

Caractérisation des aléas chute de blocs et glissement de terrain pour différentes périodes de référence (démarche STEPRIM) – Application sur deux sites pilotes du Cirque de Salazie

Rapport final

BRGM/RP-69999-FR
Mai 2021

M. Chaput

Vérificateur :

Nom : B. Colas

Fonction : Ingénieur géotechnicien

Date : 06/04/2021

Signature :



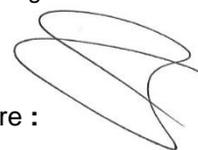
Approbateur :

Nom : K. Samyn

Fonction : Directeur régional – La Réunion

Date : 17/05/2021

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés : aléa, mouvement de terrain, chute de bloc, glissement de terrain, STEPRIM, Cirque de Salazie, La Réunion.

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

Chaput M. (2021) – Caractérisation des aléas chute de blocs et glissement de terrain pour différentes périodes de référence (démarche STEPRIM) – Application sur deux sites pilotes du Cirque de Salazie. Rapport final. BRGM/RP-69999-FR, 125 p., 55 fig., 30 tabl.

Synthèse

Dans le cadre du développement d'une démarche STEPRIM, visant à élaborer une stratégie territoriale pour la prévention des risques en montagne, la DEAL Réunion a missionné le BRGM afin de réaliser un diagnostic du territoire du Cirque de Salazie, axé sur la connaissance des aléas chute de blocs et glissement de terrain. La démarche STEPRIM vise à identifier les zones d'emprises potentielles pour différents aléas selon trois scénarii de référence : un scénario fréquent, un scénario centennal et un scénario exceptionnel. Le diagnostic est limité au phénomène de chutes de blocs et de glissement de terrain.

Le diagnostic du territoire de Salazie s'est fondé sur une approche de caractérisation des aléas dite hybride, basée à la fois sur une approche quantitative (recueil de données historiques, analyse statistique de données et modèles physiques de trajectographie) et sur une approche qualitative « à dire d'expert » lorsque des données sont manquantes ou insuffisantes.

Pour l'aléa chute de bloc/éboulement, une analyse détaillée a été menée à l'échelle de l'encaissement de la Rivière du Mât, depuis le Pont Bengalis jusqu'à l'entrée du village de Salazie. En effet, cette zone bénéficie d'une base de donnée événementielle relativement importante depuis une vingtaine d'années grâce au recensement quasi-systématique des atteintes sur l'itinéraire routier. Sur ce secteur, une cartographie « test » de l'aléa en fonction des différents scénarii a été réalisée sur le site pilote de Plateau Wickers/Camp Lilas, secteur habité, à enjeux et fortement exposé aux chutes de blocs.

Pour l'aléa glissement de terrain, les processus de déclenchement, d'évolution et de propagation sont plus complexes. L'état des connaissances actuelles est donc moindre et les données moins nombreuses. L'analyse a porté sur les événements historiques survenus sur l'ensemble du Cirque de Salazie et sur les connaissances récentes acquises au droit des glissements lents de grande ampleur du Cirque, en particulier sur la zone de Grand Ilet et de Fond de Rond-Point. Les études en cours sur ces secteurs (études structurales, géomorphologiques, géophysiques dans le cadre du projet de recherche RenovRisk-Erosion) permettent d'apporter de nouvelles connaissances pour une meilleure caractérisation de cet aléa dans le cirque.

Ce travail d'analyse a permis de proposer des gammes d'intensité des phénomènes attendus pour chaque scénario et de définir des approches méthodologiques adaptées pour la caractérisation des aléas pour diverses périodes de référence.

La mise en application cartographique des cartes d'aléa pour les différents scénarios, menée dans un premier temps à l'échelle de zones pilotes, a vocation à être précisée puis étendue à l'ensemble du Cirque de Salazie. Puis, grâce au recensement des enjeux présents dans le Cirque, une cartographie du risque pourra être élaborée, permettant de hiérarchiser les zones les plus exposées aux phénomènes gravitaires et de prioriser les actions de sécurisation à mener à court terme sur ce territoire.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Contexte général	15
2.1. ZONE D'ETUDE ET CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE	15
2.2. GEOLOGIE	16
2.2.1. Les formations effusives	17
2.2.2. Les formations pyroclastiques.....	17
2.2.3. Les formations de démantèlement	18
2.3. HYDROLOGIE ET HYDROGEOLOGIE	21
2.4. CLIMATOLOGIE	22
3. Diagnostic du territoire – Connaissance des aléas	25
3.1. CHUTES DE BLOCS – EBOULEMENTS.....	25
3.1.1. Inventaire évènementiel.....	25
3.1.2. Sectorisation de la zone d'étude	35
3.1.3. Analyse statistique et loi fréquence vs volume	50
3.1.4. Définition des intensités attendues pour différentes périodes de référence (logique STEPRIM)	54
3.2. GLISSEMENTS DE TERRAIN	56
3.2.1. Inventaire évènementiel.....	56
3.2.2. Désordres observés au droit des glissements lents	76
3.2.3. Définition des intensités attendues pour les différentes périodes de références (logique STEPRIM) pour les différents types de glissement.....	78
4. Méthodologie d'évaluation de l'aléa appliquée à la démarche STEPRIM	83
4.1. CHUTES DE BLOCS	83
4.1.1. Méthode générale.....	83
4.1.2. Aléa de rupture	84
4.1.3. Probabilité d'atteinte	91
4.1.4. Probabilité d'occurrence.....	101
4.1.5. Aléa résultant.....	103
4.1.6. Stratégie de cartographie de l'aléa chute de bloc à l'échelle du cirque de Salazie	
105	
4.2. GLISSEMENT DE TERRAIN	106
4.2.1. Glissements spontanés.....	106
4.2.2. Glissements permanents, de grande ampleur.....	111

4.2.3. Application sur le site pilote de Grand Ilet	112
5. Conclusion.....	122
6. Bibliographie	123
7. Annexes	125

7.1. ANNEXE 1 : GAMMES DE VALEURS D'ANGLES D'ENERGIE EN FONCTION DES PROFILS DE PENTE POUVANT ETRE RENCONTRES (MEZAP, 2014).	125
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Liste des figures

Figure 1 – Vue générale du Cirque de Salazie (fond carte IGN 1/25 000, 2015). La zone d'étude générale est délimité par les tirets noirs. Les deux sites pilotes sont localisés par les tirets rouges (Plateau Wickers au nord-est du village de Salazie pour l'aléa chute de blocs et Grand Ilet à l'ouest pour l'aléa glissement de terrain).....	16
Figure 2 - Ignimbrite prismée de Salazie, affleurant au niveau de Plateau Wickers.....	18
Figure 3 : Extrait de la carte géologique au 1/25000 du Cirque de Salazie (Lacquement et Nehlig, 2008).....	20
Figure 4 – Réseau hydrographique de Salazie (fond Lidar 2015 © Région Réunion).....	21
Figure 5 – Pluviométrie moyenne annuelle sur l'île de La Réunion (Météo-France).....	22
Figure 6 - Répartition de l'activité chute de blocs l'ensemble du Cirque de Salazie (fond orthophoto IGN 2017). Les losanges représentent le plus souvent les points d'arrivée des blocs. Très peu d'évènements disposent d'information sur la zone de départ des blocs.	26
Figure 7 – Fréquence des évènements de chute de blocs en fonction du volume sur l'ensemble du Cirque de Salazie.....	27
Figure 8 - Répartition de l'activité chute de blocs sur le linéaire de l'encaissement de la Rivière du Mât (fond orthophoto IGN 2017).....	28
Figure 9 – Fréquence des évènements de chute de blocs en fonction du volume sur l'encaissement de la Rivière du Mât.	29
Figure 10 – Eboulement en masse du rempart face à l'îlet Morin en septembre 2010.	31
Figure 11 – Blocs de plusieurs dizaines de m ³ observés dans le secteur de Petit Trou. a. Bloc d'environ 60m ³ ; b. bloc d'environ 20m ³	32
Figure 12 – Chaos de blocs observé au niveau de Plateau Wickers.....	33
Figure 13 – Blocs isolés de taille proche du m ³ observés à Plateau Wickers	34
Figure 14 – Localisation des différents secteurs identifiés le long de l'encaissement de la Rivière du Mât, à partir de l'analyse géomorphologique et de l'activité chute de blocs.	35
Figure 15 – Carte des pentes et localisation des évènements chute de blocs sur le secteur 1.	36
Figure 16 - Carte des pentes et localisation des évènements chute de blocs sur le secteur 2. .	38
Figure 17 - Carte des pentes et localisation des évènements chute de blocs sur le secteur 3. .	40
Figure 18 - Carte des pentes et localisation des évènements chute de blocs sur le secteur 4. .	42
Figure 19 - Carte des pentes et localisation des évènements chute de blocs sur le secteur 5. .	44

Figure 20 - Carte des pentes et localisation des évènements chute de blocs sur le secteur 6 .	46
Figure 21 - Carte des pentes et localisation des évènements chute de blocs sur le secteur 7 .	49
Figure 22 – Relation entre la fréquence annuelle cumulée et le volume des évènements de l’inventaire (courbes noires) pour les différents secteurs de l’encaissement de la Rivière du Mât et loi fréquence-volume calculée (tiretés rouge).	53
Figure 23 – Répartition de l’activité glissement de terrain dans le cirque de Salazie (fond orthophoto IGN 2017). En tirets blancs sont délimités les sept glissements lents de grande ampleur connus dans le cirque.	57
Figure 24 – Nombre de glissements de terrain « spontanés » dans le cirque de Salazie en fonction de leur volume recensés entre 1998 et 2018.	58
Figure 25 – Glissement de la bordure Est du plateau de Grand Ilet lors de Béjisa en 2014 (volume estimé 1 million de m ³).	59
Figure 26 - Relation entre la fréquence annuelle cumulée et le volume des glissements spontanés de l’inventaire (symboles noirs) dans le cirque de Salazie et loi fréquence-volume calculée (droite tiretée rouge).	60
Figure 27 – Recul observé entre 2003 et 2012 au niveau de la ravine Nourry, en bordure Nord du plateau de Grand Ilet et principalement lié au passage du Diwa en 2006 (Aunay et al., 2015).	62
Figure 28 – Erosion régressive en bordure du plateau d’Ilet à Vidot suite à Gamède.	62
Figure 29 – Comparaison des orthophotos de 1997 (en haut) et 2008 (en bas) sur le secteur de plateau Artimidor (flanc sud de Mare à Citrons) en rive gauche de la rivière du Mât, montrant les phénomènes d’érosion et de recul.	63
Figure 30 – Photos aériennes du plateau de Grand Ilet avant et après le passage de Hyacinthe et montrant les reculs associés aux phénomènes de déboulés (d’après Aunay et al., 2015).	65
Figure 31 – Vitesses annuelles de déplacement planimétrique des différents glissements de grande ampleur du cirques de Salazie entre 2003 et 2018 (rapport RP-68284-FR, Cance et Rey, 2018).	67
Figure 32 – Déplacement horizontaux cumulés sur le glissement d’Ilet à Vidot entre mai 2010 et mai 2014 montrant l’accélération des vitesses de déplacement corrélée la pluviométrie (Belle, 2014).	68
Figure 33 – Indices d’activité anciens et actuels sur le plateau de Grand Ilet et vitesses de déplacement sur la période 2003-2008 (Garnier, 2008).	70
Figure 34 – Vue aérienne du glissement de Grand Ilet et des différents compartiments qui le compose (Garnier, 2008).	70
Figure 35 (page suivante) – a. Morphologie du glissement de Grand Ilet. La ligne A-B localise la coupe présentée en b. b. Coupe interprétative de la structure interne du glissement de Grand Ilet le long du profil A-B. (modifié d’après Rault et al., 2021).	71
Figure 36 – Déplacements annuels moyens planimétriques sur la période 2003-2008 sur le glissement d’Hell-Bourg (Garnier et Lucas, 2008).	74
Figure 37 (page suivante) - a. Morphologie et structure de surface du glissement de Hell-Bourg/Fond de Rond Point. La ligne A-B localise la coupe présentée en b. b. Coupe interprétative de la structure interne du glissement de Hell-Bourg le long du profil A-B (modifié d’après Rault et al., 2021).	74
Figure 38 – Exemples de désordres au bâti observés sur le plateau de Grand Ilet (en haut, école ; en bas, ancienne Poste – Garnier, 2008)	77
Figure 39 – Désordres sur le bâti d’une habitation située dans l’emprise du glissement de Mare à Goyaves	77

Figure 40 – Impact du glissement de Fond de Rond Point sur les terrains au niveau de Mare à Poule d’Eau, avec un déplacement de 15 à 20 m en 10 ans sur ce secteur.....	78
Figure 41 – Carte des pentes dérivées du MNT 5m sur le secteur 2 de la zone d’étude (fond orthophoto IGN 2017, isolignes 5m).....	86
Figure 42 - Carte des pentes dérivées du MNT 5m sur les secteurs 5 et 6 de la zone d’étude (fond orthophoto IGN 2017, isolignes 5m).....	86
Figure 43 – Définition de l’indice d’intensité de l’aléa rocheux en fonction du volume et du potentiel de dommages (MEZAP, 2014).	87
Figure 44 – Définition de l’indice d’activité de l’aléa rocheux pour une période de référence de 100 ans (MEZAP, 2014)	88
Figure 45 – Représentation cartographique des résultats des simulations trajectographiques pour le scénario fréquent et centennal le long des différents profils sur le secteur 7 (fond Orthophoto IGN 2017 – isolignes 10 m MNT Lidar 2015 – Sintegra.	94
Figure 46 – Probabilités d’atteinte obtenues par le modèle ELANA basé sur la méthode de l’aire normalisée, sur le secteur de Plateau Wickers/Camp Lilas et comparaison avec les résultats de trajectographie (fond Orthophoto IGN2017 – isolignes 10m MNT Lidar 2015 Sintegra).	97
Figure 47 – Enveloppes de probabilités d’atteinte forte (rouge), moyenne (orange) et faible (jaune) retenues pour des volumes unitaires de blocs de 5 m ³ (limite haute du scénario fréquent) et de 10m ³ (scénario centennal) sur le site pilote de Plateau Wickers obtenues par trajectographie. Un bandeau sécuritaire de 50 m a été ajouté pour tenir compte des incertitudes liées à la méthode trajectographique (fond Scan topo IGN 1/25 000 ^e , 2015).	99
Figure 48 – Probabilités d’occurrence pour les scénarios fréquent (à gauche) et centennal (à droite) sur le secteur de Plateau Wickers.	102
Figure 49 – Aléa Chute de blocs sur le site pilote de plateau Wickers pour les scénarios fréquent (à gauche) et centennal (à droite).....	104
Figure 50 – Carte des pentes du cirque de Salazie, localisant les principaux glissements actifs du cirque : Mare à Goyaves, Hell-Bourg/Fond de Rond-Point, Ilet à Vidot, Grand Ilet, Mathurin, Le Bélier et Camp Pierrot.	107
Figure 51 – Probabilité d’occurrence de glissements spontanés sur le secteur de Grand Ilet (fond Scan Topo IGN 1/25 000 ^e , 2015). Les triangles bleus et blancs représentent les événements recensés à la BDMVT (cf. figure 23).....	114
Figure 52 – Cartographie des intensités attendues pour le scénario fréquent (à gauche) et le scénario centennal (à droite) pour des phénomènes de glissements spontanés (fond Scan Topo IGN 2015).	116
Figure 53 – Cartographies de l’aléa glissement spontané sur le secteur de Grand Ilet, pour le scénario fréquent (à gauche) et le scénario centennal (à droite).	117
Figure 54 – Aléa Glissement de grande ampleur sur le secteur de Grand Ilet pour le scénario fréquent (à gauche) et centennal (à droite) (fond Scan Topo IGN 2015).....	119
Figure 55 – Aléa glissement de terrain sur le secteur de Grand Ilet pour un scénario fréquent (à gauche) et centennal (à droite).	121

Liste des tableaux

Tableau 1 – Pluie quotidienne du 15 au 27 janvier 1980 sur les stations de Grand Ilet et Hell-Bourg lors du passage du cyclone Hyacinthe (Pinchinot, 1984).....	23
Tableau 2 – Cumuls pluviométriques estimés pour différentes périodes de retour, pour des épisodes de 24, 48 ou 96h à Mare à Vieille Place (données Météo France).	23
Tableau 3 - Répartition des volumes des évènements connus de chute de blocs sur la période 1998-2020 dans le Cirque de Salazie.....	26
Tableau 4 – Répartition des volumes des évènements connus de chute de blocs sur la période 1998-2020 dans l'encaissement de la Rivière du Mât.....	29
Tableau 5 – Fréquence des évènements en fonction du volume sur le Secteur 1	37
Tableau 6 - Fréquence des évènements en fonction du volume sur le Secteur 2.....	39
Tableau 7 - Fréquence des évènements en fonction du volume sur le Secteur 3.....	41
Tableau 8 - Fréquence des évènements en fonction du volume sur le Secteur 4.....	43
Tableau 9 - Fréquence des évènements en fonction du volume sur le Secteur 5.....	45
Tableau 10 - Fréquence des évènements en fonction du volume sur le Secteur 6.....	47
Tableau 11 - Fréquence des évènements en fonction du volume sur le Secteur 7.....	49
Tableau 12 – Caractéristiques principales des différents secteurs de l'encaissement de la rivière du Mât.....	50
Tableau 13 – Loi fréquence-volume calculée sur la zone d'étude et les différents secteurs indépendants à partir de l'analyse des données historiques de volumes $\geq 1\text{m}^3$	52
Tableau 14 – Classes de volumes pour lesquelles une probabilité de départ égale à 1 est calculée selon différentes périodes de temps considérées.	52
Tableau 15 – Résumé des intensités attendues des évènements représentatifs des différents scenarii STEPRIM sur l'encaissement de la Rivière du Mât.	56
Tableau 16 – Répartition des volumes des évènements glissements de terrain sur la période 1998-2018 dans le cirque de Salazie.....	58
Tableau 17 - Classes de volumes pour lesquelles une probabilité d'occurrence égale à 1 est calculée selon différentes périodes de temps considérées.....	60
Tableau 18 – Caractéristiques principales des glissements de grande ampleur du cirque de Salazie et déplacements sur la période 2013-2018 (d'après Rault et al., 2021 et Cance et Rey, 2018).	67
Tableau 19 – Résumé des intensités attendues des évènements représentatifs des différents scenarii STEPRIM pour les phénomènes de glissement de terrain.	81
Tableau 20 – Indices d'intensité choisis selon les différents scenarii STEPRIM sur les secteurs de la zone d'étude (encaissement de la Rivière du Mât).	88
Tableau 21 – Proposition d'indices d'intensité et d'activité pour les phénomènes de chute de blocs, en fonction des scenarii de référence appliqués aux différents secteurs de la zone d'étude.	91
Tableau 22 - Distances correspondantes aux probabilités d'atteinte forte, moyenne et faible pour 12 profils sur le secteur 7 pour le scénario fréquent obtenues à partir des simulations trajectographiques.	92

Tableau 23 – Distances correspondantes aux probabilités d’atteinte forte, moyenne et faible pour 12 profils sur le secteur 7 pour le scenario centennal obtenues à partir des simulations trajectographiques.	93
Tableau 24 – Matrice de qualification de la probabilité d’occurrence en un point donné (MEZAP, 2014).	101
Tableau 25 – Grille de définition de l’aléa chute de blocs (MEZAP, 2014).	103
Tableau 26 – Classification des principales formations géologiques de La Réunion selon leur nature et leur aspect (Rey, 2016)	108
Tableau 27 – Probabilité d’occurrence d’un glissement de terrain (Rey, 2016).	109
Tableau 28 – Définition de l’intensité d’un glissement de terrain (Rey, 2016).	110
Tableau 29 – Définition de l’aléa glissement de terrain pour les glissements spontanés.....	111
Tableau 30 – Définition du niveau d’aléa au droit des glissements de grande ampleur du cirque de Salazie, en fonction du scenario envisagé, de la position géographique et des vitesses de déplacement enregistrées.	112

1. Introduction

A l'instar des démarches menées pour le risque inondation (définition des TRI, PGRI et SLGRI), la DEAL de La Réunion souhaite mettre en place une stratégie similaire pour le risque « Mouvement de Terrain » à La Réunion, avec une action prioritaire pour le Cirque de Salazie, le plus impacté à l'échelle du territoire par les phénomènes gravitaires. Il s'agit notamment de mettre en place un Plan d'Action pour la Prévention et la protection vis-à-vis des Aléas Mouvement de terrain (« PAPAM » – Salazie), notamment pour les biens et personnes exposés en zone rouge.

Dans ce cadre, la démarche STEPRIM (appel à projet « Stratégie Territoriale pour la Prévention des Risques en Montagne », initié par la DGPR), vise à définir une stratégie de prévention des aléas accompagnée d'un programme d'action cohérent et hiérarchisé. Sa mise en œuvre doit permettre d'aboutir à une réduction des risques par réduction de la vulnérabilité ou en intervenant sur l'aléa. Les pré-requis indispensables à l'élaboration d'une telle stratégie sont :

- Un diagnostic initial et approfondi du territoire considéré ;
- Une adhésion du plus grand nombre d'acteurs concernés, passant par la concertation, afin de garantir la réussite de la démarche.

L'établissement d'une stratégie territoriale de gestion des risques intégrée et concertée est déclinée en un programme d'action opérationnel proportionné aux enjeux identifiés. Les objectifs et les étapes d'élaboration de la stratégie se déclinent en 7 axes majeurs détaillés dans l'appel à projet¹. Toutefois, l'élaboration de la stratégie nécessite dans un premier temps une bonne connaissance du fonctionnement du territoire au regard des risques naturels de montagne. La première phase du projet STEPRIM consiste donc à acquérir cette connaissance approfondie via la réalisation d'un **diagnostic du territoire**. Ce diagnostic comporte plusieurs volets :

- Connaissance des aléas ;
- Recensement des enjeux ;
- Recensement et analyse des ouvrages de protection existants ;
- Bilan et performance des démarches et des outils de prévention existants.

Ce diagnostic a pour vocation de mettre en évidence les points forts et points faibles actuels du territoire en termes de gestion des risques de montagne et ainsi établir une stratégie visant une amélioration de la situation.

Dans cette optique, la DEAL a missionné le BRGM pour la réalisation du volet « **Connaissance des aléas** » du diagnostic du territoire, sur le secteur de Salazie. Les phénomènes considérés dans cette étude sont les **chutes de blocs/éboulement** et les **glissements de terrain**.

Ce volet vise à identifier sur le territoire (le Cirque de Salazie), les zones d'emprises potentielles de chaque type d'aléa considéré. Sur ces secteurs, le diagnostic est établi en étudiant 3 scénarii pour la caractérisation des aléas :

- Scénario fréquent : « *Il correspond à un aléa qui représente les événements que l'on a de grandes chances de rencontrer durant sa vie sur un périmètre donné (ordre de grandeur de la période de retour : 30 ans)* » ;

¹ Cahier des charges Steprim (V2019) : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Cahier_des_charges_STePRiM_2019.pdf

- Scenario centennal : « Dans la majorité des cas et quand elles existent, les études d'aléas réalisées dans les PPRN sur la base d'un aléa de référence à l'échelle de 100 ans (1 % de probabilité de se produire dans l'année) sont exploitées afin de définir le scenario centennal. Pour mémoire, il est rappelé que pour des événements dont la période de retour peut être évaluée, l'aléa de référence est considéré comme le ou les aléas naturels correspondant à l'événement historique ou aux événements historiques les plus importants connus et documentés sur un territoire donné ou à un ou des événements de période de retour centennale si ces derniers les dépassent en importance. Pour des événements dont la période de retour ne peut pas être évaluée, l'aléa naturel de référence est considéré comme l'événement ou les événements les plus importants sur un territoire donné susceptibles de survenir dans les cent prochaines années »;
- Scenario exceptionnel : « Correspondant à des événements extrêmes réalistes, même s'ils ne se sont jamais produits, le scenario exceptionnel est évalué pour l'établissement du diagnostic. Il peut conduire à définir des actions spécifiques, notamment en termes de gestion de crises. Ce scénario n'a pas vocation à avoir d'impact sur les aménagements standards, mais permet d'aborder des questions de résilience ou d'implantations spécifiques. »

Une première phase de l'étude a eu pour objectif de réaliser un état de l'art sur la caractérisation de l'aléa glissement de terrain et chute de blocs en montagne, à travers l'analyse des méthodologies mises en œuvre en France et à l'étranger. Cette première phase a donné lieu au rapport BRGM/RP-69751-FR². Ce rapport détaille notamment les approches méthodologiques développées par les groupes de travail MEZAP³ et MEZAG⁴, se basant sur les retours d'expérience internationaux en termes de définition des aléas rocheux.

Partant de cet état des lieux méthodologique, l'objectif de cette seconde phase d'étude est de réaliser le diagnostic initial et approfondi du territoire à partir notamment du recueil des phénomènes historiques dans le Cirque de Salazie. A partir de cette analyse, le but est de définir la probabilité d'occurrence (activité et atteinte notamment) et l'intensité des phénomènes attendus pour chaque scenario « STEPRIM » par type de phénomène considéré (chute de blocs/éboulement et glissement de terrain) et de définir l'approche méthodologique adaptée à la caractérisation de l'aléa.

La mise en application cartographique des cartes d'aléa pour les différents scenarios est menée à l'échelle de zones pilotes, caractérisées par leur exposition et leur concentration d'enjeux, définies en concertation avec la DEAL de La Réunion.

Pour l'aléa chute de blocs/éboulement, une analyse détaillée est menée à l'échelle de l'encaissement de la Rivière du Mât, depuis le Pont Bengalis sur la commune de Saint-André, jusqu'à l'entrée du village de Salazie. Cette zone dispose en effet d'une base de donnée événementielle relativement importante depuis une vingtaine d'années étant donné la présence de la RD48, régulièrement impactée. Sur ce secteur, la cartographie des aléas est réalisée sur le site pilote de Plateau Wickers/Camp Lilas, correspondant à un secteur habité, exposé aux chutes de blocs.

² Chaput, M., en collaboration avec Y. Thiery et B. Colas (2020) – Caractérisation des aléas glissement de terrain et chute de blocs – Etat de l'art et apport des techniques récentes, rapport BRGM RP-69751-FR, 73p., 26 fig., 20 tabl., 1 ann.

³ Groupe de travail réuni sous l'autorité du MEDDE et piloté par l'IRSTEA pour la détermination d'une Méthodologie de Zonage de l'Aléa chute de Pierres.

⁴ Groupe de travail pour la détermination d'une Méthodologie de Zonage de l'Aléa Glissement de terrain.

Pour l'aléa glissement de terrain, les données d'évènements historiques sont moins nombreuses et les processus de déclenchement et de propagation peuvent être plus complexes que pour les chutes de blocs. Le Cirque de Salazie est également impacté par des glissements lents de grande ampleur, dont les déplacements sont suivis depuis près d'une vingtaine d'années. L'analyse porte sur les évènements historiques survenus sur l'ensemble du Cirque de Salazie et sur les connaissances récentes acquises au droit des glissements lents, en particulier sur la zone de Grand Ilet. C'est ce secteur qui sera choisi comme site pilote pour la cartographie des aléas.

2. Contexte général

Les éléments de ce chapitre sont majoritairement tirés de la note de présentation du PPR « Inondations et Mouvements de terrain », approuvé en juillet 2019.

2.1. ZONE D'ETUDE ET CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE

Le Cirque de Salazie est l'un des trois cirques découpant le massif du Piton des Neiges. Situé à l'Est du sommet du Piton des Neiges, il s'agit d'une dépression globalement circulaire (diamètre ~10 km) de plus de 100 km² (Figure 1). La morphologie du cirque a été façonnée au fil du temps par l'alternance de phases éruptives, d'effondrements en masse et de période d'érosion intense en contexte tropical. Le cirque est délimité par des remparts abrupts pouvant dominer le cœur du cirque de plus de 1000 m. On trouve :

- Au sud, le massif du Piton des Neiges ;
- A l'est, le plateau de Bélouve ;
- Au nord, la Plaine des Fougères ;
- A l'ouest, le cirque de Mafate.

Salazie présente un paysage au relief très escarpé où les ravines découpent les terrains en plateaux plus ou moins étendus (ilets). Sur ces ilets sont installés les différents secteurs habités du Cirque : Salazie village, Hell-Bourg, Grand ile, Mare à Vieille Place, Ilet à Vidot, Mare à Poule d'eau, Mare à Goyave...etc.

L'exutoire du cirque au nord-est est caractérisé par un important encaissement où s'écoule la rivière du Mât en direction de la ville de Saint-André et de l'océan (Figure 1). Ce défilé étroit, de plus de 10 km de long est bordé, notamment dans sa moitié amont par des remparts de hauteur comprise entre 400 et 800 m de haut.

La RD48 qui dessert les zones habitées du défilé et le Cirque de Salazie circule au pied de cet encaissement. Elle est l'objet de nombreuses atteintes par des chutes de blocs, dont le recensement (position, volume, dégâts...) est quasiment systématique depuis une vingtaine d'années par le gestionnaire (Conseil Départemental).

La zone d'étude concerne ici l'ensemble du Cirque de Salazie, à savoir le cirque *stricto sensu* ainsi que l'encaissement de la Rivière du Mât à l'exutoire du cirque (Figure 1). La zone d'étude s'étale donc les communes de Salazie, de Saint-André et de Bras Panon.

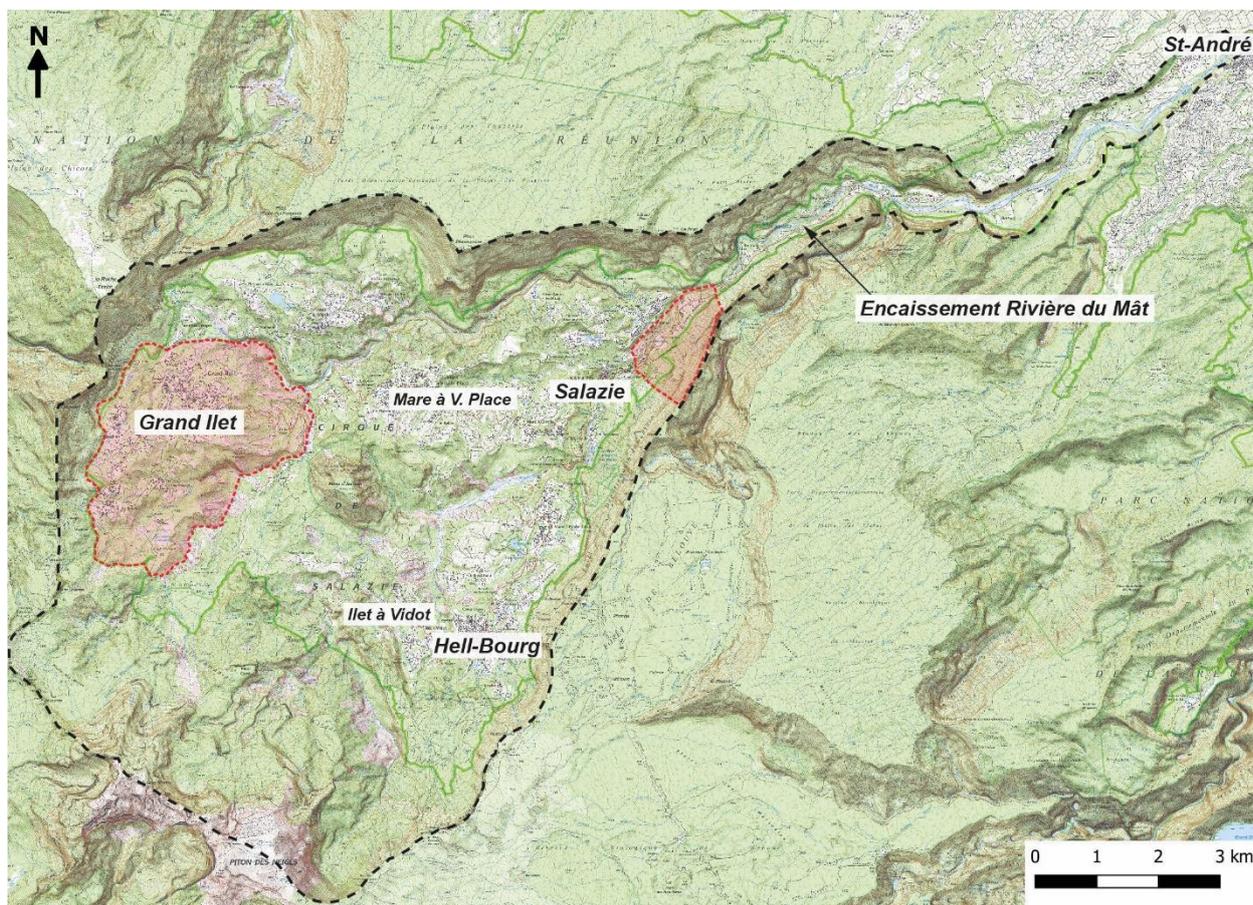


Figure 1 – Vue générale du Cirque de Salazie (fond carte IGN 1/25 000, 2015). La zone d'étude générale est délimitée par les tirets noirs. Les deux sites pilotes sont localisés par les tirets rouges (Plateau Wickers au nord-est du village de Salazie pour l'aléa chute de blocs et Grand Ilet à l'ouest pour l'aléa glissement de terrain)

2.2. GEOLOGIE

Le cirque de Salazie s'inscrit dans le contexte géologique du massif du Piton des Neiges. Le cirque est entouré d'imposants « remparts », de grande hauteur (jusqu'à plus de 1000 m) et de forte pente. Au fond du cirque, des matériaux de remplissage (brèches) sont présents sur des épaisseurs parfois très importantes (jusqu'à plusieurs centaines de mètres). L'origine de ces formations détritiques est multiple (avalanches de débris, colluvions, éboulis, alluvions...) et illustre l'histoire géologique complexe de formation des cirques. Ces brèches peuvent être consolidées et indurées, avec une bonne cohésion sur de fortes pentes ou plutôt meubles, pulvérulentes et très sensibles à l'érosion.

Les remparts bordant le cirque sont majoritairement composés de coulées de lave issues des différentes phases d'activité du Piton des Neiges.

Les paragraphes ci-dessous détaillent les différentes formations rencontrées dans le cirque.

2.2.1. Les formations effusives

- Phase I - les « océanites anciennes »

La phase I correspond aux plus anciennes formations visibles à l’affleurement, d’âge supérieur à 1.4 Ma. Elles affleurent essentiellement dans le fond des cirques et de certaines grandes rivières. Il s’agit de basaltes aphyriques, de basaltes à olivine et d’océanites et de brèches de démantèlement. Ces formations présentent généralement une forte altération, avec de nombreux minéraux secondaires (zéolite, calcite, chlorite)

Deux grandes familles de formations peuvent être distinguées à l’intérieur de cette phase : les formations correspondant à des empilements de coulées préservées (phase de construction), et celles associées au processus de démantèlement. Ces dernières se présentent sous forme de matériaux bréchiques fortement indurés, avec des éléments anguleux centimétriques à décimétriques, contenus dans une matrice fine.

- Phase II - les « océanites récentes »

Cette deuxième phase correspond aux coulées émises durant la période de 1.4 Ma à 430 ka qui ont permis progressivement de constituer l’essentiel du volcan bouclier. Elle est décrite comme un empilement de coulées basaltiques dont les textures, associées à leur mise en place, sont préservées. Il s’agit de basaltes aphyriques, de basaltes à olivine et d’océanites. Ces coulées peuvent être localement zéolitisées à la base de la série (caractéristiques mécaniques amoindries). L’épaisseur totale de ces formations atteint plusieurs centaines de mètres d’épaisseur et constitue, en majorité, la partie inférieure des remparts.

La distinction principale entre les formations anciennes et récentes correspond donc au degré d’altération et de zéolitisation des faciès observés.

- Le stade « différencié », de 340 ka à 12 ka

La transition entre le stade basaltique et le stade différencié est associée à une phase de calme éruptif du Piton des Neiges, entre 430 à 340 ka. Le rôle de l’érosion est alors prépondérant, permettant la formation de paléocirques et l’incision de grandes ravines.

De 340 à 200 ka, puis de 180 à 12 ka, l’activité du Piton des Neiges reprend avec l’émission de laves différenciées : basaltes à plagioclases, hawaïtes, mugéarites. Ces coulées forment le sommet des remparts et couvrent une partie des planèzes externes du Piton des Neiges. Des trachytes (Grand Ilet et Bélouve) se sont mis en place dans le cirque de Salazie à cette période, notamment lors des dernières phases éruptives du Piton des Neiges.

Ce stade différencié est marqué par des éruptions peu fréquentes, sporadiques, avec de nombreux épisodes de quiescence qui favorisent l’érosion au détriment de la construction de l’édifice. Les cirques actuels commencent probablement à se former vers 70 ka.

2.2.2. Les formations pyroclastiques

Des brèches pyroclastiques et des ignimbrites se sont mises en place au cours de la phase différenciée de l’édifice, il y a environ 193 ka (Salvany et al., 2012).

Les ignimbrites affleurent à l’entrée du cirque de Salazie après le pont de l’Escalier, sur des épaisseurs de l’ordre de 100 m (visibles dans le rempart dominant la RD48 en direction de

Salazie, Figure 2). Ce dépôt pyroclastique très compact et prismé forme un placage correspondant au remplissage d'une ancienne vallée. Il s'agit de brèches renfermant des fragments de laves différenciées, le tout englobé dans une matrice cendreuse couleur chocolat, issues d'éruptions explosives majeures.



Figure 2 - Ignimbrite prismée de Salazie, affleurant au niveau de Plateau Wickers.

2.2.3. Les formations de démantèlement

Plusieurs périodes d'érosion sont identifiées dans le cirque de Salazie :

- Période de repos entre les phases basiques et différenciées de l'édifice (450 – 340 ka)
- Période comprise entre 220 et 190 ka, précédant la phase « ignimbrétique »
- Période post « ignimbrétique » entre 190 et 140 ka ;
- La période post-70ka, où les cirques actuels commencent à se creuser.

Durant ces périodes, le démantèlement du volcan s'opère principalement par érosion régressive, prenant la forme de glissements et d'effondrements partiels. Les volumes peuvent parfois atteindre plusieurs kilomètres cubes. Ces événements sont à l'origine de formations bréchiques dont la nature dépend du mode de dépôt et des formations qu'elles remanient.

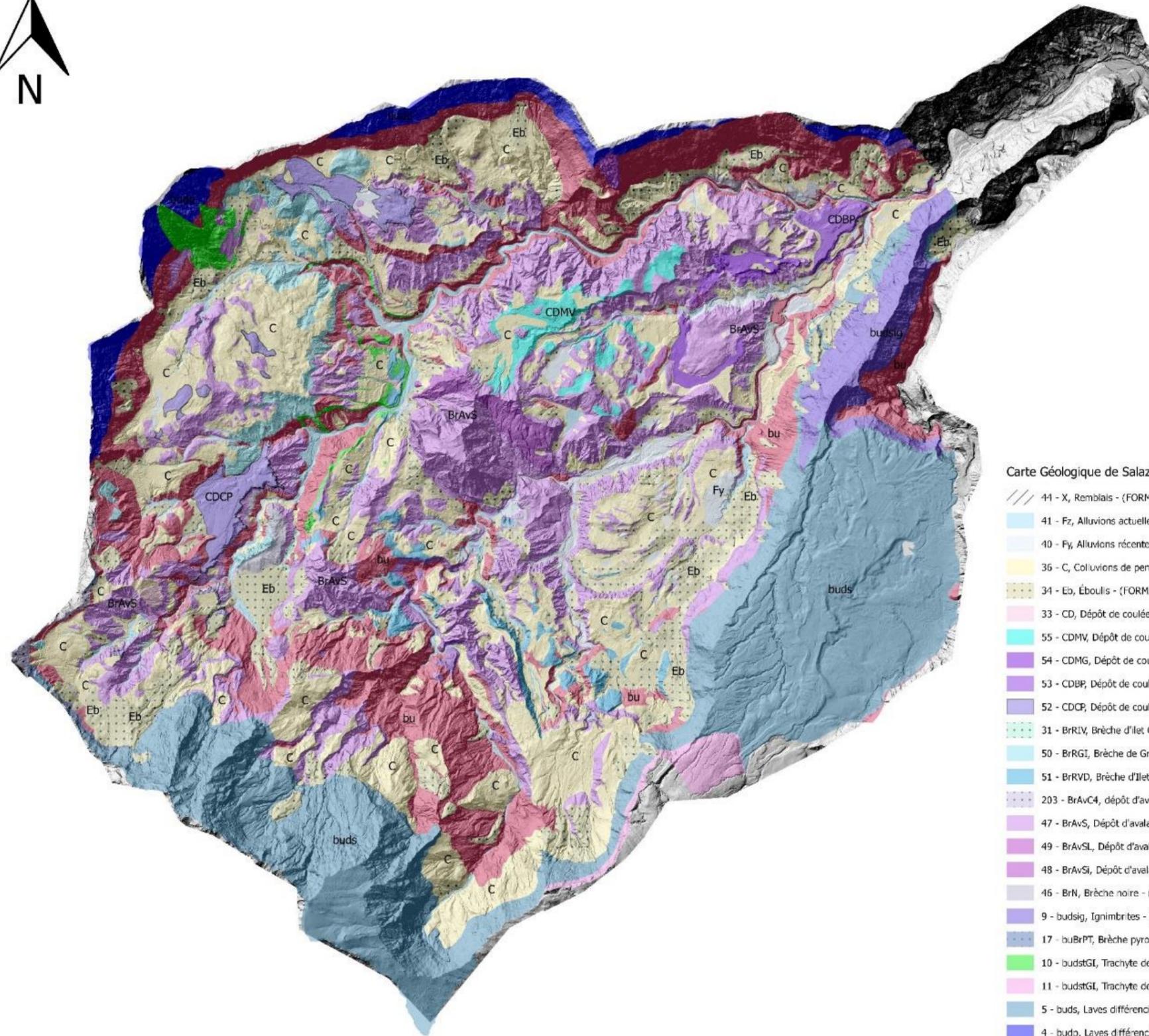
Des séquences bréchiques importantes, de type avalanche de débris, interstratifiées au sein des séries laviques et pyroclastiques, indiquent que des phénomènes de déstabilisation en masse se sont produits de manière récurrente au cours de la vie du Piton des Neiges.

A La Réunion, les différents travaux menés sur les formations bréchiques ont permis de distinguer quatre types de dépôts principaux:

- Les dépôts de coulées de débris, liés à des écoulements gravitaires saturés qui empruntent les lits des ravines et des rivières ;

- Les dépôts liés aux déstabilisations de parois et de chutes de pierre (avec éventuel remaniement postérieur) : éboulis, colluvions... ; Ces formations nappent généralement le sommet des îlets.
- Les dépôts d'avalanche de débris, liés à la déstabilisation catastrophique des flancs de l'édifice et leur propagation jusque vers l'océan. Ces brèches sont caractérisées par des faciès très grossiers, peu ou mal classés. Ce sont généralement des blocs de tailles variables décimétriques à pluridécamétriques (méga-bloc), contenus dans une matrice sableuse à graveleuse. Ces faciès sont, en outre, caractérisés par une forte hétérogénéité spatiale au sein d'un même dépôt, avec notamment des proportions variables entre le volume de matrice et celui de blocs. Les mécanismes à l'origine de ces grandes déstabilisations sont généralement multiples, et leurs actions combinées. Les facteurs d'instabilité ayant été reconnus sont l'augmentation des contraintes par surcharge, l'infiltration des eaux de surface, l'altération hydrothermale, l'activité sismique, ou encore l'injection de magma dans les rift zones sous forme de dykes.
- Les alluvions fluvio-torrentielles transportées et déposées dans les lits des ravines et rivières.

A l'exclusion des remparts, les formations bréchiques sont largement dominantes dans le cirque de Salazie (Figure 3). Elles présentent des faciès plus ou moins indurés et leurs faibles propriétés géomécaniques les rendent **particulièrement propices aux déstabilisations gravitaires**, en particulier aux glissements de terrain. Les glissements de grande ampleur de Salazie affectent notamment ces dépôts.



Carte Géologique de Salazie

- /// 44 - X, Remblais - (FORMATION ANTHROPIQUES)
- 41 - Fz, Alluvions actuelles à subactuelles - (FORMATION ALLUVIONNAIRES)
- 40 - Fy, Alluvions récentes - (FORMATION ALLUVIONNAIRES)
- 36 - C, Colluvions de pente - (FORMATION DE PENTE)
- 34 - Ea, Éboulis - (FORMATION DE PENTE)
- 33 - CD, Dépôt de coulées de débris - (FORMATION ALLUVIONNAIRES)
- 55 - CDMV, Dépôt de coulées de débris de Mare à Vieille Place - (FORMATION ALLUVIONNAIRES)
- 54 - CDMG, Dépôt de coulées de débris de Mare à Goyaves - (FORMATION ALLUVIONNAIRES)
- 53 - CDBP, Dépôt de coulées de débris de Bois de Pomme - (FORMATION ALLUVIONNAIRES)
- 52 - CDCP, Dépôt de coulées de débris de Camp Pierrot - (FORMATION ALLUVIONNAIRES)
- 31 - BrRIV, Brèche d'Ilet Gros Galet - (FORMATION DE DEMENTELEMMENT)
- 50 - BrRG1, Brèche de Grand Ilet - (FORMATION DE DEMENTELEMMENT)
- 51 - BrRVD, Brèche d'Ilet à Vidot - (FORMATION DE DEMENTELEMMENT)
- 203 - BrAvC4, dépôt d'avalanche de débris d'Aurère - (FORMATION DE DEMENTELEMMENT)
- 47 - BrAvS, Dépôt d'avalanche de débris de Mare à Poule d'Eau - (FORMATION DE DEMENTELEMMENT)
- 49 - BrAvSL, Dépôt d'avalanche de débris de Mare à Poule d'Eau - Coulée de débris - (FORMATION DE DEMENTELEMMENT)
- 48 - BrAvSi, Dépôt d'avalanche de débris de Mare à Poule d'Eau - Faciès ignimbritique - (FORMATION DE DEMENTELEMMENT)
- 46 - BrN, Brèche noire - (FORMATION DE DEMENTELEMMENT)
- 9 - budsig, Ignimbrites - (DEPOTS PYROCLASTIQUES)
- 17 - buBPT, Brèche pyroclastique du Tablit - (DEPOTS PYROCLASTIQUES)
- 10 - budstGI, Trachyte de Grand Ilet - (FORMATIONS EFFUSIVES)
- 11 - budstGI, Trachyte de Bélouve - (FORMATIONS EFFUSIVES)
- 5 - buds, Laves différenciées tardives - (FORMATIONS EFFUSIVES)
- 4 - budp, Laves différenciées précoces - (FORMATIONS EFFUSIVES)
- 1 - bu, Basalte à Olivine - (FORMATIONS EFFUSIVES)
- 211 - d, Intrusions indifférenciées - (FORMATIONS PLUTONIQUES ET HYPOVOLCANIQUES)
- 999 - , Lacs - ()



Figure 3 : Extrait de la carte géologique au 1/25000 du Cirque de Salazie (Lacquement et Nehlig, 2008).

2.3. HYDROLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

Le Cirque de Salazie compte trois cours d'eau pérennes principaux (Figure 4) :

- La Ravine Roche à Jacquot bordant au nord le plateau de Grand Ilet, et affluente de la Rivière Fleurs Jaunes ;
- La Rivière Fleurs Jaunes à l'ouest du Piton d'Enchain, et affluente de la Rivière du Mât à proximité de Bois de Pomme ;
- La Rivière du Mât, à l'est du Piton d'Enchain, exutoire du bassin versant du cirque de Salazie et atteignant l'océan au niveau de Saint-André.

Les autres ravines sont des cours d'eau temporaires qui n'entrent en fonctionnement qu'en cas de fortes pluies. La forte pluviométrie observée dans Salazie, associée au relief marqué, est à l'origine d'un réseau hydrographique très dense (Figure 4) et contribue à générer des débits importants sur les rivières pérennes. Ce réseau de ravines contribue à l'érosion très active à laquelle est soumis le cirque.

Les forts débits enregistrés sur les ravines du cirque (débit de crue centennal de la Rivière du Mât estimé à 3300 m³/s à proximité de l'exutoire), génèrent un transport solide particulièrement fort. Les matériaux arrachés par l'érosion sont transportés jusqu'à l'océan et très peu de dépôts alluviaux se forment dans le cirque.

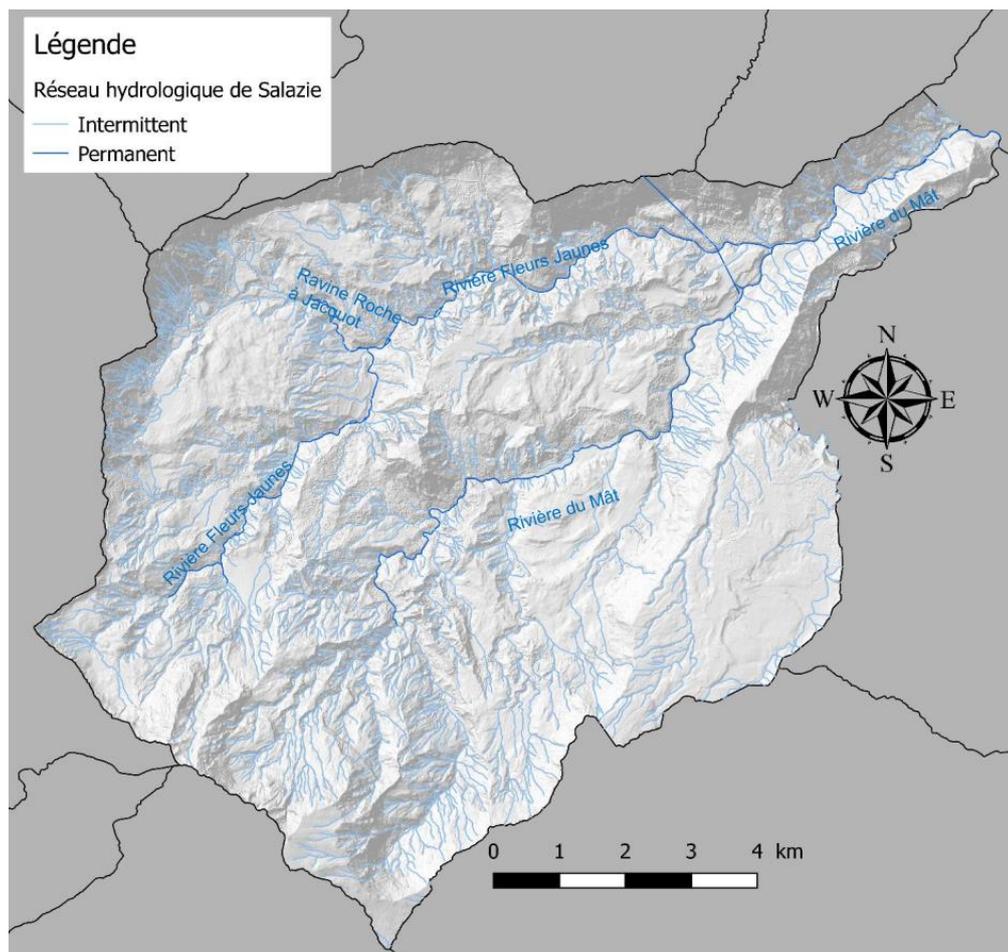


Figure 4 – Réseau hydrographique de Salazie (fond Lidar 2015 © Région Réunion)

2.4. CLIMATOLOGIE

Le climat tropical humide de La Réunion génère des cumuls pluviométriques exceptionnels, en particulier au cours de l'été austral (Figure 5). Ces précipitations d'intensité, et parfois de durée, exceptionnelles constituent un élément moteur majeur dans de nombreux mouvements de terrain, dont une grande partie se produit à l'intérieur des cirques et au niveau des remparts.

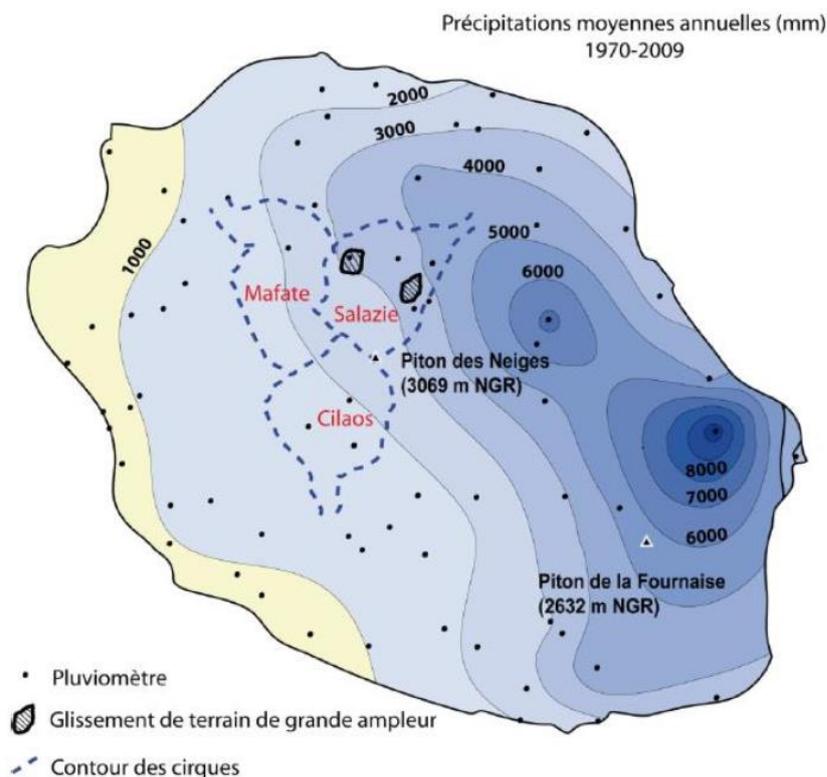


Figure 5 – Pluvimétrie moyenne annuelle sur l'île de La Réunion (Météo-France)

Le cirque de Salazie est le plus arrosé des trois cirques, ses remparts ouest et sud constituant l'ultime barrière pour les systèmes dépressionnaires arrosant périodiquement la « côte au vent ». Salazie connaît ainsi un régime de précipitations très marqué, avec des cumuls moyens annuels compris entre 2500 et 5000 mm. Au-delà de ces cumuls annuels, les pluies journalières peuvent être particulièrement importantes et dépasser 1000 mm/jour. Elles conditionnent souvent les cumuls mensuels voire annuels. Ces fortes pluies journalières observées dans le cirque sont souvent associées à des cyclones durant la saison des pluies.

Le cyclone Hyacinthe en janvier 1980 illustre l'impact des phénomènes cycloniques sur les cumuls de pluie. Ce cyclone majeur fut à l'origine de désordres importants dans le cirque de Salazie, en particulier sur Grand Ilet et Hell-Bourg. Il constitue l'épisode cyclonique le plus marquant des cinquante dernières années. Ce cyclone fut exceptionnel à la fois par l'importance des cumuls pluviométriques et par la durée de son influence sur La Réunion.

A Grand Ilet, il a ainsi été enregistré un cumul de 5240 mm en 13 jours, pour un cumul annuel inférieur à 7000 mm cette année-là (Tableau 1).

Janvier 1980	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	Total
Station de Grand Ilet	3	94	172	171	240	164	160	391	360	858	706	1044	877	5240
Station d'Hell-Bourg	28	27	222	240	299	256	191	138	388	400	358	407	581	3535

Tableau 1 – Pluie quotidienne du 15 au 27 janvier 1980 sur les stations de Grand Ilet et Hell-Bourg lors du passage du cyclone Hyacinthe (Pinchinot, 1984).

Lors de cet évènement, la pluviométrie horaire a été forte sans toutefois être exceptionnelle en terme d'intensité (100 mm maximum sur une heure, soit une période de retour estimée à environ 10 ans [Données SHYPRE, 2012]).

D'autres évènements ont généré de forts cumuls de précipitations sur le cirque de Salazie. Parmi eux, on peut citer :

- Clotilda (février 1987) : 2500 mm sur Grand Ilet en 6 jours, dont 1040 mm en 24h ;
- Diwa (mars 2006) : 1325 mm sur Grand Ilet dans la journée du 5 mars (record journalier quotidien dans le cirque) ;
- Gamède (février 2007) : 3729 mm sur Hell-Bourg en 6 jours, dont 1111 mm en 24h.

Le tableau 2 suivant indique les hauteurs de précipitations en 24h, 48h et 96h, estimées pour différentes périodes de retour au niveau de la station de Mare à Vieille Place (statistiques sur la période 1994-2005, Météo France) :

Durée de retour	Hauteur estimée (mm)		
	Episode 24h (1j)	Episode 48h (2 j)	Episode 96h (4j)
5 ans	555	709	1061
10 ans	650	837	1307
20 ans	745	965	1552.5
30 ans	800	1040	1696
50 ans	870	1134	1877
100 ans	965	1262	2123

Tableau 2 – Cumuls pluviométriques estimés pour différentes périodes de retour, pour des épisodes de 24, 48 ou 96h à Mare à Vieille Place (données Météo France).

La valeur décennale sur 24h du tableau précédent (650 mm) est inférieure à la pluie journalière décennale estimée par le modèle SHYPRE (IRSTEA, 2012) au niveau de cette station (**P₁₀ = 888 mm**), qui se base sur des chroniques de données plus longues.

Sur **Grand Ilet**, le modèle SHYPRE estime la pluie journalière décennale à **922 mm**, valeur légèrement supérieure à la partie plus aval du Cirque.

Pour la pluie journalière centennale, le modèle SHYPRE propose des valeurs journalières centennales P₁₀₀ de :

- 1566 mm pour Grand Ilet ;
- 1464 mm pour Hell-Bourg ;
- 1513 mm pour Mare à Vieille Place.

Ces précipitations intenses ont des conséquences sur les possibilités d'occurrence des phénomènes de mouvements de terrain, qui se produisent principalement durant les mois de décembre à avril, correspondant à la période cyclonique. Ainsi, les chroniques de déplacements

des glissements de grande ampleur du cirque de Salazie, analysées dans le cadre de MvTerre-2, indiquent que les glissements sont activés pour des précipitations cumulées sur plusieurs jours de l'ordre de 600 à 800 mm :

- Le seuil de 600 mm est atteint entre 50 et 100 sur une période de 50 ans, soit une fréquence moyenne de 1 à 2 fois par an ($P_{\text{annuelle}} \in [0,63 - 0,82]$) ;
- Le seuil de 800 mm est atteint entre 10 et 25 sur 50 ans, soit une fréquence moyenne de 1 fois tous les 2 à 5 ans ($P_{\text{annuelle}} \in [0,18 - 0,39]$).

Toutefois, il convient de noter que si l'augmentation de la fréquence des mouvements de terrain coïncide le plus souvent avec l'arrivée d'un événement météorologique important, le retour à la normale ne coïncide jamais avec son départ. En effet, de nombreux terrains sont déstabilisés (perte de cohésion, glissements, ravinement...) et se retrouvent en position d'équilibre précaire. La plupart des ruptures se produisent bien pendant le paroxysme de la crise climatique mais certains désordres n'apparaissent que dans les semaines voire les mois qui suivent.

3. Diagnostic du territoire – Connaissance des aléas

3.1. CHUTES DE BLOCS – EBOULEMENTS

3.1.1. Inventaire évènementiel

L'inventaire des évènements historiques sur la zone d'étude a été réalisé sur la base d'une revue bibliographique complétée par des observations de terrain.

Les sources d'information utilisées sont :

- La Banque de Données des Mouvements de Terrain (BDMVT) gérée par le BRGM (<https://www.georisques.gouv.fr/>) ;
- Les études et expertises du BRGM concernant les phénomènes de chutes de blocs ;
- Les données du registre des routes, tenu par le Conseil Départemental.

Des reconnaissances de terrain ont été réalisées sur des secteurs cibles, généralement éloignés des itinéraires routiers où le recensement des évènements, notamment de petite taille, est moins systématique. Ces reconnaissances ont permis notamment de préciser la quantité, la taille et la géométrie des blocs éboulés. Elles ont été menées dans les secteurs de Plateau Wickers/Camp Lila ainsi que dans le secteur Petit Trou (commune de Saint-André, rive gauche de l'encaissement de la Rivière du Mât).

a) Cirque de Salazie

A l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude (Cirque de Salazie ss. + encaissement de la Rivière du Mât), un total de **824 évènements** de type chute de blocs/éboulement est recensé.

La figure ci-dessous représente la répartition de ces évènements (points d'arrivée des blocs pour la plupart), avec une classification en fonction des volumes mobilisés. Elle montre que les éboulements répertoriés sont majoritairement localisés le long des itinéraires routiers qui traversent le cirque (RD48 et RD52, Figure 6). Pour l'essentiel, les évènements hors de ces itinéraires sont soit des évènements en grande masse soit des évènements observés mais dont le volume n'a pas été déterminé.

Deux évènements majeurs se sont produits dans le Cirque de Salazie sur la période historique : il s'agit de l'effondrement du Piton d'Enchain en 2001 qui a mobilisé environ 200 000 m³ de matériaux et de l'effondrement de Grand Sable en 1875. On estime que cet évènement catastrophique, lié à l'effondrement d'une partie du versant nord du Gros Morne, a mobilisé environ 18 millions de m³ de matériaux. Ces derniers se sont propagés sur plus de 2 km en aval de la zone de départ, ensevelissant au passage le village de Grand Sable (63 morts).

Sur ces 824 évènements, 635 d'entre eux disposent d'information sur les volumes mobilisés, soit 80%. Ces 635 évènements sont tous concentrés sur la période 1998 à 2020, soit une période de 22 ans (à partir de 1998, les données de volume sont quasi-systématiquement relevées). Sur cette période, les volumes éboulés se répartissent selon le Tableau 3.

En revanche, très peu d'évènements disposent d'informations sur les zones de départ des blocs (hauteur dans le versant, dimension de la zone de départ...etc.). Ces dernières sont par ailleurs le plus souvent rapidement masquées par la végétation après l'évènement. Ce manque

d'information limite certaines analyses, en particulier les relations possibles entre pente et zone de départ possible au sein de la falaise.

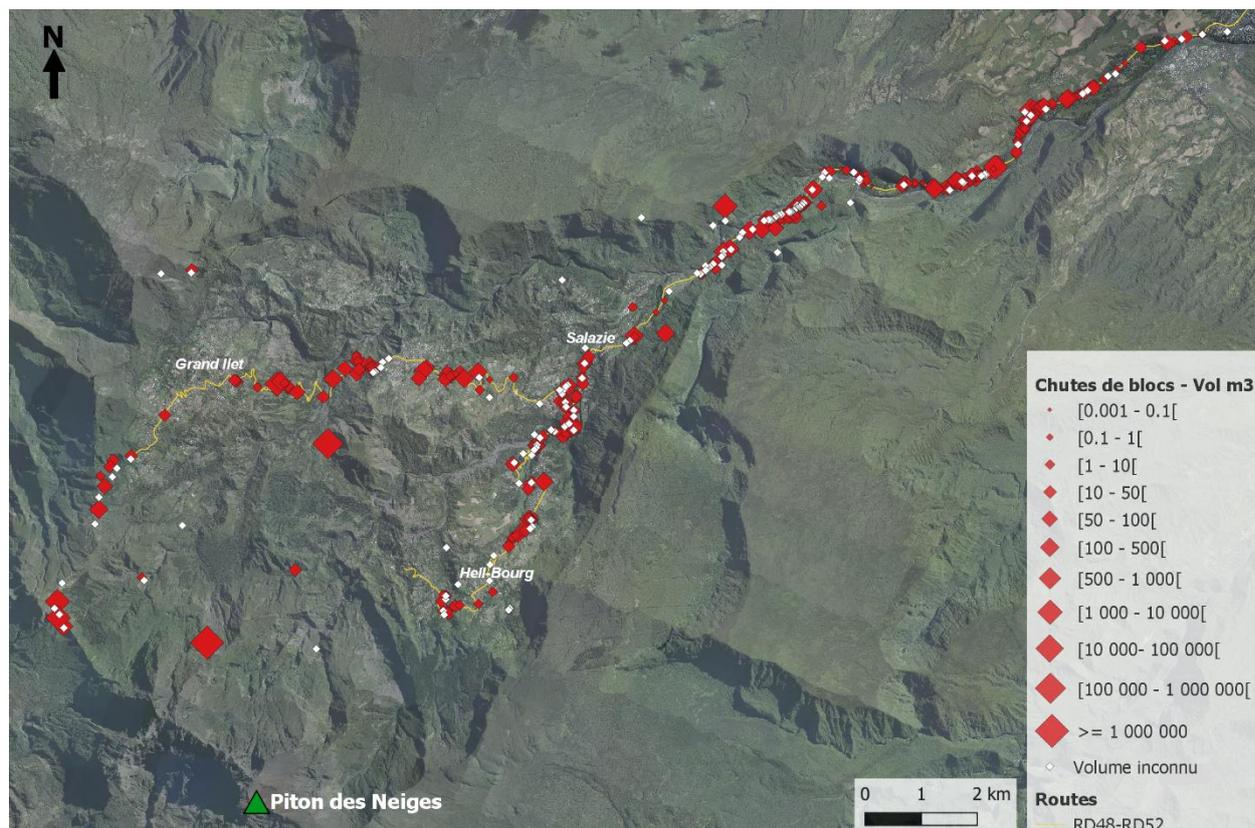


Figure 6 - Répartition de l'activité chute de blocs l'ensemble du Cirque de Salazie (fond orthophoto IGN 2017). Les losanges représentent le plus souvent les points d'arrivée des blocs. Très peu d'évènements disposent d'information sur la zone de départ des blocs.

Période 1998-2020 (22 ans)

Volume total (m ³)	Nombre d'évènements	Fréquence (Nb évènement/an)
< 0.1	106	4.82
[0.1-1[	96	4.36
[1-10[	210	9.55
[10-50[	111	5.05
[50-100[	33	1.50
[100-500[	54	2.45
[500-1 000[	17	0.77
[1 000-10 000[	5	0.23
[10 000 - 10 ⁵[	1	0.05
[10 ⁵ -10 ⁶[	1	0.05
≥ 10 ⁶	1	0.05
TOTAL	635	28.86

Tableau 3 - Répartition des volumes des évènements connus de chute de blocs sur la période 1998-2020 dans le Cirque de Salazie.

Ce tableau et la figure 7 associée, montrent que la grande majorité des événements sont de volume inférieurs à 50 m³ avec une prédominance pour des volumes compris entre 1 et 10 m³. Sur la période d'observation (22 ans), il se produit en moyenne près de 29 événements par an, dont près de 10 avec des volumes de [1-10 m³].

Notons toutefois que **les plus petits volumes (< 1 m³) sont certainement sous-représentés dans l'inventaire**. En effet, ces événements peuvent passer plus facilement inaperçus (pas d'atteinte d'enjeux par exemple, zone de départ peu visible) et ne sont donc pas systématiquement recensés dans les bases de données existantes.

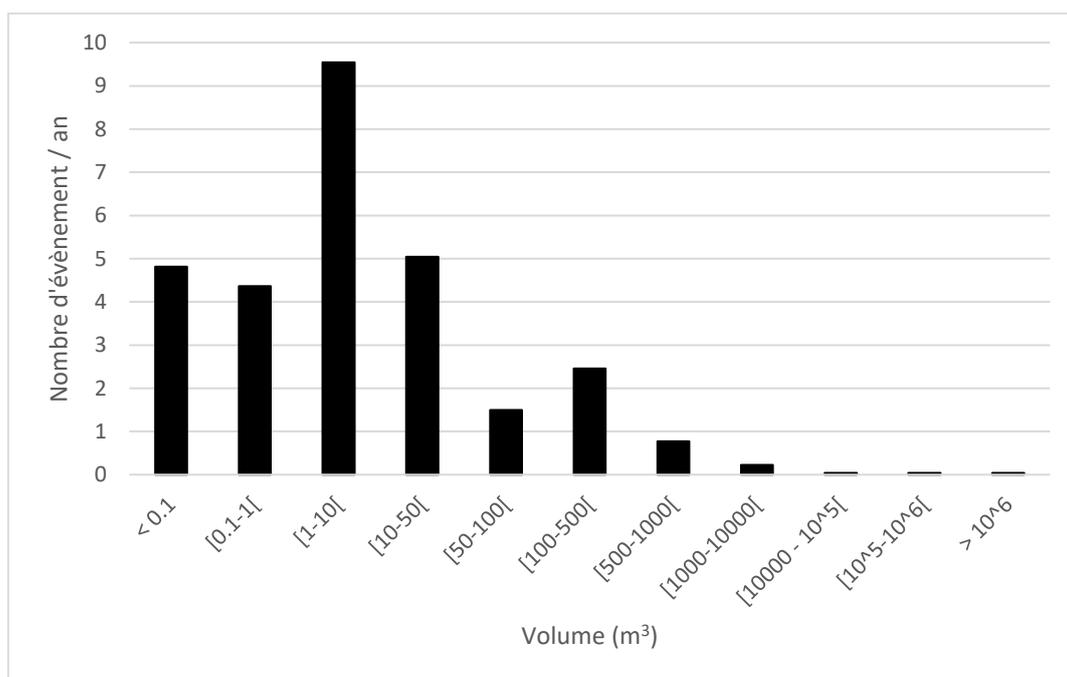


Figure 7 – Fréquence des événements de chute de blocs en fonction du volume sur l'ensemble du Cirque de Salazie.

b) Encaissement de la Rivière du Mât

Dans le cadre de ce travail, une analyse plus spécifique des événements a été menée sur l'encaissement de la Rivière du Mât, depuis le Pont Bengalis jusqu'à l'entrée du village de Salazie. En effet, ce secteur concentre un nombre très important de chutes de blocs, lié à la hauteur des remparts dominant la Rivière du Mât à l'origine de fréquents départs de blocs. La présence d'un itinéraire routier stratégique le long de cet encaissement permet un recensement quasi-systématique des événements qui s'y produisent et de disposer ainsi d'une base de données particulièrement exhaustive, notamment depuis une vingtaine d'années. Depuis 1998, le volume des événements de chute de blocs est également le plus souvent relevé.

La figure 8 ci-dessous représente la répartition de l'ensemble des événements de chute de blocs recensés le long du défilé de la Rivière du Mât avec une classification en fonction des volumes mobilisés. Tout comme pour le cirque entier, très peu d'événements disposent d'information sur les zones précises de départ des blocs et la plupart des événements localisés ci-dessous indiquent les zones d'atteinte des blocs.

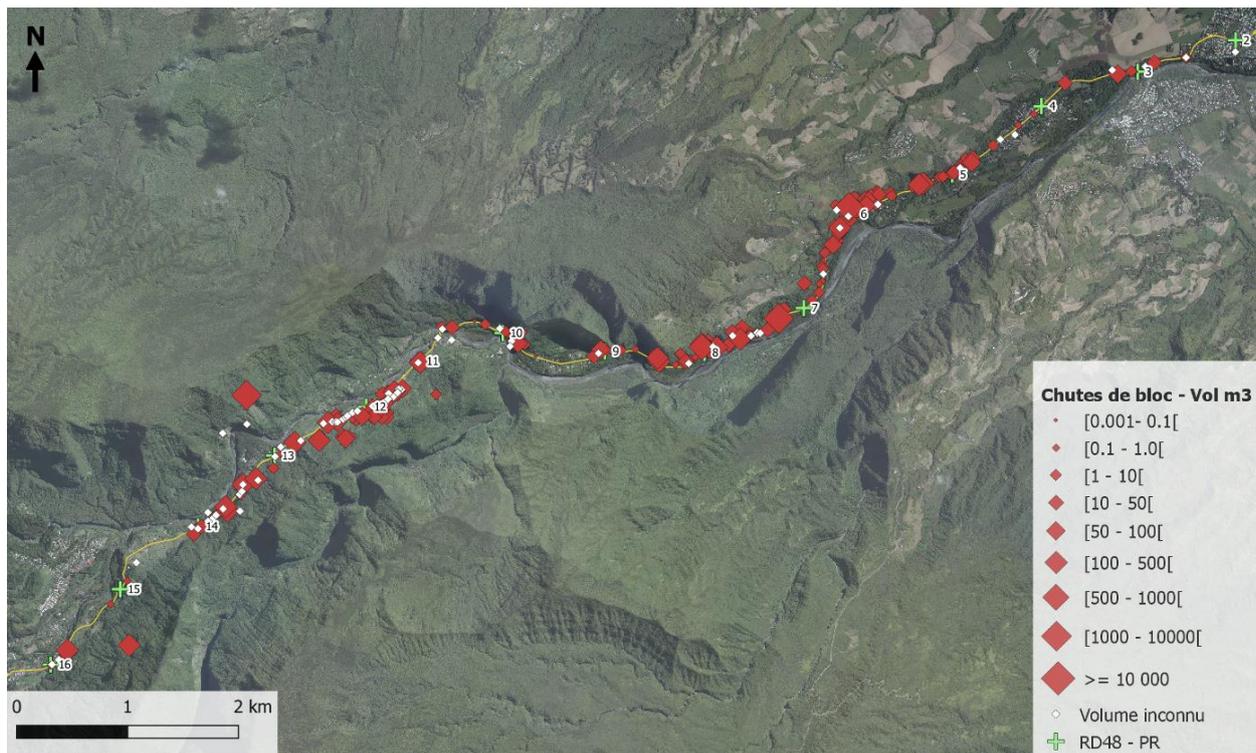


Figure 8 - Répartition de l'activité chute de blocs sur le linéaire de l'encaissement de la Rivière du Mât (fond orthophoto IGN 2017).

L'analyse statistique de ces données permet d'avoir une vision globale de la fréquence des évènements sur les différentes portions d'itinéraires et des volumes les plus souvent observés. Le croisement de ces informations avec le contexte géologique et géomorphologique des zones de départs permet de définir plusieurs secteurs distincts sur la zone étudiée.

Un total de **578 évènements** de type chute de blocs/éboulement est recensé sur l'ensemble de l'encaissement de la rivière du Mât, du PR2+500 (Pont Bengalis) au PR16+020 (Camp Lilas, entrée du village de Salazie) de la RD48. Ce nombre représente 70% des évènements de chute de blocs recensés sur l'ensemble du cirque de Salazie ($N_{\text{Salazie}} = 824$). Cette zone concentre donc l'essentiel de l'activité « chute de blocs » du cirque. La répartition des volumes éboulés sur ce secteur est similaire à celle observée dans le reste du cirque, de sorte qu'il est possible de considérer l'encaissement de la Rivière du Mât comme représentatif **des phénomènes se produisant à l'échelle du cirque (cf. détails ci-dessous)**.

Sur ces 578 évènements, 464 d'entre eux disposent d'information sur les volumes mobilisés, soit 80%, concentrés sur la période 1998-2020. Sur cette période, les volumes éboulés se répartissent selon le tableau suivant (Tableau 4).

Période 1998-2020 (22 ans)

Volume total (m ³)	Nombre d'évènements	Fréquence (Nb évènements/an)
< 0.1	103	4.68
[0.1-1[	89	4.05
[1-10[	153	6.95
[10-50[	70	3.18
[50-100[	12	0.55
[100-500[	28	1.27
[500-1 000[	6	0.27
[1 000-10 000[	2	0.09
≥ 10 000	1	0.05
TOTAL	464	21.09

Tableau 4 – Répartition des volumes des évènements connus de chute de blocs sur la période 1998-2020 dans l'encaissement de la Rivière du Mât.

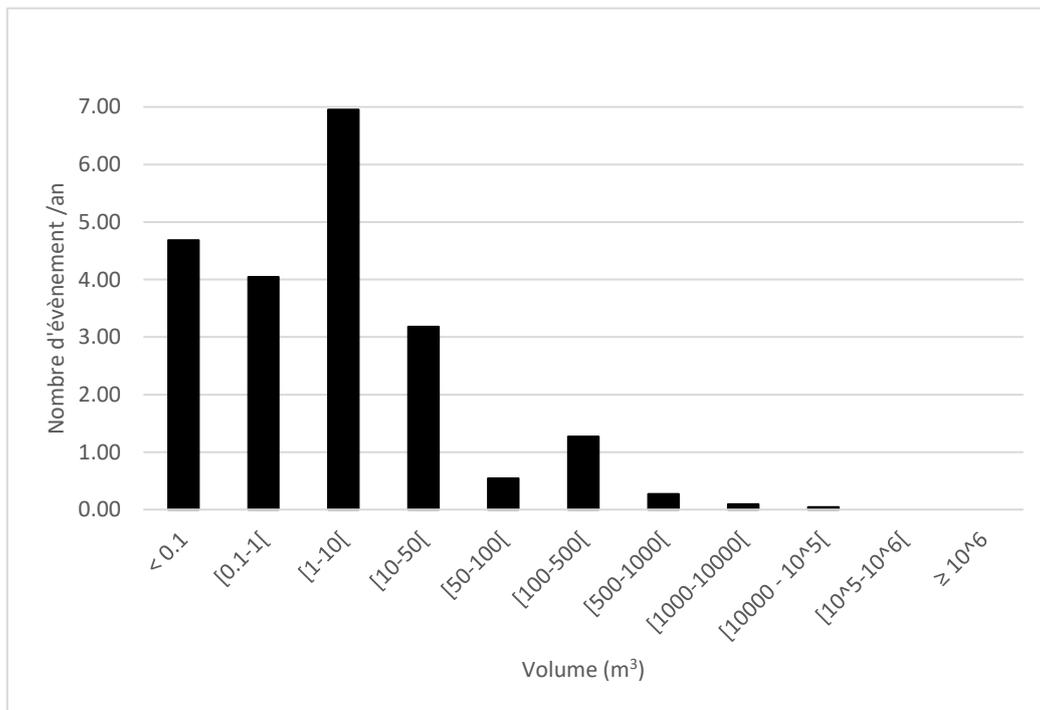


Figure 9 – Fréquence des évènements de chute de blocs en fonction du volume sur l'encaissement de la Rivière du Mât.

Le tableau et la figure 9 associée montrent que les évènements se produisant sur ce secteur d'étude présentent majoritairement des volumes totaux compris entre 0,1 et 50 m³ avec une prédominance des volumes compris entre 1 et 10 m³ (36% de l'ensemble des évènements). Il se produit ainsi en moyenne 21 évènements de chute de blocs par an sur le secteur, dont 7 évènements par an en moyenne avec des volumes de 1 à 10 m³, ce qui témoigne de la forte activité.

L'évènement le plus important enregistré sur la zone d'étude au cours de cette période correspond à l'éboulement en masse du rempart faisant face à l'ilet Morin en septembre 2010

ayant impliqué environ 10 000 m³ de matériaux (Figure 10). Cet évènement s'est produit sur la rive opposée à l'itinéraire routier et n'a pas directement impacté celui-ci. Toutefois, cet évènement est pris en compte dans la base de données compte tenu de son caractère exceptionnel impliquant un volume particulièrement conséquent.

Ces observations sont donc cohérentes avec celles faites à l'échelle de l'ensemble du Cirque de Salazie où, sur la même période d'observation, les volumes totaux les plus fréquemment observés sont également compris entre 1 et 10 m³. Toutefois, le volume maximum relevé dans l'encaissement (10 000 m³) est loin d'égaliser les deux effondrements en grande masse recensés dans le reste du cirque (200 000 m³ et 18 millions de m³).

Sur l'ensemble du défilé de la Rivière du Mât, certaines zones concentrent particulièrement les évènements alors que peu d'évènements sont recensés sur d'autres secteurs. Deux phénomènes peuvent expliquer ces variations de répartition :

- Une variabilité intrinsèque et naturelle de la falaise à produire des départs de blocs, liée à la nature géologique du versant et à sa géomorphologie (pente, hauteur...).
- Un éloignement de l'itinéraire routier et/ou d'autres enjeux par rapport au pied de paroi. Les évènements n'atteignant pas d'enjeux, ils ne sont pas forcément observés ni référencés. Cela crée une variabilité artificielle dans la répartition spatiale des évènements.



Figure 10 – Eboulement en masse du rempart face à l'îlet Morin en septembre 2010.

Des reconnaissances de terrain ont été réalisées dans les secteurs éloignés de la route afin de vérifier et préciser l'activité de chute de bloc à ce niveau. Ce travail a été réalisé sur deux zones principales :

- La zone de Petit Trou entre les PR9 et 10 ;
- La zone de Plateau Wickers entre les PR14 et 15.

Sur la zone de Petit Trou, les observations ont montré la présence de blocs basaltiques en aval de l'itinéraire routier, de volumes compris entre quelques centaines de litres et quelques m³ maximum. Toutefois, au moins deux blocs de très gros volume, l'un supérieur à 60m³ (Figure 11a), l'autre supérieur à 20m³ (Figure 11b), ont pu être observés dans ce secteur, en amont de la route. La période d'éboulement de ces blocs n'a pas pu être estimée mais il est probable qu'elle soit ancienne (centaine d'année à plusieurs centaines d'années). La présence de ces blocs témoigne des possibilités de départ de très gros blocs au niveau du versant surplombant l'îlet Petit Trou.



Figure 11 – Blocs de plusieurs dizaines de m^3 observés dans le secteur de Petit Trou. a. Bloc d'environ $60m^3$; b. bloc d'environ $20m^3$.

Au niveau de Plateau Wickers, dont le rempart est constitué d'une ignimbrite prismée, le pied de paroi et les quelques centaines de mètres en aval jusqu'à la RD48 montrent la présence de blocs extrêmement nombreux formant un talus d'éboulis en pied de rempart correspondant à des chaos de blocs et témoignant d'une très forte activité de la paroi à ce niveau (Figure 12). Les blocs présentent un volume relativement homogène, de quelques centaines de litres au m^3 (Figure 13), avec quelques blocs supérieurs à $1-2 m^3$ à ce niveau. En aval de la route, des blocs de taille similaire sont observés de manière un peu plus éparse mais ceux-ci restent toutefois assez nombreux.



Figure 12 – Chaos de blocs observé au niveau de Plateau Wickers.



Figure 13 – Blocs isolés de taille proche du m³ observés à Plateau Wickers

Par ailleurs, le secteur du tournant Z entre les PR11.5 et PR12 est le siège d'une très forte activité de chute de blocs avec des atteintes quasi-systématiques de la route. Cela a conduit le service des routes à engager des travaux de sécurisation importants sur cette portion d'itinéraire avec la mise en place d'ouvrages de protection passifs (filets dynamiques) et la réalisation d'un nouvel itinéraire s'éloignant de la paroi en 2016. Aucun évènement n'ayant atteint la route n'est recensé depuis cette date, suggérant que l'éloignement de l'itinéraire du pied de paroi et les ouvrages de protection sont efficaces. Toutefois, les départs de bloc dans cette zone se poursuivent forcément avec des caractéristiques de volume et de fréquence vraisemblablement similaires à la période pré-sécurisation.

Au-delà de l'observation des volumes de blocs éboulés (paramètre intensité de l'aléa) sur les différents secteurs investigués, les visites ont également permis de constater les atteintes possibles par les chutes de blocs et de caler les analyses trajectographiques utilisées pour définir les probabilités d'atteintes selon les différents scénarios considérés.

Toutefois, ces données d'évènements ne permettent pas d'avoir une information précise et exhaustive sur les zones de départ associées. Les positions enregistrées, relevées et intégrées dans la base de données BDMVT notamment sont souvent celles de l'atteinte observée sans que l'information sur la zone de départ au sein de la paroi/rempart dominant soit précisément implanté.

Enfin, comme précisé précédemment, l'inventaire des évènements sur l'encaissement de la Rivière du Mât sous-estime très probablement les volumes les plus petits (< 1m³), ceux-ci pouvant passer plus facilement inaperçus.

SECTEUR 1

- **Localisation** : **Pont Bengalis à l'ilet** (PR 2.5 à 4.7 soit 2.2 km – Figure 15)
- **Géologie et géomorphologie** : Terrasse alluviale de 500m de large en rive gauche, bordée par une falaise de 50 à 70 m de haut et de pente 40-50° composée de coulées de lave différenciées de phase IV du Piton des Neiges (> 250ka, mugéarites)
- **Facteur(s) aggravant(s)** : Versant végétalisé
- **Nombre d'évènements recensés** : **26**, soit 1.18 évènements/an et **0.54 évènement/km²/an** (Tableau 5)
- **Volume de bloc le plus abondant de l'inventaire**: ~ 1 m³
- **Volume du plus gros évènement recensé**: **70 m³** (30/01/2011 et 24/04/2018)
- Propagation maximale observée **jusqu'à plus de 100 m** de la paroi.
- *Correspond aux tronçons 2 et 3 identifiés dans le rapport BRGM RP-52744-FR⁶ (PR2.5 à 4.6), caractérisés par un niveau d'exposition de la route Nul à Faible.*

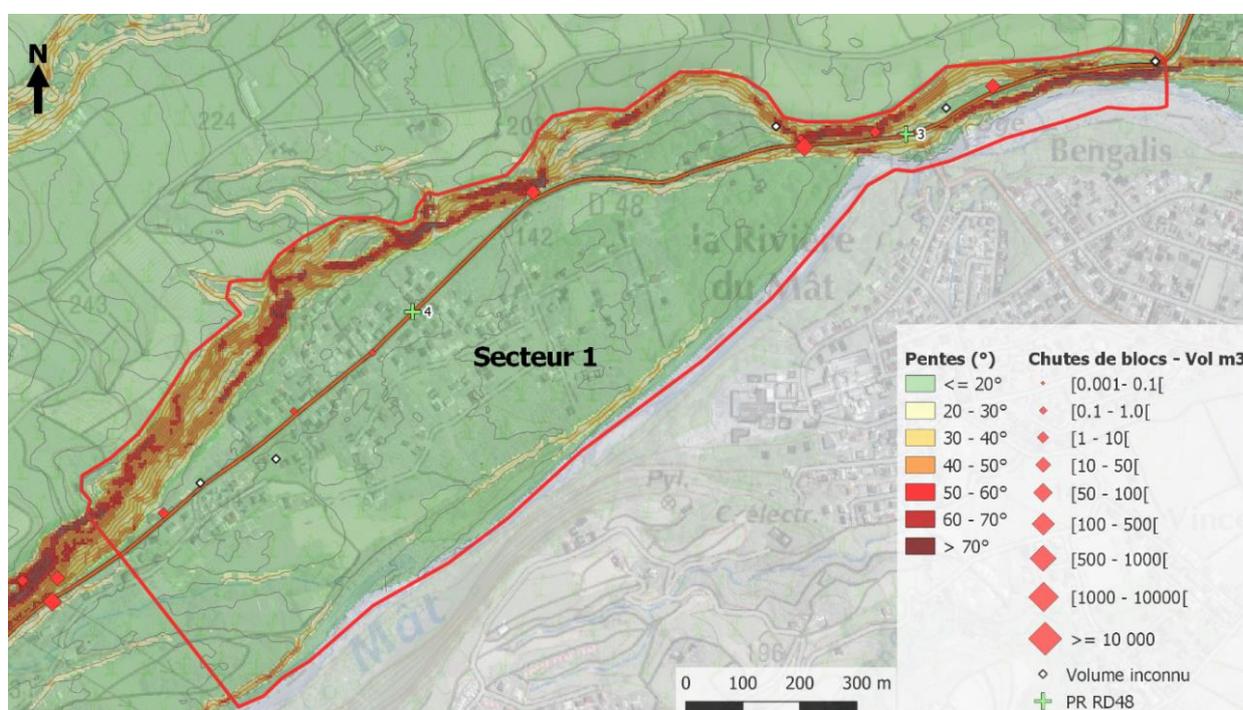


Figure 15 – Carte des pentes et localisation des évènements chute de blocs sur le secteur 1.

⁶ Auber, B. et al. (2003) – Salazie – Ile de La Réunion. Exposition des routes départementales RD48 et RD52 aux phénomènes naturels. Sectorisation de l'exposition du tracé routier. BRGM/RP-52744-FR, 41p., 3 fig., 7 annexes.

* Il s'agit ici de km de route (et non de linéaire de falaise). Idem pour les secteurs suivants.

S1 : Pont Bengalis – L'ilet		
Volume (m³)	Nb d'évènement	Fréquence (Nb d'évènement/an)
< 0.1	4	0.18
[0.1-1[	5	0.23
[1-10[	6	0.27
[10-50[	2	0.09
[50-100[	3	0.14
[100-500[	0	0.00
[500-1000[	0	0.00
[1000-10000[	0	0.00
≥ 10 000	0	0.00
Non connu	6	0.27
TOTAL	26	1.18

Tableau 5 – Fréquence des évènements en fonction du volume sur le Secteur 1

SECTEUR 2

- **Localisation** : Secteur Bras Citronnier (PR4.7 à 7.5 soit 2.8 km – Figure 16)
- **Géologie et géomorphologie** : Terrasse alluviale de 300 m à 50 m de large bordée par une falaise de 100 à 250 m de haut. La tête de rempart, sur 40 à 100 m de haut présente une plus forte pente (60-65° localement 80°) que le reste du versant (40° environ). Cette configuration est liée à la géologie avec des coulées de lave différenciée de phase III et IV du Piton des Neiges en tête (< 350 ka, hawaiiites, mugéarites) et des coulées de lave basiques de phase II sur le reste de la hauteur (> 430 ka, basaltes à olivine). Des traces de cicatrices d'arrachement sont visibles dans le versant.
- **Facteur(s) aggravant(s)** : Paroi végétalisée
- **Nombre d'évènements recensés** : **165** - soit 7.5/an et **2.7 évènements /km/an** (Tableau 6)
- **Volume de bloc le plus abondant**: [1 à 10] m³
- **Volume du plus gros évènement recensé** : **2500 m³** (19/10/2011)
- **Zones de départ** : les évènements sont principalement issus des zones à plus fortes pentes (> 40°) du rempart lorsque l'information de la localisation de la zone de départ est disponible.
- *Correspond aux tronçons 4 et 5 du rapport RP-52744-FR (PR4.6 à 7.5) caractérisés par un niveau d'exposition fort à moyen.*

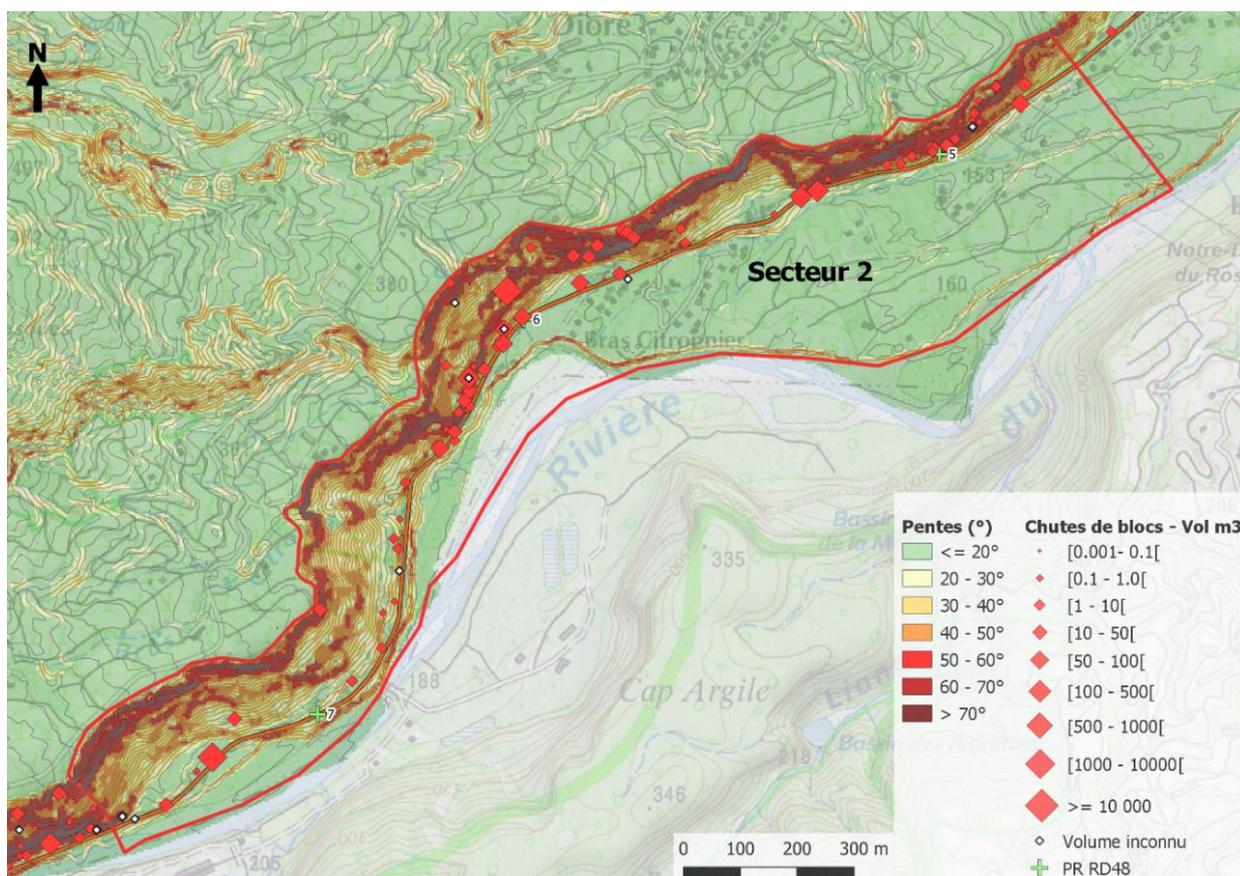


Figure 16 - Carte des pentes et localisation des évènements chute de blocs sur le secteur 2.

S2 : Bras Citronnier		
Volume (m³)	Nb d'évènement	Fréquence (Nb d'évènement/an)
< 0.1	33	1.50
[0.1-1[	29	1.32
[1-10[	51	2.32
[10-50[	31	1.41
[50-100[	3	0.14
[100-500[	6	0.27
[500-1000[	1	0.05
[1000-10000[	2	0.09
≥ 10 000	0	0.00
Non connu	9	0.41
TOTAL	165	7.50

Tableau 6 - Fréquence des évènements en fonction du volume sur le Secteur 2

SECTEUR 3

- **Localisation** : Secteur Ilet Payet / Petit Trou (PR7.5 à 8.7 soit 1.2 km – Figure 17)
- **Géologie et géomorphologie** : Secteur étroit du défilé, bordé par un rempart de 250 à 300m de haut présentant des fortes pentes sur toute sa hauteur (60-70°, localement 80°). Le rempart est essentiellement constitué de coulées de phase II du Piton des Neiges (> 450ka, basaltes à olivines), excepté sur les 10-20 derniers mètres en tête où affleurent des coulées différenciées de phase IV.
- **Facteur(s) aggravant(s)** : Rempart très végétalisé. Présence de nombreuses venues d'eau, en particulier près du PR8
- **Nombre d'évènements recensés**: **112** - soit 5.1 /an et **4.2 évènements/km/an** (Tableau 7)
- **Volume de bloc le plus abondant** : ~ **1 m³**
- **Volume du plus gros évènement recensé** : **600 m³** (10/08/2017)
- **Zones de départ** : évènements recensés sur toute la hauteur du rempart où affleurent les coulées de phase II.
- *Correspond au tronçon 6 du rapport RP-52744-FR (PR7.5 à 9) caractérisé par un niveau d'exposition fort à majeur*

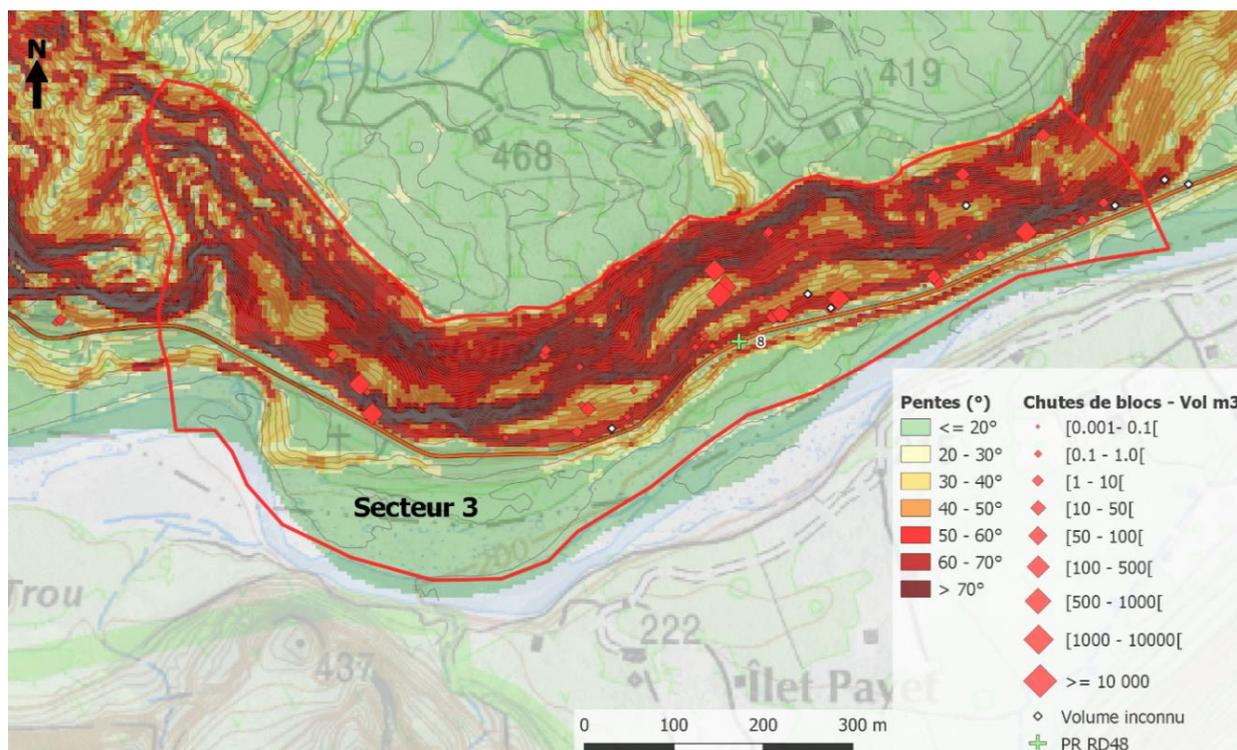


Figure 17 - Carte des pentes et localisation des évènements chute de blocs sur le secteur 3.

S3 : Ilet Payet – Petit Trou		
Volume (m³)	Nb d'évènement	Fréquence (Nb d'évènement/an)
< 0.1	32	1.45
[0.1-1[	23	1.05
[1-10[	28	1.27
[10-50[	13	0.59
[50-100[	3	0.14
[100-500[	4	0.18
[500-1000[	4	0.18
[1000-10000[	0	0.00
≥ 10 000	0	0.00
Non connu	5	0.23
TOTAL	112	5.09

Tableau 7 - Fréquence des évènements en fonction du volume sur le Secteur 3

SECTEUR 4

- **Localisation** : Secteur Petit Trou / Pisse en l'air (PR 8.7 à 10.6 soit 1.9 km – Figure 18)
- **Géologie et géomorphologie** : Secteur étroit du défilé où le rempart s'élève de manière importante par rapport au secteur précédent. Le rempart surplombant le secteur, d'une hauteur totale de 500-550 m, présente une configuration particulière : un premier rempart subvertical (70-80°) de 350 m de haut environ surplombe l'ilet Petit Trou, avec présence d'un talus d'éboulis en pied (pente 15°) sur 300m de long. En arrière du sommet de ce premier rempart (Piton Bonnet d'Evêque), une dépression d'environ 150 m est creusée par une ravine, puis un second rempart de 250 m de haut (pente 50-60°) permet d'atteindre la planèze externe des Hauts de Dioré. Le rempart inférieur est constitué de coulées basiques de phase II, tandis que le rempart supérieur est constitué de coulées différenciées de phase IV.
- **Facteur(s) aggravant(s)** : Rempart inférieur végétalisé et concerné par de nombreuses venues d'eau (secteur Pisse en l'air notamment). Par ailleurs, des blocs isolés sont observés à plus de 180 m du pied rempart au niveau de l'ilet Petit Trou, suggérant des possibilités de propagation de blocs importantes (propagation au sein du talus d'éboulis). Quelques très gros blocs de plusieurs dizaines de m³ sont observés sur le secteur.
- **Nombre d'évènements recensés**: 61 - soit 2.8 /an et 1.5 évènements/km/an (Tableau 8)
- **Volume de bloc le plus abondant**: ~1 m³
- **Volume du plus gros évènement recensé** : 100 m³ (23/01/2002)
- *Correspond aux tronçons 7, 8, 9 du rapport RP-52744-FR (PR9 à 10.9) caractérisés par un niveau d'exposition compris entre moyen et fort/majeur avec un petit tronçon de 600 m à exposition faible (PR 9 à 9.6).*

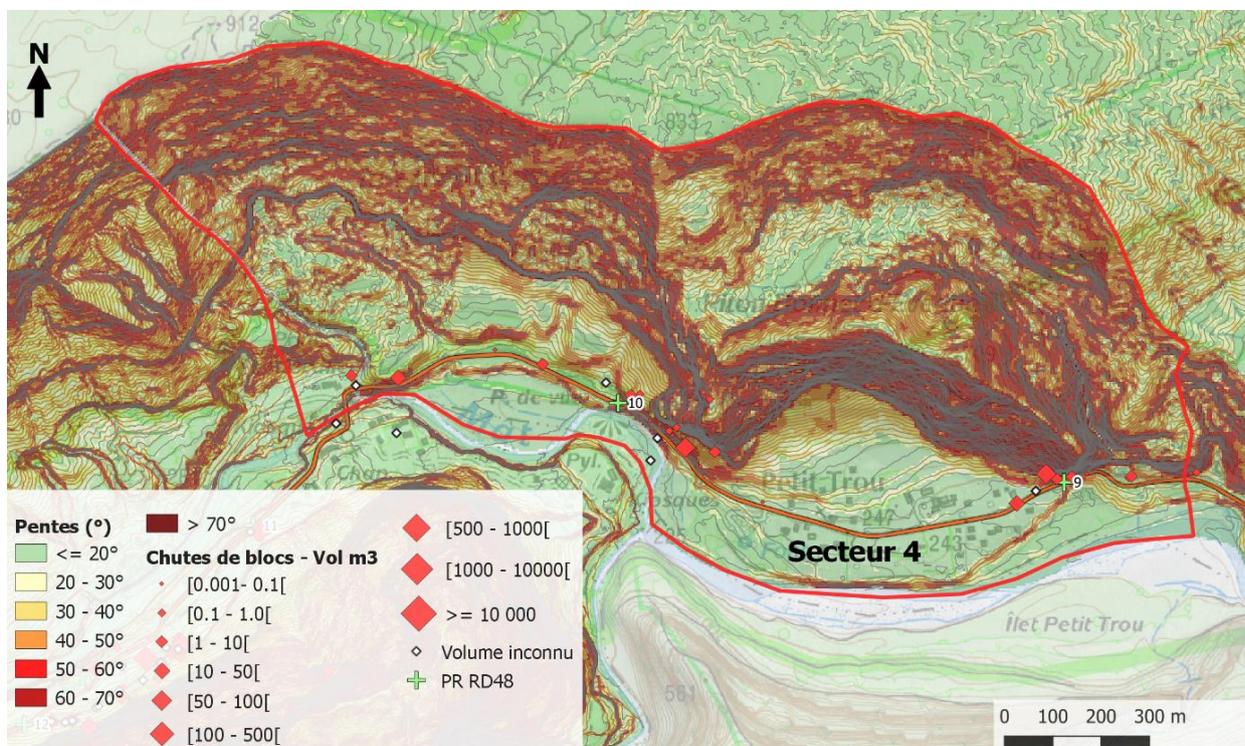


Figure 18 - Carte des pentes et localisation des évènements chute de blocs sur le secteur 4.

S4 : Petit Trou – Pisse en l'air		
Volume (m³)	Nb d'évènement	Fréquence (Nb d'évènement/an)
< 0.1	21	0.95
[0.1-1[	11	0.50
[1-10[	12	0.55
[10-50[	5	0.23
[50-100[	1	0.05
[100-500[	2	0.09
[500-1000[	0	0.00
[1000-10000[	0	0.00
≥ 10 000	0	0.00
Non connu	9	0.41
TOTAL	61	2.77

Tableau 8 - Fréquence des évènements en fonction du volume sur le Secteur 4

SECTEUR 5

- Localisation : **Secteur Tournant Z** (PR10.75-12.2 soit 1.45 km) en rive droite de la Rivière du Mât (Figure 19).
- Géologie et géomorphologie : Rempart de 500-550 m de haut à très forte déclivité sur les 350-400 m supérieurs (70-80°, localement 85°) puis pente d'éboulis (25-30°) sur la partie inférieure. La partie subverticale du rempart est constituée d'une ignimbrite prismée (coulee pyroclastique d'âge 180 ka) formant de grand dièdres métriques à plurimétriques fracturés et décomprimés. Les chutes de blocs recensés sont quasi-uniquement issus de la chute de ces dièdres (quelques rares déstabilisations du talus d'éboulis)
- Nombre d'évènements recensés: **115** - soit 5.2 /an et **3.6 évènements/km/an** (Tableau 9)
- Volume de bloc le plus abondant : **[1-10] m³**
- Volume du gros évènement recensé : **500 m³** (23/01/2002)
- Secteur sécurisé mi-2016 : protections passives et modification de l'itinéraire routier. Plus aucune atteinte sur la chaussée n'est recensée après 2016.
- *Correspond au tronçon 10 du rapport RP-52744-FR (PR10.9 à 14.3) caractérisé par un niveau d'exposition fort à majeur.*

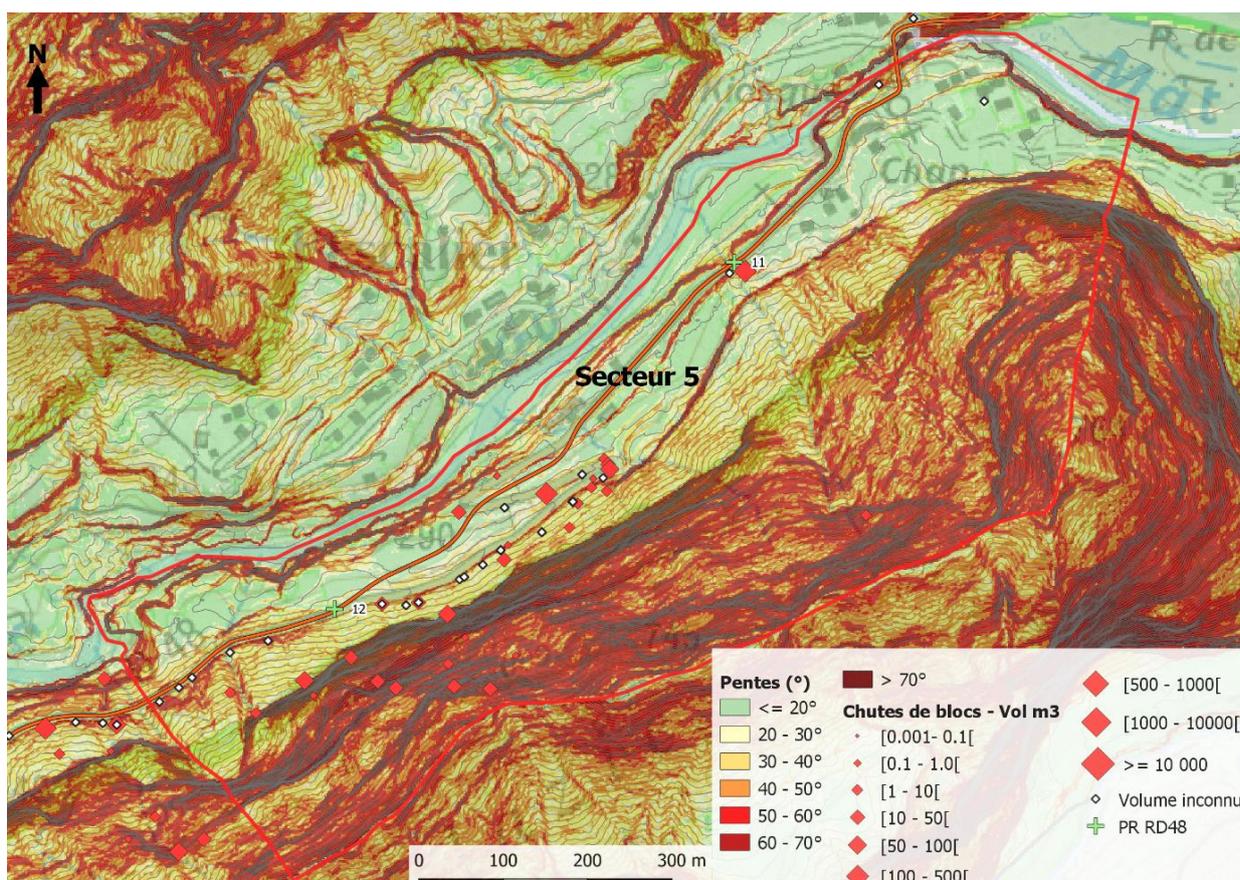


Figure 19 - Carte des pentes et localisation des évènements chute de blocs sur le secteur 5.

S5 : Tournant Z		
Volume (m³)	Nb d'évènement	Fréquence (Nb d'évènement/an)
< 0.1	10	0.45
[0.1-1[	10	0.45
[1-10[	29	1.32
[10-50[	13	0.59
[50-100[	0	0.00
[100-500[	5	0.23
[500-1000[	1	0.05
[1000-10000[	0	0.00
≥ 10 000	0	0.00
Non connu	47	2.14
TOTAL	115	5.23

Tableau 9 - Fréquence des évènements en fonction du volume sur le Secteur 5

SECTEUR 6

- **Localisation** : Secteur Ilet Morin (PR12.2 à 14.1 soit 1.9 km – Figure 20)
- **Géologie et géomorphologie** : La lithologie est identique au secteur 5 (ignimbrite prismée). La hauteur de rempart est plus importante (500-800m), mais avec une pente plus faible (60° environ) associée à une pente d'éboulis plus douce en pied (20-25°).
- **Nombre d'évènements recensés**: **84** - soit 3.8 /an et **2 évènements/km/an** (Tableau 10)
- **Volume de bloc le plus abondant** : **1-5 m³**
- **Volume du plus gros évènement recensé** : **10 000 m³ (éboulement du Cap Picard en rive gauche en 2010) et 350 m³ en rive droite avec un volume unitaire max de 5m³ (08/03/2015).**
- *Correspond au tronçon 11 du rapport RP-52744-FR (PR10.9 à 14.3) caractérisé par un niveau d'exposition fort à majeur*

NB : Le regroupement des secteurs 5 et 6 est possible compte tenu de leur caractéristiques proches (dans ce cas, le secteur s'étend sur 3.05 km avec 196 évènements recensés soit 8.9 /an et 2.9 évènements/km/an).

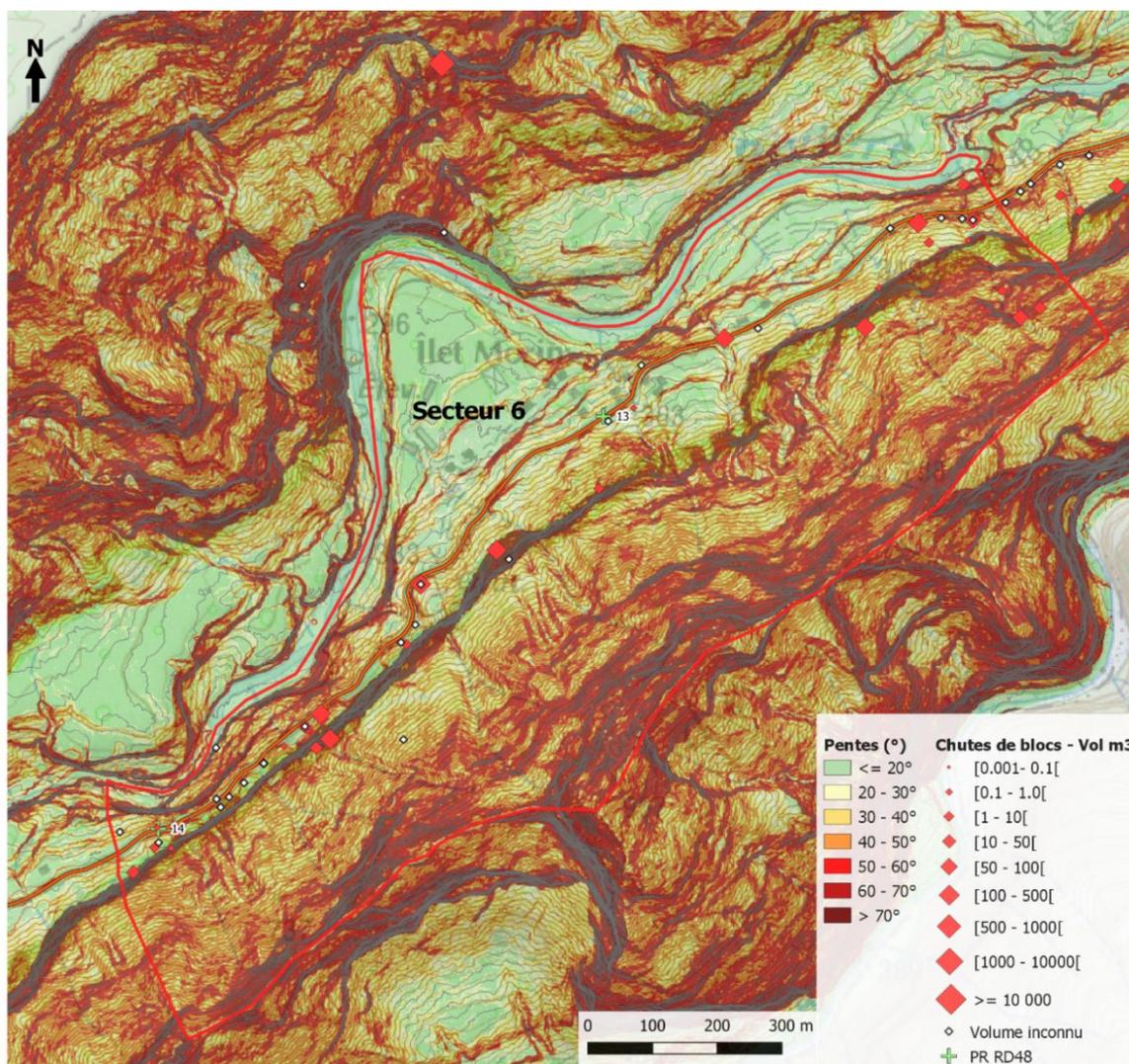


Figure 20 - Carte des pentes et localisation des évènements chute de blocs sur le secteur 6.

S6 : Ilet Morin		
Volume (m³)	Nb d'évènement	Fréquence (Nb d'évènement/an)
< 0.1	2	0.09
[0.1-1[	11	0.50
[1-10[	17	0.77
[10-50[	7	0.32
[50-100[	3	0.14
[100-500[	9	0.41
[500-1000[	0	0.00
[1000-10000[	0	0.00
≥ 10 000	1	0.05
Non connu	34	1.55
TOTAL	84	3.82

Tableau 10 - Fréquence des évènements en fonction du volume sur le Secteur 6.

SECTEUR 7

- Localisation : **Secteur Plateau Wickers / Camps Lilas** (PR14.1 à 16 soit 1.9 km – Figure 21)
- Géologie et géomorphologie : Sortie du défilé et ouverture du Cirque de Salazie. La zone de Plateau Wickers est caractérisée par un rempart de 400m de haut de pente moyenne (45°) suivi en pied par une zone de plateau de pente faible (10°). La zone de Camp Lila présente la même configuration mais avec un rempart plus élevée (650m) et à plus forte pente (50-55°) et une zone de plateau en pied de pente légèrement plus forte (20°). Le rempart est constitué par l'ignimbrite prismée sur 250 à 500 m de haut, puis par des coulées différenciées (phase IV) sur le reste de la hauteur. De nombreux éléments sont observés dans la pente en aval du rempart dont la nature n'est pas identifiée (ignimbrite ou coulée).
- Nombre d'évènements recensés : **15** - soit 0.68 /an et **0.35 évènement/km/an** (Tableau 11) mais de très nombreux blocs sont présents dans la pente issus d'évènements plus ou moins anciens non décrits.
- Volume de bloc le plus abondant: **~1 m³**
- Volume du plus gros évènement recensé : **300 m³** (04/03/2004)
- *Correspond aux tronçons 12 et 13 du rapport RP-52744-FR (PR14.3 à 16.1) caractérisés par un niveau d'exposition nul (14.3-15.7) à moyen (15.7-16.1).*

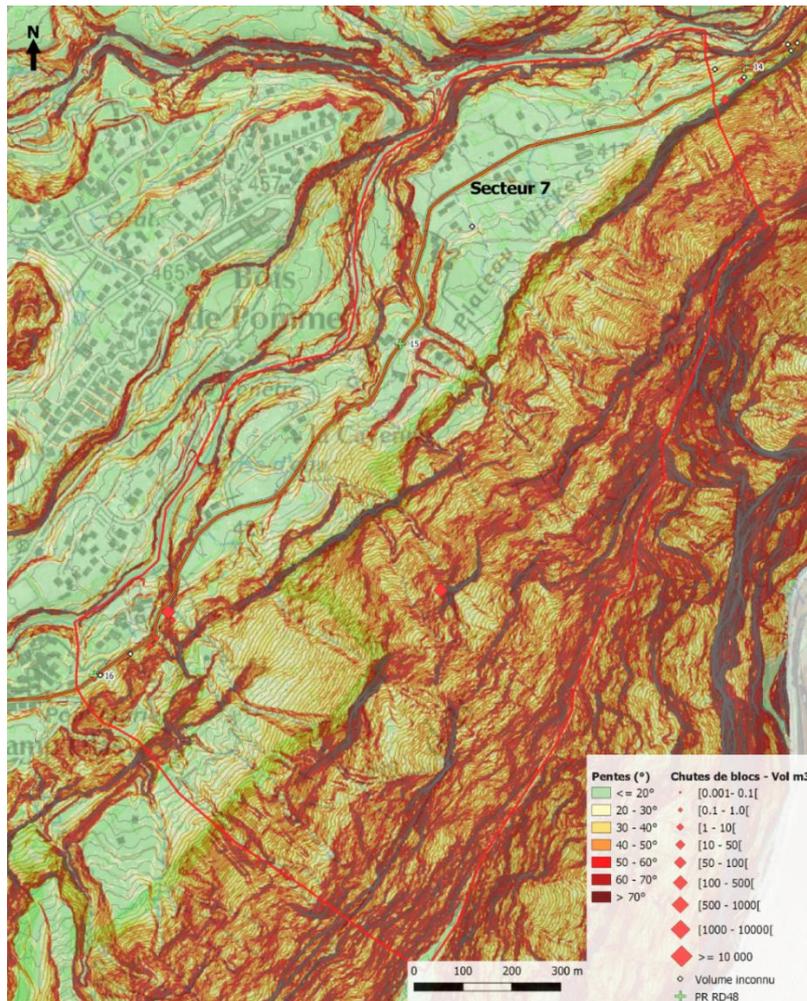


Figure 21 - Carte des pentes et localisation des évènements chute de blocs sur le secteur 7.

S7 : Plateau Wickers / Camp Lilas		
Volume (m ³)	Nb d'évènement	Fréquence (Nb d'évènement/an)
< 0.1	1	0.05
[0.1-1[	0	0.00
[1-10[	7	0.32
[10-50[	2	0.09
[50-100[	0	0.00
[100-500[	2	0.09
[500-1000[	0	0.00
[1000-10000[	0	0.00
≥ 10 000	0	0.00
Non connu	3	0.14
TOTAL	15	0.68

Tableau 11 - Fréquence des évènements en fonction du volume sur le Secteur 7

3.1.3. Analyse statistique et loi fréquence vs volume

L'analyse des événements historiques recensés permet d'avoir une vision relativement précise de la nature et de la fréquence des événements de type chute de blocs (CDB) sur la zone d'étude et leurs variabilités selon les différents secteurs identifiés. Le tableau 12 ci-dessous résume les principales caractéristiques des différents secteurs identifiés sur l'encaissement de la Rivière du Mât.

	Loc.	Versant	Linéaire (km de route)	Nb d'évnt	Freq / an	Freq / an / km	Volume de bloc retenu (m ³)	Volume plus gros évènement (m ³)
S1	Pont Bengalis – L'ilet	H : 50-70 m Pente : 40-50° Coulées différenciées	2.2	26	1.2	0.54	1	70
S2	Bras Citronnier	H : 100-250 m Pente : 60-65° Coulées différenciées et basiques	2.8	165	7.5	2.7	1-10	2500
S3	Ilet Payet Petit Trou	H : 250-300 m Pente : 60-70° Coulées basiques	1.2	112	5.1	4.2	1	600
S4	Petit Trou Pisse en l'air	H : 500-550 m Pente : 70-80° Coulées basiques et différenciées	1.9	61	2.8	1.5	1	100
S5	Tournant Z	H : 500-550 m Pente : 70-80° Coulées et ignimbrite prismée	1.45	115	5.2	3.6	1-10	500
S6	Ilet Morin	H : 500-800m Pente : 60° Ignimbrite prismée	1.9	84	3.8	2	1-5	10 000
S7	Plateau Wickers / Camp Lilas	H : 400-650 m Pente : 45-55° Ignimbrite et coulées différenciées	1.9	15	0.7	0.35	1-5	300
TOTAL			13.35	578	26.3	1.2		

Tableau 12 – Caractéristiques principales des différents secteurs de l'encaissement de la rivière du Mât

Sur les 22 années de chronique disponible, l'analyse des données montre que le **volume de bloc le plus abondant des événements se situe aux alentours des 1m³ pour la majorité des secteurs et peut atteindre la dizaine de m³** :

- Les secteurs 1, 3 et 4 sont plutôt concernés par des blocs de **0.1-1 m³** (bien que quelques très gros blocs soient observés sur le secteur 4) ;
- Les secteurs 6 et 7 par des volumes de **1-5 m³** ;
- Les secteurs 2 et 5 par des volumes pouvant atteindre **10 m³**.

En 22 ans, les événements les plus importants ont été de l'ordre de la centaine à quelques centaines de m³, avec toutefois quelques événements plus conséquents :

- Eboulement de 2500 m³ en octobre 2011 dans le secteur de Bras Citronnier (Secteur 2, PR6) et éboulement de 2000 m³ l'année précédente au PR7+250 (secteur 2, llet Payet) ;
- Eboulement de grande ampleur (10 000 m³) du rempart rive gauche de la rivière du Mât au droit de l'Ilet Morin (secteur 6) en septembre 2010.

On remarque que des remparts de hauteur « limitée » sont capables de produire des événements importants de l'ordre de plusieurs milliers de m³. C'est le cas notamment du secteur 2 (effondrements de 2000 et 2500 m³), qui présente une hauteur de rempart comprise entre 100 et 250 m, bien inférieure à celle des secteurs 4, 5 ou 7 et où les volumes des événements les plus importants observés ces dernières années ne sont que de quelques centaines de m³. Toutefois, des effondrements en masse de ces remparts de hauteur supérieure à 500 m sont possibles, notamment à des échelles de temps contemporaines – en témoigne l'effondrement du Cap Picard au Secteur 6 en 2010 - et sont alors potentiellement catastrophiques en termes d'impacts sur les enjeux et les vies humaines.

La fréquence spatio-temporelle F_{st} des événements s'obtient en divisant le nombre cumulé de chute de blocs par la période (ici 22 ans) et la surface de falaise (ou le linéaire) couverte par l'inventaire. Plusieurs études ont montré que la relation entre la fréquence cumulée des événements et le volume pouvait être décrite par une loi de type puissance (Dussauge-Peissier, 2002 ; Picarelli et al., 2005 ; Dewez et al., 2009 ; Hantz, 2011 ; Hantz et al., 2020).

Ainsi, pour une paroi donnée, **la fréquence cumulée F_{st} des éboulements de volume supérieur à V (en m³) est donnée par la relation :**

$$F_{st} = \alpha_{st} V^{-b}$$

α_{st} représente la fréquence des événements de volume $\geq 1\text{m}^3$ et reflète donc l'activité de la paroi. La constante b, qui est généralement comprise entre 0.4 et 1.5 (Dewez et al., 2009; Hantz et al., 2020), reflète l'uniformité de la distribution des volumes. Plus b est grand, plus la distribution est uniforme dans la plage de volume considéré.

A La Réunion, il a été montré que la loi de Poisson (loi de probabilité discrète) permettait de bien décrire l'occurrence de chutes de blocs sur la route du Littoral (Rat, 2006 ; Azemard, 2018⁷). En adoptant cette distribution, **la probabilité qu'une paroi soit affectée par au moins une chute de blocs pendant la période de temps t est donnée par :**

$$P = 1 - e^{-F \cdot t} = 1 - e^{-t/T}$$

Avec $T = 1 / F$, la période de retour des chutes (inverse de la fréquence).

Cette analyse statistique a été appliquée à la zone d'étude, à la fois sur l'ensemble du linéaire de l'encaissement de la Rivière du Mât et sur chaque secteur indépendamment. Les résultats sont résumés dans les tableaux suivants et représentés dans la figure 22. Le tableau 14 présente les résultats pour une probabilité de départ égale à 1, soit qu'il existe **100% de chance qu'un événement de la gamme de volume indiqué se produise sur la période de temps considéré.**

⁷ $N(\text{chute/an}) = 4.23 * V^{-0.40}$ entre 1976 et 2003, avant la mise en place des protections en paroi ;
 $N(\text{chute/an}) = 3.24 * V^{-0.37}$ entre 2008 et 2018

Secteur	Nombre de données	Relation Fq cumulée-volume calculée	Coefficient de détermination R ²
Encaissement Rivière du Mât	464	$F(\text{chute/an/km}) = 1.5 * V^{-0.65}$	0.96
Secteur 1	15	$F(\text{chute/an/km}) = 0.23 * V^{-0.33}$	0.99
Secteur 2	122	$F(\text{chute/an/km}) = 1.9 * V^{-0.58}$	0.98
Secteur 3	84	$F(\text{chute/an/km}) = 2.1 * V^{-0.42}$	0.99
Secteur 4	40	$F(\text{chute/an/km}) = 0.52 * V^{-0.50}$	0.99
Secteur 5	53	$F(\text{chute/an/km}) = 1.9 * V^{-0.6}$	0.95
Secteur 6	41	$F(\text{chute/an/km}) = 1.2 * V^{-0.48}$	0.85
Secteur 7	10	$F(\text{chute/an/km}) = 0.25 * V^{-0.39}$	0.98

Tableau 13 – Loi fréquence-volume calculée sur la zone d'étude et les différents secteurs indépendants à partir de l'analyse des données historiques de volumes $\geq 1\text{m}^3$.

	Classes de volumes (m ³) pour lesquelles une probabilité de rupture P = 1 est calculée sur la période de temps t considérée					
	t = 1 an	t = 10 ans	t = 30 ans	t = 100 ans	t = 300 ans	t = 1000 ans
Encaissement Rivière du Mât	[0.1-1[	[1-10[	[10-50[	[100-500[	[10 ³ -10 ⁴[	[10 ³ -10 ⁴ [
Secteur 1	<0.01	[0.1-1[	[1-10[	[100 – 500[	[10 ³ -10 ⁴[	[10 ⁵ -10 ⁶ [
Secteur 2	[0.1-1[	[10-50[	[50-100[	[500 – 1000[	[10 ³ – 10 ⁴[	[10 ⁵ -10 ⁶ [
Secteur 3	[0.1-1[	[10-50[	[500 – 1000[	[10 ⁴ -10 ⁵[	[10 ⁵ -10 ⁶[	$\geq 10^6$
Secteur 4	< 0.1	[1-10[	[10-50[	[100-500[	[10 ³ -10 ⁴[	[10 ⁴ -10 ⁵ [
Secteur 5	[0.1-1[	[10-50[	[50-100[	[500 – 1000[	[10 ³ – 10 ⁴[	[10 ⁴ -10 ⁵ [
Secteur 6	< 0.1	[1-10[	[50-100[	[10 ³ – 10 ⁴[	[10 ⁴ -10 ⁵[	[10 ⁵ -10 ⁶ [
Secteur 7	<0.01	[0.1-1[	[1-10[	[50-100[	[10 ³ – 10 ⁴[	[10 ⁴ -10 ⁵ [
SCENARIO STEPRIM	Fréquent		Centennal		Exceptionnel	

Tableau 14 – Classes de volumes pour lesquelles une probabilité de départ égale à 1 est calculée selon différentes périodes de temps considérées.

Le coefficient de détermination permet de vérifier la qualité de l'équation de la loi puissance et sa représentativité vis-à-vis des données. Plus le coefficient est proche de 1, plus cette dernière est bonne. Dans notre cas, les coefficients R² sont supérieurs à 0.95 à l'exception du secteur 6 où R² = 0.85, témoignant d'une bonne qualité de prédiction des équations. Toutefois, certains secteurs ne disposent que de très peu de données (secteurs 1 et 7 par exemple), ce qui peut altérer la validité de l'équation. Par ailleurs, bien que le nombre d'événements recensés soit important, les plus petits événements sont très probablement sous-représentés car soit non observés, soit non comptabilisés, en particulier lorsqu'ils se produisent en retrait de l'itinéraire routier ou des zones habitées. Ceci est bien visible sur les courbes de la Figure 22. Il convient donc de conserver un regard critique sur l'analyse statistique des données et des probabilités de rupture obtenues via les calculs. Ces résultats constituent un outil supplémentaire à l'analyse simple des événements historiques et à l'analyse à dire d'expert pour la détermination des scénarii de référence. Dans le cadre de la définition des événements représentatifs des différents

scenarii STEPRIM, c'est donc une analyse croisée des chroniques d'évènements sur la zone d'étude, des évènements historiques majeurs dans d'autres portions du cirque de Salazie et des calculs de probabilités qui a été menée.

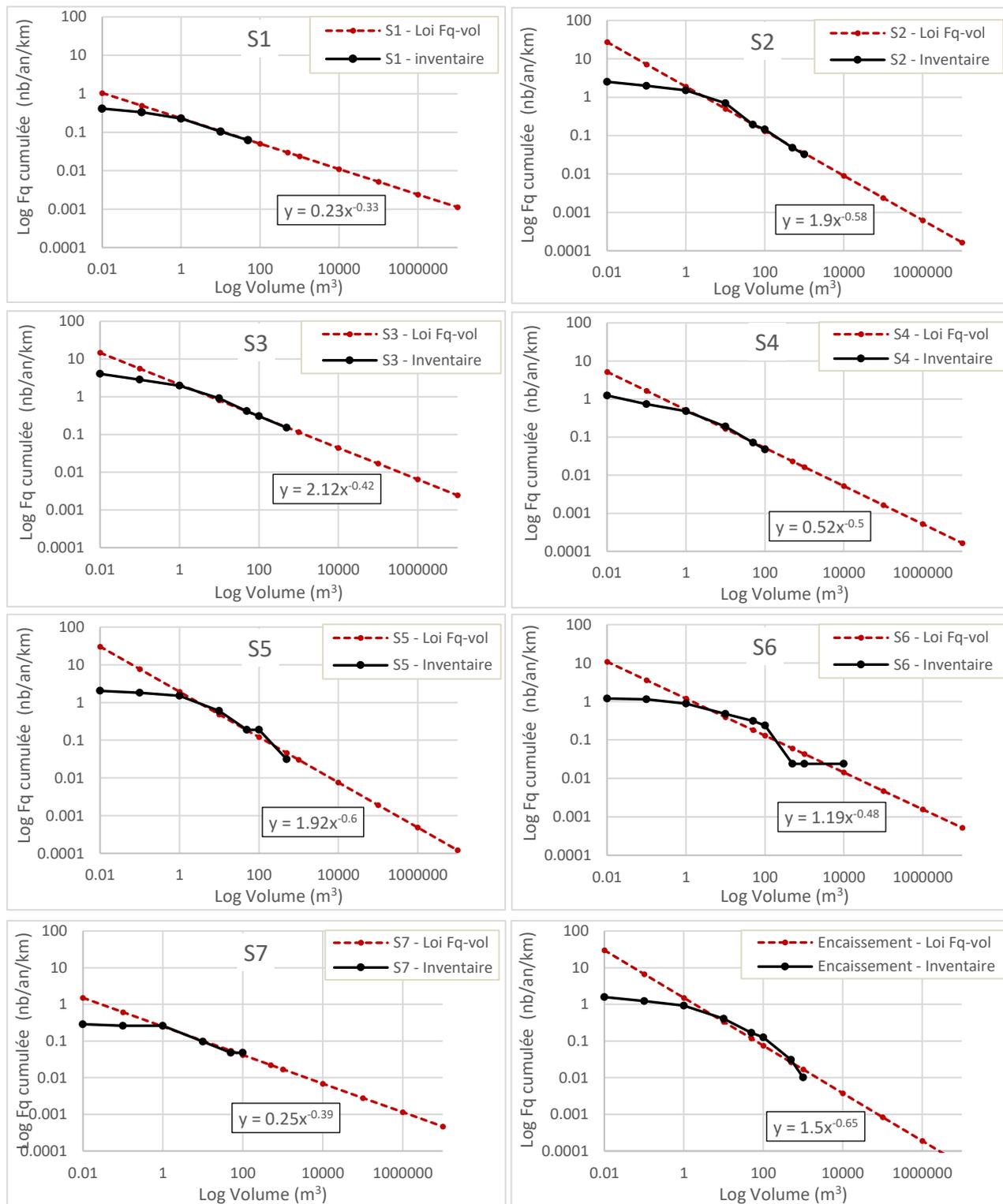


Figure 22 – Relation entre la fréquence annuelle cumulée et le volume des évènements de l'inventaire (courbes noires) pour les différents secteurs de l'encaissement de la Rivière du Mât et loi fréquence-volume calculée (tiretés rouge).

3.1.4. Définition des intensités attendues pour différentes périodes de référence (logique STEPRIM)

La démarche STEPRIM propose la définition de trois scénarii de référence : le scénario fréquent, correspondant à des évènements qui se produisent tous les 10-30 ans environ ; le scénario centennal et le scénario exceptionnel correspondant à des évènements extrêmes mais réalistes (échelle d'occurrence : plusieurs centaines d'années).

La période d'observation et de recensement (quasi) systématique des évènements sur le Cirque de Salazie et sur l'encaissement de la Rivière du Mât en particulier, est de 22 ans. Cette période est cohérente avec le scénario fréquent. Ainsi, la définition des intensités et des activités attendues pour ce scénario est réalisée à partir des données issues des observations directes des évènements et l'analyse statistique permet de valider la pertinence des choix réalisés.

En revanche, pour les scénarios centennal et exceptionnel, la période d'observation n'est pas suffisante pour déterminer les intensités à attendre. Dans ces deux cas, l'analyse statistique couplée à l'analyse des évènements majeurs qui se sont produits par le passé à l'échelle du cirque de Salazie (dans des contextes similaires) permet de définir les intensités et l'activité attendue au niveau des différents secteurs de la zone d'étude.

▪ Scénario fréquent (10-30 ans)

Pour l'ensemble des secteurs, les volumes de blocs retenus se situent autour de 1m^3 . De nombreux évènements se produisent toute l'année tout au long de l'itinéraire, impliquant généralement 1 à quelques m^3 . Les plus gros évènements recensés sur la période de 22 ans sont de l'ordre de la centaine à quelques centaines de m^3 sur la majorité des secteurs bien que trois évènements impliquant plusieurs milliers de m^3 soient recensés (2 sur le secteur 2, 1 sur le secteur 6). L'analyse statistique montre qu'à l'échéance 10-30 ans, ce sont des évènements de l'ordre de la dizaine à la centaine de m^3 qui ont la plus grande probabilité de se produire, et ce sur tous les secteurs (Tableau 14). Le secteur 3 enregistrerait des volumes légèrement supérieurs, de l'ordre de plusieurs centaines de m^3 .

Ainsi, pour le secteur 3, le scénario fréquent serait caractérisé par des volumes susceptibles de s'ébouler de l'ordre de **de 500 m^3** . Les autres secteurs seraient caractérisés par des volumes de l'ordre **de quelques dizaines à une centaine de m^3** avec des volumes de blocs unitaires supérieurs ou égaux à 1m^3 . Le secteur 1 se situerait plutôt aux alentours de la dizaine de m^3 alors que les autres secteurs seraient concernés par des évènements de 50-100 de m^3 .

▪ Scénario centennal

Les analyses statistiques menées sur les évènements historiques connus permettent de qualifier, grâce aux lois de relation entre la fréquence de chute et les volumes en jeu, la probabilité de rupture des chutes de blocs. Ces analyses montrent sur les différents secteurs des évènements attendus d'intensité variable d'un secteur à l'autre (Tableau 14). Pour les secteurs 1 et 4, ce sont des évènements de l'ordre de 100 à 500 m^3 qui auraient une probabilité « certaine » (c.à.d. égale à 1) de se produire. Pour le secteur 1, l'ordre de grandeur de volume calculé semble cohérent. En effet, compte tenu de la hauteur limitée de la paroi (50-70 m), il ne peut se produire de très gros évènement sur ce secteur (Nédellec et Cruchet, 2008⁸). Pour le secteur 4, en revanche, ce

⁸ L'analyse des modes d'effondrement en masse à La Réunion par Nédellec et Cruchet (2008, rapport BRGM/RP-56729-FR) a montré que les éboulements au-delà de plusieurs dizaines de milliers de m^3 nécessitent généralement la présence de parois rocheuses de plus de 100 m de hauteur.

volume semble légèrement sous-estimé, compte tenu notamment de la hauteur de la falaise et une gamme de volume légèrement supérieure est retenue : quelques milliers de m³.

Les secteurs 2 et 5 se situent dans la gamme 500-1000 m³, ce qui semble également légèrement sous-estimé au regard des évènements passés sur ces secteurs et des volumes déterminés sur des secteurs adjacents aux caractéristiques proches (cf. ci-dessous). Un volume de quelques milliers de m³ est donc retenu.

Les secteurs 3 et 6 montrent qu'à cette échéance, ce sont des volumes de l'ordre de de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers de m³ qui sont susceptibles de s'ébouler.

Enfin, pour le secteur 7, le volume déterminé par la méthode statistique (50-100 m³) semble clairement sous-évalué (calcul sur un faible nombre de données disponibles). Au vu de la configuration de la paroi, proche de celle des secteur 5 et 6, il semble plus pertinent de considérer des évènements de l'ordre quelques milliers de m³ à dizaines de milliers de m³ sur ce secteur.

En résumé, les évènements de référence pour le **scenarion centennal** pouvant être retenus sont :

- **Secteur 1** : éboulement de l'ordre de **500 m³** (avec blocs unitaires de quelques m³)
- **Secteur 2, 4, 5** : éboulement de l'ordre de **quelques milliers de m³** (avec blocs unitaires d'environ 10m³)
- **Secteurs 3, 6, 7** : éboulement de l'ordre de la **dizaine de milliers de m³** (avec blocs unitaires d'environ 10m³). Il s'agirait d'un évènement de type éboulement du Cap Picard sur le secteur 6 en 2010 (évènement rare mais non exceptionnel à l'échelle humaine).

▪ **Scenario exceptionnel**

Les calculs de probabilité de rupture à l'échéance 300 ans voire 1000 ans suggèrent des évènements de très grande ampleur impliquant des volumes de plusieurs centaines de milliers de m³ voire supérieurs au million de m³ et des volumes unitaires supérieurs à 10m³.

Le secteur 1, compte tenu de sa configuration, ne peut toutefois pas être concerné par ce type d'évènement (cf. ci-dessus). En toute logique, l'évènement maximal qui pourrait s'y produire n'impliquerait qu'un volume de l'ordre de la dizaine de millier de m³.

De la même manière, au vu de la hauteur du rempart des secteurs 2 et 3 (100-300 m), des évènements de l'ordre de la centaine de milliers de m³ sont les plus probables à cette échéance.

En revanche, les secteurs 4, 5, 6 et 7 sont concernés par des remparts de plus de 500 m de haut, atteignant parfois 800 m. A ce niveau, des déstabilisations majeures des parois sont possibles, à l'image de l'évènement exceptionnel de Grand Sable en 1875 avec la déstabilisation du rempart Est du Gros Morne qui a mobilisé près de 18 millions de m³ de matériaux.

En résumé, les évènements de référence pour le scenarion exceptionnel pouvant être retenus sont :

- **Secteur 1** : éboulement de l'ordre de la **dizaine de milliers de m³**
- **Secteurs 2 et 3** : éboulement de l'ordre de la **centaine de milliers de m³**
- **Secteurs 4, 5, 6, 7** : éboulement de l'ordre de **1 à 10 millions de m³**

Le tableau 15 ci-dessous synthétise les intensités attendues selon chaque scenarion envisagé, au niveau des différents secteurs de l'encaissement de la Rivière du Mât (V_t = volume total ; V_u = volume unitaire pouvant se propager).

	Scenario fréquent	Scenario centennal	Scenario exceptionnel
Secteur 1	$V_t = 10 \text{ m}^3$ $V_u = \sim 1 \text{ m}^3$	$V_t = 500 \text{ m}^3$ $V_u = [1-10[\text{ m}^3$	$V_t = 10^4 \text{ m}^3$ $V_u > 10 \text{ m}^3$
Secteur 2	$V_t = 50-100 \text{ m}^3$ $V_u = [1-10[\text{ m}^3$	$V_t = 10^3 \text{ m}^3$ $V_u = \sim 10 \text{ m}^3$	$V_t = 10^5 \text{ m}^3$ $V_u > 10 \text{ m}^3$
Secteur 3	$V_t = 10^2 - 10^3 \text{ m}^3$ $V_u = [1-10[\text{ m}^3$	$V_t = 10^4 \text{ m}^3$ $V_u = \sim 10 \text{ m}^3$	$V_t = 10^5 \text{ m}^3$ $V_u > 10 \text{ m}^3$
Secteur 4	$V_t = 50-100 \text{ m}^3$ $V_u = [1-10[\text{ m}^3$	$V_t = 10^3 \text{ m}^3$ $V_u = \sim 10 \text{ m}^3$	$V_t = 10^6-10^7 \text{ m}^3$ $V_u > 10 \text{ m}^3$
Secteur 5	$V_t = 50-100 \text{ m}^3$ $V_u = [1-10[\text{ m}^3$	$V_t = 10^3 \text{ m}^3$ $V_u = \sim 10 \text{ m}^3$	$V_t = 10^6-10^7 \text{ m}^3$ $V_u > 10 \text{ m}^3$
Secteur 6	$V_t = 50-100 \text{ m}^3$ $V_u = [1-10[\text{ m}^3$	$V_t = 10^4 \text{ m}^3$ $V_u = \sim 10 \text{ m}^3$	$V_t = 10^6-10^7 \text{ m}^3$ $V_u > 10 \text{ m}^3$
Secteur 7	$V_t = 50-100 \text{ m}^3$ $V_u = [1-10[\text{ m}^3$	$V_t = 10^4 \text{ m}^3$ $V_u = \sim 10 \text{ m}^3$	$V_t = 10^6-10^7 \text{ m}^3$ $V_u > 10 \text{ m}^3$
Encaissement Rivière du Mât (tous secteurs confondus)	$V_t = 50-100 \text{ m}^3$ $V_u = [1-10[\text{ m}^3$	$V_t = 10^4 \text{ m}^3$ $V_u = \sim 10 \text{ m}^3$	$V_t = 10^6-10^7 \text{ m}^3$ $V_u > 10 \text{ m}^3$

Tableau 15 – Résumé des intensités attendues des évènements représentatifs des différents scenarii STEPRIM sur l'encaissement de la Rivière du Mât.

3.2. GLISSEMENTS DE TERRAIN

3.2.1. Inventaire évènementiel

Comme pour les chutes de blocs, l'inventaire des évènements historiques a été réalisé sur la base d'une revue bibliographique complétée par des observations de terrain. Les sources d'information utilisées sont :

- La Banque de Données des Mouvements de Terrain (BDMVT) gérée par le BRGM ;
- Les études et expertises du BRGM concernant les phénomènes de glissements de terrain (spontanés ou lents) ;
- Les données du registre des routes, tenu par le Conseil Départemental.

Les glissements de terrain dits « spontanés » sont des évènements qui se déclenchent de manière rapide et brutale. Ce type de glissement est observé sur l'ensemble du Cirque de Salazie. Toutefois, dans le cadre de cette étude, les secteurs de Grand Ilet et de Hell-Bourg/Fond de Rond-Point ont été plus particulièrement analysés car ils sont également le siège de glissements permanents de grande ampleur dans des zones urbanisées, avec des vitesses de déplacement de plusieurs dizaines de cm/an voire supérieures à 1m/an. Le secteur de Grand Ilet concentre également les phénomènes de déboulés. Ces phénomènes qui se produisent au front du glissement lent, sont des déstabilisations rapides de versants sous l'effet de l'augmentation de la charge hydrostatique liées aux circulations d'eau souterraines qui peuvent induire des reculs de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres lors des phénomènes pluvieux intenses.

a) Glissement spontanés

La Figure 23 représente la répartition de l'ensemble des évènements de glissement de terrain spontanés recensés dans le cirque à partir des bases de données disponibles avec une classification en fonction des volumes mobilisés. Ces glissements sont le plus souvent enregistrés le long des itinéraires routiers ou à proximité des zones à enjeux. Dans les secteurs moins urbanisés, des évènements similaires se produisent également mais sont moins souvent observés et donc moins bien décrits. L'emprise des sept glissements permanents est également représentée sur la figure.



Figure 23 – Répartition de l'activité glissement de terrain dans le cirque de Salazie (fond orthophoto IGN 2017). En tirets blancs sont délimités les sept glissements lents de grande ampleur connus dans le cirque.

Volumes

L'analyse statistique de ces données permet d'avoir une vision globale de la fréquence des évènements sur les différentes portions d'itinéraires et des volumes les plus souvent observés.

Un total de 277 évènements de type glissement spontané (sans les déboûlés) est recensé sur l'ensemble du Cirque. Sur ces 277 évènements, 198 d'entre eux disposent d'informations sur les volumes, soit 71.5%. Ces 198 évènements sont tous concentrés sur la période 1998 à 2018, soit une période de 21 ans. Sur cette période, les volumes glissés se répartissent selon le tableau et la figure suivants.

Période 1998-2018 (21 ans)

Volume (m ³)	Nombre d'évènement	Fréquence (Nb évènement/an)
[1-10[	69	3.29
[10-50[	87	4.14
[50-100[	12	0.57
[100-500[	24	1.14
[500-1 000[	3	0.14
[1 000-10 000[	1	0.05
[10 000-100 000[	1	0.05
[100 000 – 1.10 ⁶]	1	0.05
TOTAL	198	9.4
Volume inconnu	79	
TOTAL	277	13.2

Tableau 16 – Répartition des volumes des évènements glissements de terrain sur la période 1998-2018 dans le cirque de Salazie.

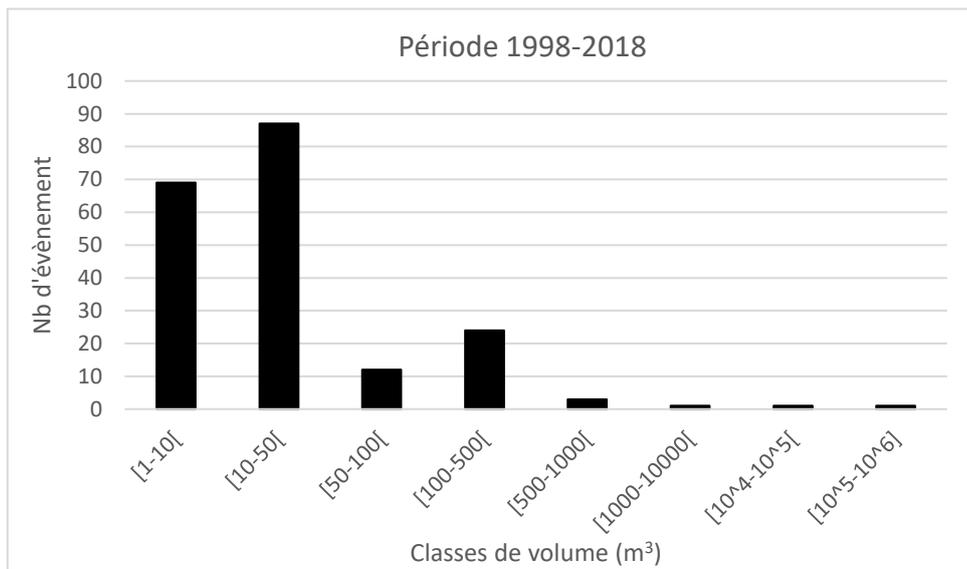


Figure 24 – Nombre de glissements de terrain « spontanés » dans le cirque de Salazie en fonction de leur volume recensés entre 1998 et 2018.

Le tableau 16 et la figure 24 montrent que les glissements recensés sont généralement de petits volumes, compris entre 1 et 50 m³ pour la plupart (79% des évènements). Il s'agit le plus souvent de déstabilisations de talus routier, se produisant à une fréquence d'environ 7 par an. Dans ces mêmes zones, quelques évènements présentent des volumes plus conséquents, compris entre 100 et 500 m³, soit environ 1 évènement par an.

Pendant cette période toutefois, plusieurs évènements majeurs ont été observés dans le cirque, en particulier au front du glissement de grande ampleur de Grand Ilet, au niveau de la Ravine Roche à Jacquot. Lors du passage du cyclone Bézisa en 2014, un glissement de terrain d'environ 18 500 m³ s'est produit au niveau de la ravine Nourry et un glissement majeur s'est produit à l'Est du plateau de Grand Ilet (Figure 25), dont le volume est estimé à environ 1 million de m³ (Le

Moigne et Rault, 2020). Il est intéressant de noter que ce glissement majeur s'est produit alors que les cumuls de pluie liés au passage du cyclone n'étaient pas exceptionnels. Ainsi, il a été enregistré « seulement » 850 mm de pluie en 2 jours sur Grand Ilet au cours de cet événement (< pluie décennale journalière), loin du record de Diwa en 2006 (1325 mm en 24h) ou des pluies de Gamède en 2007 (1111 mm en 24h), qui ont certes engendré des désordres mais pas d'ampleur comparable à ce niveau.

Il semble donc que si la pluviométrie a une incidence avérée sur l'occurrence des glissements de terrain, l'ampleur de ces événements n'est pas systématiquement corrélée à la quantité de précipitations tombées au moment où le glissement se produit.



Figure 25 – Glissement de la bordure Est du plateau de Grand Ilet lors de Bêjisa en 2014 (volume estimé 1 million de m³).

L'application d'une loi Fréquence-Volume similaire à celle réalisée pour les chutes de blocs (cf.3.1.3) donne le résultat suivant, illustré à la Figure 26:

$$F(\text{nb de glissement/an}) = 11.75 * V^{-0.52}$$

Pour rappel, le coefficient α (ici égal à 11.75) représente la fréquence cumulée des événements de volume $\geq 1\text{m}^3$.

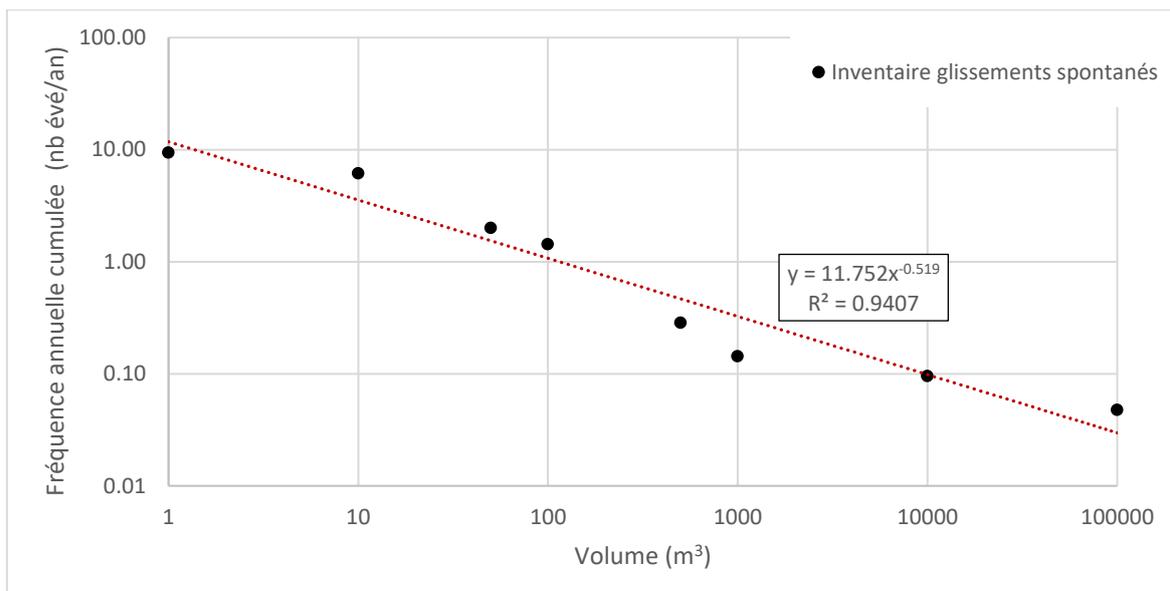


Figure 26 - Relation entre la fréquence annuelle cumulée et le volume des glissements spontanés de l'inventaire (symboles noirs) dans le cirque de Salazie et loi fréquence-volume calculée (droite tiretée rouge).

L'application d'une loi de probabilité discrète (loi de Poisson) permet, comme pour les chutes de blocs, d'estimer la probabilité qu'au moins un glissement de volume V se produise pendant une période de temps t. Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous :

	Classes de volumes (m ³) pour lesquelles une probabilité P = 1 qu'un glissement de terrain spontané se produise est calculée sur la période de temps t considérée					
	t = 1 an	t = 10 ans	t = 30 ans	t = 100 ans	t = 300 ans	t = 1000 ans
Cirque de Salazie	[1-10[	[500-1000[	[10 ³ -10 ⁴[	[10 ⁴ -10 ⁵[	[10 ⁵ -10 ⁶[	> 10 ⁶
SCENARIO STEPRIM	Fréquent		Centennal		Exceptionnel	

Tableau 17 - Classes de volumes pour lesquelles une probabilité d'occurrence égale à 1 est calculée selon différentes périodes de temps considérées.

Au vu des phénomènes historiques connus, ces résultats semblent légèrement sous-estimer les volumes attendus pour les différentes périodes de référence (exemple du glissement de 1 million de m³ lors de Béjisa qui n'a pas un caractère exceptionnel mais plutôt un caractère centennal). Tout comme pour les chutes de bloc, ces résultats sont donc à prendre avec recul et oeil critique. Ils sont une indication supplémentaire pour la définition des scenarii de référence. Ces derniers seront donc définis par la suite à travers une analyse croisée des chroniques d'évènements historiques dans le cirque de Salazie, des calculs de probabilités ci-dessus et des contextes naturels (géologique, géomorphologique, climatique...) auxquels les différents secteurs du cirque sont soumis.

Reculs

Dans Salazie, le front des ilets (qu'ils soient touchés ou non par des glissements lents de grande ampleur) est souvent le siège de déstabilisations brutales de la bordure des plateaux. Les reculs observés peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres pour un seul épisode. Parmi les reculs les plus importants recensés, on peut noter :

- Ravine Nourry (Nord de Grand Ilet) :
 - Recul de 30-40 m entre mai 2004 et mars 2005 hors épisode pluvieux,
 - Recul de 70 m lors de la tempête Diwa en 2006 (Figure 27),
 - Recul de 30 m en 2014 lors de Béjisa.
- NE du plateau de Grand Ilet, glissement de 2014 :
 - Recul de 20-30 m de la cicatrice d'arrachement du glissement en 2015,
 - Recul de 10-20 m du même secteur en 2018.
- Ilet Mathurin :
 - Recul de plus de 100 m lors de Diwa en bordure du plateau.
- Ilet à Vidot :
 - Recul de 200 m de la bordure du plateau depuis 60 ans, principalement lors de Hyacinthe en 1980 puis lors de Gamède en 2007 (Figure 28).
- Plateau Artimidor (flanc sud de Mare à Citrons) :
 - Recul de 20 m de la bordure du plateau et apparition de zones d'érosion en pied de plateau entre 1997 et 2008 (Figure 29). Cette zone n'est pas le siège de mouvements lents de grande ampleur.

D'après les données disponibles, **aucune corrélation claire entre quantité de pluie et ampleur du recul n'a pu être mise en évidence**. Par ailleurs, le peu d'informations connues sur les reculs ne permet pas à l'heure actuelle sur Salazie de les intégrer dans l'analyse statistique des glissements.

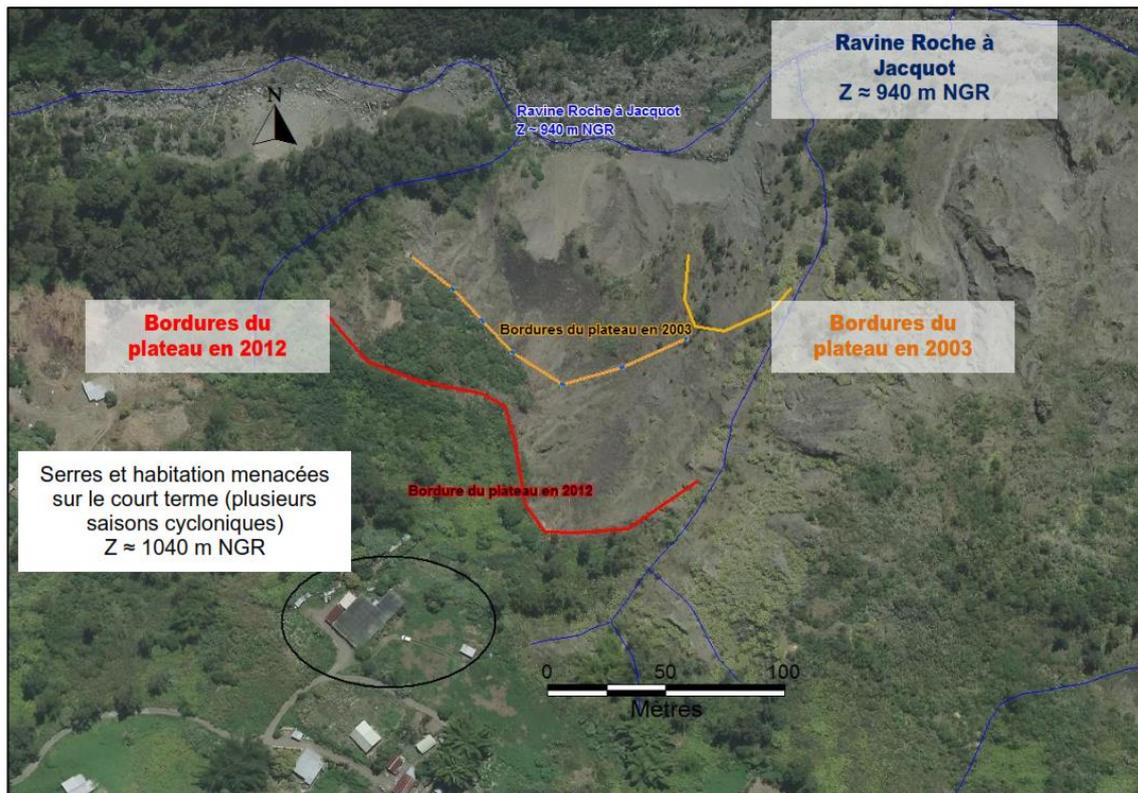


Figure 27 – Recul observé entre 2003 et 2012 au niveau de la ravine Nourry, en bordure Nord du plateau de Grand Ilet et principalement lié au passage du Diwa en 2006 (Aunay et al., 2015).



Figure 28 – Erosion régressive en bordure du plateau d'Ilet à Vidot suite à Gamède.

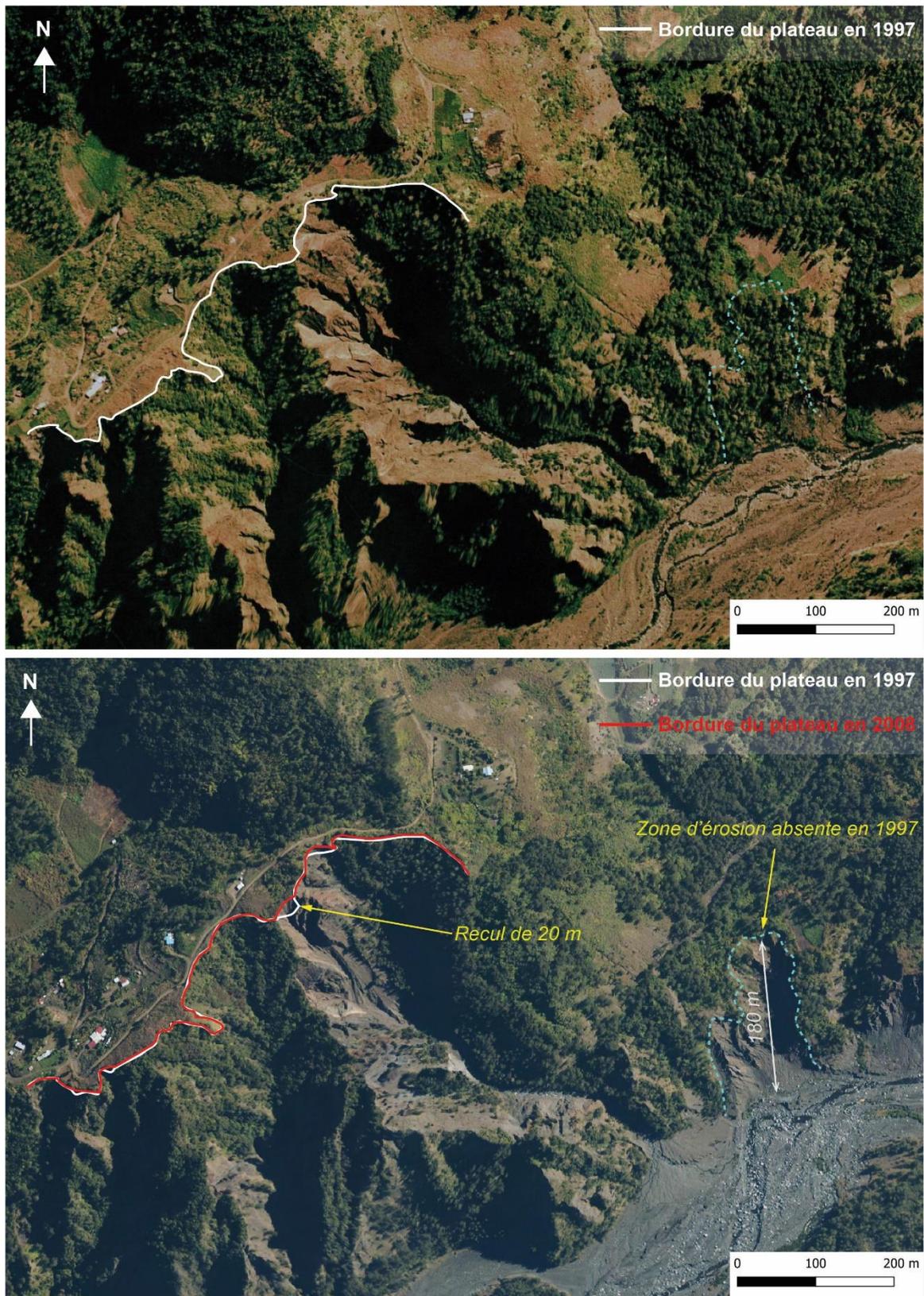


Figure 29 – Comparaison des orthophotos de 1997 (en haut) et 2008 (en bas) sur le secteur de plateau Artimidor (flanc sud de Mare à Citrons) en rive gauche de la rivière du Mât, montrant les phénomènes d'érosion et de recul.

Le cas des déboûlés

Ces phénomènes peuvent être associées à des phénomènes de glissement catastrophique (de manière simplifiée), même si le mécanisme de rupture à l'origine de leur déclenchement, aujourd'hui mal connu, s'apparente plus à des phénomènes de boulangce. Plusieurs phénomènes de déboûlés ont été observés au front du glissement de Grand Ilet, en particulier lors du cyclone Hyacinthe en 1980. Ce phénomène est la conséquence d'une forte infiltration d'eau dans les terrains, qui génère une hausse de pression interstitielle dans les sols lors d'épisodes pluvieux intenses. Cette mise en charge induit au point de résurgence des débits importants qui favorisent le déclenchement de déstabilisations gravitaires locales et des phénomènes d'érosion intense à l'origine de la création de nouvelles ravines. Le rôle des dépressions fermées (mares sèches), présentes en nombre sur le plateau de Grand Ilet est également mis en avant dans le déclenchement de ce type d'instabilité. Lors des grands événements pluvieux, les mares peuvent se remplir (c'était le cas lors de Hyacinthe) et constituer des zones d'infiltrations préférentielles où la pression interstitielle est particulièrement élevée.

Ces déstabilisations peuvent impliquer des volumes importants de matériaux dans des contextes de brèches peu indurées, sensibles à l'érosion.

Trois déboûlés se seraient produits lors du cyclone Hyacinthe, avec des volumes mobilisés compris entre 0.5 et 1 million de m³ (Figure 30):

- Le déboûlé de la Ravine de l'Eglise qui a pris naissance à quelques dizaines de mètres des premières habitations en limite nord-est du plateau. La niche d'arrachement s'est développée sur 150 m de large et 40 m de haut et le phénomène s'est propagé jusqu'au fond de la ravine Roche à Jacquot, créant une « ravine » de plusieurs mètres de profondeur. Le recul engendré par cet événement approche les 400 m ;
- Le déboûlé « Est » qui a pris naissance en bordure de plateau. La niche d'arrachement s'étend sur 300 m de long environ pour une hauteur proche de 50 m. Le glissement aurait ensuite évolué en coulée de boue jusqu'au lieu-dit Roche Plate, en amont de la rivière Fleurs Jaunes, où elle a enseveli une famille de 10 personnes. Le recul observé est de plusieurs dizaines de mètres ;
- Le déboûlé « Sud », lui aussi apparu en bordure de plateau vers 1150 m d'altitude. Il s'est propagé jusque dans la ravine Camp Pierrot. Le recul observé est de quelques dizaines de mètres.

Ces événements se sont produits dans un contexte climatique extrême, marqué à la fois par l'importance des cumuls pluviométriques et par la durée de l'influence du cyclone sur La Réunion. Ainsi, il a été enregistré un cumul de 5240 mm en 13 jours sur Grand Ilet, avec un maximum journalier de 1044 mm, supérieur à la pluie journalière décennale.

L'apparition des déboûlés a été décrite lors du cyclone Hyacinthe par Pinchinot (1984). Les seuils de pluie enregistrés lors de cet événement n'ont jamais été atteints à nouveau. Un phénomène de déboûlé aurait été observé lors du cyclone Bèjisa en 2014 dans le secteur de Grand Ilet. Toutefois, le manque de connaissances sur les mécanismes à l'œuvre dans l'apparition de ces phénomènes ne permet pas à l'heure actuelle d'avoir une vision exhaustive de ce type d'évènement.

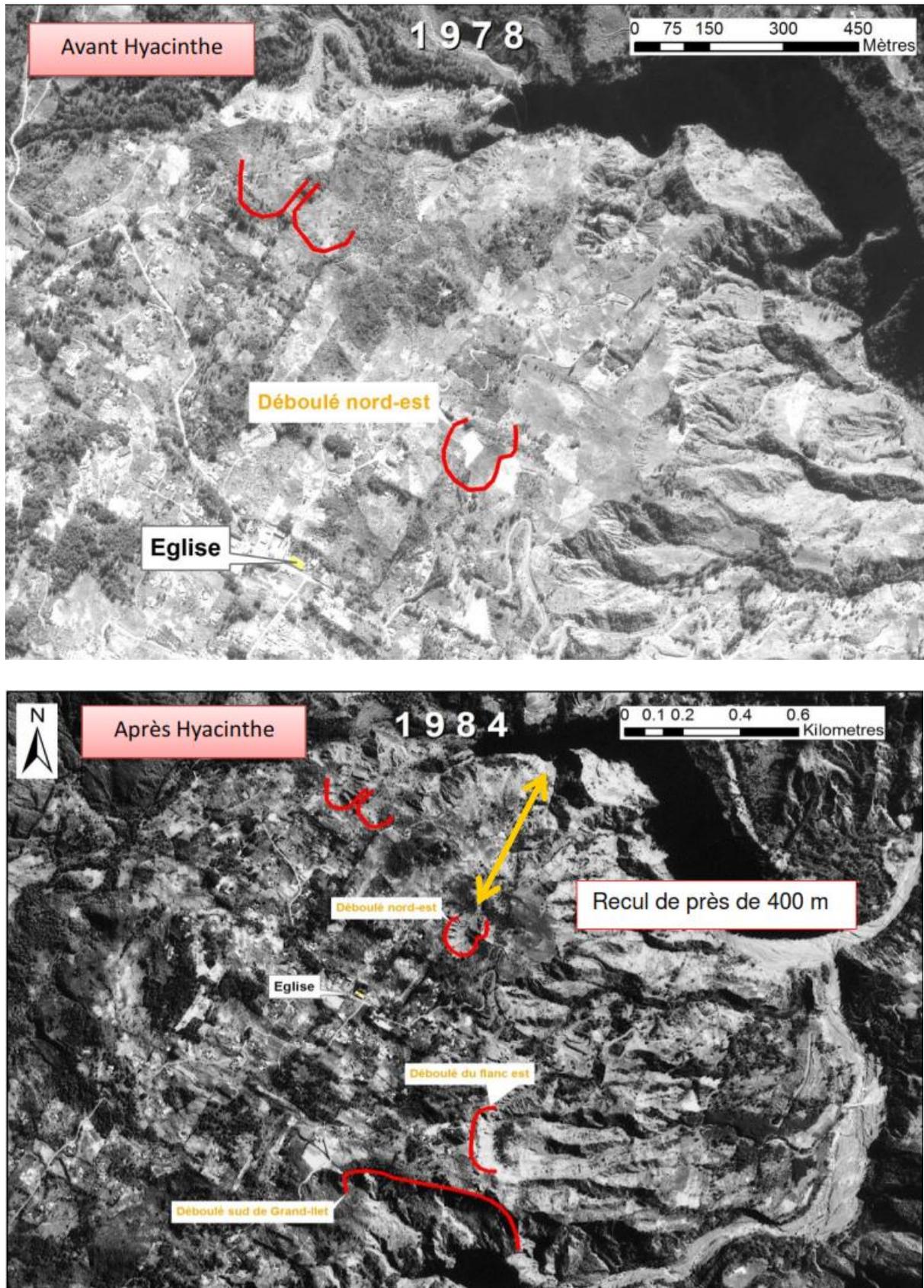


Figure 30 – Photos aériennes du plateau de Grand Ilet avant et après le passage de Hyacinthe et montrant les reculs associés aux phénomènes de déboulés (d'après Aunay et al., 2015).

b) Glissements de grande ampleur

Dans le cirque de Salazie, sept glissements de grande ampleur sont identifiés. Il s'agit de glissements profonds, lents et permanents, dont la vitesse varie principalement selon l'intensité pluviométrique et l'état de saturation des formations mobilisées sur l'épaisseur des glissements actifs. Les secteurs concernés par ces mouvements sont :

- Grand Ilet et Fond de Rond-Point pour les 2 principaux glissements de grande ampleur ;
- Mare à Goyaves ;
- Ilet à Vidot ;
- Le Bélier ;
- Camp Pierrot ;
- Mathurin.

Ces glissements de grande ampleur mobilisent des volumes considérables de matériaux (plusieurs millions à centaines de millions de m³). Dans l'état actuel des connaissances, ils ne présenteraient pas de risque d'emballement catastrophique à court ou moyen terme, hormis pour le glissement de Mare à Goyaves pour lequel ce risque n'est pas totalement exclu.

L'installation et le suivi de bornes géodésiques entre 2003 et 2018 a permis de mesurer les déplacements horizontaux et verticaux au niveau de ces glissements et de confirmer l'absence de déplacement en dehors des zones de glissement permanent identifiées.

La figure 31 ci-dessous représente les vitesses annuelles de déplacement horizontal des principaux glissements entre 2003 et 2018. Le glissement de Fond de Rond-Point enregistre des déplacements annuels les plus importants, avec des vitesses horizontales au front supérieures à 1m/an (vitesse maximale 1.14 m/an). Le glissement de Grand Ilet enregistre quant à lui des vitesses de déplacement horizontales de 60 cm/an au niveau de la ravine Roche à Jacquot.

Sur l'ensemble des glissements, la vitesse de déplacement tend logiquement à augmenter de l'arrière vers le front du glissement. Le tableau 18 résume les principales caractéristiques des glissements de grande ampleur du cirque.

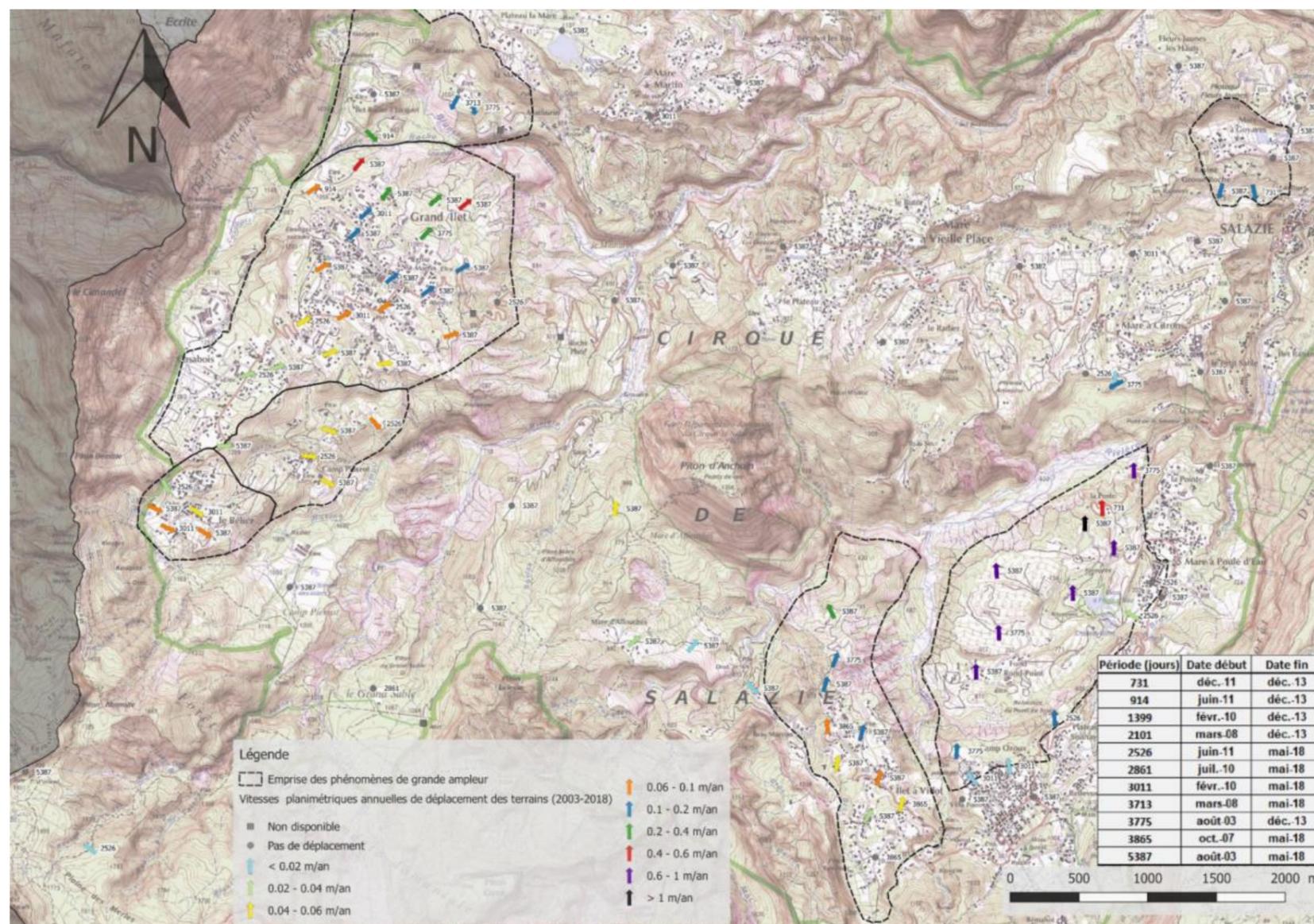


Figure 31 – Vitesses annuelles de déplacement planimétrique des différents glissements de grande ampleur du cirques de Salazie entre 2003 et 2018 (rapport RP-68284-FR, Cance et Rey, 2018).

	Emprise (ha)	Volume estimé (Mm ³)	Orientation	Vitesse horiz min-max (cm/an)	Tassement min-max (cm/an)	Tendance entre les périodes 2003-2013 et 2013-2018
Grand Ilet	250	215	Nord-Est	2-60	1-14	Ralentissement au N et E (-2.9 cm/an au max), accélération au NE (+6.8 cm/an au max)
Fond de Rond-Point	210	225	Nord	2-114	2-51	Ralentissement au front (-28 cm/an au max), accélération au Belvédère Point du Jour (+8.7 cm/an au max)
Ilet à Vidot	230	87	NNE&SSW	5-16	5-20	Accélération au front (+14.8 cm au max)
Mathurin	100-125	?	SSW	0-40	-	Pas d'évolution notable
Mare à Goyaves	40-50	?	Sud	0-20	4-4	Légère accélération (+5.8 cm/an au max)
Le Bélier	45-55	?	Sud-Est	2-10	1-3	Très légère accélération (+1.6 cm/an au max)
Camp Pierrot	70-85	?	Sud-Est	4-10	1-1	Pas d'évolution notable

Tableau 18 – Caractéristiques principales des glissements de grande ampleur du cirque de Salazie et déplacements sur la période 2013-2018 (d'après Rault et al., 2021 et Cance et Rey, 2018).

D'après le travail de thèse de P. Belle (2014), il apparait qu'un cumul pluviométrique supérieur à 600 mm sur plusieurs jours consécutifs engendre une accélération du glissement de grande ampleur de Grand Ilet. Des valeurs similaires sont observées pour le glissement de Mathurin (450-650 mm), une valeur de 700mm (sur 10 jours consécutifs) est considérée pour Ilet à Vidot (Figure 32) et de 650-800 mm pour Mare à Goyaves. Un seuil pluviométrique de 600-800 mm/jour est donc actuellement considéré pour l'accélération des glissements de grande ampleur.

Le seuil de 600 mm de pluie en 1 jour est dépassé en moyenne une fois chaque année à Salazie et le seuil de 800 mm de pluie quotidienne est dépassé en moyenne tous les 2 à 5 ans. Ce type d'évènement est donc fréquent voire récurrent.

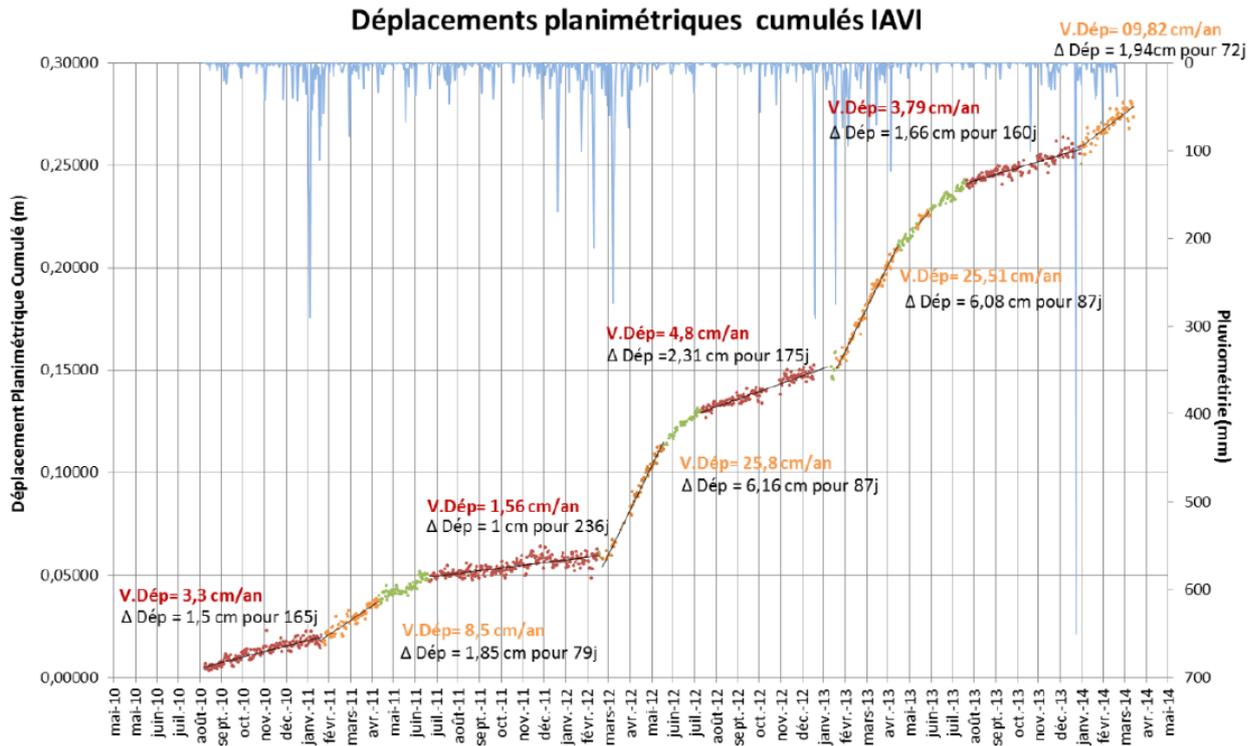


Figure 32 – Déplacement horizontaux cumulés sur le glissement d'Ilet à Vidot entre mai 2010 et mai 2014 montrant l'accélération des vitesses de déplacement corrélée la pluviométrie (Belle, 2014).

Les glissements de grande ampleur de Grand Ilet et Fond de Rond-Point (anciennement Hell-Bourg) sont les deux principaux glissements lents du cirque de Salazie. Ils font l'objet d'un suivi depuis de nombreuses années, notamment dans le cadre des programmes de recherche MvTerre 1 et 2 et RenovRisk-Erosion. Les résultats de ces travaux de recherche ont fait l'objet de plusieurs rapports (Garnier, 2008 ; Garnier et Lucas, 2008 ; Belanger et Aunay, 2008 ; Mazué et al., 2013, Cance et Rey, 2018...) ainsi que d'une thèse (P. Belle, 2014). De nouvelles données sont actuellement en cours d'acquisition, notamment sur la typologie, la dynamique et l'organisation morpho-structurale des glissements de Salazie et permettront à court terme d'améliorer encore les connaissances sur ces phénomènes.

Glissement de Grand Ilet (zone pilote)

La dynamique et de l'organisation spatiale du glissement de Grand Ilet ont fait l'objet de nombreuses études depuis 2008 (Garnier, 2008, Mazué et al., 2013, Belle, 2014, Rey et Cance, 2018, Rault et al., 2021). Nous reprenons ici les éléments principaux de ces travaux.

Sur Grand Ilet, le glissement présente un mouvement général orienté vers le **nord-est**. La zone en mouvement est constituée de **trois panneaux** principaux évoluant différemment, de dimension hectométrique et séparés par des escarpements plus ou moins identifiables dans la topographie (Figures 33 et 34):

- Le panneau le plus *actif* se situe au front du glissement, avec une vitesse moyenne planimétrique de **30 à 55 cm/an**. La cicatrice d'arrachement marquant la limite amont du panneau frontal est calée sensiblement à la même altitude que celle du déboulé nord-est. Ce panneau est affecté par des phénomènes importants d'érosion régressive, avec des reculs de plusieurs dizaines voire centaines de mètres ;
- Le panneau « *central* », sur lequel se trouve le centre du village de Grand Ilet, évolue à des vitesses moyennes de **15 à 30 cm/an** ;
- Enfin le panneau *arrière*, dont la niche d'arrachement sommitale marque l'arrivée sur le plateau de Casabois, enregistre des vitesses de déplacement planimétriques comprises entre **12 cm/an à l'aval et 4 cm/an à l'amont**.

En amont de ces trois panneaux, l'orientation du vecteur déplacement et les valeurs de déplacement vertical (tassement entre 10 et 20 cm/an) incitent à rattacher le plateau de Casabois au phénomène général de Grand Ilet, bien que l'activité y soit moins importante (déplacement planimétriques peu significatifs).

D'après les études les plus récentes (Rault et al., 2021 – Figure 35), le glissement de Grand Ilet concernerait une surface de **2.5 km²** environ (2 km de long et 1.8 km de large). Le glissement serait délimité par le rempart du Cimendef à l'ouest et par celui de la ravine Roche à Jacquot au nord. A l'est, il se propage jusqu'au premier tiers du versant plongeant vers la rivière Fleurs Jaunes, et atteint la bordure du plateau de Casabois au sud.

La surface de glissement se situerait à 150 m de profondeur à l'amont et 50 m de profondeur au pied du glissement, avec un pendage estimé à environ 10°-15° (Figure 35).

La masse en mouvement représenterait alors un volume estimatif de l'ordre de **215 millions de m³**.

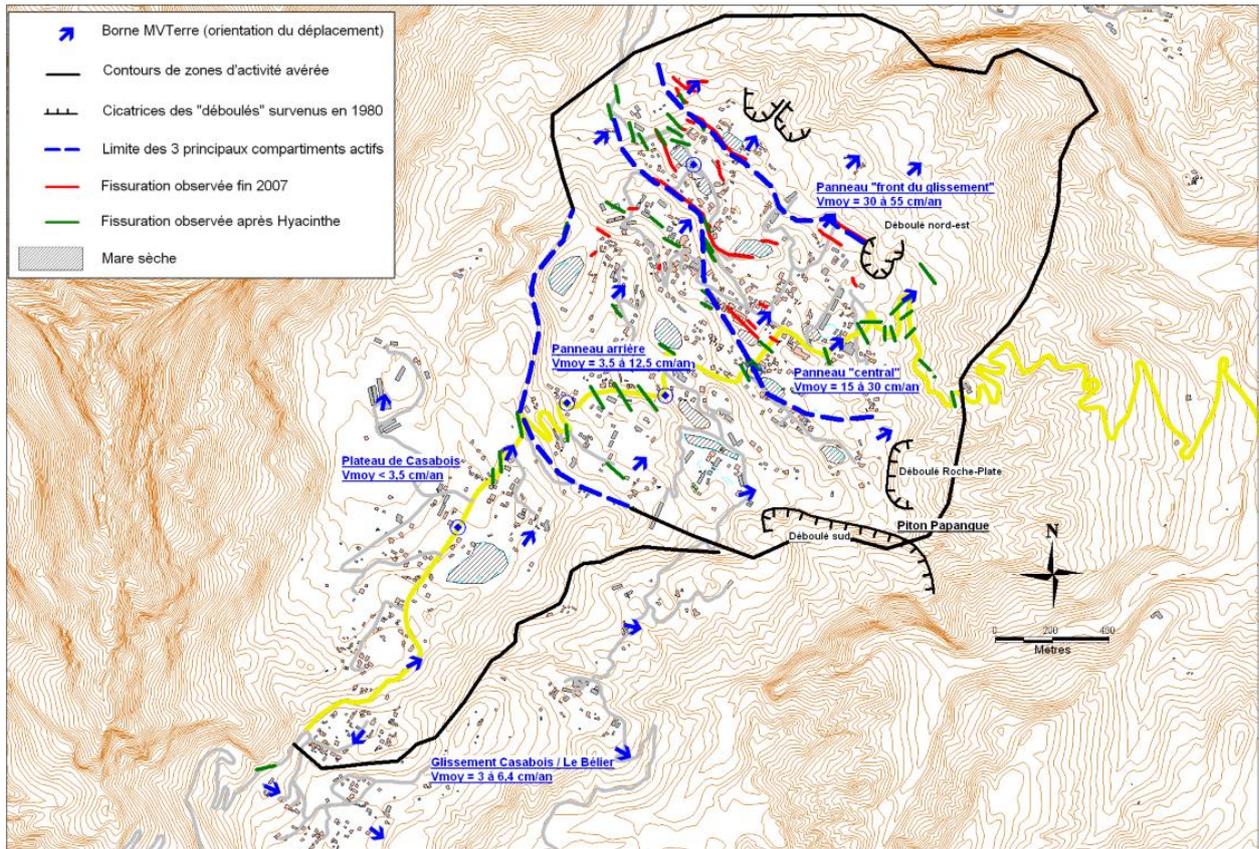


Figure 33 – Indices d'activité anciens et actuels sur le plateau de Grand Ilet et vitesses de déplacement sur la période 2003-2008 (Garnier, 2008).

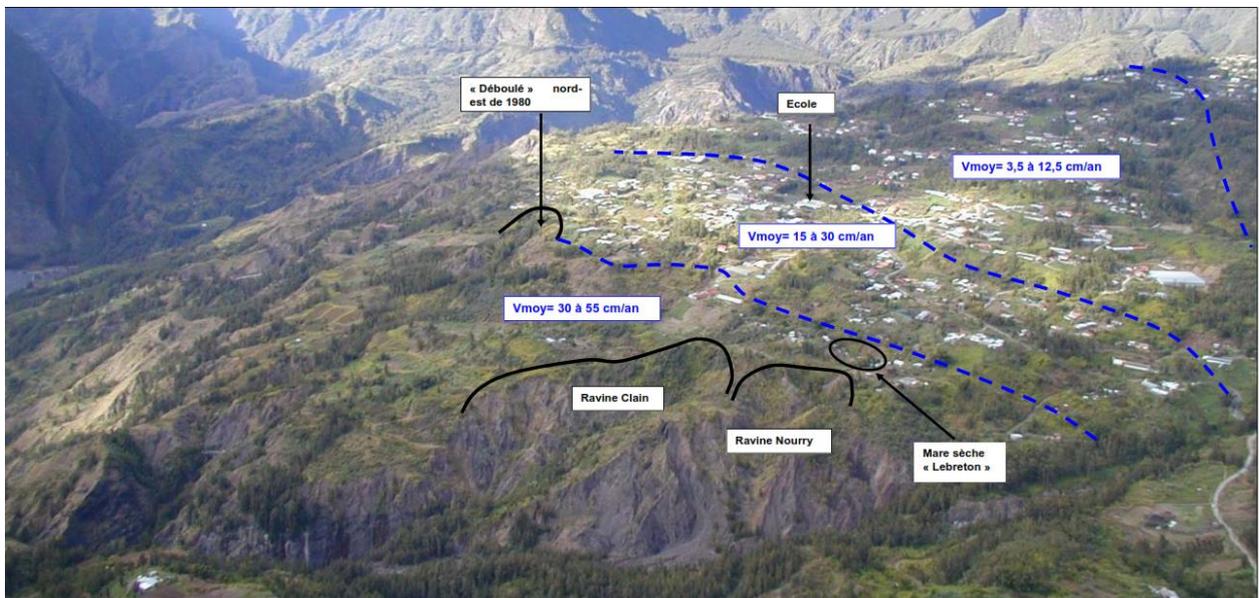
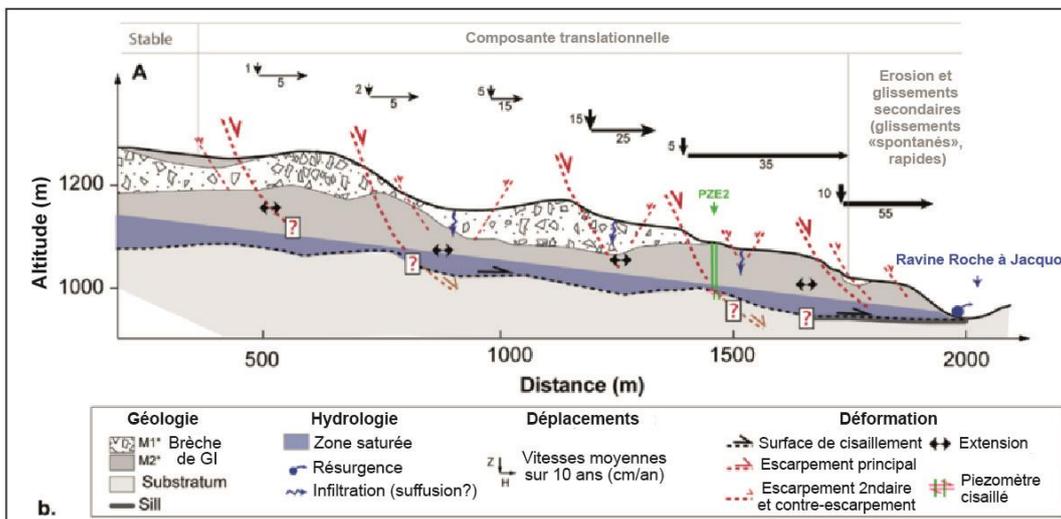
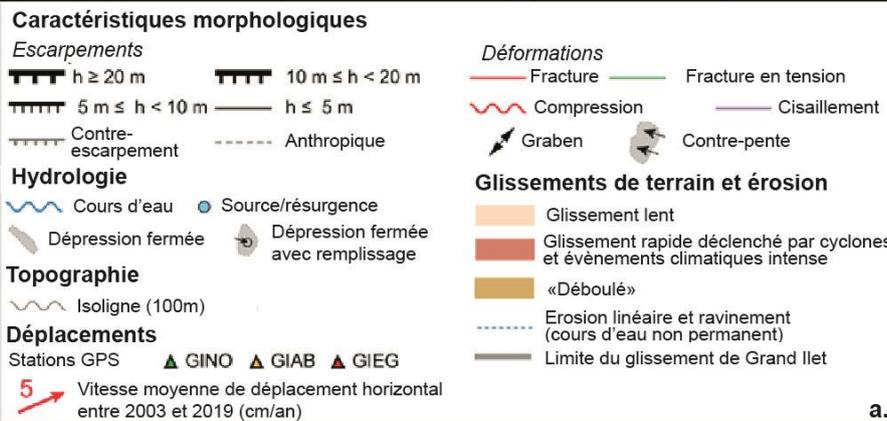
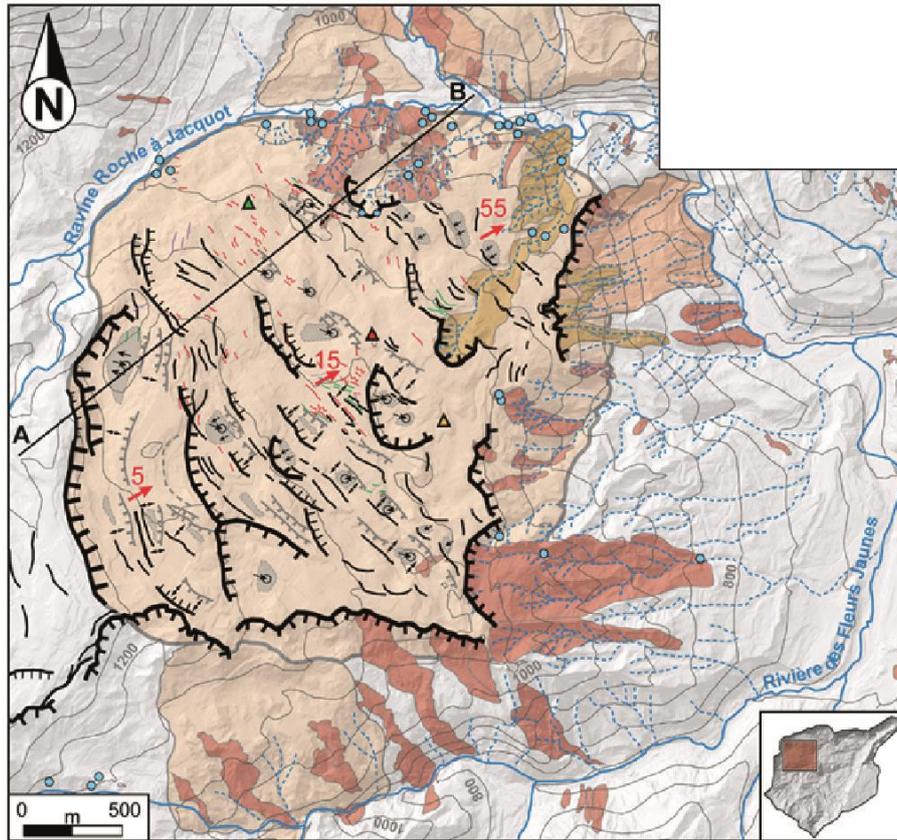


Figure 34 – Vue aérienne du glissement de Grand Ilet et des différents compartiments qui le compose (Garnier, 2008)

Le glissement de Grand Ilet montre une grande hétérogénéité spatiale des déplacements, mais également une hétérogénéité temporelle (activation ou accélération brutale de secteurs précédemment peu affectés), qui rend particulièrement complexe l'analyse de l'aléa dans ce secteur. Les travaux récents menés dans le cadre du programme de recherche Renovrisk-

Erosion ont permis de préciser la morphologie de surface du glissement de Grand Ilet et sa structure interne. Les dépressions fermées, sources, structures de déformation et grands escarpements ont été précisément répertoriés. Les secteurs affectés par le glissement lent, par les phénomènes de glissements spontanés et de déboulés ont été cartographiés (Rault et al., 2021, in prep) et sont représentés sur la figure de synthèse ci-dessous (Figure 35).

Figure 35 (page suivante) – a. Morphologie du glissement de Grand Ilet. La ligne A-B localise la coupe présentée en b. b. Coupe interprétative de la structure interne du glissement de Grand Ilet le long du profil A-B. (modifié d'après Rault et al., 2021).



Glissement de Hell-Bourg/Fond de Rond-Point

Le glissement d'Hell-Bourg/Fond de Rond-Point couvre une surface estimée à **2.1 km²** (2 km de long et 1.5 km de large). La pente moyenne de la masse en mouvement est de 15° environ.

Le suivi de bornes géodésiques a montré un mouvement d'ensemble orienté selon une direction générale vers le Nord (Figures 36 et 37). Les vitesses horizontales varient entre :

- **40 cm/an** au Sud (tête du glissement) ;
- et **114 cm/an** au Nord, à proximité du pied du glissement en rive droite de la Rivière du Mât (les déplacements ont pu atteindre 170 cm/an entre 2003 et 2008).

Une augmentation de 8 cm/an est à noter au niveau du Belvédère du Point du Jour, en bordure de la RD48 depuis quelques années. Ce relief constitue la bordure arrière du glissement, dont le déplacement est une réaction du mouvement au front. A ce niveau, les vitesses verticales (tassement) ont, elles-aussi augmenté. Une vitesse annuelle de tassement de **51 cm/an** entre 2013 et 2018 est enregistrée, soit un décrochement de plus de 2 m sur cette période (vitesse maximale enregistrée dans le cirque). Cela représente une augmentation de près de 30 cm/an par rapport à la période 2003-2013 et traduit un décrochement progressif et significatif d'un panneau visible en surface, en bordure du glissement actif. Une augmentation des tassements est également observée au niveau de la bordure ouest du plateau de Mare à Poule d'Eau où les vitesses ont augmenté par rapport à 2003-2013, pour atteindre désormais 3 à 6 cm/an.

Ces données traduisent une réaction de la partie arrière du glissement au déplacement rapide du front. Une évolution catastrophique avec un décrochement brutal, notamment au niveau du Belvédère du Point du Jour n'est pas exclu à très court terme, avec le cas échéant des dégâts sur les bâtis et les infrastructures.

Les villages d'Hell-Bourg et de Mare à Poule d'Eau ne sont pas directement impactés par le phénomène (vitesses de déplacement de l'ordre de 1.5 cm/an, peu significatives). Sur Hell-Bourg, les mouvements n'affectent que la bordure Nord du plateau, sur une largeur de 50 à 70 m, avec des vitesses planimétriques moyennes de 12 cm/an sur la période 2003-2008. Sur Mare à Poule d'Eau, seuls l'ancienne école et le lotissement des Bambous en limite sud du village sont affectés par des mouvements, interprétés comme des phénomènes de décompression en arrière de la bordure du plateau.

Le phénomène semble étroitement lié au contexte géologique et structural. La base du glissement repose sur des Brèches Noires, matériaux fortement altérés représentant une surface de décollement privilégiée, tandis que la limite amont du glissement correspond à un accident tectonique qui a vraisemblablement joué un rôle prépondérant dans l'initiation du phénomène.

Tout comme pour Grand Ilet, la géomorphologie et la dynamique du glissement de Hell-Bourg ont été précisés récemment (Rault et al., 2021). Le glissement serait découpé en deux compartiments principaux, l'un situé à l'ouest, l'autre à l'est. Le compartiment Est (secteur Mare à Poule d'Eau) se déplaçant plus rapidement que le compartiment Ouest, une importante zone de cisaillement est suspectée à l'interface de ces deux secteurs et concentre les déformations. La partie Nord du compartiment Est est la plus active (déplacements > 1m/an) et est le siège des plus importants désordres observés sur les infrastructures.

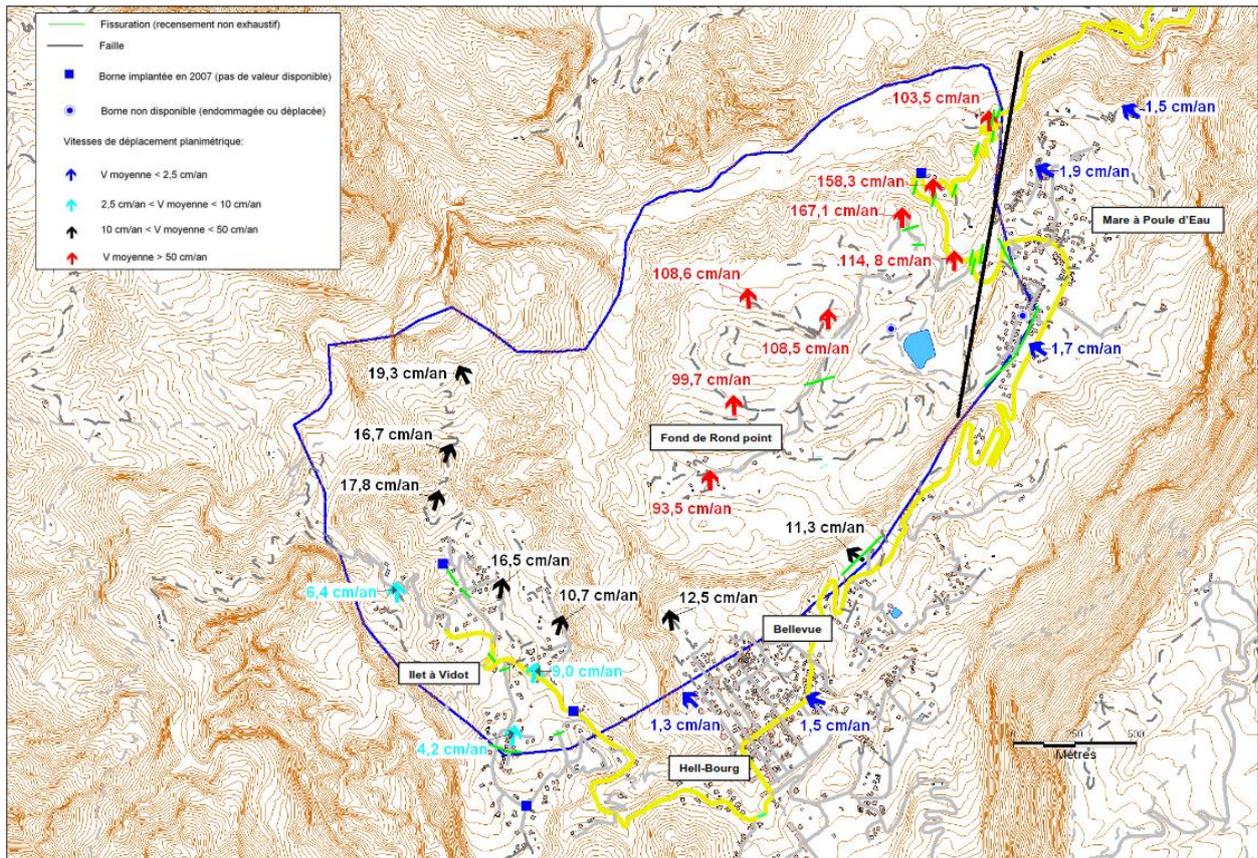
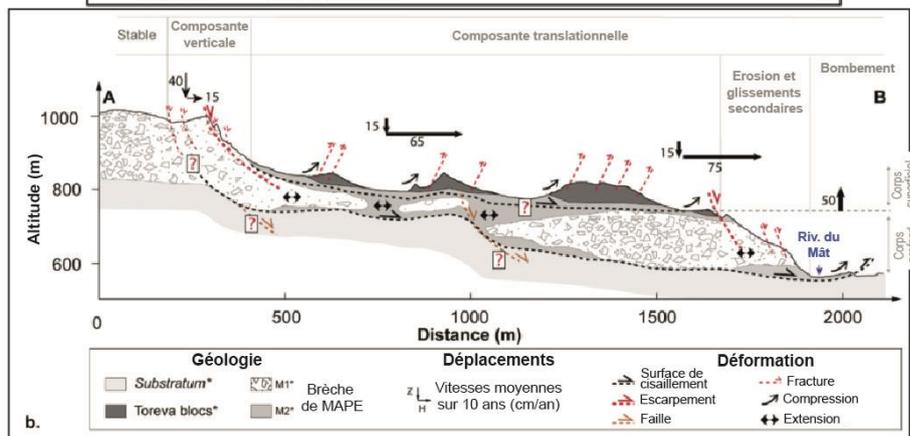
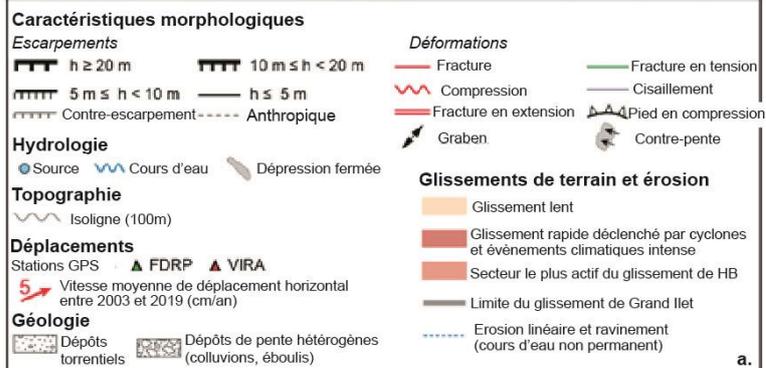
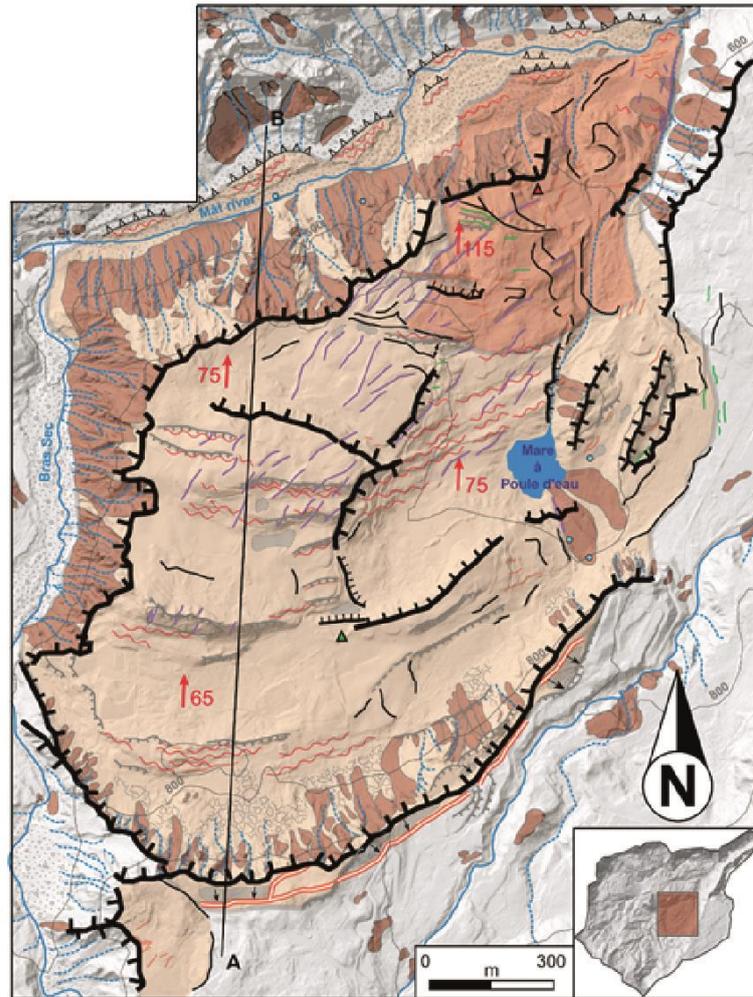


Figure 36 – Déplacements annuels moyens planimétriques sur la période 2003-2008 sur le glissement d'Hell-Bourg (Garnier et Lucas, 2008).

Figure 37 (page suivante) - a. Morphologie et structure de surface du glissement de Hell-Bourg/Fond de Rond Point. La ligne A-B localise la coupe présentée en b. b. Coupe interprétative de la structure interne du glissement de Hell-Bourg le long du profil A-B (modifié d'après Rault et al., 2021).



3.2.2. Désordres observés au droit des glissements lents

Les phénomènes de grande ampleur dans le cirque de Salazie affectent de manière très hétérogènes les terrains en surface. Ils ont des incidences importantes sur les réseaux routiers et sur le bâti présent dans leur emprise et engendrent de nombreux désordres, pouvant menacer directement la population.

Les principaux désordres observés sont :

- Apparition et/ou ouverture de fissures au sol, dans les ouvrages, dans les bâtis et les routes traversant les différents compartiments des glissements (Figure 38 et 39) ;
- Déformation voire décrochement dans les terrains : tassements, formation de contre pentes, d'escarpements, voire surélévation de compartiments par endroits (Figure 40). Ces mouvements induits en profondeur par le mécanisme de glissement peuvent générer la formation de dépressions fermées en surface (mares sèches).

Les désordres les plus importants apparaissent **principalement à la limite entre les différents compartiments composant les glissements où des mouvements différentiels apparaissent**. Toutefois, à l'heure actuelle, il n'existe pas de base de donnée exploitable recensant et localisant de manière fine et exhaustive l'ensemble des désordres apparus au droit des glissements.





Figure 38 – Exemples de désordres au bâti observés sur le plateau de Grand Ilet (en haut, école ; en bas, ancienne Poste – Garnier, 2008)



Figure 39 – Désordres sur le bâti d'une habitation située dans l'emprise du glissement de Mare à Goyaves



Figure 40 – Impact du glissement de Fond de Rond Point sur les terrains au niveau de Mare à Poule d'Eau, avec un déplacement de 15 à 20 m en 10 ans sur ce secteur.

3.2.3. Définition des intensités attendues pour les différentes périodes de références (logique STEPRIM) pour les différents types de glissement

Dans le Cirque de Salazie, les phénomènes de glissement de terrain sont complexes et prennent diverses formes pouvant se cumuler au cours d'un même évènement : érosion régressive/glissements de terrain spontané, déboisé, glissement de grande ampleur.... L'accélération des glissements de grande ampleur et l'occurrence de glissements de terrain spontanés ou des phénomènes d'érosion régressive sont le plus souvent en lien avec des épisodes pluvieux notables (bien que des reculs aient été observés hors période pluvieuse), qui se produisent généralement sur plusieurs jours consécutifs.

A partir des différentes observations disponibles pour les glissements de terrain, pour la définition des évènements de référence selon les différents scénarii STEPRIM, il est choisi des approches différentes selon le type de phénomène redouté :

- D'une part, de distinguer les phénomènes de glissement de grande ampleur des glissements de terrain plus « classiques », spontanés ;
- D'autre part, d'établir les évènements de référence pour chaque phénomène à partir des observations issues des données historiques (volumes, reculs...) et, pour les glissements lents, des données historiques et climatiques (seuils de pluie).

Au sein des glissements spontanés, on choisit de regrouper les phénomènes de glissements rapides, d'érosion régressive et de « déboûlés ». L'évolution des glissements de grande ampleur pour les différents scénarii est évaluée à partir des vitesses de déplacement (horizontal et vertical) et des désordres pouvant être engendrés, en fonction des cumuls de pluie. Pour les glissements spontanés, la probabilité d'occurrence est plus difficile à déterminer que pour les chutes de blocs. Elle est analysée à partir de paramètres tels que la géologie/lithologie, la topographie et la présence de facteurs aggravants éventuels (cf. chapitre 4.2). Ainsi, les volumes des événements de référence définis ci-dessous seront appliqués aux secteurs où l'occurrence de ces phénomènes est jugée possible au sein de la zone d'étude.

A l'échelle de la période d'observation, le secteur de Grand Ilet semble concerné par des phénomènes d'ampleur plus importante que sur le reste du cirque (glissements de terrain récurrents au front du glissement lent, déboûlés...). Ceci pourrait être rattaché à une pluviométrie pouvant être bien plus conséquente dans ce secteur en comparaison du reste du cirque (pluie décennale largement supérieure). Ainsi, pour le scénario fréquent, il est proposé de distinguer le plateau de Grand Ilet au sens large (incluant Grand Ilet, Casabois, Camp Pierrot, Le Bélier) du reste du cirque. Pour les autres scénarii, il est considéré que l'ensemble du cirque peut être concerné par des mouvements d'ampleur centennale ou exceptionnelle.

a) **Scénario fréquent (10-30 ans)**

Glissements spontanés

Nous avons vu que pour l'ensemble du cirque, d'après les données disponibles, les volumes glissés les plus fréquents se situaient autour de 10-50 m³ (cf. Tableau 16), avec au moins un événement par an de volume compris entre 100 et 500 m³. Toutefois, ces événements sont principalement des phénomènes au droit des talus routiers et des escarpements et ne sont pas forcément représentatifs des phénomènes à l'échelle du cirque. Par exemple, sur la période de 21 ans, **à Grand Ilet, des glissements de plusieurs milliers de m³ voire de quelques dizaines de milliers de m³ se sont produits à quelques reprises, associés à des reculs de plusieurs dizaines de mètres et jusqu'à 100 m.** Dans l'ensemble, les bordures des îlets de Salazie⁹, lorsque ceux-ci sont constitués de matériaux remaniés (brèches), sont particulièrement sensibles aux phénomènes d'érosion régressive et de glissement (formations en bad lands), que ces secteurs soient affectés ou non par des glissements lents de grande ampleur. Ces phénomènes ne sont pas systématiquement recensés dans les bases de données historiques et/ou leur volume n'est pas forcément estimé. Néanmoins, ces phénomènes sont visibles et se produisent de manière récurrente, notamment lors des phénomènes cycloniques. Les reculs observés sont de l'ordre de 20-30 m jusqu'à 50-70 m par événement. Ainsi, pour les glissements spontanés, il semble pertinent d'envisager des événements avec les ordres de grandeur suivants pour le scénario fréquent :

- **Bordure des principaux îlets (au droit de la rupture de pente):**
 - o Plateau de Grand Ilet : événement de l'ordre de 15 à 20 000 m³, de type Ravine Nourry lors de Béjisa – recul compris entre plusieurs dizaines de mètres et 100 m ;
 - o Autres îlets: événement de l'ordre de 5 à 10 000 m³ - recul compris entre quelques dizaines de mètres et 50-70 m.

- **Autres secteurs (où l'occurrence de glissements spontanés sera jugée possible, notamment talus routiers, escarpements topographiques jusqu'à 20-25 de haut) :**

⁹ Par bordure des îlets, est entendue la zone de rupture de pente entre le plateau (zone de moindre pente) et le versant abrupt menant à la ravine à l'aval.

Evènement de l'ordre du millier de m³ – recul compris entre quelques mètres et 10-15 mètres.

Glissements de grande ampleur

Pour les glissements de grande ampleur, le scénario fréquent correspondrait à une **accélération du glissement** telle qu'observée lors de l'apparition d'une pluie décennale sur un ou plusieurs jours, soit un ordre de grandeur considéré à partir des données pluviométriques disponibles de **600-800 mm**, engendrant des désordres couramment observés au droit des glissements : tassements, fissurations, déformations...L'analyse détaillée des variations de vitesses planimétriques au droit des 7 glissements de grande ampleur permettra de quantifier les valeurs d'accélération à prendre en compte pour qualifier le paramètre d'intensité de ce scénario.

b) Scénario centennal

Glissements spontanés

Pour le scénario centennal, il est possible de considérer un évènement de volume important, à l'image du glissement qui s'est produit en bordure Est du plateau de Grand Ilet suite au passage de Béjisa ou des phénomènes de déboulés qui ont eu lieu lors de Hyacinthe. Le glissement à l'Est de Grand Ilet lors de Béjisa, bien qu'il n'a engendré que très peu de dégâts, est considéré comme un évènement majeur, de période de retour supérieure au décennal et qui a mobilisé un volume d'environ 1 million de m³ de matériaux, sur une emprise de 250 x 300 m. Les volumes mobilisés lors des déboulés du cyclone Hyacinthe sont estimés à 0.5-1 million de m³, avec des reculs observés de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres. Ces évènements sont généralement considérés comme **d'intensité forte à majeure, cohérente avec un scénario centennal**.

Ainsi, pour les glissements spontanés, des évènements de l'ordre de 1 à 10 millions de m³ peuvent être considérés pour le scénario centennal, ces évènements se produisant au sein de matériaux bréchiés plus ou moins consolidés, **essentiellement au front des principaux ilets du cirque** (concernés ou non par des glissements de grande ampleur). Les reculs envisagés pour ce type de phénomène sont de l'ordre de la centaine à quelques centaines de mètres.

Glissements de grande ampleur

Pour les glissements de grande ampleur, le scénario centennal correspondrait à une accélération du glissement suite à une pluie centennale sur un ou plusieurs jours, soit un ordre de grandeur considéré à partir des données pluviométriques disponibles de **1000-1600 mm**, à l'origine de l'apparition de désordres majeurs au front et au sein de l'emprise du glissement (déformations, ouverture de fissures, tassements, dégâts sur les infrastructures...). L'analyse détaillée des variations de vitesses planimétriques au droit des 7 glissements de grande ampleur permettra de quantifier les valeurs d'accélération à prendre en compte pour qualifier le paramètre d'intensité de ce scénario.

c) Scénario exceptionnel

Qu'il s'agisse de glissement spontané ou des glissements de grande ampleur, le scénario exceptionnel correspondrait à la déstabilisation générale des terrains au droit des ilets, par rupture brutale de la surface de glissement et/ou de limites structurales préexistantes. D'après l'état des connaissances actuelles, ce type d'évènement n'est susceptible de se produire qu'en

cas d'évènement pluvieux extrême et exceptionnel (d'intensité supérieure à celle enregistrée lors de Hyacinthe). Ce type d'évènement, bien que catastrophique, demeure toutefois tout à fait réaliste sur le long terme (cas de Mare à Goyaves, où ce type d'évènement est particulièrement craint). Il mobiliserait des volumes de plusieurs dizaines voire centaines de millions de m³, avec des conséquences potentiellement dramatiques sur la morphologie du cirque, sur les enjeux et sur les vies humaines.

Le Tableau 19 synthétise les intensités attendues selon le scénario envisagé, pour les phénomènes de glissements de terrain, spontanés et de grande ampleur.

	Scenario fréquent	Scenario centennal	Scenario exceptionnel
Glissements spontanés	Bordure Plateau Gd Ilet - Volume : 15-20 000 m ³ - Recul : pls dizaines de m	Glissement en bordure des ilets - Volume : 1-10 millions de m ³ - Recul : qq centaines de m	Déstabilisation générale au droit des ilets Recul de pls centaines de m
	Bordure autres ilets - Volume : 5-10 000 m ³ - Recul : qq dizaines de m		
	Talus et escarpements topo - Volume : millier de m ³ - Recul : qq mètres		
Glissements de grande ampleur	Accélération associée à une pluie décennale	Accélération associée à une pluie centennale	Emballement et déstabilisation générale du glissement lent

Tableau 19 – Résumé des intensités attendues des évènements représentatifs des différents scénarii STEPRIM pour les phénomènes de glissement de terrain.

4. Méthodologie d'évaluation de l'aléa appliquée à la démarche STEPRIM

4.1. CHUTES DE BLOCS

4.1.1. Méthode générale

L'évaluation de l'aléa chute de bloc nécessite de définir les volumes susceptibles d'atteindre les enjeux. Ces volumes peuvent être issus d'un départ de bloc unitaire, d'un départ d'un volume important se fragmentant en cours de propagation (individualisation des trajectoires) ou d'effondrements en masse avec une propagation spécifique. Le groupe de travail MEZAP propose une méthode d'évaluation de l'aléa rocheux issue d'une réflexion menée dans le cadre d'une révision des guides méthodologiques PPR en montagne¹⁰. Cette méthodologie est celle valorisée dans le cadre de ce travail. Elle est adaptée à la démarche des scénarii STEPRIM.

Pour l'aléa chute de bloc, la méthodologie MEZAP définit le scénario de référence par le volume du plus gros bloc susceptible de se propager jusqu'aux enjeux sur la période de référence considérée (100 ans dans le cadre des PPR). Cet aléa peut être reproductible ou non. Ce scénario de référence peut correspondre soit au plus gros événement historique connu, soit être supérieur, soit inférieur à celui-ci. Si aucun événement historique n'est connu, une analyse spécifique est à mener.

L'évaluation de l'aléa de référence se base dans un premier temps sur la définition de zones homogènes, à partir de l'analyse des zones de départ et des zones de dépôts, du contexte géologique et géomorphologique, d'une synthèse historique des événements...etc. Chaque zone homogène est caractérisée par un volume unitaire de bloc susceptible de se propager jusqu'aux enjeux.

La cartographie de l'aléa de référence résulte de la cartographie du scénario de référence sur chaque zone homogène.

L'évaluation de l'aléa se décline en 4 étapes principales :

- Aléa de rupture :
 - On définit dans un premier temps ce qui peut être mis en mouvement. C'est la quantité de roches, exprimée en volume qui peut être déstabilisée par gravité. Ces volumes potentiellement mobilisables décrivent l'intensité attendue du phénomène, via un *indice d'intensité* ;
 - On définit dans un second temps la fréquence à laquelle ce volume se met en mouvement. Pour cela, on s'appuie lorsque cela est possible sur l'inventaire des phénomènes historiques. Ce paramètre est qualifié par un *indice d'activité* de la zone de départ considérée, aussi appelé probabilité de départ ;
 - Le croisement des deux paramètres définit l'aléa de rupture.

¹⁰ Note technique MEZAP – Méthodologie de caractérisation de l'aléa rocheux, 2014, guide à paraître.

- Probabilité d'atteinte:

Cette analyse se base sur les observations d'évènements passés, sur travaux de simulations de trajectoires (calculs 2D ou 3D de trajectographie intégrant les volumes, la nature des sols, la forme des blocs...) et/ou sur des enveloppes globales résultant d'analyses empiriques. Le résultat permet de définir des probabilités d'atteinte en chaque point.

- Probabilité d'occurrence :

La probabilité d'occurrence résulte du croisement de l'indice d'activité des zones de départ et des probabilités d'atteinte simulées et/ou observées.

- Aléa résultant :

L'aléa chute de bloc résulte du croisement de la probabilité d'occurrence et de l'intensité du phénomène de référence considéré.

Dans le cadre de la démarche STEPRIM, l'approche diffère légèrement puisque trois périodes de référence sont analysées et fixées. L'objectif est de **définir le scénario de référence pour la période considérée qui fixe l'évènement de référence**. Il s'agit de déterminer pour chaque scénario (fréquent, centennal et exceptionnel) l'évènement de référence, qualifié par un volume (intensité), des zones de départ et d'atteinte (activité, occurrence) sur le secteur d'étude. Par croisement, ces paramètres permettront pour chaque scénario, de qualifier l'aléa.

La méthodologie MEZAP et les matrices de croisement pour qualifier l'intensité, l'activité, les atteintes et l'aléa s'adaptent ainsi à cette démarche STEPRIM.

4.1.2. Aléa de rupture

a) Définition des zones de départs potentiels

La définition de l'aléa de rupture passe par la définition de zones de départs potentiels. Cette dernière se base sur des facteurs de prédisposition tels que la géologie, la morphologie de la paroi et les différents mécanismes de rupture éventuels. Les données existantes ne permettent pas à l'heure actuelle d'avoir une vision exhaustive des zones de départ préférentielles au sein des parois du Cirque de Salazie (information sur la zone d'atteintes la plupart du temps, mais informations sur la zone de départ rares sur l'ensemble de l'inventaire). De ce fait, à l'échelle du cirque de Salazie, il a été considéré que tout relief était à même de produire des blocs et il n'a pas été fait de discrimination spécifique des modes de rupture pour les différents scénarios (hypothèse retenue d'une approche similaire pour ce paramètre).

Géologie

Les zones favorables à la chute de blocs sont définies par rapport à la carte géologique du Cirque de Salazie au 1/10 000 (BRGM, 2008), à la carte géologique de La Réunion au 1/100 000 de 2006 (BRGM/Univ. Réunion), et à la carte géologique de La Réunion au 1/50 000 de 1974 (Billard, 1974).

Les ensembles géologiques favorables aux départs de blocs sont les coulées de lave basiques de phase I et II (> 430 ka), les coulées de lave différenciées de phase III et IV (< 350 ka), formant

la très grande majorité des remparts et parois rocheuses du Cirque, ainsi que les formations ignimbrétiques de phase IV (190-180 ka) affleurant en rive droite de la rivière du Mât sous le plateau de Bélouve.

Morphologie

La prédisposition d'une paroi à générer des départs de blocs selon sa morphologie peut être évaluée par couplage de photo-interprétation, valorisation de MNT et observations de terrain. Il est attesté que la présence potentielle de zone de départ est directement liée à la pente du terrain naturel. L'INRAe (ex IRSTEA) a mis en évidence une relation entre la présence de zones de départ et la pente, évaluée à partir de MNT (Berger, 2009). Sur cette base, un modèle permettant de calculer la valeur du seuil de pente α au-delà duquel on peut considérer des départs potentiels, en fonction de la résolution du MNT (RES en m):

$$\alpha = 55^\circ \cdot \text{RES}^{-0.075}$$

A La Réunion, l'application de cette relation avec le MNT de résolution 5m donne une valeur d'angle de 48.7°. Pour une approche plus sécuritaire, cette valeur est arrondie à 45°, et est appliquée à la zone d'étude et validée/précisée sur la base de l'analyse historique et des observations de terrain. Les résultats de cette démarche sont illustrés pour exemple sur les Figures 41 et 42. Elles présentent la carte des zones de départ potentiel de blocs, de pente supérieure à 45° (avec une distinction des zones subverticales de pente > 70°) pour les secteurs 2 et 5-6 respectivement.

Le secteur 2 est principalement concerné par des pentes comprises entre 45 et 70°, notamment dans la partie supérieure de la paroi. Les secteurs 5 et 6 présentent quant à eux des pentes fréquemment supérieures à 70°, notamment en partie haute du rempart et en partie intermédiaire.

Ainsi, considérant que les remparts du cirque de Salazie sont susceptibles de produire des départs sur l'ensemble de leur superficie dans les zones de pentes supérieures à 45°, un aléa de rupture diffus a été considéré. A partir de l'analyse géomorphologique associée à d'autres caractéristiques (géologie, activité, facteurs aggravants...), sept secteurs ont été distingués sur le linéaire de la zone d'étude, présentés dans le paragraphe 3.1.2.

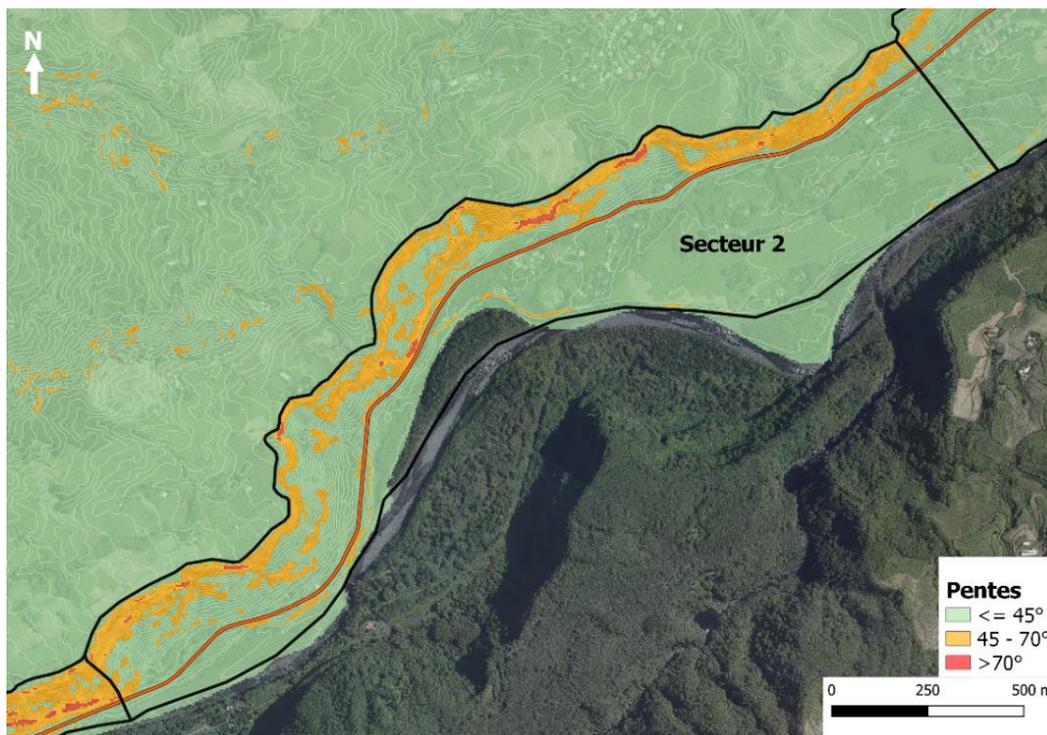


Figure 41 – Carte des pentes dérivées du MNT 5m sur le secteur 2 de la zone d'étude (fond orthophoto IGN 2017, isolignes 5m).

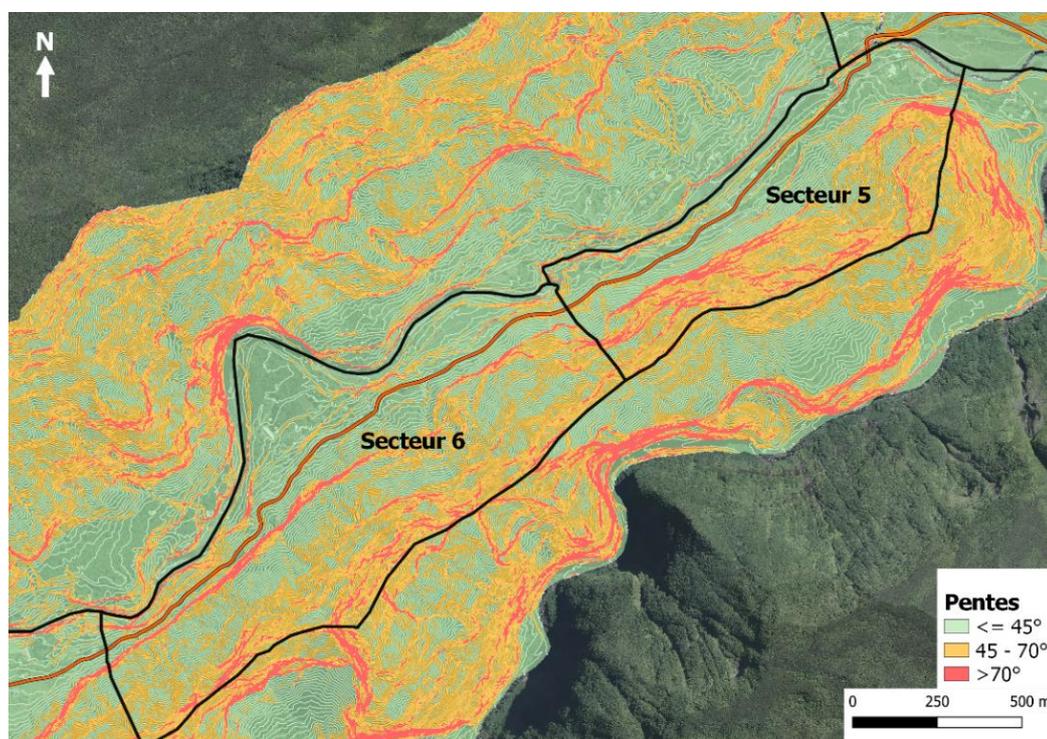


Figure 42 - Carte des pentes dérivées du MNT 5m sur les secteurs 5 et 6 de la zone d'étude (fond orthophoto IGN 2017, isolignes 5m).

b) Indice d'intensité

Les volumes potentiellement mobilisables conditionnent directement l'intensité attendue des phénomènes, qualifiée par un indice d'intensité. Les volumes totaux mobilisables pour les différents scénarii STEPRIM sont de l'ordre de quelques centaines de m³ pour le scénario fréquent, de l'ordre de la dizaine de milliers de m³ pour le scénario centennal et de l'ordre de quelques centaines de milliers à plusieurs millions de m³ pour le scénario exceptionnel. Au sein de ces volumes totaux, des volumes unitaires de blocs sont pris en compte afin de définir un indice d'intensité, à partir de la grille issue du groupe de travail MEZAP (Figure 43).

<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	Domage 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	Domage 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

Figure 43 – Définition de l'indice d'intensité de l'aléa rocheux en fonction du volume et du potentiel de dommages (MEZAP, 2014).

D'une manière générale, à La Réunion et dans le Cirque de Salazie en particulier, les volumes unitaires pouvant atteindre les enjeux sont rarement inférieurs au m³, du fait de la nature des formations géologiques constituant les remparts et les parois. **Ces volumes de l'ordre du m³ sont confirmés par l'analyse des évènements historiques** recensés notamment sur les routes du cirque (cf. partie 3.1). Les nombreux évènements de chute de blocs enregistrés chaque année sur ce territoire et répertoriés de manière systématique depuis une vingtaine d'années tendent à montrer que, sur cette échelle de temps, le volume éboulé le plus courant recensé se situe aux alentours de 1 m³.

Comme évoqué précédemment, les évènements de référence des scénarii STEPRIM impliquent des volumes totaux important, le plus souvent supérieurs à 100 m³. Ainsi, compte tenu de ce qui précède et des larges volumes totaux mobilisés, les volumes unitaires pouvant se propager lors de ces évènements sont choisis supérieurs ou égaux à 1m³, voire supérieurs à 10 m³ pour le scénario exceptionnel, selon le tableau 20 suivant. D'après la figure 43, des **indices d'intensité Elevé à Très Elevé** sont donc considérés.

	Scenario fréquent		Scenario centennal		Scenario exceptionnel	
	Volume unitaire pouvant se propager (m ³)	Indice d'intensité	Volume unitaire pouvant se propager (m ³)	Indice d'intensité	Volume unitaire pouvant se propager (m ³)	Indice d'intensité
Secteur 1	~ 1 m ³	Elevé	[1-10[	Elevé	> 10	Très Elevé
Secteur 2	[1-10[	Elevé	~ 10	Très Elevé	> 10	Très Elevé
Secteur 3	[1-10[	Elevé	~ 10	Très Elevé	> 10	Très Elevé
Secteur 4	[1-10[	Elevé	~ 10	Très Elevé	> 10	Très Elevé
Secteur 5	[1-10[	Elevé	~ 10	Très Elevé	> 10	Très Elevé
Secteur 6	[1-10[	Elevé	~ 10	Très Elevé	> 10	Très Elevé
Secteur 7	[1-10[	Elevé	~ 10	Très Elevé	> 10	Très Elevé

Tableau 20 – Indices d'intensité choisis selon les différents scenarii STEPRIM sur les secteurs de la zone d'étude (encaissement de la Rivière du Mât).

c) **Indice d'activité (probabilité de départ)**

La fréquence à laquelle les volumes de roches se mettent en mouvement sont définis, notamment à partir des données historiques et permettent d'établir un indice d'activité des zones de départ. Afin de qualifier de manière comparable l'activité de zones homogènes de tailles différentes, l'indice intègre une référence spatiale (nombre de bloc pour un linéaire de 100 m). La grille établie par le groupe de travail MEZAP pour une période de référence de 100 ans, sert de base à la définition de cet indice (Figure 44).

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

Figure 44 – Définition de l'indice d'activité de l'aléa rocheux pour une période de référence de 100 ans (MEZAP, 2014)

La connaissance historique sur la zone d'étude a été présentée précédemment (cf. partie 3.1). D'une manière générale, à La Réunion, dans la logique des PPR avec période de référence de 100 ans, l'indice d'activité est souvent considéré comme fort voire moyen mais rarement de niveau faible étant donnée la prédisposition des parois rocheuses de La Réunion à générer des instabilités importantes et la forte pluviométrie qui intervient dans les déclenchements. Ceci est

particulièrement le cas à Salazie, qui dispose de pluviométries records et pour lequel, l'analyse des évènements historiques montre la très forte activité.

La grille MEZAP ci-dessus définit l'indice d'activité pour une période de référence de 100 ans. La grille se doit donc d'être adaptée à la période de référence considérée pour chaque scénario STEPRIM.

De plus, cette grille, définie pour des évènements de type chute de blocs isolés (volume global < 100 m³), se base sur la fréquence de chute d'un bloc de référence. Or, pour les scénarii STEPRIM, compte tenu de la nature des évènements de référence considérés aux diverses échelles de temps (i.e. éboulements, effondrements en masse), il semble plus pertinent de considérer la fréquence de l'évènement en question et non un volume unitaire de bloc pour définir l'activité.

Ainsi, les propositions suivantes sont faites de la définition de l'indice d'activité :

Pour le **scénario « fréquent » (10-30 ans)**, on peut considérer l'indice d'activité comme suit :

- Faible : de l'ordre d'un évènement tous les 30 ans
- Moyen : de l'ordre d'un évènement tous les 3 ans
- Fort : de l'ordre d'un évènement tous les 0.3 ans (3 évènements/an)

Pour le **scénario centennal** :

- Faible : de l'ordre d'un évènement tous les 100 ans
- Moyen : de l'ordre d'un évènement tous les 10 ans
- Fort : de l'ordre d'un évènement tous les ans

Pour le **scénario exceptionnel** :

- Faible : de l'ordre d'un évènement de référence tous les 300 ans
- Moyen : de l'ordre d'un évènement de référence tous les 30 ans
- Fort : de l'ordre d'un évènement de référence tous les 3 ans

L'analyse des évènements historiques sur la zone d'étude et sur l'ensemble du cirque de Salazie conduit à définir un indice d'activité pour chaque secteur.

Pour le scénario fréquent, l'analyse des évènements historiques montre un indice d'activité **Fort à Moyen** pour des blocs de référence de 1 m³ à quelques m³ selon les secteurs.

Pour le scénario centennal, les évènements de l'ordre du millier à la dizaine de milliers de m³ s'étant produits à l'échelle du cirque de Salazie ont été analysés. Six évènements impliquant ces volumes sont recensés sur une période d'environ 150 ans, soit environ 1 tous les 25 ans. Toutefois, pour de nombreux évènements recensés à l'échelle du cirque, les volumes restent inconnus. Il est donc très probable que plusieurs évènements supplémentaires de cette ampleur se soient produits. Il est ainsi raisonnable d'estimer un indice d'activité **Moyen** pour ce type d'évènement, soit 1 tous les 10 ans environ.

Pour le scénario exceptionnel, on recense 1 évènement de l'ordre de la centaine de milliers de m³ dans le cirque de Salazie en environ 150 ans (Effondrement du Piton d'Enchain, 200 000m³ en 2001), soit 1 tous les 150 ans. Il est donc possible d'envisager un indice d'activité **Moyen à Faible** pour ce type d'évènement. On recense également 1 évènement de l'ordre de la dizaine de millions de m³ (Evènement de Grand Sable, 18 millions de m³ en 1875) sur cette période. Ce type d'évènement étant toutefois moins susceptible de se produire, l'indice d'activité pour ce dernier peut être estimé de **Faible**.

d) Synthèse sur la zone d'étude

Le tableau ci-dessous présente une synthèse des indices d'intensité et d'activité sur les différents secteurs de la zone d'étude pour chaque scénario STEPRIM. La plupart des sites sont susceptibles de générer des phénomènes d'intensité élevée voire très élevée, à des fréquences moyennes voire élevées.

Les scénarii de référence retenus selon les secteurs de falaise et selon les 3 scénarii STEPRIM sont donc les suivants (Tableau 21):

SCENARIO FREQUENT 10-30 ans				
	Volume mobilisable	Volume unitaire (après fragmentation)	Indice d'intensité	Indice d'activité
Secteur 1	Dizaine de m ³	De l'ordre de 1 m ³	Elevé	Moyen à Fort
Secteur 2	Centaine de m ³	Quelques m ³ (< 10m ³)	Elevé	Fort
Secteur 3	Qqes centaines de m ³	Quelques m ³ (< 10m ³)	Elevé	Fort
Secteur 4	Centaine de m ³	Quelques m ³ (< 10m ³)	Elevé	Moyen à Fort
Secteur 5	Centaine de m ³	Quelques m ³ (< 10m ³)	Elevé	Fort
Secteur 6	Centaine de m ³	Quelques m ³ (< 10m ³)	Elevé	Moyen à Fort
Secteur 7	Centaine de m ³	Quelques m ³ (< 10m ³)	Elevé	Moyen

SCENARIO CENTENNAL				
	Volume mobilisable	Volume unitaire (après fragmentation)	Indice d'intensité	Indice d'activité
Secteur 1	Qqes centaines de m ³	Quelques m ³ (< 10m ³)	Elevé	Moyen
Secteur 2	De l'ordre de quelques milliers de m ³	De l'ordre de la dizaine de m ³	Très élevé	Moyen
Secteur 3	De l'ordre de la dizaine de milliers de m ³	De l'ordre de la dizaine de m ³	Très élevé	Moyen
Secteur 4	De l'ordre de quelques milliers de m ³	De l'ordre de la dizaine de m ³	Très élevé	Moyen
Secteur 5	De l'ordre de quelques milliers de m ³	De l'ordre de la dizaine de m ³	Très élevé	Moyen
Secteur 6	De l'ordre de la dizaine de milliers de m ³	De l'ordre de la dizaine de m ³	Très élevé	Moyen
Secteur 7	De l'ordre de la dizaine de milliers de m ³	De l'ordre de la dizaine de m ³	Très élevé	Moyen

SCENARIO EXCEPTIONNEL				
	Volume mobilisable	Volume unitaire (après fragmentation)	Indice d'intensité	Indice d'activité
Secteur 1	De l'ordre de la dizaine de millier de m ³	De l'ordre de la dizaine de m ³	Très élevé	Moyen
Secteur 2	De l'ordre de la centaine de milliers de m ³	Supérieur à 10 m ³	Très élevé	Moyen à Faible
Secteur 3	De l'ordre de la centaine de milliers de m ³	Supérieur à 10 m ³	Très élevé	Moyen à Faible
Secteur 4	De l'ordre de 1-10 millions de m ³	Supérieur à 10 m ³	Très élevé	Faible
Secteur 5	De l'ordre de 1-10 millions de m ³	Supérieur à 10 m ³	Très élevé	Faible
Secteur 6	De l'ordre de 1-10 millions de m ³	Supérieur à 10 m ³	Très élevé	Faible
Secteur 7	De l'ordre de 1-10 millions de m ³	Supérieur à 10 m ³	Très élevé	Faible

Tableau 21 – Proposition d'indices d'intensité et d'activité pour les phénomènes de chute de blocs, en fonction des scenarii de référence appliqués aux différents secteurs de la zone d'étude.

4.1.3. Probabilité d'atteinte

L'évaluation de la propagation des chutes de blocs est ici menée à partir de :

- L'analyse à partir de la méthode dite de la ligne d'énergie et de l'aire normalisée, permettant la définition d'enveloppes de propagation en fonction des caractéristiques topographiques du site ;
- La simulation trajectographique 2D sur les secteurs nécessitant des précisions (zones de concentration d'enjeux par exemple) ;
- La vérification de terrain.

Nous nous sommes concentrés dans un premier temps sur une zone test du cirque du Salazie présentant des enjeux, soit le secteur de Plateau Wickers/Camp Lilas (secteur 7). La localisation des profils sur le secteur est visible sur la figure 45.

a) Trajectographie 2D

L'intégration de résultats d'études spécifiques d'évaluation de l'aléa rocheux, à partir de simulations trajectographiques permet d'apporter de la précision dans la qualification de la probabilité d'atteinte, notamment sur des secteurs concentrant des enjeux.

Le logiciel PIERRE 98 a été utilisé. Il s'agit d'un logiciel probabiliste de trajectographie 2D prenant en compte le volume et la forme des blocs, la nature du sol... Le calcul d'une trajectoire est effectué de manière déterministe en prenant en compte la variabilité des paramètres d'entrée cités ci-dessus. Le recours à un nombre de blocs au départ (runs) dans les simulations le plus important possible permet d'estimer les probabilités d'atteinte de l'ordre de 10⁻⁶ (soit 1 million de runs).

Les choix de types de sols et la forme des blocs retenus sont guidés par les observations de terrain et la géologie. Les hypothèses de blocs retenus sont les suivantes :

- Blocs de forme parallélépipédique avec des volumes moyens de 1 à 5 m³ pour le scénario fréquent ;
- Blocs de forme parallélépipédique avec des volumes moyens de 10 à 20 m³ pour les scénarii centennal et exceptionnel.

Les zones de départ ont été choisies au sommet de rempart afin d'envisager les événements les plus pénalisants, avec les distances de propagations les plus importantes.

La qualification de la probabilité de propagation est définie à partir des seuils communément admis en France:

- $P < 10^{-6}$ (moins d'1 bloc sur 1 000 000 atteint un point donné) = probabilité **faible**
- $10^{-6} \leq P < 10^{-4}$ = probabilité **moyenne**
- $10^{-4} \leq P < 10^{-2}$ = probabilité **forte**

Les tableaux suivants donnent les probabilités de propagation et les distances associées pour les 12 profils réalisés sur le secteur 7 pour le scénario fréquent (volume de bloc unitaire 5m³) et le scénario centennal (volume de bloc unitaire 10m³). L'angle de la ligne de la ligne d'énergie correspondant à chaque probabilité est donné à titre indicatif (pour comparaison avec la méthode de l'aire normalisée).

Scénario fréquent - Volume bloc unitaire 5m ³						
Profil	Probabilité d'atteinte - Distance			Probabilité d'atteinte - Angle		
	Faible	Moyenne	Forte	Faible	Moyenne	Forte
P0	450	417	384	42.1	43.4	46.2
P1	410	398	385	44.1	44.9	45.8
P2	490	440	395	38.3	40.8	43.3
P3	530	495	460	40.2	41.8	43.6
P5	610	555	500	35.8	37.9	40.1
P6	595	555	510	43.5	45	46.9
P7	880	820	765	38.1	41.1	43.8
P8	865	825	790	39.5	40.6	41.8
P9	950	920	890	39.5	39.7	41
P10	1010	970	930	40	41.6	42.5
P11	970	945	920	42.1	42.6	43

Tableau 22 - Distances correspondantes aux probabilités d'atteinte forte, moyenne et faible pour 12 profils sur le secteur 7 pour le scénario fréquent obtenues à partir des simulations trajectographiques.

Scenario centennal - Volume bloc unitaire 10m ³						
Profil	Probabilité d'atteinte - Distance			Probabilité d'atteinte - Angle		
	Faible	Moyenne	Forte	Faible	Moyenne	Forte
P0	530	497	464	39.5	43	44.1
P1	460	425	390	41.6	43.3	45.5
P2	490	440	410	39.6	41.1	42.8
P3	535	505	480	40	41.3	42.7
P5	610	555	510	36.4	38	39.7
P6	595	560	520	43.5	44.8	46.5
P7	880	820	790	40.2	41.6	43.4
P8	900	850	805	38.7	39.4	41
P9	1010	960	905	38.7	39.4	41
P10	1010	970	930	40	41.6	42.5
P11	1030	1015	995	40.7	41.1	41.5

Tableau 23 – Distances correspondantes aux probabilités d'atteinte forte, moyenne et faible pour 12 profils sur le secteur 7 pour le scenario centennal obtenues à partir des simulations trajectographiques.

La figure 45 ci-dessous permet de visualiser les distances de propagation le long des différents profils. L'interpolation des résultats au droit des différents profils permet de proposer une carte des propagations à l'échelle du secteur test étudié (cf. Figure 47).

Les différences de distances de propagation entre les scénarii fréquent et centennal se font surtout ressentir pour la probabilité forte avec des variations de distance entre 10 et 80 m pour la plupart des profils. Les plus grandes variations de distance de propagation sont observées sur les profils P0 et P11 (80 et 75 m respectivement pour la probabilité forte).

Les résultats montrent la forte exposition de la route (RD48) sur une grande partie de son linéaire traversant le secteur étudié, quel que soit le scénario. En effet, celle-ci se situe dans la zone de probabilité de propagation forte ou moyenne sur sept profils sur douze. Les habitations présentes en amont de la route se trouvent donc également exposées. Les habitations de Plateau Wickers, situées en aval de la route sont exposées au droit des profils P0 et P1. En revanche, elles se situent en zone de probabilité d'atteinte faible au droit des profils P2, P3 et P5. Il est possible de voir que des atteintes dans la rivière du Mât sont envisagées le long de certains couloirs de propagation dès le scénario fréquent (P7 et P10) et plus fréquemment pour le scénario centennal (P0, P7, P8, P9, P10). Le long du profil P10, des probabilités de propagation faibles sont envisagées jusqu'en rive gauche de la rivière du Mât, au niveau de Bois de Pomme. Ce résultat apparaît toutefois peu réaliste compte tenu de l'effet de fosse naturelle joué par l'encaissement de la rivière du Mât à ce niveau, qui tend à intercepter et piéger les blocs, et empêchant de ce fait, toute propagation en rive gauche.

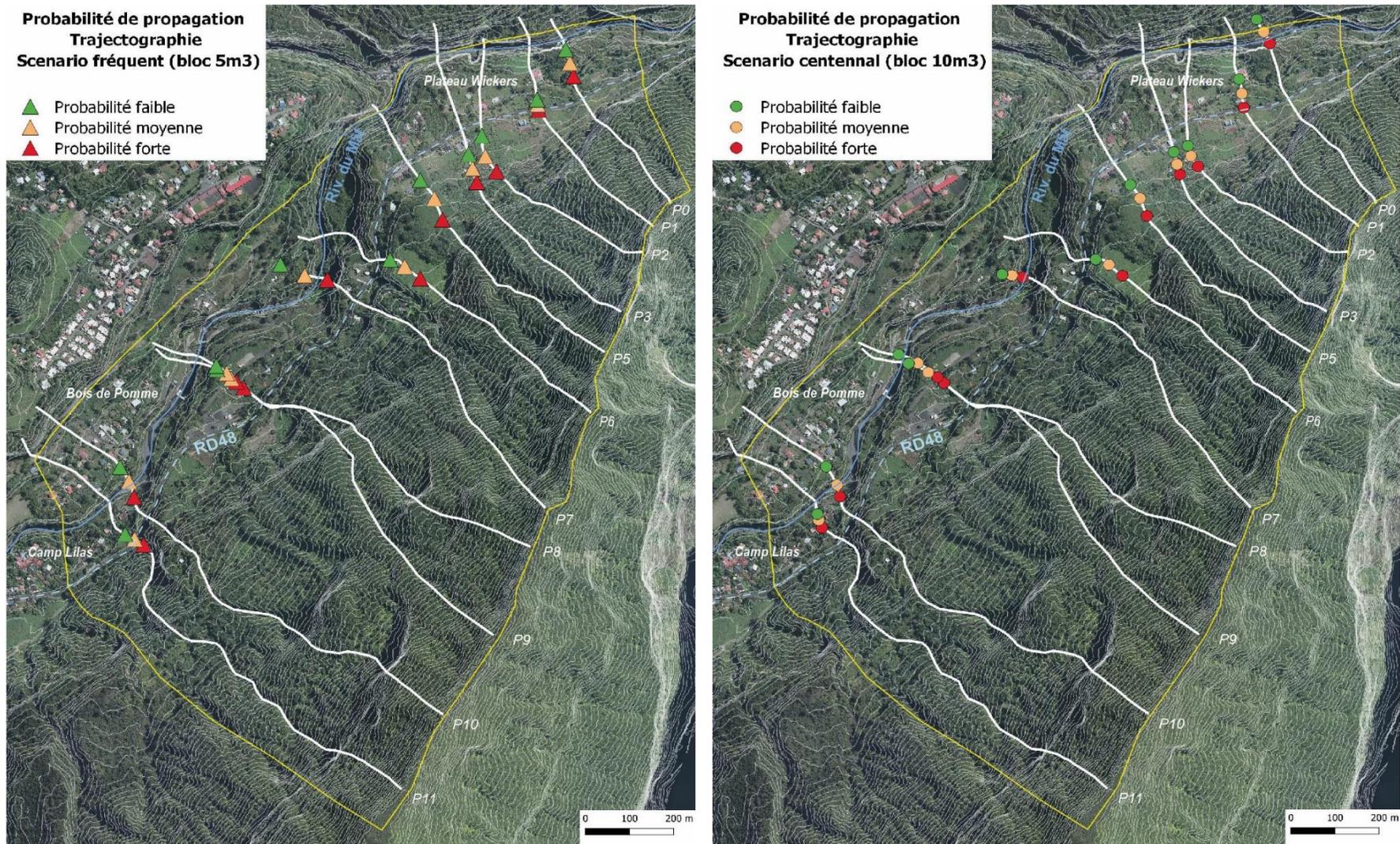


Figure 45 – Représentation cartographique des résultats des simulations trajectographiques pour le scénario fréquent et centennial le long des différents profils sur le secteur 7 (fond Orthophoto IGN 2017 – isolignes 10 m MNT Lidar 2015 – Sintegra).

Le scénario exceptionnel n'a pas fait l'objet d'analyse trajectographique. En effet, les volumes en jeu sont tels pour ce scénario, que les simulations trajectographiques 2D, développées pour des chutes de blocs isolés, ne permettent pas de qualifier de manière pertinente la propagation des événements en grande masse (phénomènes complexes d'interaction entre blocs, fluidisation...etc). Pour le scénario centennal, les données de trajectographie peuvent être prises en compte mais compte tenu des volumes mis en jeu, là aussi relativement importants, les résultats de simulations devront être confrontés à des phénomènes historiques connus et/ou à des données bibliographiques afin d'être validés et précisés le cas échéant.

L'outil trajectographique Pierre98 est un outil performant mais, comme tout modèle, il dispose de limites à prendre en considération lors de l'interprétation des profils de trajectoire. Le modèle tend notamment à sous-estimer les atteintes pour les profils particulièrement longs. Certaines caractéristiques topographiques peuvent également être sous-estimées comme notamment l'effet intercepteur de dépressions topographiques naturelles sur la trajectoire (cas de la rivière du Mât par exemple, souligné plus haut). Il est donc important de conserver un œil expert sur les résultats obtenus afin d'identifier de possibles incohérences avec la réalité du terrain.

b) Ligne d'énergie et aire normalisée (LE/AN) – Modèle ELANA

Sur la base des résultats du groupe de travail MEZAP, une méthode de définition des enveloppes de propagation de chutes de blocs, appelée méthode de l'aire normalisée, a été développée et est décrite dans le rapport BRGM/RP-66589-FR (Colas, 2017). Cette méthode valorise la méthode de la ligne d'énergie (cf. Annexe 1), intégrant les facteurs naturels impactant la propagation et permettant d'affiner les limites de propagation. La méthode s'appuie sur une base de données d'événements décrits (plus de 2700 chutes de blocs analysés dont un certain nombre d'événements observés à La Réunion) et permet d'établir une relation, dans des contextes variés, entre la morphologie de la paroi pouvant libérer des blocs rocheux et les valeurs d'angle de ligne d'énergie associées. Cette méthode permet de définir des limites probables d'atteinte (probabilité faible, moyenne, forte) en intégrant le facteur morphologique du profil topographique, à partir de lois empiriques.

L'outil de cartographie ELANA (Levy et al, 2021) est actuellement développé par le BRGM pour utiliser les lois empiriques 2D de la méthode de l'aire normalisée afin de cartographier spatialement la probabilité de propagation des chutes de blocs. Le modèle ELANA utilise les données topographiques issues de MNT ainsi qu'une couche de même dimension identifiant les zones de départ (ici secteurs à pente > 45°). Il permet d'obtenir des couches des zones de propagation faible, moyenne et forte à partir des lois empiriques proposées. Ce modèle a été testé sur le secteur de Plateau Wickers. Ses résultats peuvent être comparés aux résultats issus de la trajectographie.

La figure 46 ci-dessous présente la cartographie brute des probabilités de propagation obtenues par le modèle ELANA (choix d'un indice d'intensité Elevé et d'un indice activité = 10 ans – correspondant au scénario STEPRIM fréquent). Les limites de propagation obtenues par trajectographie pour le scénario fréquent ont été ajoutées pour comparaison.

Le modèle ELANA tend à donner des résultats plus sécuritaires que les simulations trajectographiques. Sur la zone d'étude, la limite de la probabilité de propagation forte est repoussée de 100 à 300 m par rapport à la trajectographie. Ces différences peuvent s'expliquer pour diverses raisons :

- La topographie du rempart dominant la zone exposée est complexe. Or, la méthode de la ligne d'énergie/aire normalisée prend en compte la ligne de plus grande pente au sein du versant, soit la distance de trajet la plus courte entre la zone de départ et le point d'arrivée. Elle ne considère donc pas la présence éventuelle de thalwegs/ravines qui peuvent, par exemple, canaliser la propagation des blocs. Le rempart surmontant Plateau Wickers à Salazie est entaillé de nombreux talwegs et présente une topographie complexe, faite de vires et de ressauts qui peuvent influencer les trajectoires des blocs. Cela est bien visible par exemple le long des profils P8 et P9 dont les zones de départ sont éloignées de plus de 200 m mais où le trajet le plus probable des blocs, contraint par des thalwegs en paroi, finit par se rejoindre à l'aval à la confluence des deux ravines (Figure 40).
- ELANA n'intègre pas les volumes de blocs dans ses calculs, mais intègre seulement un facteur d'intensité (indice d'intensité Faible, Moyen, Fort).
- Le modèle, bien que basé sur une base de données très conséquente d'évènements, ne dispose probablement que peu d'évènements sur des profils de propagation longs (comme c'est le cas ici, avec des profils > 700 m). Le modèle pourrait donc être moins bien contraint pour ce type de profils.
- Enfin, comme indiqué plus haut, l'outil de trajectographie Pierre98, à l'inverse d'ELANA, peut sous-estimer les atteintes pour les longs profils, ce qui tend à augmenter les différences entre les résultats des deux méthodes.

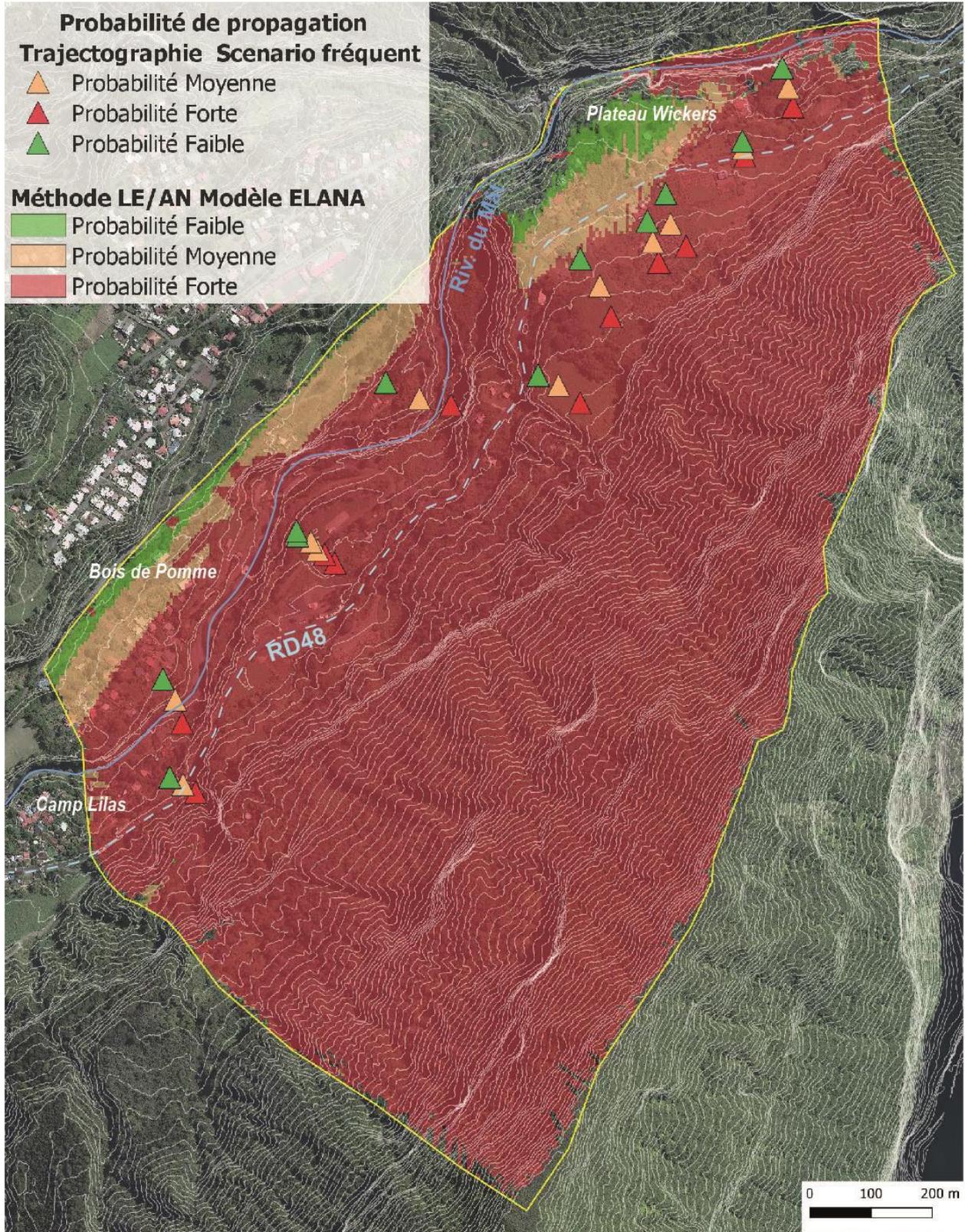


Figure 46 – Probabilités d'atteinte obtenues par le modèle ELANA basé sur la méthode de l'aire normalisée, sur le secteur de Plateau Wickers/Camp Lilas et comparaison avec les résultats de trajectographie (fond Orthophoto IGN2017 – isolignes 10m MNT Lidar 2015 Sintegra).

c) Application sur site pilote

L'analyse croisée des travaux réalisés (trajectographie et Aire normalisée/ELANA) permet de proposer une cartographie de l'aléa de propagation. Afin d'aboutir à une hiérarchisation de l'atteinte potentielle de blocs rocheux, la démarche suivante a été suivie :

- Exploitation des profils trajectographiques en associant les probabilités d'atteinte aux classes définies ci-dessus (10^{-2} = proba forte, ...etc)
- Valorisation de la méthode de la ligne d'énergie par l'outil de cartographie ELANA permettant de proposer des limites de probabilités d'atteinte faible, moyenne et forte.
- Comparaison des résultats des deux méthodes et positionnement des enveloppes de propagation et cartographie résultante arrêtées à dire d'expert en intégrant les caractéristiques topographiques locales.

Pour la mise en œuvre de stratégies de gestion de l'aléa et du risque cohérentes dans le cirque de Salazie, il est nécessaire de disposer des cartographies d'aléas les plus précises possibles, adaptées à l'échelle de temps considérée pour le phénomène redouté. Nous avons vu que la méthode ELANA semblait particulièrement sécuritaire lorsqu'on la compare aux simulations trajectographiques. Ces dernières prenant en considération la microtopographie locale, elles peuvent donner des résultats localement plus précis. La méthode trajectographique 2D n'en demeure pas moins un modèle numérique qui ne peut reproduire parfaitement la complexité de processus naturels en jeu. Une certaine marge d'erreur est donc à considérer afin de prendre en compte l'incertitude inhérente au modèle.

Sur le site pilote de Plateau Wickers, nous proposons de baser la cartographie finale des probabilités d'atteinte pour les phénomènes de chute de blocs sur les résultats des simulations trajectographiques réalisées. Pour rappel, les enveloppes de propagation ont été établies pour un éboulement se produisant au droit du rempart en rive droite de la rivière du Mât, surmontant l'îlet de Plateau Wickers. Un bandeau de sécurité de 50 m (établi à dire d'expert) est appliqué aux trois enveloppes de propagation forte, moyenne et faible. Il permet de prendre en compte les effets d'éventuelles interactions entre les blocs compte tenu des volumes attendus pour les scénarii des référence (en particulier centennal – cf. paragraphe suivant) et les trajectoires les plus atypiques. Il permet également de prendre en compte les éventuelles limites de l'outil, notamment sa tendance à sous-estimer les atteintes sur les longs profils.

Les figures ci-dessous (Figure 47) illustrent les enveloppes de propagation obtenues pour les scénarii fréquent (volume unitaire de bloc 5 m^3) et centennal (volume unitaire de bloc 10 m^3) sur la zone de Plateau Wickers.

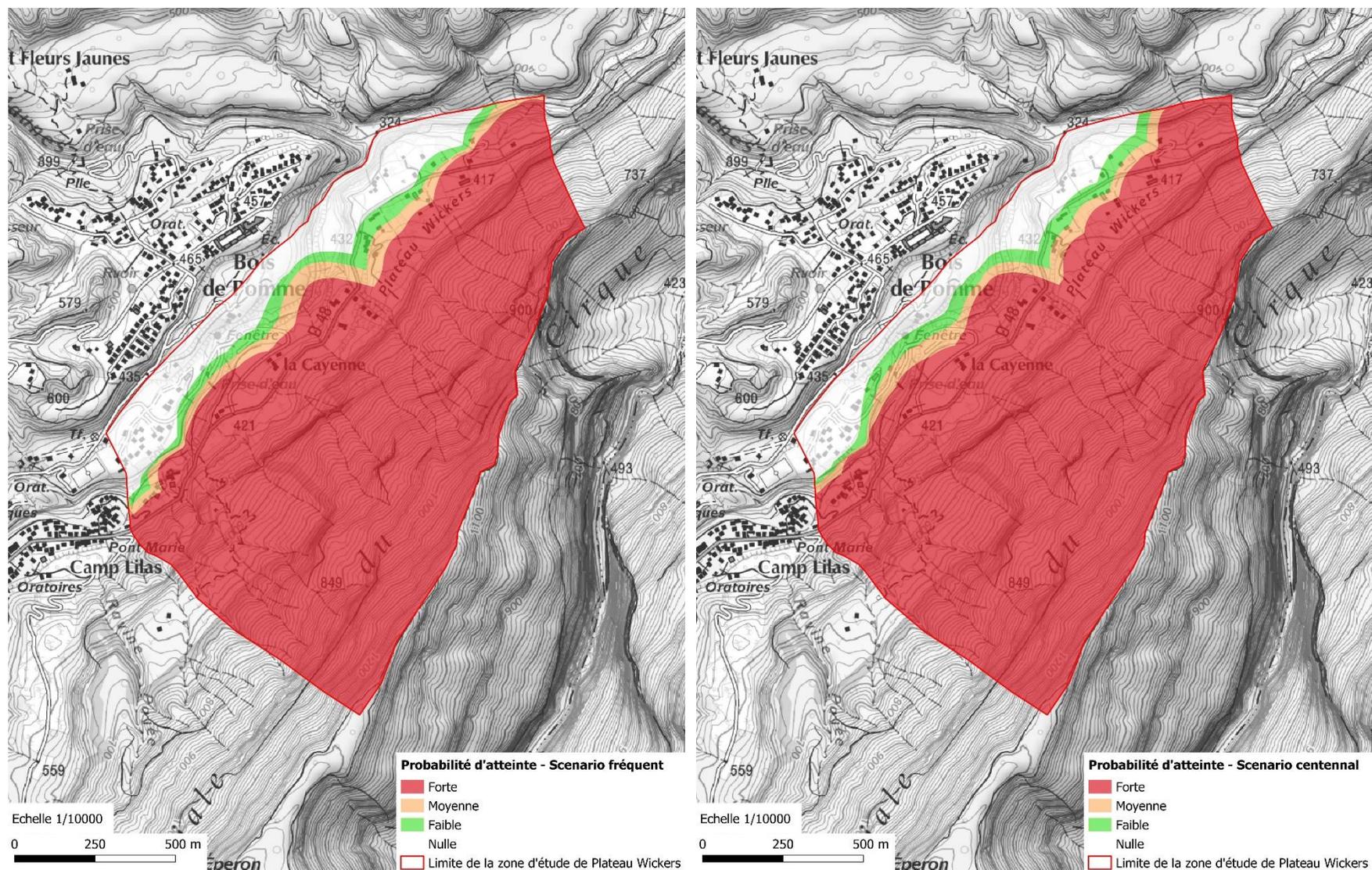


Figure 47 – Enveloppes de probabilités d’atteinte forte (rouge), moyenne (orange) et faible (jaune) retenues pour des volumes unitaires de blocs de 5 m³ (limite haute du scenario fréquent) et de 10m³ (scenario centennial) sur le site pilote de Plateau Wickers obtenues par trajectographie. Un bandeau sécuritaire de 50 m a été ajouté pour tenir compte des incertitudes liées à la méthode trajectographique (fond Scan topo IGN 1/25 000^e, 2015).

d) Limites de l'approche trajectographie/ligne d'énergie pour les éboulements en masse

Les méthodes de trajectographie et de la ligne d'énergie ont été développées pour des chutes de blocs mobilisant de faibles volumes totaux. Pour des événements en masse, on estime que les mécanismes influant sur les distances de propagation deviennent significatifs à partir de plusieurs milliers de m³.

Pour le scénario fréquent de la démarche STEPRIM, l'approche couplant les méthodes trajectographiques et statistiques, peut raisonnablement être appliquée. Pour le scénario centennal, dont les volumes totaux sont de l'ordre de la dizaine de milliers de m³, ces méthodes sont en limite de validité. Les résultats obtenus doivent donc être confrontés aux observations réalisées lors d'événements connus en contexte similaire et précisés au cas par cas en fonction des caractéristiques topographiques du secteur étudié.

Pour le scénario exceptionnel, les événements considérés sont des phénomènes extrêmes où la propagation tend à prendre un caractère turbulent (type avalanche de débris). Pour ces événements, les distances de propagation sont bien plus importantes que pour des événements de moindre volume. Les méthodes de simulations trajectographiques et de la ligne d'énergie ne sont plus applicables dans ce contexte, les limites de propagation pour des événements de grand volume étant forcément largement sous-estimées compte tenu de la dynamique de l'écoulement.

La définition des probabilités d'atteinte pour ce type d'événement doit donc se baser sur d'autres paramètres. D'après le retour d'expérience acquis, le groupe MEZAP préconise un intervalle de valeur de ligne d'énergie de [25°, 28°] pour les éboulements en masse. De plus, l'analyse des événements passés (lorsqu'ils ont pu être décrits) permet généralement de préciser les distances de propagation. A Salazie, par exemple, l'événement de Grand Sable correspond à la déstabilisation en très grande masse du rempart Nord du Gros Morne, entre 1500 et 1900 m d'altitude. Les produits de la déstabilisation se sont répandus sur une largeur maximum d'1km et **sur au moins 2 à 2.5 km de long**, avec une épaisseur de matériaux d'environ 100 m et un volume total estimé à 18-20 millions de m³. Les valeurs d'angles d'énergie pour cet événement sont très faibles, de l'ordre de **16-17°**. Ces grandes distances de propagation sont liées à la dynamique de l'écoulement, où l'interaction entre les blocs génère une fluidisation de l'écoulement.

L'effondrement en grande masse du rempart surplombant le secteur 7 serait à même de produire des volumes de l'ordre du million de m³ pour le scénario exceptionnel. **Des valeurs d'angles de ligne d'énergie inférieures à 20° sont donc à considérer pour les distances d'atteinte pour ce type d'événement.** Une approche à dire d'expert peut ensuite permettre de préciser le zonage via l'analyse des caractéristiques topographiques au droit du secteur analysé (encaissement des rivières, distance du rempart opposé...etc.).

Toutefois, **des études complémentaires d'analyse des mécanismes de propagation associés à ces phénomènes de grande ampleur semblent indispensables, par exemple via des logiciels de simulation numérique 3D.** Elles favoriseraient une meilleure compréhension des processus en jeu dans ce type d'événement et permettraient ainsi une meilleure prédiction des distances d'atteinte des éléments.

4.1.4. Probabilité d'occurrence

La probabilité d'occurrence est ensuite qualifiée à partir du croisement de la probabilité d'atteinte et de l'indice d'activité (probabilité de départ), selon la matrice ci-dessous.

		<i>Probabilité d'atteinte</i>			
		Faible	Moyenne	Forte	Très Forte
<i>Indice d'activité</i>	Faible	Faible	Modérée	Elevée	Très Elevée
	Moyen	Modérée	Modérée	Elevée	Très Elevée
	Fort	Modérée	Elevée	Elevée	Très Elevée

Tableau 24 – Matrice de qualification de la probabilité d'occurrence en un point donné (MEZAP, 2014).

Pour rappel, sur le secteur de Plateau Wickers, un indice d'activité **Moyen** a été défini pour le scénario fréquent et centennal, et Faible pour le scénario exceptionnel.

En fonction des enveloppes de propagation obtenues au paragraphe précédent, la probabilité d'atteinte se répartit donc, d'après le Tableau 24, entre un degré **Modéré à Elevé**. L'application cartographique sur le secteur pilote est présentée à la Figure 48, pour les scénarii fréquent et centennal.

Pour le scénario exceptionnel, compte tenu des très grands volumes de matériaux concernés associés à de très grandes distances d'atteinte potentielles (ligne d'énergie inférieure à 20°), des études complémentaires s'avèrent nécessaires pour mieux caractériser les processus relatifs à la propagation des éléments et les probabilités d'atteintes.

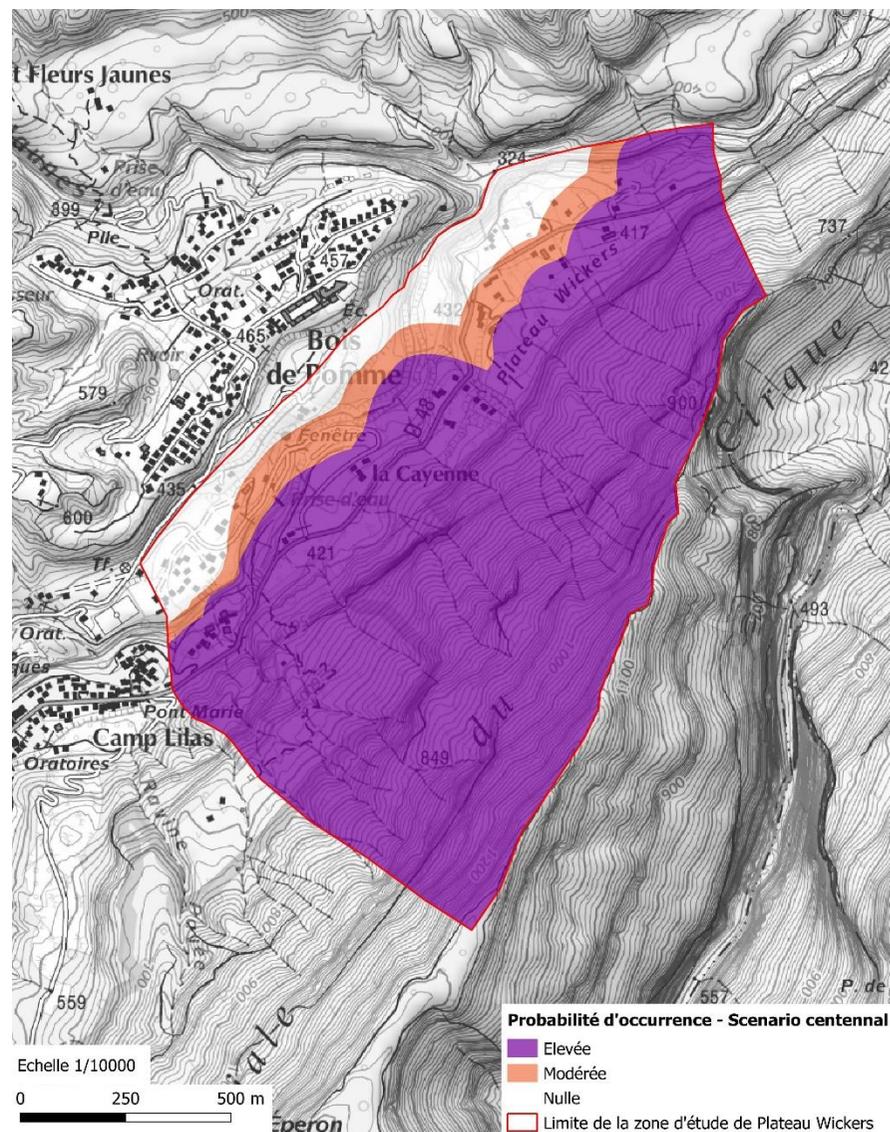
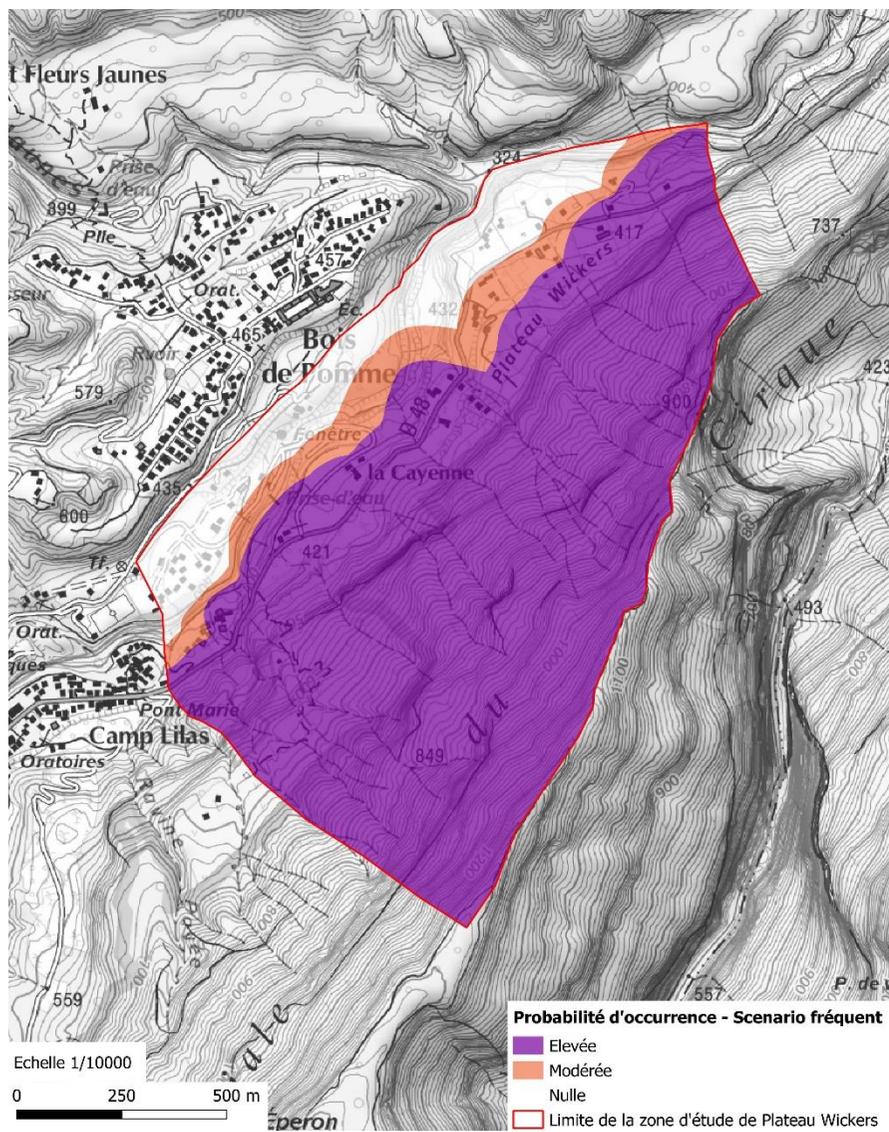


Figure 48 – Probabilités d'occurrence pour les scénarios fréquent (à gauche) et centennial (à droite) sur le secteur de Plateau Wickers.

4.1.5. Aléa résultant

L'aléa chute de bloc résultant correspond au croisement de la probabilité d'occurrence et de l'intensité du phénomène selon la matrice du Tableau 16. Il peut être évalué sur cette base pour le scénario fréquent, voire pour le scénario centennal en première approche.

L'intensité des phénomènes redoutés pour les scénarii STEPRIM étant majoritairement élevée à très élevée, cela conduit à considérer un aléa résultant systématiquement de niveau **Elevé à Très élevé** dans les zones où les blocs sont susceptibles de se propager (carré rouge dans le tableau 25). La cartographie de l'aléa élevé et très élevé pour le scénario fréquent et centennal est illustrée à la figure 49. Cette cartographie d'aléas correspond à des événements se produisant au niveau du rempart surplombant l'îlet de Plateau Wickers. Il ne prend pas en compte l'aléa issu d'évènements se produisant au niveau de la rive gauche de la Rivière du Mât (escarpement de Bois de Pomme, rempart du Cap Picard...).

		<i>Intensité</i>				Phénomène de grande ampleur (écoulement turbulent)
		$V \leq 0,25 \text{ m}^3$	$0,25 < V \leq 1 \text{ m}^3$	$1 < V \leq 10 \text{ m}^3$	$V > 10 \text{ m}^3$	
		Faible	Modérée	Elevée	Très élevée	Cartographie avec un niveau d'aléa unique: très élevé (Cf. 3.1)
<i>Probabilité d'occurrence</i>	Faible	Faible	Modéré	Elevé	Elevé	
	Modérée	Faible	Modéré	Elevé	Elevé	
	Elevée	Modéré	Elevé	Elevé	Très élevé	
	Très élevée	Elevé	Elevé	Très élevé	Très élevé	

Tableau 25 – Grille de définition de l'aléa chute de blocs (MEZAP, 2014).

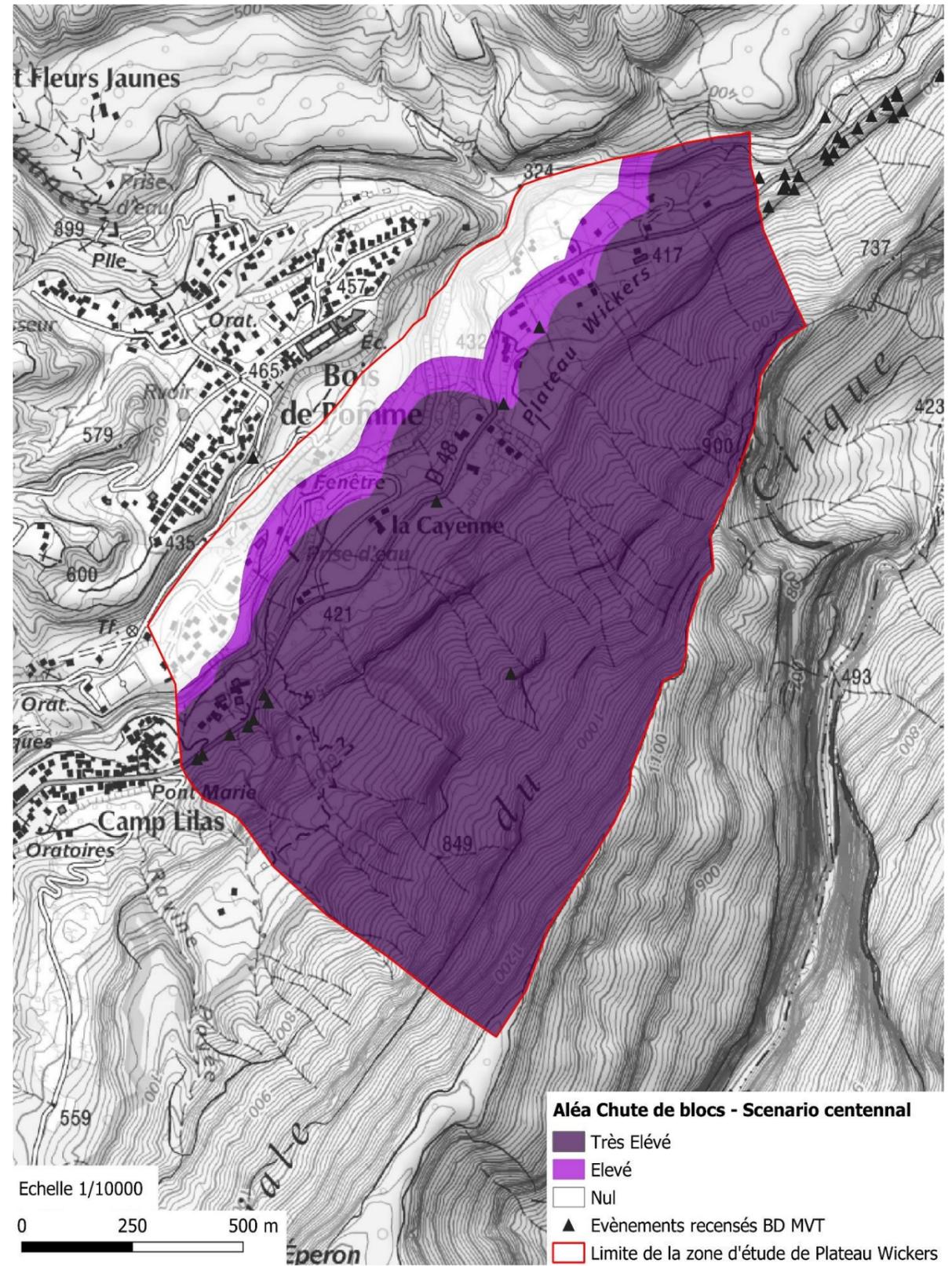
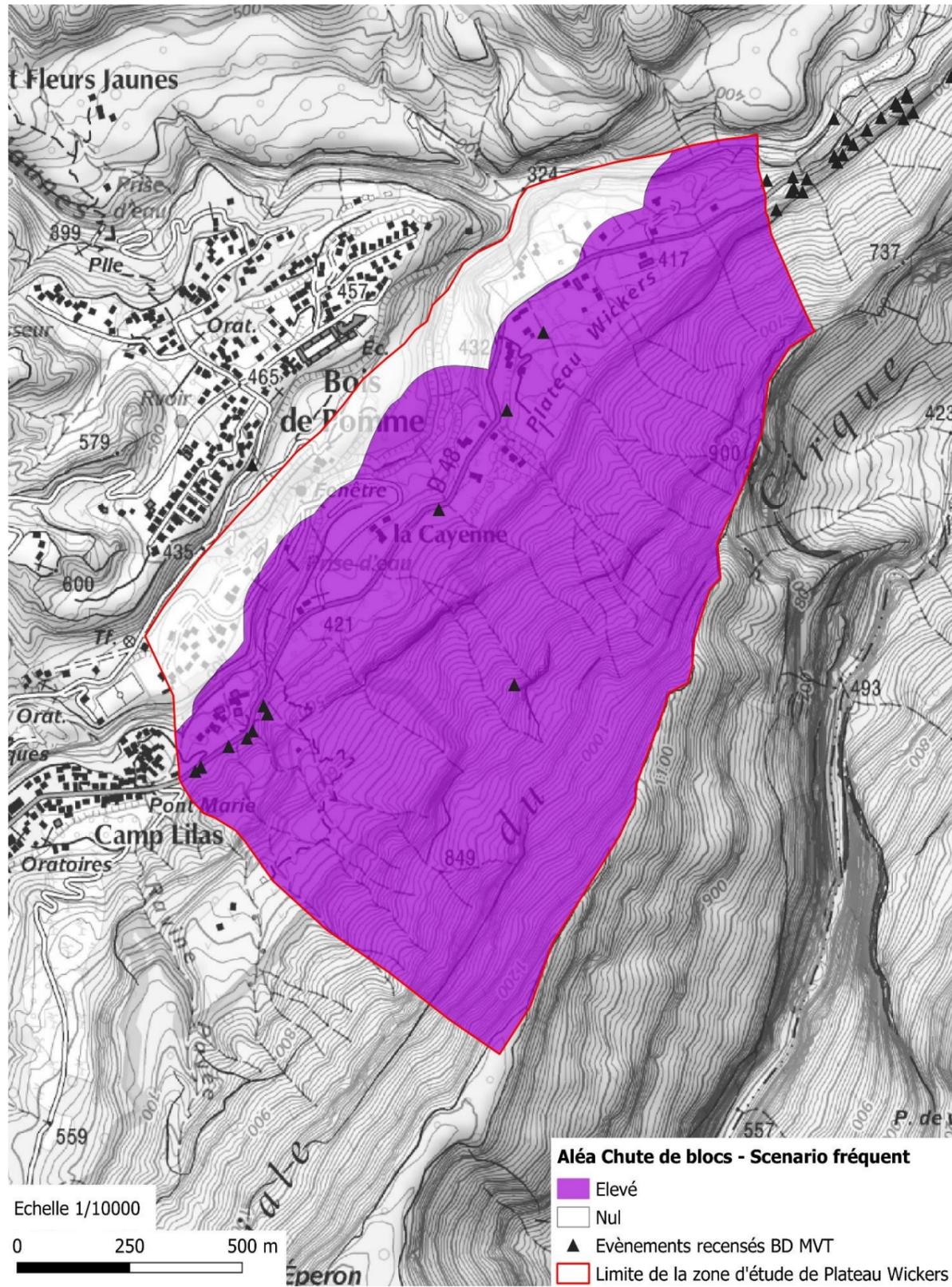


Figure 49 – Aléa Chute de blocs sur le site pilote de plateau Wickers pour les scénarios fréquent (à gauche) et centennial (à droite)

4.1.6. Stratégie de cartographie de l'aléa chute de bloc à l'échelle du cirque de Salazie

Dans le cadre du projet, l'objectif est d'aboutir à une cartographie des aléas gravitaires à l'échelle du cirque de Salazie, notamment pour le scénario fréquent de la démarche STEPRIIM.

Les travaux ci-dessus à l'échelle du site pilote ont montré l'intérêt des outils de trajectographie pour la détermination des enveloppes de propagation. Toutefois, la mise en œuvre de ces outils est longue et fastidieuse. Leur développement à l'échelle de l'ensemble du cirque semble difficilement réalisable car extrêmement chronophage. L'intérêt de cette méthode se fait toutefois ressentir dans les zones à enjeux du Cirque afin de mettre en place les stratégies de gestion du risque les plus adaptées possible. C'est pourquoi la réalisation de la cartographie de l'aléa chute de blocs à l'échelle du Cirque sera menée en suivant les modalités suivantes :

- Une cartographie de l'aléa sera réalisée à l'échelle du cirque grâce à l'outil de cartographie ELANA, basé sur la méthode de la ligne d'énergie ;
- Dans les secteurs regroupant des enjeux bâtis (ilets principalement), l'aléa obtenu sera précisé, dans la mesure du possible, grâce à l'outil de trajectographie 2D (outil Pierre 98) avec application systématique d'un bandeau de sécurité (défini à dire d'expert) sur les différentes enveloppes ;
- Dans les secteurs hors enjeux bâtis (zones naturelles...), l'aléa obtenu grâce à ELANA sera conservé ;
- Une vérification à dire d'expert des résultats obtenus sera systématiquement réalisée, notamment dans les zones de configuration particulière (forts encaissements par exemple) où les simulations ELANA ou trajectographiques pourraient s'avérer irréalistes ;
- Enfin, dans la majorité des cas, l'évolution des phénomènes naturels est continue, la transition entre les divers degrés d'aléas est donc à priori linéaire. Lorsque les conditions naturelles, notamment la topographie, n'imposent pas de variations particulières, les zones d'aléas élevé, moyen, faible sont « emboîtées ». Dans ce cas, pour une zone d'aléa élevée donnée, il existe donc une zone d'aléa moyen et faible qui traduisent la décroissance de l'intensité et/ou de la probabilité du phénomène avec l'éloignement des zones de départ. Ce principe de **gradation des aléas** sera appliqué à la cartographie de l'aléa à l'échelle du cirque, avec l'application à la suite d'un aléa élevé, d'un bandeau forfaitaire, de largeur variable définie à dire d'expert selon la configuration de la zone (10 à 20 m minimum). De la même manière, un bandeau d'aléa faible sera appliqué à la suite de l'aléa moyen.

4.2. GLISSEMENT DE TERRAIN

L'évaluation de l'aléa s'effectue par étapes successives tout en respectant les recommandations du guide méthodologique pour l'élaboration des PPR mouvement de terrain, les spécifications du rapport BRGM/RP-66346-FR (Rey, 2016) proposant des évolutions méthodologiques pour l'élaboration des PPR à La Réunion et en s'inspirant de certaines méthodologies étrangères, Suisses en particulier.

Toutefois, l'évaluation de l'aléa au sens strict n'est quasiment jamais réalisée compte tenu de la complexité extrême des phénomènes et des analyses de probabilité d'occurrence et d'intensité associées. La cartographie de l'aléa glissement de terrain reflètera donc la susceptibilité des formations et de leur contexte géomorphologique, à l'apparition des différents phénomènes.

La potentialité plus ou moins forte d'occurrence des glissements de terrain va dépendre de facteurs de prédisposition, de facteurs aggravants et de facteurs déclencheurs. Il est donc indispensable de définir leur rôle et poids respectif dans l'initiation des phénomènes.

Par ailleurs, le Cirque de Salazie, est affecté par plusieurs glissements de grande ampleur, permanents et actifs. Ces phénomènes sont découplés des glissements de terrains dits « spontanés ».

4.2.1. Glissements spontanés

Pour les différents scénarii STEPRIM, la période de référence est fixée. L'objectif est donc de définir (1) l'ampleur du phénomène maximum qui se produira pour chaque scénario (intensité, réalisé au chapitre précédent) et (2) l'impact de ce phénomène sur le territoire. Caractériser cet impact revient à déterminer les zones de départ possibles et, dans la mesure du possible, les distances de propagation de l'évènement.

La détermination des zones potentielles de départ est réalisée à partir de l'analyse des facteurs de prédisposition (topographie, géologie...) et des facteurs aggravants (pluviométrie...). L'analyse de la propagation se base également en partie sur ces facteurs. Toutefois, les mécanismes de propagation des glissements de terrain demeurent particulièrement complexes et aucune approche aussi aboutie que pour les chutes de blocs (méthodologie MEZAP, trajectographie...) n'existe à l'heure actuelle. Les enveloppes de propagation doivent donc être définies soit à partir d'outils de simulations 3D en cours de développement (modèles Flow-R, Shaltop), soit à partir d'une évaluation à dire d'expert basée sur une analyse croisée des données géomorphologiques et des données historiques existantes.

a) Facteurs de prédisposition

La caractérisation d'un phénomène est principalement basée sur la typologie des mouvements de terrain recensés sur le territoire analysé. Sur le Cirque de Salazie, les glissements de terrain « spontanés » sont essentiellement de 3 formes (pelliculaire, plans, rotationnels) et peuvent impliquer des volumes limités (quelques m³) comme des volumes extrêmement importants (million de m³, Bejisa 2014).

Les facteurs de prédisposition de base sont le relief et la nature des terrains et donc, plus généralement, la géomorphologie du terrain. Chaque zone fait l'objet d'un classement selon les critères définis ci-dessous.

Topographie/Morphologie

La topographie conditionne la cinématique du mouvement : plus la pente est élevée, plus l'aléa augmente. Une évaluation de la pente est définie en fonction du MNT de la zone d'étude (MNT 5m IGN 2011 et MNT 50cm 2015 Sintegra). Le retour d'expérience à La Réunion montre d'une manière générale les pratiques suivantes pour les définitions des classes de pentes :

- Pente faible : < 15-20°
- Pente modérée : 15-20° à 30-35°
- Pente forte : > 30-35°

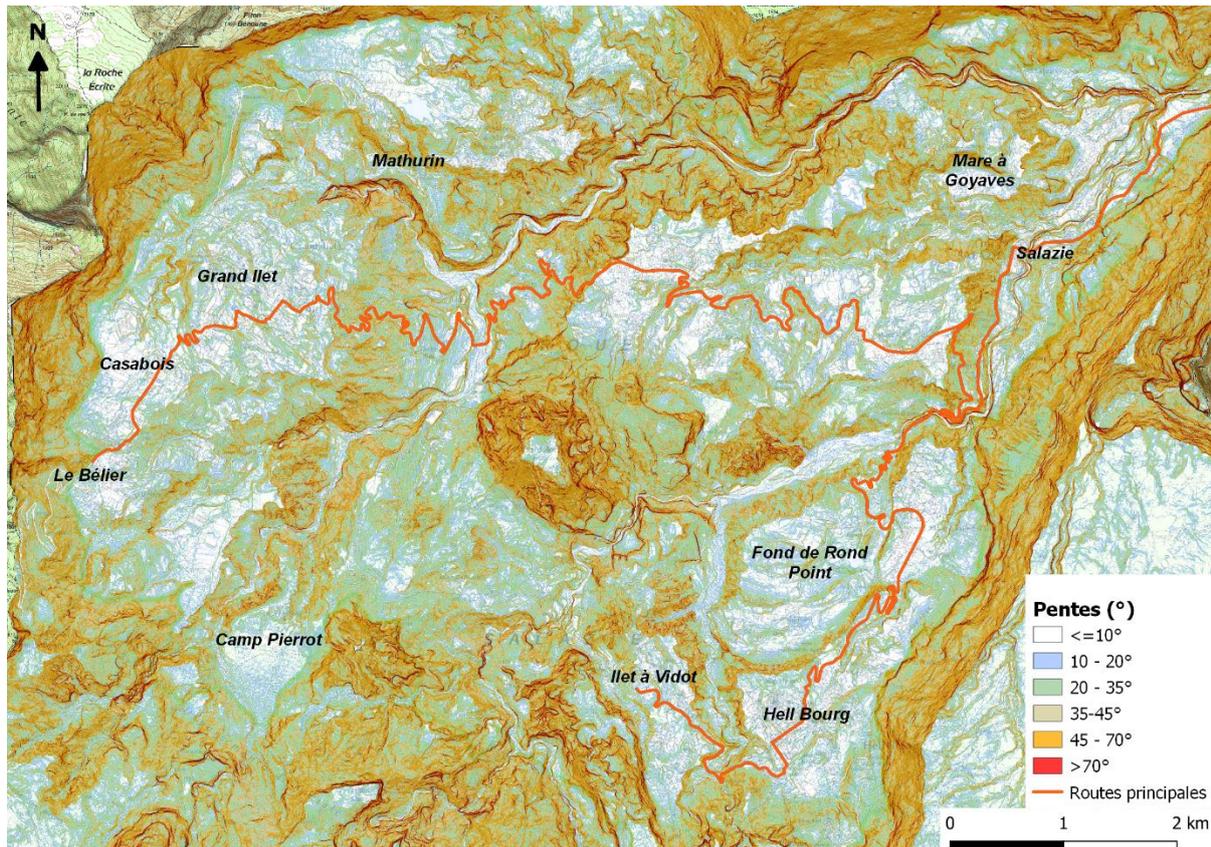


Figure 50 – Carte des pentes du cirque de Salazie, localisant les principaux glissements actifs du cirque : Mare à Goyaves, Hell-Bourg/Fond de Rond-Point, Ilet à Vidot, Grand Ilet, Mathurin, Le Bélier et Camp Pierrot.

La carte précédente (Figure 50) montre qu'à l'exception de quelques secteurs situés sur les îlets, l'ensemble du Cirque de Salazie est concerné par des pentes supérieures à 10° et majoritairement supérieures à 20°. La grande majorité du cirque est donc potentiellement susceptible d'être affectée par des glissements de terrain dits spontanés. En plus de ce type d'évènement, sept glissements de grande ampleur, actifs sont recensés dans le cirque, participant à l'apparition d'instabilités secondaires à leur front.

Nature des formations

Le déclenchement des glissements de terrain 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 formations en place.

A La Réunion, les formations géologiques rencontrées ont été classées en 4 groupes en fonction de leur aspect et de leur caractéristiques géotechniques vis-à-vis de leur sensibilité au développement de glissement de terrain (Tableau 26). Les formations rocheuses constituent la 4^{ème} classe de matériaux mais ne sont pas concernées par les phénomènes de glissement de terrain.

	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 26 – Classification des principales formations géologiques de La Réunion selon leur nature et leur aspect (Rey, 2016)

Dans le Cirque de Salazie, à l'exception des remparts, les formations bréchiques représentent les formations dominantes et constituent majoritairement les îlets du cirque. Ces brèches ont diverses origines (brèches d'avalanches de débris anciennes, colluvions, brèches d'éboulis, ...etc.) et sont particulièrement sensibles aux phénomènes de glissements de terrain. Les classes de sol sont donc principalement de **classe 2 et 3**.

b) Facteurs aggravants et potentiellement déclencheurs

Des facteurs locaux, variables, peuvent venir s'ajouter aux facteurs de prédisposition et augmenter ou diminuer l'exposition d'une zone aux phénomènes de glissements de terrain. La présence d'eau ou un déboisement non contrôlé vont ainsi venir augmenter l'exposition d'une zone.

Végétation

L'absence de végétation arborée est un facteur aggravant classique en particulier pour les événements de volume limité. Le système racinaire contribue à stabiliser la frange superficielle de terrain entre 1 et 3 m de profondeur et réduit les infiltrations d'eau météorique et donc la teneur en eau du sol. Une mauvaise gestion du couvert forestier peut donc engendrer une fragilisation des terrains et favoriser leur instabilité.

Eau/Pluviométrie

Les zones humides aggravent la susceptibilité des terrains à développer des glissements en provoquant une perte de cohésion dans les formations meubles à matrice fine (brèches non ou peu consolidées). Les précipitations de longue durée et/ou d'intensité élevée sont le principal déclencheur naturel des glissements de terrain. Elles augmentent la teneur en eau des sols à matrice fine et font chuter la résistance au cisaillement de ces derniers. L'augmentation des niveaux de nappe favorise la mise en pression des aquifères et le décollement de masses potentiellement instables. Par ailleurs, les zones de résurgence, les zones de rejets d'eau superficielle et d'écoulement concentré (thalweg, ravines) favorisent également la mobilisation de matériaux déstructurés et la déstabilisation des terrains, en particulier lors des événements pluvieux.

A La Réunion, et en particulier sur la côte au vent, la forte pluviométrie parfois enregistrée avec des intensités extrêmes est l'un des facteurs aggravants principaux. Le suivi des glissements de grande ampleur du Cirque de Salazie a montré par exemple une corrélation entre la pluviométrie et l'accélération des déplacements au front des glissements. Cette pluviométrie est généralement plus importante dans les Hauts du territoire. Une altitude élevée des terrains constitue donc également un facteur potentiellement aggravant.

Activité anthropique

La présence de l'occupation humaine avec des pratiques de terrassement potentiellement néfastes pour la stabilité des terrains (déblais non soutenus, remblais en surcharge non confortés) ou des pratiques agricoles non maîtrisées constitue un facteur aggravant au déclenchement de glissements de terrain.

A partir de l'analyse des facteurs de prédisposition et des facteurs aggravants/déclencheurs décrits ci-dessus, une évaluation de la probabilité d'occurrence d'un glissement de terrain est réalisée. Cette évaluation se base sur la grille de définition suivante (Tableau 27), élaborée dans le contexte spécifique de La Réunion (Rey, 2016).

Dans le cas de notre étude, les probabilités d'occurrence seront essentiellement définies de niveau **Moyen ou Elevée**, avec ponctuellement un niveau faible dans les secteurs de plus faible pente (< 20°) situés au cœur des plateaux des îlets (cf. Figure 52).

	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 27 – Probabilité d'occurrence d'un glissement de terrain (Rey, 2016).

c) Intensité

L'intensité définit l'importance du phénomène (volume mobilisé). Les degrés d'intensité correspondent aux capacités à créer des préjudices (dommages engendrés, coût des parades...). Des zones homogènes sont définies, où le niveau d'exposition est jugé constant. Chaque zone homogène dispose d'un contexte géomorphologique similaire à celui existant au droit d'une zone ayant été affecté par l'évènement de référence connu ou prévisible. Ainsi, des secteurs n'ayant fait l'objet d'aucun témoignage d'instabilité peuvent être considérés comme exposés s'ils présentent un contexte géomorphologique similaire à un ou plusieurs secteurs actifs ou historiquement touché.

Une grille de définition de l'intensité est proposée pour La Réunion d'après les travaux de Rey, 2016 (Tableau 28).

	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 28 – Définition de l'intensité d'un glissement de terrain (Rey, 2016).

Dans la démarche STEPRIM, l'évènement attendu selon la période de référence est défini avec l'intensité suivante pour les glissements ponctuels (cf. chapitre 3.2.3) :

- Scenario fréquent¹¹ = intensité **moyenne à élevé**
- Scenario centennal¹² = intensité **très élevée**
- Scenario exceptionnel = intensité **très élevée**

¹¹ Rappel scenario fréquent:

- Bordure plateau Gd ilet : volume 15-20 000 m³, recul pls dizaines de m, jusqu'à 100m
- Bordure autres ilets : volume 5-10 000 m³, recul qq dizaines de m
- Autres secteurs (talus) : volume millier de m³, recul qq m, jusqu'à 10-15m.

¹² Rappel scenario centennal : Glissement en bordure des ilets 1-10 millions de m³, recul qq centaines de m

d) Aléa résultant

En fonction des différents paramètres retenus, quatre niveaux d'aléa sont définis à partir de la probabilité d'occurrence et de l'intensité, selon la grille ci-dessous (Tableau 29). Cette grille est appliquée pour les trois scénarii et pour les différents secteurs identifiés dans le scénario fréquent (bordure du plateau de Grand Ilet, bordure des autres ilets, talus routiers et escarpements topographiques).

		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 29 – Définition de l'aléa glissement de terrain pour les glissements spontanés.

4.2.2. Glissements permanents, de grande ampleur

Pour les glissements actifs, de grande ampleur connus dans le cirque de Salazie, la probabilité d'occurrence est toujours égale à 1. **C'est donc l'intensité du phénomène qui va conditionner le niveau d'aléa.** Cette intensité est définie à partir des vitesses de déplacements planimétriques et des tassements observés et de leur variation dans le temps.

Par ailleurs, le front des glissements de grande ampleur constitue généralement le secteur le plus actif, affecté par des phénomènes importants d'érosion régressive avec des reculs potentiellement importants.

Afin de garder une cohérence avec la méthodologie appliquée pour la caractérisation de l'aléa dans le cadre du PPR au droit des glissements de grande ampleur (cf. Note de présentation du dossier de PPR, juillet 2019), une démarche semblable est proposée dans le cadre de ce projet. Ainsi :

- Pour les terrains situés au front et en bordure des glissements, ces zones sont systématiquement considérées en aléa **élevé pour le scénario fréquent et très élevé pour le centennal et exceptionnel**. Au-delà des phénomènes brutaux pouvant survenir, ces terrains sont également soumis à des forts déplacements et à des accélérations notables liés au glissement actif, voire à d'importants tassements (secteur de Mare à Goyaves par exemple) avant rupture brutale potentielle.
- Pour les terrains au sein de l'emprise des glissements de grande ampleur, qui subissent ou subiront des désordres, les connaissances actuelles en termes de déplacements permettent de distinguer des zones à faibles et fortes vitesses, traduites en plusieurs niveaux d'aléa (Tableau 30) :

- Un **aléa moyen** pour les secteurs affectés par des vitesses de déplacement planimétrique **inférieures à 6-10 cm/an**, sans tassement significatif ni désordre connu en surface, pour les **scénario fréquent et centennal**, **élevé pour le scénario exceptionnel** ;
- Un **aléa élevé** pour les secteurs affectés par des vitesses planimétriques **supérieures à 6-10 cm/an et/ou des tassements significatifs (≥ 10 cm/an)**, pour les **scénario fréquent et centennal**, **très élevé pour le scénario exceptionnel**.

Scenario	Fréquent	Centennal	Exceptionnel
Evènement de référence du scénario	Accélération du glissement suite à pluie décennale	Accélération du glissement suite à pluie centennale	Emballement et déstabilisation généralisée du glissement
Secteurs au front et en bordure du glissement	Elevé	Très Elevé	Très Elevé
Secteurs dans l'emprise du glissement (zones centrales et arrières) avec vitesses planimétriques < 6-10 cm/an sans tassements ni désordres notables	Moyen	Moyen	Elevé
Secteurs dans l'emprise du glissement (zones centrales et arrières) avec vitesses planimétriques > 6-10 cm/an et/ou tassements notables	Elevé	Elevé	Très Elevé

Tableau 30 – Définition du niveau d'aléa au droit des glissements de grande ampleur du cirque de Salazie, en fonction du scénario envisagé, de la position géographique et des vitesses de déplacement enregistrées.

4.2.3. Application sur le site pilote de Grand Ilet

La méthodologie proposée ci-dessus a fait l'objet d'une application à l'échelle du plateau de Grand Ilet, confronté conjointement aux phénomènes de glissements spontanés et de glissement permanent de grande ampleur.

Sur cette zone d'étude, les aléas « glissement spontané » et « glissement permanent » ont été cartographiés indépendamment, puis assemblés afin d'obtenir une carte globale de l'aléa glissement de terrain, regroupant les deux phénomènes.

La zone d'étude englobe l'ensemble du plateau de Grand Ilet en incluant les secteurs de Casabois, Camp Pierrot et du Bélier. Les limites de la zone d'étude sont matérialisées par le lit de la Rivière Fleurs Jaune à l'Est, Sud et Sud-Est, par le lit de la Ravine Roche à Jacquot au Nord et par le rempart Ouest du cirque de Salazie (Cimendef, Piton Bémale, Bord Martin).

a) Glissements spontanés

Sur Grand Ilet, les paramètres suivants ont été retenus :

Facteurs de prédisposition :

- Topographie :
 - Pente faible < 15° ;
 - Pente modérée entre 15 et 30° ;
 - Pente forte > 30°

- Nature des formations : le plateau de Grand Ilet était majoritairement constitué de dépôts de glissement en masse et de brèches sensibles à l'érosion, des formations de **classe 2** ont été considérées.

Facteurs aggravants : Compte tenu des fortes pluviométries enregistrées dans le secteur de Grand Ilet, la présence de facteur aggravant lié à la pluie a été systématiquement considéré.

L'application de ces paramètres a permis d'établir une cartographie des probabilités d'occurrence pour les phénomènes de glissement spontané. La carte géomorphologique détaillée de la zone présentée en Figure 35 ainsi que le MNT 2015 de résolution 50 cm (Sintégra, Région Réunion) ont été utilisés en appui pour localiser avec précision les secteurs actifs, les zones d'escarpement...etc. La cartographie des probabilités d'occurrence est présentée ci-dessous (Figure 51).

Elle montre que la bordure du plateau, siège de déstabilisations fréquentes associées à des fortes pentes présente logiquement des probabilités d'occurrence élevées. Sur le plateau, les zones de pente faible disposent d'une probabilité d'occurrence faible. Toutefois, plusieurs escarpements, atteignant parfois des hauteurs de plus de 20 m sont présents sur le plateau. Ils témoignent notamment des déformations associées au glissement de grande ampleur qui affectent la zone d'étude. Selon la hauteur de ces escarpements et leur pente, la probabilité d'occurrence de déstabilisations rapides au droit de ces derniers varie de élevée à moyenne (hauteur > 10m et/ou pente > 30° = probabilité élevée ; hauteur < 10 m et/ou pente < 30° = probabilité moyenne).

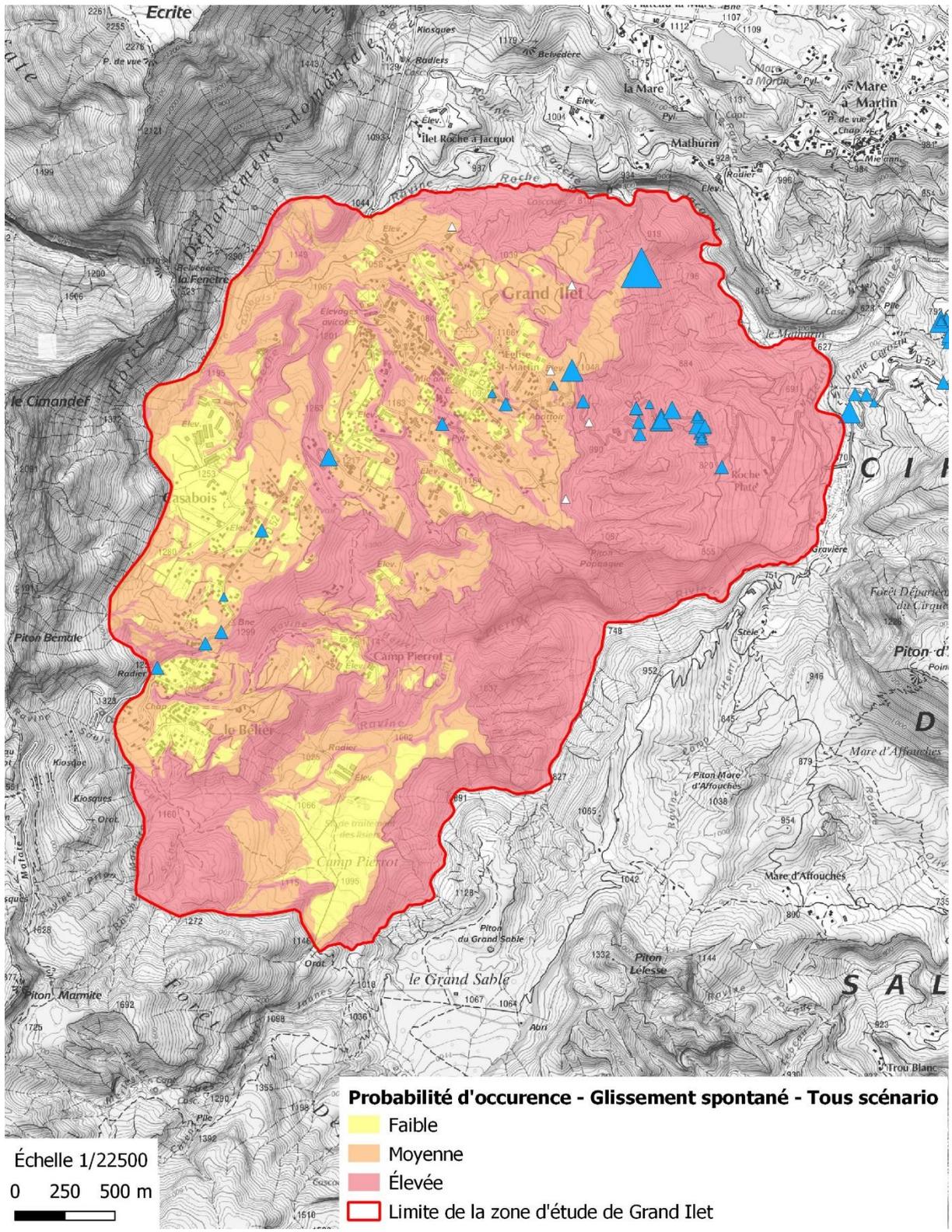


Figure 51 – Probabilité d'occurrence de glissements spontanés sur le secteur de Grand Ilet (fond Scan Topo IGN 1/25 000^e, 2015). Les triangles bleus et blancs représentent les évènements recensés à la BDMVT (cf. figure 23)

Sur Grand Ilet, l'analyse des phénomènes historiques, permet de définir l'intensité des phénomènes attendus comme suit :

- Scenario fréquent :
 - Intensité **élevée en bordure du plateau** (volume attendu de 15-20 000m³ avec des reculs maximums de l'ordre de 100 m) ;
 - Intensité **moyenne au droit des escarpements** (volume attendu de l'ordre du millier à quelques milliers de m³, avec des reculs de l'ordre de 10-15 m maximum) ;
 - Intensité faible sur le reste du plateau.

- Scenario centennal :
 - Intensité **très élevée en bordure du plateau** (volume attendu de 1-10 millions de m³ avec des reculs de l'ordre de 400 m, proche de ceux observés lors des phénomènes de déboulés) ;
 - Intensités identiques au scenario fréquent ailleurs.

Afin d'obtenir une gradation cohérente de l'intensité, un bandeau d'intensité moyenne de 30 m de largeur a été appliqué en arrière de l'intensité élevée pour le scenario fréquent. Cette largeur correspond à la différence entre les plus grands reculs observés (70 m et 100 m) sur des phénomènes de cette ampleur et permet de prendre en compte l'incertitude associée au phénomène.

De la même manière, un bandeau d'intensité élevé de 100 m de large a été appliqué en arrière de l'intensité très élevée pour le scenario centennal afin de prendre en compte l'incertitude associée aux phénomènes attendus sur cette période de référence.

Les cartographies d'intensité sont présentées sur la Figure 52 ci-dessous.

Enfin, l'aléa résultant « glissement spontané » a été obtenu par application de la matrice du Tableau 29 et est présenté sur la Figure 53.

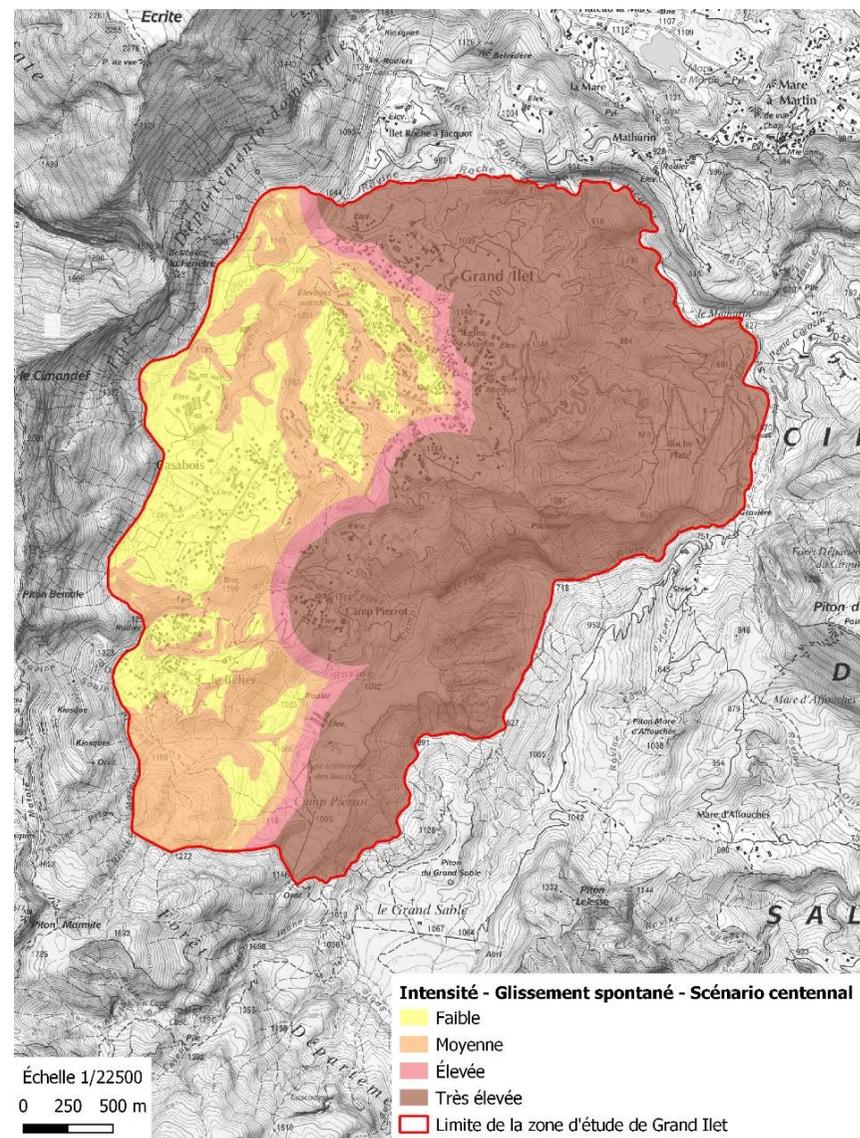
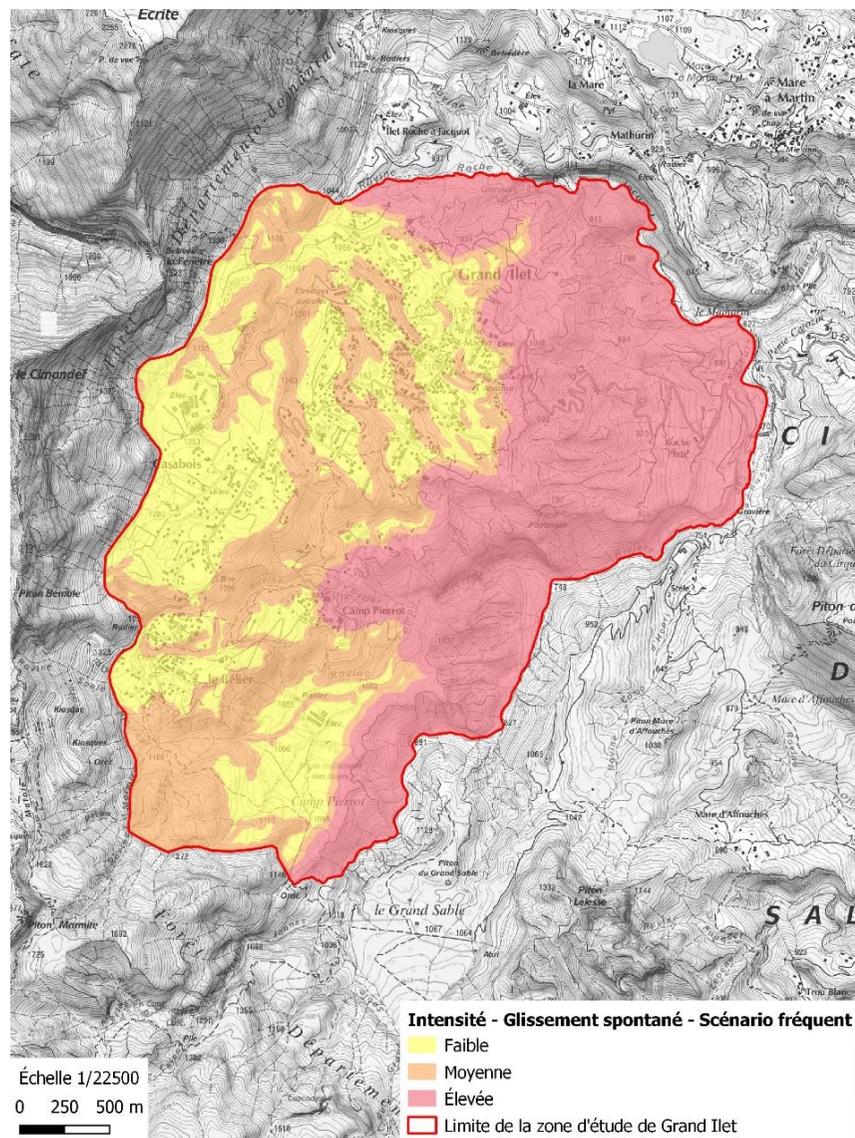


Figure 52 – Cartographie des intensités attendues pour le scénario fréquent (à gauche) et le scénario centennial (à droite) pour des phénomènes de glissements spontanés (fond Scan Topo IGN 2015).

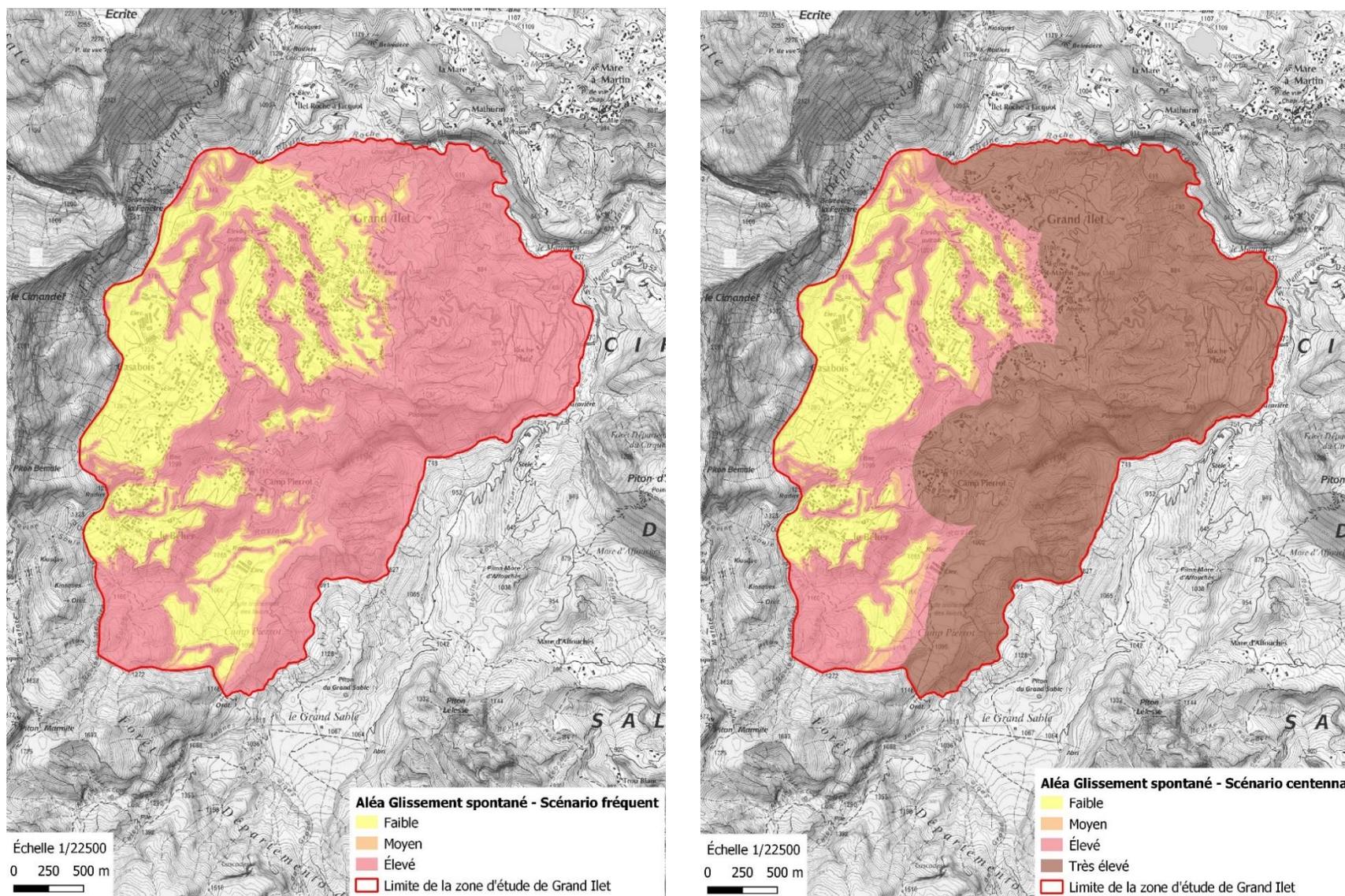


Figure 53 – Cartographies de l'aléa glissement spontané sur le secteur de Grand Ilet, pour le scénario fréquent (à gauche) et le scénario centennial (à droite).

b) Glissement de grande ampleur

Grand Ilet est le siège d'un glissement lent, de grande ampleur dont le front se situe à l'extrémité Nord-Nord-Est du plateau. L'analyse et l'interpolation des vitesses de déplacement horizontal et des tassements depuis 2003 sur le secteur a permis d'élaborer la cartographie d'aléa pour ce phénomène, pour le scénario fréquent et centennal, en appliquant la méthodologie proposée au paragraphe 4.2.2. (Figure 54).

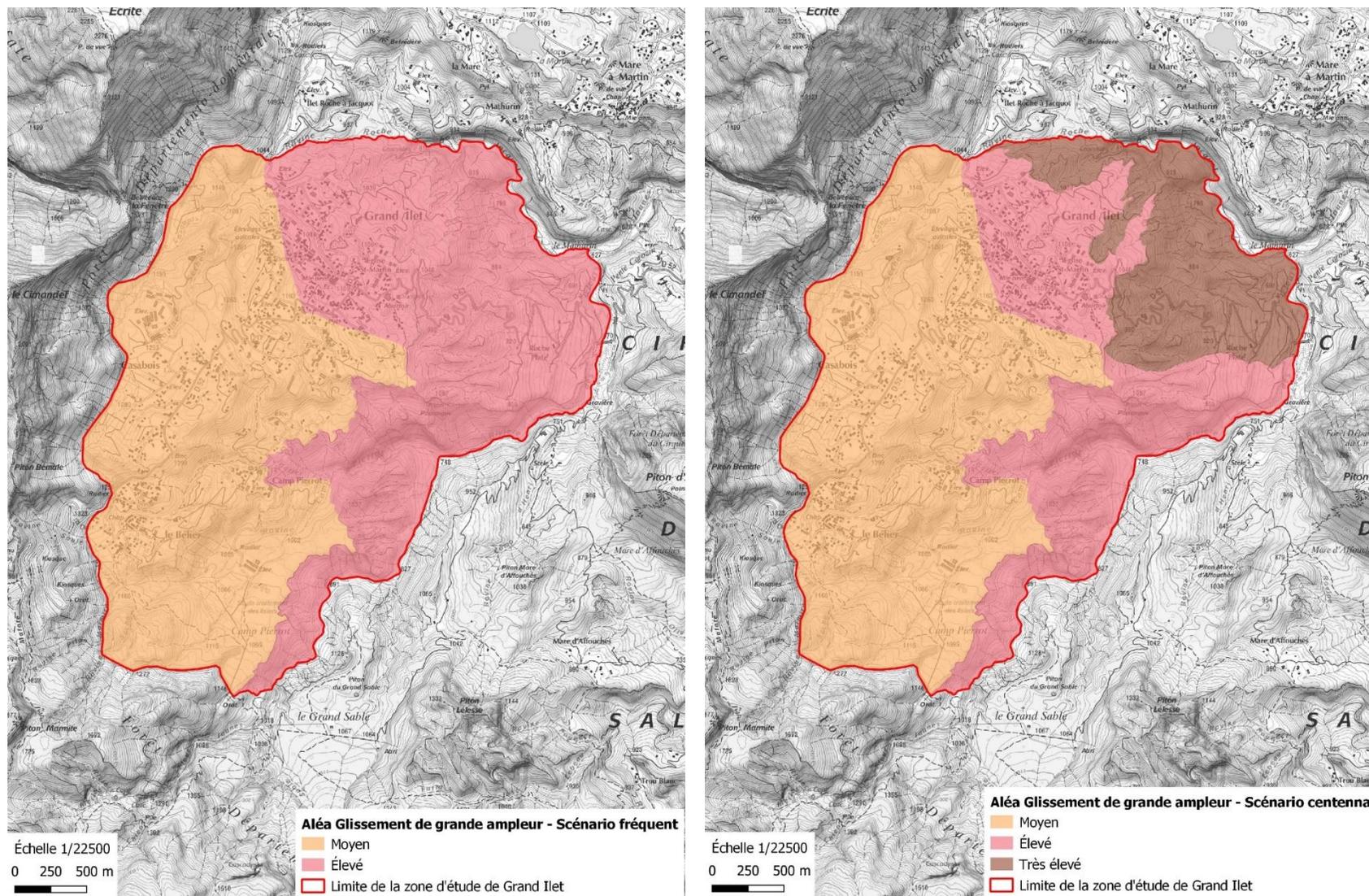


Figure 54 – Aléa Glissement de grande ampleur sur le secteur de Grand Ilet pour le scénario fréquent (à gauche) et centennal (à droite) (fond Scan Topo IGN 2015).

c) Croisement des aléas glissement spontané & glissement de grande ampleur

Les deux phénomènes étant présents conjointement sur la zone d'étude, le croisement des cartes d'aléas glissement spontané et glissement de grande ampleur fournit une carte d'aléa générale incluant l'ensemble des processus de glissements de terrain.

Ces cartes sont présentées ci-dessous (Figure 55).

Lors de la réalisation de la carte d'aléa « Mouvement de terrain » à l'échelle du cirque, l'aléa « Chute de bloc » sera également intégré à cette cartographie de l'aléa « Glissement de terrain ». En effet, la bordure ouest du plateau de Grand Ilet se situe au pied du rempart du Cimendef, et est donc exposée à des phénomènes de chute de blocs et éboulements en masse.

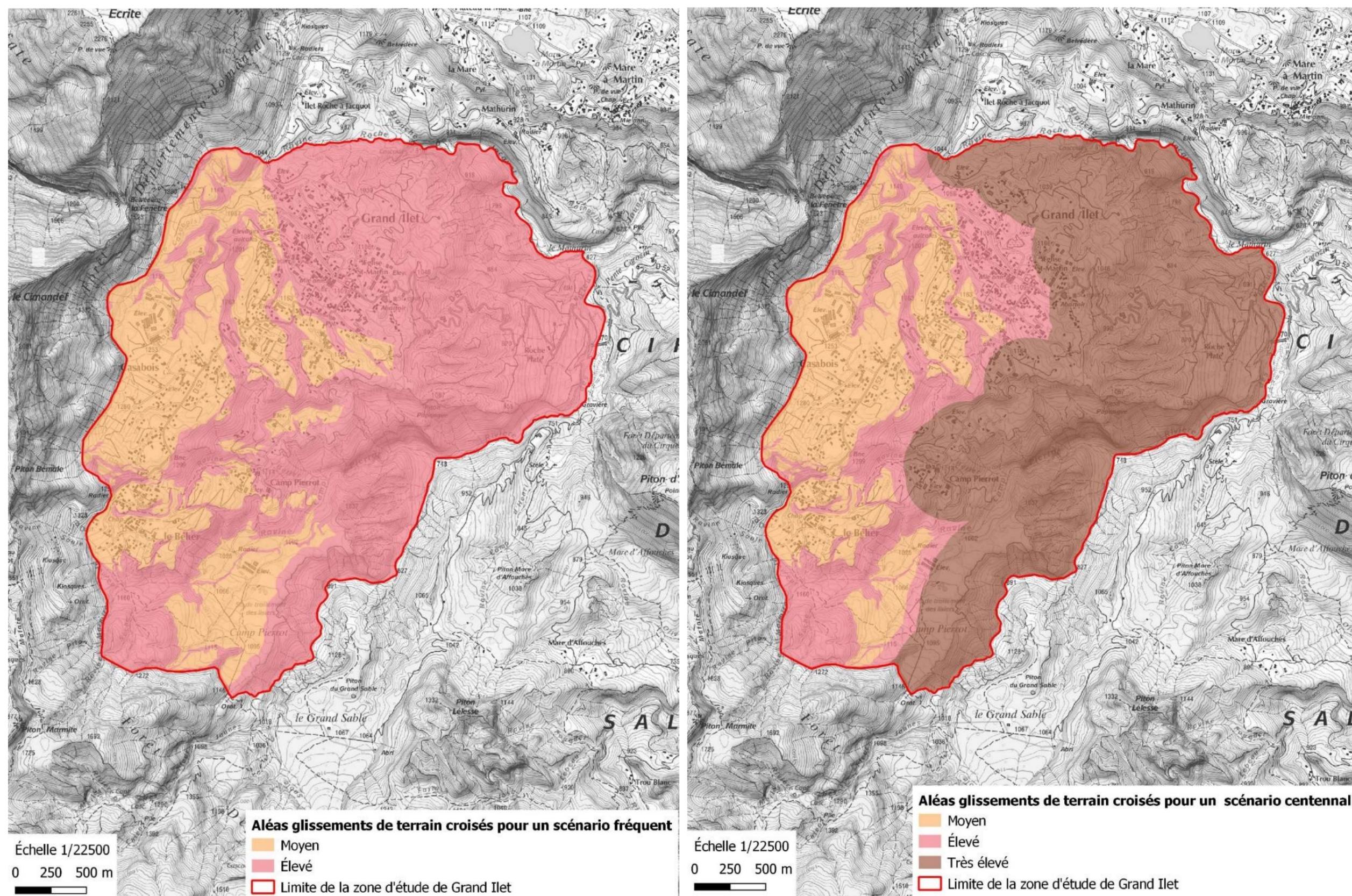


Figure 55 – Aléa glissement de terrain sur le secteur de Grand Ilet pour un scénario fréquent (à gauche) et centennial (à droite).

5. Conclusion

La première étape pour l'établissement d'une stratégie territoriale de prévention des risques en montagne (STEPRIM) consiste à acquérir cette connaissance du territoire considéré, à travers la réalisation d'un diagnostic approfondi. Dans cette optique, la DEAL Réunion a missionné le BRGM pour la réalisation du volet « *Connaissance des aléas* » du diagnostic, sur le secteur du cirque de Salazie, pour les phénomènes de chute de blocs et de glissements de terrain.

L'objectif de ce travail a été d'identifier sur le territoire d'étude, les zones d'emprises potentielles de chaque type d'aléa considéré (chutes de blocs et glissement), selon trois scénarii: un scénario fréquent (ordre de grandeur de la période de retour : 10-30 ans), un scénario centennal et un scénario exceptionnel (événement extrême, réaliste). Pour cela, l'approche qualitative « à dire d'expert » généralement utilisée a été couplée à une approche quantitative basée sur un recueil des données historiques, une étude statistique de ces données et l'utilisation de modèles physiques (trajectographie). A partir de cette analyse, le but a été de proposer des **intensités attendues pour chaque phénomène** et pour chaque scénario STEPRIM et de déterminer **l'approche méthodologique de qualification de l'aléa la plus adaptée**.

L'évaluation de l'aléa chute de bloc bénéficie d'un retour d'expérience et d'avancées méthodologiques récentes qui permettent une caractérisation plus précise et plus élaborée des phénomènes attendus selon la période de référence considérée. Des éboulements de l'ordre de la centaine de m³ à quelques milliers de m³ sont considérés pour le scénario fréquent et des événements allant du millier à la dizaine de milliers de m³ sont considérés pour le scénario centennal. Pour le scénario exceptionnel, des événements catastrophiques de type effondrement en très grande masse (plusieurs millions de m³) sont envisagés. Pour ces derniers, les processus de propagation étant encore mal contraints, l'évaluation de l'aléa et notamment des distances d'atteintes se doit d'être précisé par des études complémentaires.

L'aléa glissement de terrain qui fait intervenir des processus plus complexes et sur lequel le retour d'expérience est moindre, a été ici évalué principalement à partir d'une approche qualitative à dire d'expert. La complexité des phénomènes est ici exacerbée par l'existence de plusieurs glissements lents de grande ampleur à l'échelle du Cirque, encore mal appréhendés malgré les nombreux travaux engagés depuis plusieurs années. Toutefois, l'acquisition de nouvelles données dans le cadre de projets de recherche actuellement en cours (RenovRisk-Erosion), a déjà permis d'améliorer le niveau de connaissance sur ces phénomènes, et permettra dans un avenir proche de préciser la typologie et la dynamique des phénomènes attendus dans le cirque de Salazie. La définition des scénarii STEPRIM ainsi que la méthodologie de caractérisation de l'aléa pourra ainsi être éventuellement précisée et améliorée sur la base de ces éléments nouveaux.

La mise en application cartographique des niveaux d'aléa pour les différents scénarios a été menée à l'échelle de zone pilotes, caractérisées par leur exposition et leur concentration d'enjeux, en particulier pour l'aléa chute de bloc. Dans les prochaines étapes du projet, cette cartographie a vocation à être étendue à l'échelle du Cirque de Salazie. Puis, grâce au recensement des enjeux présents dans le Cirque, une cartographie du risque pourra être élaborée, permettant de hiérarchiser les zones les plus exposées aux phénomènes gravitaires et de prioriser les actions de sécurisation à mener à court terme sur ce territoire.

6. Bibliographie

Aunay, B., Bès de Berc S. et Weyland G. (2015) – Cirque de Salazie : exposition des habitations aux phénomènes gravitaires. Rapport BRGM/RP-64089-FR, 74p.

Auber, B. et al. (2003) – Salazie – Ile de La Réunion. Exposition des routes départementales RD48 et RD52 aux phénomènes naturels. Sectorisation de l'exposition du tracé routier. BRGM/RP-52744-FR, 41p., 3 fig., 7 annexes.

Azemard, P. (2018) – The RN1 in Reunion Island : Rock Hazard Management : circulation management, protections works and new route, International Symposium Rock Slope Stability 13-15 november 2018, Chambéry (France).

Belanger, A., Aunay B. (2008) – Suivi des glissements de Hell-Bourg et de Grand Ilet par les stations GPS permanentes. BRGP/RP-56708-FR, 62 p.

Belle, P. (2014) – Contribution des processus hydrologiques et hydrogéologiques aux glissements de terrain de grande ampleur. Application au contexte tropical de La Réunion. Thèse de doctorat. Université de La Réunion – BRGM, 348 p.

Berger, F. (2009) – CEMAGREF : 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.

Billard, G. (1974) – Carte géologique de la France – La Réunion. Echelle 1/50000, en collaboration avec P.M. Vincent. Carte (4 feuilles) et notice explicative, Editions du BRGM.

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 p.

Cance, A., Rey A. (2018) – Plan de Prévention des Risques Naturels « inondations et mouvements de terrain » de Salazie. Suivi du réseau géodésique du cirque de Salazie. Rapport BRGM/RP-68284-FR. 35p., 11 ill., 7 tab.

Chaput, M. (2020) – Caractérisation des aléas glissement de terrain et chute de blocs. Etat de l'art et apport des techniques récentes. Rapport final. BRGM/RP-69751-FR, 69p., 24 fig., 19 tabl., 1 ann.

Colas, B., Faure P., Rohmer J. (2017) – Valorisation des travaux réalisés dans le cadre du GT MEZAP (année 1). Rapport d'avancement. BRGM/RP-66589-FR, 64 p., 57 fig., 1 ann.

Dewez, T., Chamblas G., Lasseur E., and Vandromme R. (2009). Five seasons of chalk cliff face erosion monitored by terrestrial laser scanner : from quantitative description to rock fall probabilistic hazard assessment. *Géophysical Research Abstracts*, 11, 2009-8218.

Dussauge-Peissier, 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.

Garnier, C. (2008) – Etude du glissement de terrain de grande ampleur de Grand Ilet, Cirque de Salazie – Ile de La Réunion. Rapport BRGM/RP-56706-FR, 74 p., 54 fig., 3 tab., 1 ann.

Garnier, C., Lucas E. (2008) – Etude du glissement de terrain de grande ampleur d’Hell-Bourg, Cirque de Salazie. Rapport BRGM/RP-56725-FR. 76p.

Hantz, D. (2011) – Quantitative assessment of diffuse rock fall hazard along a cliff foot, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1303-1309, doi : 10.5194/nhess-11-1303-2011.

Hantz, D., Colas, B., Dewez, T. Levy, C., Rossetti, J.P., Guerin, A. et M. Jaboyedoff (2020) – Caractérisation quantitative des aléas rocheux de départ diffus, *Rev. Fr. Geotech.*, 163, 2, doi : 10.1051/geotech/2020011.

Lacquement, F., Nehlig P. (2008) – Notice des cartes géologiques des cirques du Piton des Neiges (Ile de La Réunion, France). BRGM/RP-56730-FR, 96 p.

Le Moigne, B., Rault C. (2019) – Surveillance de l’évolution du glissement de Ravine Roche à Jacquot d’août 2015 à août 2019. Rapport BRGM/RP-69492-FR, 36 p.

Levy, C., Colas, B., Rohmer, J., Berger, F. (2021) – ELANA (Energy Line Angle Normalized Area) : un outil d’aide à la cartographie de la propagation des chutes de blocs basée sur la méthode de la ligne d’énergie à différentes échelles, 5th RSS Rock Slope Stability Symposium – Chambéry 2021.

Mazué, R., Aunay, B. et Belle P. (2013) – Suivi des réseaux géodésiques dans les cirques de La Réunion – Rapport BRGM/RP-61994-FR, 57p.

IRSTEA, 2013 – Modélisation des pluies sur l’île de La Réunion – Méthode SHYREG.

Nédellec, J.L., et Cruchet M. (2008) – Analyse des modes d’effondrement en masse sur plusieurs sites de La Réunion. Rapport BRGM/RP-56729-FR, 100p.

Picarelli, L., Oboni F., Evans S., Mostyn G., and Fell R. (2005) – Hazard characterization and quantification, in : *Landslide Risk Management*, edited by Hungr O., Fell R., Couture R., and Eberhardt E., Taylor and Francis Group, London, 27-61.

Pinchinot, H. (1984) – Etude géologique des formations superficielles et du proche substratum à Grand Ilet (Cirque de Salazie, La Réunion). Application à la cartographie du risque de mouvements de versants. Thèse de doctorat, Université scientifique et médicale de Grenoble.

Plan de prévention des risques naturels prévisibles « Inondation et mouvements de terrain » - Commune de Salazie. Note de présentation, juillet 2019.

Rat, M. (2006) – Optimisation de la gestion de la route du littoral à La Réunion vis-à-vis du risque de chute de blocs. *Bull. Laboratoires Ponts & Chaussées*, 263-264, p. 43-52.

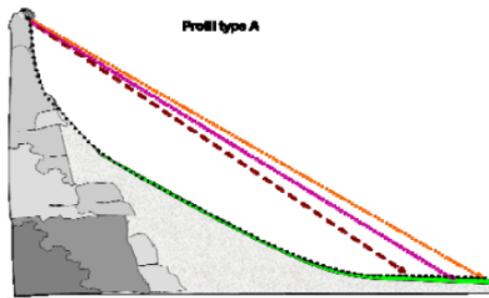
Rault, C. et al. (2021) – Landslide processes involved in volcano dismantlement from past to present mechanisms : The Cirque of Salazie a remarkable laboratory, in prep for submission to *JGR Earth Surface*.

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

Salvany, T., Lahitte P., Nativel, P. et Gillot P.Y (2012). Geomorphic evolution of the Piton des Neiges volcano (Reunion Island, Indian Ocean) : competition between volcanic construction and erosion since 1.4 Ma. *Geomorphology*, 136(1), 132-147.

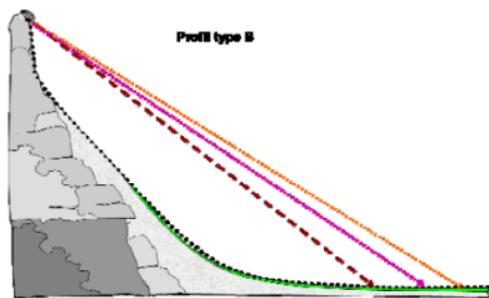
7. Annexes

7.1. ANNEXE 1 : GAMMES DE VALEURS D'ANGLES D'ENERGIE EN FONCTION DES PROFILS DE PENTE POUVANT ETRE RENCONTRES (MEZAP, 2014).



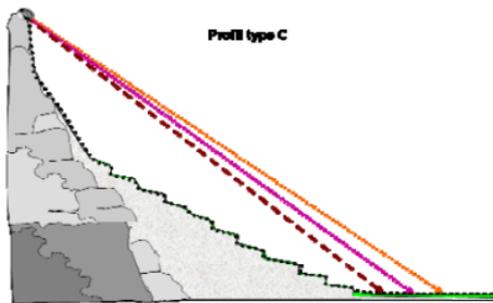
A) Description : Profil de pente régulière en pied de zone de départ.

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°)



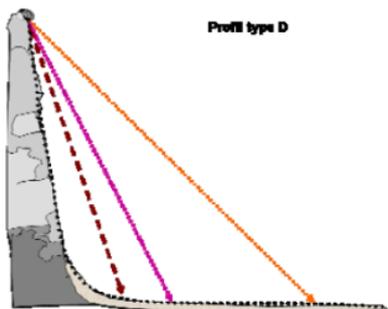
B) Description : Profil de pente régulière en pied de zone de départ avec replat marqué en fin de trajectoire.

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°)



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

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