comme pour les phénomènes de glissements de terrain la notion d'échelle de parade pour s'en prémunir peut également être utilisée, ainsi que l'ampleur des phénomènes pouvant se développer (importance des reculs érosifs possibles pour les érosions de berges et volume ou surface érodée pour le ravinement).

Pour l'érosion des berges :

L'intensité de l'érosion de berge (ou recul de berge) est évaluée en fonction :

- ↪ de l'érodabilité des berges ;
- ↪ de l'analyse historique des évolutions de berges passées et de l'estimation des érosions possibles sur la période de référence.

L'intensité de l'érosion sur la période de référence sera traduite par une distance en recul considérée à partir du sommet de la berge ou de l'encaissement. Les phénomènes historiques dans les zones de plaines alluviales illustrent l'intensité des reculs de berges passés et potentiels. Dans les secteurs d'encaissement de ravine composé de formations plus indurées voire rocheuses (berges parfois verticales), les reculs observés sont moins fréquents mais peuvent être brutaux suite au sapement du pied de berge par les crues répétées sur la période de référence. L'analyse des phénomènes historiques est donc importante dans l'évaluation de l'intensité, afin de traduire l'intensité prévisible de ces phénomènes. Les niveaux d'intensité de l'érosion peuvent se décliner de la manière suivante :

- ↪ En cas d'érosion de berge constatée par le passé, avec un recul potentiellement important (jusqu'à plusieurs dizaines de mètres par exemple) et/ou une perte de matériaux significative (plusieurs centaines à milliers de m³ par exemple), une distance calculée sur la période de référence au prorata du recul constaté par le passé = intensité

forte. Il s'agit principalement des berges composées de formations alluvionnaires au niveau des cônes de déjection des principales rivières de La Réunion ;

- ↳ A défaut d'érosion ou de manque de connaissance sur les érosions observées par le passé, la distance sera à minima équivalente à la hauteur de berge voire 1,5 fois la hauteur de berge dans des configurations défavorables (extrados de méandre par exemple) = intensité moyenne. Cette méthode d'évaluation de l'intensité s'applique principalement les berges de faibles hauteurs (moins de 10 m en général). Pour les berges plus hautes (au-delà de 10 m de haut), généralement composées de formations indurées ou rocheuses, la distance de recul sera plafonnée à minimum 10 m.

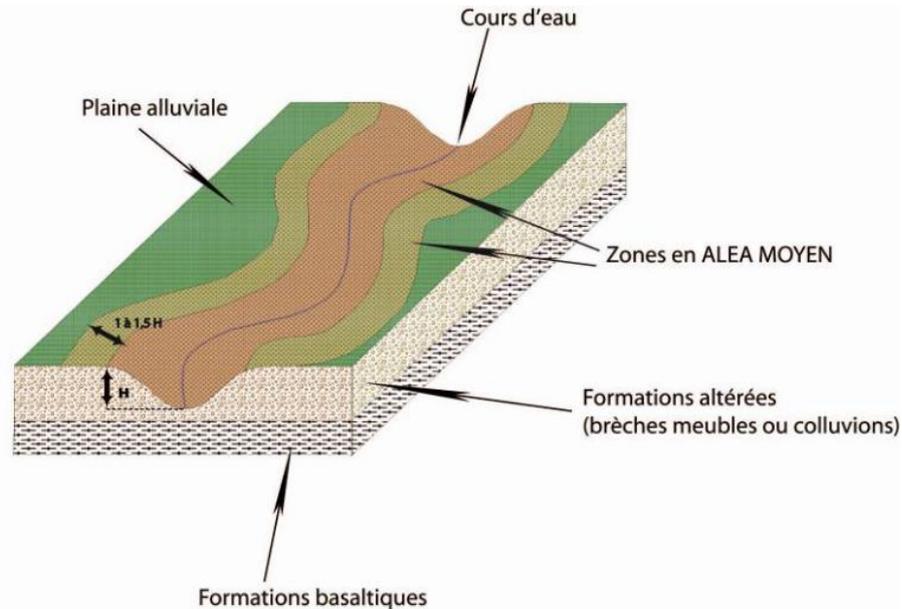


Illustration 45 : Schéma de principe de la qualification de l'aléa MVT pour les érosions de berges (Guide PPR Réunion, DEAL, 2012)

Pour le ravinement :

L'intensité du ravinement est évaluée en fonction :

- ↳ de la surface de terrain mobilisable favorable au déclenchement de ce type de phénomène (cf. facteurs de prédisposition) ;
- ↳ du linéaire de voie pouvant concentrer les eaux de ruissellement ;
- ↳ de l'analyse historique des phénomènes de ravinement passés et de l'estimation possible de ce type d'érosion sur la période de référence.

L'intensité de l'érosion (ravinement) sur la période de référence sera traduite principalement par une surface de terrain mobilisable.

A titre d'exemple, l'analyse des phénomènes récents de ravinement observés (cf. rapport BRGM RP-62049-FR, E. Chateuminois, A. Desprez, J. Druon, A. Rey (2013)) montre notamment que dès quelques dizaines de mètres de linéaire de voirie dans le sens de la pente (de l'ordre de 8 à 10% de pente pour les routes endommagées observées), le ravinement se développe et endommage la voirie (enrobés déformés voire détruits à partir d'un linéaire plus important ou en cas de faiblesse (tranchée récente ou défaut de stabilisation des accotements par exemple)).

6.2.3. Elaboration d'une grille complémentaire d'aide à la cartographie

A partir des éléments présentés précédemment, les grilles suivantes sont proposées pour la qualification de l'aléa érosion dans les PPR des communes de La Réunion :

	Description des facteurs attendus
Elevée	zones cartographiées en aléa fort inondation (lit de ravine principalement) + encaissement du lit jusqu'au sommet de la berge (et quelques mètres en recul en général).
Moyenne	zone de débordement et/ou lit de ravine peu marqué cartographié en aléa moyen inondation (aléa inondation conditionné par des vitesses d'écoulement) ou zone d'auréole autour de la zone de probabilité d'occurrence forte (10 à 20 m selon l'ampleur de l'encaissement de la ravine)
Faible	zone en recul de la zone de probabilité d'occurrence moyenne

Tableau 31 : Définition de la probabilité d'occurrence d'un phénomène d'érosion de berges

	Description des facteurs attendus
Elevée	zone de badlands non stabilisé où les phénomènes sont actifs et reconnus
Moyenne	zone d'auréole autour de la zone de probabilité d'occurrence forte ou ravinement potentiel (facteurs non cumulatifs) : <ul style="list-style-type: none"> • classe « sol » 1 + pente supérieure à 10-15° + présence terrain potentiellement mis à nu (facteur aggravant) ou facilement mobilisable (zone agricole par exemple) • classe « sol » 2 + pente supérieure à 15-20° + présence terrain potentiellement mis à nu (facteur aggravant) ou facilement mobilisable (zone agricole par exemple) • voirie avec pente de plus de 7-8% dans le sens de la pente sur un linéaire de plus de 500m • valeurs d'IDPR supérieures à 1500
Faible	zone en recul de la zone de probabilité d'occurrence moyenne ou pentes inférieures aux seuils définis pour la probabilité d'occurrence moyenne mais non nulles (supérieures à 5°)

Tableau 32 : Définition de la probabilité d'occurrence d'un phénomène de ravinement

Description des facteurs attendus	
Très élevé	Parade au cout prohibitif et/ou techniquement impossible Destruction des bâtis de la zone Erosion de berge : incision du lit et/ou recul observé par le passé + potentiel de plus de 100 m Ravinement : surface active mobilisée très importante (bassin versant) : supérieure à 1 km ²
Elevé	Parade au cout prohibitif et/ou techniquement impossible Dommage important au bâti (gros œuvre) avec ruine probable dans les 100 ans – réparation très coûteuse Erosion de berge : incision du lit et/ou recul observé par le passé + potentiel de plus de 10 m Ravinement : surface active mobilisée importante (bassin versant) : supérieure à 10 000 m ²
Moyenne	Parade réalisable à l'échelle de la collectivité Dommage au gros œuvre sans ruine probable dans les 100 ans – réparation possible Erosion de berge : recul potentiel de l'ordre de 1 à 1,5 x H (hauteur de la berge) ou de l'ordre de 10 m Ravinement : surface active mobilisée réduite (bassin versant) : supérieure à 1000 m ²
Faible	Parade réalisable à l'échelle de la parcelle Pas de dommage structurel, gros œuvre très peu touché

Tableau 33 : Définition de l'intensité d'un phénomène érosif (ravinement et érosion de berges)

Comme pour les autres phénomènes considérés, l'aléa MVT pour les phénomènes érosifs est ensuite défini par croisement entre la probabilité d'occurrence et l'intensité.

		Intensité			
		Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Probabilité d'occurrence	Faible	Faible (E1)	Moyen (E2)	Elévé (E3)	Très élevé (E4)
	Moyenne	Moyen (E2)	Moyen (E2)	Elévé (E3)	Très élevé (E4)
	Elevée	Elévé (E3)	Elévé (E3)	Elévé (E3)	Très élevé (E4)

Tableau 34 : Définition du niveau de l'aléa MVT (érosion)

Pour les nombreuses ravines du territoire réunionnais observées sur les planèzes, fréquemment encaissées de plusieurs mètres à dizaines de mètres et composées de formations basaltiques au niveau des encaissements, **les critères utilisés pour définir la probabilité d'occurrence prévalent sur la qualification de l'aléa (notion de prédisposition) :**

- ↳ **Aléa élevé MVT (E3)** au droit du lit et de l'encaissement, englobant les premiers mètres en recul (fréquemment de l'ordre de 5m en recul depuis le sommet de la berge) ;

- ↪ **Aléa moyen MVT (E2)** en recul de l'encaissement sur une « auréole » de largeur variable : 10 à 20 m selon l'ampleur de l'encaissement.

Afin d'illustrer l'application de la méthode à un secteur de La Réunion, le secteur des terrains pentus au Nord de Boucan Canot à Saint-Paul, est présenté sur l'illustration 46, avec :

- La présence de formations de démantèlement : Brèches d'avalanche de débris de Saint-Gilles (= classe 2) d'une sensibilité moyenne à forte à l'érosion selon la couverture végétale à la surface des terrains (= facteur aggravant) ;
- de pente moyenne de l'ordre de 25° oscillant entre 20 et 30° ;
 - ↪ soit une probabilité d'occurrence moyenne ;
- l'intensité est jugée moyenne avec une surface de concentration des eaux de ruissellement (bassin versant) de l'ordre de plusieurs milliers de m² où les travaux nécessaires pour limiter le risque de ravinement seraient réalisables à l'échelle du versant (ou de la collectivité) : drainage du versant, végétalisation, confortement par exemple :
 - ↪ le niveau d'aléa moyen MVT est retenu ;
- La présence du thalweg en pied de pente (lit) cartographié en aléa fort inondation au PPR de Saint-Paul est cartographié en aléa élevé MVT (E3).

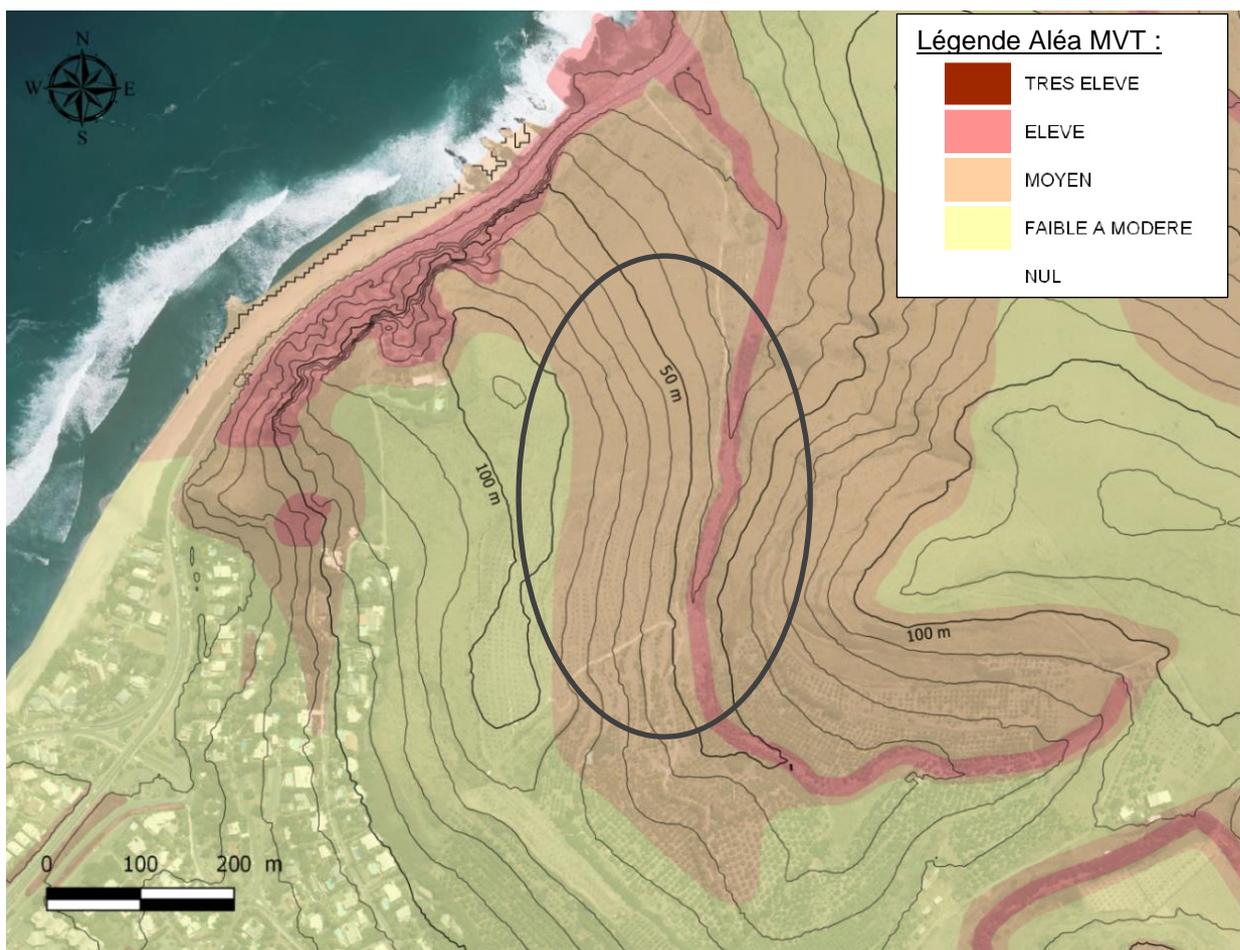


Illustration 46 : Illustration de la méthodologie de cartographie des aléas MVT pour les phénomènes de ravinement – Cap La Houssaye - Saint-Paul (fond orthophoto de l'IGN©, isolignes 10 m issues du MNT de l'IGN©)

7. Qualification de l'aléa MVT

7.1. METHODE DE QUALIFICATION ACTUELLE DE L'ALEA MVT

Historiquement, la méthode intégrait la démarche suivante (extrait de la note de présentation du PPR de Saint-Pierre, approuvé en avril 2016) :

Comme pour l'évaluation de l'intensité, la méthode consiste en une démarche naturaliste de type expertise. En combinant à cette approche naturaliste un historique des phénomènes naturels dans la zone et l'expérience du bureau d'études, il est possible de définir une série de contextes, auxquels seront rattachés des critères physiques afin de définir un niveau d'aléa en accord avec l'évènement de référence prévisible sur la zone considérée.

Quatre niveaux d'aléa mouvements de terrain ont été définis (en plus du niveau « très faible à nul ») par regroupement des typologies rencontrées :

- **aléa faible à modéré** : zones sur lesquelles des caractéristiques géomécaniques plutôt favorables à la stabilité des terrains existent et sur lesquelles généralement aucun désordre n'a été recensé (des informations événementielles peuvent quelquefois exister vis-à-vis de mouvements d'ampleur limités, maîtrisables à l'échelle de la parcelle). L'intensité prévisible du phénomène à craindre reste limitée.
- **aléa moyen** : des incertitudes demeurent par rapport à l'extension, l'ampleur, et la fréquence des phénomènes potentiels ou bien les caractéristiques des mouvements sont réellement intermédiaires entre un aléa faible et élevé.
- **aléa élevé** : zones jugées instables, où de nombreux mouvements de terrain sont recensés et où les paramètres géomécaniques sont défavorables et indiquent une stabilité précaire. Ces secteurs peuvent également être associés aux zones d'extensions maximales de phénomènes gravitaires se propageant (ex : aval des remparts) ou de phénomènes régressifs (ex : amont des remparts).
- **aléa très élevé** : en complément aux qualifications précédentes en terme d'instabilité, l'aléa très élevé concerne des zones directement exposées à des phénomènes de grande ampleur et/ou très fréquents.

Pour évaluer l'aléa, suivant les niveaux définis précédemment, la méthode actuelle consiste à intégrer l'ensemble des phénomènes naturels mouvement de terrain sur la zone considérée suivant leur intensité (cf. Tableau 35).

Le phénomène le plus intense conditionnant le niveau d'aléa sauf pour l'aléa faible. Afin de simplifier la compréhension des utilisateurs, le niveau de parade nécessaire pour se prémunir du phénomène redouté pouvant survenir sur la période de référence (paramètre permettant de qualifier le niveau d'intensité) est inséré (cf. Tableau 36).

Phénomène	Intensité du phénomène	Symbole
Chute de pierres, de blocs et éboulements	Faible	P1
	Moyen	P2
	Fort	P3
	Majeur	P4
Glissements de terrain	Faible	G1
	Moyen	G2
	Fort	G3
	Majeur	G4
Erosion (érosion de berges, ravinement)	Faible	E1
	Moyen	E2
	Fort	E3
	Majeur	E4

Tableau 35 : Codification des aléas mouvements de terrain selon l'intensité

Intensité du phénomène	Niveau d'aléa	Exemple de types de zones	Echelle à laquelle l'aléa peut être traité
si un phénomène d'intensité 1 et/ou un phénomène d'intensité 2	Faible à modéré	P1, G1, P1G1, P2, G2, G2P1, P2G1	Echelle de la parcelle individuelle
si plus d'un phénomène d'intensité 2	Moyen	P2G2, E2G2, E2P2	Echelle du versant ou du regroupement de propriétaires
si au moins un phénomène d'intensité 3	Elevé	P3, E3, G3 et toute combinaison comprenant un de ceux-ci	Parades techniques difficiles ou coûteuses
si au moins un phénomène d'intensité 4	Très élevé	P4, E4, G4 et toute combinaison comprenant un de ceux-ci	Pas de parade technique (financièrement envisageable pour des projets « classiques »)

Tableau 36 : Caractérisation du niveau d'aléa mouvements de terrain en fonction de l'intensité du phénomène

7.2. EVOLUTION DANS LA QUALIFICATION DE L'ALEA MVT

La méthodologie actuelle, déjà simplifiée depuis quelques années, présente encore quelques contraintes d'utilisation et de compréhension notamment dans la définition de l'aléa MVT à partir des 3 phénomènes étudiés et dans la définition des « codes degrés ».

L'analyse menée repose sur l'exploitation des guides nationaux pour la réalisation des PPR et les récentes réflexions dans la perspective de leur révision (analyse et points clés de la DGPR suite au comité technique n°1, courrier du 30 septembre 2015). Ces récentes réflexions (menées par les divers organismes en charge de l'élaboration des PPR sur le territoire français) s'appuient sur les pratiques menées et proposent des perspectives d'évolutions.

Les principaux points qui suivent ressortent de cette analyse.

7.2.1. Règles actuellement appliquées à La Réunion et difficultés afférentes

Sur les cartes, 5 niveaux d'aléa sont représentés par une couleur spécifique, ce qui peut être considéré comme important :

- nul à très faible,
- faible à modéré,
- moyen,
- élevé,
- très élevé.

Dans un souci de transparence, est systématiquement représenté sur les cartes d'aléa le niveau de l'intensité de chaque type de phénomène permettant d'évaluer le niveau d'aléa dans une zone. Toutefois, dans la mesure où le niveau d'intensité ne correspond pas automatiquement au niveau d'aléa (les règles adoptées intègrent la superposition de plusieurs phénomènes qui peuvent s'ajouter), il s'avère que cet indigage de l'intensité a tendance à complexifier la compréhension des cartes pour un non spécialiste ;

Le croisement de plusieurs phénomènes de mouvements de terrain (chutes de bloc, glissement, érosion) est actuellement adopté pour mieux intégrer la multiplicité de l'exposition aux risques. Cependant, cette méthode est souvent jugée trop complexe : délicate à appliquer et difficile à comprendre ;

7.2.2. Que disent les guides nationaux ?

Le guide PPR spécifique aux mouvements de terrains, fort du constat qu'il est très délicat de qualifier un phénomène d'instabilité de pentes par une notion de fréquence (contrairement aux phénomènes d'inondations, de houle ou de vent), accepte que le critère d'intensité ou d'impact sur un bâti « standard » permette à lui seul de qualifier l'aléa mouvement de terrain ;

Les guides (1999) n'exigent pas que soit reportée sur les cartes d'aléa l'indication de la nature du phénomène et son intensité. Un code couleur peut suffire à représenter l'aléa mouvements de terrains par son niveau.

7.2.3. Que disent les récentes réflexions du « cotech n°1 » (2014) analysées par la DGPR (2015) ?

Les propositions pour améliorer la traçabilité dans les démarches PPR sont :

- de conserver une approche « multi-aléas » dans les territoires montagneux du fait de l'interaction des phénomènes naturels ;
- d'établir une carte de facteurs, une carte des scénarios (fréquent, « centennal » et rare) par phénomène naturel et une carte d'aléa synthétique (ou résultante pour les scénarios fréquent et standard PPR). Pour les cartes par phénomène il est proposé de suivre la méthode C2PN (cartographie pondérée des phénomènes naturels), issue du RTM, présentée en Annexe 5, qui permet de définir, par un jeu d'indice et d'exposant, le couple « intensité/periode de retour » ou « activité présente / activité maximale » et d'intégrer la prise en compte des ouvrages de protection existants dans la qualification du phénomène.

7.2.4. Propositions d'améliorations pour les PPR de La Réunion

La démarche C2PN pour l'indiçage (ou « étiquetage ») des aléas n'est pas retenue pour le moment du fait de la complexité qu'elle engendre dans son application au regard de la taille des communes du territoire réunionnais et de la difficulté de compréhension pour les utilisateurs (collectivité, particuliers). L'élaboration de la cartographie des aléas MVT sur une commune « test » pourra être envisagée à l'avenir suivant ce principe.

La simplification du niveau d'aléa « faible à modéré » à « faible » est proposée pour faciliter la compréhension des usagers.

La carte des phénomènes historiques MVT (annexe du PPR) sera complétée par l'insertion des autres principaux « facteurs » utilisés pour la qualification des aléas (principe d'une carte des « facteurs » suggérée par le « CoTech n°1 »), comme :

- La carte géologique en fond de carte ;
- La représentation des principaux escarpements (zone de départ de blocs) et principaux indices de phénomènes anciens ou actifs (indice de recul érosifs, zones de badlands, niche d'arrachement, zone d'éboulis actifs, etc.) ;
- Les courbes de niveaux issues du MNT ;

Etant donnée la proposition de méthodologie pour la définition de chaque aléa MVT (érosion, chute de blocs, glissement), suivant une matrice combinant la probabilité d'occurrence et l'intensité, l'affichage de la seule notion d'intensité dans l'indiçage pour qualifier les différentes zones d'aléa ne semble plus appropriée et peut dorénavant prêter à confusion. Dans les secteurs concernés par plusieurs aléas, le niveau d'aléa le plus élevé sera prédominant pour la définition du niveau d'aléa « résultant ». Ainsi la définition du niveau d'aléa par le croisement des intensités de chaque aléa, comme établi actuellement, sera revue en considérant le niveau de chaque aléa :

Niveau d'aléa des phénomènes naturels cartographiés	Niveau d'aléa résultant	Exemple de types de zones	Potentiel de dommages sur des enjeux bâtis (existants ou non)
si au moins un aléa faible	Faible	E1, P1, G1 et toute combinaison comprenant un de ceux-ci	Pas de dommage au gros œuvre Pas ou peu de dommage aux éléments de façades
si au moins un aléa moyen	Moyen	E2, G2, P2, et toute combinaison comprenant un de ceux-ci	Domage au gros œuvre sans ruine. Intégrité structurelle sollicitée
si au moins un aléa élevé	Elevé	P3, E3, G3 et toute combinaison comprenant un de ceux-ci	Domage important au gros œuvre. Ruine probable. Intégrité structurelle remise en cause.
si au moins un aléa très élevé	Très élevé	P4, E4, G4 et toute combinaison comprenant un de ceux-ci	Destruction du gros œuvre Ruine certaine Perte de toute intégrité structurelle

Tableau 37 : Définition du niveau d'aléa MVT résultant en fonction des différents aléas caractérisés

8. Prise en compte des ouvrages de protection existants

8.1. CONSIGNES NATIONALES

Les échanges lors du comité technique n°2 dans le cadre de la révision des guides PPR en montagne (cf. courrier du 30 septembre 2015 du MEDDE intégrant les points clés et les synthèses des différents groupes de travail (CoTechs 1, 2 et 3) pour la révision des guides méthodologiques relatifs à l'élaboration des PPR en montagne) ont permis d'établir :

- les règles d'exception au principe général d'inconstructibilité derrière les ouvrages de protection existants (définition d'un logigramme, cf. Illustration 47) ;
- une analyse multicritères pour chaque type d'ouvrage de protection (face aux différents aléas possibles en montagne) qui permet d'évaluer au cas par cas la possibilité de dérogation au principe général d'interdiction. Les trois composantes principales de cette analyse sont : la capacité structurelle, la capacité fonctionnelle et la sûreté de fonctionnement.

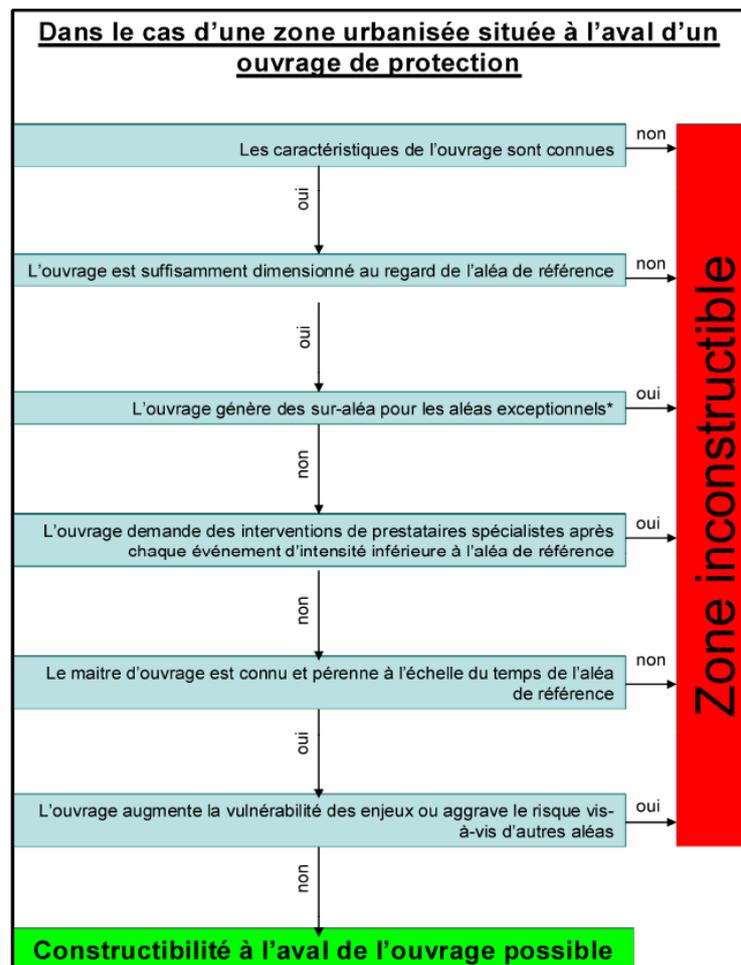


Illustration 47 : Logigramme proposé par le MEDDE en 2015 définissant les conditions nécessaires pour une constructibilité à l'aval d'un ouvrage de protection existant

La prise en compte des ouvrages de protection existants concerne **uniquement les zones urbanisées situées à l'aval de ces derniers** et pour lesquels l'analyse précédente permet de déroger au principe d'inconstructibilité.

De plus, en cas de dérogation possible, le secteur urbanisé concerné devra satisfaire aux conditions suivantes :

- présence de « dents creuses » au sein de zones urbanisées ;
- « intérêt stratégique » pour la collectivité d'une urbanisation dans la continuité de l'existant.

La prise en compte des ouvrages de protection intègre la notion d'efficacité qui est évaluée à partir :

- **Capacité structurelle** : l'ouvrage est dimensionné pour résister à l'aléa de référence
- **Capacité fonctionnelle** : effet de l'ouvrage sur le phénomène permettant une diminution des niveaux d'intensité à l'aval, au niveau de la zone d'enjeu protégé
- **Sûreté de fonctionnement du système** (ouvrage et gestionnaire) :
 - **Fiabilité** : capacité de l'ouvrage à rester en service (durée de vie de l'ouvrage) ;
 - **Maintenabilité** : capacité du gestionnaire à détecter des désordres et à remettre en service l'ouvrage (conditions d'entretien) ;
 - **Disponibilité** : capacité du gestionnaire à maintenir le dispositif dans son état de fonctionnement ;
 - **Sécurité** : capacité du système à éviter de produire des événements critiques (s'assurer que l'ouvrage n'entraînera pas d'augmentation de l'aléa sur les zones à enjeux à l'aval, ni de sur-aléa).

Le CoTech n°2 propose une analyse pour chaque type d'ouvrage, face aux différents aléas et définit les possibilités d'exception au principe d'inconstructibilité. Cette analyse, s'appuie sur une cotation et une pondération de chaque paramètre qualifiant l'efficacité de l'ouvrage considéré. Cette approche donne une tendance pour chaque type d'ouvrage sans qu'il s'agisse d'une note définitive (cf. Illustration 48).

Cette analyse générale montre que certaines familles d'ouvrages sont à exclusion de possibles dérogations dans l'analyse de situation où ils peuvent être rencontrés comme par exemple :

- ↳ Les ouvrages en filets (déflecteurs, écrans) face au risque de chute de bloc, du fait notamment de leur durée de vie limitée (25 ans) et des réparations nombreuses nécessaires même pour des événements inférieurs à l'aléa de référence ;

A contrario, certains ouvrages peuvent plus facilement être considérés favorablement dans l'optique d'une constructibilité à l'aval de ces derniers comme par exemple :

- ↳ Les merlons en pied de versant qui offrent fréquemment une bonne efficacité sans nécessité d'entretien ou d'intervention en urgence pour garantir leur niveau de fonctionnement et dans la mesure où les critères d'efficacité sont satisfaits ;
- ↳ Les travaux de substitution, de terrassement dans des zones soumises à des risques de glissements superficiels où ces travaux permettent de stabiliser voire de supprimer l'aléa.

Aléa	Actif / Passif	Efficacité	Capacité structurelle /8	Capacité fonctionnelle /8	Sûreté de fonctionnement/8				Total /24
					Maint. /2	Fiabili. /2	Dispo. /2	Sécur. /2	
Chute de pierre (P)	P	Merlon	6	8	1,5	2	2	1,5	21
	P	Filets PP	6	4	0,5	0	0,5	1	12
	A	Ancrage	2	8	1	0,5	1,5	1	14
	A	Purges	8	4	1	0,5	1	2	16,5
Torrentiel (T)	P	Digue T	6	4	1,5	1	1,5	2	16
	P	Plage	6	8	1,5	2	1,5	2	21
	P	Remblai	8	8	2	1,5	2	1,5	23
	P	P.berges	8	8	1,5	1,5	1,5	1,5	22
	P	Canalisation couverte	4	2	1	1	1	1	10
	A	Seuils	8	8	1,5	1,5	1,5	2	22,5
Avalanches (A)	P	Tournes	6	8	1,5	2	1,5	2	21
	P	Digues A	6	6	1,5	2	1	1,5	18
	A	Filets- Rat.	6	6	1,5	1,5	0	2	17
	A	Banquettes	2	2	1,5	0,5	0,5	1,5	8
	A	Ouv.vents	8	4	0	1	2	1,5	16,5
	A	Déclench	8	2	0	0,5	2	0,5	13
Glissement (G)	A	Drainage	2	8	1,5	1	1,5	2	16
	P	Soutèn.	2	6	1,5	1	1,5	2	14
	A	Substitu.	2	8	2	1,5	2	2	17,5

Il ressort quatre types de situation.

- Il y a une note égale à 0 pour l'un des critères de sécurité de fonctionnement ; par exemple lorsque l'ouvrage n'a jamais une durée de vie compatible avec l'aléa de référence (fiabilité jamais possible). L'ouvrage ne permettra jamais de dérogation..... ■
- La note totale est inférieure à 15/24 mais sans aucun 0, la dérogation est rarement possible. ■
- La note totale est comprise entre 15/24 et 19/24, la dérogation est parfois possible..... ■
- La note totale est égale ou supérieure à 20/24 et alors la dérogation est souvent possible..... ■

Illustration 48 : Tableau de qualification de l'efficacité des ouvrages de protection dans l'optique d'une possibilité de construction à l'aval (groupe de travail CoTech n°2)

8.2. APPLICATION PROPOSEE

8.2.1. Contexte de La Réunion

D'une manière générale à La Réunion, en zone d'aléa élevé MVT, peu d'ouvrages de sécurisation à l'amont de zones habitées existent sur le territoire. Les ouvrages existants sont principalement mis en œuvre sur le territoire pour la protection des enjeux routiers (cf. ouvrages de la Route du Littoral par exemple). Les zones bâties exposées en pied de versant pouvant générer des chutes de blocs, sont peu sécurisées (à l'instar des secteurs de l'ilet Furcy à Saint-

Louis et du secteur de La Passerelle à Saint-Joseph) mais aussi assez peu nombreuses au regard de la densité d'urbanisation sur le territoire de La Réunion. En effet, souvent ces zones caractérisent des lits de ravines, sans accès et avec peu d'espace disponible pour l'implantation de zones urbaines.

8.2.2. Principes méthodologiques retenus

L'analyse établie à l'échelle nationale dans le cadre de la révision des guides PPR en montagne, sera considérée à deux échelons de l'élaboration des PPR des communes de La Réunion :

- dans la cartographie de l'aléa MVT ;
- sa traduction réglementaire.

La prise en compte d'ouvrages existants sur le territoire sera effectuée suivant l'analyse décrite précédemment et détaillée dans le compte rendu du CoTech n°2.

Les modifications de zonage de l'aléa MVT (prise en compte de l'ouvrage dans la cartographie) seront possibles dans la mesure où toutes les conditions de dérogation (logigramme et analyse multicritères de l'efficacité de l'ouvrage) seront satisfaites (capacité, entretien, durée de vie).

En zone d'**aléa élevé MVT**, la réalisation d'ouvrage de protection ne doit pas permettre le développement d'enjeux à l'aval. L'analyse de l'efficacité de l'ouvrage pourra au cas par cas justifier un déclassement en aléa moyen MVT à l'aval de ce dernier tout en conservant un principe d'inconstructibilité au niveau réglementaire (**traduction en R2**).

Cela traduit les cas d'ouvrages de protection de type merlon implantés en pied de versant qui peuvent limiter toute atteinte à l'aval sur la période de référence (selon l'analyse de leur efficacité). Le cas échéant, l'aléa élevé MVT peut être limité en pied de versant à l'emprise de l'ouvrage avec le maintien d'un aléa moyen MVT à l'aval qui sera traduit en zone inconstructible (R2). Cette « bande » d'aléa moyen MVT, de largeur variable selon l'appréciation de l'expert (10 m minimum), à l'aval de l'ouvrage, permet également de maintenir un espace suffisant pour les opérations d'entretien.

En zone d'**aléa moyen MVT**, la réalisation d'ouvrage de protection pourra permettre le développement d'enjeux à l'aval, voire à l'amont pour les cas de stabilisations de terrain. Pour les ouvrages jugés efficaces sur la période de référence (type soutènement face à des problématiques de glissement superficiel), le zonage au droit des terrains à l'aval initialement cartographiés en aléa moyen pourra être précisé. De plus, la réalisation de ces ouvrages confirme la capacité de sécurisation des terrains concernés dans l'optique de leur aménagement (construction ou autre). La traduction réglementaire de ces zones sécurisées sera dotée d'un principe de constructibilité (**zone B2u**, cf. chapitre 9).

Dans le cas contraire où le logigramme ou l'analyse multicritères ne permet pas d'envisager une possibilité de construction, la notion d'inconstructibilité sera considérée au niveau du zonage réglementaire (**aléa moyen MVT traduit en R2**).

Enfin, pour les contextes particuliers suivants, la présence d'ouvrages de sécurisation ne sera pas considérée dans l'élaboration du zonage de l'aléa MVT, ni dans sa traduction réglementaire :

- la problématique de « recul de rempart » : quelle que soit la configuration du rempart et son évolution historique constatée ou non sur la zone considérée, la réalisation

d'éventuels ouvrages ponctuels de confortement en partie haute ou basse du rempart n'auront pas d'incidence sur l'occurrence des phénomènes de grande ampleur pouvant survenir sur la période de référence du PPR considérée (100 ans) et donc sur la cartographie de l'aléa MVT.

- Les phénomènes d'éboulement ou de glissement de grande ampleur, où par définition, la notion d'intensité de tels évènements se caractérise par l'absence de parades techniques possibles pour s'en prémunir (cf. Guide national PPR, risque mouvements de terrain, MATE-METL, 1999).

9. Traduction réglementaire de l'aléa moyen MVT

Nota bene : la traduction réglementaire des PPR est de la responsabilité de l'état (notamment les services de la DEAL en charge des procédures PPR sur le territoire réunionnais). Le BRGM a contribué à la présente réflexion sur les évolutions proposées concernant la traduction réglementaire de l'aléa moyen mouvements de terrain, au regard de son implication dans la réalisation des PPR à La Réunion depuis plus de 10 ans.

9.1. PRINCIPES REGLEMENTAIRES

Conformément à l'article L.562-1 du code de l'environnement, le PPR a pour objet, en tant que de besoin :

- 1° – de délimiter les **zones exposées aux risques** en tenant compte de la nature et de l'intensité du risque encouru, d'y interdire tout type de construction, d'ouvrage, d'aménagement ou d'exploitation agricole, forestière, artisanale, commerciale ou industrielle ou, dans le cas où des constructions, ouvrages, aménagements ou exploitations agricoles, forestières, artisanales, commerciales ou industrielles pourraient y être autorisés, prescrire les conditions dans lesquelles ils doivent être réalisés, utilisés ou exploités ;
- 2° – de délimiter les zones qui ne sont **pas directement exposées aux risques** mais où des constructions, des ouvrages, des aménagements ou des exploitations agricoles, forestières, artisanales, commerciales ou industrielles **pourraient aggraver des risques ou en provoquer de nouveaux** et y prévoir des mesures d'interdiction ou des prescriptions telles que prévues au 1°.

A La Réunion, les PPR « multi-aléas » (inondation et mouvements de terrain) approuvés ne prévoient pas de délimitation de zones non directement exposées.

Parmi les zones exposées aux risques, les PPR distinguent :

- des **zones très exposées** concernées par un aléa fort inondation et/ou à un aléa très élevé, élevé ou moyen mouvements de terrain : zones inconstructibles, appelées **zones rouges (R)** ;
- des **zones moyennement ou faiblement exposées** concernées par un aléa inondation moyen ou faible, et/ou un aléa moyen (dans certaines conditions) mouvements de terrain, appelées **zones bleues (B)** : zones constructibles avec prescriptions ;

Ponctuellement, des **zones très exposées** concernées par un aléa fort inondation et situées dans les centres-villes urbains sont également distinguées. Ces zones nécessitent une évolution minimale du bâti existant, qui est permise sous conditions, notamment d'évolution vers une diminution des risques auxquels sont exposées les personnes. Zones appelées **zones R1B1**. Ces zones ont été définies en accord avec la circulaire du 24 avril 1996 relative aux espaces urbains anciens, afin de concilier exigences de prévention des risques naturels et nécessité d'assurer la continuité de vie et le renouvellement urbain de centre-ville constitué ;

Il ressort de ces dispositions réglementaires générales la possibilité de traduction de l'aléa moyen MVT en zone bleue ou en zone rouge au zonage réglementaire du PPR selon certaines règles.

La traduction réglementaire de ces zones d'aléa moyen MVT ainsi que la définition des prescriptions réglementaires qui s'y appliquent, concentrent donc les attentions depuis plusieurs années lors des phases réglementaires des PPR et jusqu'à l'approbation de ces derniers.

9.2. RAPPEL DE LA PROBLEMATIQUE DE LA TRADUCTION REGLEMENTAIRE DE L'ALEA MOYEN MVT

9.2.1. De 2004 jusque mi-2011

La cartographie réglementaire attachée aux plans de prévention des risques « mouvements de terrain » établis à La Réunion transcrivait systématiquement les zones d'aléa moyen en zone rouge (R2 ou R2b), dont le principe réglementaire est l'inconstructibilité.

Ces zones d'aléa moyen correspondaient pour chacun des quatre phénomènes rencontrés à La Réunion (éboulements, chutes de pierres, glissement de terrain et érosion) à des secteurs de transition entre l'aléa modéré ou faible et l'aléa fort ou très fort. Il s'agissait déjà à l'époque de secteurs sur lesquels les mesures de prévention dépassent généralement le cadre de la parcelle individuelle et relèvent donc d'une maîtrise d'ouvrage collective ou des secteurs à relief déjà protégés (la protection pouvant, le cas échéant, être constituée par l'ensemble des protections individuelles mises en œuvre par les constructions existantes).

Le principe d'inconstructibilité de ces zones se heurtait à l'incompréhension de la population et avait justifié la majorité des observations recueillies en 2010 et 2011 au travers des enquêtes publiques des PPR mouvement de terrain voire multirisques approuvés (Entre-Deux, Cilaos, Plaine des Palmistes). De plus, la transcription réglementaire faite localement n'intégrait pas la distinction figurant dans les différents guides nationaux d'élaboration des PPR préconisant un traitement différencié des zones selon les enjeux communaux identifiés (secteurs urbanisés, centre urbain, projets majeurs). Dès lors, la concertation Etat/commune qui trouve sa pleine justification dans le croisement aléa / enjeux et préfigure la cartographie réglementaire, s'en trouvait réduite.

9.2.2. De mi-2011 à mi-2015

Entre 2010 et 2011, une réflexion globale menée par le BRGM et la DEAL Réunion relative à l'aléa moyen mouvement de terrain à La Réunion a été effectuée et portait notamment sur l'état des pratiques réglementaires à La Réunion dans le cadre d'une analyse comparée avec d'autres départements métropolitains voire ultra-marins. L'enjeu de cette analyse était d'importance puisqu'une superficie d'environ 1800 ha dans les zones U et AU de 21 communes avait été identifiée à l'époque comme directement concernée par l'aléa moyen MVT à La Réunion. La tension sur le foncier disponible et la compétition entre les usages des sols justifiaient cette étude afin que soient explorées toutes les possibilités de densification ou d'extension raisonnée dans le respect de la sécurité des biens et des personnes.

Fin juin 2011, certaines propositions issues de cette réflexion menée ont été retenues par la DEAL Réunion (représentation graphique des aléas mouvements de terrain, réduction de 6 à 4 du nombre de niveaux d'aléa, hors aléa nul à très faible) ainsi que diverses dispositions issues de la jurisprudence nationale qui pouvaient être appliquées sans approfondissement complémentaire aux PPR en cours d'élaboration. Il a surtout été retenu la possibilité de rendre constructibles sous conditions les zones d'aléa moyen sur les secteurs à enjeux d'aménagement.

- ↳ Extrait du guide méthodologique PPR Mouvements de terrain en vigueur : « *Les zones d'aléa moyen, où les parades dépassent le cadre de la parcelle et relèvent généralement d'un maître d'ouvrage collectif, peuvent être constructibles sous réserve de pouvoir identifier ce maître d'ouvrage ou sous réserve que ces zones soient déjà protégées. Ce raisonnement peut s'appliquer pour traiter le cas des « dents creuses » ou de certains espaces interstitiels en milieu urbain notamment dans les centres urbains mais en aucun cas pour des zones vierges »*. Il est toutefois nécessaire de continuer à afficher le type d'exposition au risque du secteur concerné et de ne pas nier ni l'existence ni le niveau de l'aléa.

Compte tenu de la géologie et de la topographie particulière de La Réunion, il a été proposé à l'époque d'exclure les zones classées en aléa moyen mouvements de terrain (éboulement de terrain) situées en tête des remparts : en effet, aucune parade individuelle ou collective ne peut éliminer cet aléa à cinétique rapide et à conséquences potentiellement élevées sur la sécurité des personnes.

Concernant la définition et les limites des zones urbaines dites à enjeux où l'assouplissement réglementaire était recherché, il a été fait le constat à l'époque que les règlements PPR des départements pris en référence s'appuyaient soit sur la notion de PAU (parties actuellement urbanisées) soit, lorsque la commune considérée dispose d'un POS/PLU, sur les zones U et AU des documents d'urbanisme en vigueur. Cette référence a alors posé plusieurs difficultés :

- l'assujettissement du zonage réglementaire du PPR à un zonage issu d'un document d'urbanisme auquel il s'impose en tant que servitude publique ;
- la délimitation entre zones U et AU n'est pas toujours représentative du mode d'occupation réelle du foncier offrant la possibilité, sous réserve d'expertise ponctuelle dans le cadre de l'élaboration du PPR, d'ouvrir à la construction certains secteurs classés en zone AU ;
- à l'inverse, l'existence de situations exceptionnelles, notamment en bordure des remparts les plus élevés sur certaines communes de la Réunion qui justifie ponctuellement que ne soient pas ouverts à la construction certaines zones classées en zone U.

- ↳ Les guides méthodologiques PPR préconisent de retenir la notion d'espaces urbanisés par référence à l'article 111-1-4 du code de l'urbanisme dont les modalités d'application sont fixées par la circulaire 96-32 du 13 mai 1996 : " La réalité physique de l'urbanisation s'apprécie au travers d'un faisceau d'indices : nombre de constructions existantes, distance du terrain en cause par rapport à ce bâti existant, contiguïté avec des parcelles bâties, niveau de desserte par les équipements. L'ensemble de ces critères a été dégagé par la jurisprudence relative à la notion des parties actuellement urbanisées introduite en 1983 où s'applique le principe de constructibilité limitée dans les communes non couvertes par un P.O.S. "

La proposition de la DEAL, appuyée par le BRGM, a alors consisté en juin 2011 à retenir le principe d'une constructibilité sous condition des Secteurs Urbains à Enjeux (SUE) situés en aléa moyen MVT (hors éboulements de rempart), ces espaces étant constitués des espaces urbanisés (cf. définition ci-dessus) et des secteurs sur lesquels la commune a confirmé l'existence de projets d'aménagement sous maîtrise d'ouvrage collective. Ces espaces urbains à enjeux sont délimités dans le cadre de l'élaboration du PPR et de la concertation avec la commune ; la carte des enjeux figurant dans le projet de PPR sert de référence à l'instruction ultérieure des demandes d'autorisations d'urbanisme. Cette démarche avait également pour finalité de donner un sens à la concertation Etat / Communes en impliquant la commune et les

élus dans le processus d'élaboration des PPR et en leur faisant partager les options stratégiques du PPR.

La condition posée a été fixée comme la production à l'appui de la demande de permis de construire de l'attestation visée à l'article R 431-16 alinéa e) du code de l'urbanisme par laquelle l'architecte ou un expert certifie la réalisation d'une étude géotechnique spécifique et la prise en compte des dispositions ainsi définies dans la conception du projet.

Le critère « jugé sécurisable » a été adopté en septembre 2011 quand les critères de détermination des secteurs urbains à enjeux sécurisables (zones appelées « SUES ») ont été définis pour enrichir les démarches PPR du Port (approbation mars 2012), Saint-Denis (approbation octobre 2012), La Possession (approbation novembre 2012) et Trois-Bassins (approbation décembre 2013).

Sur ces bases, les critères suivants de détermination des SUES, et par croisement avec les zones d'aléa moyen MVT de la zone réglementaire B2u, ont donc été figés en septembre 2011 et repris dans le guide d'élaboration des PPR naturels à La Réunion d'août 2012 :

1) Les enjeux relatifs aux secteurs urbanisés (cf. critères circulaire 13 mai 1996) :

- nombre de constructions existantes ;
- distance du terrain en cause par rapport à ce bâti existant ;
- contiguïté avec des parcelles bâties, niveau de desserte par les équipements.

2) Les enjeux relatifs à l'aménagement (cf. guide méthodologique PPR MVT et réflexions locales) :

- cohérence avec les orientations du SAR ; les secteurs à enjeux considérés doivent nécessairement se situer dans les espaces urbains de référence ou dans les zones préférentielles d'urbanisation ;
- existence d'un projet d'aménagement (ZAC notamment) et d'une maîtrise d'ouvrage identifiée ;
- niveau d'avancement de la procédure d'autorisation de ce projet d'aménagement ;
- intérêt collectif de l'aménagement et existence d'une alternative foncière permettant la réalisation ;
- cohérence avec les autres documents d'urbanisme (Scot et POS/PLU).

3) Les enjeux relatifs à la sécurité des biens et des personnes (cf. réflexions locales) :

- capacité technique à protéger la zone ;
- coût de la protection proportionné au projet ;
- vulnérabilité des équipements projetés au regard des risques (liste d'établissements sensibles à exclure).

Sur ces bases, la définition précise des SUES a été établie par le BRGM pour les PPR du Port, de La Possession, de Trois-Bassins suivant la méthodologie itérative suivante :

1. recouplement cartographique à partir des données d'urbanisme de la commune : croisement des zones U et « AU » du POS/PLU de la commune ;
2. le périmètre ainsi obtenu est corrigé pour éliminer toutes les zones U+AU non comprises dans le périmètre de la zone préférentielle d'urbanisation (ZPU) du Schéma d'Aménagement Régional (SAR) de novembre 2011 ;

3. le périmètre ainsi obtenu est corrigé pour éliminer toutes les zones jugés non sécurisables dans le cadre d'un projet d'aménagement, sur la base des principaux critères suivants :
- la capacité technique à protéger la zone considérée doit être garantie ;
 - le coût de la protection doit être proportionné au projet éventuel de la zone considérée (les principaux secteurs tels que les zones en recul de tête de rempart sont exclus).

À partir de ce périmètre obtenu par recoupements cartographiques et par un travail d'expertise du BRGM sur les critères de sécurité, la délimitation précise des SUES prend ensuite en compte les enjeux suivants :

- les projets d'aménagement ;
- la densité de l'urbanisation existante (suffisante pour garantir une sécurisation de la zone considérée, distance de la zone considérée par rapport au bâti existant limitée, niveau de desserte par les réseaux et équipements suffisant).

9.2.3. Evolutions mises en œuvre sur les PPR soumis à la concertation en 2015

Concernant la couche ZPU du SAR, il a été successivement mis en œuvre les adaptations suivantes :

- prise en compte de la différence d'échelle d'élaboration de ces différents périmètres (ZPU au 1/100 000^{ème} et U+AU au 1/5 000^{ème}). Dans ce cadre, le périmètre de la ZPU est considéré depuis le PPR de Trois-Bassins comme un « bandeau » de 100 m de large pour tenir compte de son imprécision relative à l'échelle de travail (1/5 000^{ème}) ;
- suppression de la couche ZPU du SAR comme élément d'entrée SUES pour les projets de PPR des communes de :
 - Saint-Paul mi-2013 (PLU récent de 2012 ayant tiré les conclusions de sa conformité avec la SAR de 2011) ;
 - Saint Leu en octobre 2014 (enjeux urbains du bâti existant et des projets d'urbanisation future, identifiés au sein des zones U+AU situés en dehors du périmètre ZPU, représentant une surface conséquente >25%, localisés notamment le long de la RD3 ou dans le secteur des Colimaçons) ;
 - Saint-Pierre en décembre 2014 (même si enjeux urbains identifiés au sein des zones U+AU du PLU de novembre 2005 très largement situés dans le périmètre ZPU, SAR précisant dans ses orientations et dans ses prescriptions qu'il est visé un cantonnement de la tâche urbaine en limitant les extensions futures autorisées dans la ZPU, au-delà de celles d'ores et déjà identifiées dans les zones AU des PLU) ;
 - Sainte-Suzanne en septembre 2014 et l'Etang-Salé en février 2015.

9.2.4. Problèmes rencontrés

Concernant les documents d'urbanisme de La Réunion, un certain nombre d'entre eux sont très anciens et ne reflètent plus l'urbanisation existante sur la commune, ce qui ne va pas sans poser des problèmes de constructions illégales du strict ressort de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire. Pour illustrer, l'analyse SUES s'appuie sur :

- le PLU de Saint-Pierre de novembre 2005 ;

- le POS de Sainte-Suzanne de mai 2001 ;
- le POS de l'Etang-Salé de février 1999 ;
- le PLU de Saint Leu de février 2007 ;
- le PLU de Saint-Paul de septembre 2012.

Par ailleurs, des questions sont désormais posées par des particuliers sur des déclassements de parcelles promises et à opérer par la commune lors de révision de son document d'urbanisme, induisant des questions de temporalité. La mise en œuvre à l'avenir d'une procédure de modification pour y pallier a été esquissée (cf. enquête publique en cours et questionnement du commissaire-enquêteur sur le projet de PPR de Saint Leu) mais n'est pas une solution pérenne. A contrario, est mis en avant dans les démarches de PPR un effort de « mise en cohérence » avec le PLU pour les zones identifiées comme constructibles par ce document.

Concernant le critère de densité pour l'urbanisation existante, il est délicat à définir en l'absence de critères quantitatifs et de méthode associée, celle-ci faisant partie du dire d'expert.

Les fiches d'opération pour les projets d'aménagement en zone « A Urbaniser », enrichies depuis peu par des éléments financiers demandés, ne sont que partiellement ou pas du tout remises, avec à titre d'exemple au 1^{er} juin 2015 :

- Saint Leu : 2 fiches pour une 15 d'opérations citées par la commune ;
- Saint-Paul : 0 fiche pour une 50 d'opérations citées par la commune ;
- Trois-Bassins : 0 fiche pour une 10 d'opérations citées par la commune ;
- Saint-Pierre : 6 fiches remises pour 6 opérations citées par la commune ;
- Etang-Salé : 0 fiche pour une opération citée par la commune ;
- Sainte-Suzanne : 0 fiche pour une 10 d'opérations citées par la commune ;

et a fortiori non communiquées dans le dossier d'enquête (cf. questionnements de février 2015 du commissaire-enquêteur du projet de PPR de Sainte-Suzanne).

Cet état de fait, tout en fragilisant juridiquement le PPR approuvé, induit une iniquité de traitement entre communes, qui pourrait être soulevé juridiquement en contentieux, et renvoi in fine au dire d'expert sur la capacité technique supposée à protéger la zone.

L'aléa moyen inondation est traduit réglementairement en constructibilité sous conditions (B2) alors que l'aléa moyen MVT est parfois traduit en inconstructible (R2), induisant de fait des problèmes de compréhension des citoyens et porteurs de projet quant aux différences de traduction vis à vis d'un aléa qualifié de moyen.

Enfin, la sécurisation jugée possible, ou non, par le BRGM est assumée par l'Etat lors de l'approbation du PPR avec la réglementation ad'hoc retenue (B2U et R2), interrogeant sur la fragilité juridique du dire d'expert en l'absence d'étude géotechnique fine à la parcelle, nonobstant les questionnements posés ci-dessus.

- ↳ **Une évolution et une précision des critères de traduction réglementaire de l'aléa moyen MVT sont donc envisagées avec une mise en œuvre progressive dans les démarches PPR en cours.**

9.3. RAPPEL DES PRATIQUES ET CONSIGNES NATIONALES

9.3.1. Pratiques dans les autres territoires

Dans le cadre d'un appui technique et méthodologique assuré par le BRGM à la collectivité territoriale de Polynésie, une analyse comparative des pratiques réglementaires en PPR concernant l'aléa élevé et l'aléa moyen MVT, dans les départements et territoires d'outre-mer (Polynésie, La Réunion, La Guyane, La Guadeloupe, Mayotte, La Martinique), a été effectuée en 2015.

L'analyse fait dans cette étude (Nachbaur et al., 2015)¹⁴ a mis en avant :

- **La Réunion est le seul territoire d'outre-mer où le cas général est l'inconstructibilité en aléa moyen MVT. En Guadeloupe, les zones à enjeux faible dans les projets de PPR sont également inconstructibles..**
- La constructibilité de projets nouveaux possible en zone d'aléa moyen MVT dans tous les départements et territoires d'outre-mer moyennant certaines préconisations et/ou obligations décrites ;
- La plupart des règlements associent la constructibilité en aléa moyen à la réalisation d'une étude technique préalable réalisée par un cabinet d'étude. Cependant, certaines constructions particulières sont dispensées d'étude technique obligatoire :
 - En Polynésie, les constructions « *comprenant 3 niveaux et moins* » (sous réserve de respecter des prescriptions techniques par défaut sécuritaire, énoncées dans le règlement) ;
 - A Mayotte, les constructions et les extensions d'une surface (SHON) inférieures à 100 m² ;
 - En Guyane, les constructions neuves de moins de 20 m² d'emprise au sol et les extensions de bâtiments existants de moins de 20 m² d'emprise au sol ;

Le contenu et les objectifs de l'étude technique exigée sont plus ou moins encadrés selon les règlements (extrait du rapport BRGM/RP-64947-FR) :

- En **Guadeloupe**, dans le règlement actuel, les constructions doivent faire l'objet « *d'une étude préalable et d'un schéma d'aménagement global* » afin de « *maitriser le risque mouvements de terrain à l'échelle du versant* ». Désormais, les réflexions sont en cours pour proposer, en zone d'enjeu modéré, une étude géotechnique est envisagée ;
- En **Polynésie**, l'étude demandée pour les constructions supérieures à trois niveaux, doit viser à « *définir les mesures de construction adaptées au projet et au site* ». L'étude est encadrée par :
 - « *une étude technique réalisée par un bureau d'étude compétent* » ;
 - plusieurs objectifs précisés dans le règlement.

¹⁴ **Nachbaur A., Stollsteiner P., Mompelat JM., Sedan O.** (2015). Plan de Prévention des Risques Naturels de la commune de Punaauia (Polynésie française). Appui technique et méthodologique. Rapport final. BRGM/RP-64947-FR, p. 91, 24 ill., 8 ann., CD.

- En **Martinique**, l'étude demandée n'est pas spécifique au niveau d'aléa moyen, puisque il est simplement demandé une « *étude géotechnique adaptée au niveau d'aléa permettant l'adaptation du bâtiment futur à la nature du terrain et la prise en compte de l'aléa mouvement de terrain* », commune à l'aléa faible ;
- En **Guyane**, une étude technique est demandée « *afin de définir les mesures de construction adaptées au projet et au site* ». Par ailleurs, les objectifs auxquels doit répondre l'étude sont précisés en distinguant le type de phénomène redouté.
- A La **Réunion**, l'étude technique préalable est très détaillée dans l'annexe 2 des règlements réunionnais. En résumé :
 - o étude géotechnique réalisée par un bureau d'étude spécialisé, conformément aux prescriptions de la norme NF P94-500 de novembre 2013 ;
 - o Au moment du dépôt du permis de construire ou d'aménager, une attestation établie par un architecte ou un expert agréé est exigée afin de s'assurer de la réalisation de cette étude préalable et de la conformité du projet avec ses prescriptions ;
 - o « *Selon le contexte géomorphologique, les caractéristiques du projet, son ampleur, les moyens techniques à mobiliser in situ, cette étude pourra être de type G1 (étude géotechnique préalable), G2 (étude géotechnique de conception) ou G5 (diagnostic géotechnique) selon la norme NF P94-500 de novembre 2013* » ;
 - o L'étude doit porter « sur l'ensemble du bassin de risque », définit précisément, de la même manière que dans le règlement de Mayotte.
- A **Mayotte**, l'étude technique demandée, détaillée au § I.2.5 du projet de règlement, doit viser à « *préciser les conditions dans lesquelles le projet sera rendu compatible avec l'aléa considéré* ». En résumé :
 - o étude géotechnique réalisée par un bureau d'étude spécialisé de type G11 de la norme NF P94-500 ;
 - o L'étude doit porter « sur l'ensemble du bassin de risque », bassin de risque défini précisément en Annexe 2 du règlement, de la même manière que dans le règlement de la Réunion ;
 - o Les objectifs auxquels doit répondre l'étude sont précisés ;
 - o Attestation certifiant la réalisation de cette étude exigée lors du dépôt du dossier de permis de construire

Sur le reste du territoire français, les règles généralement appliquées dans les PPR pour la traduction réglementaire de l'aléa moyen MVT sont les suivantes :

- dans les zones « hors enjeux » (A & N), une transcription de l'aléa moyen en zone rouge inconstructible ;
- dans les zones « à enjeux » (U & AU et éventuellement zones de développement futur), une transcription de l'aléa moyen en zone bleue constructible ;
- la constructibilité y est systématiquement assujettie à des prescriptions en matière d'urbanisme et de construction. La réalisation d'une étude géotechnique est le plus souvent exigée.

9.3.2. Consignes nationales

Les guides nationaux en vigueur (MATE et METL, 1999), donne les consignes suivantes en matière de traduction réglementaire :

- pas de règle imposée. Les guides fournissent uniquement des recommandations et constituent un ensemble de « bonnes pratiques » ;
- le guide général sur la réalisation des PPR annonce :
 - il est possible de différencier la transcription réglementaire selon la vocation des sols et la destination et l'usage des constructions ;
 - dans les zones à fort enjeux, la constructibilité peut être autorisée sous prescriptions, si le risque peut être totalement maîtrisé au préalable et sous réserve de ne pas l'aggraver et que les travaux de sécurisation soient clairement identifiables ;
- le guide spécifique PPR mouvements de terrains précise :
 - le zonage réglementaire est issu du croisement entre aléas et enjeux ;
 - les zones d'aléa moyen peuvent être constructibles sous réserve d'être déjà protégées et d'identifier un maître d'ouvrage collectif en charge de ces protections ;
 - néanmoins, dans la plupart des cas les secteurs non encore urbanisés doivent être préservés de l'urbanisation sauf si l'aléa est faible ;
 - dans les zones protégées la construction est envisagée si la maintenance des ouvrages de protection est garantie par une solution fiable et des ressources financières déterminées.

Ce dernier point renvoie aux récentes réflexions concernant la constructibilité derrière des ouvrages de protection existants (« cotech n°2 »).

Les récentes réflexions menées dans le cadre de la révision des guides PPR en montagne (Points clés retenus par la DGPR suite aux travaux du comité technique relatif à la doctrine réglementaire - cotech n°3) proposent les évolutions suivantes :

- Des prescriptions distinctes (règlement type) selon le type d'espaces considérés et par type de phénomène naturel cartographié et selon le niveau de l'aléa. Les différents espaces considérés sont les espaces urbanisés, les espaces naturels hors forestiers et les espaces forestiers ;
- **Seule la problématique de l'aléa « rocheux » (chute de blocs et éboulement) est dotée d'un principe d'inconstructibilité en zone d'aléa moyen dans les espaces naturels (forestiers ou non) pour les projets de construction nouvelle, d'établissements de secours, d'ERP, de campings et de travaux d'affouillement et d'exhaussement de sol) ;**
- **Dans les espaces urbanisés cartographiés en aléa moyen MVT, les projets de constructions nouvelles sont autorisés (avec prescriptions) pour tout type de phénomène considéré (érosion, glissement et chute de blocs).**

9.4. EVOLUTION REGLEMENTAIRE PROPOSEE

9.4.1. Principe

Sur la base des éléments présentés précédemment, il est proposé une évolution de l'approche B2u pour l'aléa moyen MVT **donc constructible avec prescriptions notamment sous la condition de réalisation d'une étude géotechnique**, sans mobilisation systématique du document d'urbanisme de la commune (potentiellement obsolète pour les zones urbaines ou à urbaniser lors de la procédure PPR) concernée par l'établissement du PPR lors de la phase de traduction réglementaire de l'aléa moyen MVT.

Plusieurs critères sont proposés pour la traduction réglementaire des zones **d'aléa moyen MVT** en zone **B2u** (principe de constructibilité) et à contrario celles qui seront traduites en **R2** (principe d'inconstructibilité) :

- Sur la base des récentes consignes nationales, les secteurs en espaces naturels (espaces forestiers ou non) concernés par des problématiques de chute de blocs et d'éboulement seront exclus de l'approche B2u et maintenus en zones rouge (R2), dotée d'un principe d'inconstructibilité. Ces zones concernent les terrains exposés situés en recul d'encaissement profond (problématique de recul de rempart) ainsi que les terrains situés en pied de versants exposés au risque de chutes de blocs et d'éboulement.

Si besoin est, il est rappelé qu'un bloc rocheux a un fort pouvoir d'endommagement sur les bâtis jusqu'à son dernier mouvement lorsqu'il présente un volume de l'ordre de plusieurs centaines de litres à 1 m³ ce qui correspond à la très grande majorité des blocs éboulés sur le territoire réunionnais, justifiant le fait d'éviter d'exposer de nouveaux enjeux dans les zones concernées (biens et humains).

Seules les problématiques de remobilisation de blocs sur pentes pourront être considérées dans l'approche B2u du fait des capacités de sécurisation généralement plus simple à mettre en œuvre avec un coût raisonnable à l'échelle des projets.

- Il est également proposé de conserver en zone rouge R2 (interdiction de projets de construction nouvelle) les espaces naturels forestiers cartographiés en aléa moyen MVT quel que soit les phénomènes MVT concernés (chute de blocs, glissement de terrain et érosion) afin d'éviter d'augmenter la vulnérabilité dans les zones potentiellement exposées et aujourd'hui non urbanisées. Cette mesure est en accord avec les consignes nationales de traduction réglementaire (Guide PPR, 1999). Toutefois, ces espaces sont pour la plupart situés au cœur du Parc National de La Réunion, et de fait inconstructibles. Cette mesure semble donc être de bon sens et en cohérence avec le classement de ces espaces protégés.
- La notion de densité d'urbanisation est exclue de la démarche. Seuls les espaces naturels forestiers (pour tous les phénomènes considérés) et les espaces naturels (pour l'aléa « rocheux ») seront dorénavant considérés comme périmètres d'exclusion de la démarche de traduction réglementaire de l'aléa moyen MVT ;
- La notion de « capacité de sécurisation » de la zone cartographiée en aléa moyen MVT (érosion et/ou glissement de terrain) constituera un second critère d'exclusion en cas d'impossibilité de conforter durablement (à l'échelle de la période de référence du PPR soit les 100 prochaines années) le secteur concerné.

La réalisation de l'étude géotechnique (prescription du règlement du PPR en zone B2u) par le pétitionnaire, intégrant l'ensemble des risques auxquels le projet est exposé (notion de bassin de risques), établie lors de sa demande de permis d'aménager ou de construire sur les terrains classés en B2u, permettra de préciser les conditions de réalisation du projet en définissant

(dimensionnement) les ouvrages de protection adaptés au projet. La réalisation de cette étude pourra ainsi conclure à deux cas de figure :

- confirmation de la possibilité d'aménager avec la définition des ouvrages à réaliser, intégrés d'un point de vue technique et financier dans l'enveloppe du projet ;

ou

- au contraire, malgré une capacité de sécurisation jugée possible dans le cadre du PPR, les reconnaissances complémentaires et l'analyse menées par le géotechnicien pourront dans certains cas conclure à l'impossibilité de sécurisation à l'échelle du projet (pour des raisons économiques par exemple).

La traduction réglementaire en zone B2u au PPR implique à l'échelle du particulier, de l'aménageur, la prise en compte de l'aléa moyen MVT dans son projet. Les secteurs exclus de cette approche sont donc principalement ceux où le contexte morphologique est suffisamment marqué pour exclure toute possibilité de sécurisation.

9.4.2. Application

Il s'agit de définir les règles claires d'exclusion des terrains cartographiés en aléa moyen MVT pour une traduction en zone B2u.

La démarche est la suivante :

1. Les données SIG des périmètres des espaces naturels forestiers et des espaces naturels, existants au moment de la démarche d'élaboration du PPR, seront collectées auprès des différents maîtres d'ouvrage concernés : Parc, ONF, Mairie principalement.
2. Puis, à partir du contour communal, il sera « déduit » dans l'ordre :
 - Le contour du cœur du Parc Naturel de La Réunion,
 - Le périmètre des espaces naturels forestiers (données ONF, dont le contour est visible notamment sur les cartes IGN au 1/25000),
3. Les zones N du PLU de la commune seront ensuite utilisées afin d'exclure toutes les zones d'aléa moyen MVT concernées par une problématique de « recul de rempart » et d'exposition aux chutes de blocs et éboulement en pied de versant.
4. Les zones d'aléa moyen MVT restant au sein de ce périmètre, qualifiées de « **secteurs à enjeux** » feront ensuite l'objet d'une analyse vis-à-vis de leur capacité de sécurisation sur le long terme (100 ans à venir), à l'échelle notamment de projet d'aménagement pouvant se développer au sein de ces mêmes zones.

Les zones d'aléa moyen MVT concernées par l'analyse de la capacité de sécurisation sont les suivantes :

- Les zones en recul de berges et d'encaissements peu à moyennement prononcés de ravines (quelques mètres à dizaine de mètres d'encaissement) ;
- Les zones de ravinement au sein des planèzes ;
- Les zones d'érosion dans les thalwegs, lit de ravine de faible envergure et zones de débordement cartographiés en aléa moyen inondation ;
- Les talus en déblais de hauteur significative (talus routier notamment) ;
- Les versants concernés par des problématiques de remobilisation de blocs.

Les capacités de sécurisation au sein de ces zones seront jugées « possibles » suivant une approche d'expertise privilégiant les observations de terrain.

L'analyse portera sur la capacité à sécuriser les configurations morphologiques propices à générer l'aléa moyen MVT sur la zone considérée (notion de bassin de risque), comme par exemple les encaissements de ravine pour les terrains classés en aléa moyen MVT en recul de sommet d'encaissement. En effet, dans ce type de configuration, l'aléa moyen constitue la zone d'incertitude d'atteinte, « d'auréole » en lien avec la zone d'aléa élevé limitrophe couvrant l'encaissement en lui-même.

Les principaux critères retenus pour considérer la capacité de sécurisation des terrains classés en aléa moyen MVT (érosion et glissement principalement) sont les suivants :

- L'absence d'aléa élevé MVT limitrophe à la zone d'aléa moyen MVT considérée permet de considérer en règle générale une possibilité de sécurisation. Les principales exceptions (terrains classés en aléa moyen MVT sans aléa élevé limitrophe) sont :
 - les zones d'aléa moyen MVT circonscrites aux talus routiers où l'aménagement futur est difficilement envisageable à l'échelle du PPR même si certains peuvent être « sécurisés », l'absence d'espace de ces zones ne permet pas d'envisager d'aménagement ;
- les zones d'encaissement de ravines peu prononcé avec une hauteur inférieure à 10 voire 15 m et une pente moyenne inférieure à 30 - 35° où peuvent être cartographiés des zones d'aléa moyen (au sein et/ou en recul de ces configurations morphologiques) seront considérées en général comme sécurisables. Toutes les configurations morphologiques plus prononcées seront exclues du fait de l'ampleur des travaux de sécurisation potentiellement nécessaire pour les sécuriser. Les observations dans les encaissements de ravines à La Réunion afin de sécuriser les berges et les terrains en recul tendent à montrer l'absence d'ouvrage au-delà de plusieurs mètres à dizaines de mètres d'encaissement, ce qui tend à confirmer les difficultés de sécurisation dans des configurations très prononcées.
- Les configurations de terrain favorables aux travaux de sécurisation permettant « d'éliminer » l'aléa à l'origine de l'aléa moyen MVT, comme les travaux de terrassement ou d'enlèvement de blocs à la surface de talus par exemple. Ce type de configuration, notamment en zone urbaine, nécessite un minimum d'espace de part et d'autre de la zone d'aléa afin de faciliter les opérations de talutage et de terrassement. A contrario les terrains exigus avec notamment la présence d'avoisinants (bâtis, route) où les travaux ne sont pas envisageables sans mobiliser un foncier conséquent et potentiellement non maîtrisé ne seront pas considérés comme sécurisables.

Ce dernier point s'appuie sur les réflexions menées dans le cadre du comité technique n°2 dont la démarche est décrite au chapitre précédent (cf. chapitre 8). En effet, les principaux travaux / ouvrages considérés comme susceptibles de permettre une dérogation au principe d'inconstructibilité derrière un ouvrage sont notamment les travaux de terrassement et de substitution face aux problématiques de glissements de terrain.

Le CoTech n°2 aborde exclusivement les ouvrages existants. Toutefois, par similitude, sur la base des critères d'évaluation de l'efficacité des ouvrages définis dans ce groupe de travail, les ouvrages jugés comme les plus « efficaces » pour permettre une constructibilité à l'aval sont considérés dans l'évaluation de la capacité de sécurisation des terrains classés en aléa moyen MVT dans la perspective de leur traduction réglementaire (R2 ou B2u).

Les ouvrages de type merlon pour se protéger de l'aléa chute de blocs et les travaux de terrassement, substitution, voire les ouvrages de soutènement face à l'aléa glissement de terrain sont les principaux ouvrages considérés. Si de tels ouvrages ne peuvent pas être

réalisés pour lutter efficacement et durablement face aux aléas MVT, la capacité de sécurisation ne sera pas jugée possible et une traduction réglementaire en R2 sera retenue.

Afin d'illustrer l'application de la méthode à un secteur de La Réunion, le secteur de la Grande Fontaine à Saint-Paul, est présenté sur l'illustration 49Illustration 30, avec :

- Secteur A : un encaissement marqué le long de la Ravine Divon (plusieurs dizaines de mètres de profondeur) ne permettant pas d'envisager de sécurisation durable pour stabiliser les terrains de l'encaissement et en recul immédiat, notamment ceux cartographiés en aléa moyen MVT. Ces terrains sont traduits en R2
- Secteur B : le versant en limite aval de planèze, sous le lieu-dit Crève-Cœur, est marqué par des pentes moyennes à fortes (30 à 35°) où de nombreux blocs rocheux sont présents à la surface avec un risque de remobilisation sur la période de référence du PPR Ce vaste secteur est classé en zone N au PLU de Saint-Paul. La capacité de sécurisation à l'échelle d'un projet d'aménagement potentiel n'est pas jugée possible au droit des zones de remobilisation (plus fortes pentes) au regard des pentes, de la superficie et de l'ampleur des travaux nécessaires pour éliminer l'ensemble des menaces potentielles. La partie aval de la planèze où les pentes se réduisent progressivement favorisant l'arrêt des blocs est jugée sécurisable via notamment la réalisation d'un merlon (espace disponible suffisant). Cette zone est caractérisée par des pentes inférieures à 20° en moyenne.
- Secteur C : la ravine à l'ouest du quartier de Grande Fontaine est faiblement encaissée (moins de 10 m de profondeur) ce qui permet d'envisager la réalisation d'ouvrages de sécurisation en berge afin de stabiliser ces dernières. Le débit de crue pour une occurrence centennale est par ailleurs faible (moins de 10 m³/s) traduisant des risques érosifs limités dans un secteur où la couverture en terrain meuble est peu prononcée. Ce type de configuration est jugée sécurisable et les terrains en aléa moyen MVT sont traduits en B2u.
- Secteur D : les pentes soutenues à l'amont de la RD5 classées en aléa moyen MVT sont également jugées sécurisables du fait de l'ampleur limitée de la surface concernée (0,1 km²) et de l'espace disponible dans ce secteur pour la mise en place d'ouvrages de protection permettant de conforter les terrains (terrassement et/ou soutènement).

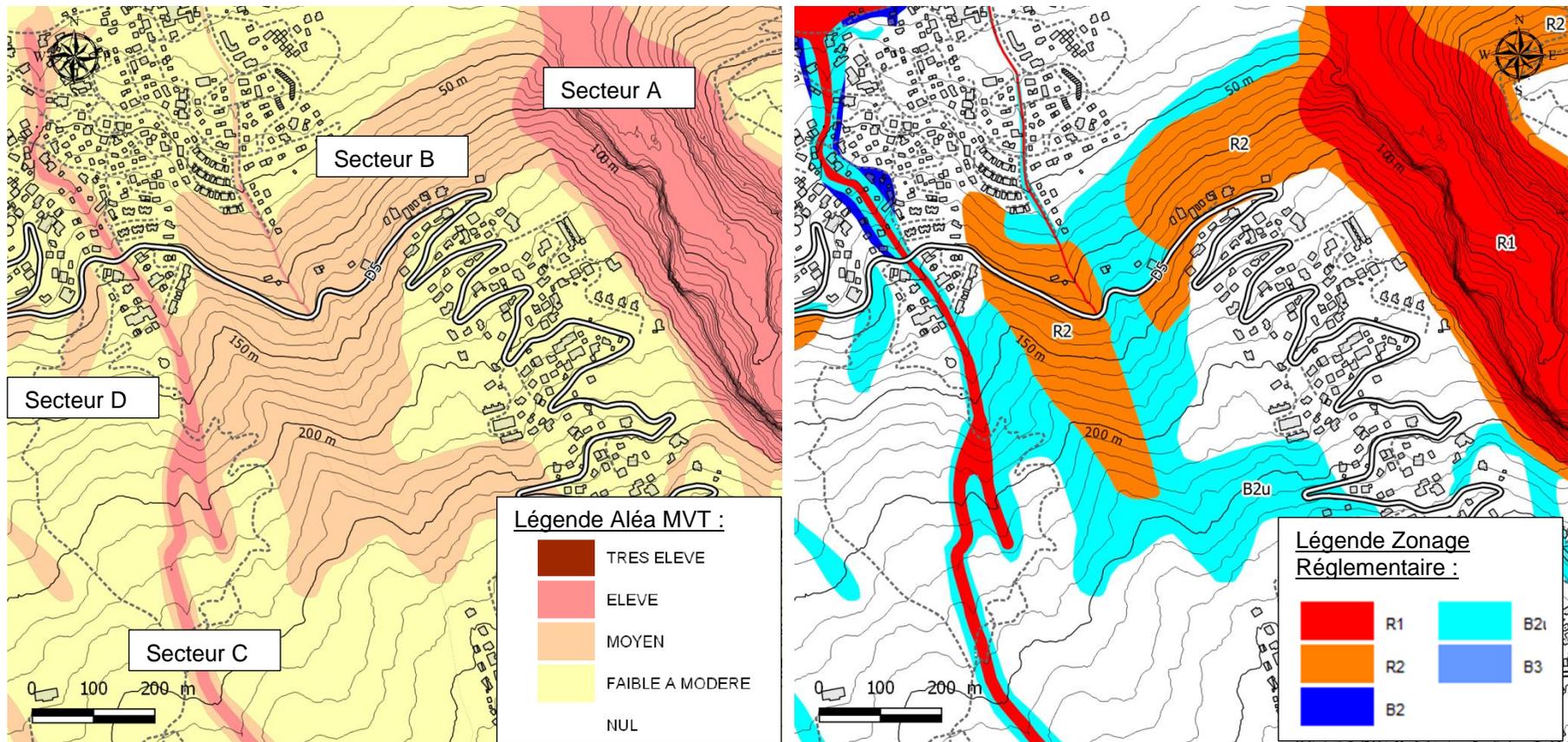


Illustration 49 : Exemple de traduction réglementaire de l'aléa moyen MVT (carte d'aléa MVT à gauche et zonage réglementaire à droite)

10. Conclusions

Afin d'améliorer la compréhension par les usagers (particuliers, services instructeurs en collectivité, aménageurs) de la méthodologie employée pour la caractérisation des aléas MVT (chute de blocs, glissement de terrain et érosion) dans les procédures PPR des communes de La Réunion, chaque méthode de caractérisation des aléas est décrite avec la proposition d'outils d'aide à la cartographie. Ces outils intègrent les récentes évolutions à l'échelle nationale, adaptées au contexte réunionnais. Ces outils se traduisent par l'élaboration de grilles de qualification des aléas intégrant les notions de probabilité d'occurrence et d'intensité pour chaque aléa MVT étudié.

Les différentes grilles méthodologiques d'aide à la qualification des aléas MVT (chute de blocs, glissement de terrain, érosion) sont détaillées, justifiées et illustrées par des cas concrets de zonage de PPR en cours ou approuvés au droit de secteurs de La Réunion dans les paragraphes précédents. L'ensemble des grilles est rappelé dans les tableaux de synthèse des pages suivantes avec les principales consignes d'utilisation. **Ces outils sont des aides à la décision pour l'expert en charge de l'élaboration des cartes d'aléas. L'expertise de terrain prévaut sur l'application stricte de ces éléments méthodologiques.**

Concernant le zonage de l'aléa MVT, les évolutions proposées concernent principalement la simplification de « l'indigage » des aléas avec, pour les secteurs concernés par plusieurs aléas, la prise en compte du niveau d'aléa le plus élevé pour définir le niveau de l'aléa MVT « résultant ». De plus, le niveau d'aléa « faible à modéré » sera simplifié par un niveau d'aléa faible.

Concernant **la prise en compte des ouvrages existants** dans la cartographie des aléas et leur traduction réglementaire dans les PPR, il est proposé de s'inscrire dans la démarche initiée par le groupe de travail « cotech n°2 » dans le cadre de la révision des guides PPR en montagne. Les logigrammes d'analyse de l'efficacité des ouvrages existants, établis dans ce groupe de travail, seront intégrés dans la réflexion afin de statuer sur la prise en compte ou non des ouvrages existants dans les zonages. D'une manière générale, en zone d'aléa élevé MVT, les terrains exposés situés à l'aval d'ouvrages existants resteront inconstructibles (R1 ou R2) suivant une distance à l'aval à définir au cas par cas. En zone d'aléa moyen MVT, l'analyse de l'efficacité de l'ouvrage permettra de préciser le zonage d'aléa ainsi que sa traduction réglementaire (R2 ou B2u). Pour les problématiques d'événements majeurs (effondrement de bordure de rempart entraînant un recul ou éboulement / glissement de grande ampleur), les éventuels ouvrages présents dans les secteurs concernés ne seront pas considérés dans l'élaboration du zonage de l'aléa MVT et sa traduction réglementaire.

Concernant **la traduction réglementaire de l'aléa moyen MVT**, sur la base des éléments présentés précédemment, il est proposé une **évolution de l'approche B2u, zone réglementaire constructible avec prescriptions, notamment sous la condition de réalisation d'une étude géotechnique.**

La traduction réglementaire des zones d'aléa moyen MVT en zone **B2u** (principe de constructibilité) s'appuie sur plusieurs critères permettant de définir les secteurs à enjeux jugés sécurisables au sein desquels le classement B2u sera retenu. Les zones exclues de la démarche, par ordre de priorité, seront les suivantes :

- Les terrains situés au sein du cœur du Parc National de La Réunion et dans les espaces naturels forestiers (d'ores et déjà inconstructibles). Cette mesure semble donc être de bon sens et en cohérence avec le classement de ces espaces protégés ;
- Les terrains situés dans les espaces naturels (zone N du document d'urbanisme en vigueur de la commune) concernés par des problématiques de chute de blocs et d'éboulement. Concernant l'aléa rocheux, seules les problématiques de remobilisation de blocs sur pentes pourront être considérées dans la réflexion pour la traduction réglementaire de l'aléa moyen MVT (R2 ou B2u), du fait, pour certaines zones concernées, de possibilités de sécurisation généralement plus simple à mettre en œuvre avec un coût raisonnable à l'échelle des projets. L'analyse au cas par cas permettra de définir le classement réglementaire pour ces secteurs ;
- Les terrains dont la capacité de sécurisation n'est pas garantie à l'échelle de projet d'aménagement pouvant se développer au sein de ces mêmes zones en considérant la période de référence du PPR (soit les 100 prochaines années).

Les zones d'aléa moyen MVT concernées par l'analyse de la capacité de sécurisation sont les suivantes :

- Les zones en recul de berges et d'encaissements peu à moyennement prononcés de ravines (quelques mètres à dizaine de mètres d'encaissement) ;
- Les zones de ravinement au sein des planèzes ;
- Les zones d'érosion dans les thalwegs, lit de ravine de faible envergure et zones de débordement cartographiés en aléa moyen inondation ;
- Les talus en déblais de hauteur significative (talus routier notamment) ;
- Les versants concernés par des problématiques de remobilisation de blocs.

Les capacités de sécurisation au sein de ces zones seront jugées « possibles » suivant une approche d'expertise privilégiant les observations de terrain.

Les principaux critères retenus pour considérer la capacité de sécurisation des terrains classés en aléa moyen MVT (érosion et glissement principalement) sont les suivants :

- L'absence d'aléa élevé MVT limitrophe à la zone d'aléa moyen MVT considérée permet de considérer en règle générale une possibilité de sécurisation. Les principales exceptions (terrains classés en aléa moyen MVT sans aléa élevé limitrophe) sont :
 - les zones d'aléa moyen MVT circonscrites au talus routiers où l'aménagement futur est difficilement envisageable à l'échelle du PPR même si certains peuvent être « sécurisés », l'absence d'espace de ces zones ne permet d'envisager d'aménagement ;
- les zones d'encaissement de ravines peu prononcé avec une hauteur inférieure à 10 voire 15 m et une pente moyenne inférieure à 30 - 35° où peuvent être cartographiés des zones d'aléa moyen (au sein et/ou en recul de ces configurations morphologiques) seront considérées en général comme sécurisables. Toutes les configurations morphologiques plus prononcées seront exclues du fait de l'ampleur des travaux de sécurisation potentiellement nécessaire pour les sécuriser. Les observations dans les encaissements de ravines à La Réunion afin de sécuriser les berges et les terrains en recul tendent à montrer l'absence d'ouvrage au-delà de plusieurs mètres à dizaines de mètres d'encaissement, ce qui tend à confirmer les difficultés de sécurisation dans des configurations très prononcées.
- Les configurations de terrain favorables aux travaux de sécurisation permettant « d'éliminer » l'aléa à l'origine de l'aléa moyen MVT, comme les travaux de terrassement

ou d'enlèvement de blocs à la surface de talus par exemple. Ce type de configuration, notamment en zone urbaine, nécessite un minimum d'espace de part et d'autre de la zone d'aléa afin de faciliter les opérations de talutage et de terrassement. A contrario les terrains exigus avec notamment la présence d'avoisinants (bâti, route) où les travaux ne sont pas envisageables sans mobiliser un foncier conséquent et potentiellement non maîtrisé ne seront pas considérés comme sécurisables.

Concernant la réalisation de l'étude géotechnique prescrite dans le règlement du PPR en zone B2u, elle devra intégrer l'ensemble des risques auxquels le projet est exposé (notion de bassin de risques) et s'assurer que le projet n'aggrave pas la situation pour les avoisinants. Cette étude sera établie par le particulier ou aménageur concerné et transmise lors de sa demande de permis d'aménager ou de construire sur les terrains classés en B2u. Elle permettra de préciser les conditions de réalisation du projet en définissant (dimensionnement) les ouvrages de protection adaptés au projet. La réalisation de cette étude pourra ainsi conclure à deux cas de figure :

- confirmation de la possibilité d'aménager avec la définition des ouvrages à réaliser, intégrés d'un point de vue technique et financier dans l'enveloppe du projet ;

ou

- au contraire, les reconnaissances complémentaires et l'analyse menées par le géotechnicien pourront dans certains cas conclure à la définition de mesures de sécurisation trop contraignantes à l'échelle du projet envisagé ne permettant pas de le réaliser (pour des raisons techniques ou économiques).

La traduction réglementaire en zone B2u au PPR implique à l'échelle du particulier, de l'aménageur, la prise en compte de l'aléa moyen MVT dans son projet.

ALEA CHUTE DE BLOCS (P) – REcul DE REMPART (H>100m)

		Niveau d'aléa MVT				Commentaires
Probabilité d'occurrence	Moyenne	Faible (P1) au-delà des aléas très élevé à moyen	Moyen (P2) sur une bande forfaitaire de 10 m en recul de l'aléa élevé	Elevé (P3) sur une distance équivalente à H/10 en recul de l'aléa très élevé	Très Elevé (P4) sur 5 à 10 m en recul de la crête du rempart	<p>Cas des remparts sans évolution historique :</p> <p>↪ probabilité d'occurrence moyenne</p>
	Forte					<p>Cas des remparts avec des évolutions passées significatives :</p> <p>↪ probabilité d'occurrence forte</p> <p>Pour ces secteurs où les <u>reculs</u> sont potentiellement importants sur la période de référence considérée, dépassant les limites de l'aléa élevé MVT par application de la méthode ci-dessus, ils seront étudiés de manière spécifique avec une majoration du zonage de l'aléa très élevé MVT en fonction des possibilités de recul de ces remparts actifs sur le siècle à venir. Dans ce cas de figure, il est proposé de définir l'aléa très élevé suivant une bande équivalente au recul historique constaté sur le siècle précédent.</p>
						<p>Configuration morphologique de l'encaissement rectiligne sans méandre marqué en pied de rempart et sans pentes très fortes au sein de l'encaissement (morphologie homogène)</p> <p>+ pas d'évolution historique connue de la crête du rempart via l'analyse comparative des orthophotos IGN disponibles</p> <p>+ aucun indice de surface en recul de la crête de rempart pouvant témoigner d'une activité dans le siècle à venir (pas de fissures ouvertes, ni de panneaux affaissés)</p>
						<p>Configuration morphologique de l'encaissement favorable à une évolution sur le siècle à venir avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> ↪ une évolution historique connue et significative de la crête du rempart avec recul constaté ou ↪ des indices de surface en recul de la crête de rempart pouvant témoigner d'une activité dans le siècle à venir (par exemple présence de fractures ouvertes et/ou de panneaux affaissés)

ALEA CHUTE DE BLOCS (P) – EBOULEMENT DE GRANDE AMPLEUR

		Phénomène de grande ampleur : Volume > 10 000 m ³	Commentaires
Probabilité d'occurrence	Faible	Intensité = très élevée	L'intégration de tels phénomènes dans la cartographie des aléas MVT des procédures PPR des communes de La Réunion est définie en fonction de l'occurrence de phénomène historique de ce type dans le bassin de risque étudié, à partir de l'analyse de la configuration morphologique actuelle.
	Moyenne		
	Elevée	Elevé (P3) : jusqu'au dernier bloc éboulé (1m ³ et plus)	
		Très élevé (P4)	

ALEA CHUTE DE BLOCS (P) – CHUTE DE BLOCS

Probabilité d'occurrence		Probabilité d'atteinte				Commentaires
		Faible $P < 10^{-6}$	Moyenne $10^{-6} < P < 10^{-4}$	Forte $10^{-4} < P < 10^{-2}$	Très forte $10^{-2} < P$	
Indice d'activité	Faible 1 bloc tous les 100 ans	faible	moyenne	élevée	Très élevée	<p>Zone de départ : à partir du MNT de La Réunion (résolution de 5 m) correspondent aux valeurs de pentes supérieures à 48,7°.</p> <p>Indice d'activité : la fréquence avec laquelle des volumes de roches se mettent en mouvement, à partir notamment des données historiques (événements). Cette fréquence est assimilée au délai dans lequel la chute de bloc ou l'éboulement le plus probable, exprimé de façon qualitative, est susceptible de survenir sur la période de référence considérée (100 ans à venir). D'une manière générale à La Réunion, cette probabilité de départ sera souvent considérée comme de niveau fort, voire moyen (1 bloc tous les ans à 10 ans) et rarement de niveau faible étant donnée la prédisposition des parois rocheuses du département à générer des instabilités de ce type.</p> <p>Probabilité d'atteinte : définie à partir de la méthode de la ligne d'énergie ou par simulations trajectographiques. Les valeurs seuils proposées (issues de MEZAP) peuvent évoluer selon les auteurs et l'analyse du site. D'une manière générale à La Réunion, l'analyse de cas historiques (57) tend à montrer des atteintes jusqu'aux valeurs d'angles de l'ordre de 38 à 40° voire plus (=probabilité d'atteinte forte).</p>
	Moyen 1 bloc tous les 10 ans	moyenne	moyenne	élevée	Très élevée	
	Fort 1 bloc par an	moyenne	élevée	élevée	Très élevée	

Aléa chute de blocs (P)		Intensité				Commentaires
		Volume < 0,25 m ³	0,25 m ³ < V < 1 m ³	1 m ³ < V < 10 m ³	Volume > 10m ³	
Probabilité d'occurrence	Faible	Faible (P1)	Moyen (P2)	Elevé (P3)	Elevé (P3)	<p>Intensité : c'est la quantité de roche, exprimée en volume, qui peut être déstabilisée et mise en mouvement. Ces volumes potentiellement mobilisables décrivent l'intensité attendue des phénomènes. L'intensité est associée à l'endommagement potentiel engendré par une atteinte à des enjeux (ici un bâtiment d'habitation « classique » est pris comme référence pour évaluer cet impact). A La Réunion, l'analyse de cas historiques (57) tend à montrer des volumes unitaires de l'ordre du m³.</p> <p>Aléa chute de blocs (P) : méthode conditionnée par l'indice d'intensité, considéré comme très fréquemment élevé (bloc de plus d'1 m³ susceptible d'atteindre les enjeux sur les 100 prochaines années pour la plupart des parois rocheuses considérées sauf quelques exceptions). Ainsi, cela implique un aléa rocheux de niveau élevé (P3) en tout point d'atteinte en contrebas, dont l'évaluation de la superficie est définie en fonction de la configuration de la paroi, quel que soit l'indice d'activité de la paroi considérée, avec l'application d'une valeur d'angle de la ligne d'énergie :</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ de l'ordre de 38 à 40° pour les configurations de parois très redressées (pente moyenne de l'ordre de 50° voire plus sur toute la hauteur) avec terrain plat ou faiblement pentu en pied ; ↳ de l'ordre de 32 à 33° pour les configurations de versants plus propices aux propagations à l'aval des zones de départ (configurations où des terrains pentus sont présents sous la paroi dominante). <p>Afin de maintenir une gradation des aléas MVT dans ces configurations de terrains exposés à l'aléa rocheux, une bande forfaitaire d'aléa moyen MVT (P2) est définie à l'aval, de largeur variable définie à dire d'expert selon la configuration de la zone (minimum 10 à 20 m, largeur variable selon la configuration morphologique). Ce niveau d'aléa traduit l'incertitude dans les zones atteintes au-delà des zones d'aléa fort considérées, notamment pour d'éventuels projections / éclats aux trajectoires parfois importantes, voire au-delà de celles des blocs considérés.</p> <p>Pour d'autres volumes unitaires considérés (moins d'1m³), la méthodologie décrite s'applique.</p>
	Moyenne	Faible (P1)	Moyen (P2)	Elevé (P3)	Elevé (P3)	
	Elevée	Moyen (P2)	Elevé (P3)	Elevé (P3)	Très élevé (P4)	
	Très élevée	Elevé (P3)	Elevé (P3)	Très élevé (P4)	Très élevé (P4)	

ALEA CHUTE DE BLOCS (P) – REMOBILISATION DE BLOCS SUR PENTES

Probabilité d'occurrence		Description des facteurs attendus pour l'indice d'activité (non cumulatif)	Probabilité d'atteinte, en cas de remobilisation β = valeur d'angle de la ligne d'énergie			Commentaires
			Faible : $\beta < 32^\circ$ + Pente des terrains > à 20°	Moyenne $32^\circ < \beta < 35^\circ$	Forte $\beta > 35^\circ$	
Indice d'activité	faible	Présence de forêt pérenne ou d'obstacles naturels dans la pente Faible sensibilité à l'érosion des terrains du versant (terrains indurés, rocheux) Pas d'historique connu / 1 événement tous les 100 ans / peu de blocs dans le versant et les zones exposées	faible	moyenne	élevée	<p>Zone de départ (de remobilisation) : la valeur à considérer au-delà de laquelle les remobilisations de blocs sont jugées possibles est comprise entre 22 et 28° selon les observations de terrains et l'historique connu. Une valeur moyenne de 25° sera retenue par défaut.</p> <p>Probabilité d'atteinte : nécessite de fortes pentes sous la zone de remobilisation de blocs. En dessous des valeurs d'angle de la ligne d'énergie (32 à 33°), la propagation est considérée comme limitée à l'emprise des zones de remobilisation (ou de départ), soit aux terrains de pente supérieure à 25° en moyenne) et des terrains directement exposés à l'aval mais moins pentus favorisant l'arrêt progressif des blocs. La valeur de pente des terrains à l'aval passant sous les 20° voire 25° sur une distance significative (au moins 10 à 20 m) traduit généralement cette distance progressive d'arrêt des blocs.</p>
	moyen	Incertitude sur la présence d'obstacles pérennes (forêt, andains) Sensibilité moyenne à l'érosion des terrains du versant (terrains meubles végétalisés) Historique connu / 1 événement tous les 10 ans / plusieurs blocs dans le versant et les zones exposées	moyenne	moyenne	élevée	
	fort	Pas d'obstacles dans les pentes Forte sensibilité à l'érosion des terrains du versant (« griffes d'érosion » visibles, terrains meubles en surfaces, non végétalisés) historique connu et fréquent ou 1 événement tous les 1 ans ou nombreux blocs dans le versant et les zones exposées	moyenne	élevée	élevée	

Aléa chute de blocs (P)		Intensité			Commentaires
		Volume < 0,25 m ³	Volume < 1 m ³	Volume > 1 m ³	
Probabilité d'occurrence	Faible	Faible (P1)	Moyen (P2)	Moyen (P2) si des travaux sont réalisables à l'échelle de la collectivité	<p>Intensité : volume de bloc le plus représentatif des blocs mobilisables dans les pentes du secteur étudié.</p> <p>Aléa chute de blocs (P) – remobilisation de blocs sur pentes :</p> <p>L'aléa « résultant » est conditionné par la taille des blocs remobilisables (indice d'intensité) modulée par la superficie du versant concernée afin de tenir compte, dans la notion d'intensité, de l'ampleur de la parade qu'il serait nécessaire de mettre en œuvre pour se prémunir de l'aléa (Guide PPR national, 1999).</p> <p>A titre d'exemple, un versant de quelques centaines voire milliers de m², avec 30 à 35° de pente moyenne où les propagations seront limitées à l'emprise des zones remobilisables ne sera pas systématiquement cartographié en aléa élevé MVT si les blocs présents en surface sont de l'ordre du m³ dans la mesure où des parades réalisables à l'échelle du versant (à l'échelle de la collectivité) sont possibles. Ainsi, un niveau d'aléa moyen MVT est fréquemment considéré dans les cartographies de l'aléa MVT pour les problématiques de remobilisation de blocs.</p>
				Elevé (P3) sinon	
	Moyenne	Faible (P1)	Moyen (P2)	Moyen (P2) si des travaux sont réalisables à l'échelle de la collectivité	
				Elevé (P3) sinon	
	Elevée	Moyen (P2)	Moyen (P2) si des travaux sont réalisables à l'échelle de la collectivité	Elevé (P3)	
				Elevé sinon	

ALEA GLISSEMENT DE TERRAIN – COULEE DE BOUE (G)

		Description des facteurs attendus
Probabilité d'occurrence	Elevée	Glissement actif avec traces de mouvements récents ou Glissement ancien non stabilisé / coulée de boue connue non stabilisée ou Glissement potentiel / coulée de boue potentielle : <ul style="list-style-type: none"> • classe « sol » 1 + pente supérieure à 25° + présence de facteurs aggravants • classe « sol » 2 + pente supérieure à 30° + présence de facteurs aggravants • classe « sol » 3 + pente supérieure à 35° + présence de facteurs aggravants
	Moyenne	Glissement ancien connu stabilisé / coulée de boue ancienne, avec doute sur l'entretien des aménagements ou non confortés ou Glissement potentiel / coulée de boue potentielle : <ul style="list-style-type: none"> • classe « sol » 1 + 20° < pente < 25° + absence de facteur aggravant prépondérant • classe « sol » 2 + 20° < pente < 30° + absence de facteur aggravant prépondérant • classe « sol » 3 + 25° < pente < 35° + absence de facteur aggravant prépondérant
	Faible	<ul style="list-style-type: none"> • Pentes inférieures au seuil définis pour la probabilité d'occurrence moyenne mais non nulles (supérieures à 5°)

Commentaires
<p>Sur la base des consignes nationales en matière de qualification de l'aléa MVT (pour les glissements de terrain), la cartographie de l'aléa MVT pour les phénomènes de glissements de terrain et de coulée de boue, s'appuie sur les facteurs suivants (qualitatifs voire quantitatifs) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • facteurs de prédisposition, inhérents au milieu : <ul style="list-style-type: none"> - formations géologiques : classification selon leur nature, caractéristiques mécaniques, état d'altération, fracturation, épaisseur des faciès ; - morphologie : définition de classe de pentes et de configurations particulières (présence de talus anthropique par exemple). • facteurs non permanents (généralement aggravants) : <ul style="list-style-type: none"> - indices de glissement de terrain (récents, anciens) - altitude : différence de pluviométrie ; - venue d'eau : résurgence, écoulement ou ruissellement concentré ; - végétation : présence ou non, culture en terrasse, etc. ; - activité humaine : ouvrages de protection, rejet d'eau concentré, non contrôlé présence de surcharge non soutenue, etc.

	Aspects	Types
Classe 1	Matériaux remaniés meubles	Colluvions meubles, alluvions lâches, remblais, sables dunaires basaltiques, sables et galets de plage, etc.
Classe 2	Matériaux remaniés à dominante rocheuse	Dépôts de glissement en masse, de coulées de débris, éboulis, brèches sensibles à l'érosion, altérites type III, tufs en épandage meubles et altérés, cendres argilisées
Classe 3	Matériaux raides / indurés	Brèches indurées, altérites type II, tufs altérés et indurés
Classe 4	Matériaux rocheux	Séries de basaltes, tufs soudés (type Maïdo), Ignimbrites, trachytes, syénites, gabbro, altérites type I

		Description des facteurs attendus – Glissement de terrain
Intensité	Très élevé	Parade au cout prohibitif et/ou techniquement impossible Destruction des bâtis de la zone Volume mobilisé très important : plusieurs millions de m ³
	Elevé	Parade au cout prohibitif et/ou techniquement impossible Dommage important au bâti (gros œuvre) avec ruine probable dans les 100 ans – réparation très couteuse Surface mobilisée de l'ordre du km ² ou volume mobilisé important de l'ordre de 10 000 à 100 000 m ³
	Moyenne	Parade réalisable à l'échelle de la collectivité Dommage au gros œuvre sans ruine probable dans les 100 ans – réparation possible Surface mobilisée de l'ordre du 1 000 à 100 000 m ² ou volume mobilisé relativement important de l'ordre de 1 000 à 10 000 m ³
	Faible	Parade réalisable à l'échelle de la parcelle Pas de dommage structurel, gros œuvre très peu touché Surface mobilisée faible, inférieure à 1 000 m ² ou volume mobilisé faible inférieure à 1000 m ³

		Description des facteurs attendus – Coulée de boue
Intensité	Très élevé	Parade au cout prohibitif et/ou techniquement impossible Destruction des bâtis de la zone Surface concernée à l'échelle du versant (> km ²) avec épaisseur mobilisable supérieur à 0,5 voire 1 m générant un volume de coulée potentiel très important : > 1 million de m ³
	Elevé	Parade au cout prohibitif et/ou techniquement impossible Dommage important au bâti (gros œuvre) avec ruine probable dans les 100 ans – réparation très couteuse Surface concernée significative (>1000 m ²) avec épaisseur mobilisable supérieur à 0,5 voire 1 m générant un volume de coulée potentiel important : > 1 000 m ³
	Moyenne	Parade réalisable à l'échelle de la collectivité Dommage au gros œuvre sans ruine probable dans les 100 ans – réparation possible Surface concernée significative (>1000 m ²) avec épaisseur mobilisable réduite (< 0,5 m) générant un volume de coulée potentiel peu important : < 1 000 m ³
<p>Pour l'aléa « coulée de boue », les consignes nationales recommandent la prise en compte des seuls niveaux d'intensité élevé et très élevé. A La Réunion, étant donné les spécificités géologiques (couverture sol peu épaisse), une intensité moyenne est également considérée pour les problématiques fréquemment rencontrées s'apparentant à un ravinement intense mobilisant une épaisseur de matériaux rarement supérieur à 0,50 m.</p>		

Aléa glissement de terrain (G)		Intensité				Commentaires
		Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée	
Probabilité d'occurrence	Faible	Faible (G1)	Moyen (G2)	Elévé (G3)	Très élevé (G4)	<p>Concernant l'aléa MVT « glissement de terrain », à la différence de la grille proposée dans le cadre des réflexions du « cotech 1 » (cf. Tableau 19), il est proposé de conserver un aléa faible et moyen MVT pour des niveaux d'intensité similaires quelle que soit la probabilité d'occurrence (hormis pour un niveau élevé) afin de conserver de manière prépondérante la notion de niveau de réalisation des parades dans l'évaluation de l'aléa. Cela se justifie par de faible épaisseur de couverture meuble (moins d'un mètre à quelques mètres avant d'atteindre le substratum rocheux) sur le territoire réunionnais hormis dans certains secteurs où l'altération poussée des formations basaltiques peut favoriser des glissements de plus fortes épaisseurs.</p>
	Moyenne	Faible (G1)	Moyen (G2)	Elévé (G3)	Très élevé (G4)	
	Elevée	Moyen (G2)	Elévé (G3)	Elévé (G3)	Très élevé (G4)	

Aléa coulée de boue (G)		Intensité			Commentaires
		Moyenne	Elevée	Très élevée	
Probabilité d'occurrence	Faible	Moyen (G2)	Elévé (G3)	Très élevé (G4)	<p>Concernant l'aléa MVT « coulée de boue », les phénomènes historiques sont peu nombreux sur le territoire réunionnais (une centaine enregistrés dans BDMVT) et concernent principalement les cirques (plus de 60% des cas enregistrés) où les formations géologiques en places sont liées à des dépôts gravitaires (formations détritiques sensibles à l'érosion et aux phénomènes de ce type). Les zones d'occurrence de ces phénomènes sont par ailleurs concernées par de très fortes pentes et exposées à d'autres types d'aléa MVT (chute de blocs notamment) avec la prise en compte d'un aléa élevé voire très élevé. D'une manière générale, en dehors de ces territoires spécifiques (Salazie, Cilaos, Mafate), l'aléa coulée de boue est peu présent et non prépondérant vis-à-vis des autres phénomènes gravitaires mais restent possibles ponctuellement lors de conditions climatiques très dégradées notamment dans des secteurs de terrains agricoles où les sols sont plus facilement mobilisables.</p>
	Moyenne	Moyen (G2)	Elévé (G3)	Très élevé (G4)	
	Elevée	Elévé (G3)	Très élevé (G4)	Très élevé (G4)	

ALEA EROSION (E) : érosion de berges et ravinement

		Erosion de berges
		Description des facteurs attendus
Probabilité d'occurrence	Elevée	zones cartographiées en aléa fort inondation (lit de ravine principalement) + encaissement du lit jusqu'au sommet de la berge (et quelques mètres en recul en général).
	Moyenne	zone de débordement et/ou lit de ravine peu marqué cartographié en aléa moyen inondation (aléa inondation conditionné par des vitesses d'écoulement) ou zone d'auréole autour de la zone de probabilité d'occurrence forte (10 à 20 m selon l'ampleur de l'encaissement de la ravine)
	Faible	zone en recul de la zone de probabilité d'occurrence moyenne

		Ravinement
		Description des facteurs attendus
Elevée		zone de badlands non stabilisé où les phénomènes sont actifs et reconnus
Moyenne		zone d'auréole autour de la zone de probabilité d'occurrence forte ou ravinement potentiel (facteurs non cumulatifs) : <ul style="list-style-type: none"> • classe « sol » 1 + pente supérieure à 10-15° + présence terrain potentiellement mis à nu (facteur aggravant) ou facilement mobilisable (zone agricole par exemple) • classe « sol » 2 + pente supérieure à 15-20° + présence terrain potentiellement mis à nu (facteur aggravant) ou facilement mobilisable (zone agricole par exemple) • voirie avec pente de plus de 7-8% dans le sens de la pente sur un linéaire de plus de 500m • valeurs d'IDPR supérieures à 1500
Faible		zone en recul de la zone de probabilité d'occurrence moyenne ou pentes inférieures aux seuils définis pour la probabilité d'occurrence moyenne mais non nulles (supérieures à 5°)

		Description des facteurs attendus
Intensité	Très élevé	Parade au cout prohibitif et/ou techniquement impossible Destruction des bâtis de la zone Erosion de berge : incision du lit et/ou recul observé par le passé + potentiel de plus de 100 m Ravinement : surface active mobilisée très importante (bassin versant) : supérieure à 1 km ²
	Elevé	Parade au cout prohibitif et/ou techniquement impossible Dommage important au bâti (gros œuvre) avec ruine probable dans les 100 ans – réparation très couteuse Erosion de berge : incision du lit et/ou recul observé par le passé + potentiel de plus de 10 m Ravinement : surface active mobilisée importante (bassin versant) : supérieure à 10 000 m ²
	Moyenne	Parade réalisable à l'échelle de la collectivité Dommage au gros œuvre sans ruine probable dans les 100 ans – réparation possible Erosion de berge : recul potentiel de l'ordre de 1 à 1,5 x H (hauteur de la berge) ou de l'ordre de 10 m Ravinement : surface active mobilisée réduite (bassin versant) : supérieure à 1000 m ²
	Faible	Parade réalisable à l'échelle de la parcelle Pas de dommage structurel, gros œuvre très peu touché

Aléa Erosion (E)		Intensité			
		Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Probabilité d'occurrence	Faible	Faible (E1)	Moyen (E2)	Elevé (E3)	Très élevé (E4)
	Moyenne	Moyen (E2)	Moyen (E2)	Elevé (E3)	Très élevé (E4)
	Elevée	Elevé (E3)	Elevé (E3)	Elevé (E3)	Très élevé (E4)

Pour les nombreuses ravines du territoire réunionnais observées sur les planèzes, fréquemment encaissées de plusieurs mètres à dizaines de mètres et composées de formations basaltiques au niveau des encaissements, **les critères utilisés pour définir la probabilité d'occurrence prévalent sur la qualification de l'aléa (notion de prédisposition) :**

- ↳ **Aléa élevé MVT (E3)** au droit du lit et de l'encaissement, englobant les premiers mètres en recul (fréquemment de l'ordre de 5m en recul depuis le sommet de la berge) ;
- ↳ **Aléa moyen MVT (E2)** en recul de l'encaissement sur une « auréole » de largeur variable : 10 à 20 m selon l'ampleur de l'encaissement.

11. Bibliographie

Aunay B., Brugeron A., Vaudour K., Wuilleumier A. (2011) - Détermination de la vulnérabilité, des pressions et des risques de pollution sur cinq Bassins d'Alimentation de Captages prioritaires à l'île de la Réunion. Rapport BRGM RP-59057-FR, 298 p.

Bachèlery P. (1981) - Le Piton de la Fournaise (île de La Réunion). Étude volcanologique, structurale et pétrologique. Thèse Université de Clermont Ferrand, 215 p

Berger F. (Irstea, 2009). Expertise trajectographique en 3 dimensions, de l'aléa chute de pierres et de blocs rocheux, pour l'aide à la réalisation de la révision du PPR de la commune de Veyrier-du-Lac. 99p.

BRGM – 2006 - Kit Pédagogique Sciences de la Terre : « Connaissance géologique de la Réunion ».

BRGM, CETE, DGPR, DDT 06, DDT 38, DDT 74, IFSTTAR, Irstea, ONF-RTM (Version du 21 janvier 2014) - Proposition d'une note technique à l'attention des Services Déconcentrés de l'Etat en charge des procédures PPRn. Méthodologie de l'élaboration du volet « aléa rocheux » d'un PPRn. Rédaction du groupe de travail MEZAP du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 49 pages

Dussauge-Peisser C, Helmstetter A, Grasso J-R, Hantz D, Jeannin M, Giraud A. (2002). Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2, 15-26.

E. Chateauminois, A. Desprez, J. Druon, A. Rey (2013) – Passage du cyclone Felleng sur l'île de la Réunion, Compte rendu des observations et désordres du 1^{er} février 2013, Rapport final. Rapport BRGM/RP-62049-FR. 138 p., 7 fig., 2 tabl., 3 ann

Cochery R., Garnier C., Taquet J., (2011) – Etude de caractérisation des formations altéritiques en vue d'une prise en compte en matière de prévention des risques naturels – Tranche 2 - (974). Rapport BRGM/RP-59742-FR, 142 p., 78 fig., 24 tabl., 5 ann

P. Chevalier, Y. De La Torre, A. Hébert et T. Kaufmant, coll. P-F. Chabalier (2002) – Cartographie de l'aléa "érosion des sols" à la Réunion – Phase 2 : Caractérisation et cartographie (1/100 000 à 1/50 000) de l'aléa érosion. Rapport BRGM RP-52031-FR 2002 SGR/REU 22, 67 p., 51 fig., 7 tab., 3 ann.

DEAL de La Réunion (Août 2012). Guide d'élaboration des Plans de prévention des Risques Naturels à La Réunion.

Delibrias G., Guiller M.T., Labeyrie J. (1983) - Gif Natural radiocarbon measurements IX Radiocarbon, t. XXV.

Deniel C. (1988) - ^{230}Th - ^{238}Th radioactive disequilibrium in some differentiated lavas from Piton des Neiges (Réunion Island). *Int. Congr. Geochim. Cosmochim. Paris, Chem. Geol., Spec. Issue 70*, p. 126.

Deniel C., Fieffer G. and Lecointre J. (1992) - New 230Th-238U and 14C age determinations from Piton des Neiges volcano, Reunion - A revised chronology for the differentiated series. *J. Volc. Geotherm. Res.*, 51, p. 253-267.

Deparis J., Tardy D. (2014) – Amélioration de la méthodologie de qualification des aléas mouvements de terrain par les données de résistivité issue de la campagne de géophysique hélicoptée. Rapport final. BRGM/RP-63462-FR, p.59, fig.30, ann.3, CD.

Géolithe (2015) – Etude globale d'exposition aux risques d'éboulements et de chute de blocs sur le site d'Ilet Furcy – Phase 1 – Aléa de rupture, 67p.

Géolithe (2016) – Etude globale d'exposition aux risques d'éboulements et de chute de blocs sur le site d'Ilet Furcy – Phase 2 – Etude de la propagation, 187p.

Géolithe (2016) – Etude globale d'exposition aux risques d'éboulements et de chute de blocs sur le site d'Ilet Furcy – Phase 3 – Solutions de sécurisation, 197p.

Gérard A., Stieljes L. (1979) - Évaluation du potentiel géothermique de l'île de La Réunion. 2ème phase exploratoire : géologie et géophysique. Rapport BRGM 79, SGN 538 GTH, 50 p.

Gillot P.Y., Nativel P.E. (1982) - K-Ar chronology of the ultimate activity of Piton des Neiges volcano, Réunion island, Indian Ocean. *J. Volc. Geotherm. Res.*, 13, p. 131- 146. **LCPC** – Juin 2004 – Guide Technique. Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux. ISBN 1151-1516.

Kieffer G. (1990) - Grands traits morphologiques de l'île de La Réunion (Océan Indien). In *Le Volcanisme de La Réunion, Monographie*, edited by J.F. Lénat, p. 75-114.

Kieffer G., Gillot P.Y., Cornette Y., Germanaz C., Nativel P. (1993) - Une phase éruptive exceptionnelle dans l'histoire récente du Piton des Neiges (île de La Réunion) : l'histoire de la « dalle soudée ». *C.R. Acad. Sci., Paris*, t. 317, série II, p. 835-842.

Kluska J.M. (1997) - Évolution magmatique et morpho-structurale du Piton des Neiges au cours des derniers 500 000 ans. Thèse Univ. Paris XI, 125 p.

McDougall I. (1971) - The geochronology and evolution of the young volcanic island of Réunion, Indian Ocean. *Geochim. and Cosmochim. Acta*, 35, p. 261-288

MEDDE - courrier du 30 septembre 2015 intégrant les points clés et les synthèses des différents groupes de travail (Cotechs 1, 2 et 3) pour la révision des guides méthodologiques relatifs à l'élaboration des PPR en montagne.

Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement et Ministère de l'équipement des transports et du logement (1999). Plans de prévention des risques naturels (PPR) – Risques de mouvements de terrain – Guide méthodologique.

Nachbaur A., Stollsteiner P., Mompelat JM., Sedan O. (2015). Plan de Prévention des Risques Naturels de la commune de Punaauia (Polynésie française). Appui technique et méthodologique. Rapport final. BRGM/RP-64947-FR, p. 91, 24 ill., 8 ann., CD.

Nédellec JL., Cruchet M. – 2008 – Analyse des modes d'effondrement en masse sur plusieurs sites de La Réunion – Rapport BRGM RP-56729-FR. 102p.

OFEV (2016). Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain. Aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue.

Rais A., Laj. C., Sumont J., Gillot P.Y., Guillou H. (1996) - Geomagnetic field intensity between 70000 and 130000 years BP from a volcanic sequence on La Réunion, Indian Ocean. Earth and Planet. Sci. Letters, 140, p. 173 -189.

Rey A. (2016) – RD48 – PR6+770 & RD52 – PR8+700 - Diagnostic des risques géologiques suite aux expertises du 1^{er} mars 2016. Rapport BRGM/RP-65689-FR. 30 p.

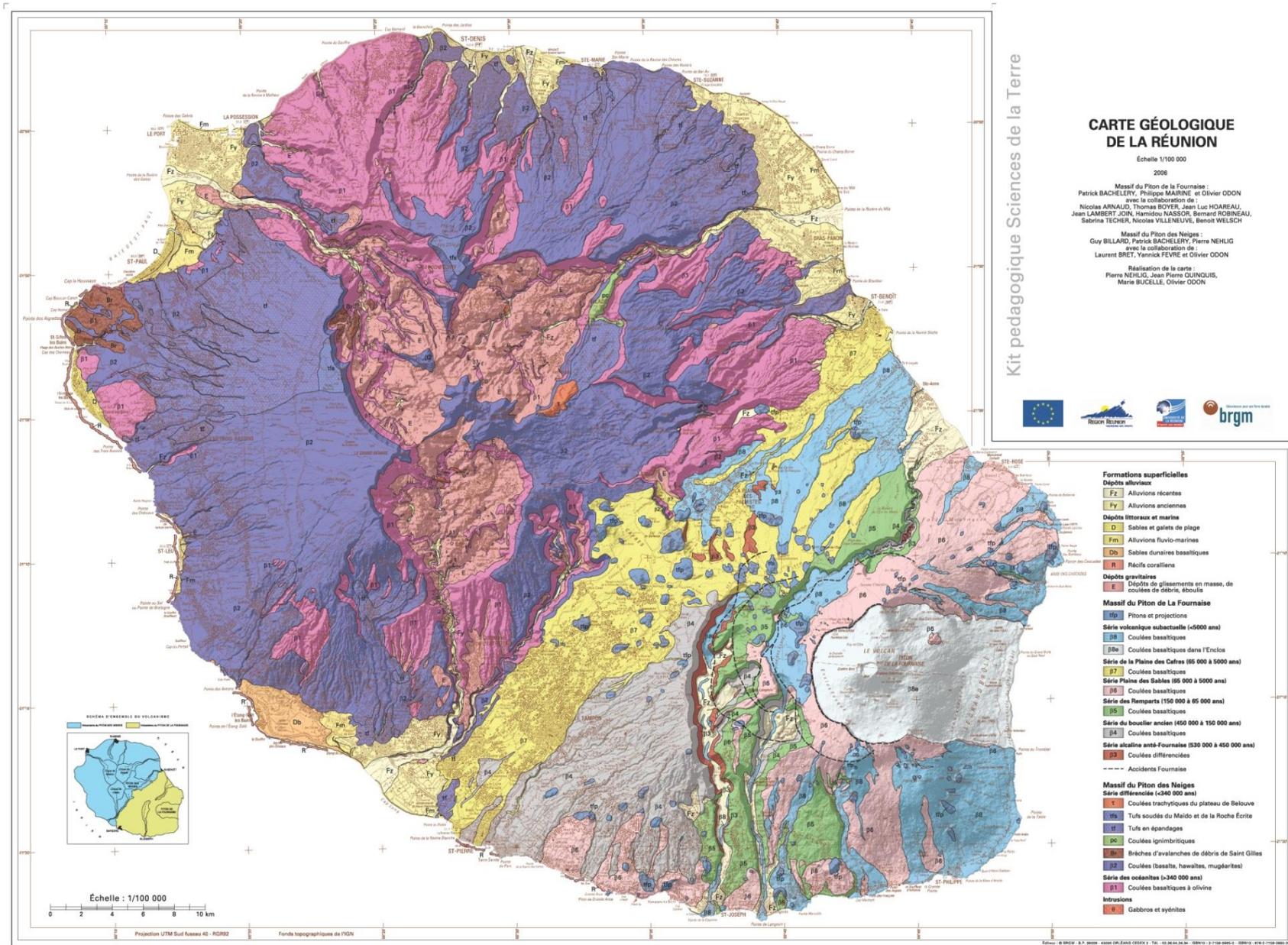
Robin Fell, Jordi Corominas, Christophe Bonnard, Leonardo Cascini, Eric Leroi, William Z (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. Savage on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes.

SAGE (2014) – Commune de Saint-Joseph – Rapport d'expertise relative aux risques de chutes de blocs – Village de la Passerelle, 38 p.

Upton B.G.J., Wadsworth W.J. (1969) - Early volcanic rocks of Réunion and their tectonic significance. Bull. Volc., 33, p. 1246-1268.

Annexe 1

Carte géologique de La Réunion (1/100 000) - 2006



Annexe 2

Méthode des cônes

La méthode des cônes permet d'estimer à partir d'une zone de départ, la localisation du point d'arrêt maximal d'un projectile. Elle est basée sur le principe de la ligne d'énergie développée par HEIM A. en 1932. Le modèle repose sur un principe simple et trivial : un bloc ne peut progresser sur une pente que si celle-ci est suffisamment raide. Ainsi, si la pente est supérieure à un angle limite β , il accélère. Si elle est inférieure à β , il ralentit. En partant de ce constat, un bloc peut aller d'une zone de départ A jusqu'à B, point d'intersection du relief avec une ligne imaginaire partant de la zone de départ et formant un angle β avec l'horizontal (Illustration 50). Cette ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β , l'angle de la ligne d'énergie.

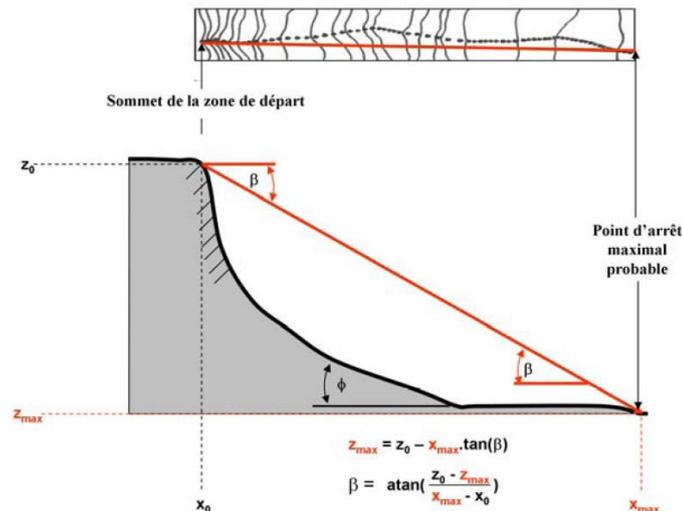


Illustration 50 : Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β

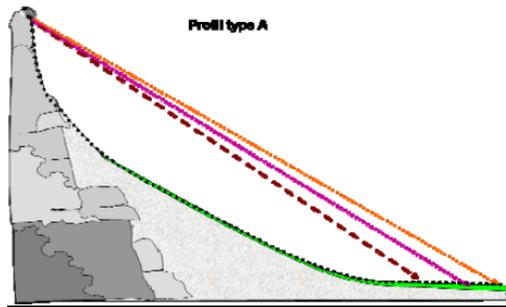
La méthode des cônes permet donc de cartographier l'extension prévisible de l'aléa rocheux par le choix de valeurs d'angle variables en fonction de singularités locales (géologiques et morphologiques notamment). Pour les zones de départ identifiées, les enveloppes d'aléa sont définies ici par l'interception de la topographie aval de la falaise avec un cône de sommet défini par les zones de départ identifiées et d'angle variable en fonction des configurations géologiques et géométriques.

Plusieurs auteurs ont travaillé sur la détermination de l'angle β de la ligne d'énergie selon le principe de Heim (1932). Plus récemment, la prise en compte de forêt de protection dans les versants montre des variations dans les valeurs d'angles à considérer. Dans le guide MEZAP, les auteurs conseillent l'utilisation des valeurs d'angles suivantes pour l'aide à l'expertise dans la cartographie de l'aléa rocheux, avec la nécessité de justifier et d'argumenter le choix des valeurs en fonction de la topographie, de la nature de l'occupation des sols et de l'historique connu.

Valeur seuil de l'angle géométrique	Niveau de probabilité d'atteinte d'un point par un bloc unitaire
$\geq 35^\circ$	Fort
$33^\circ \leq < 35^\circ$	Moyen
$30^\circ \leq < 33^\circ$	faible
$26^\circ \leq < 30^\circ$	très faible mais non nul

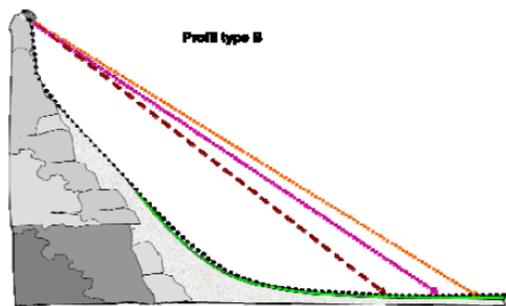
Illustration 51 : Valeurs de seuillage des angles géométriques pouvant être utilisés pour l'aide à l'expertise et la réalisation d'une pré-cartographie de l'aléa chutes de pierres et de blocs (MEZAP, 2014)

Le guide MEZAP propose également les différentes plages de valeurs de seuil pouvant être considérées selon la configuration des profils de propagation (ou de pente).



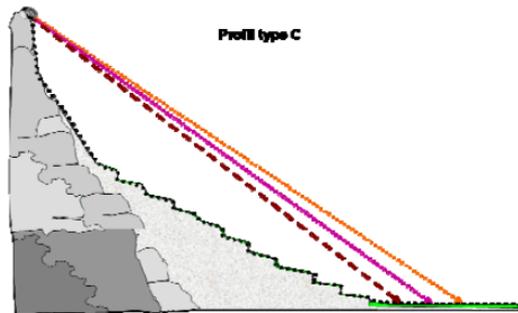
A) Description : Profil de pente régulière en pied de zone de départ.

Qualification des niveaux de probabilités : répartition statistique des blocs régulières selon des valeurs d'angle usuelles (**A titre indicatif :** Fort de l'ordre de 34°, Moyen de l'ordre de 32°, Faible de l'ordre de 30°)



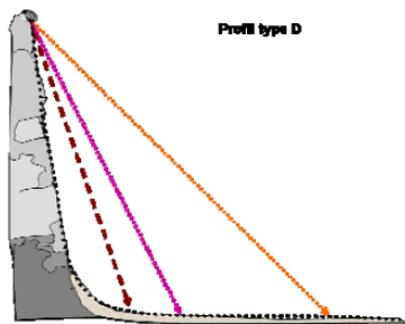
B) Description : Profil de pente régulière en pied de zone de départ avec replat marqué en fin de trajectoire.

Qualification des niveaux de probabilités : répartition statistique des blocs resserrée, valeurs d'angle plus fortes (**A titre indicatif :** Fort de l'ordre de 34-38°, Moyen de l'ordre de 33-37°, Faible de l'ordre de 31-36°)



C) Description : Profil de pente irrégulière en pied de zone de départ (terrasses agricoles...).

Qualification des niveaux de probabilités : répartition statistique des blocs régulières selon des valeurs fortes (**A titre indicatif :** Fort de l'ordre de 34-38°, Moyen de l'ordre de 32-36°, Faible de l'ordre de 30-34°)



D) Description : Falaise et replat marqué

Qualification des niveaux de probabilités : répartition statistique des blocs très resserrée valeurs d'angle très fortes (la méthode des cônes ne s'applique dans ce cas qu'au sens d'une méthode géométrique permettant par un rapport de distance d'apprécier les distances de propagation. A titre indicatif il n'est pas impossible de retenir des valeurs supérieures à 40°)

Illustration 52 : Exemples de modulations des intervalles d'angles de la méthode des cônes en fonction des profils de pente pouvant être rencontrés (MEZAP, 2014)

Annexe 3

Qualification des seuils de probabilité d'atteinte

Dans les études trajectographiques ADRGT 1989, IMSRN 2002, Sage 2007 et Géolithe 2007, des synthèses de l'aléa chutes de pierres ont été proposées en se basant sur les seules probabilités d'atteinte obtenues lors des travaux de simulations. La figure suivante présente les seuils de probabilités d'atteinte (notée PA) utilisées par chacun de ces bureaux d'études pour proposer une discrétisation cartographique en classe d'aléa fort, moyen faible et le cas échéant très faible.

Source	Zone d'aléa fort	Zone d'aléa moyen	Zone d'aléa faible	Zone d'aléa très faible
ADRGT 1994	$PA > 10^{-2}$	$10^{-2} > PA > 10^{-4}$	$10^{-4} > PA > 10^{-6}$	$10^{-6} > PA$
IMSRN 2002	$PA \geq 10^{-4}$	$10^{-4} > PA \geq 10^{-6}$	$10^{-6} > PA$	N'existe pas
Géolithe 2007	$PA > 10^{-2}$	$10^{-2} \geq PA > 10^{-3}$	$10^{-3} \geq PA > 10^{-4}$	$10^{-4} \geq PA$
SAGE 2007	$PA > 10^{-2}$	$10^{-2} > PA > 10^{-4}$	$10^{-4} > PA > 10^{-6}$	$10^{-6} > PA$

Illustration 53 : Tableau comparatif des seuils de zonage d'aléa dans les précédentes études trajectographiques réalisées (NB : l'ADRGT et SAGE sont en fait le même bureau d'étude).

Au regard de ce tableau on s'aperçoit que :

- Les valeurs des seuils sont différents entre ces trois bureaux d'étude (SAGE = ADRGT)
- Que pour l'ADRGT-SAGE, les intervalles utilisés ont des bornes exclusives et que dans les rapports d'étude on ne trouve aucune information sur l'attribution d'une classe aux valeurs de probabilité d'atteinte de 10^{-2} , 10^{-4} et 10^{-6} .

Une des explications possibles à ces différences de bornes de seuillage est qu'elles sont adaptées aux différents modèles utilisés et que par conséquent au final pour un même secteur les propositions doivent converger. En fait, compte tenu des résultats présentés par ces bureaux d'études il n'en n'est rien. En effet, les zones de propagations obtenues par simulations diffèrent d'un bureau d'étude à l'autre. Ceci est explicable par :

- Le choix du scénario de départ
- Le choix des paramètres de restitution des sols
- La robustesse des modèles utilisés

Le CEMAGREF (2009) à partir des valeurs présentées sur l'illustration précédente, a proposé aux experts de l'Etat en charge de la révision du PPR de Veyrier du Lac d'utiliser pour les probabilités d'atteinte les seuils suivants :

Probabilité d'atteinte (PA)	$\geq 10^{-2}$	$10^{-2} > PA \geq 10^{-4}$	$10^{-4} > PA \geq 10^{-6}$	$10^{-6} > PA$
Signification	Probabilité d'atteinte Forte	Probabilité d'atteinte moyenne	Probabilité d'atteinte faible	Probabilité d'atteinte très faible

Illustration 54 : Proposition de seuillage par le Cemagref pour les classes des probabilités d'atteinte

Il n'existe pas en France de doctrine nationale pour la qualification des seuils d'atteinte selon les probabilités calculées. Le programme de recherche INTERREG IIC Falaise a proposé une ébauche de réflexion (ADRGT) basée sur les observations et sur les calculs de trajectographie notamment. A partir de l'observation de blocs extrêmes et d'une probabilité d'atteinte calculée

(p_0), il est proposé de considérer comme limites aval les points d'abscisse correspondant aux probabilités de $10^{-2} p_0$ et $10^{-4} p_0$. Les implications sur l'aménagement du territoire seraient les suivantes avec entre parenthèses la définition supposée de classe d'aléa (non considération de l'intensité de phénomène ici) :

- $p > p_0$: pas de construction autorisées ; protection à prévoir en urgence pour l'existant (i.e. ALEA FORT, associée à atteinte forte);
- $10^{-2} p_0 < p < p_0$: pas de construction neuve a priori ; pour l'existant, protections à prévoir avec un ordre d'urgence décroissant (i.e. ALEA MOYEN, associée à atteinte moyenne) ;
- $10^{-4} p_0 < p < 10^{-2} p_0$: construction neuve possible moyennant protections (i.e. ALEA FAIBLE, associé à atteinte faible)
- $P < 10^{-4} p_0$: construction libre (i.e ALEA NUL, associée à atteinte négligeable à nulle)

Cette méthode a de nombreuses limites (utilisation impossible sur des sites non concernés par des chutes de blocs répertoriées, définition de p_0 non univoque en particulier – dépendante de l'intensité et de la fréquence des événements du site). Néanmoins, elle pose les bases d'une hiérarchisation qualitative. Dans l'hypothèse d'une probabilité qualifiée de « FORTE » lorsque 1 bloc sur 100 au moins [$p_0 = 1\%$ (10^{-2})] atteint une abscisse donnée, cette règle permet de proposer qualification des atteintes comme suit :

- $p > 10^{-2}$: atteinte forte ;
- $10^{-4} < p < 10^{-2}$: atteinte moyenne ;
- $10^{-6} < p < 10^{-4}$: atteinte faible ;
- $p < 10^{-6}$: atteinte négligeable à nulle (très faible).

Ces valeurs rejoignent la proposition CEMAGREF (2009, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) présentée ci-avant. Les discussions au sein du GT MEZAP a pour sa part proposé des valeurs fortement conservatoires suivantes :

<i>Niveau de probabilité d'atteinte d'un point</i>	
Faible	$< 10^{-6}$ des blocs atteignent le point
Moyen	$10^{-6} \leq < 10^{-4}$ des blocs atteignent le point
Fort	$10^{-4} \leq < 10^{-2}$ des blocs atteignent le point
Très fort	$10^{-2} \leq$ des blocs atteignent le point

Illustration 55 : Qualification des niveaux de probabilité d'atteinte à partir des résultats obtenus avec un logiciel de trajectographie (Annexe 6 – § 1.1.5 des recommandations MEZAP à paraître)

Annexe 4

Principaux résultats de l'étude « Altérites – Phase 2 »

Extrait du rapport (document public téléchargeable sur le site <http://infoterre.brgm.fr/>) :

Cochery R., Garnier C., Taquet J., (2011) - Etude de caractérisation des formations altéritiques en vue d'une prise en compte en matière de prévention des risques naturels – Tranche 2 - (974). Rapport BRGM/RP-59742-FR, 142 p., 78 fig., 24 tab., 5 ann.

		altérite I	altérite II	altérite III
classement des altérites selon AFTES et ISMR		2 et 3	4	5 et 6
classement sols selon ISMR, 1980		W ₂ et W ₃ (roche légèrement et moyennement altérée)	W ₄ (roche fortement altérée)	W ₅ (roche complètement altérée)
description générale		début d'altération de la roche, existence de quelques particules argileuses	altération bien distincte, particules argileuses nombreuses, résidus de roches saine, plus de 50% de la roche correspond à un sol	altération prononcée, horizon C bien défini, le faciès se rapproche d'un sol. Selon la localisation : andosols, sol hétérogène, sol ferrallitiques ou sol brun
texture selon les bureaux d'études		1 et 2	3, 4 et 5	6
nombre de données issues des bureaux d'études		12	24	22
poids volumique (kN/m ³)	Min.	18	17	17
	Max.	25	22	20
	Moy.	22	19,1	18,3
cohésion (kPa)	Min.	20	10	5
	Max.	100	40	25
	Moy	53,6	20,9	14,3
angle de frottement (°)	Min.	30	25	22
	Max.	40	40	30
	Moy.	35,8	29,5	26,1
module pressiométrique (Mpa)	Min.	15,4	7,6	2,5
	Max.	192	72,7	27,5
	Moy.	89,6	29,3	13,6
pression limite (Mpa)	Min.	0,6	0,4	0,2
	Max.	3,2	2	1,7
	Moy.	2	1,4	0,7

Tableau 38 : Proposition de regroupement des altérites de La Réunion et principales caractéristiques géotechniques

Les simulations de stabilité effectuées ont mis en évidence les principaux paramètres influençant la stabilité des altérites volcaniques de la Réunion :

- les paramètres prépondérants :
 - la valeur de cohésion, directement liée au niveau d'altération ;
 - la géométrie du talus ;
 - la présence d'eau dans le talus ;
- les paramètres secondaires :
 - la variabilité de faciès ;
 - la présence d'une surcharge en crête de talus.

Les résultats des simulations effectuées, intégrant les principaux paramètres de prédisposition, ont permis d'obtenir, pour les altérites de types II et III, une classification de l'aléa glissements de terrain basé sur le facteur de sécurité calculé Γ_{\min} . Cette proposition de classification (cf. ci-dessous) permet de prendre en considération d'autres facteurs (appréciables sur le terrain) que le faciès en présence et la géométrie du talus (présence d'éventuels facteurs aggravants).

niveau d'aléa	Γ_{\min}
nul à très faible	$2 < \Gamma_{\min}$
faible	$1,5 < \Gamma_{\min} < 2$
faible à moyen	$1,4 < \Gamma_{\min} < 1,5$
moyen	$1,25 < \Gamma_{\min} < 1,4$
moyen à fort	$1 < \Gamma_{\min} < 1,25$
Fort	$\Gamma_{\min} < 1$

Cette grille permet d'obtenir une qualification de l'aléa glissements de terrain en fonction de la classe d'altération, de la géométrie du talus et de la présence éventuelle de conditions hydrogéologiques défavorables.

Illustration 56 : Extrait de la conclusion du rapport d'étude « Altérites – Phase 2 » à propos de la classification de l'aléa glissement de terrain dans des secteurs composés d'altérites

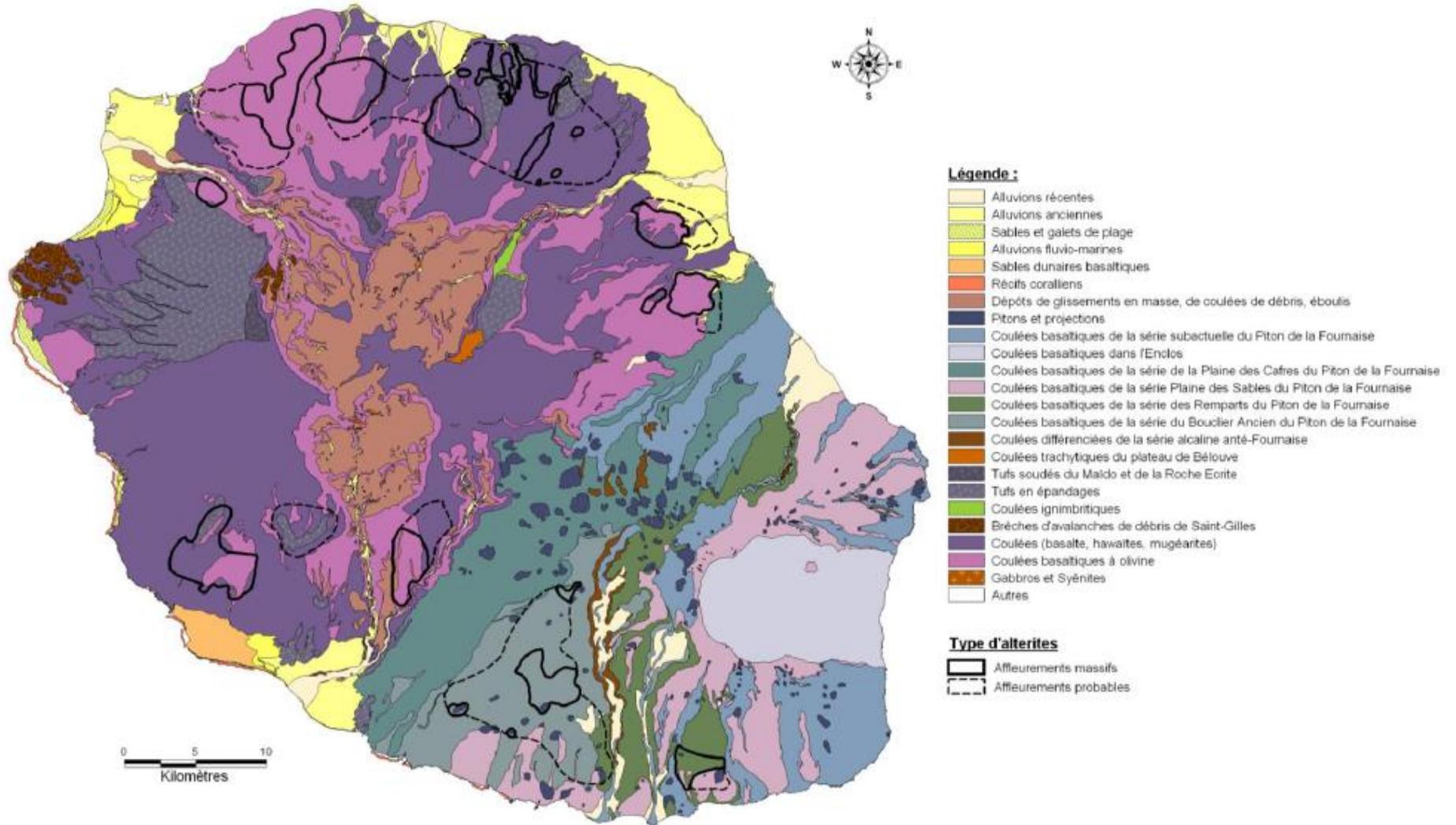


Illustration 57 : Superposition de la carte géologique de La Réunion au 1/100 000 (BRGM, 2006) et des affleurements altéritiques recensés dans l'étude (phase 1)

Annexe 5

Méthode C2PN (Roudnitska – ONF – RTM – avril 2014)

S. ROUDNITSKA - ONF-RTM - avril 2014 version 1

Problématique :

Sur un même site géographique et pour une même nature de phénomène naturel, des événements d'ampleurs variées peuvent se produire au cours du temps. Leur ampleur dépend elle-même de l'intensité des facteurs déclenchants et de leur possible conjonction. Il en résulte une puissance et une extension du phénomène naturel souvent proportionnelles à sa période de retour.

Pour les phénomènes périodiques (avalanches, chutes de pierres, crues torrentielles, inondations, coulées de boue, effondrements, érosions de berges et ravinements), nous proposons donc de cartographier trois types de scénarios, de période de retour spécifique :

- un scénario fréquent, de période de retour moyenne 30 ans ;
- un scénario rare, de période de retour moyenne centennale ;
- un scénario exceptionnel ou maximal vraisemblable, de période de retour pluri-centennale.

Chaque scénario se caractérise par une gamme d'intensité, évaluée principalement en fonction de son potentiel d'endommagement du bâti (voir grilles de caractérisation des intensités par phénomènes).

Afficher ces trois types de scénarios sur une même carte présente un intérêt en terme de traçabilité de l'expertise :

Les zones fréquemment atteintes sont bien connues de la population et incontestables. Elles sont délimitées à partir d'observations et données historiques souvent précises.

Les zones rarement atteintes peuvent être délimitées avec une part d'incertitude, les données historiques étant parfois lacunaires et la part d'expertise plus importante.

Les zones potentiellement exposées, liées à concours de circonstances exceptionnel ou à un dépassement de seuil, sont entachées d'une forte incertitude. Elles permettent d'englober la marge d'incertitude non retenue dans le scénario rare.

Pour les phénomènes continus (glissements de terrain, affaissements), on ne peut généralement pas parler de période de retour. Nous parlerons plutôt d'activité, directement liée au potentiel d'endommagement du bâti.

Lorsque l'activité présente au moment de l'expertise n'est pas l'activité maximale prévisible à l'échelle du siècle, il est possible de distinguer ces deux niveaux d'activité. Cela permet de justifier un possible décalage entre activité observée et niveau d'aléa retenu.

Indices de qualification des scénarios :

Il faut pouvoir décrire simplement, sur carte, la nature du phénomène ainsi que le couple « intensité/période de retour » ou le couple « activité présente/activité maximale » retenu sur la zone.

La nature du phénomène est donc représentée par une lettre :

- A : avalanche
- C : coulée de boue
- E : effondrement
- F : affaissement
- G : glissement de terrain
- I : inondation
- P : chute de pierres
- R : ravinement
- S : érosion de berge
- T : crue torrentielle

A cette lettre est joint, en indice, un couple de chiffres, variant de 1 à 3 et représentant les gammes d'« intensité/période de retour » ou d'« activité présente/activité maximale » retenues.

Voir tableaux ci-après.

Famille de phénomènes définis par un couple "intensité / période de retour"

Période de retour (T) \ Intensité	100 ans < T ≤ 300 ans scénario exceptionnel : 1	30 ans < T ≤ 100 ans scénario rare : 2	0 ans < T ≤ 30 ans scénario fréquent : 3
faible : 1	1-1	1-2	1-3
moyenne : 2	2-1	2-2	2-3
élevée : 3	3-1	3-2	3-3

Niveau d'aléa : Faible  Moyen  Elevé  Exceptionnel 

A chaque couple d'indice correspond un niveau d'aléa.

Dans l'enveloppe des scénarios fréquents à rares, le niveau de l'aléa est déterminé en fonction de l'intensité maximale prévisible du phénomène. Un code couleur différent de celui du zonage réglementaire est associé à ces niveaux d'aléas.

Pour une meilleure lisibilité, l'enveloppe concernée uniquement par le scénario exceptionnel est associée à une seule couleur (au hasard le jaune...). L'indice d'intensité donne cependant une indication de l'impact prévisible du phénomène, et donc des mesures de sauvegarde adaptées.

Famille de phénomènes définis par un couple "activité présente / activité maximale"

Activité maximale \ Activité présente	faible : 1	moyenne : 2	élevée : 3
faible : 1	1-1	1-2	1-3
moyenne : 2		2-2	2-3
élevée : 3			3-3

Niveau d'aléa : Faible  Moyen  Elevé 

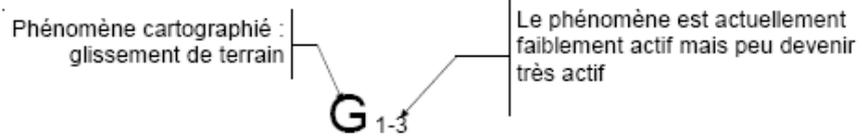
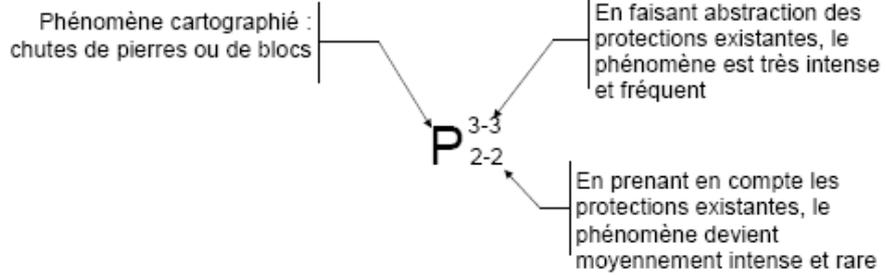
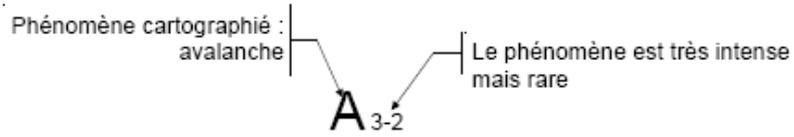
Prise en compte des ouvrages de protection existants :

Si l'existence d'ouvrages de protection ou de boisements à rôle de protection est de nature, sur le long terme, à modifier le niveau de l'intensité, de la période de retour ou de l'activité du phénomène, il est possible d'en tenir compte, au niveau du couple d'indices.

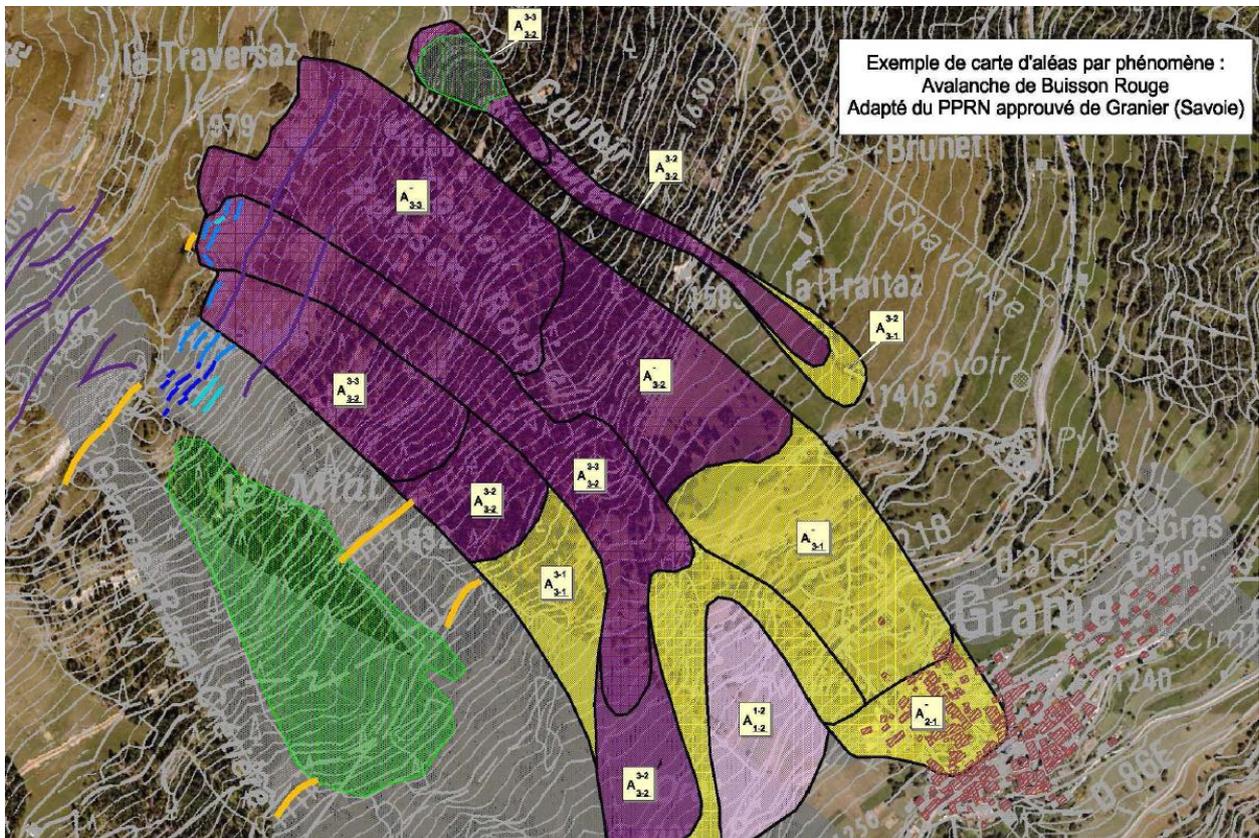
Le couple de chiffre caractérisant le phénomène « hors protection » sera alors rappelé en exposant. La comparaison de ces deux couples permet de mesurer l'efficacité prévisible des protections (voir exemples ci-après). L'aléa peut résulter du phénomène « avec protection » ou « hors protection », au choix.

A noter qu'une protection peut augmenter la période de retour du phénomène sans pour autant diminuer le niveau de l'aléa.

Exemples de codification :



Exemple de cartes d'aléas par phénomène :





Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Réunion
5, rue Sainte Anne
97400 Saint-Denis – La Réunion - France
Tél. : 02 62 21 22 14