

Géosciences pour une Terre durable

brgm



SGNC

Service Géologique
de NOUVELLE-CALÉDONIE

Cartographie de l'aléa mouvement de terrain Méthode générale (Nouvelle Calédonie) Echelle 1:25 000^{ème}

Rapport d'avancement année 2020

BRGM/RP-70345-FR / DIMENC/SGNC-2020(07)
Novembre 2020

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

B. Colas, Y. Thiery, Y. Guyomard, M. Mengin, R. Vandromme, O. Monge

Vérificateur :

Nom : S. Bernardie

Fonction : Ingénieure
géotechnicienne

Date : 03/12/2020

Signature :



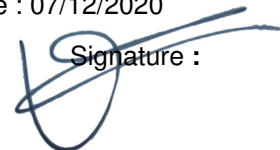
Approbateur :

Nom : V. Mardhel

Fonction: Directeur Antenne
Nouvelle Calédonie

Date : 07/12/2020

Signature :



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

Mots-clés : aléa, mouvement de terrain, glissement de terrain, chutes de blocs, laves torrentielles, Nouvelle Calédonie, Mont-Dore

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

B. Colas, Y. Thiery, Y. Guyomard, M. Mengin, R. Vandromme, O. Monge (2020) – Cartographie de l'aléa mouvement de terrain. Méthode générale. (Nouvelle Calédonie). Echelle 1 :25 000^{ème}. Rapport final. BRGM/RP-70345-FR, 161 p., 110 illustrations.

SYNTHESE

Lors des événements météorologiques intenses de novembre 2016, la commune de Houaïlou a connu des phénomènes de mouvements de terrain et de coulées boueuses qui ont été la cause de pertes humaines. L'aléa « mouvements de terrain » à l'échelle du pays reste encore en grande partie peu pris en compte par les populations et les autorités. En Nouvelle-Calédonie la prévention des risques de toutes natures est principalement une mission de sécurité civile depuis le 1^{er} janvier 2014. Dans ce cadre, le gouvernement de Nouvelle-Calédonie par son service géologique (SGNC) et le BRGM se sont associés pour l'établissement de cartes d'aléas mouvements de terrain, à l'échelle du 1:25 000^{ème}, dans le cadre d'un programme pluriannuel sur quinze communes.

Le présent document décrit la méthode développée et sa mise en œuvre à l'échelle d'une commune « pilote » (commune du Mont-Dore). Des rapports communaux seront produits sur cette base pour chaque commune à traiter au rythme de quatre communes environ par an à partir de 2021. Au terme de l'année 2020, un premier rapport communal (commune du Montdore) a été produit.

La méthode proposée se définit comme suit :

- Constitution d'un **inventaire des événements** passés, le plus exhaustif possible à l'échelle du territoire ;
- Définition d'une **typologie des phénomènes**. À partir de l'inventaire de la commune pilote il est déterminé quatre types de phénomènes à cartographier : i) GG : Glissement dans matériaux grossiers ; ii) GF : Glissement dans matériaux fins ; iii) LT : Lave-torrentielle ; iv) CB : Chute de blocs ;
- Qualification de l'aléa à l'appui d'une matrice « **occurrence / intensité** » :
 - o L'intensité traduisant l'importance du phénomène (volume mobilisé, dynamique, énergie...) et présume de ses conséquences (dommages aux bâtiments), est évaluée selon les volumes unitaires mobilisés (pour les chutes de blocs) ou les vitesses de mouvement pour les autres types ;
 - o L'occurrence (spatiale et temporelle) intègre **la rupture** potentielle et **la propagation** des masses en versant :
 - La rupture est évaluée suivant une approche statistique calée sur les données d'inventaire qui pondère l'influence des facteurs de prédisposition à l'apparition des phénomènes ;
 - La propagation des phénomènes est réalisée à partir de méthodes empirique (pour les chutes de blocs) ou à l'appui de simulation numérique pour les autres phénomènes.

La validation des cartes par type de phénomène s'effectue à l'avancement du projet par rétro-analyse sur les données événementielles, par expertise et visite de terrain et par comparaison qualitative avec la connaissance actuelle de l'aléa « mouvement de terrain ».

Une agrégation des aléas est proposée afin d'obtenir une carte d'aléa « Mouvement de terrain » unique. Les restitutions des cartes sont réalisées sous forme d'atlas au format A3, à l'échelle du 1:25 000^{ème}. En synthèse seront rappelées les surfaces communales exposées aux différents aléas (exprimées en valeur absolue et en pourcentage).

Afin d'initier une réflexion sur la valorisation des cartes produites, une première qualification de l'exposition des enjeux est menée en calculant la distribution des bâtiments exposés à l'aléa mouvements de terrain à l'échelle de la commune pilote.

Sommaire

1	INTRODUCTION	15
1.1	Cadrage du projet	15
1.2	Programme de travail	18
1.3	Calendrier de réalisation	20
1.4	Produits livrés.....	20
1.5	Contenu du document	21
2	CONTEXTE PHYSIQUE GÉNÉRAL.....	23
2.1	Contexte géographique et morphologique.....	23
2.1.1	Situation géographique	23
2.1.2	Contexte géomorphologique.....	24
2.2	Contexte géologique	25
2.2.1	Le socle anté-crétacé supérieur : la marge active du Sud-Est Gondwana	26
2.2.2	Du rifting marginal crétacé à l'obduction éocène.....	26
2.2.3	Le complexe subduction-obduction.....	27
2.2.4	L'évolution post-obduction	30
2.3	Le régolithe, formations d'altération et formations de versants	31
2.3.1	Les formations autochtones ou en place.....	31
2.3.2	Les formations allochtones ou remaniées.....	38
2.4	Contexte hydrogéologique.....	43
2.4.1	Dans les péridotites	43
2.4.2	En contexte volcano-sédimentaire	44
2.5	Contexte climatique.....	46
2.5.1	Le climat	46
2.5.2	Les précipitations.....	46
2.5.3	Catalogue des cyclones, dépressions tropicales et tempêtes en Nouvelle-Calédonie	50
2.5.4	Zonage climatique	51
2.5.5	Exemple de définition du forçage météorologique à Thio.....	52
3	COLLECTE ET STRUCTURATION GÉNÉRALE DES DONNÉES	55
3.1	Données de base	55
3.2	Données relatives aux mouvements de terrain.....	55
3.2.1	Données existantes	55
3.2.2	Atlas	60
3.2.3	Document de synthèse du BRGM (2003)	64

4	TPOLOGIE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN.....	67
4.1	Généralités.....	67
4.1.1	Classification des mouvements de terrain.....	67
4.1.2	Facteurs d'instabilité	69
4.1.3	Intensité des phénomènes	74
4.2	Etat des connaissances sur les phénomènes en Nouvelle-Calédonie	77
4.2.1	Les chutes de blocs	77
4.2.2	Les mouvements en grande masse	79
4.2.3	Les glissements	83
4.2.4	Coulées boueuses, coulées de débris / laves torrentielles	84
4.2.5	Le ravinement.....	87
4.2.6	Les lavakas.....	88
4.2.7	Engrèvement, charriage, débordement, divagation torrentielle	89
4.2.8	Synthèse.....	91
4.3	Inventaire des mouvements de terrain.....	94
4.3.1	Inventaire communal des mouvements de terrain.....	94
4.3.2	Structuration des données	98
4.4	Typologie des mouvements pour le programme de cartographie	99
4.4.1	Glissements grossiers (GG).....	100
4.4.2	Glissements fins (GF)	103
4.4.3	Laves torrentielles (LT)	107
4.4.4	Coulées (COUL)	111
4.4.5	Chutes de blocs (CB).....	115
4.4.6	Grands glissements de versant (GGV).....	119
4.5	Base de données mouvements de terrain	119
5	MÉTHODE	123
5.1	Définitions et principes	123
5.2	Aléa de référence	127
5.3	Méthode déployée.....	128
5.3.1	Intensité.....	128
5.3.2	Occurrence (ou atteinte)	129
5.3.3	Aléa résultant.....	136
5.4	Cartographie par phénomène.....	137
5.4.1	Méthode de traitement.....	137
5.4.2	Validation des méthodes et des résultats, correction éventuelles.....	145
5.4.3	Cartes d'aléa par phénomène	145
5.5	Carte d'aléa mouvement de terrain – Synthèse	146
6	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	155
7	BIBLIOGRAPHIE	157

7.1	Guides.....	157
7.2	Rapports	157
7.3	Documents académiques.....	161
8	ANNEXES.....	163
	Annexe 1 : Catalogue des cyclones, dépressions tropicales et tempêtes (d'après meteo.nc)	
	Annexe 2 : Descriptif des champs de la base de données « mouvements de terrain » constituée dans le cadre du projet	
	Annexe 3 : Paramètres de calage des analyses sur la commune pilote	

Liste des illustrations

illustration 1 – Carte des communes prioritaires pour le programme de cartographie.....	17
illustration 2 – Tentative de hiérarchisation des communes prioritaires pour le programme de cartographie.....	18
illustration 3 – Déroulement des cartographies à l'échelle communale (* : à adapter selon phénomènes redoutés).....	19
illustration 4 – Calendrier de réalisation prévisionnel d'une carte communale.....	20
illustration 5 – Calendrier de réalisation prévisionnel des 15 communes.....	20
illustration 6 - Carte de la nature du socle et éléments structuraux associés (Collot et al., 2011).....	23
illustration 7 - a) Carte géologique simplifiée de la Nouvelle-Calédonie à l'échelle du 1:500 000 ^{ème} (Maurizot et Vendé-Leclerc, 2009) et isobathes 500 m et b) coupes géologiques simplifiées localisées sur a (Cluzel et al., 2012a).....	25
illustration 8 - Carte géologique simplifiée des massifs de péridotite de Nouvelle-Calédonie et surfaces d'altération maîtresses, modifiée après Maurizot et Vendé-Leclerc (2009), sur fond de carte de l'anomalie gravimétrique à l'air libre des bassins adjacents à la Gran.....	29
illustration 9 - Profil d'altération type sur substrat ultrabasique (modifié d'après Sevin, 2014 et GSEGWP, 1990).....	33
illustration 10 - Profil d'altération sur cherts noirs, pendage original des bancs encore visibles.....	36
illustration 11 – Instabilité d'un talus routier dans des siltites charbonneuse du Jurassique entièrement argilitisées (Gohapin, Poya).....	36
illustration 12 – Talus de carrière dans les basaltes avec altération typique couleur chocolat au lait.....	37
illustration 13 – Altération en boule typique des flyschs volcano sédimentaire.....	37
illustration 14 - Récapitulatif des faciès géologiques décrivant des formations de versant sur la carte géologique à l'échelle du 1 :50 000 ^{ème}	39
illustration 15 – Schéma des faciès rencontrés sur versant de massif de péridotites.....	41
illustration 16 – Carte hydrogéologique de la Nouvellele Calédonie.....	43
illustration 17 – Horizons hydrodynamiques des péridotites de Nouvelle-Calédonie (Jeanpert, 2017).....	45
illustration 18 – Moyenne interannuelle des précipitations sur l'ensemble de la Grande Terre (1990-2009, Romieux 2011).....	47
illustration 19 – Intensité, Durée, Fréquence (IDF) Quantile de durée 15 minutes et période de retour 100 ans (Romieux 2011).....	48
illustration 20 – Intensité, Durée, Fréquence (IDF) Quantile de durée 1 heure et période de retour 100 ans (Romieux 2011).....	49
illustration 21 – Episodes pluvieux les plus intenses relevés entre 1961 et 2018 en Nouvelle Calédonie (http://pluiesextremes.meteo.fr/nouvelle-caledonie/).....	50
illustration 22 – Tableau de synthèse de quelques événements mémorables ((http://pluiesextremes.meteo.fr/nouvelle-caledonie/)).....	51
illustration 23 – Zones climatiques en Nouvelle-Calédonie (http://pluiesextremes.meteo.fr/nouvelle-caledonie/).....	52
illustration 24 – Principales caractéristiques des précipitations à Thio, par période entre les différentes campagnes de photographies aériennes (d'après Garcin, 2017).....	53
illustration 25 – Données fondamentales utilisées ou constituées.....	55
illustration 26 – Evènements « mouvements de terrain » marquants (source DRM, 2016).....	56
illustration 27 – Coupures de presse suite au cyclone Anne (http://pluiesextremes.meteo.fr/).....	57
illustration 28 – Vue sur les versants du Massif de Bel Air suite à l'épisode pluvieux du 24-12-2011 a) centre de secours ruiné ; b) secteur de Gouareu avec coulées de matériaux sur les versants.....	58
illustration 29 – Vue sur le massif de Bel Air, Houaïlou, secteur de Gouareu après épisode pluvieux du 22-11-2016.....	59
illustration 30 – Exemple de carte issue des cartes informatives de phénomènes des atlas (zone de Goro, 2003, BRGM RP-51623-FR).....	61
illustration 31 – Exemple de phénomène répertoriés (zone de Goro, 2003, BRGM RP-51623-FR).....	62
illustration 32 – Récapitulatif des travaux réalisés dans le cadre des atlas entre 1998 et 2005.....	63
illustration 33 – Exemple de carte fournie (zone de Tontouta, 1999, BRGM RP-40476-FR).....	64
illustration 34 – Classification des mouvements de terrain (Varnes, 1978).....	68
illustration 35 – Représentation du champ de l'hydraulique torrentielle par rapport aux mouvements de terrain et à l'hydraulique fluviale (Meunier, 1994).....	69
illustration 36 – Synthèse des principaux facteurs d'instabilité aux mouvements de terrain (Colas, 2008).....	73

illustration 37 – Qualification de l'intensité (principe selon le guide méthodologique PPR).....	74
illustration 38 – Exemple d'échelle conventionnelle d'intensité, en fonction des parades envisageables (guide méthodologique PPR)	74
illustration 39 – Exemple d'échelle d'intensité (Hervas, 2007).....	75
illustration 40 – Exemple d'échelle d'intensité basée sur les vitesses (International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, 1995, Cruden DM, Varnes DJ, 1996).....	76
illustration 41 – Exemple d'échelle d'intensité basée sur les vitesses (Thiery, 2007)	76
illustration 42 - Exemple de chute de bloc, substrat péridotitique, Poro, route du bord de mer, SGNC 201978	
illustration 43 – Exemples d'écroulement sur substrat péridotitique a) NEWCO2 (Kouaoua, cliché Fond Nickel) b) écoulement de Kaala-Gomen	80
illustration 44 – Exemples d'écroulement en masse sur substrat volcano-sédimentaire a) écoulement de la Néra au col de Gouaro (Maurizot, 2003) ; b écoulement de la Ouième (SGNC 2019)	80
illustration 45 - Inventaire des grands glissements de versants (Rouet, 2009)	81
illustration 46 – Typologie de l'évolution des grandes masses ultrabasiques glissées (I. Rouet, 2018) ...	82
illustration 47 – Vue aérienne du mont Mou depuis l'Ouest (en rouge la zone de rupture, en grisé les zones glissées, Maurizot, 2007).....	82
illustration 48 – Glissements rotationnels et translationnels (d'après USGS 2004).....	83
illustration 49 – a) Vue sur un talweg après passage d'une lave torrentielle (Houailou), b) Vue sur un talweg avec trace ancienne supposée (Thio)	86
Illustration 50 - Vue sur un secteur en érosion dans les pélites charbonneuse crétacées, Ouaménie	87
illustration 51 – Bordure latéritique verticale typique avec prismes verticaux en place et basculés.....	89
illustration 52 – Vues sur les parois latéritiques avec de nombreuses cavités et traces de dépôt	89
illustration 53 - Vue sur un creek surengravé, Thio, cote est.....	90
illustration 54 – Essai de classification des désordres sur massif péridotitique selon la lithologie (zone de Tontouta, 1999, BRGM RP-40476-FR)	91
illustration 55 – Tentative de typologie selon critères géomorphologiques et contextes hydrogéologiques et géotechniques (zone de Dumbéa-Païta, 1998, BRGM RP-40403-FR)	92
illustration 56 – Tentative de définition des processus selon la lithologie et les processus de transport (zone de Tontouta, 1999, BRGM RP-40776-FR)	92
Il est finalement possible de récapituler les types mouvement de terrain connus sur les domaines péridotitiques et volcano-sédimentaire (illustration 57 Erreur ! Source du renvoi introuvable.).....	93
illustration 58 – Tableau récapitulatif des phénomènes connus par type de substratum	93
illustration 59 – Glissement de Nondoué (Dumbéa) 10/10/1999 (BRGM RP-52213-FR, cliché BRGM) ..	94
illustration 60 – Creek Jeanne et Marie le 3/07/1990 (cliché B. Pelletier, atlas Thio BRGM RP-50845-FR))95	
illustration 61 – Glissement de terrain, RP1 Pont des Français 13/05/2018 (cliché NC la 1ère).....	95
illustration 62 – Exemple d'identification de mouvement à partir d'images Google Earth (lave torrentielle à Houailou)	97
illustration 63 – Définition des enveloppes décrivant les mouvements de terrain (Thiery, 2007) et exemple de report sur la commune du Mont-Dore	98
illustration 64 – Typologie des mouvements de terrain	100
illustration 65 – Glissements grossiers (GG), massif péridotitique de Bel Air Houailou	101
illustration 66 – Synthèse : glissements grossiers (GG)	102
illustration 67 – Glissements fins.....	105
Illustration 68 – Synthèse : glissements fins (GF).....	106
Illustration 69 – Mécanismes des laves torrentielles (d'après Remaitre, 2006).....	108
Illustration 70 – Laves torrentielles	109
Illustration 71 – Synthèse : Synthèse : laves torrentielles (LT)	110
Illustration 72 – Ablation après coulée boueuse suite au passage de la Tempête Freda de 2013 (lieu dit DALLAS à Thio).....	113
Illustration 73 – Synthèse : coulées (COUL)	114
Illustration 74 – Modes généraux de mouvement de blocs rocheux selon les pentes de versant (Ritchie, 1963).....	115
Illustration 75 – Configuration et mécanismes de chutes de blocs (Dussauge-Peissier, 2002)	116
illustration 76 – Exemple de chutes blocs (S : surplomb, Gd : glissement dièdre, Cb : basculement de blocs ou de colonnes)	117
illustration 77 – Synthèse : chute de blocs (CB)	118
Illustration 78 – Champs des bases de données événementielles	120
Illustration 79 – Mouvements de terrain répertoriés à l'échelle de chaque commune.....	121

Illustration 80 – Date des mouvements de terrain répertoriés à l'échelle de chaque commune.....	121
Illustration 81 – Méthodes pour évaluer la susceptibilité et l'aléa glissement de terrain (d'après Soeters et van Westen, 1996 ; van Westen et al., 2006 ; Fell et al., 2008 ; Corominas et al., 2014)	125
Illustration 82 – Classification des méthodes, de leur précision et du champ d'application selon l'échelle de travail (d'après Cascini, 2008)	126
Illustration 83 – Principe de grille de qualification des aléas	127
Illustration 84 – Echelle d'intensité retenue pour les chutes de blocs (CB)	128
Illustration 85 – Echelle d'intensité retenue pour GG, GF, LT	129
Illustration 86 – Exemple : zone de calage pour la commune du Mont-Dore.....	131
Illustration 87 – Recommandations pour les descriptifs pour le zonage d'aléa (JTC-1, Fell et al. 2008) et adaptation au projet	132
Illustration 88 – Aléa de rupture (CB), exemple de carte.....	132
Illustration 89 – Exemple de modélisation DEM 10 m (Solalex, Suisse, extrait Horton et al, 2013)	133
Illustration 90 – Principe de la ligne d'énergie (angle d'atteinte β)	134
Illustration 91 – Représentation de la zone de propagation rocheuse concernée dans le versant en fonction de l'angle d'énergie choisi (Sources : Modifié d'après Jaboyedoff M. et Labieuse V., (2011) à gauche et Conefall à droite).....	135
Illustration 92 – Classes retenues pour la qualification de l'occurrence des phénomènes (rupture et/ou atteinte)	136
Illustration 93 – Matrice d'atteinte croisant rupture et propagation des aléas	136
Illustration 94 – Matrice d'aléa, principe général	137
Illustration 95 – Distribution des valeurs d'angle de ligne d'énergie pour les GG (commune du Mont-Dore).....	138
Illustration 96 – Qualification des atteintes (glissement grossiers GG)	138
Illustration 97 – Matrice de l'aléa pour glissement grossier (GG), glissement fin (GF) et laves torrentielles (LT)	139
Illustration 98 – Distribution des valeurs d'angle de ligne d'énergie pour les GF (commune du Mont-Dore).....	140
Illustration 99 – Qualification des atteintes (glissement fins GF).....	140
Illustration 100 – Valeurs d'angle d'énergie selon les atteintes.....	142
Illustration 101 – Qualification des atteintes (chute de blocs CB)	142
Illustration 102 – Matrice d'aléa pour phénomène de chute de bloc (CB)	143
Illustration 103 – Distribution des valeurs d'angle de ligne d'énergie pour les LT (commune du Mont-Dore).....	144
Illustration 104 – Qualification des atteintes (laves torrentielles LT)	144
Illustration 105 – Table attributaire qualifiant les aléas par phénomène et global pour chaque cellule du raster SIG	146
Illustration 106 – Synthèse des aléas par commune (ex. commune du Mont-Dore)	147
Illustration 107 – Exemple de restitution à l'échelle communale (aléa « Glissement grossier »).....	149
Illustration 108 – Exemple de restitution à l'échelle du 1 :25 000 ^{ème} (aléa « Glissement grossier »)	150
Illustration 109 – Exemple de restitution à l'échelle communale (aléa « Mouvement de terrain »)	151
Illustration 110 – Exemple de restitution à l'échelle du 1:25 000 ^{ème} (aléa « Mouvement de terrain »)	152
Illustration 111 – Exemple de restitution à l'échelle du 1:25 000 ^{ème} (aléa « Mouvement de terrain ») sous la forme d'atlas	153

1 Introduction

Lors des événements météorologiques intenses de novembre 2016, la commune de Houaïlou a connu des phénomènes de mouvements de terrain et de coulées boueuses qui ont été la cause de pertes humaines. L'aléa « mouvements de terrain » à l'échelle du pays reste encore en grande partie peu pris en compte par les populations et les autorités. Il fait partie des risques naturels auxquels le pays est soumis, dont les plus notables sont les cyclones (vent, houle, submersion), les inondations, l'amiante environnemental, les incendies, l'érosion littorale, les séismes et les tsunamis.

Le pays est concerné périodiquement par des phénomènes de mouvements de terrain. En janvier 1988, lors du cyclone « Anne », une coulée boueuse ou « lave torrentielle », phénomène identique à celui qui s'est produit à Houaïlou, avait fortement impacté le lotissement Milles et Berton au Mont-Dore, entraînant de lourds travaux de mise en sécurité, mais ne faisant pas de victime. En 2011, des laves torrentielles ont menacé des installations (centre de secours, ...) et des vies autour du massif de Bel Air à Houaïlou.

1.1 CADRAGE DU PROJET

Sollicité sur « sur la répartition des compétences entre la Nouvelle-Calédonie et les provinces en matière de prévention des risques naturels prévisibles », dans son avis du 31 octobre 2017, le Conseil d'Etat précise que la prévention des risques de toutes natures est principalement une mission de sécurité civile dévolue à la Nouvelle-Calédonie depuis le 1^{er} janvier 2014. La finalité de plans de prévention des risques est la protection des personnes, des biens et de l'environnement ; leur régime juridique est défini par le code de l'environnement en Métropole. La Nouvelle-Calédonie a compétence pour définir le régime juridique d'outils équivalents aux plans de prévention des risques sur son territoire et pour instituer le cas échéant la réglementation en matière d'urbanisme afférente.

A la suite de l'avis du conseil d'état, plusieurs réunions de travail interservices (DIMENC, DAVAR, DAJ, DSCGR) ont été organisées pour définir la méthode et le champ d'application d'une démarche de mise en place de plan de prévention des risques en Nouvelle Calédonie. Enfin une réunion de concertation a été organisée le 1^{er} mars 2018 par la DAVAR avec les représentants des collectivités provinciales et communales (Association Française des Maires de Nouvelle-Calédonie).

Les principes suivants ont été convenus par le gouvernement de Nouvelle Calédonie :

- 1) La démarche métropolitaine de réalisation des PPRNP¹ ne sera pas dupliquée mais pourra demeurer une source d'inspiration technique sur l'évaluation des aléas en particulier au moins, au regard des guides nationaux existants.
- 2) L'absence d'exercice de la responsabilité de prévention des risques avant 2014 par la Nouvelle-Calédonie explique pour partie la faible couverture actuelle de documents d'information. La production des documents d'information préventive – et de règlements futurs associés, ne pourra être assurée que dans plusieurs années au travers de programmes de caractérisation des aléas notamment.
- 3) Il est nécessaire de définir des priorités et les limites de la démarche.

¹ Plan de Prévention des Risques Naturels Prévisibles ou PPR

- 4) La démarche consistera à caractériser les aléas afin de les superposer aux enjeux (définis en concertation avec les collectivités locales) mais aussi à édicter des recommandations voire des prescriptions en matière de normes d'aménagement ou de construction, en fonction des différents risques encourus sur le territoire concerné.
- 5) Il n'est pas envisagé de rendre opposable les PPR aux tiers et aux collectivités en matière d'urbanisme ni d'en faire une servitude d'utilité publique sur terres de droit commun ou coutumières. Il est rappelé que l'urbanisme opérationnel relève des provinces, voire des communes quand elles disposent d'un PUD et que les décisions d'urbanisme et de construction relèvent de la responsabilité des collectivités locales.
- 6) Deux sujets doivent être développés en parallèle : la connaissance des aléas et le cadre réglementaire, qui feront l'objet de groupes de travail.

Pour appliquer ces principes, deux groupes de travail ont été mis en place :

A/ Groupe de travail « cadre technique »

La DAVAR, la DIMENC et la DSCGR sont appelées à composer ce groupe de travail piloté par la DAVAR. Il a pour objectifs :

- La définition de sa méthode de travail et de son organisation ;
- La priorisation des éléments de connaissance des aléas à obtenir en fonction des moyens dédiés par la collectivité, éventuellement abondés par les collectivités partenaires ;
- La priorisation des communes cibles ;
- La concertation des services techniques des collectivités partenaires ;
- L'aide à l'identification des enjeux puis la cartographie des risques avec les collectivités partenaires.

B/ Groupe de travail « cadre réglementaire »

La DAJ, la DAPM et la DSCGR composerait ce groupe de travail piloté par la DAJ. Il a pour objectifs :

- La définition de sa méthode de travail et de son organisation ;
- L'actualisation du cadre réglementaire pour compléter les principes directeurs de l'urbanisme, définir les responsabilités de chaque collectivité, la portée et le régime de la « démarche locale PPR » ;
- La définition juridique ou réglementaire des recommandations/prescriptions en matière de prévention, de normes de construction ou d'aménagement ;
- La consolidation des travaux préparatoires, la concertation avec les collectivités partenaires et le portage administratif du dossier devant les différentes instances en vue de l'adoption du nouveau cadre réglementaire.

Le présent projet s'inscrit dans le cadre des actions de la DIMENC au sein du groupe de travail « **cadre technique** » et porte sur **la connaissance des aléas et leur cartographie**. Dans ce cadre, le gouvernement de Nouvelle-Calédonie par son service géologique (SGNC) et le BRGM se sont associés pour l'établissement de cartes d'aléas mouvements de terrain, dans le cadre d'un programme pluriannuel.

Le présent projet relève des actions de la DIMENC au sein du groupe de travail « **cadre technique** » et porte sur **la connaissance des aléas mouvements de terrain et leur**

cartographie. Ainsi, le gouvernement de Nouvelle-Calédonie par son service géologique (DIMENC/SGNC) et le BRGM se sont associés pour l'établissement de cartes d'aléas mouvements de terrain, dans un programme pluriannuel concernant une quinzaine de communes.

Le résultat de cette action a vocation à permettre ensuite la **cartographie des risques** avec les collectivités partenaires une fois l'identification des enjeux par ces dernières. Il n'existe pas en 2018 de programmation particulière mise en place pour cette phase d'identification des enjeux dont la réalisation est hors du cadre de la présente convention, de même que la confrontation de ces enjeux avec les cartes d'aléa.

Il est convenu d'initier la démarche de cartographie pour 15 communes (illustration 1), hiérarchisées par la DIMENC à partir d'une analyse géomorphologique (croisement lithologie / pente des terrains) ; tout en tenant compte des enjeux à travers la densité du bâti (illustration 2).

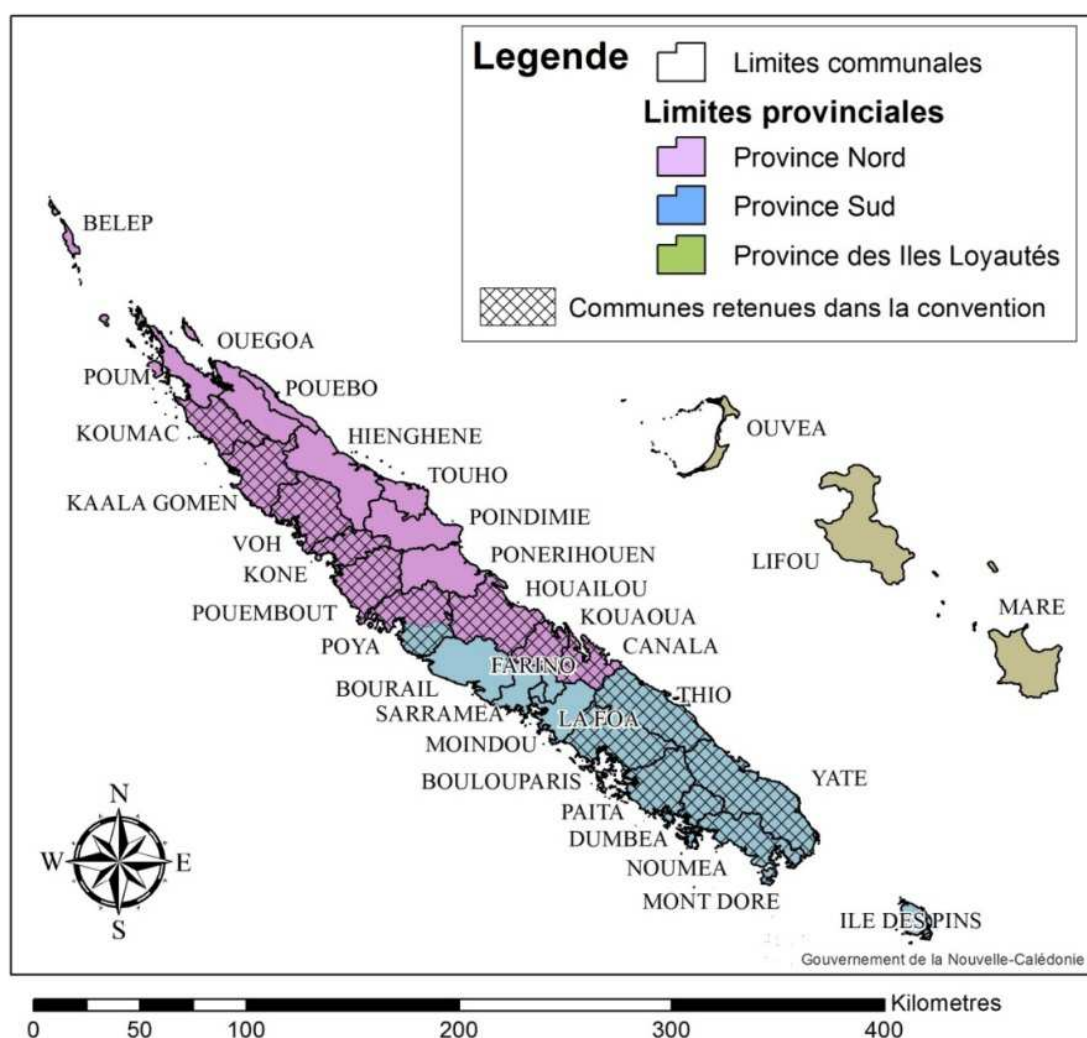


illustration 1 – Carte des communes prioritaires pour le programme de cartographie

Communes	Ordre selon le contexte géomorphologique (pente et lithologie)	Ordre selon les enjeux (bâtiments)	Millésime
BOULOUPARIS	10	9	A venir
CANALA	6	6	A venir
DUMBEA	13	15	A venir
HOUAILLOU	2	3	A venir
KAALA GOMEN	11	11	2018-21
KONE	14	13	A venir
KOUAOUA	5	5	2018-21
KOUMAC	12	10	A venir
MONT DORE	4	1	2018-20
PAITA	8	8	A venir
POUEMBOUT	9	12	A venir
POYA	15	14	A venir
THIO	1	2	2018-21
VOH	7	7	A venir
YATE	3	4	A venir

illustration 2 – Tentative de hiérarchisation des communes prioritaires pour le programme de cartographie

1.2 PROGRAMME DE TRAVAIL

Le programme des travaux envisagés vise à établir des cartes communales des aléas mouvements de terrain à l'échelle du 1:25 000. Les moyens d'accéder à ce résultat sont variables en fonction (i) des données disponibles ou à acquérir ; (ii) du niveau de restitution souhaité en termes de zonage cartographique de l'aléa.

Dans le cadre du programme, l'aléa décrit le phénomène selon son type (glissement, éboulement, etc..) et son intensité (ampleur du mouvement). La hiérarchisation de l'aléa est menée en intégrant la probabilité d'occurrence d'un type de phénomène pour une intensité et une période donnée. À cette échelle, compte tenu des phénomènes redoutés, l'évaluation de la propagation des phénomènes est impérative. Dans ces conditions, les méthodes déployées sont dites « avancées », couplant analyse des ruptures potentielles et propagation des phénomènes. Si l'approche demeure qualitative, des développements sont menés vers la quantification (ou pseudo-quantification) de l'analyse afin de limiter le caractère subjectif du dire d'expert et d'autre part d'assurer une homogénéité de qualification d'une commune à une autre.

Les phénomènes pris en compte dans cette cartographie à l'échelle du 1:25 000^{ème} sont les glissements de terrain, les chutes de blocs et éboulements, les coulées et laves torrentielles. Le programme sera scindé en deux phases majeures :

- 1) Cadrage méthodologique sur une première commune (Mont-Dore, « commune pilote »)
- 2) Déclinaison aux communes ciblées (14)

Pour ces deux phases, la répartition des tâches se réalisera comme suit :

Tâche		Description
T1		Collecte et mise au format des données de base
	1.1	Recensement, acquisition et structuration des données
T2		Typologie des mouvements de terrain
	2.1	Enrichissement inventaire mouvement de terrain
	2.2	Définition des typologies de mouvements de terrain
T3		Cartographie des formations superficielles
	3.1	Carte des formations de surface (régolithe)
	3.2	Carte du substratum
T4		Aléa par phénomène (*)
	4.1	Carte GL
	4.2	Carte CB
	4.3	Carte CO
	4.4	Carte LT
	4.5	Validation de terrain, correction éventuelle
T5		Synthèse et valorisations
	5.1	Restitution, perspectives de valorisation
	5.2	Rapport

illustration 3 – Déroulement des cartographies à l'échelle communale (: à adapter selon phénomènes redoutés)*

Le programme tel qu'envisagé se veut partenarial du point de vue technique, avec un transfert de compétence progressif au SGNC sur la thématique. À cet égard, l'ensemble des travaux seront menés par le BRGM avec l'appui du service de la géologie de Nouvelle Calédonie (SGNC). Certaines tâches seront assurées conjointement, d'autres réalisées de manière exclusives par l'un ou l'autre des partenaires. Les contributions du SGNC sont focalisées prioritairement sur : (i) la cartographie géologique, du régolithe en particulier (T3) ; (ii) l'inventaire des mouvements de terrain (T2) ; (iii) une implication progressive sur les phases de cartographies des aléas une fois le cadrage méthodologique validé.

1.3 CALENDRIER DE RÉALISATION

Le délai de réalisation d'une cartographie communale, une fois la méthode stabilisée est prévu globalement sur 6 mois avec un étalement chronologique envisagé a priori comme suit, avec 3 réunions planifiées (lancement ; avancement ; restitution) :

	Mois					
Tâche	1	2	3	4	5	6
T1						
T2						
T3						
T4						
T5						
Réunions						

illustration 4 – Calendrier de réalisation prévisionnel d'une carte communale

A l'échelle du programme, planifié sur 5 ans (2019-2023), la chronologie d'avancement actualisée est la suivante :

Année	2019				2020				2021				2022				2023			
Trimestre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	18
Méthodologie																				
Commune Pilote (1)																				
Communes (2 à 5)																				
Communes (6 à 10)																				
Communes (11 à 15)																				

illustration 5 – Calendrier de réalisation prévisionnel des 15 communes

1.4 PRODUITS LIVRÉS

Dans le cadre du programme seront livrés :

- un rapport de synthèse méthodologique décrivant (objet du présent document) :

- le contexte général
- la méthodologie déployée;
- les outils et moyens mise en œuvre ;
- une synthèse des principales données pour chaque commune

Ce rapport sera actualisé chaque année à l'avancement des communes couvertes

- pour les communes :

- o un rapport de synthèse communal décrivant :
 - un bref rappel de la méthode déployée ;
 - les données acquises et valorisées ;
 - les cartes d'aléa par phénomènes considérés.

1.5 CONTENU DU DOCUMENT

Ce document expose :

- le contexte du programme ;
- les données exploitées pour la cartographie ;
- une classification générale des mouvements de terrain (qui sera adaptée à l'avancement des cartographies communales) ;
- les méthodes d'évaluation développées (approches, outils et moyens).
- une synthèse des données et paramètres valorisés pour les différentes communes couvertes (qui sera adaptée à l'avancement des cartographies communales).

2 Contexte physique général

2.1 CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET MORPHOLOGIQUE

2.1.1 SITUATION GÉOGRAPHIQUE

La Nouvelle-Calédonie, située dans l'hémisphère Sud, dans la partie Sud-Ouest de l'océan Pacifique, en Mélanésie. Elle est positionnée à environ 1200 km à l'Est de l'Australie et 1500 km au Nord-Est de la Nouvelle-Zélande à proximité du tropique du Capricorne (entre le 17° et 23° de latitude sud), l'archipel est inclus en totalité dans la zone intertropicale.

D'un point de vue géodynamique, la Grande Terre se situe au nord de la ride de Norfolk, correspondant à une lanière de croûte continentale, fragment de la marge Sud-est du Gondwana, en majeure partie immergée et se prolongeant jusqu'au Nord de la Nouvelle-Zélande. La Nouvelle-Calédonie et la Nouvelle Zélande constituent la partie émergée du continent Zealandia (Luyendyk, 1955 ; Mortimer et al., 2017).

Elle est composée d'une Ile principale nommée la Grande-Terre (400 km de long sur 50 km de large) et de quatre îles situées à l'Est de cette dernière : Maré, Lifou, Ouvéa et Tiga que l'on nomme aussi les Iles Loyauté (1981 km²), d'origine corallienne avec un relief plat. La Grande Terre se prolonge par de petites îles isolées l'île des Pins au Sud, ou l'archipel des Bélep (220 km²) dans le lagon nord.

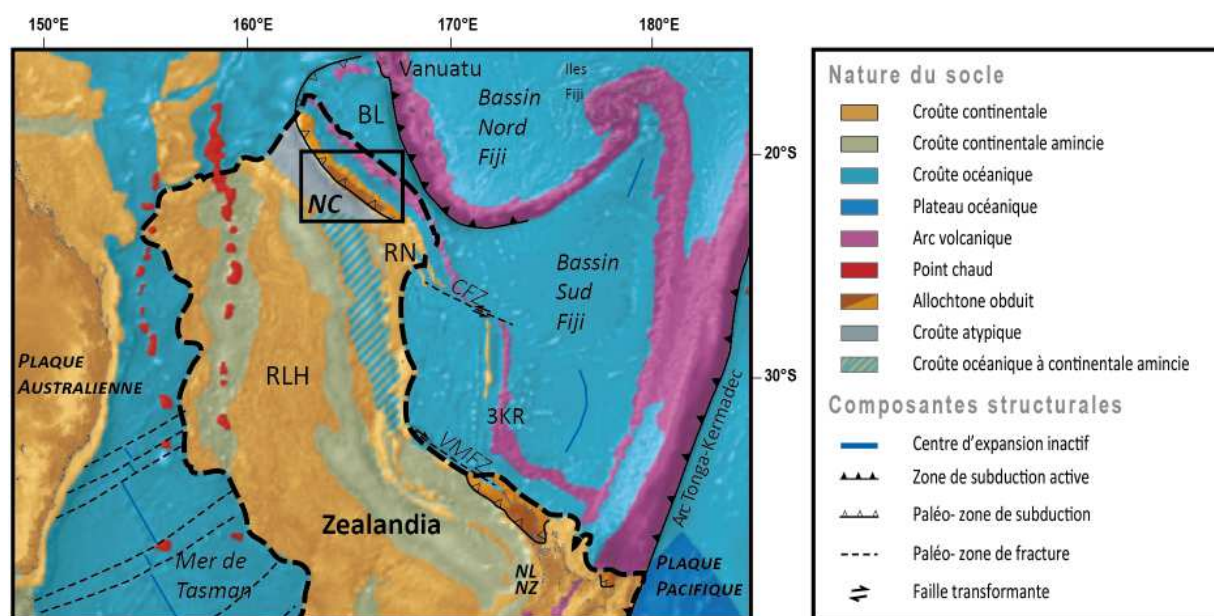


illustration 6 - Carte de la nature du socle et éléments structuraux associés (Collot et al., 2011)
 Abréviations : 3KR, Ride des Trois Rois ; BL, Bassin des Loyauté ; CFZ, Fracture de Cook ; NC, Nouvelle-Calédonie ; NL NZ, Northland Nouvelle-Zélande ; RLH, Ride de Lord Howe ; RN, Ride de Norfolk ; VMFZ, Fracture de Meisnez.

2.1.2 CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE

La topographie et la bathymétrie de la Nouvelle-Calédonie ont été façonnées postérieurement à l'épisode tectonique majeur d'obduction et la mise en place de péridotites. Ce façonnement résulte de l'action souvent combinée de quatre facteurs : les mouvements tectoniques verticaux, l'altération chimique et l'érosion hydrique sous l'action d'un climat tropical et à la sédimentation associée. La ride de Norfolk (illustration 6), qui porte la Grande Terre et son lagon, constitue un système géomorphologique exceptionnel au sein duquel ces 4 facteurs interagissent encore aujourd'hui. Les îles de la ride des Loyautés ont quant à elle, une morphologie essentiellement héritée de plates-formes récifales coralliennes soulevées.

L'île principale (la Grande Terre), est structurée par une ligne continue de relief montagneux de moyenne altitude, dite « la chaîne » et orientée nord-ouest-sud-est, incisée par de profondes vallées. Cette ligne de relief sépare la côte Est de la côte Ouest qui présentent un contraste morphologique. La côte est peu large avec des pentes plus marquées, la côte Ouest est plus large avec un piedmont plus développé entre les sommets et le littoral

La chaîne comprend trois ensembles de premier ordre, dont la géomorphologie est contrôlée par la nature du substrat : le « Massif du Sud », la « Chaîne centrale » et le massif du complexe métamorphique septentrional. Les principaux sommets du massif du sud ont des altitudes supérieures à 1000 m avec pour point culminant le massif du Humbolt à 1618 m. Pour la Chaîne centrale, les lignes de crête s'échelonnent de 500 à 1000 m d'altitude, alors que le massif métamorphique septentrional culmine au mont Panié à 1629 m.

Le massif du Sud est constitué de péridotites qui ont un relief profondément incisée par des rivières. Certaines lignes de partage des eaux et les flancs de vallées préservent les lambeaux d'aplanissements latéritiques étagés formant une série de gradins qui sont les témoins érosifs de l'enfoncement progressif du réseau hydrographique. Sur la frange littorale, entre Yaté et Ponérihouen, ces reliques d'aplanissements sont généralement des plateaux de plusieurs centaines de mètres d'altitude dominant la mer, alors que dans la partie méridionale, elles tapissent de grandes dépressions délimitées par des inselbergs. Elles correspondent à des cuirasses ferrugineuses coiffant les manteaux d'altération atteignant plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur.

Le complexe métamorphique septentrional est caractérisé par un important relief formé par de grandes rides structurales en pente très fortes. Cet ensemble porte de vastes reliques d'aplanissements en contrebas des lignes de crêtes principales, notamment sur le massif du Panié (1629 m). Ces replats, bien que largement disséqués portent localement plusieurs mètres de régoélite.

La chaîne centrale constitue une zone déprimée ancienne développé entre le Grand Massif du Sud et le massif métamorphique septentrional. Elle est façonnée en collines et en rides dominant des témoins d'aplanissement multiconvexe entre 400 et 600 m d'altitude. Cette ancienne plane se prolonge vers le nord-ouest par une série de replats sur le complexe sédimentaire septentrional qui sépare le piémont occidental du massif métamorphique. Elle est largement disséquée par le réseau hydrographique actuel.

Le piémont occidental de la Grande Terre est un vaste système de glacis raccordant la côte et les plaines alluviales au rebord occidental de la chaîne et aux massifs de péridotites alignés nord-ouest-sud-est, les « klippe de la côte Ouest ». L'amplitude de leur relief s'amointrie en direction du nord-ouest jusqu'aux îles Bélep.

2.2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Les paragraphes suivants détaillent les grandes unités géologiques qui constituent la Grande Terre. Une carte géologique est présentée en illustration 7.

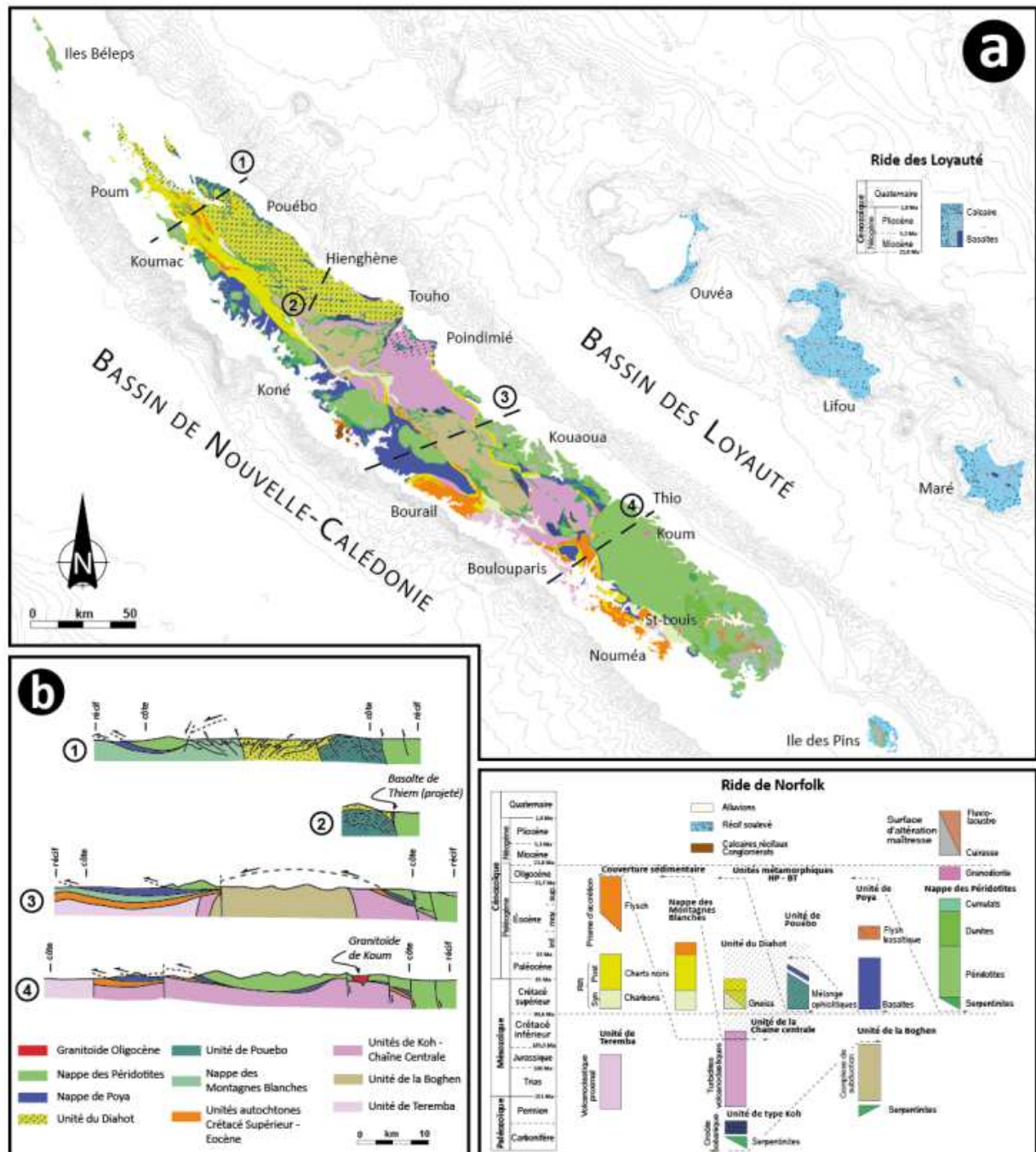


illustration 7 - a) Carte géologique simplifiée de la Nouvelle-Calédonie à l'échelle du 1:500 000^{ème} (Maurizot et Vendé-Leclerc, 2009) et isobathes 500 m et b) coupes géologiques simplifiées localisées sur a (Cluzel et al., 2012a).

2.2.1 LE SOCLE ANTÉ-CRÉTACÉ SUPÉRIEUR : LA MARGE ACTIVE DU SUD-EST GONDWANA

Le socle est constitué de trois unités structurales déformées et partiellement métamorphisées situées sous la discordance du Crétacé :

- l'**unité de Teremba** correspond à des sédiments proximaux et des roches volcaniques d'âge **Permien – Jurassique supérieur** (Paris, 1981; Campbell *et al.*, 1985) ;
- l'**unité de Koh-Centrale** est constituée de deux ensembles, l'**ophiolite de Koh** d'âge **Permien inférieur** (Aitchison *et al.*, 1998) et l'**unité sédimentaire de la Chaîne centrale du Trias – Crétacé inférieur** (Albien, 105 Ma) composée de sédiments distaux volcanoclastiques d'arc (Guérangé *et al.*, 1975; Meffre, 1995; Cluzel *et al.*, 2010);
- l'**unité de la Boghen** est constituée de métasédiments démembrés ('*broken formation*') d'origine volcanique ou plus rarement terrigène, de basaltes en coussin ('*pillow lavas*') en lames tectoniques et de serpentinites. L'âge maximum déterminé sur zircons détritiques est **Crétacé inférieur** (Adams *et al.*, 2009). Cet ensemble est affecté par un métamorphisme HP-BT croissant vers l'ouest, absent dans les unités adjacentes.

Cluzel et Meffre (2002) proposent une reconstitution de la marge active est-gondwanienne où l'unité de Koh correspond à un fragment de bassin piégé en situation d'avant-arc, sur lequel les sédiments de la Chaîne Centrale se seraient déposés. L'unité de Teremba, dont le socle reste inconnu, correspondrait à la partie proximale de ce même bassin d'avant-arc. L'unité de la Boghen représenterait le prisme d'accrétion dont le gradient métamorphique augmentant vers l'ouest suggère le plongement ouest de la zone de subduction.

2.2.2 DU RIFTING MARGINAL CRÉTACÉ À L'OBDUCTION ÉOCÈNE

Le socle est recouvert en discordance angulaire d'une importante couverture sédimentaire du **Crétacé supérieur** communément appelée « **Formation à charbon** » (Paris, 1981). Cette formation est composée de sédiments parfois charbonneux accumulés en zone tidale ou deltaïque, et de roches volcaniques d'âge coniacien (~ **88 Ma**, Nicholson *et al.*, 2011). Les sédiments clastiques contiennent des faunes endémiques indiquant un isolement de l'Australie (Paris, 1981), confirmé par la provenance locale des zircons détritiques (Cluzel *et al.*, 2011). Nicholson *et al.* (2011) interprètent ce bref épisode volcanique comme le résultat d'une subduction à plongement ouest, cependant d'autres auteurs le mettent en relation avec le rifting de l'ancienne marge active (Bryan, 1997; Cluzel *et al.*, 2010).

La subsidence post-rift est enregistrée durant le **Maastrichtien** par les cherts noirs appelés « **phtanites** » (Routhier, 1953a). Ces sédiments hémi-pélagiques marquent la fin des apports terrigènes et donc la submersion progressive de la Nouvelle-Calédonie. La sédimentation pélagique se poursuit pendant le Paléocène avec une évolution graduelle vers des micrites en relation avec un réchauffement climatique. Durant cette période, la ride portant la Nouvelle-Calédonie est un plateau isolé stable dans des eaux relativement profondes.

De l'**Éocène inférieur à supérieur**, cette configuration change avec l'apparition d'une pente dans le bassin et la reprise d'un régime instable dont témoignent les brèches et olistostromes (régions de Koumac et de Nouméa), au sommet d'une séquence turbiditique nommée « **Flysch de Bourail** » (Paris, 1981). L'érosion, qui précède le remplissage syntectonique des bassins de Bourail et Nouméa, est interprétée comme la conséquence de l'émergence due à un bombement lithosphérique (Cluzel *et al.*, 1998) et à la formation du

bassin d'avant-pays liée à l'entrée oblique de la ride de Norfolk dans la zone de subduction (Maurizot, 2014; Maurizot et Cluzel, 2014). Il est à noter qu'au nord de la Grande Terre la discordance n'existe pas, le passage aux brèches étant continu.

2.2.3 LE COMPLEXE SUBDUCTION-OBDUCTION

2.2.3.1 La nappe des Montagnes Blanches

La **nappe des Montagnes Blanches** est tectoniquement intercalée entre le flysch paléogène et les unités basiques et ultrabasiques obduites. Cette unité est composée de cherts et d'argilites du **Crétacé supérieur** surmontés de micrites **paléocènes** passant à des calci-turbidites à l'**Éocène inférieur**. Dans les régions de Koumac, Bourail et Nouméa, les niveaux supérieurs du flysch paléogène contiennent des éléments de cette unité sédimentaire allochtone marquant le début de la convergence à **environ 50 Ma** à Koumac (Maurizot, 2011) et vers **45 Ma** sur Nouméa (Dallanave *et al.*, 2018). Cette nappe représente l'équivalent latéral non métamorphisé de l'**unité du Diahot** (voir § 2.2.3.3).

2.2.3.2 La nappe de Poya

La **nappe de Poya** surmonte tectoniquement toutes les séries pré-néogènes, à l'exception de la Nappe des Péridotites. Cette unité a été affectée par un métamorphisme de subduction (amphibolites) et par le métamorphisme haute pression éocène constituant l'**unité de Pouébo** (Cluzel *et al.*, 2001).

Cette nappe est composée de deux unités lithotectoniques :

- des **basaltes de Poya** reconnus comme un ensemble de lames tectoniques métriques à kilométriques de basaltes (massifs ou en coussins) et dolérites, associés à des sédiments bathaux contenant des radiolaires d'âge **Campanien-Paléocène supérieur à Éocène inférieur** (Aitchison *et al.*, 1995; Cluzel *et al.*, 2001). Au sein de cette unité coexistent des basaltes « enrichis » (E-MORB), de bassin d'arrière-arc (BABB) et intra-plaque (OIB) indiquant l'existence d'au moins deux sources mantelliques.
- du **Faciès Koné** (Paris, 1981) composé de grès et turbidites de marge passive d'âge **coniacien-santonien**, affectés par des intrusions de sills doléritiques d'âge éocène inférieur (Cluzel *et al.*, 2017).

Par ailleurs, des bassins en « **piggy-back** », représentés par les **Flyschs de Népoui** et de **Koumac**, sont étroitement liés à l'unité de Poya. En effet, ces deux bassins sont tectoniquement intercalés entre la nappe de Poya, constituant leur principale source sédimentaire, et la Nappe des Péridotites.

2.2.3.3 Le complexe métamorphique

Le **complexe métamorphique HP-BT**, affleurant au nord de la Grande Terre, est composé de deux unités métamorphiques :

- l'**unité du Diahot**, caractérisée par des roches du faciès schiste bleu au sud-ouest et éclogite au NE de la zone, a été subduite jusqu'à une profondeur d'**environ 50 km** (~1.7 GPa – ~550°C ; Fitzherbert, 2003).
- l'**unité de Pouébo** est constituée de blocs décimétriques à pluri-hectométriques de roches basiques dérivées de l'unité de Poya (Cluzel *et al.*, 2001; Spandler *et al.*, 2005) et de métasédiments englobés dans une matrice de méta-serpentine (talc-schiste). Ces roches éclogitiques, montrant un degré métamorphique plus fort que l'unité du Diahot et

un enfouissement maximum d'**environ 80 km** (~2.4 GPa – ~600°C ; Clarke *et al.*, 1997 ; Carson *et al.*, 2000), enregistrent un pic de métamorphisme à **environ 44 Ma** (U-Pb sur surcroissances métamorphiques de zircons ; Spandler *et al.*, 2005).

L'exhumation du complexe métamorphique à 7 km de profondeur a été estimé à **34±4 Ma** par traces de fission sur apatites.

2.2.3.4 La Nappe des Péridotites

La **Nappe des Péridotites** (Avias, 1967) est une unité litho-structurale majeure obduite à l'**Éocène supérieur** sur l'ensemble des unités précédemment décrites. Actuellement, les roches ultramafiques recouvrent entièrement le sud de la Grande Terre, appelé « **Massif du Sud** », et affleurent en une série de klippes alignées le long de la Côte Ouest. Les péridotites culminent à 1 618 m d'altitude au Mont Humboldt.

Cette unité est principalement composée de harzburgites et dunites, et de rares lherzolites dans les massifs du Nord (Tiébaghi et Poum). Les rares zones à cumuls mafiques et ultramafiques (dunites, pyroxénites, wherlites et gabbros) dans le Massif du Sud seraient les seuls témoins résiduels d'une croûte « océanique » (Prinzhofer, 1981).

La présence d'une anomalie gravimétrique positive marque l'occurrence d'un corps dense et allongé le long de la Côte Est de la Grande Terre. Combinée à l'interprétation de profils sismiques, cette anomalie rend compte de l'enracinement de la Nappe des Péridotites en continuité avec le bassin des Loyauté (Bitoun et Récy, 1982; Collot, 1987; Auzende *et al.*, 2000).

La **subduction à plongement vers le nord-est**, menant à la fermeture du bassin puis à l'obduction, s'initie à la dorsale et implique donc de la lithosphère jeune et chaude (Ulrich *et al.*, 2010; Cluzel *et al.*, 2012b). Durant cette période, la moitié occidentale du bassin des Loyauté est inversée et transformée en bassin d'avant-arc (Milsom, 2003; Edwards *et al.*, 2015). Le démarrage de la subduction a été estimé à **environ 56 Ma**.

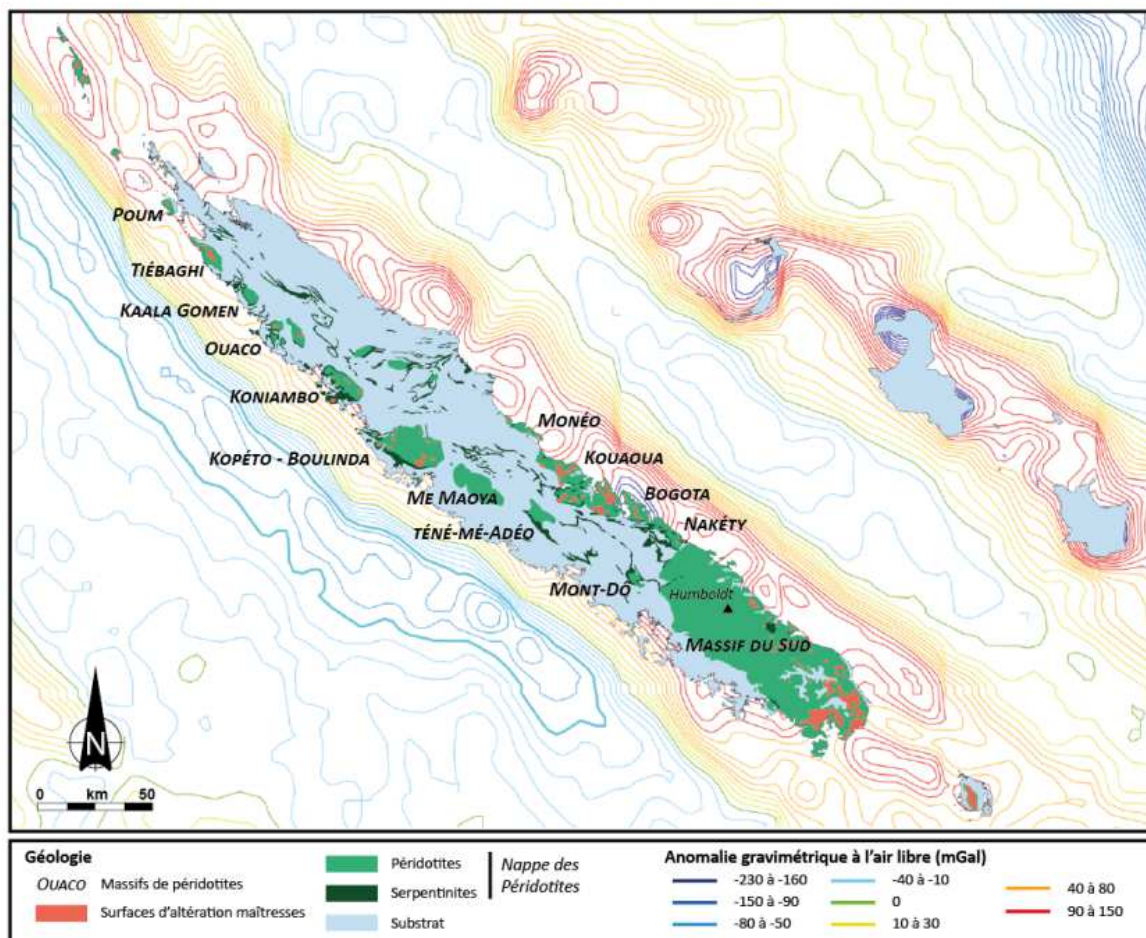


illustration 8 - Carte géologique simplifiée des massifs de péridotite de Nouvelle-Calédonie et surfaces d'altération maîtresses, modifiée après Maurizot et Vendé-Leclerc (2009), sur fond de carte de l'anomalie gravimétrique à l'air libre des bassins adjacents à la Gran

La Nappe des Péridotites est recoupée par des **filons d'âge éocène inférieur** (hornblendite, diorite, leucodiorite et autres roches feldspathiques), mis en place dans un laps de temps restreint (55-50 Ma) (Cluzel *et al.*, 2006). Des filons de dolérite de type IAT, un peu plus récents (~50 Ma, Ar/Ar ; Comm. Pers. D. Cluzel, données inédites), représentent probablement le produit le plus précoce de l'activité de l'arc volcanique.

De la dorsale à l'obduction, les péridotites ont subi divers épisodes d'hydratation et de refroidissement sous contraintes menant à la néoformation de phases minérales du groupe des serpentines. Le degré de serpentinitisation varie généralement entre 40 et 80% mais on peut trouver localement des péridotites serpentinisées à 100% ; plus rarement, des roches exemptes de toute serpentinitisation constituent des masses isolées.

Par ailleurs, la base de la Nappe des Péridotites est caractérisée par une **semelle serpentineuse**, de 20 à 200 m d'épaisseur, formée de mylonites porphyroclastiques au sein desquelles des veines syntectoniques de magnésite supergène ont été décrites suggérant une émergence et altération précoce de la nappe durant ou sur la fin de sa mise en place (Quesnel *et al.*, 2013).

2.2.4 L'ÉVOLUTION POST-OBDUCTION

2.2.4.1 Le plutonisme post-obduction

Les **granitoïdes de Saint-Louis et de Koum** affleurent dans le Massif du Sud. Ils sont respectivement datés à **27, 5 et 24**. La mise en place de ces granitoïdes semble contrôlée par la fracturation du substrat et leur remontée semble avoir été stoppée au niveau de la semelle serpentineuse de la Nappe des Péridotites.

2.2.4.2 Évolution supergène, dépôts post-obduction et morphologie actuelle

Dès son émergence, la Nouvelle-Calédonie est soumise à l'**altération supergène** en climat tropical développant un épais manteau d'altération sur les péridotites (§ 2.3 Le régolithe, formations d'altération et formations de versants). Les profils d'altération forment des surfaces d'aplanissement étagées sur les massifs de péridotites (Wirthmann, 1965) et constituent la partie autochtone du régolithe. Chardon et Chevillotte (2006) invoquent des soulèvements tectoniques successifs probablement accompagnés de variations du niveau marin pour expliquer la formation de ces surfaces. Actuellement la majorité de ces profils sont démantelés mais certaines cuirasses fossiles, échantillonnées sur le massif de Tiébaghi, ont pu être datées à **25 Ma** par méthode paléo-magnétique (Sevin et al., 2012). Si l'altération supergène a probablement débuté antérieurement à cette date, elle marque la fin des mouvements verticaux au nord de la Grande Terre.

Parallèlement au processus d'altération, le **Miocène inférieur** est enregistré par des dépôts calcaires intercalés de séquences détritiques terrigènes formant la **série de Népoui** (Coudray, 1976; Maurizot *et al.*, 2016). Cette unité repose en discordance angulaire sur l'Unité de Poya et le Flysch de Népoui et représente à ce jour les seuls sédiments post-obduction datés. Elle n'affleure que très localement dans la région de Népoui et son origine est encore fortement débattu (Lagabrielle *et al.*, 2005; Sevin *et al.*, 2014; Maurizot *et al.*, 2016).

La **formation « fluvio-lacustre »** située dans le Massif du Sud est elle aussi interprétée comme post-obduction (Trescases, 1973; Chardon et Chevillotte, 2006), cependant aucune datation absolue n'est disponible à ce jour (Folcher, 2016). Ces sédiments, d'une épaisseur maximale de 70 m, sont principalement constitués de produits remaniés du profil d'altération développé sur péridotites et remplissent les paléo-vallées et dépressions endoréiques (Trescases, 1973; Folcher, 2016).

Plus tardivement, des plateformes carbonatées, datées entre le Miocène supérieur et le Pliocène supérieur, se sont développées à l'apex de monts sous-marins sur la rive des Loyauté (Bitoun et Récy, 1982; Guyomard *et al.*, 1996; Lafoy *et al.*, 1996).

2.3 LE RÉGOLITHE, FORMATIONS D'ALTÉRATION ET FORMATIONS DE VERSANTS

- ➔ Ce chapitre a vocation à évoluer en fonction de l'avancement général du programme

Un des traits caractéristiques des paysages calédoniens est la présence généralisée d'un couvert d'altération. Bien que l'altération soit ubiquiste, son expression reste peu développée sur le domaine volcano sédimentaire, en comparaison avec le domaine des massifs péridotitiques où son expression est la plus étonnante avec le développement de profils d'altération latéritique, parfois sur des épaisseurs pluri-décamétriques.

L'ensemble de ces formations d'altérations sont regroupées sous la désignation « régolithe ». Comme les phénomènes de mouvement de terrain mobilisent une partie du profil d'altération, la connaissance des formations du régolithe est une donnée fondamentale dans le cadre de la caractérisation des aléas.

Les formations du régolithe sont typiquement distinguées entre formations en place ou autochtones et les formations remaniées ou allochtones (Dewolf et Bourrié, 2008). Dans le cadre des travaux de caractérisation de l'aléa mouvement de terrain et de la mise au point de la méthodologie générale, un effort particulier a été mené en parallèle de l'inventaire des phénomènes sur l'amélioration de la cartographie du régolithe en domaine péridotitique avec une prise en compte des formations allochtones jusqu'à présent cartographiées de manière non systématique.

2.3.1 LES FORMATIONS AUTOCHTONES OU EN PLACE

Les formations autochtones comprennent les faciès lithologiques issus de l'altération *in situ*.

2.3.1.1 Sur substrat péridotitique

Sur substrat péridotitique, le régolithe regroupe l'ensemble des faciès du profil d'altération (illustration 9), depuis la saprolite rocheuse jusqu'aux cuirassements ferrugineux en place, pour lesquels il n'y a pas ou peu eu de phase de transport gravitaire hormis des tassements verticaux pour certains horizons de latéritiques rouges. Des épaisseurs de l'ordre de la dizaine de mètres sont courantes et des épaisseurs maximales de 40 m sont connues au niveau des plateaux du sud de la Grande Terre.

Ce profil type est bien souvent tronqué et se réduit notamment en rebord de plateau et sur les hauts de versant. Les horizons supérieurs terreux sont alors évacués par l'érosion laissant sur place les boulders rocheux de saprolite et de péridotites saines, eux même repris de façon gravitaire pour alimenter les formations allochtones (voir infra), sur une assise rocheuse qui pointe en chicot.

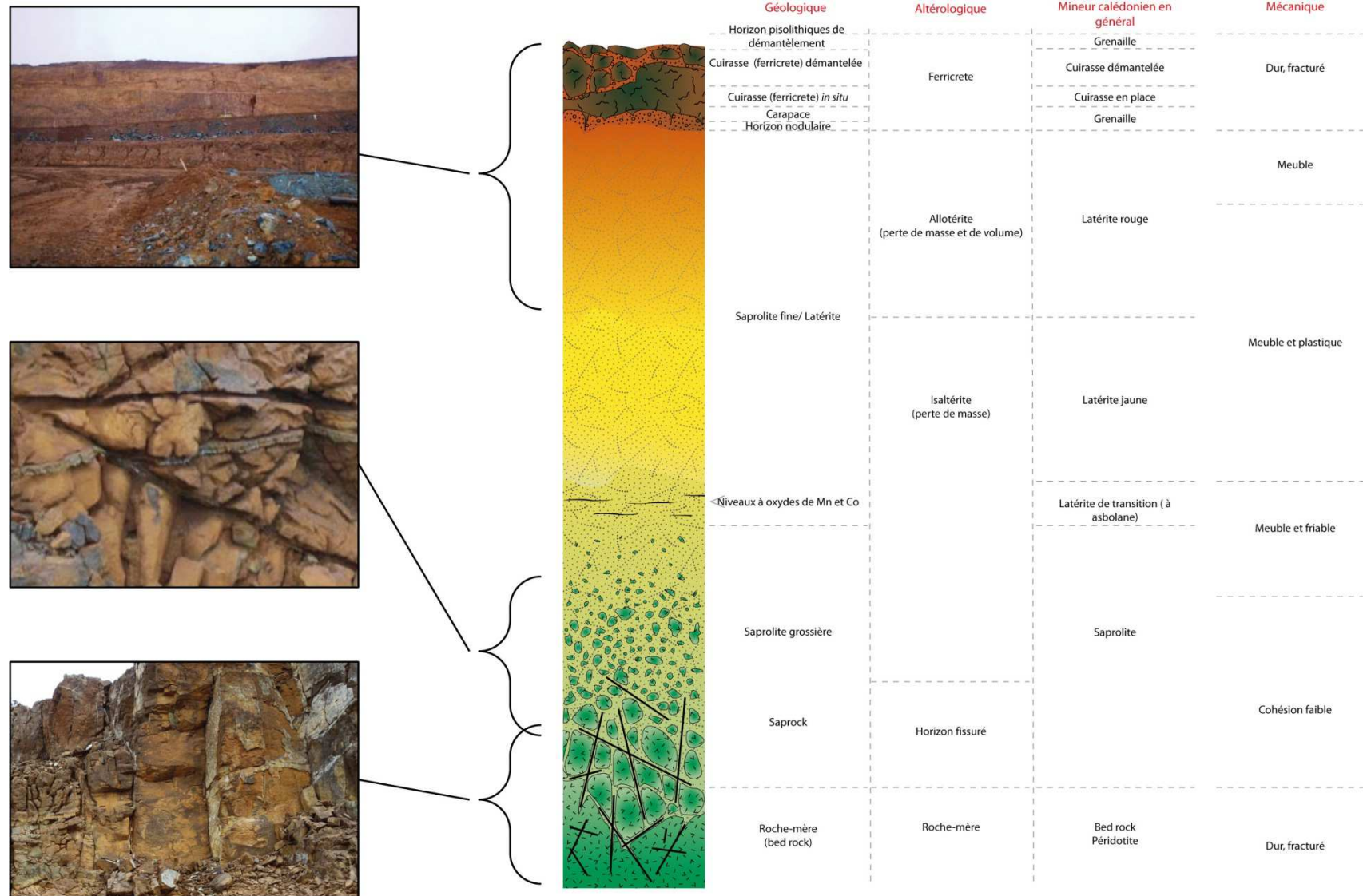


illustration 9 - Profil d'altération type sur substrat ultrabasique (modifié d'après Sevin, 2014 et GSEGWP, 1990)

2.3.1.2 Sur volcano-sédimentaire

Les faciès du pole sédimentaire comprennent essentiellement des argilites et des siltites avec variations plus grossières : grès, grauwacke et jusqu'à des conglomérats et brèches. A ces faciès purement détritiques s'ajoutent les faciès biodétritiques comme les cherts et les calcaires micritiques et calcaires bioclastiques.

Les faciès du pole volcanique comprennent essentiellement des basaltes auxquels s'ajoute un cortège de laves (ignimbrites, rhyolites, trachytes et dépôts volcanoclastiques type tufs).

A noter que dans l'arc métamorphique du nord, on retrouve les équivalents métamorphiques de ces faciès : schistes, gneiss, metabasaltes, etc.

Le maître mot de l'altération sur le substrat volcano-sédimentaire est l'**argilitisation** (illustration 11) qui affecte également les faciès sédimentaires et volcaniques et conduit à la formation d'un profil peu épais, de un à quelques mètres tout au plus et exceptionnellement décamétrique pour les épaisseurs les plus importantes.

Le profil d'altération typique sur les argilites et siltites du substrat volcano-sédimentaire montre la succession suivante :

- un horizon inférieur d'isaltérite où la texture et les structures de la roche sont encore reconnaissables, les éléments lithiques sont rendus poreux et friables par lessivage ;
- un horizon supérieur d'allotérite où l'argilisation poussée a effacé toute texture et structure initiale. Des phénomènes de tassement conduisent à une perte de volume et ne subsistent que des cailloutis résiduels qui peuvent se concentrer en surface du fait d'une érosion diffuse.
- Sur les basaltes de la nappe de Poya, les reconnaissances hydrogéologiques sur 44 forages (Espirat, 1967) révèlent une épaisseur moyenne de 11 m avec des valeurs comprises entre 10 et 16 m qui représentent 50 % des valeurs. La transition entre faciès altéré et roche saine s'opère en quelques décimètres avec parfois et de façon limitée un approfondissement le long des principales fissures. L'altération produit au sommet du profil une arène de granulométrie sablo-argileuse. Vers la base, la roche devient plus compacte mais reste poreuse avec des fissures ouvertes. Un exemple typique de profil d'altération est présenté en illustration 12.
- Les laves acides forment des bancs rocheux durs généralement en relief dans le paysage. Assez difficilement altérables avec un réseau de fissure plutôt lâche, la roche saine apparaît rapidement en profondeur.
- L'altération du fond péritique noir des formations d'âge crétacé donne dans un premier temps un débit schisteux à une roche décolorée beige rosâtre. Puis l'argilitisation se poursuivant, la roche évolue vers une matrice argileuse plastique emballant des débris siliceux blanchis.
- Sur les grauwackes et les tufs, l'altération transforme une roche saine compacte parcourue par un réseau de fissures colmatées en une roche peu dense où les fissures sont largement ouvertes. La transition entre zone altérée et zone saine est de l'ordre de plusieurs mètres et les épaisseurs sont comprises entre 10 et 20 m au niveau des plaines alluviales, avec un amincissement sur les versants et les sommets. Le front d'altération suit de très près les formes du relief (Espirat, 1967).
- Les flyschs et les formations volcano-détritiques sont à l'origine compacts et durs. L'altération produit typiquement des pelures d'oignon concentriques (isaltérite) qui se

superposent au réseau de fissuration formé par les joints de stratifications et les diaclases (illustration 13). Le sommet du profil est un sol brun argileux brun beige. La transition s'opère sur 1 à 2 m d'épaisseurs. Les reconnaissances par forage indiquent une épaisseur d'altération comprise entre le 10 et 20 au niveau des plaines alluviales ; sur les versants et les sommets, les épaisseurs sont moindres ne dépassant rarement quelques mètres et la roche saine peut rapidement affleurer (Jeanpert, 2009).

- Les cherts sains forment une roche dure intensément fracturée. L'altération conduit à la formation d'un horizon inférieur d'isaltérite marqué par une dépigmentation poussée un horizon supérieur d'allotérite à argiles bariolées blanche et rouge (illustration 10) avec une accumulation en surface de caillasse résiduelle. Un glissement survenu sur les travaux d'ouverture de la SAV Express sur la commune de Païta a révélé une épaisseur d'altération de 6 m (Maurizot, 2003).
- Sur les calcaires, l'altération conduit à la formation de modelé karstique avec des reliefs typique en lames et cupules de dissolution. Il n'existe pas à proprement parler de profil d'altération sur les formations calcaires hormis la formation de calcrêtes,
- A noter donc le cas des calcrêtes, formations d'altération additives, qui se développent aux dépens de roches carbonatées et forment une croute blanchâtre, pulvérulente, d'épaisseur métrique.



illustration 10 - Profil d'altération sur cherts noirs, pendage original des bancs encore visibles



illustration 11 – Instabilité d'un talus routier dans des siltites charbonneuse du Jurassique entièrement argilitisées (Gohapin, Poya)



illustration 12 – Talus de carrière dans les basaltes avec altération typique couleur chocolat au lait



illustration 13 – Altération en boule typique des flyschs volcano sédimentaire

2.3.2 LES FORMATIONS ALLOCHTONES OU REMANIÉES

Les formations allochtones regroupent l'ensemble des formations qui sont la conséquence d'un déplacement. Sont ici concernés les faciès issus d'une instabilité gravitaire ou de transport par érosion. L'agent de transport est le plus souvent l'eau mais peut-être le vent. Des éolianites sont par ailleurs connues mais ne seront pas abordées par la suite car extrêmement peu représentées. La neige, la glace sont également des agents possibles mais sans objet dans le cadre des présents travaux. Ces formations résultant de dynamiques gravitaires sont regroupées sous l'appellation générale de colluvions de versant. Pour Dewolf et Bourié (Les formations superficielles, ellipses, 2008), il s'agit de formations sub-autochtones dans la mesure où le transport sur des distances courtes laisse ces dépôts remaniés en contact avec la formation lithologique mère.

La carte géologique au 1 :50 000^{ème} actuelle est issue de l'harmonisation des éditions papiers, éditées entre 1967 (feuille de Paagoumène) et 1989 (feuille de Pam – Ouégoa). Il en résulte que les formations allochtones sont diversement cartographiées avec des caissons récapitulés dans le tableau en illustration 14. Certains caissons décrivent des formations strictement rattachés au substratum volcano sédimentaire (cas des colluvions sur basaltes) ou strictement rattachés au substratum péridotitique (éboulis de blocs de péridotites). D'autres caissons sont utilisés à la fois sur substratum péridotitique et volcano sédimentaire. Les formations de pente à débris ferrugineux sont toutes rattachées au domaine péridotitique mais débordent éventuellement sur les formations volcano sédimentaires. Enfin, les cônes de déjections indifférenciés sont également largement associés au domaine péridotitique, seules quelques entités sont associées au domaine volcano sédimentaire sur le secteur de Bourail à l'occasion d'une actualisation de la carte géologique en 2006 (Maurizot, 2006). Quoi qu'il en soit, la surface de formations allochtones cartographiée est de l'ordre de 380 km², soit 2% de la superficie de la Grande Terre de 18 340 km².

Caisson	Domaine péridotitique	Domaine volcano sédimentaire	Surface (ha)
Calcrêtes	non	oui	145
Colluvions indifférenciées	oui	oui	7 687
Colluvions sur basaltes	non	oui	3 203
Coulées de débris à blocs de péridotites	oui	non	2 914
Coulées de débris anciennes	oui	(oui)	1 058
Débris de péridotites serpentinisées	oui	non	76
Eboulis de blocs de micaschistes	non	oui	233
Eboulis de blocs de péridotites	oui	non	717
Eboulis indifférenciés	oui	oui	181
Eboulis issus du démantèlement de terrasses	non	oui	35
Epandages anciens à éléments de silice et produits ferrugineux	oui	non	357
Epandages de blocs de cherts dépigmentés (Caillasse siliceuse)	non	oui	4 375
Formations de pente à débris ferrugineux	oui	(oui)	4 850
Fragments de silice et produits ferrugineux (Formation de Muéo)	cas particulier d'un paléo régolithe issu du démantèlement ancien d'un massif péridotitique		538
Masse de cherts noirs écroulés	non	oui	42
Masses de péridotites écroulées et déstructurées	oui	non	270
Cônes de déjection indifférenciés	oui	oui	11 760
Total des surfaces			38 442

illustration 14 - Récapitulatif des faciès géologiques décrivant des formations de versant sur la carte géologique à l'échelle du 1 :50 000^{ème}

2.3.2.1 Sur substrat péridotitique

Les caissons disponibles décrivent à la fois des lithologies et des processus génétiques (coulées de débris, cône de déjection). Pour les besoins de la cartographie des aléas, une mise à jour des formations du régolithe a été menée avec un effort particulier sur le domaine péridotitique. Deux nouveaux caissons ont été définis sur la base de description lithologique, et non plus phénoménologique, et généralisés sur l'ensemble du domaine péridotitique. La cartographie des formations allochtones a été généralisée au moyen de deux caissons :

- blocs ultrabasiques indifférenciés à matrice latéritique remaniées plus ou moins abondante. Cette formation de versant est directement issue du démantèlement gravitaire d'escarpement et de versant rocheux redressé ou sous couverture d'altération mince. Selon la nature de la zone source et la présence de matériaux latéritique fins, la proportion de latérite peut être notable.

Cette formation vient napper les versants sous forme de chaos de blocs sous des couverts forestiers et sont purement liés à la dynamique gravitaire.

- les latérites remaniées à blocs ultrabasiques indifférenciés. En position aval dans la topo-séquence par rapport au faciès précédent, dont il se distingue par la proportion plus importante de matrice latéritique. Le diamètre des éléments rocheux est plus faible avec des granulométries les plus grossières de taille décimétrique. Vers l'aval, ce faciès évolue vers des termes largement dominé par les latéritiques avec présence de petits éléments lithiques de nature variés : petits graviers de péridotites, de gabbro, de plaquettes siliceuses ainsi que des fragments de cuirasse et des pisolithes en abondance. Ces éléments soulignent parfois des figures de dépôt avec des stratifications frustres.

La succession des faciès dans le versant est également dépendante de la configuration de celui-ci. Sur des versants très redressés ou au niveau des falaises littorales, la formation de versant à blocs vient s'accumuler au pied du versant, dans le fond de vallée ou en bord de mer. Sur les versant plus long, les dépôts gravitaires à blocs passent insensiblement de faciès blocs / latérites à des faciès latérites / blocs puis enfin à des faciès essentiellement latéritiques. Vers l'aval, dans les vallées les plus larges, la dynamique alluviale prend progressivement le relais à mesure que la granulométrie devient sablo argileuse. On sort alors de la formation de versant à proprement parler pour passer dans les dépôts alluviaux.

La transition entre le faciès à blocs dominants et le faciès à latérites dominantes est progressive, dépendante de la configuration du versant et de la source de production des matériaux. Une succession de petits événements érosifs peut alimenter le nappage du versant en dépôts latéritiques remaniés ; éventuellement recouverts par un éboulement en masse avec des dépôts essentiellement rocheux.

Ces faciès sont mis en place par tout un cortège de phénomènes gravitaires qui peuvent se combiner et se prolonger d'amont en aval. Une chute de bloc à partir d'une facette rocheuse pouvant déclencher un glissement de la couverture pelliculaire latéritique pouvant lui-même évoluer en coulée puis lave torrentielle à la faveur d'une chenalisation vers l'aval.



illustration 15 – Schéma des faciès rencontrés sur versant de massif de péridotites

2.3.2.2 Sur volcano-sédimentaire

Sur substrat volcano-sédimentaire, les formations allochtones sont exceptionnellement cartographiées du fait de l'étendue des zones à couvrir et des médiocres conditions d'affleurement sous un couvert végétal tropical omniprésent.

Les paragraphes suivants donnent quelques éléments concernant les formations allochtones connues sur substrat volcano-sédimentaire.

Les colluvions indifférenciées constituent la formation de versant la plus cartographiée, suivies par les épandages de blocs de cherts dépigmentés et les colluvions sur basaltes. Ces trois formations viennent typiquement ennoyer les pieds des versants dans les parties amont des bassins versants. Indépendamment de la nature du substrat (basaltes, cherts, siltites, flyschs), ces formations sont le résultat d'une ablation des matériaux fins, à partir des hauts de versant et des crêtes, et d'un transfert puis accumulation vers les bas de versants.

Les phénomènes de transferts sont généralement lents : ruissellement, érosion diffuse, reptation. Ponctuellement, un phénomène plus rapide peut survenir, de type glissement avec évolution possible en coulée. Les distances de propagation sont de l'ordre de quelques dizaines de mètres et exceptionnellement une centaine de mètres.

Notons le cas de nombreux talus de déblais, ouverts lors de la réalisation d'axe routiers à travers la chaîne centrale et qui sont régulièrement le siège d'instabilités (illustration 11) lors d'épisodes pluvieux.

2.3.2.3 Cas des cônes de déjection et de coulées de débris anciennes

Un système torrentiel comprend 3 éléments : i) un bassin de réception des eaux de pluie où elles sont concentrées vers ii) un chenal torrentiel qui conduit à iii) un cône de déjection. Ils sont typiques des paysages montagneux.

Le fonctionnement est intermittent du fait de la saisonnalité des écoulements. Les cônes de déjection sont des unités morphométriques qui correspondent au lieu de dépôt et d'accumulation, généralement en forme d'éventail ou de cône, de matériaux transportés par un système torrentiel. Ces dépôts sont alimentés par des matériaux mis en mouvement en amont des versants (sous l'effet d'instabilités gravitaires) puis propagés vers l'aval via un chenal torrentiel jusqu'à une zone de dépôt. L'ensemble du phénomène : rupture amont, propagation chenalisée et dépôt constituent un mouvement de terrain typique : la lave torrentielle.

Il est à noter que hormis sur le secteur de Bourail où une mise à jour de la carte géologique a été réalisée en 2006, les cônes de déjection sont tous associés au domaine ultrabasique et sur le domaine ultrabasique, leur représentation n'est pas systématique.

2.4 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Le contexte hydrogéologique est largement dépendant de la distribution des formations d'altération, que ce soit dans le domaine volcano-sédimentaire que dans le domaine péridotitique (Espirat 1967, Jeanpert 2017). En domaine volcano-sédimentaire, les circulations hydrogéologiques sont favorisées dans les horizons fissurés non colmatés par les argiles. En domaine péridotitique, les circulations sont plus importantes dans l'horizon de saprolites grossières.

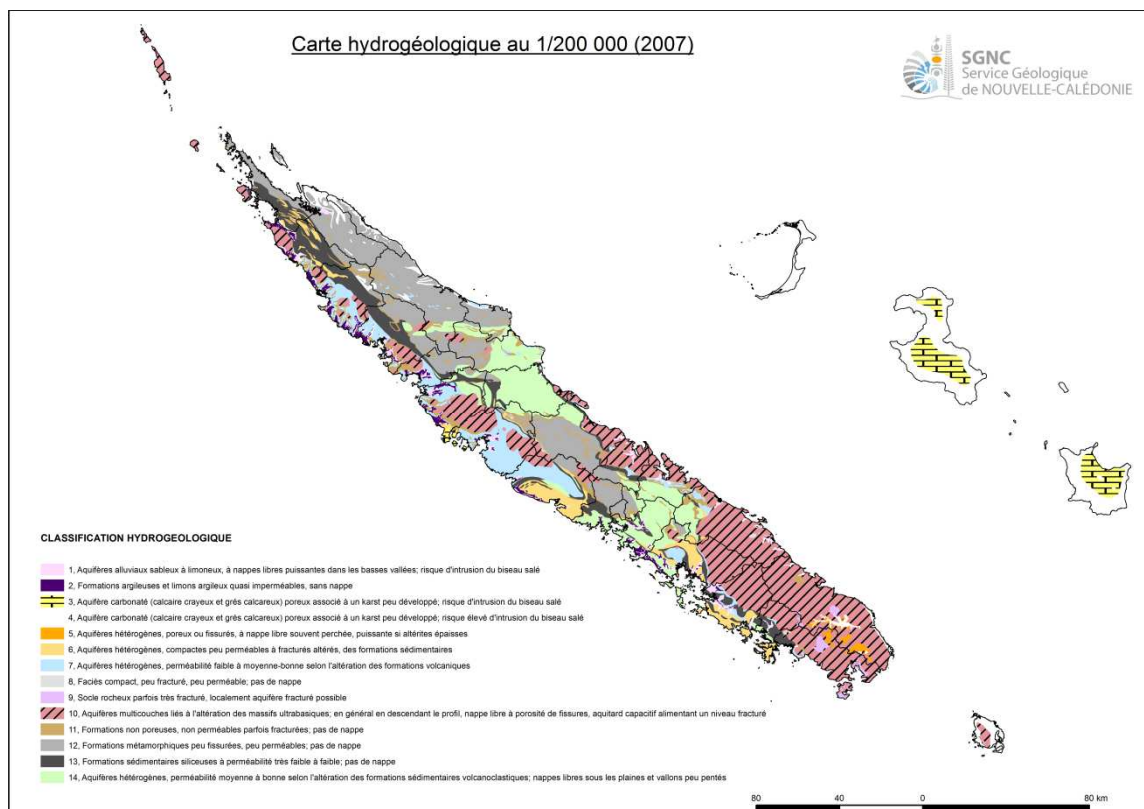


illustration 16 – Carte hydrogéologique de la Nouvellele Calédonie

2.4.1 DANS LES PÉRIDOTITES

Le système aquifère des massifs de péridotites présente un comportement de type karstique avec des transferts d'eaux rapides et des connexions souterraines entre bassins. Les nombreux éléments tels que dolines, lapiaz et autres pertes caractéristiques des milieux calcaires en témoignent. Le terme de pseudo-karst est employé pour désigner ce comportement observé dans les péridotites de Nouvelle-Calédonie. Il désigne des particularités hydrogéologiques similaires à celles observables en milieu karstique, mais au sein de roches peu solubles et dont l'altération provient donc de processus différents tels que l'hydrolyse ou l'érosion mécanique. Ces facteurs de l'altération sont favorisés en climat tropical, chaud et humide.

La nappe des péridotites de Nouvelle-Calédonie constitue un aquifère multicouche potentiellement intéressant en terme de circulation et stockage d'eau (illustration 17). Le profil d'altération des massifs comporte trois types d'aquifères.

- La cuirasse et la grenaille constituent un aquifère temporaire perméable fissuré impliquant des écoulements de sub-surface.

- Un niveau semi-imperméable dont la porosité est importante et avec une perméabilité faible (ce qui lui confère alors une fonction capacitive), composé de latérites jaune et rouge et de saprolite fine, terreuse et représente donc un aquitard. Des zones de suintement peuvent localement être observées sur les affleurements de latérite en période de hautes-eaux.
- Et enfin l'aquifère principal qui se situe au niveau des saprolites grossières et les péridotites fracturées. Cet aquifère possède une fonction transmissive et il alimente les principales résurgences des versants.

Cet horizon, lieu principal de la minéralisation de l'eau, est composé d'une roche altérée qui facilite la circulation de l'eau. À l'échelle du massif, ces formations ont une capacité de stockage importante dans le manteau d'altération, dans les fractures et pourraient jouer le rôle de régulateur pour les débits des cours d'eau.

2.4.2 EN CONTEXTE VOLCANO-SÉDIMENTAIRE

En domaine volcano sédimentaire, seuls les horizons altérés sont susceptibles de présenter une perméabilité et une porosité à même d'en faire des réservoirs. Les lithologies altérées qui forment les principaux réservoirs sont les basaltes, les grauweekes et le flysch éocène. La nappes des formations altérées sont fortement contrôlées par la topographie et elles sont plus développées dans les zones plates à faiblement vallonnées (Espirat, 1967).

Les circulations d'eau se font préférentiellement dans les horizons d'isaltérites où les fissures sont ouvertes, l'argilitisation ayant tendance à colmater les fissures dans les horizons supérieurs des profils d'altération. Dans les horizons d'allotérites, largement argileux, les fissures sont colmatées et les circulations d'eau souterraines réduites.

Parmi les formations alluviales, seules les alluvions modernes recèlent des nappes d'intérêt, les alluvions anciennes s'avérant généralement imperméables.

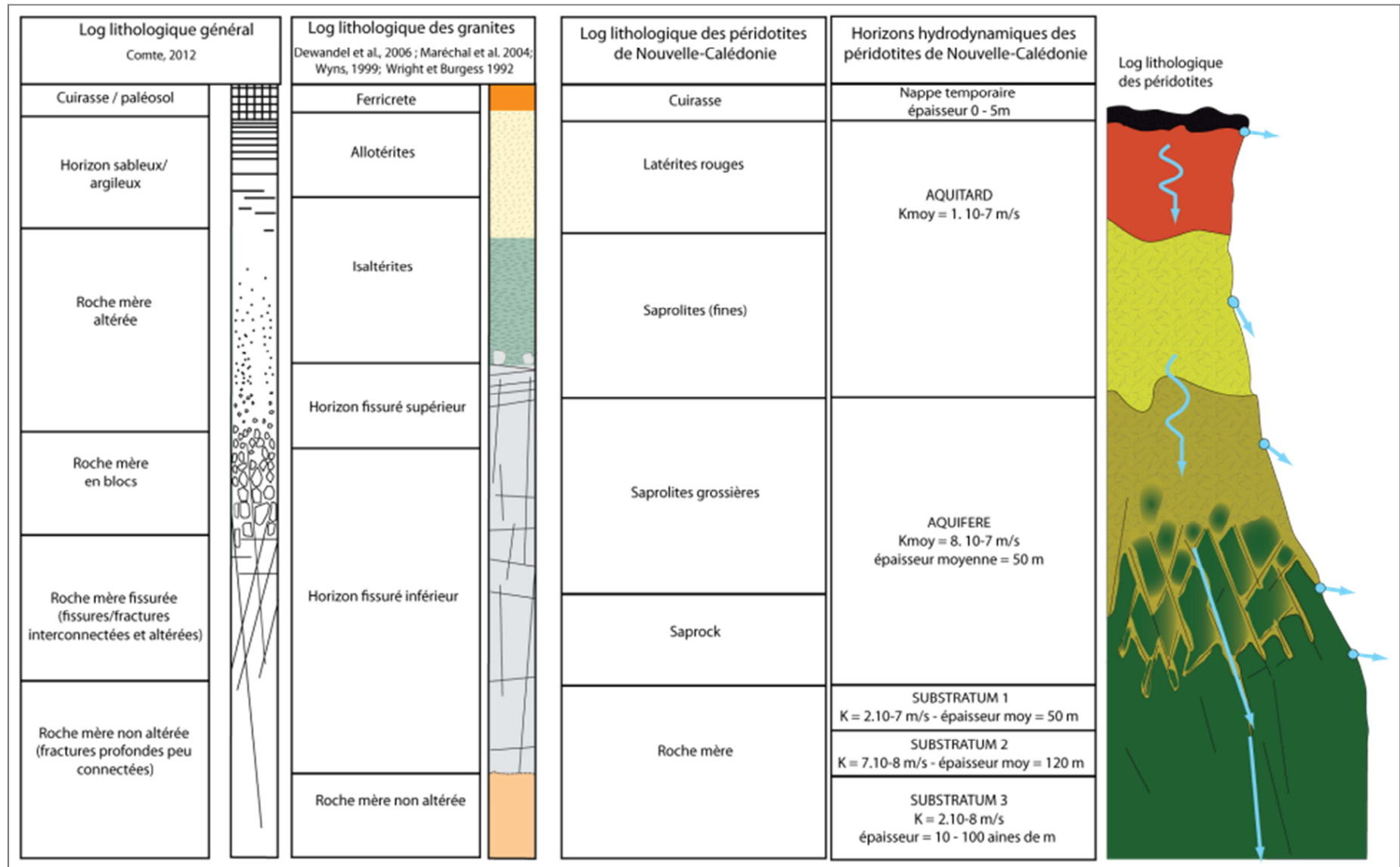


illustration 17 – Horizons hydrodynamiques des péridotites de Nouvelle-Calédonie (Jeanpert, 2017)

2.5 CONTEXTE CLIMATIQUE

2.5.1 LE CLIMAT

La Nouvelle-Calédonie est située dans la zone intertropicale, juste au nord du tropique du Capricorne. Très isolée géographiquement et soumise au courant des alizés de Sud-Est, elle bénéficie d'un climat relativement tempéré, que l'on peut qualifier de « tropical océanique » (Perchat 2003, Romieux, 2011).

La variation annuelle de la position de la ceinture anticyclonique subtropicale et des basses pressions intertropicales détermine deux saisons principales, séparées par deux intersaisons :

- De novembre à avril : c'est la saison chaude et humide, dite « saison des cyclones ».
- D'avril à mai : c'est une saison de transition, où les perturbations tropicales sont rares ou peu actives.
- De mai à septembre : c'est la saison fraîche, où des perturbations d'origine polaire peuvent atteindre le territoire et provoquer des « coups d'Ouest ».
- De septembre à novembre : c'est la saison sèche, durant laquelle l'alizé souffle en quasi permanence.

La pluviogénèse est essentiellement liée à l'activité de la zone de convergence du Pacifique Sud (ZCPS). La convection se trouve accentuée par effet orographique lorsque les flux d'alizé de Sud-Est rencontrent les massifs montagneux.

Le climat est également soumis au phénomène ENSO « El Niño Southern Oscillation ». Il s'agit d'une interaction entre la dynamique océanique et atmosphérique qui se manifeste tous les 3 ou 4 ans suivant deux phases, « El Nino » et « La Nina ». ENSO perturbe la configuration habituelle des précipitations ainsi que la circulation atmosphérique aux latitudes tropicales. En Nouvelle-Calédonie, les précipitations ont tendance à diminuer durant El Nino et à augmenter durant La Nina.

2.5.2 LES PRÉCIPITATIONS

La pluviométrie de la Grande Terre varie beaucoup en fonction du relief et de l'exposition au vent. En effet, la pluviométrie est la plus importante dans les montagnes à l'Est et dans le Sud.

La pluviométrie interannuelle moyenne est 1683 mm. Elle varie de 750 mm à 4000 mm (illustration 18). Les intensités de pluies centennales suivent une répartition analogue :

- 140 à 200 mm.h⁻¹ en 15 min (illustration 19) ;
- 80 à 130 mm.h⁻¹ en 1h (illustration 20).

A titre d'illustration, les cumuls de précipitations en 24h, déduits du radar de Lifou le 22 novembre 2016 atteignent 550 mm à la station de Carovin (Houaïlou) et 700 mm à Méa (Kouaoua) et 350 mm sur le massif de Bel Air (Houaïlou).

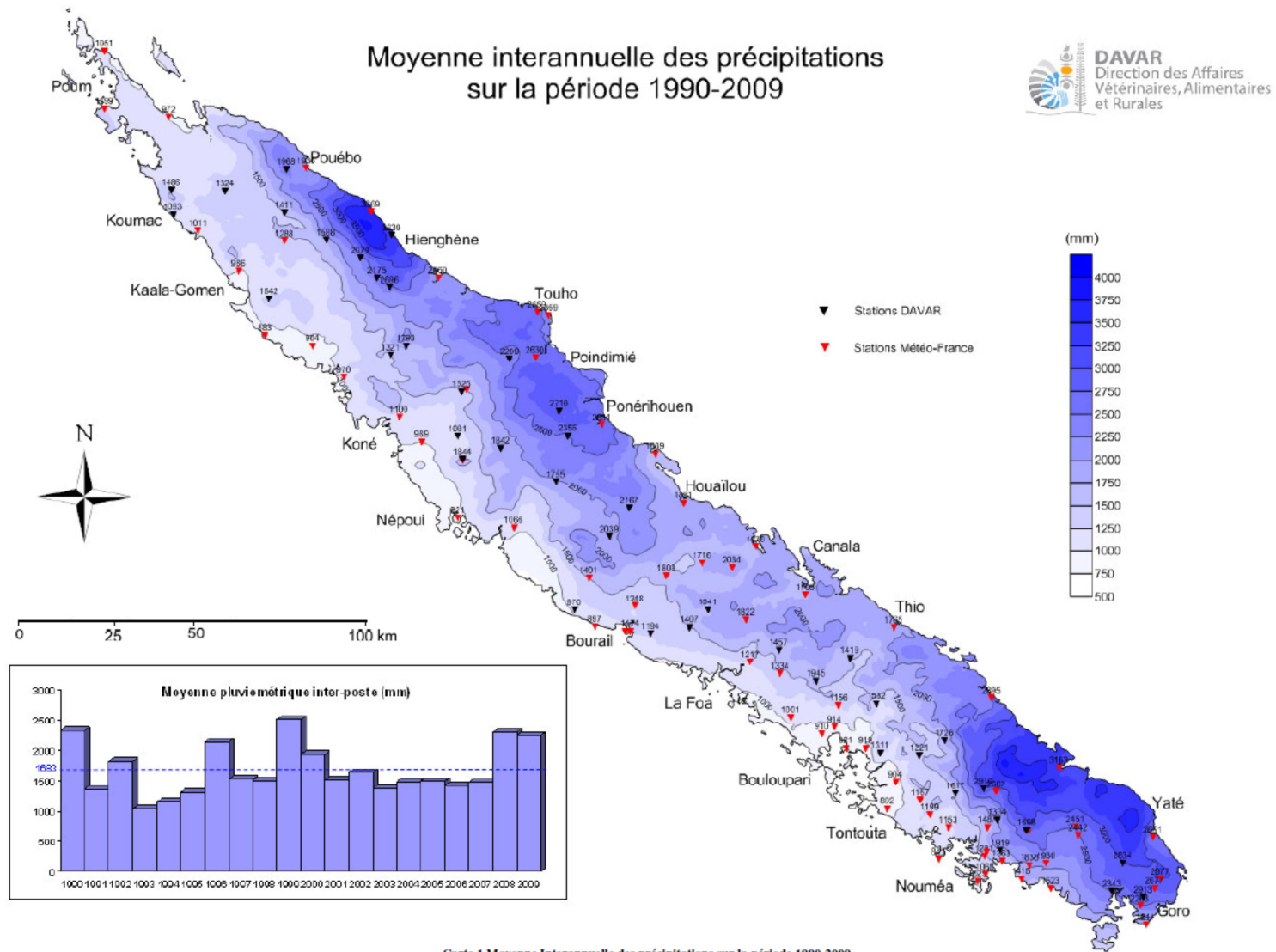


illustration 18 – Moyenne interannuelle des précipitations sur l'ensemble de la Grande Terre (1990-2009, Romieux 2011)

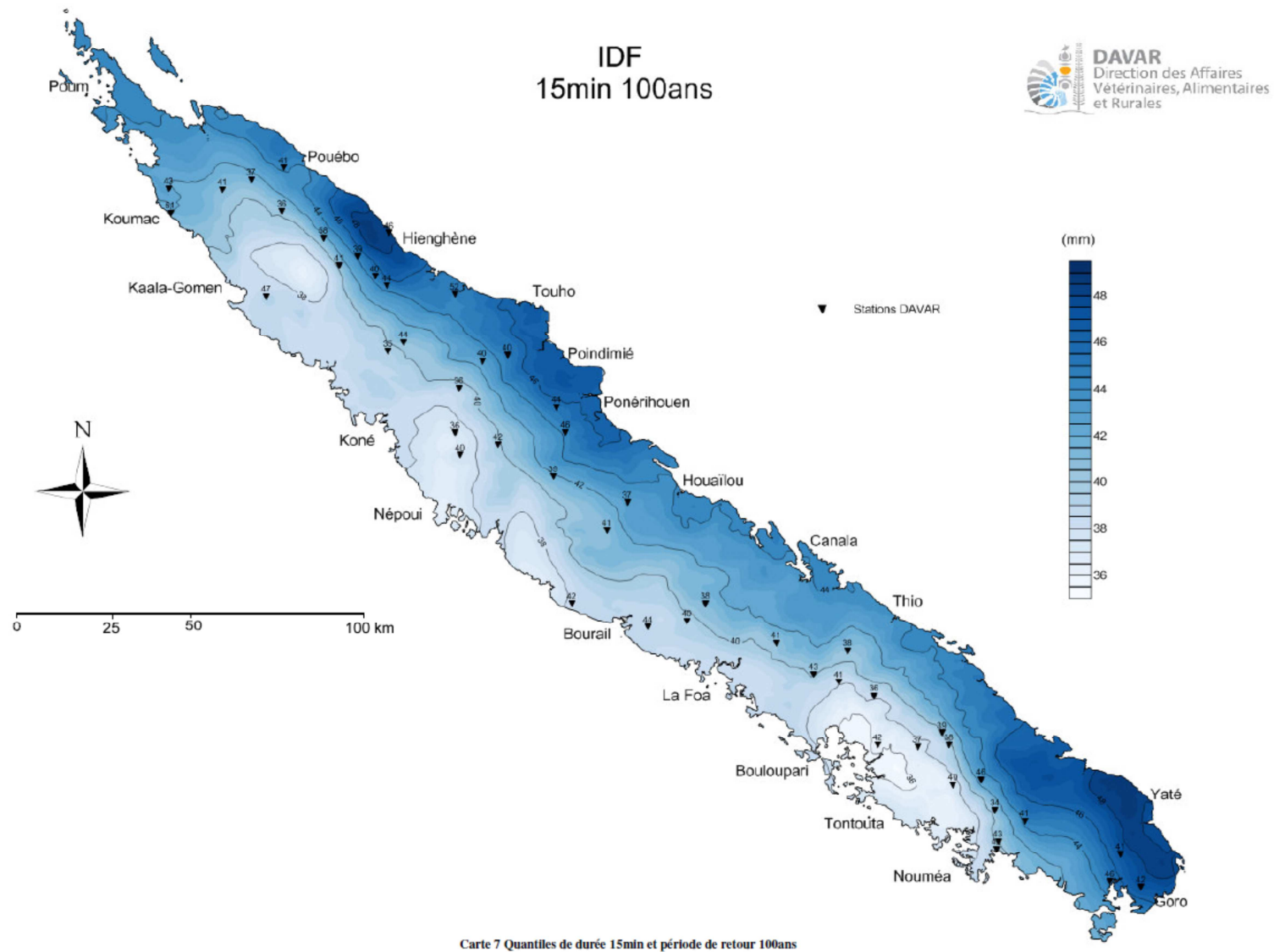


illustration 19 – Intensité, Durée, Fréquence (IDF) Quantile de durée 15 minutes et période de retour 100 ans (Romieux 2011)

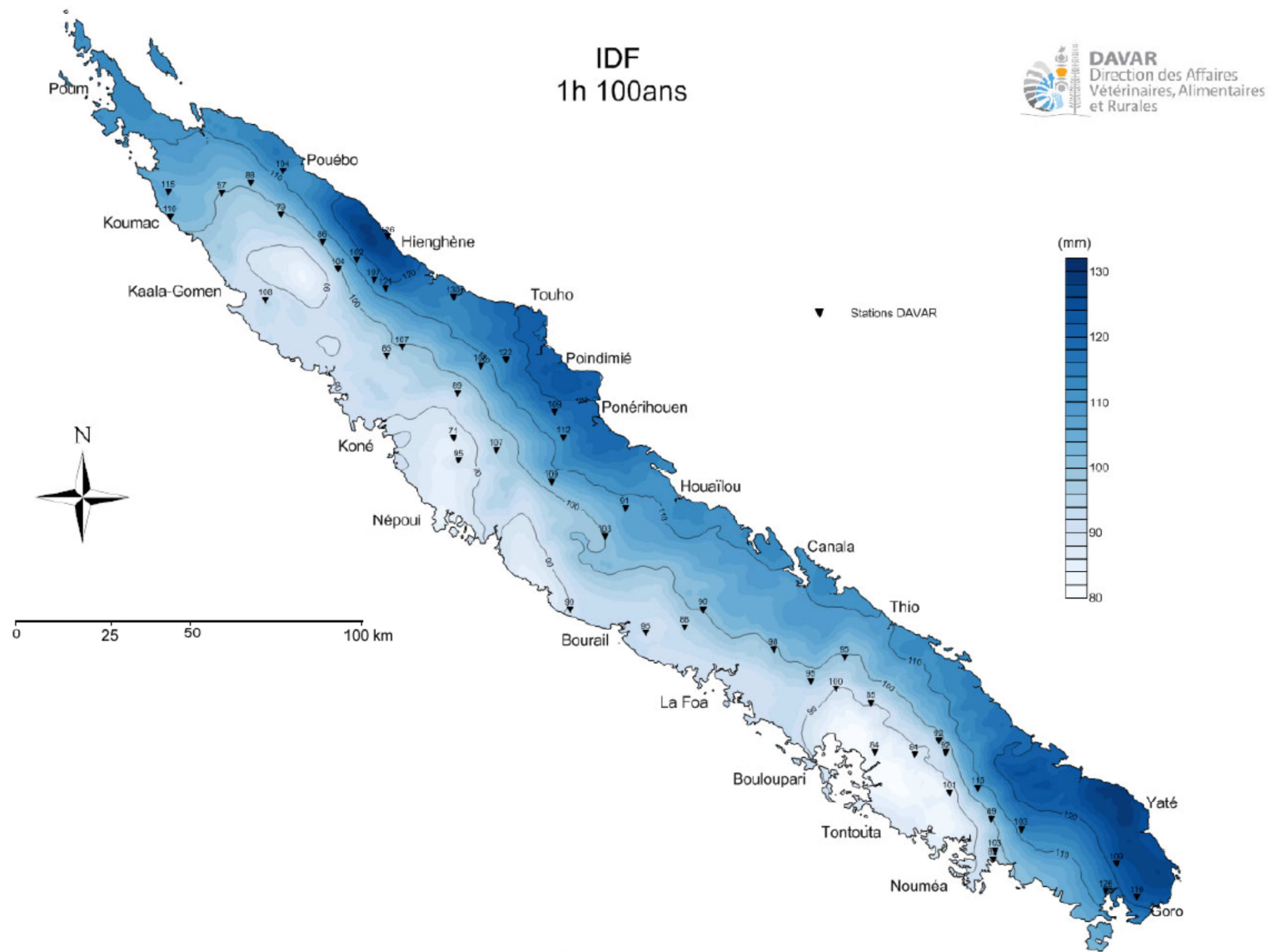


illustration 20 – Intensité, Durée, Fréquence (IDF) Quantile de durée 1 heure et période de retour 100 ans (Romieux 2011)

2.5.3 CATALOGUE DES CYCLONES, DÉPRESSIONS TROPICALES ET TEMPÊTES EN NOUVELLE-CALÉDONIE

Météo France en Nouvelle-Calédonie (www.meteo.nc) recense les cyclones, dépressions tropicales et tempêtes ayant affecté la Nouvelle-Calédonie depuis 1880 (annexe 1). On dénombre 55 phénomènes en 141 ans, dont 18 entre 1880 et 1976, 25 entre 1976 et 2008 et 12 depuis 2008. Les données pluviométriques sont celles des stations Météo-France. D'autres pluviomètres (DAVAR, sites miniers ou industriels) peuvent avoir enregistré des valeurs localement plus élevées.

A noter que l'intensité d'un cyclone est évaluée selon la vitesse des vents. Toutefois ce paramètre n'est pas forcément déterminant en termes d'intensité ou de cumul de pluies. Ainsi, certains épisodes pluvieux hors saison cyclonique présentent des intensités pluviométriques très importantes (plus de 350 mm en 24 h) comme observé sur les foyers orageux dans le Nord-Est en 1964 ou plus récemment lors des orages sur Houaïlou en 2016.

Les événements de précipitations mémorables répertoriés par Météo-France Nouvelle Calédonie sont identifiés selon les 3 critères (illustration 21) :

- Le volume total d'eau précipitée* ;
- La quantité maximale de précipitations mesurée (par un pluviomètre) en une journée ;
- Le nombre de jours de l'épisode.

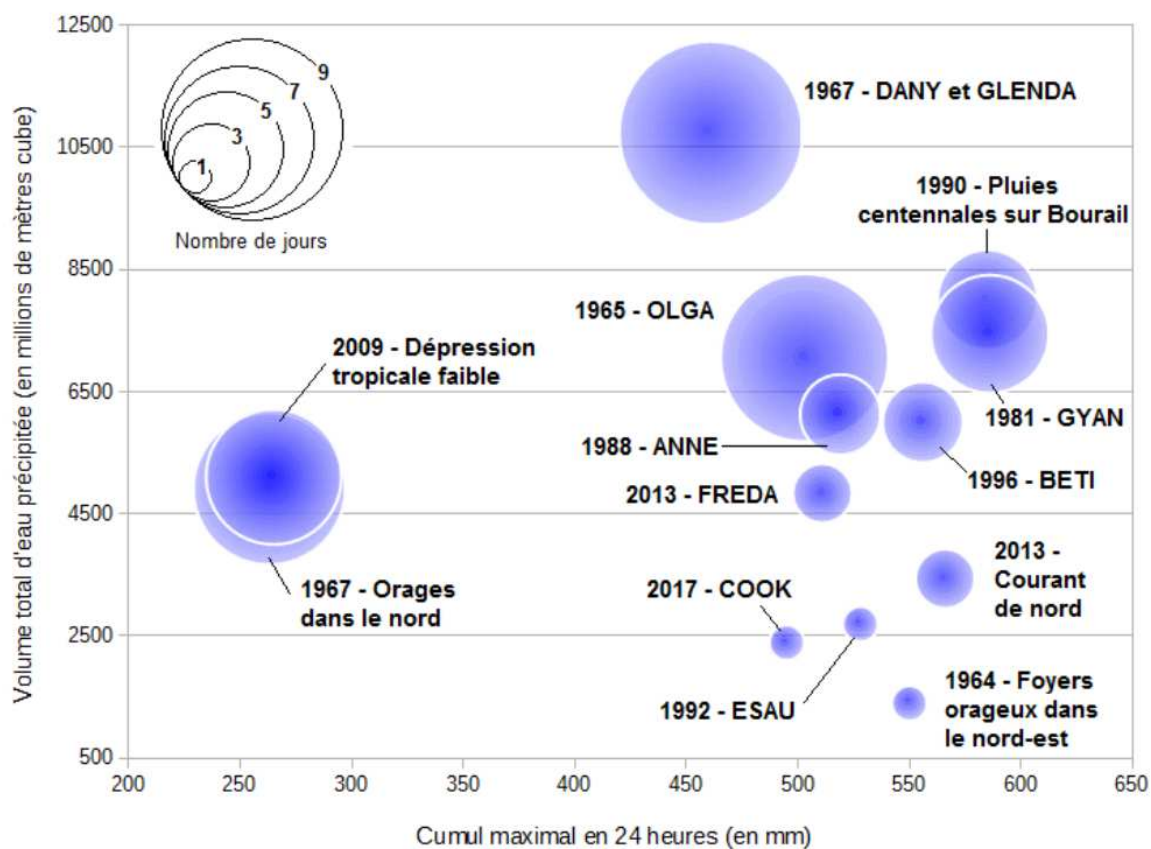


illustration 21 – Episodes pluvieux les plus intenses relevés entre 1961 et 2018 en Nouvelle Calédonie (<http://pluiesextremes.meteo.fr/nouvelle-caledonie/>)

Nom	Phénomène	Zones touchées	Date	Cumul maximum en 24H
<u>1996 - BETI</u>	Cyclone tropical	Côte Est Chaîne	25 au 27 mars 1996	556 mm (station Méa, commune de Kouaoua)
<u>1992 - ESAU</u>	Cyclone tropical	nord et centre de la Grande-Terre	4 mars 1992	528 mm (station Kopéto, commune de Koné)
<u>1990 - Pluies centennales sur Bourail et ses alentours</u>	Dépression tropicale	centre de la Grande- Terre	21 au 24 janvier 1990	582 mm à la station Bourail (commune de Bourail)
<u>1988 - ANNE</u>	Cyclone tropical	Côte Est	11 au 13 janvier 1988	519 mm (station Thio P., commune de Thio)
<u>1981 - GYAN</u>	Cyclone tropical	Grande-Terre Ile des Pins Maré	22 au 26 décembre 1981	586 mm (station Ouenarou, commune de Yaté)
<u>1967 - DANY et GLENDA</u>	Cyclone tropical	Iles Loyauté Côte Est Ile des Pins	28 mars au 5 avril 1967	461 mm (station Tiwaka, commune de Touho)

*illustration 22 – Tableau de synthèse de quelques évènements mémorables
((<http://pluiesextremes.meteo.fr/nouvelle-caledonie/>))*

2.5.4 ZONAGE CLIMATIQUE

Selon la trajectoire et la taille du phénomène météorologique, un événement cyclonique (ou une dépression tropicale) peut être marquant pour une partie du territoire seulement. La Nouvelle-Calédonie a été divisée en 9 zones climatiques de régimes pluviométriques distincts (<http://pluiesextremes.meteo.fr/nouvelle-caledonie/>, carte ci-dessous).

Les zones climatiques sont constituées des communes suivantes :

- Zone Extrême sud : sud des communes du Mont-Dore et de Yaté ;
- Zone Extrême sud-ouest : nord de la commune du Mont-Dore et commune de Dumbéa ;
- Zone Sud-ouest : île des Pins, Nouméa, Boulouparis, Farino, Sarraméa (voir carte ci-dessous) ;
- Zone Centre-ouest : Moindou, Bourail ;
- Zone Nord-ouest : Poya, Pouembout, Koné, Voh, Kaala-Gomen, Koumac, Poum et Belep ;
- Zone Nord-est : Ouegoa, Pouébo, Hienghène, Touho, Poindimié ;
- Zone Centre-est : Ponérihouen, Houailou, Kouaoua, Canala, Thio ;
- Zone Sud-est : une grande partie de la commune de Yaté ;
- Zone îles Loyauté : Maré, Lifou, Ouvéa.



illustration 23 – Zones climatiques en Nouvelle-Calédonie (<http://pluiesextremes.meteo.fr/nouvelle-caledonie/>)

2.5.5 EXEMPLE DE DÉFINITION DU FORÇAGE MÉTÉOROLOGIQUE À THIO

Dans le cadre du projet CNRT IMMILA, une approche pour évaluer le forçage météorologique a été proposée sur le bassin versant de la Thio (Garcin, 2017). L'approche proposée a été d'utiliser la distribution temporelle des précipitations comme un indicateur du forçage météorologique. Les enregistrements depuis 1952 sont quasi continus (92 jours seulement sont manquants suite à un arrêt d'enregistrement) jusqu'à aujourd'hui. Cette analyse sur une longue période a permis :

- D'une part d'essayer de caractériser la pluviométrie d'un secteur ;
- D'autre part, d'identifier les événements ou saisons où les pluies, par leurs différentes caractéristiques (intensité, durée, quantité).

Chaque événement, en fonction de ses caractéristiques (durée, intensité etc.) a un effet spécifique sur les processus d'instabilité. Le travail réalisé fournit des indicateurs sur l'évolution du forçage météorologique fondé sur des analyses statistiques et l'élaboration d'une typologie des événements pluvieux. Entre 1952 et 2016, 3 518 événements pluvieux sont caractérisés. Afin de hiérarchiser les événements, une évaluation par quantiles (des précipitations et des durées) a été effectuée. Il est souligné que l'événement de juillet 2013 qui a la plus forte intensité moyenne de tous les événements de la période 1952-2016 se produit en dehors de la saison cyclonique. Ceci confirme que des événements météorologiques durant la période sèche sont relativement rares, mais qu'ils peuvent être très significatifs.

En parallèle, une analyse morphologique historique des phénomènes a été menée dans le cadre de cette étude, par analyse et traitement des campagnes de photographies aériennes (et des images Google Earth depuis 2008). Sur chaque période encadrant les campagnes de photographies aériennes (source de données d'inventaire), les caractéristiques définies des épisodes pluvieux sont agrégées :

Périodes	Pluie cumulée (mm)	Nb de jours pluvieux	Intensité maximale (mm/24h)	Pluie cumulée en période cyclonique (mm)	Pluie cumulée en saison sèche (mm)	Nb d'évènements pluvieux	Nb d'évènements P>155 mm (5%)	Nb d'évènements > 6j (5%)	Nb d'évènements "longs et pluvieux"	Nb d'évènements courts et intenses"
1954 to 1971	33 370	2 067	372	21 841	11 649	857	54	40	18	36
1971 to 1976	7 662	694	215	5 051	2 757	282	11	13	8	3
1976 to 1989	20 219	1 585	519	13 258	6 565	679	20	25	12	17
1989 to 2008	32 612	2 633	260	22 537	10 367	1 106	42	53	19	23
2008 to 2015	13 639	879	454	9 191	4 568	382	27	11	6	21

illustration 24 – Principales caractéristiques des précipitations à Thio, par période entre les différentes campagnes de photographies aériennes (d'après Garcin, 2017)

Si on analyse ces données en moyenne annuelle par période et sur toute la période de données on relève que :

- Le nombre d'évènements « long et pluvieux » est en moyenne de 1,1 par an (min. 0,9 / max 1,6) ;
- Le nombre d'évènements courts et intenses est en moyenne de 1,6 par an (min. 0,6 / max. 3,0).

L'ensemble de ces éléments montre que :

- A l'échelle du territoire, beaucoup de dépressions-cyclones (environ 30 sur les 30 dernières années) touchent tout ou partie du territoire, soit un évènement par an. La valorisation du zonage climatique serait sans doute pertinente pour juger de la spatialisation de cette donnée, même si les cartes de période de retour illustrent a priori indirectement cela ;
- A l'échelle d'un bassin de référence (Thio), il est décrit en moyenne environ un évènement long et pluvieux par an et un à deux évènements courts mais intenses (P > 155 mm par 24 h).

Ces éléments montrent la relative répétitivité des phénomènes intenses, responsables de l'activation de mouvements de terrain et valide, au moins de façon qualitative, la valorisation de longues périodes d'inventaires (30 à 50 ans) pour aboutir à des données pertinentes sur la représentativité des phénomènes.

3 Collecte et structuration générale des données

3.1 DONNÉES DE BASE

Les données suivantes (illustration 25) ont été spécifiquement collectées ou élaborées pour le projet de cartographie de l'aléa mouvement de terrain :

Type de données	Source	Propriétaire	Type	Existant (E) / Constitué lors du projet (C)
Topographie	MNT 10 m	DITTT	Couches raster (SIG)	E
Photographies aériennes	Campagne 1976 Campagne 2008	DITTT	Couches raster (SIG)	E
	Campagnes 1954	DITTT	Archives papier	E
Google Earth Pro	Images satellite 2012-2020	Google	Images 3D	E
Occupation du sol	BD-TOPO	DITTT	Couches vecteur (SIG)	E
Géologie	Carte géologique 1 :50 000 ^{ème}	SGNC	Couches vecteur (SIG)	E
	Carte du régolithe 1 :10 000 ^{ème}	SGNC	Couches vecteur (SIG)	C
Météo	Romieux (2011)	DAVAR	Couches raster (SIG)	E
Inventaire mouvement de terrain	Bibliographie Travail de terrain Géomorphologie	-	Emprises SIG	C

illustration 25 – Données fondamentales utilisées ou constituées

3.2 DONNÉES RELATIVES AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN

3.2.1 DONNÉES EXISTANTES

3.2.1.1 BDMvt nationale

La base BDMvt² mémorise de façon homogène, l'ensemble des informations disponibles en France, sur des situations récentes et sur des événements passés de mouvements de terrain, et permet le porté à connaissance des phénomènes. Cette base de données répond en partie aux objectifs de planification préventive des risques permettant une meilleure protection des personnes et des biens. Les phénomènes considérés sont : glissements de terrain,

² <https://www.georisques.gouv.fr/dossiers/mouvements-de-terrain/>

éboulements rocheux, coulée de boue, effondrements de cavités souterraines et érosion de berges. **A ce jour, la Nouvelle-Calédonie n'intègre cependant pas cet inventaire national**, au même titre que la Polynésie.

3.2.1.2 DRM Nouvelle-Calédonie

En revanche, le DRM (Dossier des Risques Majeurs) de la Nouvelle Calédonie recense quelques événements marquants (illustration 26) :

Date	Localisation	Type de mouvement de terrain	Conséquences
1970	Népoui	Glissement de terrain suite à une importante période pluvieuse	Glissement de grandes décharges minières venant barrer la rivière Muéo (Népoui), créant ainsi un lac artificiel lui-même ayant englouti un village minier installé en amont de la vallée.
1988	Mont-Dore	Type de mouvement de terrain : coulée boueuse lors du cyclone Anne	Mouvements de terrain dans les lotissements Milles et Berton. Pas de victimes.
2009	Koné	Glissement de terrain suite au cyclone Jasper	Routes coupées induisant de longs détours et des difficultés de communication.
25/01/2011	Païta	Glissement de terrain suite au cyclone Vania	Routes coupées induisant de longs détours et des difficultés de communication.
24/12/2011	Houailou et Yaté	Glissement de terrain suite à de fortes précipitations	Phénomène qui a évolué en coulées de débris, rapidement et en grand nombre, sur une portion limitée de la commune de Houailou lors des précipitations exceptionnelles (500 mm en 24 h) de Noël 2011 (tempête Fina). Quelques constructions détruites par des glissements de terrain, des coulées de boues ou des inondations. Aucune victime n'est à déplorer, mais l'évacuation de plusieurs centaines de personnes, privées d'abri par les fortes pluies, a été rendue nécessaire.

illustration 26 – Evènements « mouvements de terrain » marquants (source DRM, 2016)

L'illustration 27 présente quelques images coupures du journal Les Nouvelles Calédoniennes, éditions du 14 et du 15 janvier 1988, qui témoignent de l'ampleur des dégâts occasionnés pendant le passage du cyclone Anne (<http://pluiesextremes.meteo.fr/nouvelle-caledonie/>).



« Plusieurs glissements de terrain ont coupé la promenade Vernier »



« [Mercredi 13 janvier] le pont du Mont Koghi était emporté par les eaux. »



« Au Mont-Dore, la montagne s'est abattue du côté des lotissements Mille et Berton. »

Une véritable catastrophe pour Païta

Propos du maire de Païta Ronald Martin :

« Nous avons de très gros dégâts sur le réseau routier. Des pistes ont été coupées en plusieurs endroits, le pont du Mont-Mou est obstrué par des rochers, nous ne savons pas exactement dans quel état est la piste qui mène au sanatorium. Elle semble avoir été emportée sur plusieurs mètres. Sur la RT1, le flot a emporté de grandes plaques de coaltar... ».

La Tontouta coulait sur la piste

Grossissant, la Tontouta a donné naissance à un nouveau bras de rivière. Celui-ci a coulé pendant toute la journée d'hier... sur la piste de l'aéroport ! Il a réduit la longueur utilisable de celle-ci de 3 000 mètres à 2400 mètres.

illustration 27 – Coupures de presse suite au cyclone Anne (<http://pluiesextremes.meteo.fr/>)

A ces évènements marquants, il convient de mentionner les mouvements de terrains survenus sur la commune de Houaïlou en 2016, après l'édition du DRM (illustration 29) et notamment autour du massif de Bel Air déjà impacté en 2011 (illustration 28).

En 2016, lors d'un épisode pluvieux particulièrement intense (>230 mm par 24h relevé par le radar Météo-France), hors saison cyclonique, de nombreux mouvements de terrain de type laves torrentielles se sont déclenchés. Les phénomènes se sont principalement activés sur le pourtour du massif de Bel Air, au droit du passage de la cellule orageuse et de façon synchrone avec celle-ci.

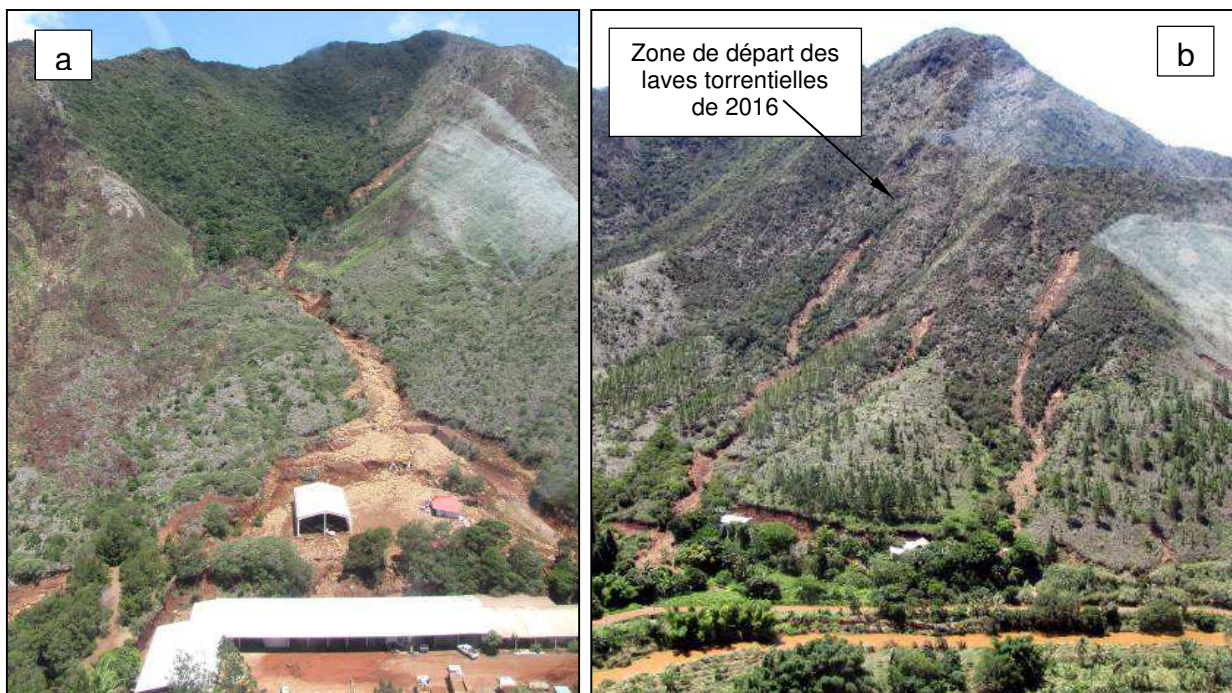


illustration 28 – Vue sur les versants du Massif de Bel Air suite à l'épisode pluvieux du 24-12-2011 a) centre de secours ruiné ; b) secteur de Gouareu avec coulées de matériaux sur les versants



illustration 29 – Vue sur le massif de Bel Air, Houaïlou, secteur de Gouareu après épisode pluvieux du 22-11-2016

3.2.2 ATLAS

Entre 1998 et 2007, un programme de cartographie des risques naturels concernant les mouvements de terrain a été entrepris en Nouvelle-Calédonie, à la demande de l'État, en réponse aux dégâts récurrents occasionnés par le passage des cyclones et des dépressions tropicales. Ce programme a été réalisé par le (BRGM), notamment en collaboration avec la direction de l'industrie, des mines et de l'énergie de Nouvelle-Calédonie (DIMENC). Entre 1999 et 2006, 14 zones d'intérêts économiques présentant des aléas ont été étudiées : Tontouta, Boulouparis, Kaala-Gomen, Prony, Touho-Poindimié, Thio, Mont-Dore, Koniambo, Goro (illustration 30 et illustration 37), Koné, Canala, Dumbéa-Païta, Pouembout et Kouaoua. Les documents cartographient les formations superficielles, les principaux phénomènes et ponctuellement les aléas mouvements de terrain. Ils sont réalisés à l'échelle du 1 :25 000^{ème}, un zoom à 1 :10 000^{ème} a été réalisé sur la commune du Mont-Dore suite aux glissements de terrains survenus en 1988 (cyclone Anne, 259 mm en 2 jours) et 1990 (épisode orageux 218 mm en 24h).

Ces atlas listent les phénomènes suivants :

- chutes de blocs ;
- lavakas ;
- glissements et fluage ;
- écroulements en masse ;
- fluage ;
- coulées boueuses et coulées de débris,
- laves torrentielles,
- ravines ;
- engravement et charriage torrentiel ;
- débordements, divagations torrentielles.

La plupart de ces phénomènes passent graduellement de l'un à l'autre, se télescopent et les mécanismes se recouvrent partiellement.

La presqu'île de Nouméa a fait l'objet d'une carte d'aptitude à l'aménagement à l'échelle 1 :25 000^{ème} qui prend en compte les aspects mouvements de terrains (1986).

Fig. 14 - Localisation des principales coulées de débris sur l'escarpement littoral de Goro

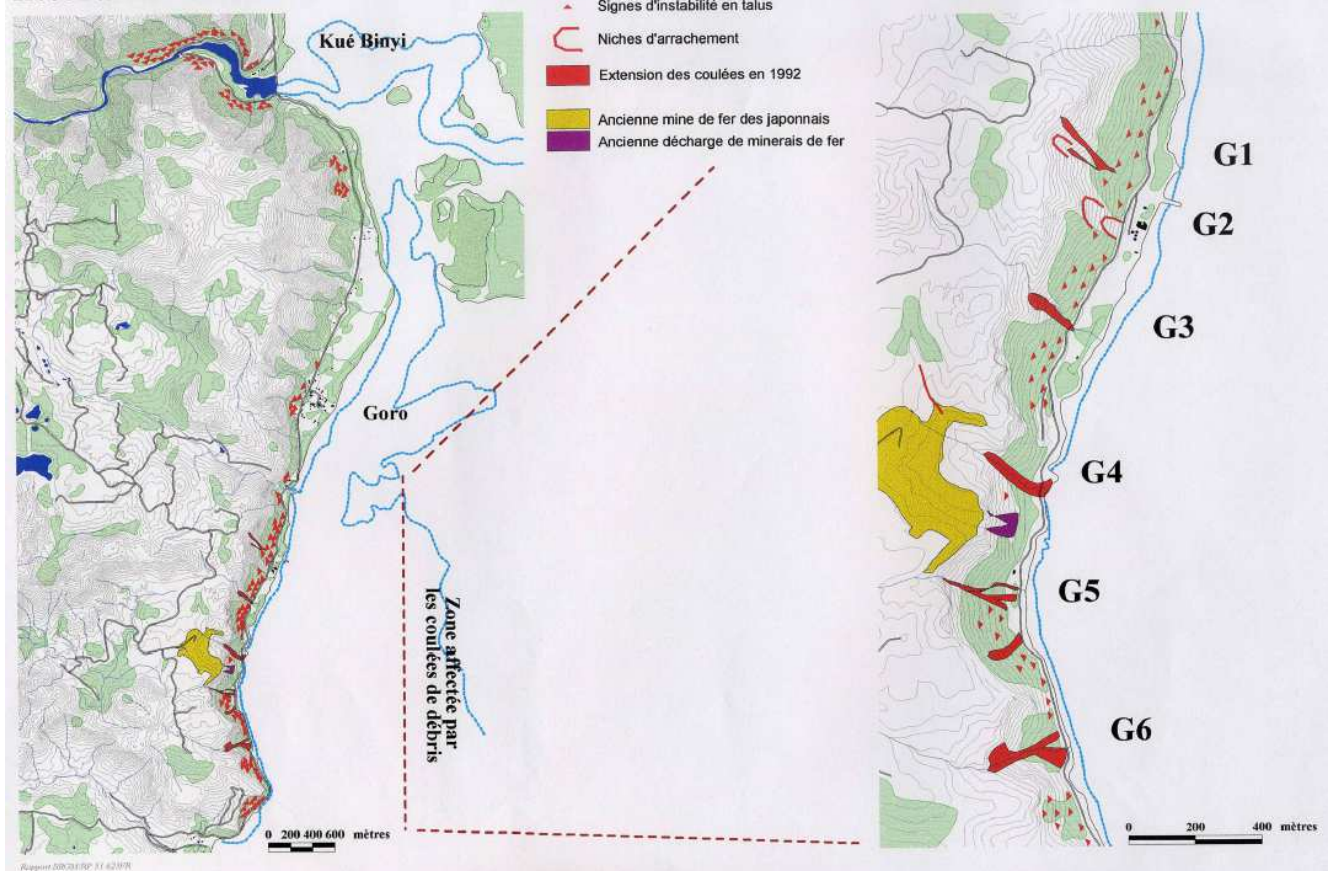


illustration 30 – Exemple de carte issue des cartes informatives de phénomènes des atlas (zone de Goro, 2003, BRGM RP-51623-FR)

Fig. 16 - Coulées de débris de Goro : Coulées G4 et G6



illustration 31 – Exemple de phénomène répertoriés (zone de Goro, 2003, BRGM RP-51623-FR)

Ces atlas cartographiques compilent des données sur :

- Les entités morphologiques ;
- Les formations géologiques : nature des faciès et analyse structurale le plus souvent ;
- Les événements recensés ;
- Les phénomènes redoutés avec les facteurs de prédisposition et de déclenchement ;
- de façon non systématique, une cartographie de la susceptibilité à l'aléa (illustration 33).

De façon générale, le facteur de prédisposition primordial des mouvements de terrain du territoire est d'ordre géologique combiné à un facteur déclenchant d'ordre climatique (cyclones, dépressions tropicales). Dans la grande majorité des cas, les désordres résultent de la conjonction des mêmes facteurs : altération des roches en climat tropical, fortes pentes du milieu montagneux, événements pluvieux cycloniques qui préparent et déclenchent des phénomènes d'instabilité parfois originaux. L'un des traits géologiques fondamental de la Grande Terre est constitué par les massifs de péridotites. La plupart des aléas gravitaires leur sont liés.

Secteur d'intérêt	Année	Cartographie des formations superficielles	Inventaire des phénomènes	Chute de bloc	Carte de susceptibilité	Carte Risque
Dumbéa	1998	oui	oui	Trajectographie localisée	oui	non
Pouembout	1998	oui	oui	non	oui	non
Koné	1999	oui	oui	non	oui	non
Tontouta	1999	oui	oui	non	oui	non
Thio	2001	oui	oui	non	oui	non
Koniambo	2002	oui	oui	non	non	non
Yaté	2003	oui	oui	non	non	non
Mont Dore	2001	oui	oui	non	oui	non
Touho-Poindimié	2001	oui	oui	non	oui	non
Thio	2001	oui	oui	non	oui	oui, localisée
Goro	2002	oui	oui	non	non	non
Canala	2003	oui	oui	non	non	non
Kouaoua	2004	oui	oui	non	non	non
Prony	2004	oui	oui	non	non	non
Kaala	2005	oui	oui	non	non	non
Boulouaris	2005	oui	oui	non	non	non

illustration 32 – Récapitulatif des travaux réalisés dans le cadre des atlas entre 1998 et 2005

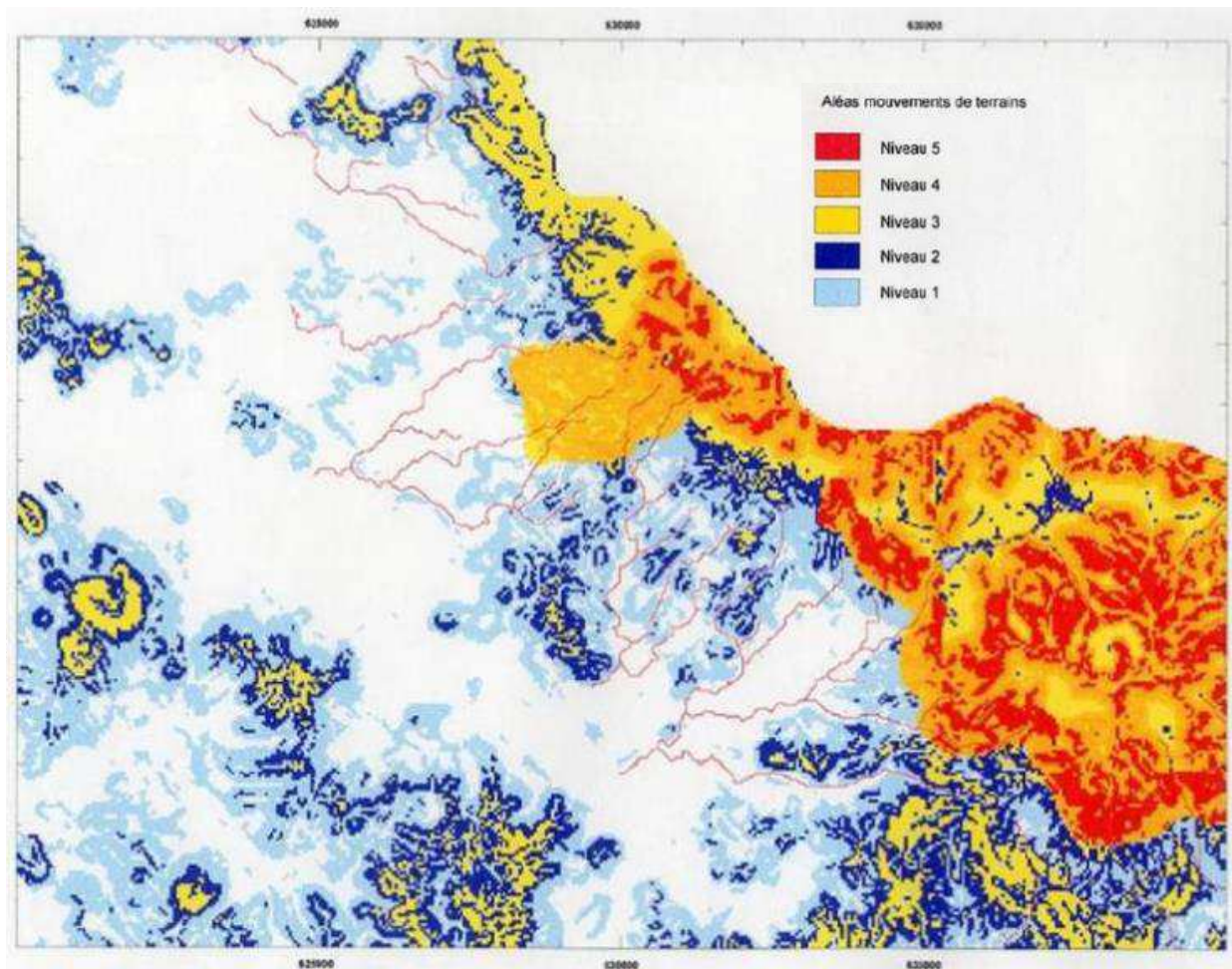


illustration 33 – Exemple de carte fournie (zone de Tontouta, 1999, BRGM RP-40476-FR)

3.2.3 DOCUMENT DE SYNTHÈSE DU BRGM (2003)

Ce document dresse un bilan des observations des atlas (§ 3.2.2) réalisés dans le cadre du programme de cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain initié en 1998.

Sont notamment présentés une sélection des phénomènes les plus caractéristiques sur l'ensemble de la Grande Terre afin d'illustrer les configurations et contextes possibles et connus.

Une des conclusions majeure est que la géologie exerce un contrôle intrinsèque déterminant qui contrôle la nature des formations d'altération. Il en résulte une distinction fondamentale entre :

- les aléas dans le contexte du substrat volcano-sédimentaire ;
- les aléas dans le contexte des massifs de péridotites.

Sur substrat volcano-sédimentaire, les désordres identifiés sont d'ampleur limité et en quantité moindre. L'évolution des phénomènes apparaît relativement lente avec des occurrences de glissement de matériaux argilo-terreux avec des évolutions en coulée boueuse. A noter que sur

les 7 cas de glissement présentés, 4 surviennent sur les siltites noires crétacées, 2 sur les basaltes et 1 sur les cherts. Dans 4 cas, le mouvement de terrain survient en contexte d'aménagement et de terrassement.

Sur substrat péridotitique, le cortège de phénomène est plus varié. Du fait des fortes pentes et du développement du profil d'altération latéritique, les matériaux sont mobilisables en grande quantité. L'ampleur et la vitesse sont plus importantes que sur substrat volcano-sédimentaire, il en résulte des phénomènes plus intense parmi lesquelles les laves torrentielles s'avèrent les plus destructeurs.

Le document conclut sur la nécessaire amélioration des connaissances des aléas par une généralisation de la cartographie des formations superficielles.

4 Typologie des mouvements de terrain

4.1 GÉNÉRALITÉS

4.1.1 CLASSIFICATION DES MOUVEMENTS DE TERRAIN

La classification internationale proposée par Varnes (1978, 1984, illustration 34) est généralement la plus utilisée. Reprise entre autres par Cruden et Varnes (1996), elle se base sur deux grands critères :

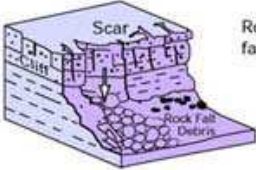
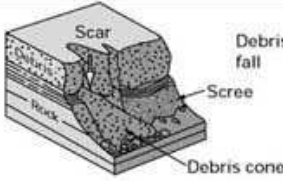
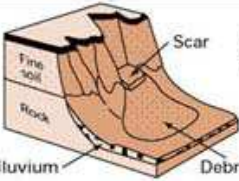
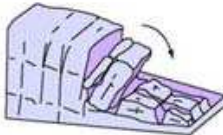

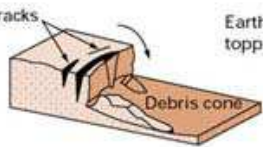
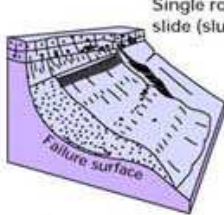
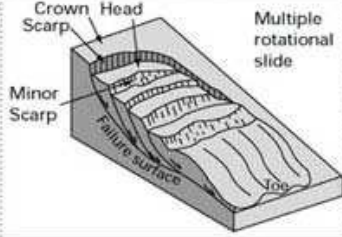
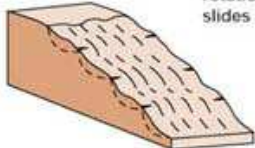
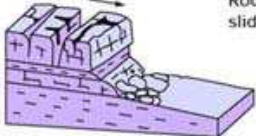
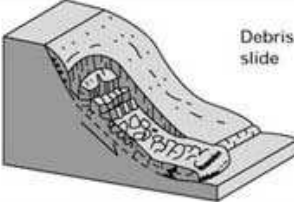
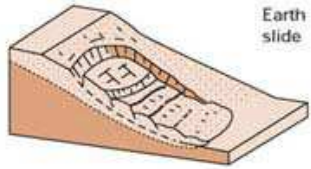
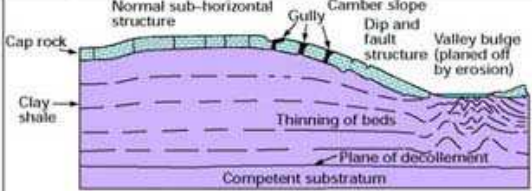
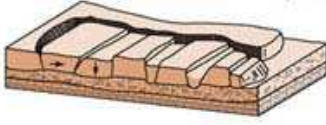
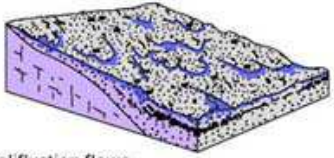


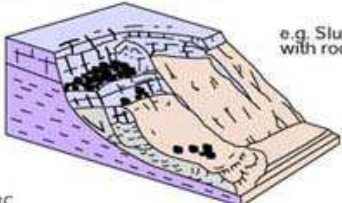
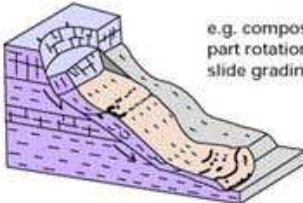
- les processus ;
- les mécanismes d'initiation.

A ces critères s'ajoutent la vitesse de déplacement, l'activité et la morphologie des phénomènes. Flageolet (1989) préfère prendre en compte la composante principale du déplacement en distinguant la composante verticale (famille des affaissements et effondrements) et la composante latérale (famille des 'mouvements de versant' au sens large ou Landslides).

Enfin, certains comme Meunier (1991, illustration 35) dans le domaine de l'hydraulique torrentielle se basent de la proportion relative de matériaux solide et d'eau. Cette classification permet de préciser la transition entre la mécanique des roches, des sols et des fluides.

A ces égards on peut distinguer deux ensembles principaux (Guide PPR Mouvements de terrain, 1999) :

- les mouvements « lents » provoquant des déformations progressives dans le temps et des conséquences pour la sécurité des personnes faibles à nulles :
 - o les affaissements à l'aplomb de cavités naturelles ou anthropiques ;
 - o les tassements des sols compressibles (tourbes, argiles) et le retrait et gonflement de certains sols argileux ;
 - o certains glissements des terrains argileux ou marneux de type fluage notamment.
- les mouvements « rapides » : ruptures brusques avec conséquences possibles pour les personnes :
 - o les effondrements (déplacement vertical de sol) : rupture brutale de voûtes de cavités souterraines naturelles ou artificielles ;
 - o les éboulements rocheux : chutes de pierres ou de blocs, ou de masses rocheuses ;
 - o les glissements de terrain meubles ou rocheux ;
 - o les coulées boueuses provenant généralement de l'évolution de glissements saturés en eau et les laves torrentielles résultant du transport chenalisé de matériaux en terrain montagneux.

Material				
Movement type		ROCK	DEBRIS	EARTH
FALLS		 Rock fall	 Debris fall Scree Debris cone	 Earth fall Colluvium Debris cone
		 Rock topple	 Debris topple Debris cone	 Earth topple Debris cone
SLIDES	Rotational	 Single rotational slide (slump) Failure surface	 Multiple rotational slide Crown Head Scarp Minor Scarp Failure surface	 Successive rotational slides
	Translational (Planar)	 Rock slide	 Debris slide	 Earth slide
SPREADS		 Normal sub-horizontal structure Cap rock Clay shale Thinning of beds Plane of décollement Competent substratum Gully Camber slope Dip and fault structure Valley bulge (planed off by erosion) e.g. cambering and valley bulging		 Earth spread
FLOW'S		 Solifluction flows (Periglacial debris flows)	 Debris flow	 Earth flow (mud flow)
COMPLEX		 e.g. Slump-earthflow with rockfall debris		 e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe

BGS © NERC

illustration 34 – Classification des mouvements de terrain (Varnes, 1978)

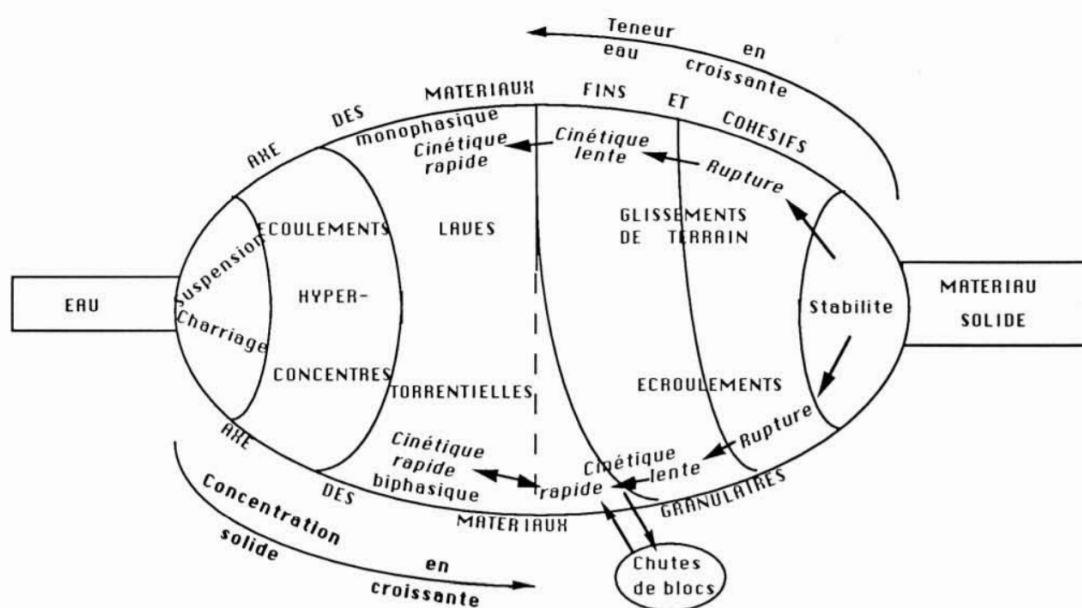


illustration 35 – Représentation du champ de l'hydraulique torrentielle par rapport aux mouvements de terrain et à l'hydraulique fluviale (Meunier, 1994)

4.1.2 FACTEURS D'INSTABILITÉ

On peut classer ces facteurs d'instabilités en deux catégories (Flageollet, 1989) :

- les facteurs de prédisposition (dits permanents ou très lentement variables, caractérisant la prédisposition d'un site aux instabilités (relief, nature géologique ...) ;
- les facteurs de déclenchement (variables dans le temps) tels que séismes, modifications anthropiques, précipitations...), pouvant jouer le rôle de déclencheur des mouvements.

La présence d'eau dans les sols est, par elle-même, un facteur d'instabilité. En général sa présence est permanente dans les formations sujettes aux mouvements de terrain. Par contre sa quantité dans les formations varie en fonction de la météorologie et cette variation peut constituer un facteur déclenchant.

4.1.2.1 Facteurs de prédisposition (permanents ou lentement variables)

Les principaux facteurs permanents sont :

- la pesanteur qui constitue le moteur essentiel des mouvements de terrain qualifiés souvent d'ailleurs de « mouvements gravitaires » ;
- l'eau : qui joue plusieurs rôles et dont l'action affecte de manière variable le comportement des terrains soumis à son action :
 - o action mécanique : par ruissellement entraînant les particules de sols sous l'effet du ruissellement de surface (ravinement, érosion) ou circulation souterraine (suffosion), par création de pressions interstitielles au sein des sols ou des massifs rocheux (cas de fractures en charge, présence de nappes sub-affleurantes...) modifiant l'équilibre mécanique des versants par diminution de la résistance au cisaillement des sols dans le cas de glissement ou encore par saturation des terrains augmentant le poids moteur des mouvements ;
 - o action physico-chimique : altération des roches régissant la modification du comportement mécanique des terrains superficiels, saturation progressive de terrains

induisant une diminution des paramètres mécaniques (diminution de la cohésion des terrains saturés par exemple) ;

- action chimique : remarquable dans le cas de la dissolution des carbonates (formation des réseaux karstiques – karst) ;
- la lithologie et l'agencement des matériaux au sein des formations. Les lithologies des terrains régissent assez directement leur susceptibilité vis-à-vis des mouvements de terrain : argile, schistes des faciès volcano sédimentaires, formations superficielles (colluvions, éboulis, produits d'altération des péridotites notamment) seront sensibles aux glissements de terrain alors que calcaires et roches ultrabasiques (roches dites compétentes) seront pour leurs parts propices aux éboulements et chutes de blocs par exemple. La granulométrie des matériaux est également prépondérante et régit pour partie la propagation des masses en mouvement ;
- la structure des terrains : que ce soit à l'échelle des massifs (exemple de la surface de chevauchement serpentineuse) ou des formations (présence de zones tectonisée à l'affleurement, nature du remplissage de joints de fracture), la structure des terrains joue un rôle essentiel dans la prédisposition à tel ou tel type de mouvement de terrain. Au-delà de ces séquences stratigraphiques (dépôts successifs des couches géologiques), les discontinuités d'origine tectonique (failles, fractures, fissures) affectent l'ensemble des formations et conditionnent également leur prédisposition à l'apparition de mouvements de terrain. La densité de fracturation, l'orientation et le pendage des couches et des plans de discontinuités conditionnent le type de mouvement et les volumes susceptibles de s'effondrer par exemple ;
- la présence de cavités souterraines : est évoquée de façon marginale dans le profil d'altération des péridotites. Ces développements peuvent conditionner des phénomènes d'affaissement / effondrement, mais peut également être un facteur de prédisposition à l'apparition de glissements de terrains. La taille, la profondeur des cavités sont des critères à prendre en compte, mais la géométrie et le comportement des terrains de couverture (lithologie) et la présence de nappes (eau dans le sol) par exemple sont autant de facteurs essentiels à l'apparition de désordres en surface ;
- la morphologie des terrains puisque la gravité est le moteur principal, la morphologie conditionne en grande partie l'apparition de mouvements de terrain. La pente est essentielle dans la stabilité d'un versant puisqu'elle régit directement l'équilibre des efforts mécaniques (moteurs et résistants). A cet égard, dans le cas des glissements de terrain on note fréquemment un optimum de valeurs de pentes favorables à l'apparition du mouvement : des pentes plus faibles sont stables et des pentes plus fortes n'existent pas (plus car déjà glissées). Il faut cependant se garder de toute analyse systématique et avoir à l'esprit l'importance des mécanismes mis en jeu ;
- le couvert végétal : a généralement un rôle de protection vis-à-vis des glissements superficiels (effet des racines contribuant à renforcer résistance au cisaillement jusque 1,5 à 2 m) et surtout de l'érosion (Greenway, 1987 ; Schmidt et al., 2001). C'est pourquoi des secteurs incendiés sont généralement plus sensibles à l'érosion mais aussi aux instabilités de surface (Rengers, 2020). Vis-à-vis de phénomènes de grande ampleur (plus profonds), la présence d'un couvert végétal dense n'est pas suffisante pour éviter leur apparition ou leur propagation. Parfois au contraire, la présence d'une couverture végétale peut même contribuer à leur possible apparition.

Pour les chutes de blocs, la présence d'arbres peut freiner ou limiter la propagation des blocs par effet barrière (dissipation d'énergie, Volkwein, 2011). L'efficacité de cet effet

protecteur est déterminé par la taille et l'énergie cinétique des blocs, la surface terrière³ totale disponible pour intercepter la roche qui tombe et les espèces d'arbres (Berger et Dorren, 2007). En revanche, par action mécanique, les racines peuvent s'insinuer au sein des fractures rocheuses d'un versant et contribuer à la déstabilisation de compartiments rocheux.

4.1.2.2 Facteurs de déclenchement (variables dans le temps)

Ces facteurs, variables dans le temps, déclenchent l'instabilité ou provoquent une accélération marquée des mouvements conduisant à la rupture. On distingue :

- les précipitations : de nombreux événements se produisent suite à des épisodes pluvieux intenses (cyclones ou dépressions) ou suite à des épisodes orageux remarquables (643 mm à Houaïlou Carovin entre le 20 et 23/11/2016) La pluie n'est pas directement responsable du mouvement mais elle agit à double titre :
 - o Le ruissellement peut initier une érosion et par suite une déstabilisation superficielle ;
 - o Surtout, l'infiltration participe à l'augmentation des pressions interstitielles ou la mise en charge de fractures par exemple.

Les précipitations ont des effets souvent instantanés sur les mouvements de terrains tels que glissement superficiels, laves torrentielles ou chutes de blocs. En revanche pour des mouvements de grande ampleur cette action peut être différée dans le temps traduisant l'inertie hydrogéologique d'un système (saturation progressive des terrains en profondeur par exemple). La part de ruissellement des précipitations est également à considérer de par son action érosive locale (ravinement, érosion différentielle) mais également par les phénomènes d'érosion de berges sapant les pieds de versant plusieurs kilomètres en aval des zones effectivement soumises aux précipitations.

- la température, et surtout ses variations, n'est pas jugé comme un facteur pertinent favorisant le déclenchement des mouvements de terrain en Nouvelle Calédonie.
- L'évaluation de l'aléa sismique de la Nouvelle-Calédonie a été réalisée par le BRGM (Bertil et al. 2008), selon une approche probabiliste, pour une période de référence de 475 ans. Ces résultats régionaux soulignent l'influence de la zone de subduction du Vanuatu, à la fois très active et siège des séismes les plus forts. Ainsi, le niveau d'agression sismique augmente fortement en se rapprochant de cette zone :
 - o Faible, 0,25 à 0,75 m.s⁻² en Province Nord ;
 - o Faible à modéré, 0,4 à 1,1 m.s⁻² en Province Sud ;
 - o Moyen à fort, 1,1 à 3,0 m.s⁻² en Province des Îles.
- l'action humaine est considérée comme facteur de déclenchement des phénomènes d'instabilité quels qu'ils soient. On peut notamment signaler :
 - o les modifications de la morphologie des versants naturels par les travaux de terrassement (talutage en pied de versant supprimant l'effet mécanique de butée naturelle de pied, création de talus routier, surcharge en remblai ...) ;
 - o les modifications des conditions de circulations d'eau dans le sol : fuite des réseaux d'adduction en eau potable, des rejets d'eaux pluviales, modification des circulations d'eau de ruissellement notamment sur exploitation minière, pompages...

³ c'est la surface du tronc coupé à 1,30 m. La surface terrière d'un peuplement forestier, c'est la somme des surfaces terrières de tous les arbres qui le composent.

- les ébranlements provoqués par les tirs de mines provoquant des chutes de blocs dans le voisinage immédiat de la zone de tir.
- d'autres facteurs, peuvent favoriser plus indirectement les instabilités des terrains et en particulier les incendies qui modifient le couvert végétal, la mise en culture des terrains ou le déboisement, et plus marginalement le fousissement d'animaux participant à l'érosion des sols et la remobilisation de blocs en versant.

Une synthèse des facteurs permanents et des facteurs de déclenchements par types de mouvements de terrain sont récapitulés dans le tableau en illustration 36.

Mouvement de terrain	Facteurs variables dans le temps (de déclenchement)											
Type	action de l'homme	vibrations (tirs)	○	●		●	●		●			
		pompage / rejets	●	○	○	●	○	○	○			
		terrassment		●		●	●	●	●	○	○	
	séismes		○	●		●	●	●	●		○	
	température	fonte neige		○				○			○	
		sécheresse			●							
		gel-dégel					●		○			
	précipitations		○	●	○	○	●	●	●		●	
	couvert végétal			○	●		○	○	○		○	
	morphologie	zone de falaise					●		●			
		pente		○			●	●	●	○	○	
	structure des terrains	direction fracturation					●		●			
		densité fracturation				○	●		●			
	nature et caractéristique des terrains	présence de cavités	●	○		●	○	○			●	
		granulométrie	○	●	●			●		●	●	
		homogénéité / hétérogénéité		○			○	○				
		sol rocheux	○			○	●		●			
		sol meuble	●	●	●	○		●			●	
	l'eau	action chimique	●	●		●	○	○	○		●	
		action physico-chimique		●	●		○	●			●	
		action mécanique	●	●		●	●	●	●	●	●	
	la pesanteur		●	●		●	●	●	●	●	●	
Vitesse	Type		Affaissement	Glissement (fluage)	Retrait-gonflement	Effondrement	Eboulements	Glissements meubles	Glissements rocheux	Laves torrentielles	Coulées de boue	
			Lente	Rapide								

● : principal ; ○ : secondaire

illustration 36 – Synthèse des principaux facteurs d'instabilité aux mouvements de terrain (Colas, 2008)

4.1.3 INTENSITÉ DES PHÉNOMÈNES

La notion d'intensité traduit l'ampleur du phénomène (volume mobilisé, dynamique, énergie...), la gravité vis-à-vis des vies humaines ou l'endommagement vis-à-vis des constructions, ou encore les moyens nécessaires pour se prémunir du phénomène (guide PPR Mouvement de Terrain, 1999). Les degrés d'intensité, gradués de limitée à très élevée, correspondent à des capacités croissantes de provoquer des préjudices.

Intensité limitée	Intensité modérée	Intensité élevée	Intensité très élevée
Dommages limités, non structurels sur un bâti standard	Dommages structurels au bâti standard Pas de dommages au bâti adapté à l'aléa	Destruction du bâti standard Dommages structurels du bâti adapté à l'aléa moyen	Destruction du bâti standard Destruction du bâti adapté à l'aléa moyen

illustration 37 – Qualification de l'intensité (principe selon le guide méthodologique PPR)

Le bâtiment standard est un indicateur commun retenu pour qualifier l'intensité du phénomène pour des cartographies d'aléa à perspective d'aménagement. Le bâtiment standard choisi dans cet objectif est un bâtiment non renforcé type villa traditionnelle en maçonnerie. Il s'agit d'un bâtiment fictif. La notion de bâti adapté à l'aléa moyen sous-entend que ce bâti fictif respecterait les préconisations d'urbanisme et de constructions que l'on impose habituellement dans les zones d'aléas moyens.

Compte tenu de la diversité des phénomènes de mouvement de terrain, il est difficile de traduire directement leurs caractéristiques physiques en termes d'intensité. Le principe proposé par le guide méthodologique de réalisation de PPR mouvements de terrain consiste à recourir à des critères globaux permettant de les rendre comparables entre eux. L'intensité des phénomènes est à ce titre évaluée en fonction de l'importance et de l'ordre de grandeur des coûts des mesures qu'il faudrait envisager pour s'en prémunir. L'illustration 38 montre un exemple conventionnel d'intensité.

Niveau d'intensité	Niveau d'importance des parades	Exemples de mesures de prévention
Faible I1	Supportables financièrement par un propriétaire individuel	Purge de quelques blocs instables en falaise, confortement d'une petite galerie par pilier maçonnée.
Moyenne I2	Supportable financièrement par un groupe restreint de propriétaires (immeuble collectif, petit lotissement)	Comblement d'une cavité souterraine, drainage d'une zone instable.
Forte I3	Intéressant une aire géographique débordant largement le cadre parcellaire et/ou d'un coût très important et/ou techniquement difficile	Stabilisation d'un glissement de terrain important confortement d'un pan de falaise instable.
Majeure I4	Pas de parade technique	Phénomène de grande ampleur tel que Séchillienne ou La Clapière

illustration 38 – Exemple d'échelle conventionnelle d'intensité, en fonction des parades envisageables (guide méthodologique PPR)

Ces critères sont intimement liés aux paramètres physiques régissant les phénomènes mais également aux techniques de prévention permettant de se protéger des phénomènes. Les approches principales pour qualifier l'intensité reposent in fine plus ou moins sur l'évaluation :

- des vitesses de déplacement (énergie cinétique). Plusieurs classifications sont proposées au niveau international, cette approche n'est pas valorisée en France mais devrait être inscrite dans le cadre d'un groupe de travail national sur la cartographie des aléas glissements de terrain (MEZAG⁴) et/ou :
- la géométrie des masses en mouvement, théoriquement variable selon la propagation du phénomène (surface, profondeur de glissement, volume total en mouvement, épaisseur de coulée, diamètre d'un fontis d'effondrement...). Le groupe de travail MEZAP⁵, pour la chute de blocs, propose une échelle d'intensité basée sur les volumes de bloc unitaire susceptible d'atteindre les enjeux.

L'évaluation de l'intensité peut également se décliner en termes de dommage engendré. Dans ces conditions, la vulnérabilité des éléments exposés est importante et différentes échelles peuvent être proposées selon que les enjeux sont des infrastructures linéaires, des bâtiments ou des personnes (illustration 39).

The basic and fundamental element for assessing landslide hazard and risk should be a map of landslides containing the following elements:

- type of landslides;
- affected or prone areas;
- state of activity;
- characteristic geometric parameters;
- possible evolution of the phenomenon.

Since intensity or magnitude are difficult to quantify correctly we decided to calculate them only in terms of velocity (Fig. 1) and volume (thickness or diameter of blocks in case of rockfalls) of the rock mass that can be set in motion (geometrical severity, Fig. 2). Furthermore, a differentiation of velocity classes has been carried out by distinguishing between infrastructures, estate assets, economic activities and people. This implies the implementation of two separate hazard maps concerning infrastructures and human beings respectively.

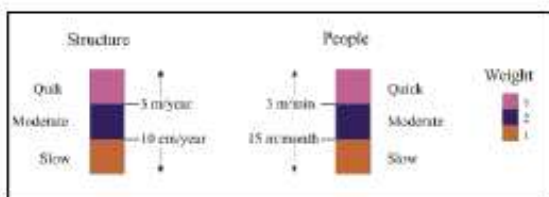


Figure 1: Velocity.

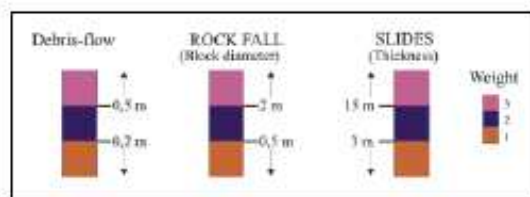


Figure 2: Geometric severity.

illustration 39 – Exemple d'échelle d'intensité (Hervas, 2007)

La MEZAP (pour les chutes de blocs) propose pour des dommages aux bâtiments dits « courants », maison individuelle maçonnée de retenir comme seuil d'intensité « fort » un

⁴ Methodologie pour l'Evaluation du Zonage de l'Aléa Glissement de terrain (dans le cadre de PPRn ou de PAC). GT piloté par le BRGM pour le METS (DGPR) au niveau national

⁵ Methodologie pour l'Evaluation du Zonage de l'Aléa chute de Pierres (dans le cadre de PPRn ou de PAC). GT piloté par INRAe / BRGM pour le METS (DGPR) au niveau national

volume unitaire d'un mètre cube et des seuils de 50 m³, 0,25 m³, et 10 m³ pour les classes d'intensité respectivement « très faible », « faible », « moyenne » et « très fort ».

Les approches en vitesses sont recommandées pour évaluer le danger pour les personnes puisqu'elles conditionnent les possibilités de réponse (surveillance, travaux de réduction des aléas, évacuation au besoin). Ce paramètre est particulièrement pertinent également pour qualifier les niveaux de dommages, dans la mesure où, couplé à un volume ou une masse, il permet une approche énergétique (illustration 41) :

Velocity class	Description	Velocity (mm/s)	Typical velocity	Response ^a
7	Extremely rapid	5×10^3	5 m/s	Nil
6	Very rapid	5×10^1	3 m/min	Nil
5	Rapid	5×10^{-1}	1.8 m/h	Evacuation
4	Moderate	5×10^{-3}	13 m/month	Evacuation
3	Slow	5×10^{-5}	1.6 m/year	Maintenance
2	Very slow	5×10^{-7}	16 mm/year	Maintenance
1	Extremely Slow			Nil

illustration 40 – Exemple d'échelle d'intensité basée sur les vitesses (International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, 1995, Cruden DM, Varnes DJ, 1996)

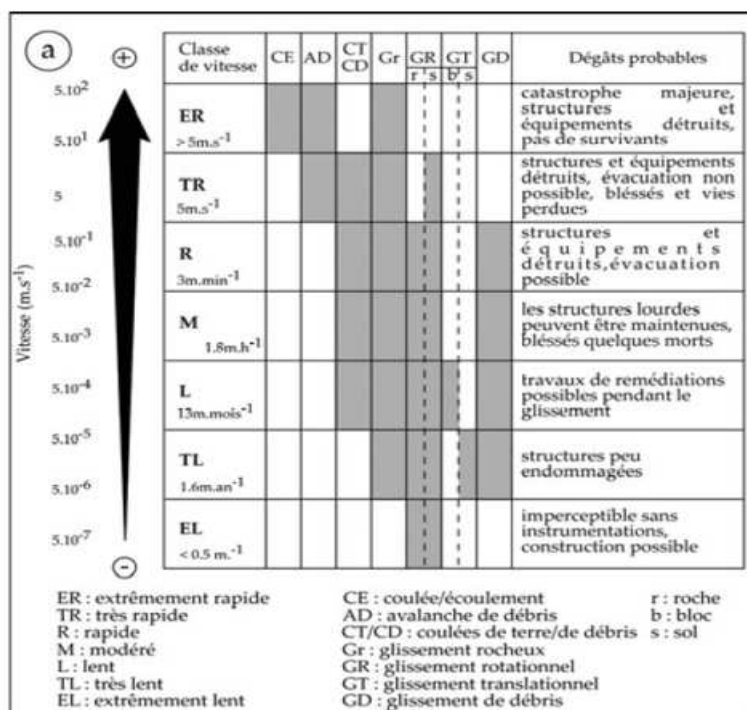


illustration 41 – Exemple d'échelle d'intensité basée sur les vitesses (Thiery, 2007)

4.2 ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES PHÉNOMÈNES EN NOUVELLE-CALÉDONIE

Les paragraphes suivants donnent des éléments descriptifs pour les types de phénomènes connus en Nouvelle-Calédonie.

Les atlas cartographiques à 1:25 000 (§ 3.2.2) distinguent fondamentalement deux types de contextes dans lesquels les mouvements de terrain sont répertoriés :

- les aléas dans le contexte du substrat volcano-sédimentaire ;
- les aléas dans le contexte des massifs de péridotites.

Dans le **substrat volcano-sédimentaire** les désordres sont d'ampleur limitée en nombre et en intensité. On relève des glissements, des glissements – coulées. Les problèmes se posent souvent en termes de stabilité des pentes (pour les terrassements) ou de stabilité de fondations. On constate cependant l'occurrence fréquente de phénomènes de liquéfaction, liés à de très fortes précipitations, accroissant la dangerosité des phénomènes. De très importants écroulements sont également décrits, totalement imprévisibles.

Dans les **massifs de péridotites**, l'éventail typologique est plus varié, parfois original. On relève des glissements rotationnels ou translationnels, des coulées de débris nombreuses et des laves torrentielles. Les grandes quantités de matériaux mobilisables, boueux et rocheux, et les dénivelés importants génèrent des phénomènes puissants et de grande ampleur. Les phénomènes les plus dangereux sont constitués par des laves torrentielles. Ces phénomènes destructeurs doivent être redoutés comme le rappelle la tragédie de Houaïlou (22/11/2016).

4.2.1 LES CHUTES DE BLOCS

Ces phénomènes se produisent dans des environnements à relief tels que falaises, rives abruptes d'une rivière, rebord de plateau, barres ou escarpements, et même ancienne carrière ou talus routier de grande hauteur. Les formations concernées sont peu altérées. Les chutes de blocs concernent des éléments isolés (taille du caillou ; quelques litres à plusieurs dizaines de m³), alors qu'éboulements et écroulements concernent des masses respectivement plus importantes.

Le gradient de pente et la morphologie de la zone de réception déterminent la trajectoire. Éventuellement des blocs déjà immobilisés peuvent être remis en mouvement. C'est un phénomène de vitesse rapide (vitesses généralement > 100 km/h), donc dangereux. Il n'y a pas ou peu de signes précurseurs.

La cause principale de ce type d'aléa est à rechercher dans le découpage des masses rocheuses par les fractures affectant la formation concernée. Le degré de fracturation de la roche détermine la maille de libération des blocs. Le départ des blocs peut être déclenché par un affouillement de la base de la falaise par l'eau (torrent, rivière, mer), par un tassement différentiel de couches tendres inférieures supportant une masse rigide fracturée (cas particulier de chute de bloc de cuirasse par exemple), ou encore par la pression hydrostatique interstitielle au sein des discontinuités, voire par la croissance de racines.

L'état général de fracturation des péridotites est tel qu'il n'y a pratiquement pas de zones où la roche n'est pas découpée en un maillage dense, libérant potentiellement des éléments de diverses tailles. Dans ce contexte, la susceptibilité d'apparition de l'aléa est difficilement

évaluable. On peut considérer qu'il existe dans tout le massif de péridotites, décrivant ainsi un aléa qualifié de « diffus », et de façon plus ponctuelle dans les faciès volcano-sédimentaires.

Les massifs de péridotites avec des pentes redressées et un réseau de fracturation dense sont particulièrement sujets aux chutes de bloc (illustration 42), éboulement et écroulement d'une manière générale.

Le domaine volcano-sédimentaire est également sujet aux chute de blocs, dès lors que la topographie forme un relief armé par une lithologie rocheuse comme par exemple dans le cas des laves acides qui forment un escarpement.



illustration 42 - Exemple de chute de bloc, substrat péridotitique, Poro, route du bord de mer, SGNC 2019

4.2.2 LES MOUVEMENTS EN GRANDE MASSE

Les mouvements en grande masse (plusieurs centaines de milliers de m³ et plus) relèvent de mécanismes souvent complexes.

4.2.2.1 Ecoulements en masse

Les écoulements concernent des matériaux essentiellement rocheux. Par rapport à l'aléa chutes de blocs, le volume rocheux concerné est plus important. Il intéresse par exemple tout un pan de falaise. Par rapport au glissement, le matériau contient une moindre proportion de latérite et son détachement depuis la niche d'arrachement est complet. La distance parcourue est plus grande.

Les écoulements en masse impliquent des volumes considérables de matériaux. C'est un pan de massif complet qui est ici mobilisé. Ce type d'aléa est vraisemblablement le plus important qui puisse se déclencher dans les massifs de péridotites. Cependant, ces phénomènes sont rares. Les exemples connus sont en général anciens, en partie ré-entaillés par l'érosion ou latéritisés, recolonisés dans tous les cas par la végétation.

Un cas d'exemple récent et actif de ce type de phénomène est le glissement dit de « Newco2 », commune de Kouaoua (illustration 43). Suite à un éboulement initial en 1975, plusieurs éboulements successifs se produisent depuis, liés aux forts épisodes pluviométriques. Le volume total des éboulements successifs est estimé entre 800 000 m³ et 1,3 million de m³.

L'origine du mouvement est naturelle essentiellement liée à : i) la rupture au niveau de deux discontinuités sécantes dans les terrains rocheux ; ii) la mise en charge hydraulique des fractures lors d'épisodes pluvieux importants. Ces événements ont engendré la création d'embâcle au niveau de la rivière Wayō Wia et des ruptures de ce barrage à deux reprises. Les scénarios d'évolution reposent sur l'apparition de nouveaux éboulements de volume estimé entre 50 000 à 750 000 m³, avec des probabilités plus ou moins fortes. Le risque principal associé est la formation d'un nouvel embâcle et sa rupture inondant la vallée en aval.

Un autre exemple récent est donné par l'écroulement survenu à Kaala-Gomen le 23 septembre 2019 en l'absence de pluie. Le mouvement s'est produit dans une vallée encaissée aux versants redressés (pente de 45 °) au sortir de laquelle un cône de déjection est présent. La zone de départ correspond à un éperon rocheux, la cicatrice du mouvement présente une surface de rupture interprétée comme un miroir de faille avec un pendage conforme à la pente du versant. La masse écroulée est constituée de péridotites serpentinisées, peu altérée, avec un réseau dense de fracture à remplissage siliceux. La masse écroulée a créé un embâcle sur le creek aval, le volume écroulé est estimé à 50 000 m³.

Ce type de phénomène affecte également de façon ponctuelle les formations du substratum volcano-sédimentaire. On citera les cas de l'écroulement de la Nera (Bourail) ou de la Ouaième (Touho) actif décrits dans la synthèse des connaissances sur les mouvements de terrains en Nouvelle- Calédonie (Maurizot P. 2003) :

- écoulement de la Néra (illustration 44 a) a eu lieu lors du cyclone Anne en janvier 1988. L'écoulement a affecté une barre de flysch de 200 m de dénivelé, au pendage de stratification inverse à la pente du talus (configuration stable vis-à-vis des glissements « banc sur banc ») au niveau d'une zone de forêt dense et d'affleurements rocheux rares. Aucun autre phénomène similaire n'est connu au sein de ces formations de grès fins à grossiers de flysch;
- écoulement de la Ouaième (illustration 44**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** b) : détachement « banc sur banc » d'une dalle de micaschistes et gneiss selon un plan de

schistosité conforme à la pente (pente de 60°, dénivelé de 100 à 150 m, largeur de 200 m, épaisseur de 15 m) soit près de 50 000 m³.

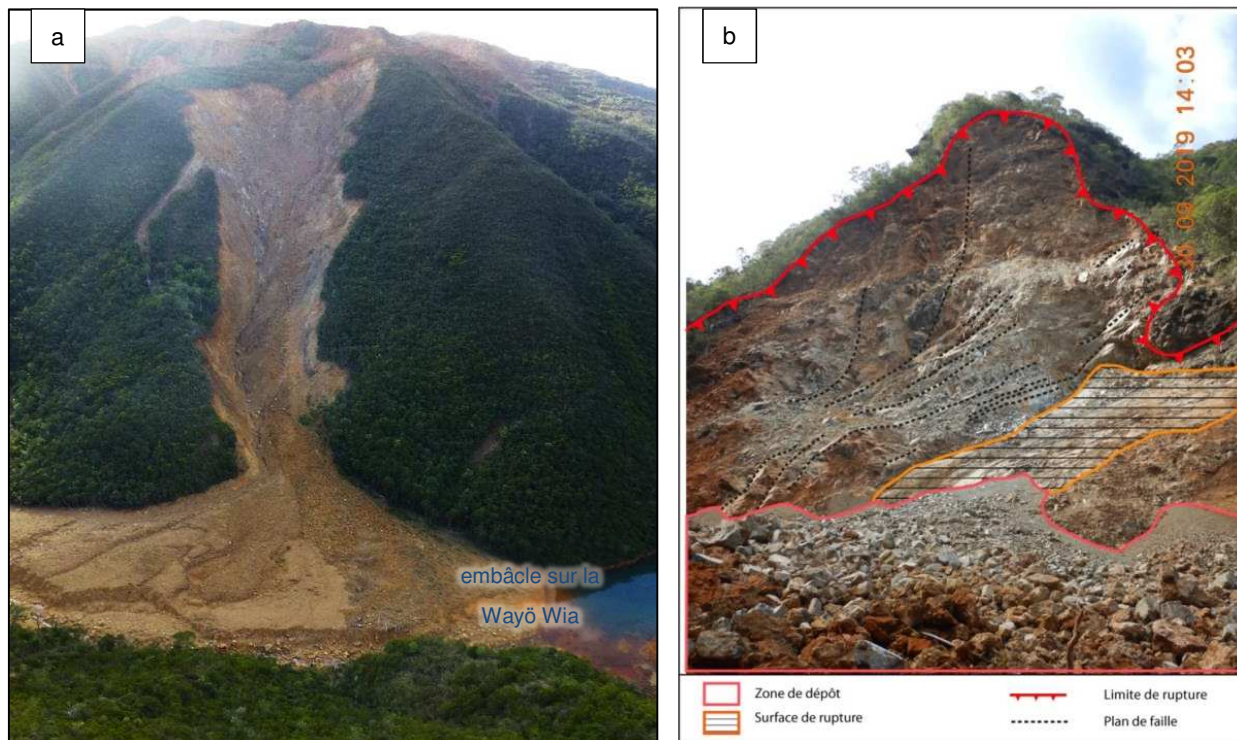


illustration 43 – Exemples d'éroulement sur substrat péridotitique a) NEWCO2 (Kouaoua, cliché Fond Nickel) b) éroulement de Kaala-Gomen

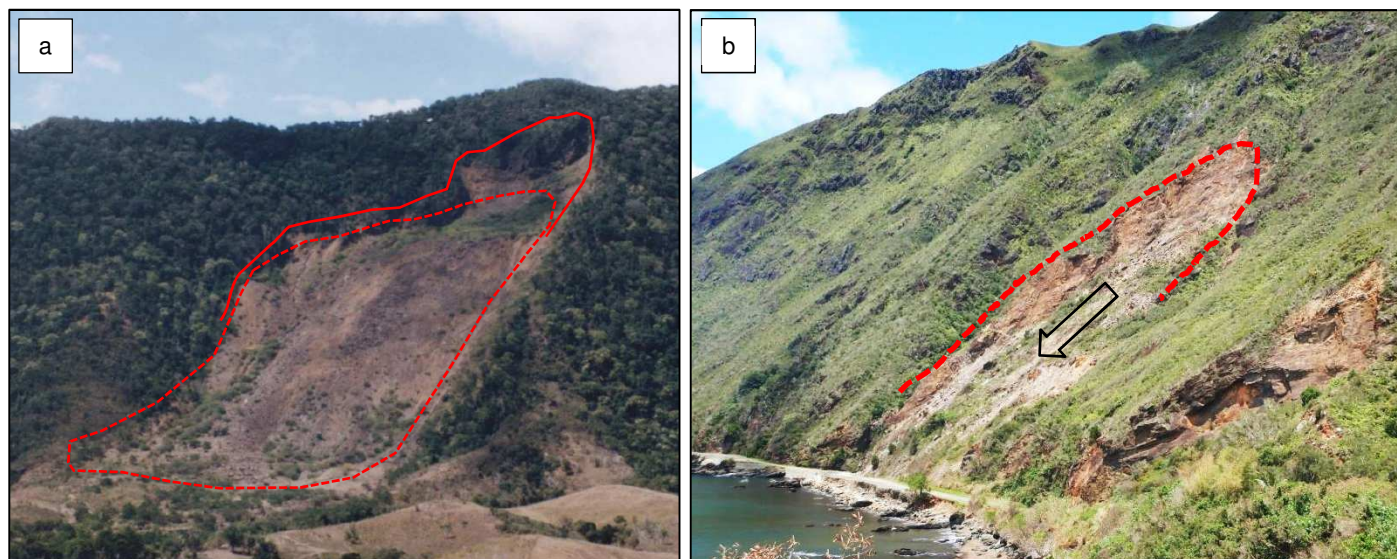


illustration 44 – Exemples d'éroulement en masse sur substrat volcano-sédimentaire a) éroulement de la Néra au col de Gouaro (Maurizot, 2003) ; b) éroulement de la Ouième (SGNC 2019)

4.2.2.2 *DGSD (Deep-Seated Gravitational Slope Deformation)*

Outre les éboulements rocheux en masse, des grands glissements de versants sont également connus. 200 objets de taille pluri-hectométrique à kilométrique ont été répertoriés au sein du Massif du Sud (illustration 45) et ces phénomènes n'ont pas d'équivalent connus en dehors du domaine péridotitique (Maurizot, 2007, Rouet 2009). Ces objets affectent des pans entiers de massifs, et bien qu'ayant gardé une certaine unicité, leur structure est largement disloquée, chaotique et peu cohésive.

Ces mouvements sont décelés et interprétés à partir des observations géomorphologiques (terrain, photographies aériennes, topographie) (illustration 47). Ils témoignent de périodes précoces de démantèlement des massifs à une époque où les gradients climatiques, de relief et d'altération mis en jeu étaient sans doute plus importants (exemples à Tontouta au pied du Mont Makou, à l'Est de la station de Karenga, ou du secteur Sud-Ouest du Mont-Mou où des versants entiers du massif de péridotite sont concernés par ces phénomènes de grande ampleur).

Les morphologies de ces grands mouvements de versant sont typiques avec une zone de rupture amont abrupte, à surface anguleuse, et une masse glissée convexe à l'aval, en pente douce, latéritique en surface, s'étendant sur des grandes distances.

L'activité de ces masses glissées est très variable. En phase "préparatoire" des DGSG, les vitesses sont faibles, de l'ordre de quelques millimètres à quelques décimètres par an. En phase paroxysmale, les vitesses peuvent aller de quelques mètres par jour à quelques dizaines de mètres.

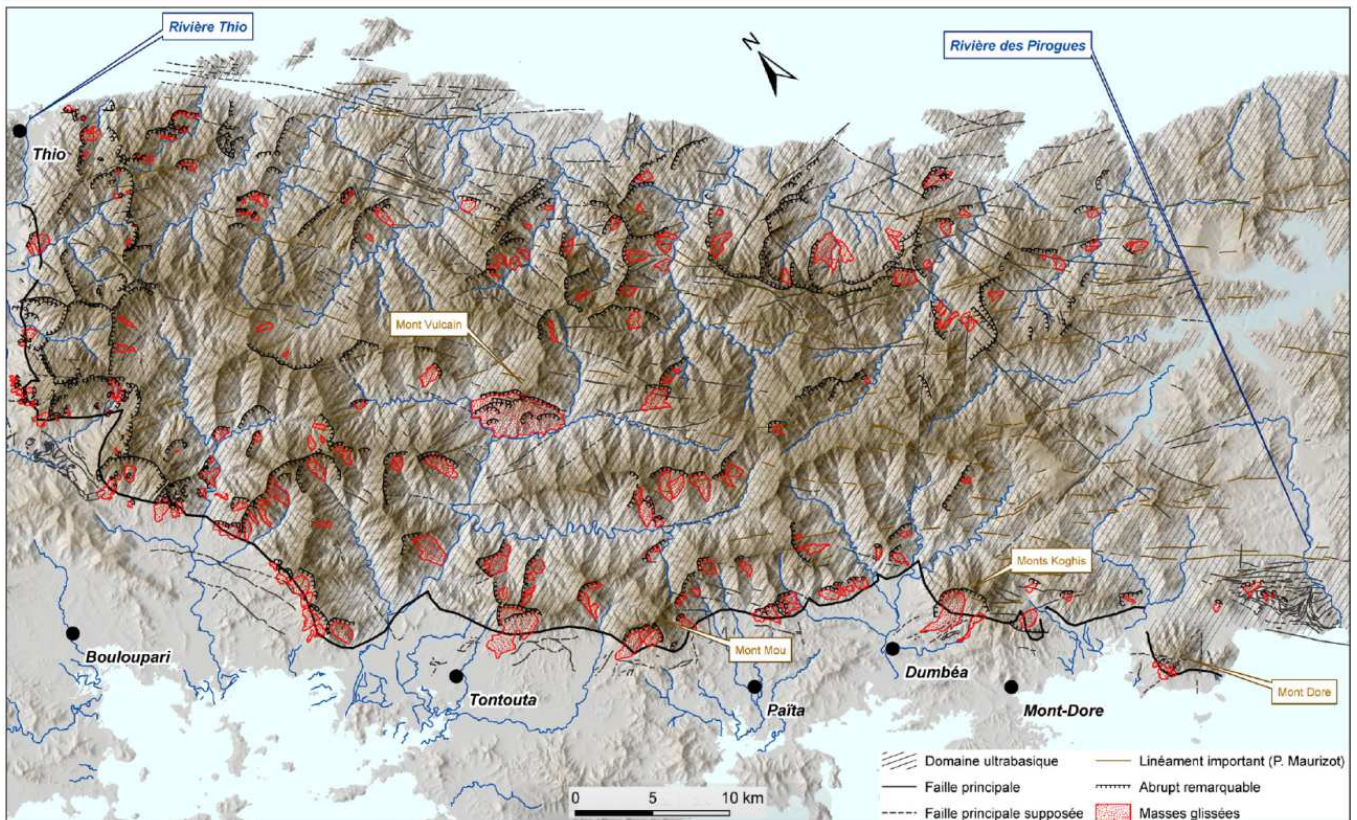


illustration 45 - Inventaire des grands glissements de versants (Rouet, 2009)

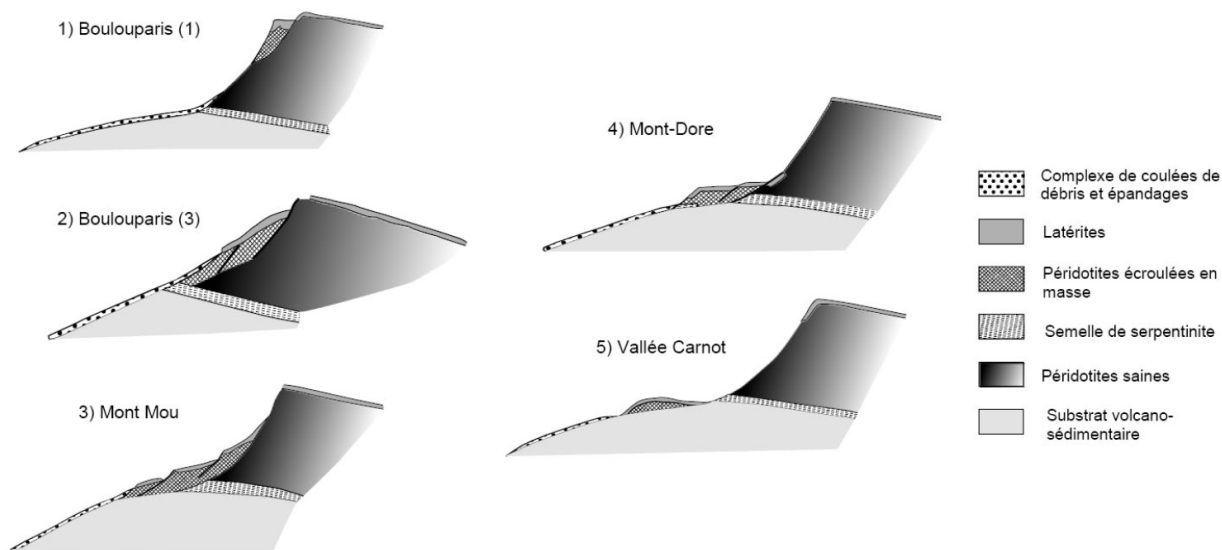


illustration 46 – Typologie de l'évolution des grandes masses ultrabasiques glissées (I. Rouet, 2018)
(1) Affaissement du versant, (2, 3, 4, 5) Glissement de panneaux de plus en plus loin du massif

La gravité des conséquences induites par ces mouvements en masse est toujours importante, soit que les implantations humaines s'y soient directement placées, soit qu'elles soient exposées en contrebas. Les mouvements en masse qui traduisent une fragilité du terrain sur de grandes étendues, ne sont jamais isolés. Ils sont généralement accompagnés par un cortège d'aléas qui paraissent secondaires en regard du phénomène principal (glissements, coulées boueuses, arrachements, écroulements, engravement à l'aval) et participent au déblaiement de la masse détachée. Ponctuellement les masses glissées peuvent être le siège de phénomène de fluage ou de solifluxion (mouvements affectant les sols de faible cohésion, proche de la saturation, sans réelle surface de discontinuité individualisée). Le cas de la masse effondrée du Mont Dore est à ce titre exemplaire avec la survenue des glissements en 1988 et 1990 ainsi que de nombreux indices de déformation du réseau routier.



illustration 47 – Vue aérienne du mont Mou depuis l'Ouest (en rouge la zone de rupture, en grisé les zones glissées, Maurizot, 2007)

4.2.3 LES GLISSEMENTS

C'est vraisemblablement la catégorie de mouvements qui offre la plus grande variété. Ces phénomènes sont caractérisés par une rupture par cisaillement le long d'une surface individualisée qui correspond souvent à une discontinuité préexistante et au déplacement par gravité de la masse de terrain ainsi désolidarisée de son substrat.

On distingue (illustration 48) une partie amont concave ou niche d'arrachement avec des crevasses satellites à l'amont, une partie intermédiaire où les phénomènes de transport prévalent avec des figures linéaires, une partie aval convexe avec des bourrelets d'accumulation. Le rôle de l'eau est très important pour ces phénomènes : lubrification, pression hydrostatique. Une distinction s'opère selon la géométrie de la surface de glissement : glissement rotationnel ou translationnel.

Ces phénomènes affectent indifféremment les formations volcano-sédimentaires et les massifs de péridotites, et concernent principalement les niveaux altérés (horizon d'altération argileux des argilites ("schistes") (et des cherts notamment dans le volcano-sédimentaire, saprolite et latérites sur substrat de péridotite), De manière générale les glissements sur substrat volcano-sédimentaire montrent des amplitudes moindres que les phénomènes relevés sur substrat péridotitique, notamment en termes de propagation et de surfaces mobilisées.

Les terrains glissés et le substrat stable peuvent être constitués de matériaux meubles et/ou de rocher.

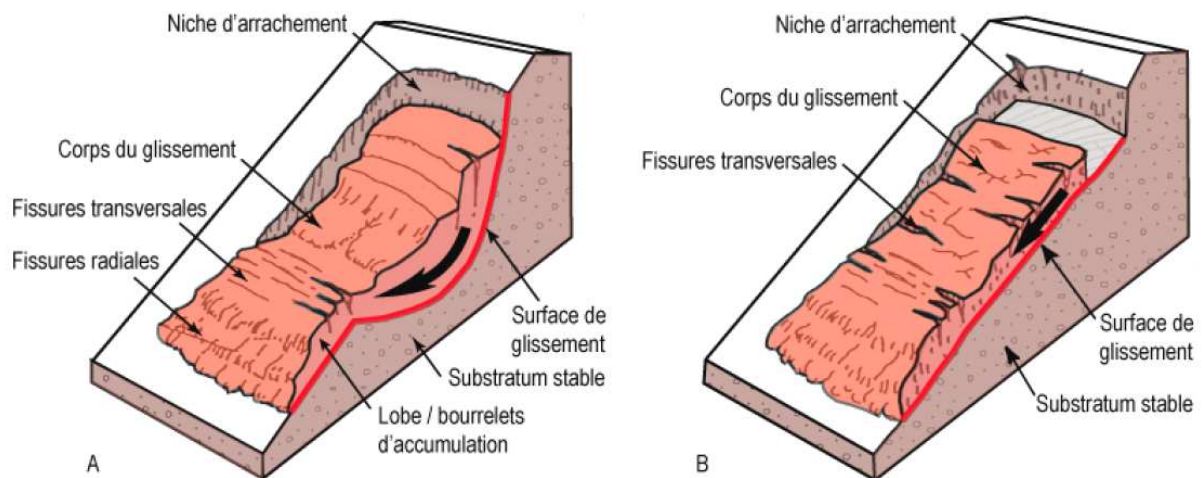


illustration 48 – Glissements rotationnels et translationnels (d'après USGS 2004)

4.2.3.1 Glissements rotationnels

Dans le cas des glissements rotationnels ("rotational slip, slump"), la surface de rupture théorique est une portion de sphère. La niche d'arrachement est circulaire. La zone de départ est nette et le bourrelet frontal plus ou moins bien marqué. Il y a fréquemment des crevasses et fissures de tension à l'amont de la niche d'arrachement, zones de ruptures potentielles.

4.2.3.2 Glissements translationnels

Dans le cas des glissements translationnels ("translational slide") ou glissements plans (en milieu rocheux surtout), les mouvements se produisent au long d'une surface sensiblement plane (couche, surface tectonique, horizons d'altération, ou toute autre anisotropie structurale)

de pendage conforme à la pente, entraînant une dislocation très variable de la masse glissée. Celle-ci peut rester plus ou moins monolithique ou évoluer vers un autre type de phénomène : coulée, écoulement. Les dimensions peuvent être modestes ou gigantesques.

Le cas particulier des glissements plans ("planar slide, block slide, slab slide, sheet slide") se produit à la faveur d'une surface de discontinuité ou de faiblesse préexistante. Il peut s'agir du contact entre formation d'altération et bed rock, d'une faille, ou de joints stratigraphiques. Dans ce dernier cas on a des glissements banc sur banc dans des séries litées à pendage aval, conforme avec la pente. Les glissements plans correspondent à des matériaux où l'anisotropie structurale prédomine. Le rôle de l'eau est très important également pour ce type de glissement : lubrification, pression hydrostatique.

4.2.3.3 Fluage

Une catégorie spéciale de glissement de terrain est constituée par le fluage ("flowage creeping"), les phénomènes de solifluxion ("solifluction, flowside") et les glissements pelliculaires et superficiels. Il s'agit d'un fluage affectant la partie superficielle (altérée généralement sur substrat imperméable) d'un sol à faible cohésion, saturé en eaux, franchissant la limite de liquidité. Le phénomène s'apparente à une coulée lente. Il n'y a pas de surface de discontinuité nettement individualisée.

Les vitesses de glissement sont lentes, de l'ordre de quelques millimètres à quelques décimètres par an. Les formations affectées sont principalement les altérites volcano-sédimentaires et les formations allochtones de versant (colluvions) associées.

4.2.4 COULÉES BOUEUSES, COULÉES DE DÉBRIS / LAVES TORRENTIELLES

Lorsque la masse issue d'un glissement se désolidarise complètement de sa zone d'origine, généralement grâce à la présence d'une grande quantité d'eau et de matériau ayant atteint leur limite de liquidité, il y a formation de coulées de matériaux (boueux ou rocheux) sur les versants. Dans les cas extrêmes il y a formation de laves torrentielles dans les chenaux existants.

Le déplacement est égal à plusieurs fois ou plusieurs dizaines de fois la dimension de la zone de rupture. La rupture elle-même peut correspondre à un glissement ou un éboulement. Les vitesses de propagation des coulées et laves sont importantes (de l'ordre du m/s). La rhéologie est celle d'un fluide visqueux. Le mécanisme est l'écoulement et non plus le glissement. La quantité d'eau impliquée est beaucoup plus grande que dans les phénomènes précédents.

Coulées boueuses, laves torrentielles (et embâcles associées) sont des phénomènes dangereux et destructeurs car rapides et chargés d'une énergie cinétique très importante. On peut distinguer différents types selon la composition du matériau impliqué et l'importance de la fraction liquide :

- Les coulées boueuses ("mudflows, earthflows") ou glissements boueux,
- Les coulées boueuses à blocs,
- Les coulées de débris ("debris flows, rockflows, debris avalanche").

Ces phénomènes présentent une morphologie générale comportant trois secteurs assez bien individualisés : une zone de départ ou rupture marquée par une niche d'arrachement, qui possède l'allure assez classique en couronne d'un glissement. L'accumulation terminale est étalée en lobe simple ou digité. Le lobe est en pente très faible, de quelques degrés, mais se

termine par un front convexe assez prononcé. Les blocs les plus imposants sont généralement immédiatement en arrière de ce bourrelet frontal. Entre les deux, se trouve un chenal rétréci, ou plusieurs, en zone de forte pente, par lequel les matériaux descendent de la source vers le lobe du bas de versant.

Lorsque la morphologie du cours d'eau, le volume et la nature des matériaux (y compris la végétation) permettent la constitution d'un barrage naturel et d'une retenue, il y a possibilité d'embâcle, puis de rupture d'embâcle ou débâcle au moment de la rupture de cette digue temporaire. Une onde de crue peut alors se propager à l'aval.

L'examen de quelques cas montre que la circulation interne de l'eau est fréquemment à l'origine de cet aléa. La mise en pression dans les péridotites fracturées lors des épisodes de fortes précipitations provoque le débouillage de certaines fissures, facilite le glissement de blocs supportés par des fractures à pendage aval et fait céder le mince épiderme végétal protecteur ou la couverture latéritique.

Coulées boueuses, laves torrentielles (et embâcles associées) sont des phénomènes destructeurs car rapides et chargés d'une énergie potentielle importante. Ils sont de loin les phénomènes ou aléas les plus redoutés en contexte montagneux, sous toutes les latitudes et dans tous les contextes géologiques.

4.2.4.1 Laves torrentielles

Les « laves torrentielles » sont des volumes importants (de quelques m³ jusqu'à plusieurs millions de m³) d'un mélange d'eau, de sédiments (jusqu'à plusieurs mètres de diamètre) et de matières organiques, fortement concentré (entre 45 et 80% en volume de fraction solide dans l'écoulement) s'écoulant dans les torrents de montagne (Coussot, 1996).

Elles se localisent dans un chenal torrentiel bien délimité et modelé au fur et à mesure des crues et des laves torrentielles. Elles érodent leur lit par une « mise au gabarit » de celui-ci. Les sections les plus étroites sont rabotées pour permettre le passage de la lave torrentielle ; au contraire les sections plus larges sont comblées jusqu'au gabarit. Les torrents à « lave » présentent des signes d'érosion/dépôt dans le lit torrentiel et un cône de déjection construit par les dépôts des événements successifs (Remaitre, 2006).

L'écoulement d'une lave torrentielle n'est pas uniforme, il présente un caractère fortement transitoire, par bouffées successives. Aucun tri granulométrique n'est observé dans les dépôts de laves torrentielles (illustration 28, illustration 29). Les matériaux grossiers du lit du torrent sont poussés au front de lave et repoussés sur les bords, tandis que des matériaux des berges peuvent s'écrouler par paquets alimentant le processus. Le dépôt s'opère plus généralement par arrêt en masse de l'ensemble d'une coulée ou d'une partie (notamment lors des débordements latéraux), lorsque les conditions (pente, hauteur d'écoulement, teneur en eau, etc.) ne permettent plus son mouvement (Fannin et Rollerson, 1993).

Le milieu péridotitique altéré, avec ses blocs de roches ultrabasiques facilement mobilisables et sa réserve de particules fines fournie par les latérites, est favorable à la survenue de ce type de phénomène. Les distances franchies, y compris en zone de faible pente, sont considérables, sans communes mesures avec l'étendue couverte initialement par les matériaux qui leur ont donné naissance (pour exemple la lave torrentielle observée à Wakaya, Houailou en 2016 s'est développé sur plus de 900 m en plan). Des cicatrices de types laves torrentielles sont connues sur tous les massifs de péridotites, depuis des formes fraîches jusqu'à des formes anciennes entièrement recolonisées par la végétation (illustration 49).

Les phénomènes observés sur substrat péridotitique et décrits comme des laves torrentielles n'ont jusqu'à présent pas été observés sur substrat volcano-sédimentaire malgré l'existence de configurations comparables en termes de pentes et la présence d'une couverture d'altération argileuse.

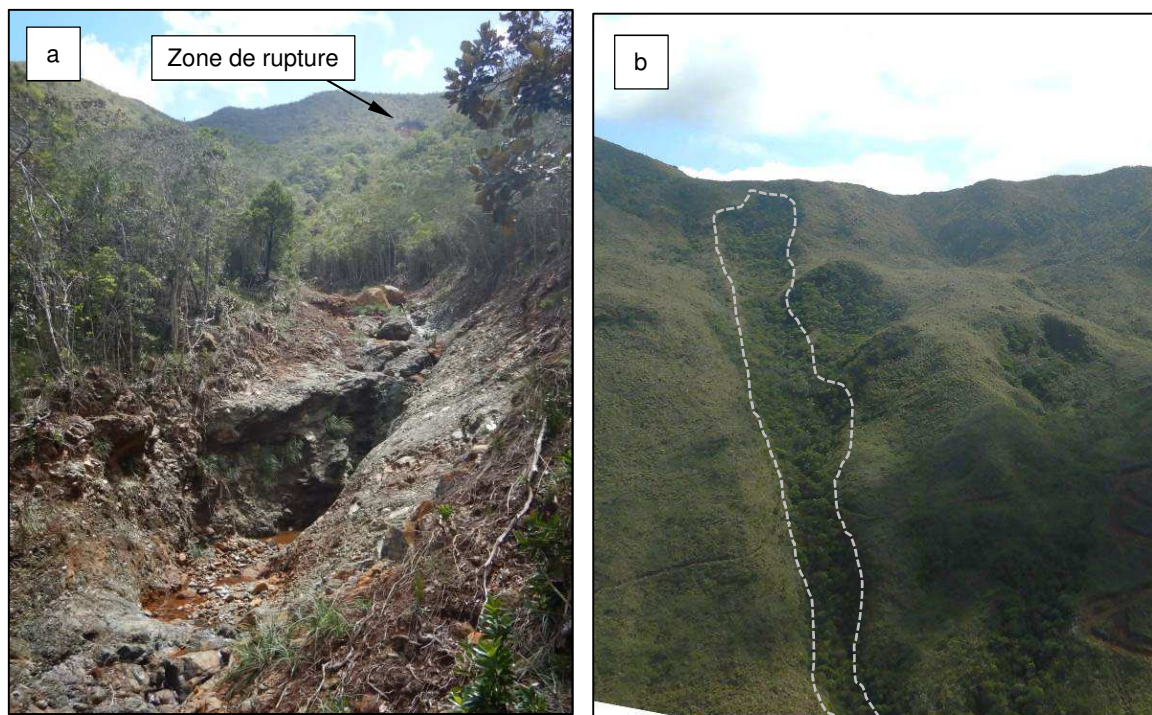


illustration 49 – a) Vue sur un talweg après passage d'une lave torrentielle (Houaïlou),
b) Vue sur un talweg avec trace ancienne supposée (Thio)

4.2.4.2 Coulées boueuses

Les coulées boueuses ont pour origine, le départ de portions de versant « meubles » incluant couverture végétale, latérite et ponctuellement blocs de péridotites. Le matériau très fortement remanié et saturé en eau s'écoule alors à la faveur de la topographie. Selon la proportion de latérites par rapport aux matériaux rocheux, et la granulométrie de ces derniers on relèvera divers types : coulées boueuses latéritiques, coulées de latérite à blocs, coulées boueuses à débris rocheux.

La zone de départ laisse une cicatrice ou niche d'arrachement ouverte dans le couvert végétal et la couverture latéritique. Lorsqu'il n'est pas volumineux, le matériau libéré s'arrête en contrebas surtout si la végétation est dense. Plus important, il va s'étaler sous forme d'une langue plus longue, souvent canalisée dans une gouttière, une ravine puis un torrent. Selon l'énergie du flux et le possible arrachement de matériaux pendant le transit, le phénomène peut évoluer en laves torrentielles.

Les phénomènes de coulées boueuses sont communs aux substrats péridotitiques et volcano-sédimentaires, ces deux environnements ayant des matériaux susceptibles de se propager selon ce mode : latérites dans le premier cas, terrains argileux dans le second.

4.2.5 LE RAVINEMENT

Les ravines sont omniprésentes et ubiquistes dans le paysage des massifs de péridotites. A la fois, zones de départ et de transport de matériaux, elles s'installent dès lors qu'une certaine quantité de produits de démantèlement doit transiter jusqu'au niveau de base sous l'influence d'un flux d'eau. On les trouve donc au droit de toutes les zones dénudées ou dégradées et parfois dans le prolongement de lavakas.

Installées sur un substrat saprolitique fin à rocheux elles se signalent simplement comme un trait sans végétation dans le paysage. Ce n'est alors qu'une zone de transit de sédiments divers. Traversant une zone en partie altérée, latéritique, le sapement des berges viendra grossir le flux détritique. Enfin, s'attaquant à des zones fragiles très saprolitiques ou serpentineuses le phénomène s'accompagne d'une érosion intense du lit de la ravine, d'un approfondissement de l'incision et de multiples petits désordres sur les bordures qui provoquent son élargissement et le recul de la zone amont. On peut parler alors de ravinement actif à caractère régressif. Les ravines peuvent naître pour diverses raisons :

- naturelle : évolution d'une lavaka s'enfonçant dans le saprolite sous-jacent,
- anthropique : aménagement humain divers mais surtout ouverture de piste ou de chantier induisant un écoulement qui va entailler la couverture latéritique et mettre à jour le saprolite. Parfois le tracé d'une ancienne piste peut lui-même se transformer en ravine active (illustration 50).

Ces formes d'érosion type des surfaces latéritiques n'ont pas d'équivalent connus en domaine volcano-sédimentaire. Tout au plus certaines zones pélitiques peuvent présenter une morphologie érosive de type badlands mais qui reste très localisée.

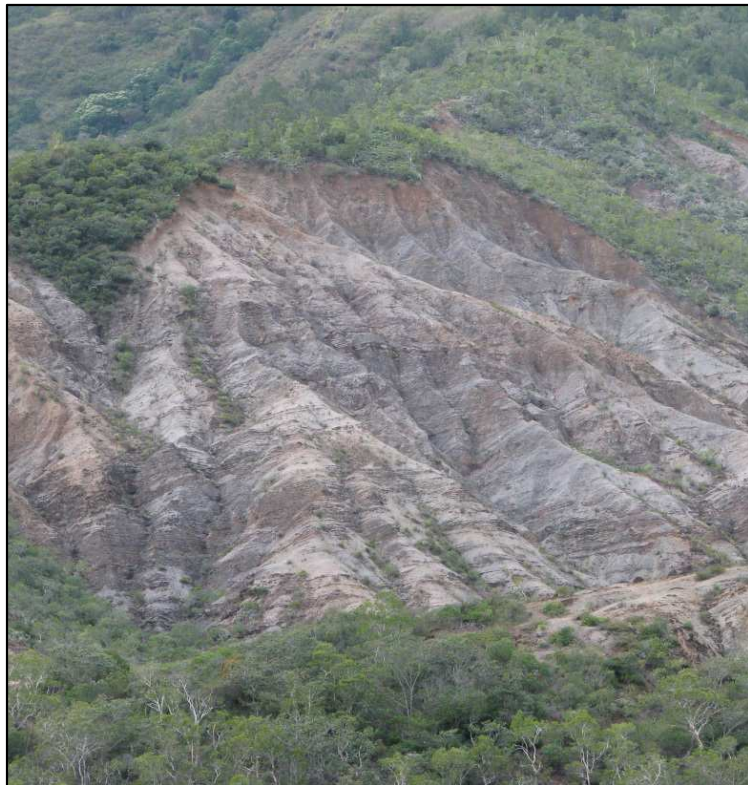


Illustration 50 - Vue sur un secteur en érosion dans les pélites carbonneuse crétacées, Ouaménie

4.2.6 LES LAVAKAS

Les lavakas en Nouvelle-Calédonie sont des zones d'érosion à fond plan et à bordures verticales, et aux contours persillés, ouvertes dans les profils latéritiques épais ; il n'y pas de description de lavaka en domaine volcano-sédimentaire. Elles abondent dans les dômes dénudés de latérites en zone de pente faible. La connaissance du fonctionnement des lavakas est faible. Les atlas proposent des hypothèses sur le fonctionnement de ces entités (Maurizot et al. 2001, BRGM-RP-50725-FR) : « *Le fonctionnement de ces unités géomorphologiques peut s'expliquer par les propriétés physiques des différents niveaux du profil d'altération. [...] En termes hydrogéologiques, la « réserve utile » des latérites rouges supérieures est faible et les latérites jaunes inférieures se comportent comme un milieu saturé étanche. En terme mécanique la partie supérieure du profil présente une cohésion moindre et donc une fragilité plus grande que la partie inférieure. [...] L'interface latérite rouge – latérite jaune est donc marquée par un contraste [...] qui entraîne la destruction et le déblaiement de la croûte superficielle du profil.* ».

Du point de vue de l'évolution temporelle, il est précisé : « *L'alternance des périodes sèches et humides favorise l'apparition de fentes de dessiccation [dans la latérite rouge] mises en charge [par les précipitations]. Des rigoles sont facilement entaillées puis des ravines s'ouvrent qui par érosion régressive se transforment en cirques [...] réceptacles des eaux de pluie. Sur les bordures de la structure, la latérite rouge se découpe en prismes verticaux [...] qui] se détachent ainsi des murs de lavakas* » (illustration 51).

Ravines et lavakas sont souvent liés morphologiquement, un lavaka pouvant se prolonger vers l'aval par une ravine sur un versant, et une ravine pouvant évoluer vers l'amont en lavaka lorsque l'érosion régressive remonte les hauts de versants latéritiques moins pentés.

Le phénomène naturel "lavaka" n'est pas un aléa à proprement parlé, à l'identique des zones de "bad lands" dans le substrat volcano-sédimentaire. Cependant il peut contribuer à la fragilisation de certaines zones :

- par la présence de zones dénudées collectant et concentrant le ruissellement ;
- par la quantité de matériau fin latéritique potentiellement mobilisable sous forme de boues ;
- par son évolution possible en ravines.

Ceci étant, il est à noter que les nombreuses analyses diachroniques réalisées (état des lieux des demandes d'autorisations d'exploitation minière, inventaires communaux ou études plus ponctuelles) montrent des évolutions morphologiques très peu dynamiques. Notamment la comparaison entre des photos aériennes de 1954 et les orthophotographies les plus récentes ne montre généralement pas d'évolution significative des contours des formes érosives type lavakas.



illustration 51 – Bordure latéritique verticale typique avec prismes verticaux en place et basculés

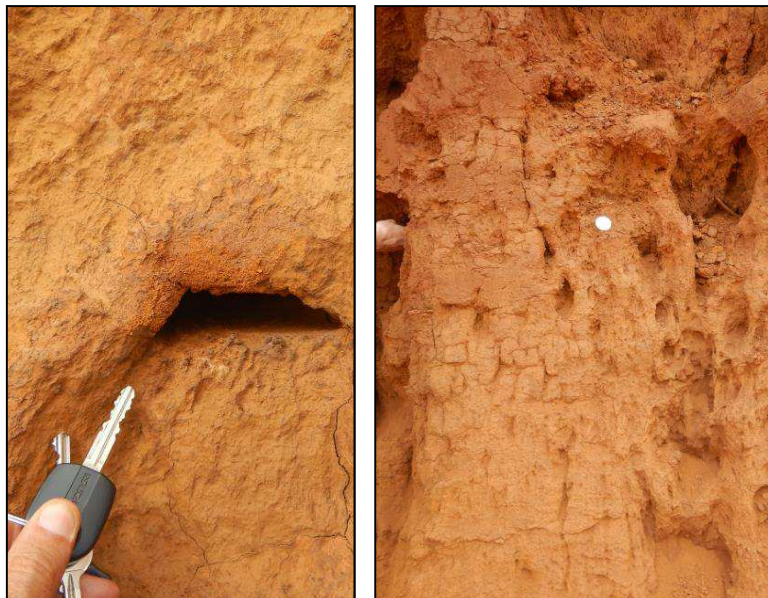


illustration 52 – Vues sur les parois latéritiques avec de nombreuses cavités et traces de dépôt

4.2.7 ENGRAVEMENT, CHARRIAGE, DÉBORDEMENT, DIVAGATION TORRENTIELLE

Ces phénomènes sont liés au fonctionnement chronique des torrents. Ils se caractérisent par la mobilisation des sédiments pris dans l'environnement immédiat du torrent. Celui-ci va chercher un surplus de charge solide aux limites de sa zone d'influence. La modification du profil longitudinal et transversal, le fauchage des berges, la divagation du lit vif, la mise à nu des sédiments, l'engravement de tout ou partie du lit, sont les désordres classiquement encourus.

Une des caractéristiques des systèmes alluvionnaires calédoniens est la présence, dans un certain nombre de cas, d'anciennes décharges minières dans les bassins versants. Ces anciennes décharges ont largement contribué, et contribuent encore, à alimenter en charge solide les rivières, au point que certains cours d'eau, considérablement engravés sont qualifiés de rivières « surengravées » (CNRT, 2018).

En s'inspirant de Garcin M. et Lesimple S. (2013), une rivière surengravée peut ainsi être définie comme une rivière subissant ou ayant subi des apports solides grossiers largement supérieurs à sa capacité de transport, induisant des changements morphologiques marqués sur un linéaire significatif du lit, i.e. un exhaussement et un élargissement (illustration 53).

A l'instar des autres phénomènes décrits, le charriage se produit pendant les crises aiguës pluviométriques. Mais contrairement aux laves torrentielles qui sont des écoulements exceptionnels, le charriage est un mode d'écoulement plus permanent. Il fait partie du fonctionnement périodique du torrent, guidé par le régime hydraulique du cours d'eau. Le charriage torrentiel se produit normalement dans un domaine aval par rapport à celui des laves, de manière parfois indépendante, parfois connexe.

Le ratio débit solide/débit liquide est très inférieur à celui des laves torrentielles. En zones encaissées et étroites, l'action érosive domine, en zones d'élargissement et de faible pente, les dépôts s'étalent et la zone active divague. A l'exutoire, dans la zone de jonction avec le niveau de base (grandes plaines alluviales à la sortie des massifs) se forme un cône de déjection dont la génératrice n'est autre que le lit vif du torrent qui par balayage séculaire distribue sa charge solide devenue désormais intransportable par manque de pente. Bien que moins dangereux que les laves torrentielles, le charriage et la divagation torrentielle sont des nuisances importantes qui ruinent fréquemment les aménagements humains trop proches de leur zone d'influence.

Les probabilités de débordements torrentiels au niveau du débouché des gros torrents du massif de péridotites sont toujours à redouter.



illustration 53 - Vue sur un creek surengravé, Thio, cote est

4.2.8 SYNTHÈSE

Les atlas ont produit des tentatives de classification des aléas concernant les massifs péridotitiques :

- En fonction des lithologies :

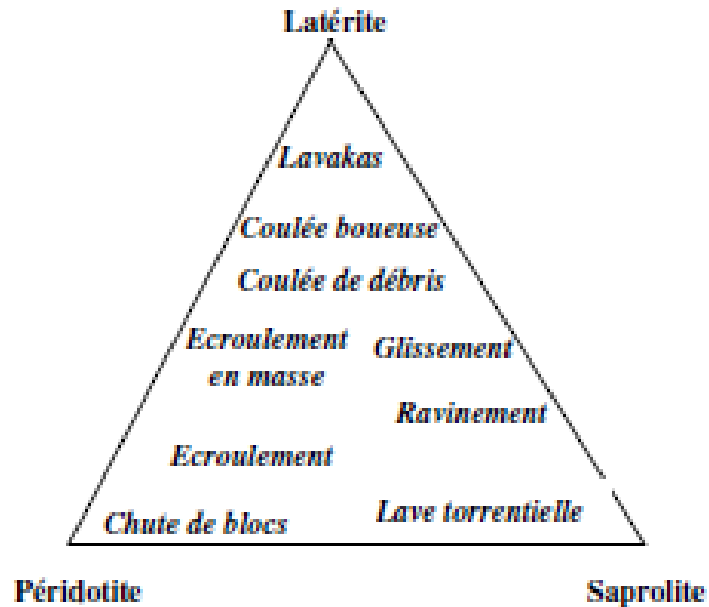


illustration 54 – Essai de classification des désordres sur massif péridotitique selon la lithologie (zone de Tontouta, 1999, BRGM RP-40476-FR)

- en fonction des lithologies, de la morphologie et des propriétés géotechniques et hydrogéologiques des faciès concernés :

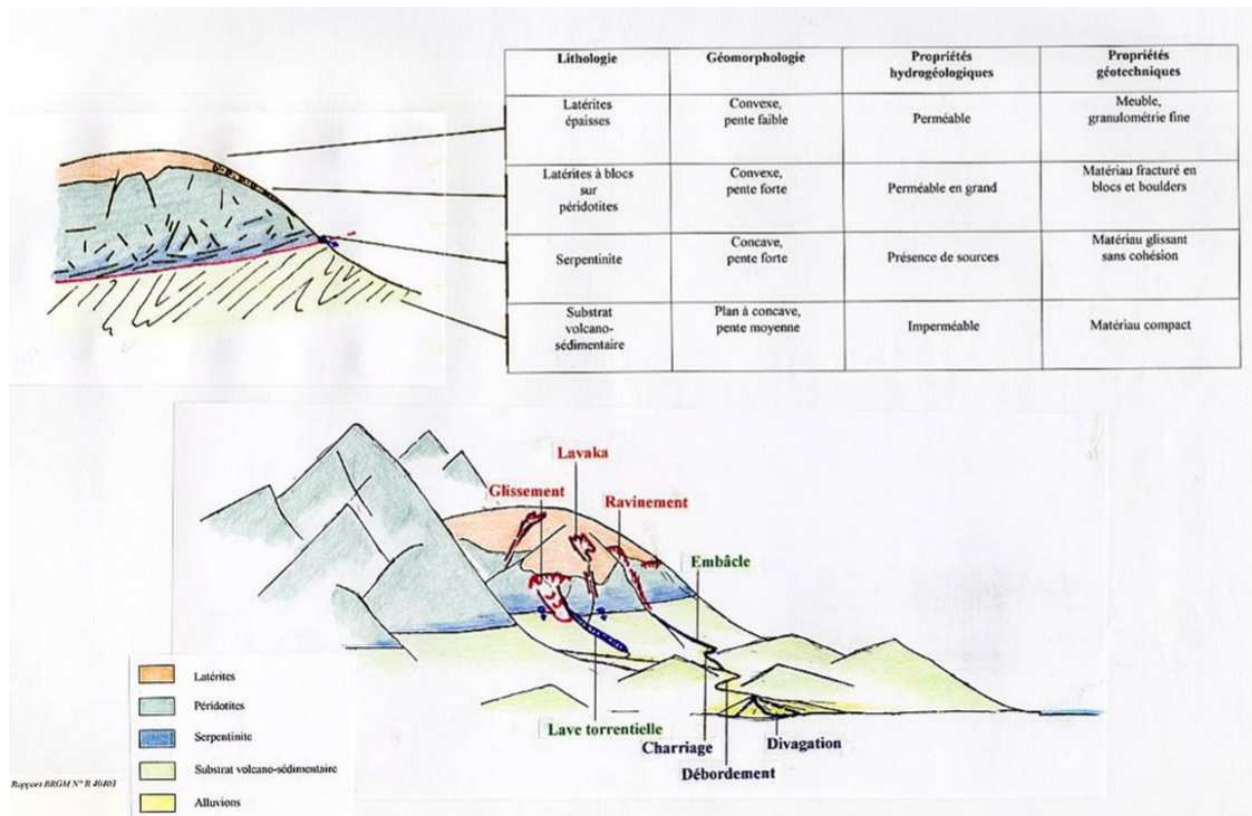


illustration 55 – Tentative de typologie selon critères géomorphologiques et contextes hydrogéologiques et géotechniques (zone de Dumbéa-Païta, 1998, BRGM RP-40403-FR)

- ou en fonction des lithologies et des processus de rupture et de transport (propagation) :

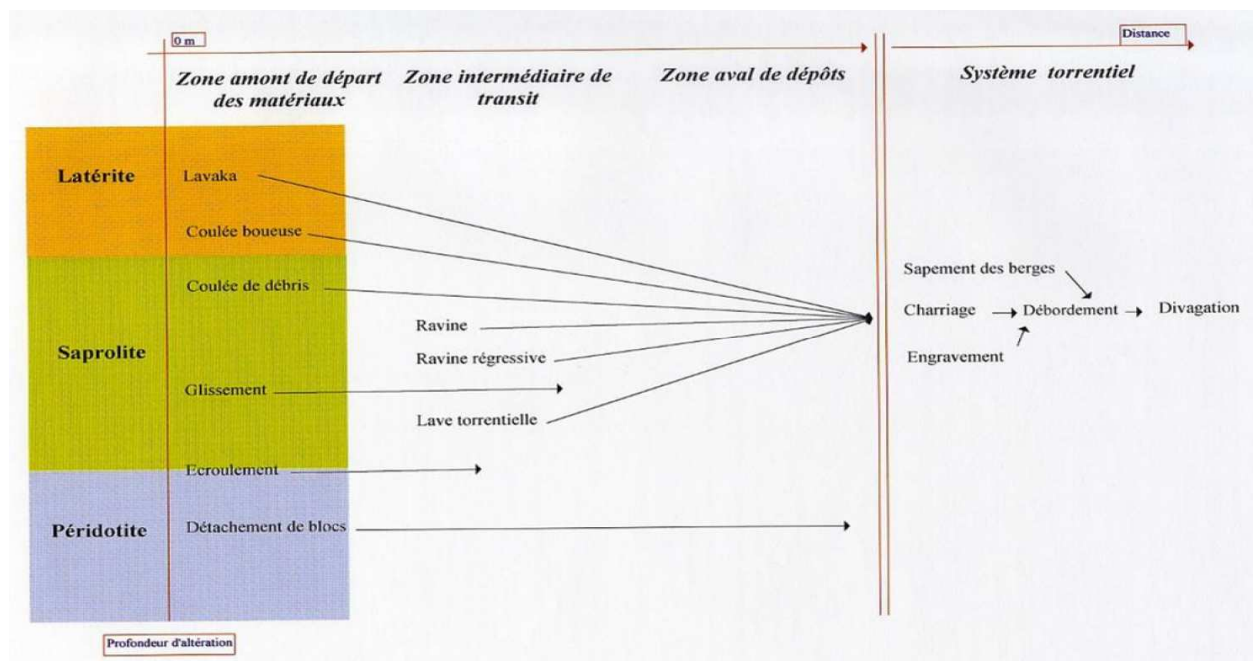


illustration 56 – Tentative de définition des processus selon la lithologie et les processus de transport (zone de Tontouta, 1999, BRGM RP-40776-FR)

Il est finalement possible de récapituler les types mouvement de terrain connus sur les domaines péridotitiques et volcano-sédimentaire (illustration 57 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Type de mouvement	Péridotite	Volcano-sédimentaire
Chute de bloc	Oui	Oui
exemples	Phénomène propre aux zones montagneuses, rocheuse. Les péridotites, avec une fracturation dense, sont particulièrement sujettes aux phénomène.	Phénomène connu et susceptible de se produire dès que les conditions de pentes et de lithologie sont réunies
Grand glissement de versant	Oui	Non
exemples	Mont Dore, Mont Mou, Boulouparis, Vallée Carnot... 200 phénomènes recensés sur le Massif du Sud	Pas d'équivalents aux formes connues sur substrat péridotitique
Eroulement en masse	Oui	Oui
exemples	Nombreux exemples	Quelques phénomènes connus
Lavaka	Oui	Non
exemples	Forme d'érosion omniprésente sur les surfaces latéritiques	Pas d'équivalent aux formes connues sur surfaces latéritiques, des formes érosives types badlands, de surface limité, sont cependant connues dans les siltites noirs crétacées
Ravine	Oui	Non
exemples	Forme d'érosion omniprésente sur les surfaces latéritiques et les versants des massifs péridotitiques	Pas d'équivalents aux formes connues sur les surfaces latéritiques si ce n'est les badlands sur terrain péritique
Laves torrentielles	Oui	Non
exemples	Nombreuses occurrences sur tous les massifs péridotitique, depuis des formes fraîches jusqu'à des formes anciennes	Pas d'équivalents aux formes connues sur le substrat péridotitique
Coulées	Oui	Oui
exemples		Glissement de Nondoué
Glissements	Oui	Oui
exemples	Nombreux glissements connus sur tous types de terrain volcano-sédimentaire altérés	Nombreux glissements connus sur tous types de terrain volcano-sédimentaire altérés

illustration 58 – Tableau récapitulatif des phénomènes connus par type de substratum

4.3 INVENTAIRE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN

Le programme de cartographie envisage un inventaire systématique des mouvements de terrain. Les approches et méthodes d'inventaire et la valorisation de ces données sont présentées ci-après.

4.3.1 INVENTAIRE COMMUNAL DES MOUVEMENTS DE TERRAIN

A l'échelle de chaque commune, un inventaire est formalisé. La classification et la caractérisation des événements évoluent naturellement à l'avancement de l'acquisition des données. La typologie des mouvements de terrains retenue pour la cartographie est présentée § 4.4.

4.3.1.1 Analyse bibliographique

Les « cartographies des formations superficielles et des mouvements de terrain » constituent le socle d'information où elles existent. Sont notamment valorisés :

- les cartes des phénomènes réalisées dans le cadre des atlas ;
- les articles de presse pour certains phénomènes remarquables ;
- les rapports et documents scientifiques traitant de la thématique.



illustration 59 – Glissement de Nondoué (Dumbéa) 10/10/1999 (BRGM RP-52213-FR, cliché BRGM)



illustration 60 – Creek Jeanne et Marie le 3/07/1990 (cliché B. Pelletier, atlas Thio BRGM RP-50845-FR))



illustration 61 – Glissement de terrain, RP1 Pont des Français 13/05/2018 (cliché NC la 1ère)

4.3.1.2 Analyse d'images aériennes

En l'absence de recul historique et de chroniques anciennes permettant d'évaluer la fréquence et l'intensité des phénomènes étudiés, l'un des seuls moyens de suivi de leur évolution est l'observation des photographies aériennes ou satellitaires (© Google Earth & Maps, Spot, Pléiades, etc.). L'intérêt de ces images est la possible analyse diachronique à partir de clichés de dates différentes, étalées sur plusieurs dizaines d'années (illustration 62). Ainsi la valorisation des images aériennes peut permettre de mieux approcher certains paramètres tels que l'évolution de phénomènes, la cartographie de la propagation ou la récurrence de certains événements et enfin d'apprécier les probabilités d'occurrence.

Plusieurs couvertures photographiques "standards" sont disponibles sur tout ou partie du territoire. Les missions de prise de vue aériennes se répartissent sur 42 années entre 1943 pour les plus anciennes jusqu'à 2018. La qualité des clichés est donc disparate et les échelles variées. Certains jeux de photo n'ont qu'une couverture partielle, certains jeux de photos ont un rendu peu intéressant pour la recherche de mouvement de terrain.

Parmi les couvertures disponibles, celles de 1976 et 2008 sont complètes, orthorectifiées et géoréférencées et accessibles sous format SIG. Afin de conserver une homogénéité de traitement de l'information ces deux campagnes ont servi de référence à l'inventaire. En complément les images Google-Earth ont été consultées (vues 3D et en plan). La chronologie des images exploitables à l'échelle de travail s'étale entre 2013 et 2020 (illustration 62).

La périodicité des documents disponibles est à comparer avec la fréquence des événements pluvieux anormaux déclencheurs des mouvements de terrains les plus remarquables (voir § Contexte climatique) à l'échelle de la Calédonie.

Cette méthode d'acquisition est essentiellement visuelle : désordres se manifestant par des zones claires correspondants à la destruction de la végétation, qu'il s'agisse de zones de départ (arrachements), de transport (ravines) ou d'atterrissement (cône, terrasse, etc.). Selon les angles de prises de vue et d'éclairage l'interprétation qui peut être faite est soumise à l'opérateur. Parfois des zones d'ombre empêchent toute observation. L'accès à une chronologie saisonnière via les images récentes permet de pallier partiellement à ce problème.

La perception offerte par les photographies aériennes aux échelles des images valorisées tend à minimiser les désordres de petites et moyennes tailles. S'il est possible de mettre en évidence les changements les plus flagrants tels qu'apparitions, cicatrisations ou aggravations spectaculaires et importantes, il est plus difficile de vouloir mesurer précisément l'évolution des phénomènes. Pour donner un exemple, le déplacement d'un front d'érosion de 10 mètres (ce qui est considérable au regard des phénomènes étudiés) sur un document à l'échelle moyenne du 1 :20 000^{ème} se traduira par un écart de 0.5 millimètres sur le cliché. La comparaison avec un cliché similaire, d'une autre époque, pris sous un angle et dans des conditions d'éclairage différents ne peut pas être valide dans de telles situations. Ceci étant, la cartographie visée à l'échelle du 1 :25 000^{ème} limite ces réserves.

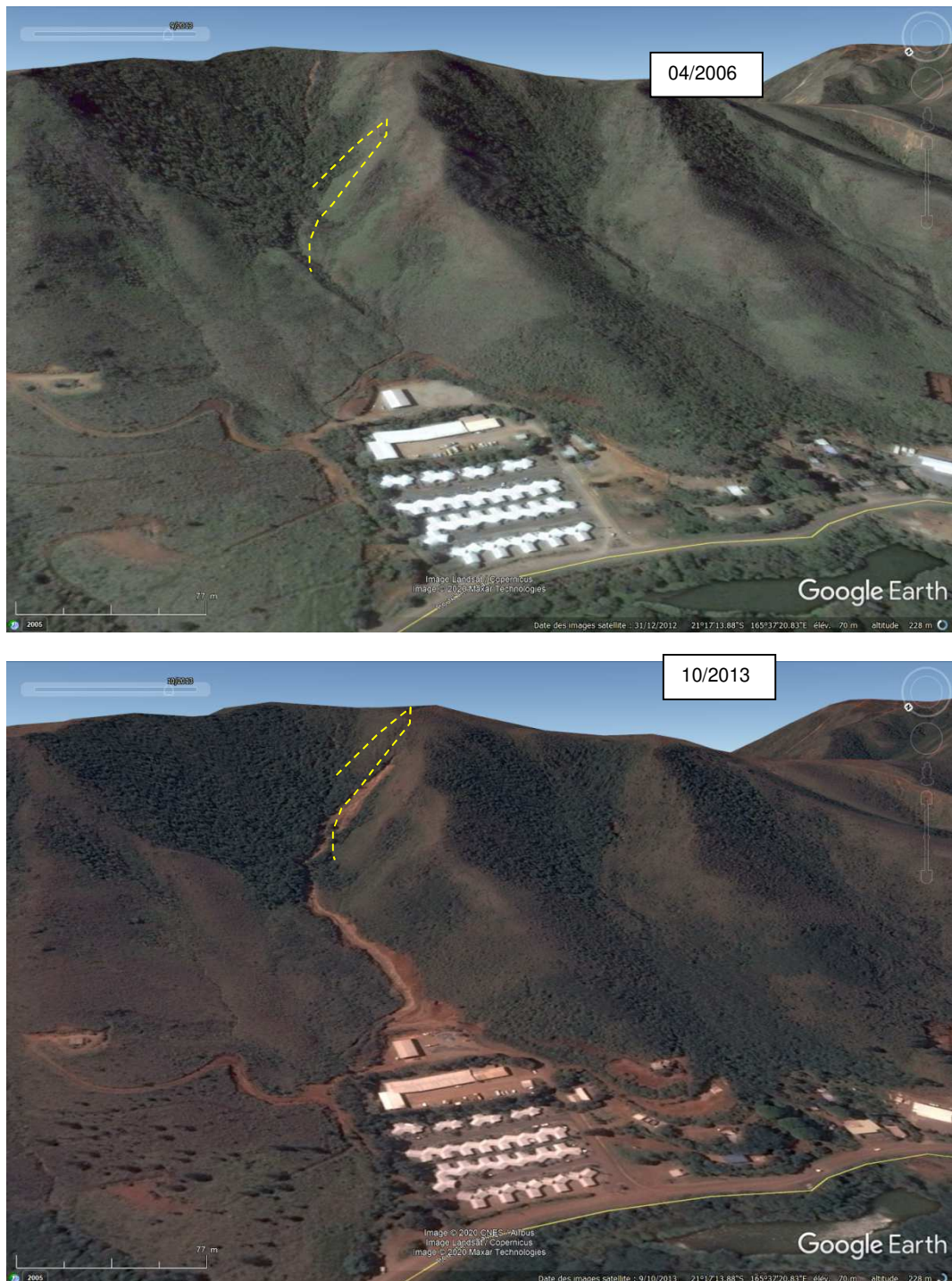


illustration 62 – Exemple d'identification de mouvement à partir d'images Google Earth (lave torentielle à Houailou)

4.3.1.3 Analyse de terrain

Compte tenu des surfaces importantes des communes et des difficultés d'accès par zone, il n'est pas envisagé un parcours systématique des territoires à cartographier. En revanche, lors de la cartographie géologique ou de campagnes de terrain ciblées le repérage et la caractérisation d'évènements peut être menée. Cette analyse permet en particulier de valider la typologie des phénomènes, de préciser les conditions d'occurrence des phénomènes (lithologie et morphologie notamment) et de préciser l'emprise spatiale pour certains phénomènes mal reconnus sur photographies aériennes.

4.3.2 STRUCTURATION DES DONNÉES

Comme signalé il n'existe pas en Nouvelle Calédonie de base de données des mouvements de terrain. Le programme permet d'initier et d'enrichir cette base sur les communes cibles. Cette base a vocation à être consolidée à l'échelle de l'ensemble du territoire dans le temps. La structuration de la base de données des mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie est basée sur la typologie (voir § des phénomènes redoutés) – typologie qui pourra s'enrichir dans le futur.

Afin de refléter cartographiquement les emprises des phénomènes, le parti pris a été d'inventorier les enveloppes des mouvements (pour mémoire en métropole à ce jour les évènements sont représentés par des points), en distinguant zones de rupture (ou d'ablation) et zone de propagation (ou d'accumulation). Dans le détail la zone d'accumulation « recouvre » une partie de la zone de rupture (illustration 63).

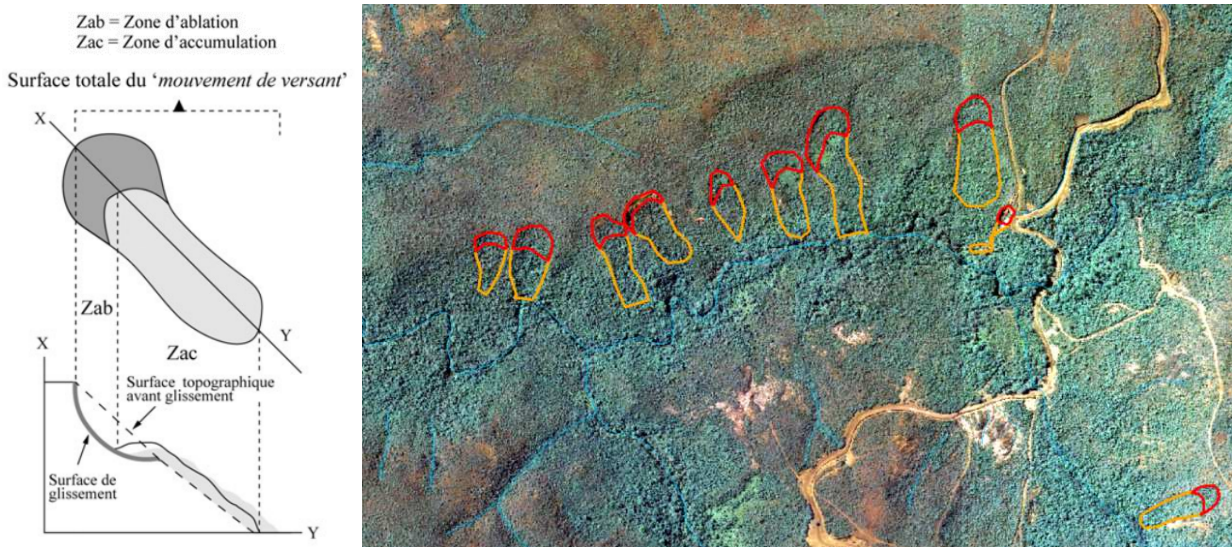


illustration 63 – Définition des enveloppes décrivant les mouvements de terrain (Thiery, 2007) et exemple de report sur la commune du Mont-Dore

Outre leur localisation, les évènements sont qualifiés suivant leur type, leur géométrie et leur date d'occurrence à partir des analyses diachroniques des images aériennes. La précision sur les dates est un intervalle de temps entre deux images. De même la précision des contours est liée à la celle des campagnes des images valorisées (ex. 1 :20 000^{ème} pour la campagne de 1976). La description détaillée des champs de la base de données est fournie § 4.5.

4.4 TYPOLOGIE DES MOUVEMENTS POUR LE PROGRAMME DE CARTOGRAPHIE

- ▀ *Ce chapitre a vocation à être amendé au fil du temps en fonction des mouvements effectivement répertoriés au cours du programme de cartographie des aléas gravitaires.*

Les types de phénomènes connus (§ 4.2) ont été codifiés suivant la typologie définie à l'international (illustration 34). L'inventaire communal des mouvements de terrain s'appuie sur cette typologie également. Au final chaque évènement est décrit suivant un type et un sous-type. Certains types (voire sous-types) d'évènement initialement décrits comme « mouvements de terrain » dans les atlas ne sont pas répertoriés pour le présent programme, pour des raisons diverses :

- Ravinement, débordement, engravement : phénomènes hydrauliques ne relevant pas spécifiquement de la thématique du programme ;
- Fluage : cas particulier de glissement non mis en évidence sur la 1^{ère} commune traitée ;
- Lavaka : comme explicité § 0, le phénomène naturel "lavaka" n'est pas un aléa à proprement parlé mais plutôt une forme géomorphologique dont la genèse est mal cernée, probablement mixte relevant de processus d'érosion plus que d'actions gravitaires

Au final les sous-types de phénomènes redoutés sont regroupés par types pour faciliter la cartographie. Les types de phénomène retenus pour la cartographie des aléas « mouvement de terrain » dans le cadre du programme sont décrits illustration 64.

Les paragraphes suivants (4.4.1 à 4.4.5) décrivent ces types en distinguant selon les zones de rupture et de propagation :

- les matériaux principalement impliqués ;
- les mécanismes attendus ;
- les géométries des évènements (surfaces, distances de propagation) ;
- La cinétique de du mouvement
- Les épaisseurs de matériaux mis en jeu, de façon très globale ;
- Les conditions morphologiques d'occurrence.

Les synthèses morphométriques reportées (surface, épaisseur; longueur de propagation décrites à partir des moyennes / écart type) sont issues des données d'inventaire de la 1^{ère} commune traitée. Le nombre d'évènements supportant cette approche est figuré Illustration 79.

TYPE	TYPE (Code)	SOUS-TYPE	SOUS-TYPE (Code)
Glissement dans matériaux grossiers	GG	glissement de débris dans matériaux grossiers (coarse debris-slide)	GLISS_DEBRIS_GROSSIER
		glissement de débris rocheux (rock debris-slide)	GLISS_DEBRIS_ROCHEUX
Glissement dans matériaux fins	GF	glissement rotationnel dans débris fins	GR_DEBRIS_FINS
		glissement translationnel dans débris fins	GT_DEBRIS_FINS
Lave-torrentielle	LT	lave torrentielle granulaire	LT_GRANUL
		lave torrentielle cohésive	LT_COHES ⁶
Coulée	COUL	glissement-coulée	COUL_GLISS
		coulée de boue dans ravin	COUL_RAVIN
Chute de blocs	CB	éboulement rocheux	CB_ECROUL
		chute de bloc isolée	CB_ISOLEE
Grand glissement de versant	GGV	déformations profondes de versants (deep seated gravitational slope deformation)	DSGSD
		glissements rocheux (écroulement en grande masse)	GR

illustration 64 – Typologie des mouvements de terrain

4.4.1 GLISSEMENTS GROSSIERS (GG)

Ces phénomènes affectent des matériaux qualifiés de « grossiers », c'est-à-dire composés de matériaux graveleux dominants, à faible cohésion. On parle aussi de « glissement de débris ». Sont clairement distinguées une zone de rupture et une zone de propagation qui consiste fréquemment en un étalement de la masse glissée. Les formations affectées sont principalement celle des massifs de péridotites.

Le mécanisme de glissement est plutôt rotationnel, mais pas exclusivement. La zone de rupture intègre la couverture végétale, les matériaux d'altération superficielle (peu épais) et les niveaux d'altération rocheux sous-jacents. La mise en charge de la couverture superficielle lors des épisodes de fortes précipitations est responsable du déclenchement du phénomène, par débouillage de certaines fissures.


Les ruptures sont brutales et la propagation rapide ($> 1-5 \text{ m.s}^{-1}$). L'accumulation en pied n'est pas systématique et il peut y avoir dépôt le long de la zone de propagation. Le déplacement total peut être important dans les contextes de pentes favorables. La masse se disloque et des trajectoires de blocs isolés peuvent accompagner la rupture.

Les surfaces concernées sont très variables.

⁶ Non observé



illustration 65 – Glissements grossiers (GG), massif péridotitique de Bel Air Houailou

GG GLISSEMENTS GROSSIERS	ILLUSTRATION	MATERIAU	MECANISME	VITESSE	SURFACE* (m²) LONGUEUR* (m)	EPAISSEUR (m)	PENTES* (°)
INITIATION		Débris rocheux et matrice fine. Produits d'altération graveleux.	Glissement Glissement rotationnel ou translationnel	Rupture brutale avec pas ou peu de précurseurs	100-2000 m²	1 - 3 m	22-42°
PROPAGATION		Grave dominante et matrice fine. Potentiellement remobilisable.	Ecoulement Ecoulement en masse. Peu d'individualisation de trajectoire. Concentration dans les ravines et talweg, ou propagation pleine pente.	Rapide jusque plusieurs mètres / s	< 5000 m² 10 - 100 m	0.5 - 2 m	18-35°
ARRÊT		Grave dominante Blocs et matrice fine, Matériaux extrêmement remaniés	Ecoulement Zone de dépôt liée à la morphologie et au volume de matériau mobilisé	-	-	1 - 5 m	-

** : les intervalles de pentes et de surface sont formulées par rapport à la moyenne des objets +/- un écart type*

illustration 66 – Synthèse : glissements grossiers (GG)

4.4.2 GLISSEMENTS FINS (GF)

Les phénomènes qualifiés de « glissement fin » affectent les matériaux à granulométrie plus fine que les glissements grossiers décrits précédemment. Il s'agit de glissements translationnels ou rotationnels pouvant ou non évoluer en coulées. Les matériaux affectés correspondent :

- aux profils d'altération bien développés (de l'ordre de quelques mètres) des faciès du substratum volcano-sédimentaire (notamment les altérites développées sur les roches silico-alumineuses) ;
- aux horizons altérés des massifs péridotitiques (latérites et saprolite fine) ;
- les formations de surface issues du remaniement des faciès décrits ci-avant : colluvions ;

Historiquement les glissements de Yahoué (Mt-Dore), Nondoué (Dumbéa), Jardins de Plum (Mont-Dore), vallée des Koghis (Dumbéa), lotissement des Santals (Mt-Dore), Ngéa (Nouméa) ou Poindimié font référence (Maurizot, 2003).

Les surfaces concernées sont très variables.

Ces glissements se déclenchent à la faveur de circulations préférentielles d'eau aux interfaces entre faciès de perméabilité contrastée (altérite / roche ou colluvions / altérite). En général des signes précurseurs à la rupture peuvent s'identifier (apparition de fissures de traction, bombement de talus, etc...). Les vitesses redoutées sont a priori plus faibles que celles des glissements grossiers mais peuvent atteindre également 5 m.s⁻¹.

La saturation des terrains peut conduire à des propagations en coulées qui s'avèrent dangereuses en cas d'épaisseur mobilisée élevée supérieure au mètre.

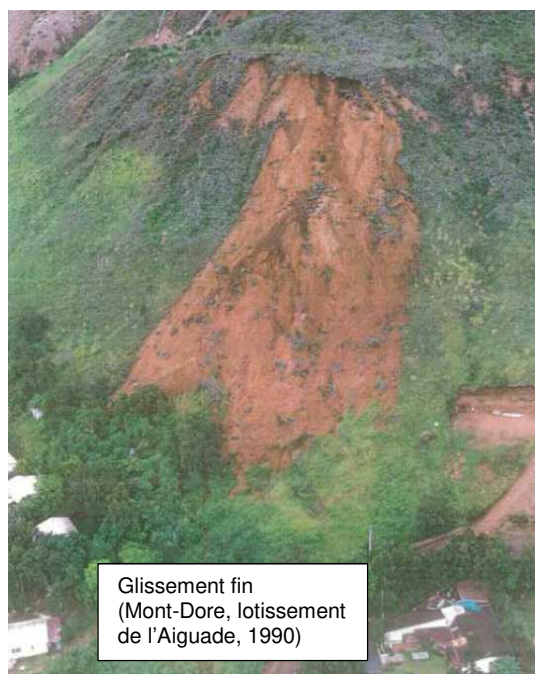



illustration 67 – Glissements fins

GF GLISSEMENTS FINS	ILLUSTRATION	MATERIAU	MECANISME	VITESSE	SURFACE* (m²) LONGUEUR* (m)	EPAISSEUR (m)	PENTES* (°)
INITIATION		Sol fins (quelques débris rocheux) : colluvions, produits d'altération sur massif minier et substrat volcano-sédimentaire	Glissement Glissement rotationnel ou translationnel	Rupture lente à brutale avec précurseurs fréquents (fissures traction)	100-2000 m²	1 - 5 m	16-30°
PROPAGATION		Sols fins remaniés plus ou moins selon mécanisme et saturation	Glissement / Ecoulement Propagation généralement peu développée pouvant évoluer en écoulement (coulée) selon degré de saturation et morphologie de la zone aval à la rupture	Lent à rapide de qq mètres par minutes à qq m par heure	< 8000 m² 10-100 m	0.5 - 5 m	11-27°
ARRÊT		Sols fins remaniés plus ou moins selon mécanisme et saturation	Glissement / Ecoulement Bourrelet de pied. Etalement possible selon degré de saturation	-	-	1 - 5 m	-

* : les intervalles de pentes et de surface sont formulées par rapport à la moyenne des objets +/- un écart type

Illustration 68 – Synthèse : glissements fins (GF)

4.4.3 LAVES TORRENTIELLES (LT)

Ces phénomènes peuvent être le résultat des glissements de terrains décrits précédemment. Ils ont cependant la particularité d'être associés à une pente et un apport d'eau suffisants et pour initialiser le processus et la propagation est chenalisée en ravine ou en talweg. L'arrêt peut être liée à l'abaissement de la pente et/ou à l'étalement (perte de chenalisation) Les facteurs favorisant la formation d'une lave torrentielle ou d'une coulée de débris sont les suivants (Remaitre, 2016) :

- Apport de matériaux (déstabilisation de versant, de berges d'un torrent ou d'un cône de dépôt) ;
- Apport d'eau intense, soudain et localisé (fortes pluies, rupture de barrage) ;
- Paramètres gravitaires : pente et dénivelé suffisants.
- La déstabilisation initiale peut être associée à des formations géologiques et pédologiques sensibles à l'érosion, c'est-à-dire lithologies meubles ou tectonisées (roches fracturées ou broyées, schisteuses ou à forte composante argileuse, etc.) ou des formations superficielles meubles (éboulis, formations d'altération, sols, ...). Les coulées et laves torrentielles peuvent également se former par déstabilisation des berges d'un torrent, incision du fond du lit, d'un cône de dépôt ou d'un versant couvert de matériaux mobilisables, liquéfiables et en quantités suffisantes. Il se produit alors un « effet boule de neige » en alimentant la coulée tout au long de son parcours.
- L'apport d'eau est représenté par des pluies intenses ($> 50 \text{ mm.h}^{-1}$) ou d'un apport d'eau soudain par la rupture d'un barrage naturel ou anthropique. La formation d'un embâcle dans les cours d'eau et d'une débâcle lors de la rupture, peut produire une onde de crue et initier le phénomène de lave torrentielle.
- La pente est un facteur important qui permet l'entraînement initial de la coulée. Celle-ci va se stopper lorsque la pente ne sera plus suffisante et/ou lorsque la teneur en eau ne permettra plus le transport du matériel en suspension (Morard, Scapozza, Duhem, Reynard, & Delaloye, 2009). Le déplacement est égal à plusieurs fois ou plusieurs dizaines de fois la dimension de la zone de rupture (Maurizot, 2003). Des distances pluri-hectométriques à kilométriques ont été observées en Nouvelle-Calédonie.
- Les observations de terrain font état d'un écoulement spasmodique ou par « bouffées », des phases d'écoulement plus rapides alternent avec des pulsions d'écoulements plus visqueux et plus lents. Elles sont produites par des à-coups dans l'arrivée des matériaux bloqués dans leur progression par des variations de la section d'écoulement, des obstacles dans le chenal des modifications de la pente longitudinale, ou par des arrivées d'eau latérales. Certaines coulées construisent des levées latérales, qui tendent à contenir l'écoulement de sorte que, moins étalée latéralement, la coulée se propage plus loin.

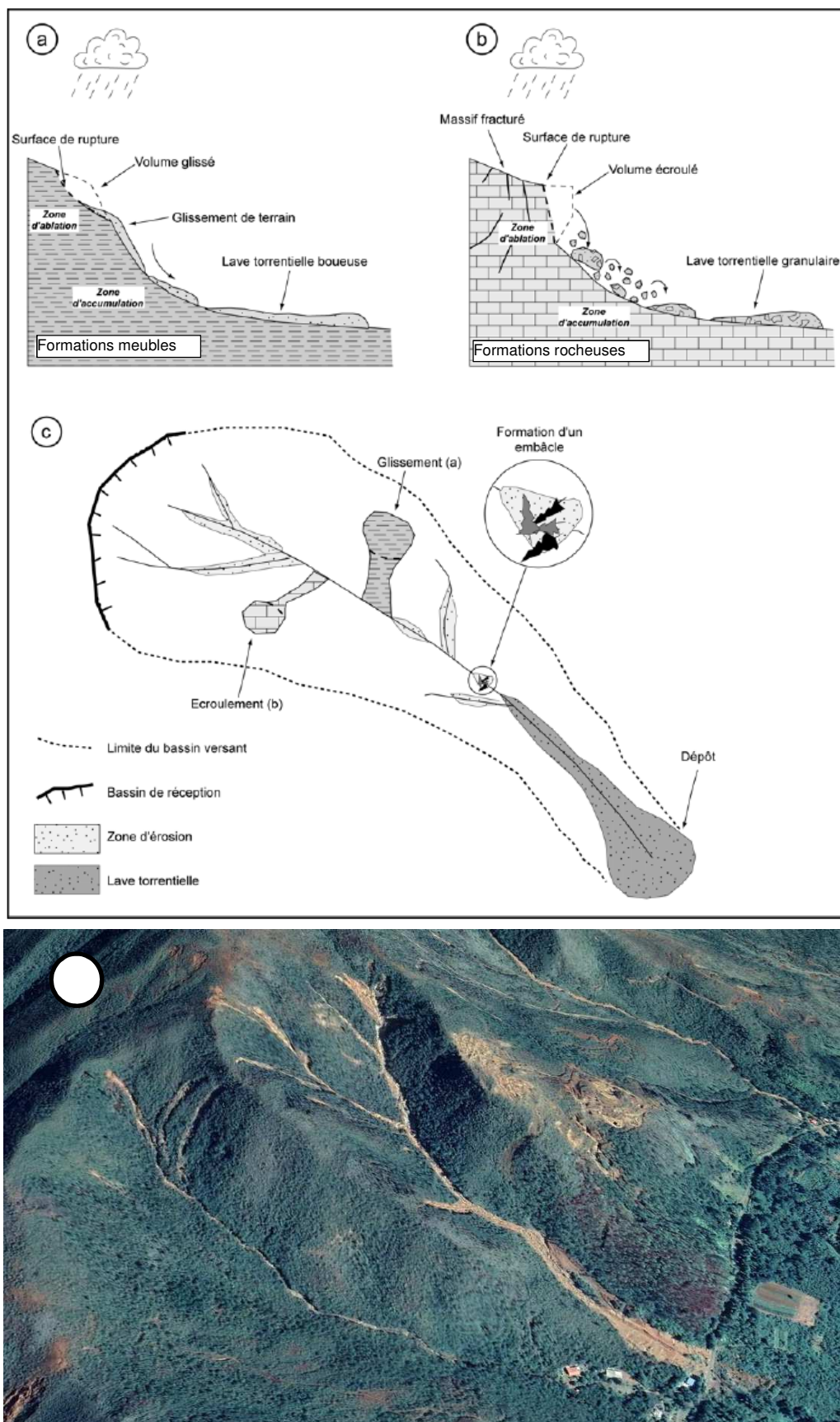



Illustration 69 – Mécanismes des laves torrentielles (d'après Remaitre, 2006)
 (a) glissement (b) éroulement (c) déclenchement et contribution (d) exemple sur Houaïlou (22/11/2016)



Illustration 70 – Laves torrentielles

LT LAVES TORENTIELLES	ILLUSTRATION	MATERIAU	MECANISME	VITESSE	SURFACE* (m²) LONGUEUR* (m)	EPAISSEUR (m)	PENTES* (°)
INITIATION		Débris rocheux. Produits d'altération graveleux	Glissement / Chute Glissement rotationnel ou translationnel Eboulement rocheux	Rupture brutale avec pas ou peu de précurseurs	100-1200 m²	1 - 3 m	24-41°
PROPAGATION		Grave dominante et matrice fine. Matériau arraché dans le lit et berges des ravines.	Ecoulement Par bouffée de matériaux saturés. Front de lave et levées latérales. Concentration dans les ravines et talweg.	Très rapide 5 m/s et plus	< 12000 m² # 620 m	0.5 - 3 m	17-31°
ARRÊT		Grave dominante Blocs et matrice fine, Matériaux extrêmement remaniés. Epandage en lobes.	Ecoulement Zone de dépôt avec front de lave et étalement en zone de faible pente.	-	-	1 - 5 m	-

* : les intervalles de pentes et de surface sont formulées par rapport à la moyenne des objets +/- un écart type

Illustration 71 – Synthèse : Synthèse : laves torrentielles (LT)

4.4.4 COULÉES (COUL)

Ces phénomènes sont le résultat des glissements de terrains fins (GF) décrits précédemment, dans des contextes morphologique et hydrologique – voire hydrogéologique, spécifiques. Un apport d'eau suffisant est nécessaire pour initialiser le processus. Il s'agit dans les faits d'une liquéfaction de masses glissées qui peuvent alors s'écouler librement sur les pentes, on parle alors de « glissement-coulées ».


La déstabilisation initiale peut être associée à des formations géologiques plutôt meubles (roches broyées altérées, schisteuses ou altérées ou formations superficielles dont notamment les masses éboulées ...).

L'apport d'eau est représenté par des pluies intenses ($> 50 \text{ mm.h}^{-1}$) ou d'un apport d'eau soudain par la rupture d'un barrage naturel ou anthropique.

La pente est un facteur important qui permet l'entraînement initial de la coulée. Celle-ci va se stopper lorsque la pente ne sera plus suffisante et/ou lorsque la teneur en eau ne permettra plus le transport du matériel en suspension. Le déplacement est égal à plusieurs fois la dimension de la zone de rupture.



*Illustration 72 – Ablation après coulée boueuse suite au passage de la Tempête Freda de 2013
(lieu dit DALLAS à Thio)*

COUL COULEE	ILLUSTRATION	MATERIAU	MECANISME	VITESSE	SURFACE* (m²) LONGUEUR* (m)	EPAISSEUR (m)	PENTES* (°)
INITIATION		Sol fins (quelques débris rocheux) : colluvions, produits d'altération sur massif minier et substrat volcano-sédimentaire	Glissement Glissement rotationnel ou translationnel	Rupture lente à brutale avec précurseurs fréquents (fissures traction)	50-4500 m²	1 - 3 m	13-33°
PROPAGATION		Sols fins remaniés plus ou moins selon mécanisme et saturation	Glissement / Ecoulement Propagation généralement peu développée pouvant évoluer en écoulement (coulée) selon degré de saturation et morphologie de la zone aval à la rupture	Lent à rapide de qq mètres par minutes à qq m par heure	< 9000 m² 50-300 m	0.5 - 2 m	13-33°
ARRÊT		Sols fins remaniés plus ou moins selon mécanisme et saturation	Glissement / Ecoulement Bourrelet de pied. Etalement possible selon degré de saturation	-	-	1 - 2 m	-

* : les intervalles de pentes et de surface sont formulées par rapport à la moyenne des objets +/- un écart type

Illustration 73 – Synthèse : coulées (COUL)

4.4.5 CHUTES DE BLOCS (CB)

Il est distingué pour ces phénomènes, les éboulements (en masse) (CB_ECROUL) de volume total de quelques dizaines à plusieurs centaines de m³, et les chutes de blocs isolées (CB_ISOLEE) qui correspondent à des événements de volume unitaire variable de quelques litres à plusieurs m³ voire dizaines de m³. Pour la cartographie il importe de justifier des éléments unitaires atteignant les enjeux.

Des éboulements rocheux conduisent systématiquement à la propagation d'éléments isolés en fin de parcours et à ce titre les volumes unitaires (après fragmentation éventuelle) sont essentiels à évaluer. Pour les éboulements, en théorie, au voisinage de la zone de départ le volume total est prépondérant.

Les différents types de mécanismes de rupture rencontrés lors des visites de terrain sont présentés Illustration 75, en s'appuyant sur la classification admise des configurations et des mécanismes :

Dans tous les cas, le contexte favorable au déclenchement est lié à la pente locale forte des versants et la présence d'escarpements rocheux (naturels : falaises, chicot rocheux ou anthropiques : talus routier par exemple). Outre la morphologie (et la lithologie rocheuse), le facteur principal régissant cet aléa est la fracturation des massifs rocheux. Le degré de fracturation de la roche (continuité, espacement) détermine la taille des blocs susceptibles de se propager et les mécanismes de rupture à attendre.

Les mécanismes de propagations sont régis par : i) de la chute libre en général au voisinage de la zone de départ en cas de falaises redressées ; ii) des rebonds ; iii) du roulement.

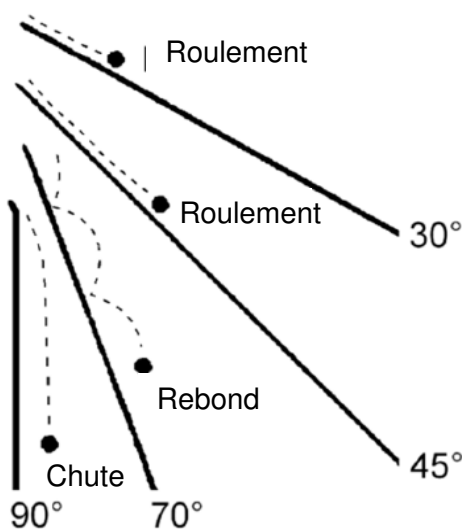


Illustration 74 – Modes généraux de mouvement de blocs rocheux selon les pentes de versant (Ritchie, 1963)

La morphologie du versant, la nature des sols de propagation et la taille et forme des blocs conditionnent les trajectoires. Éventuellement des blocs déjà immobilisés peuvent être remis en mouvement. En règle générale on admet que la remobilisation est rare sur des pentes inférieures à 25-26°.





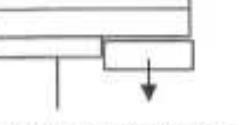



Configurations / mécanismes	Mécanisme d'instabilité
	Glissement plan Gp
	Glissement dièdre ou plan Gd
	Glissements rotationnel et fractionné Gr
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="379 947 651 1126">  <p>Configuration jointure verticale (rupture en cisaillement)</p> </div> <div data-bbox="762 947 1034 1126">  <p>Configuration jointure horizontale (rupture en traction)</p> </div> </div>	Rupture de surplomb S
	Basculement de colonne ou de blocs Cb
	Rupture de colonne en pied Cp
	Rupture de banc (par flambage ou sur fracture) Bf

Illustration 75 – Configuration et mécanismes de chutes de blocs (Dussauge-Peissier, 2002)

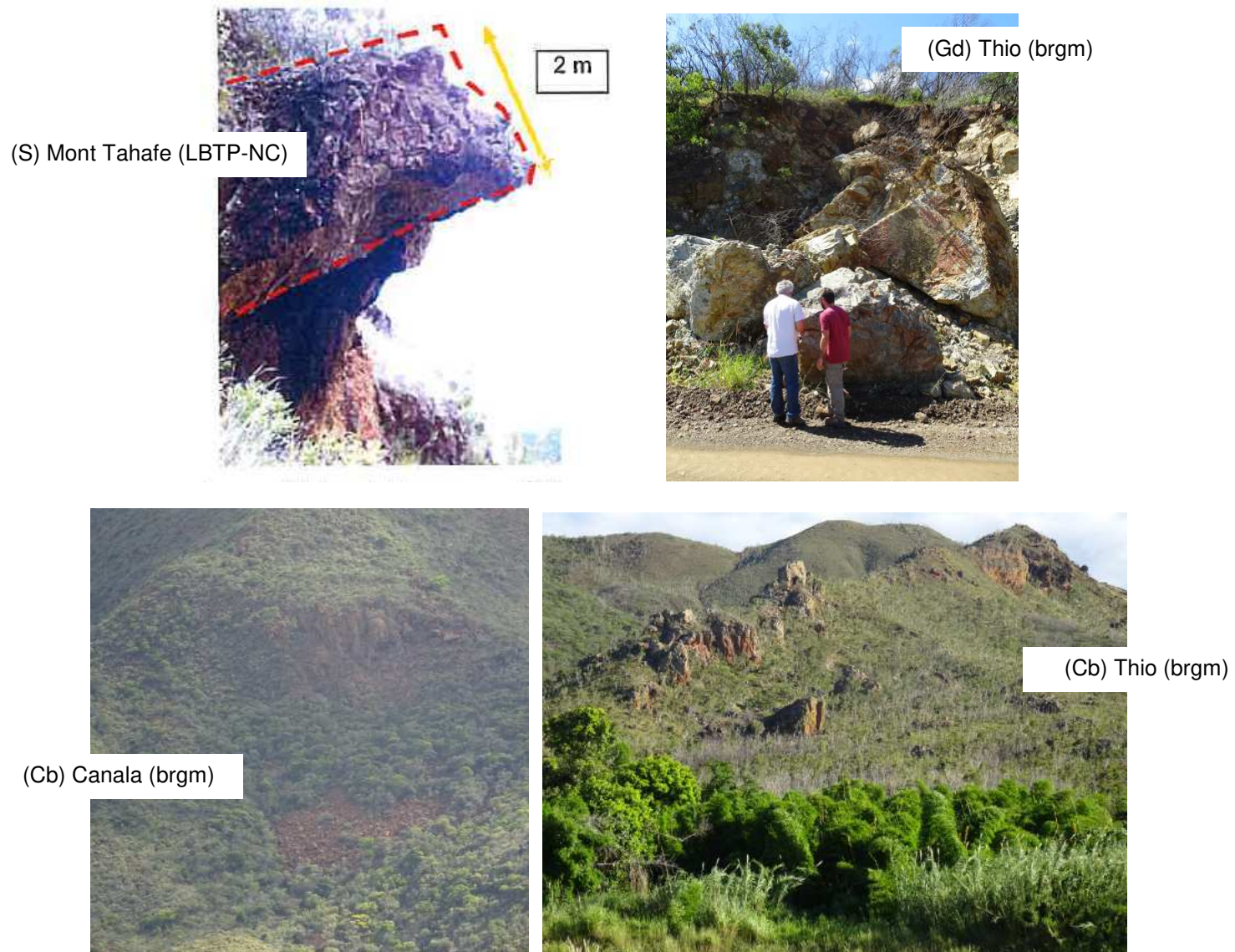



illustration 76 – Exemple de chutes blocs (S : surplomb, Gd : glissement dièdre, Cb : basculement de blocs ou de colonnes)

CB CHUTE DE BLOCS	ILLUSTRATION	MATERIAU	MECANISME	VITESSE	SURFACE* (m²) LONGUEUR* (m)	EPAISSEUR (m)	PENTES* (°)
INITIATION		Matériaux rocheux, fracturés	Glissement / Chute / basculement Eboulement dièdre (ou plan plus rarement, surplombs) à la faveur de la fracturation du massif rocheux	Rupture brutale en général sans indice précurseur	100-1500 m²	0.5 - 3 m	30-50°
PROPAGATION		Blocs rocheux, fragmentés potentiellement pendant la propagation	Chute / Rebond / Roulement Propagation liée au volume total, la morphologie, la nature / forme des blocs et des sols dans la zone aval.	Très rapide > 5-10 m/s	< 5 500 m² 10-90 m	0.5 - 2 m	26-42°
ARRÊT		Blocs rocheux isolés au niveau des zones d'arrêt	Perte d'énergie cinétique. Arrêt possible sur obstacle (ouvrage, route / fossé, végétation pour les éléments les moins volumineux)	-	-	1 - 2 m	-

* : les intervalles de pentes et de surface sont formulées par rapport à la moyenne des objets +/- un écart type
illustration 77 – Synthèse : chute de blocs (CB)

4.4.6 GRANDS GLISSEMENTS DE VERSANT (GGV)

La description des GGV est détaillée § 4.2.2.2. La fréquence de ces mouvements de grande ampleur est très rare, à l'échelle de l'histoire géologique récente du territoire. À ce titre la carte d'aléa de ce type de phénomène n'est pas réalisée. Un report sur carte des emprises des grands glissements connus est cependant réalisé.

À l'échelle communale

En synthèse pour chaque commune, la typologie des phénomènes à cartographier sera rappelée et illustrée.

4.5 BASE DE DONNÉES MOUVEMENTS DE TERRAIN

La structure de la base de données événementielle a évolué au fil de l'acquisition des données de terrains (missions sur les communes du Mont-Dore, de Houailou, Canala, Thio et Kouaoua notamment). Au final, deux bases sont consolidées sous forme de polygones (format .shp sous ©ArcGIS) :

- Une base de données des enveloppes totales des mouvements (BD_MERGE) ;
- Une base de données des zones sources des mouvements (BD_INIT).

Chacune de ces bases est indépendante mais une partie des champs est commune (Illustration 78). Le descriptif détaillé des champs et des lexiques associés au remplissage de la base de données est reporté en annexe 2.

ENVELOPPES (BD_MERGE)

DESCRIPTION DU MOUVEMENT	TYPE	GEOLOGIE	GEOL_SGNC
	SOUS_TYPE		FORM_SUP
	TYPE_ZONE		DESC_LITHO
	PROFONDEUR		MATERIAUX
	ORIGINE	SOURCE D'INFORMATION	SOURCE_INF
	MULTI_SOUR		SOURCE_I_1
	PROPAG		SOURCE_I_2
	ACTIVITE		SOURCE_I_3
	AGE		SOURCE_I_4
	CONT_MORPH	GEOMETRIE	EPAISSEUR_
	ACTIV_HYDR		SURFACE_M2
	DATE_DEBUT		VOL_TOT_M3
	ANNEE		VOL_UNIT_M
	PREC_DATE		ALT_MAX
	OBSERVATIO		ALT_MIN
LOCALISATION	COMMUNE		DENIVELLE
	CODE_COMMUNE		ANGLE_NRJ
	LIEU_DIT		LONGUEUR_T
	X_RGNC		LARGEUR_T
	Y_RGNC		LONGUEUR_I
	Z_NGNC		LARGEUR_I
	PREC_XY		LONGUEUR_A
	PREC_Z		LARGEUR_A
SAISIE	OPERATEUR		LONGUEUR_R
	FIABILITE		SURFACE_I
			SURFACE_T
			SURFACE_A

ZONES SOURCES (BD_INIT)

DESCRIPTION DU MOUVEMENT	TYPE	} Champs communs aux 2 bases
	SOUS_TYPE	
	TYPE_ZONE	
	PROFONDEUR	
	PROPAG	
	ACTIVITE	
	AGE	
	CONT_MORPH	
	ACTIV_HYDR	
LOCALISATION	X_RGNC	
	Y_RGNC	
	Z_NGNC	
	PREC_Z	
GEOMETRIE	LONG_INIT	
	LARG_INIT	
	SFCE_INIT	
	PERIM_INIT	

Illustration 78 – Champs des bases de données évènementielles

Ci-après sont synthétisés les données des résultats d'inventaires réalisés à l'échelle communale en intégrant les types de mouvements effectivement retenus pour la cartographie des aléas :

COMMUNE	NB DE MOUVEMENTS	GF	GG	LT	COUL	CB	GGV
MONT-DORE	1682	279	1235	68	11	65	24

Illustration 79 – Mouvements de terrain répertoriés à l'échelle de chaque commune

COMMUNE	NB DE MOUVEMENTS		
	ANCIEN (< 1976)	RECENT (1976-2008)	ACTUEL (>2008)
MONT-DORE	1481	176	2

Illustration 80 – Date des mouvements de terrain répertoriés à l'échelle de chaque commune

- ▀ Ces tableaux de synthèse ont vocation à être amendés à l'avancement des communes traitées.

A l'échelle communale

En synthèse pour chaque commune, une base de données événementielle et une analyse des données sera fournie (dénombrement de phénomènes, principales constantes géométriques notamment)

5 Méthode

5.1 DÉFINITIONS ET PRINCIPES

L'aléa correspond à la probabilité spatiale (susceptibilité) et temporelle (période de retour) qu'un type de phénomène d'une certaine intensité se produise sur un territoire pour une période temporelle donnée (Cruden et Fell, 1997 ; Fell et al., 2005).

Si l'intensité du phénomène redouté n'est pas discriminée formellement l'aléa traduit la probabilité d'occurrence d'un phénomène de ce type. Cette probabilité peut être spatiale (on parle de « susceptibilité ») ou spatiale et temporelle (on parle alors bien d'aléa).

Les méthodes d'évaluation de l'aléa glissement de terrain mobilisent différentes disciplines comme la géomorphologie, la géologie, l'hydrogéologie, les mathématiques, la statistique, ou encore la géotechnique (Thiery, 2007 ; Fressard, 2013 ; Corominas et al., 2014 ; Thiery et al., 2020). Si certaines de ces méthodes ont bénéficié d'une augmentation croissante des capacités de calcul informatique, toutes ont le même objectif et sont fondées sur la relation entre les glissements de terrain existants et les facteurs environnementaux du site investigué. On distingue :

- Les **méthodes qualitatives (ou empiriques)** qui se divisent en deux catégories (Illustration 81) :
 - o La méthode directe : utilisée pour la cartographie réglementaire, elle est fondée sur une analyse géomorphologique. L'évaluation et/ou le zonage est réalisé sur le terrain par l'expert qui, sur la base de ses observations et de son expérience, placera les limites des secteurs cartographiés et un degré d'aléa estimé. Ainsi, l'expert synthétise directement les informations et peut intégrer un grand nombre de facteurs. Les avantages de la méthode sont sa rapidité de mise en œuvre et l'intégration de la propagation dans les enveloppes cartographiées. Les défauts majeurs résident dans une démarche peu expliquée avec des règles implicites difficilement reproductibles par autrui (van Westen et al., 2008) ;
 - o Les méthodes indirectes : plusieurs méthodes existent ; toutes partent du même principe qui consiste à : (i) sélectionner les phénomènes, (ii) sélectionner les facteurs contributifs (sous forme de variables spatiales), (iii) attribuer un poids relatif pour chaque facteur de prédisposition et classe respective⁷ (chaque poids étant proportionnel à la contribution attendue par l'expert pour générer un type de phénomène, (iv) combiner sous SIG les variables afin d'obtenir, après reclassification, des zones homogènes favorables ou pas aux glissements de terrain. Plusieurs approches sont distinguées avec : (i) l'approche par logique booléenne, (ii) l'approche par combinaison de cartes d'index, (iii) l'approche par logiques floues, (iv) les systèmes multicritères (Analyse par Processus hiérarchique, Saaty, 1977). Les deux dernières citées sont en terme de combinaison de variables et de formalisation de règles expertes les plus complètes. De plus, elles gardent la souplesse de l'approche géomorphologique tout en étant considérées comme plus objectives par le cadre formaliste qu'elles imposent à leur application (Poiraud, 2012). Pour ces méthodes, seule la susceptibilité est évaluée.

⁷ Pour les variables discontinues, un poids est affecté à chaque classe contributive ; pour les variables continues, une classification préalable est requise.

- Les **méthodes quantitatives** : par opposition aux méthodes qualitatives, les méthodes quantitatives sont considérées comme objectives. Elles sont théoriquement reproductibles pour des environnements similaires en produisant des résultats identiques avec un même jeu de variables (Thiery, 2007 ; Fressard, 2013). Deux grands types de méthodes quantitatives sont différenciées : (i) les méthodes statistiques/probabilistes (ou méthodes axées sur les données) et (ii) les méthodes déterministes (ou à base physique).
 - o Les méthodes statistiques/probabilistes utilisant plusieurs approches : les approches bivariées le plus souvent fondées sur le théorème de Bayes (Weight of Evidence, valeur de l'information, rapport de fréquence, etc...) ; les approches multivariées (régression logistique, analyses discriminantes, ...) ; les approches par réseaux de neurones artificiels. Le principe est le même pour chacune, il repose sur la distribution spatiale des phénomènes et une comparaison avec les différents facteurs (sous forme de variable spatiale). Ainsi, selon l'approche choisie, une pondération pour chaque classe de facteur est obtenue. Les pondérations sont donc définies de manière objective, sans intervention de l'expert, puis comme pour les méthodes qualitatives indirectes une combinaison sous SIG est réalisée. Le zonage en secteurs homogènes favorables ou pas aux glissements de terrain est effectué après reclassification des modèles.
 - o Les méthodes à base physique sont fondées sur des modèles de calcul d'équilibre limite (calcul du facteur de sécurité - FS) et sont réservées, au regard du grand nombre d'informations requises, à des études à échelle de site ou de petits bassin-versants.

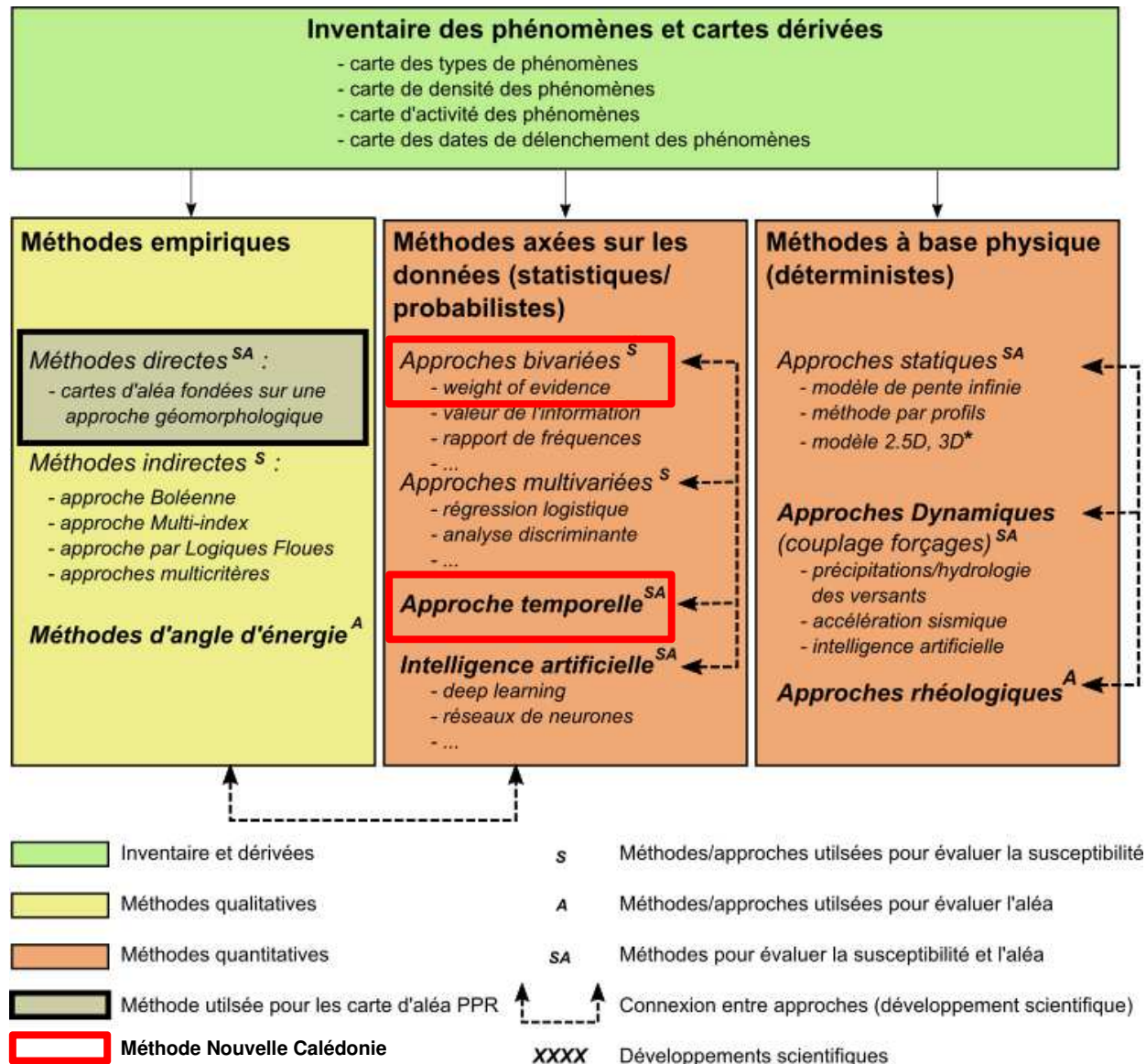


Illustration 81 – Méthodes pour évaluer la susceptibilité et l'aléa glissement de terrain (d'après Soeters et van Westen, 1996 ; van Westen et al., 2006 ; Fell et al., 2008 ; Corominas et al., 2014)

La qualité des données et les objectifs recherchés conditionnent l'approche d'évaluation de l'aléa (Illustration 82). Pour le projet les méthodes dites « sophistiquées » axées sur des approches quantitatives sont retenues au regard du travail d'inventaire réalisé. Ces méthodes intègrent la dimension spatiale et la composante temporelle. Elles sont fondées sur des analyses statistiques/probabilistes.

Echelle		Méthode d'évaluation			Niveau de précision spatiale			Type de cartographie		Proposition d'application
		Basique	Intermédiaire	Sophistiqué	Faible	Moyen	Fort	Susceptibilité	Aléa	
Petite (nationale)	<1:250 000	X			X			X		Cartographie régionale : informative
Moyenne (régionale)	1 :250 000 – 1 :25 000	X	(X)		X	(X)		X	(X)	Cartographie régionale : consultative
Large (locale)	1 :25 000 – 1 :5 000	X	X	(X)	X	X	(X)	X	(X)	Cartographie locale : Informative, Consultative, Prescriptions et recommandations
Détaillée (site)	>1 :5 000	[X]	(X)	X	[X]	(X)	X	X	X	Cartographie spécifique locale : Informative, Consultative Prescriptions et recommandations, aide à l'aménagement

Illustration 82 – Classification des méthodes, de leur précision et du champ d'application selon l'échelle de travail (d'après Cascini, 2008)

X = recommandée ; (X) = applicable avec précautions ou développements spécifiques ; [X] = non recommandé

Pour mémoire, l'aléa est défini comme « la probabilité d'apparition d'un phénomène donné, d'intensité donnée, sur un territoire donné, dans une période de référence donnée ». Cette définition peut être décomposée de la façon suivante :

- un phénomène donné : cela comprend le **type de phénomène** (glissement, chute de blocs, lave torrentielle, etc...) ;
- une intensité donnée : intensité de ce phénomène permettant de moduler l'aléa. Pour les études communales, **l'intensité est représentée différemment selon les phénomènes**. Elle peut être représentée par le volume des matériaux mis en jeu (volume de bloc rocheux, surface de glissement) ou la vitesse de déplacement des masses instables, ... ;
- un territoire donné : c'est la composante spatiale de l'aléa. L'aléa s'applique sur une zone délimitée. Dans les études communales, la **composante spatiale est appréhendée à partir de la lithologie (nature des matériaux) et de la morphologie** des zones à cartographier. La propagation des phénomènes est intégrée à ce volet ;
- une période de référence donnée : c'est la composante temporelle de l'aléa qui définit la possibilité, plus ou moins grande, d'occurrence temporelle du phénomène. Pour l'aménagement du territoire, il est admis de retenir une période centennale. Les analyses locales préconisent la notion de « probabilité d'occurrence dans un délai fixé ». Pour les études communales, le principe a été retenu de tendre vers **des probabilités d'occurrence annuelles**, qui permettent d'objectiver l'analyse, en tenant compte de l'historique des évènements sur la période 1976-2018, soit environ 50 ans.

Les approches retenues quelque soient les phénomènes intègrent à la fois l'expertise et l'analyse des évènements passés. La méthode déployée s'est attachée à garantir une **homogénéité dans les approches quel que soit le phénomène considéré**.

Dans le cadre du projet de cartographie communale, l'aléa est traduit à partir d'un croisement entre intensité et occurrence de phénomènes.

5.2 ALÉA DE RÉFÉRENCE

Selon le guide PPRn « Risques de mouvement de terrain » (1999) et, afin de prévoir au mieux le phénomène qui pourrait se produire et dont il faut protéger les populations et les biens concernés, il convient de déterminer l'aléa de référence (phénomène d'occurrence et d'intensité données servant de référence pour définir la cartographie) dans un secteur homogène donné.

Cet aléa est décrit conventionnellement comme le « plus fort événement historique connu dans le site, sauf si une analyse spécifique conduit à considérer comme vraisemblable à échéance centennale, ou plus en cas de danger humain, un événement de plus grande ampleur. ». Un événement exceptionnel d'occurrence géologique (type grand glissement de versant du Mont Mou) n'est par principe pas pris en considération. En Nouvelle-Calédonie, le recul temporel demeure relativement limité et à ce titre ce peut être le plus fort événement historique connu, d'un type donné, dans la zone considérée qui peut être tenu comme aléa de référence.

Il est traditionnellement retenu d'approcher l'aléa de référence au travers de scénarios dits « de référence ». Plusieurs scénarios de référence peuvent être proposés pour construire l'aléa de référence qui est évalué pour chaque grande zone de départ jugée homogène. Ces scénarios doivent spécifier en particulier **l'intensité des phénomènes** et les **conditions de propagation**.

Les phénomènes objet de cartes d'aléa sont issus de la typologie des mouvements définie :

- GG : Glissement dans matériaux grossiers
- GF : Glissement dans matériaux fins
- LT : Lave-torrentielle
- CB : Chute de blocs

Pour rappel les phénomènes de « Grand glissement de versant » (GGV) ne font pas l'objet de cartes d'aléa. Les phénomènes connus (actifs-latents ou dormants-stabilisés) sont reportés sur les cartes d'aléa produites.

L'aléa pour chaque phénomène est élaboré par croisement de matrice occurrence / intensité (Illustration 83). L'occurrence (spatiale et temporelle) est définie en intégrant rupture et propagation des phénomènes.

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

Illustration 83 – Principe de grille de qualification des aléas

5.3 MÉTHODE DÉPLOYÉE

5.3.1 INTENSITÉ

La notion d'intensité traduit l'importance du phénomène (volume mobilisé, dynamique, énergie...) et présume de ses conséquences (dommages, voir § 4.1.3). Dans le cadre du projet l'intensité est appréhendée de façon variable selon chaque type de phénomène considéré.

Pour les phénomènes de chute de bloc (CB), la classification MEZAP est retenue pour qualifier l'aléa de référence :

Indices d'intensité	Description	Indications sur les dommages
Très faible	Le volume unitaire pouvant se propager est inférieur ou égal à 50 litres (0,05 m ³)	Peu ou pas de dommage au gros œuvre, perturbation des activités humaines.
Faible	Le volume unitaire pouvant se propager est compris entre 50 et 250 litres (0,05 à 0,25 m ³)	Peu de dommage au gros œuvre, perturbation des activités humaines.
Moyen	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur ou égal à 0,25 m ³ mais inférieur ou égal à 1 m ³	Dommage au gros œuvre sans ruine. Intégrité structurelle sollicitée.
Fort	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur à 1 m ³ mais inférieur ou égal à 10 m ³	Dommage important au gros œuvre. Ruine probable. Intégrité structurelle remise en cause.
Très fort	Le volume unitaire pouvant se propager dépasse 10 m ³	Destruction du gros œuvre. Ruine certaine. Perte de toute intégrité structurelle

Illustration 84 – Echelle d'intensité retenue pour les chutes de blocs (CB)

Pour les autres phénomènes (LT, GG, GF) une approche en vitesses est privilégiée au regard des données effectivement accessibles pour les phénomènes à cartographier et sur la base des recommandations internationales :

Vitesse			Conséquences		Intensité	Phénomène NC
mm/s	typique	Qualification	Impacts	Réponse		
5000 =>	5 m/s	ER	Catastrophe majeure	-	Très élevée	LT
50 =>	3 m/min	TR	Structure détruite		Elevée	GG
0.5 =>	1,8 m/h	R	Structure détruite, possible évacuation	Evacuation	Modérée	GF
0.005 =>	13 m/mois	M	Qq structures résistent			
0.00005 =>	1,6 m/an	L	Possibles intervention travaux	Intervention		
0.0000005 =>	16 mm/an	TL	Structure peu endommagées			
		EL	Imperceptible	-		

ER.extrêmement rapide / TR.Très rapide / R.Rapide / M.Modérée / L.Lent / TL.Très lent / EL.extrêmement lent

Illustration 85 – Echelle d'intensité retenue pour GG, GF, LT

5.3.2 OCCURRENCE (OU ATTEINTE)

L'évaluation de l'occurrence (ou atteinte) intègre la rupture et la propagation. La rupture intègre une dimension temporelle alors que la propagation est indépendante du temps (une fois enclenché le mouvement se propage plus ou moins loin dans les versants). Les deux évaluations (rupture et propagation) sont donc menées séparément et de façon indépendantes.

5.3.2.1 Rupture

Afin d'aboutir à une analyse homogène, l'ensemble des aléas sont traités de façon homogène. Quelques spécificités sont néanmoins explicitées dans le § 5.4 (Cartographie par phénomène). Globalement la méthode déployée consiste à pondérer l'influence des facteurs permanents définis par la typologie de chaque type de phénomène. Ce travail s'appuie sur des visites de terrain et du traitement géomatique.

La méthode pour obtenir les cartes de rupture est divisée en quatre étapes :

- Etape 1 : intégration des événements (i.e. les points de localisation des glissements) dans le modèle ;
- Etape 2 : calcul de la relation statistique entre les variables à modéliser (VM, i.e. les événements) et les variables prédictives (VP, i.e. les facteurs de prédisposition) par une approche statistique bivariable appelée théorie de l'évidence (i.e. Weight of Evidence Bonham-Carter, 1994), après reclassement des variables à modéliser ;
- Etape 3 : analyse de sensibilité pour connaître quelles VM sont les plus influentes selon l'approche développée par Thiery et al. (2007). Pour chaque calcul, la carte est reclassée selon les seuils établis par le JTC-1⁸. Un test statistique de reconnaissance entre les

⁸ JTC-1 : Joint Technical Committee. Le comité technique joint (ISSMGE, ISRM, IAEG) sur « Landslides and Engineered Slopes » a préparé des directives cadrant les définitions et terminologies à utiliser sur le plan international ainsi que les descriptions des types et des niveaux de zonage de mouvements de terrain (ref. Fell et al., 2008)

classes de susceptibilité forte et moyenne est réalisé avec les évènements. Si le test d'une simulation numérique est inférieur au test de la simulation précédente la VM est rejetée, en cas inverse elle est acceptée. Ainsi le meilleur jeu de VM peut-être défini ;

- Etape 4 : classification des probabilités finales pour les meilleures simulations numériques selon les seuils établis par le JTC-1 ;

Pour l'analyse à l'échelle communale, après tests, les facteurs intégrés sont :

- SUBSTRAT : nature géologique du substratum rocheux ;
- FORM_SUP : nature lithologique des formations superficielles ;
- LANDFORM : paramètre intégrateur descriptif de paysages et de morphologies (versants, crêtes, talwegs, etc...) ;
- PENTE : pente des terrains évaluée à l'échelle des données topographiques valorisée.

La méthode déclinée est une **approche quantitative, statistique par méthode bivariée** (poids des évidences). L'approche bivariée par la théorie de l'évidence est une version log-linéaire du théorème général de Bayes utilisant les principes de calcul de probabilité fondés sur les notions de probabilité a priori et de probabilité a posteriori. Dans la cadre d'une analyse spatiale de la susceptibilité aux « mouvements de terrain », on exprime :

- La probabilité a priori (pprior), comme la probabilité qu'une unité de terrain (une cellule) contienne une variable à modéliser (VM, i.e. les 'mouvements de versant'). Elle est calculée suivant la densité de cellules sur la totalité du site d'étude ;
- La probabilité a posteriori (ppost) comme l'actualisation de la pprior. Elle est estimée après le calcul de la probabilité a priori selon la densité de VM pour chaque variable (ou classe de variable) considérée comme prédictive (VP, i.e. chaque facteur de prédisposition).

La méthode est fondée sur le calcul d'un poids positif (W^+) et d'un poids négatif (W^-), dont les valeurs dépendent de l'association entre la VM et la VP. Ces poids positifs et négatifs sont calculés selon les ratios des logarithmes naturels des côtes (odds), appelé aussi logit (une côte représentant la probabilité de présence sur la probabilité d'absence d'un phénomène), soit :

$$W^+ = \ln \frac{P(B | VM)}{P(\bar{B} | VM)}$$

$$W^- = \ln \frac{P(\bar{B} | VM)}{P(B | VM)}$$

où B est la classe de VP et le symbole ' _ ' représente l'absence de VP et/ou de VM.

Les calculs des valeurs de W^+ et de W^- , pour toutes les VP, permettent de calculer la probabilité a posteriori, qui additionnée à la probabilité a priori l'actualise. Lorsque plusieurs VP sont combinées, les secteurs ayant une pondération finale élevée ou faible correspondent respectivement à une plus grande ou une plus petite probabilité de présence de VM.

Les résultats (i.e. estimation des probabilités) sont largement dépendants du nombre et de la qualité des VM et de VP introduits initialement (Bonham-Carter, 1994) :

- Pour les VM, les probabilités seront basses si le site est caractérisé par un petit nombre de phénomènes. Dans ce cas, la faible certitude statistique des résultats oblige à les interpréter

avec une extrême prudence (Bonham-Carter, 1994 ; van den Eeckhaut et al., 2006). A l'inverse, si le site est couvert par un nombre 'raisonnable' de phénomènes (VM), alors les résultats seront statistiquement robustes et réalistes ;

- (ii) Pour les VP, outre un contrôle de leur qualité en amont du processus de calcul, il est possible d'en réduire leur nombre (ou le nombre de classes) lorsque celui-ci est trop grand en utilisant leurs pondérations, leur contraste, leur variance ou le contraste de leur variance. Cette réduction permet de réduire la variance des pondérations finales et d'obtenir des résultats plus fiables d'un point de vue statistique (Bonham-carter, 1994 ; Thiart et al., 2003).

Le calcul des probabilités de rupture pour chaque type de phénomène est réalisé avec 50% des événements (50% des cellules représentant les enveloppes de rupture) tirés aléatoirement sur un secteur de calage (exemple pour la 1^{ère} commune traitée sur l'illustration 86). La simulation est ensuite déclinée sur l'ensemble du territoire communal et le taux de reconnaissance des événements non inclus initialement évalué.

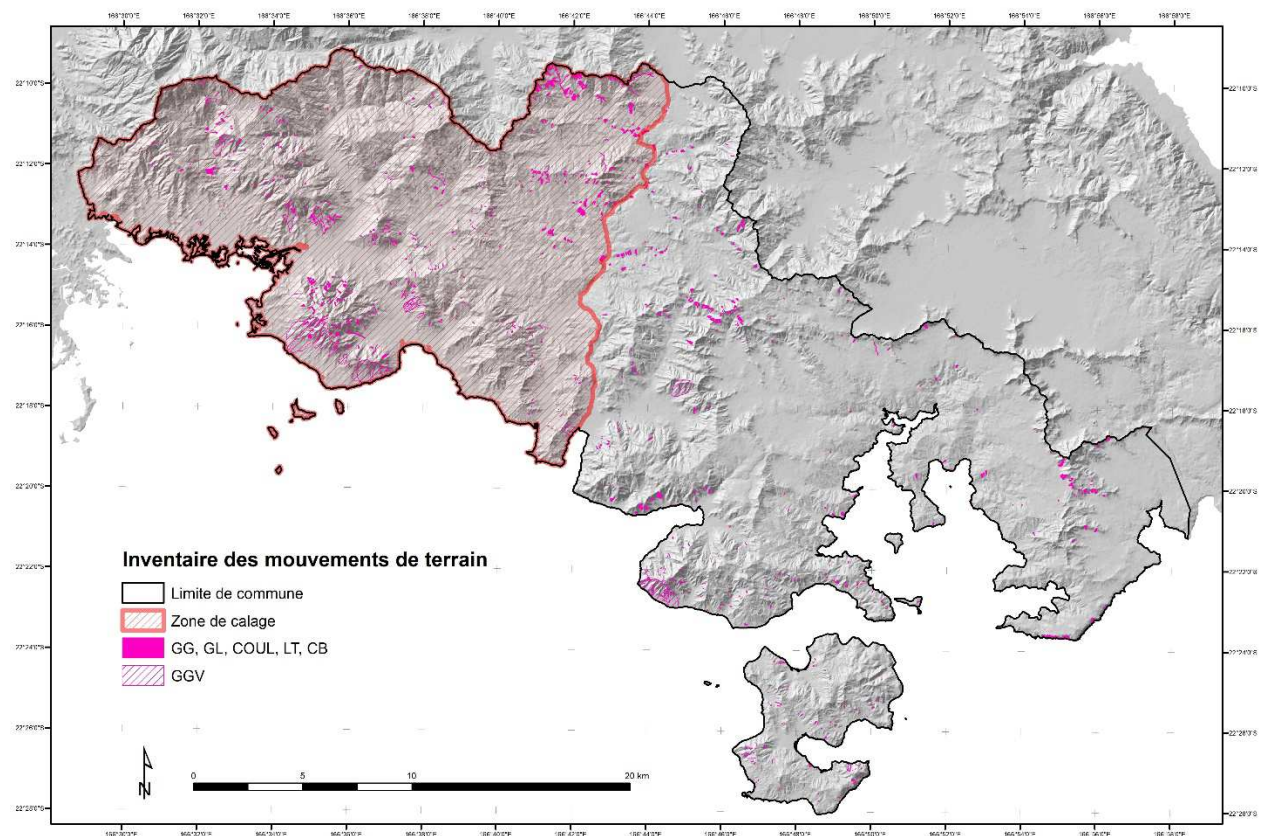


Illustration 86 – Exemple : zone de calage pour la commune du Mont-Dore

Au final la cartographie de la rupture est déclinée spatialement. Les coupures affichées et les différentes classes de probabilité de rupture sont appuyées sur les travaux du JTC-1 adaptées au programme (Illustration 87) :

Hazard descriptor	Rock falls from natural cliffs or rock cut slope Number/annum/km of cliff or rock cut slope	Slides of cuts and fills on roads or railways Number/annum/km of cut or fill	Small landslides on natural slopes Number/km ² /annum	Individual landslides on natural slopes Annual probability of active sliding	
Very high	>10	>10	>10	10^{-1}	Très fort
High	1 to 10	1 to 10	1 to 10	10^{-2}	Fort
Moderate	0.1 to 1	0.1 to 1	0.1 to 1	10^{-3} to 10^{-4}	Moyen
Low	0.01 to 0.1	0.01 to 0.1	0.01 to 0.1	10^{-5}	Faible
Very low	<0.01	<0.01	<0.01	< 10^{-6}	Très faible
				< 10^{-6}	Négligeable
				< 10^{-7}	Nul à négligeable

Illustration 87 – Recommandations pour les descriptifs pour le zonage d'aléa (JTC-1, Fell et al. 2008) et adaptation au projet

L'illustration 88 fournit un exemple de restitution à l'échelle du 1:25 000^{ème} sur la commune du Mont-Dore pour les chutes de blocs (CB) :

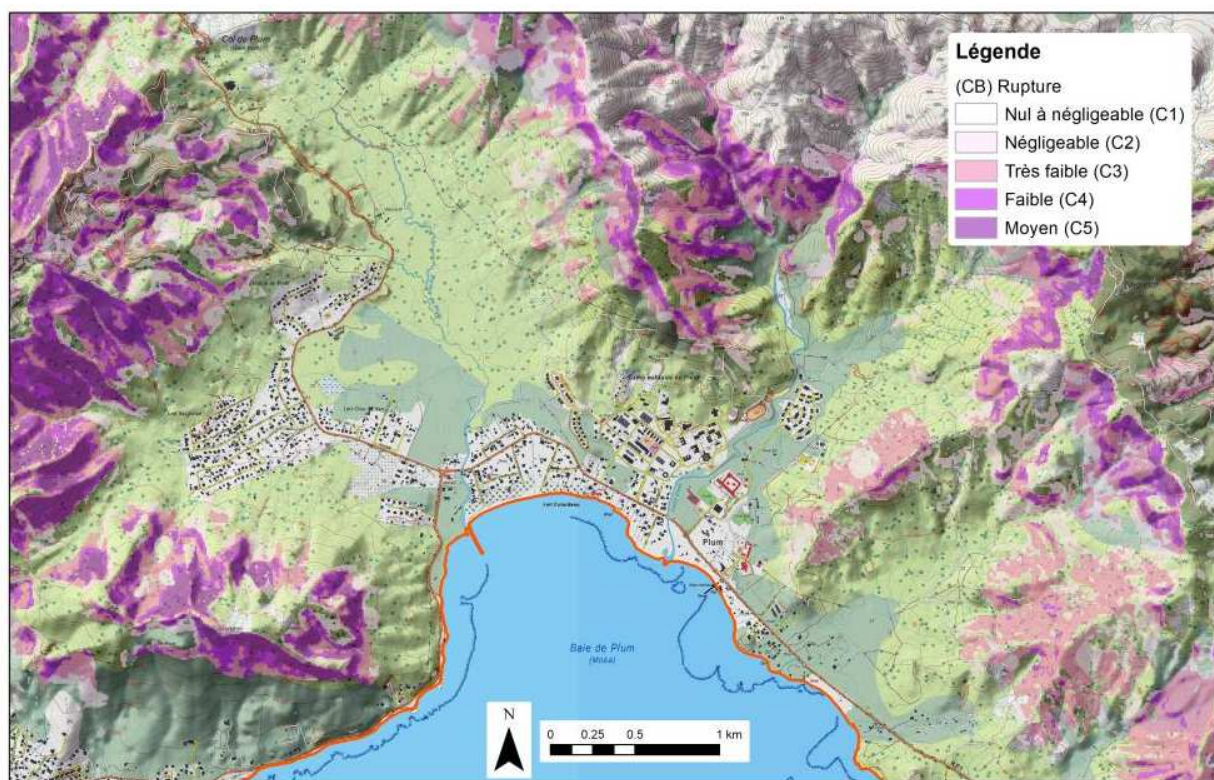


Illustration 88 – Aléa de rupture (CB), exemple de carte

5.3.2.2 Propagation

Pour la propagation des phénomènes les approches diffèrent selon les aléas. Le calage des modèles et les résultats par type de phénomène sont décrits en détail dans le § 5.4.

→ **GG (Glissements grossiers), GF (Glissements fins) et LT (Lave torrentielles et coulées)**

L'outil Flow-R (Flow path assessment of gravitational hazards at Regional scale, Horton et al., 2013) est utilisé dans le cadre de cette étude. Flow-R est un modèle empirique distribué pour l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements gravitaires. Il permet d'effectuer une délimitation automatique des zones sources, mais aussi et surtout une évaluation du périmètre d'atteinte basée sur le choix de différents algorithmes de propagations empiriques éprouvés aux échelles locales et régionales.

Flow-R est un modèle empirique spatialement distribué développé sous Matlab®. L'application du modèle nécessite deux étapes basées sur un modèle numérique d'élévation (DEM):

- les zones sources sont d'abord identifiées. Cette étape est menée distinctement de Flow-R pour chaque aléa (§ 5.3.2.1 Rupture) ;
- les flux de débris sont propagés à partir de ces sources sur la base de lois de frottement et les algorithmes de direction d'écoulement. Le volume d'écoulement des débris, et de fait les hauteurs des masses propagées) ne sont pas évaluées.

Le paramétrage est empirique, basé sur des rétro-calage d'évènement passés, selon le type de phénomène à cartographier. Les différents aléas sont modélisés séparément. Le modèle définit des valeurs normalisées ou absolues pour les zones sources initiales. Ces valeurs sont ensuite propagées et représentent une notion de poids relatif de l'aléa. Une fois normalisées, les valeurs ne dépassent jamais 1, et se rapprochent ainsi d'une notion de probabilité spatiale.

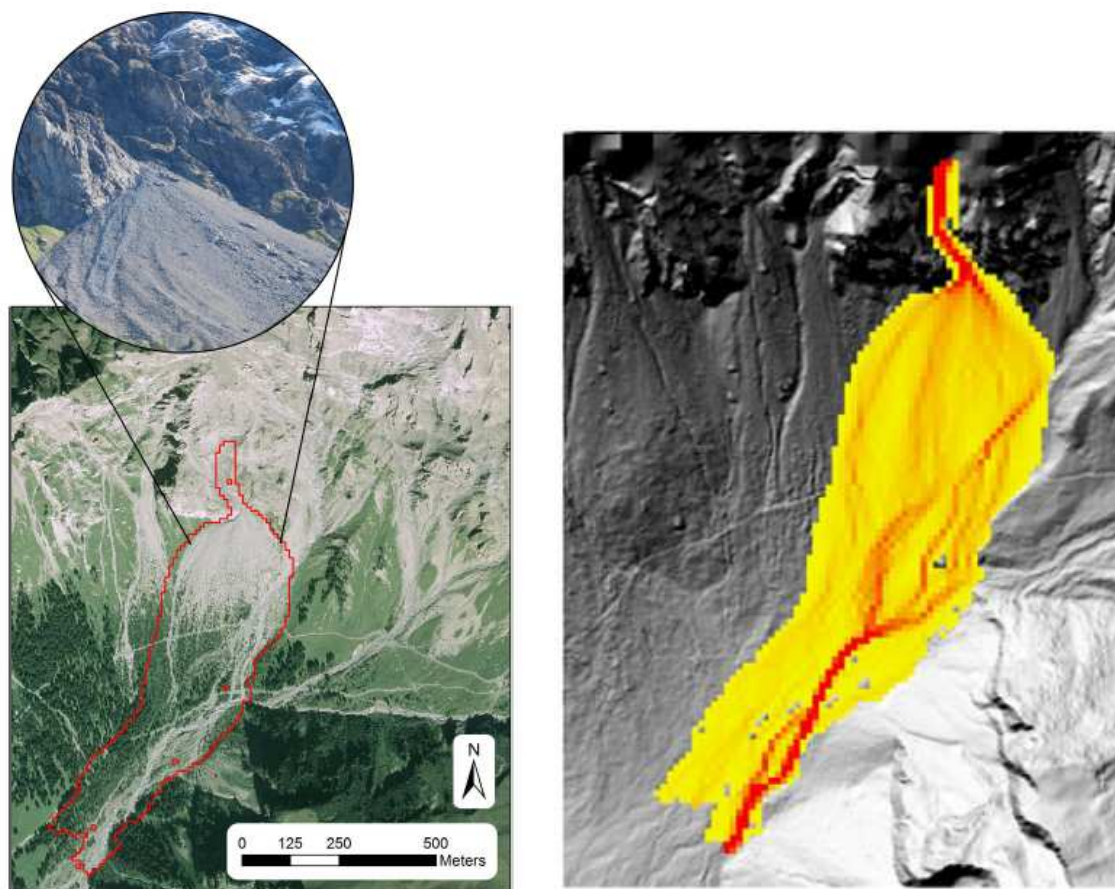


Illustration 89 – Exemple de modélisation DEM 10 m (Solalex, Suisse, extrait Horton et al, 2013)

→ CB (chutes de blocs)

La propagation est évaluée à partir de l'application de la méthode dite de la ligne d'énergie déclinée en 3D à l'appui du logiciel ConeFall.

La méthode de la ligne d'énergie trouve son fondement scientifique dans les phénomènes de grande ampleur. En effet, elle assimile la phase de propagation des blocs à une phase de glissement sur un plan et permet d'obtenir l'extension du phénomène (distance de propagation). Il a cependant été observé que, dans le cas de chutes isolées, elle donne des résultats probants. A ce titre, la Norvège, la Bavière, l'Australie, la Slovénie et l'Autriche ont utilisé cette méthode pour la réalisation de cartes de susceptibilité.

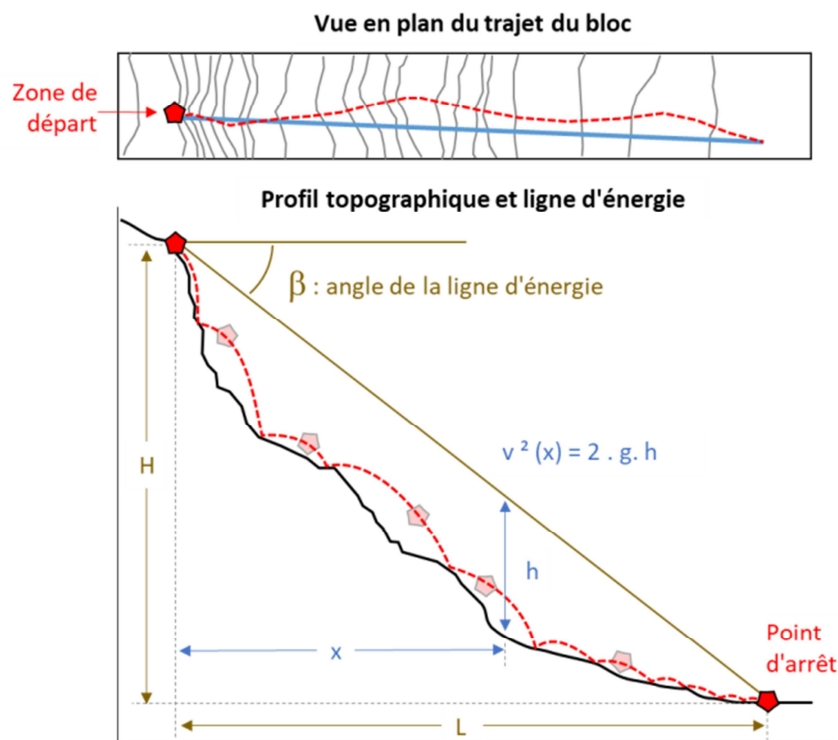


Illustration 90 – Principe de la ligne d'énergie (angle d'atteinte β)

Les retours d'expérience de plusieurs centaines d'éboulements rocheux montrent que les angles de ligne d'énergie correspondant à des chutes de blocs isolés sont quasi systématiquement supérieurs à 22-26°. Dans des contextes morphologiques particuliers tels que des parois rocheuses au droit de zone de plaine, ces valeurs peuvent atteindre voire dépasser 45°.

La méthode développée par Heim en 1932 repose sur un principe simple et trivial: un bloc ne peut progresser sur une pente que si celle-ci est suffisamment raide. Ainsi, si la pente est supérieure à un angle limite β , il accélère. Si elle est inférieure à β , il ralentit. En partant de ce constat, un bloc peut aller d'une zone de départ A jusqu'à B, point d'intersection du relief avec une ligne imaginaire partant de la zone de départ et formant un angle β avec l'horizontale (Illustration 90). Cette ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β , l'angle de la ligne d'énergie.

A partir du profil en long de la pente à partir d'une zone de départ, on peut alors, si on connaît la valeur de l'angle β , déterminer le point maximal probable qu'atteindra tout projectile qui se détachera de la zone de départ.

Compte tenu de la possibilité de déviation des trajectoires des blocs que ce soit à cause de leur forme ou des obstacles rencontrés, ils peuvent donc progresser dans un cône, appelé cône de propagation. Ce cône a une pente β et son sommet est placé au niveau de la zone de départ. En ce qui concerne la valeur de l'angle du cône de déviation, celle-ci dépend de la configuration topographique du versant étudié. La valeur la plus communément utilisée est de l'ordre de 30°.

L'outil ConeFall (Labieuse et al., 2011) permet de cartographier l'extension prévisible des cônes de propagation et donc des atteintes probables, selon le choix de valeurs d'angle d'énergie (Illustration 91).

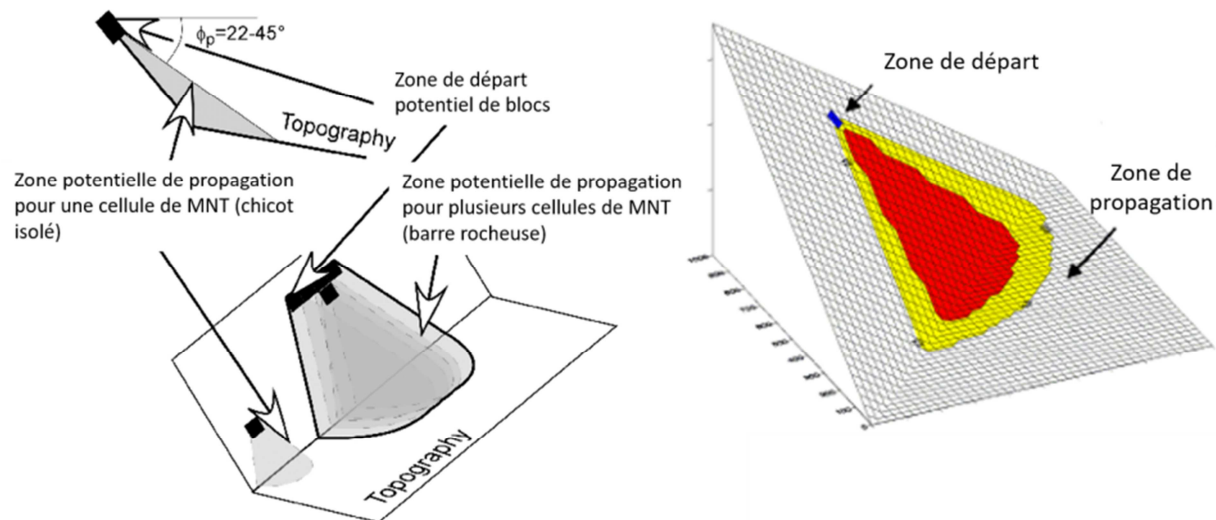


Illustration 91 – Représentation de la zone de propagation rocheuse concernée dans le versant en fonction de l'angle d'énergie choisi (Sources : Modifié d'après Jaboyedoff M. et Labieuse V., (2011) à gauche et Conefall à droite)

Le modèle de la ligne d'énergie permet également de calculer la vitesse des blocs le long du profil (enveloppe) à partir de la différence de hauteur h entre la ligne d'énergie et le profil. La formule de calcul est la suivante :

$$V = (2 \cdot g \cdot h)^{1/2} \quad (g = 9.8 \text{ m/s}^2)$$

Il existe une vitesse maximum que le bloc ne peut pas dépasser. D'après Dorren et al. (2005), cette vitesse maximum (m/s) est calculée selon la formule suivante :

$$V_{\max} \text{ (m/s)} = 0.8 \cdot \text{pente (pente en degrés)}$$

5.3.2.3 Occurrence (ou atteinte)

En théorie, l'atteinte est calculée en considérant pour une source unique que la probabilité d'atteinte en un point est le produit de la probabilité de rupture et de la probabilité de propagation. Dans le cas où plusieurs zones sources sont concernées, la probabilité d'atteinte est définie comme la somme des probabilités indépendantes calculées pour chaque zone source.

Dans le cadre du projet, de façon simplifiée, la qualification de l'atteinte repose sur une matrice croisant rupture et propagation (multiplication des probabilités).

Le passage d'une donnée quantifiée (probabilité) à une qualification de l'atteinte est menée en suivant les recommandations internationales du JTC-1 (Fell et al. 2008) en s'appuyant sur la probabilité annuelle de déclenchement selon l'approche de l'illustration 87 (illustration 92) :

		Probabilité annuelle d'occurrence	Qualification de l'activité sur 100 ans (période de référence)
Probabilité de rupture (et d'atteinte)	Nul à négligeable	$< 10^{-7}$	Improbable moins d'une "chance" sur 100 000
	Négligeable	10^{-7} à 10^{-6}	Très incertaine moins d'une "chance" sur 10 000
	Très faible	10^{-6} à 10^{-5}	Incertaine jusqu'à 1 "chance" sur 1 000
	Faible	10^{-5} à 10^{-4}	Peu probable jusqu'à 1 "chance" sur 100
	Moyen	10^{-4} à 10^{-3}	Possible jusqu'à 1 "chance" sur 10
	Elevée	10^{-3} à 10^{-2}	Probable > 1 "chance" sur 10
	Très élevée	$> 10^{-2}$	Certaine phénomène attendu

illustration 92 – Classes retenues pour la qualification de l'occurrence des phénomènes (rupture et/ou atteinte)

Sur cette base une matrice qualifiant l'occurrence (atteinte), **commune à tous les aléas** est proposée (Illustration 93) :

		Probabilité de propagation						
Probabilité annuelle de rupture		Négligeable	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte	
		10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1
Très faible	10^{-6}	1E-11	1E-10	1E-09	1E-08	1E-07	1E-06	1E-05
		Nul à négligeable					Négligeable	Très faible
Faible	10^{-5}	1E-10	1E-09	1E-08	1E-07	1E-06	1E-05	1E-04
		Nul à négligeable				Négligeable	Très faible	Faible
Moyen	10^{-4}	1E-09	1E-08	1E-07	1E-06	1E-05	1E-04	1E-03
		Nul à négligeable			Négligeable	Très faible	Faible	Moyen
Fort	10^{-3}	1E-08	1E-07	1E-06	1E-05	1E-04	1E-03	1E-02
		Nul à négligeable		Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort
Très fort	10^{-2}	1E-07	1E-06	1E-05	1E-04	1E-03	1E-02	1E-01
		Nul à négligeable	Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort
Très Fort	10^{-1}	1E-06	1E-05	1E-04	1E-03	1E-02	1E-01	1E+00
		Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort	

Illustration 93 – Matrice d'atteinte croisant rupture et propagation des aléas

5.3.3 ALÉA RÉSULTANT

L'aléa résultant par phénomène est élaboré par croisement de matrice occurrence / intensité. La **matrice de croisement est homogène quel que soit le phénomène considéré** afin de garder une cohérence entre les approches. Les classes pour qualifier les atteintes sont celle définies pour la rupture (Illustration 87). L'évaluation de l'intensité des phénomènes varie selon le type (Illustration 84 et Illustration 85) :

		Intensité				
		Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Probabilité d'atteinte	Négligeable 10-6	Négligeable	Négligeable	Très faible	Faible	Faible
	Très faible 10-5	Négligeable	Très faible	Faible	Modéré	Modéré
	Faible 10-4	Négligeable	Faible	Modéré	Elevée	Elevée
	Moyen 10-3	Très faible	Modéré	Modéré	Elevée	Elevée
	Elevée 10-2	Faible	Modéré	Elevée	Elevée	Très élevée
	Très élevée	Faible	Modéré	Elevée	Très élevée	Très élevée

Illustration 94 – Matrice d'aléa, principe général

5.4 CARTOGRAPHIE PAR PHÉNOMÈNE

- ▀ Ce chapitre a vocation à être amendé au fil du temps en fonction des mouvements effectivement répertoriés au cours du programme de cartographie des aléas gravitaires.

5.4.1 MÉTHODE DE TRAITEMENT

5.4.1.1 Glissements grossiers (GG)

➔ Intensité de phénomène

L'intensité des phénomènes est appréhendée à partir des vitesses estimées des phénomènes et de leur pouvoir destructeur (illustration 41). Les glissements grossiers sont qualifiés avec un niveau d'intensité « Elevée », correspondant à des vitesses de quelques mètres par minute à 5 m/s. Il s'agit là du phénomène de référence, redouté dans la période de 100 ans (Illustration 85).

➔ Occurrence (ou atteinte)

La qualification de la probabilité annuelle de rupture est menée prioritairement à partir de l'analyse statistique comme présentée § 5.3.2.1 (Rupture). Cette analyse permet de spatialiser selon les faciès et les contextes morphologiques, la susceptibilité à la rupture. Compte tenu des données nombreuses d'inventaire pour ce phénomène on considère que les probabilités spatio-temporelles caractérisent l'aléa de façon pertinente.

La propagation des phénomènes est évaluée à partir de l'outil de modélisation FLOW-R en se calant sur les événements acquis lors de l'inventaire. Les paramètres de calage de l'outil sont :

- La ligne d'énergie, évaluée à partir des retours d'expérience des événements cartographiés (Illustration 95) ;
- La vitesse présumée des mouvements (# 5 m/s au maximum) ;
- Le mode de dispersion latérale définie suivant des modèles d'étalement.

Pour la 1^{ère} commune traitée du Mont-Dore, la distribution des valeurs de ligne d'énergie calculées pour les données d'inventaire est valorisée pour paramétrer le modèle :

Données statistiques	Valeur d'angle de ligne d'énergie
Nb. d'observations	1208
Minimum	4.6
Maximum	51.9
1er Quartile (25%)	16.9
Médiane (50%)	23.2
3ème Quartile (75%)	31.5
Moyenne	24.2

Illustration 95 – Distribution des valeurs d'angle de ligne d'énergie pour les GG (commune du Mont-Dore)

Le choix des angles d'énergie qualifiant les différentes classes de propagation est établi à partir des retours d'expérience des événements passés. Globalement il est retenu, après tests sur la reconnaissance des phénomènes effectivement observés :

- les coupures aux quantiles à 25% et 50% pour définir les propagations « fortes » et « très fortes »,
- les coupures aux quantiles à 5% et 10% pour définir les propagations « moyennes » et « faible à très faible ».

Probabilité annuelle de rupture	Probabilité de propagation						
	Négligeable	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte	
	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
Très faible	Nul à négligeable					Négligeable	Très faible
Faible	Nul à négligeable				Négligeable	Très faible	Faible
Moyen	Nul à négligeable			Négligeable	Très faible	Faible	Moyen
Fort	Nul à négligeable		Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort
Très fort	Nul à négligeable	Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort
Très fort	Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort	Très fort
	1						
Valeurs d'angle de la ligne d'énergies pour FLOW-R selon probabilité de propagation			10°	13°	17°	23°	
Propagations calculées pour les ruptures spatiales qualifiées de "moyenne" à "très forte"							

Illustration 96 – Qualification des atteintes (glissement grossiers GG)

Les choix de valeurs d'angles seront a priori adaptés à chaque commune en fonction des évènements effectivement répertoriés.

→ Aléa

L'aléa est évalué à partir de la matrice générique de l'illustration 97 en appliquant l'intensité des phénomènes de référence retenue :

		Intensité					
		Extrêmement lent	Très lent qq mm/an	Lent à rapide # qq m/jour	Très rapide # qq m/min	Extrêmement rapide	
		Très faible 16 mm/an	Faible 1.6 m/an	Moyenne 3 m/min	Elevée 5 m/s	Très élevée	
Probabilité d'atteinte	Négligeable 10-6	Négligeable	Négligeable	Très faible	Faible	Faible	
	Très faible 10-5	Négligeable	Très faible	Faible	Modéré	Modéré	
	Faible 10-4	Négligeable	Faible	Modéré	Elevée	Elevée	
	Moyen 10-3	Très faible	Modéré	Modéré	Elevée	Elevée	
	Elevée 10-2	Faible	Modéré	Elevée	Elevée	Très élevée	
	Très élevée	Faible	Modéré	Elevée	Très élevée	Très élevée	
				GF	GG	LT	

Illustration 97 – Matrice de l'aléa pour glissement grossier (GG), glissement fin (GF) et laves torrentielles (LT)

5.4.1.2 Glissements fins (GF)

→ Intensité de phénomène

L'intensité des phénomènes est appréhendée à partir des vitesses estimées des phénomènes et de leur pouvoir destructeur (illustration 41). Les glissements fins sont qualifiés avec un niveau d'intensité « Moyenne » (Illustration 85), correspondant à des vitesses pouvant atteindre quelques mètres par minute. Il s'agit là du phénomène de référence, redouté dans la période de 100 ans.

→ Occurrence (ou atteinte)

La qualification de la probabilité annuelle de rupture est menée prioritairement à partir de l'analyse statistique comme présentée § 5.3.2.1 (Rupture). Cette analyse permet de spatialiser selon les faciès et les contextes morphologiques, la susceptibilité à la rupture. Compte tenu des données nombreuses d'inventaire pour ce phénomène on considère que les probabilités spatio-temporelles caractérisent l'aléa de façon pertinente.

La propagation des phénomènes est évaluée à partir de l'outil de modélisation FLOW-R en se calant sur les évènements acquis lors de l'inventaire. Les paramètres de calage de l'outil sont :

- La ligne d'énergie, évaluée à partir des retours d'expérience des évènements cartographiés (Illustration 98) ;
- La vitesse présumée des mouvements (# 0,5 m/s au maximum) ;
- Le mode de dispersion latérale définie suivant des modèles d'étalement.

Pour la 1^{ère} commune traitée du Mont-Dore, la distribution des valeurs de ligne d'énergie calculées pour les données d'inventaire est valorisée pour paramétrer le modèle :

Données statistiques	Valeur d'angle de ligne d'énergie
Nb. d'observations	236
Minimum	2.4
Maximum	37.9
1er Quartile (25%)	11.4
Médiane (50%)	14.6
3ème Quartile (75%)	20.8
Moyenne	15.8

Illustration 98 – Distribution des valeurs d'angle de ligne d'énergie pour les GF (commune du Mont-Dore)

Le choix des angles d'énergie qualifiant les différentes classes de propagation sont établies à partir des retours d'expérience des événements passés. Globalement il est retenu, après tests sur la reconnaissance des phénomènes effectivement observés :

- les coupures aux quantiles à 25% et 50% pour définir les propagations « fortes » et « très fortes »,
- les coupures aux quantiles à 5% et 10% pour définir les propagations « moyennes » et « faible à très faible ».

Probabilité annuelle de rupture	Probabilité de propagation						
	Négligeable	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte	
	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
Très faible	Nul à négligeable					Négligeable	Très faible
Faible	Nul à négligeable				Négligeable	Très faible	Faible
Moyen	Nul à négligeable			Négligeable	Très faible	Faible	Moyen
Fort	Nul à négligeable		Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort
Très fort	Nul à négligeable	Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort
Très fort	Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort	Très fort
	1						
Valeurs d'angle de la ligne d'énergies pour FLOW-R selon probabilité de propagation			7°	9°	12°		15°
Propagations calculées pour les ruptures spatiales qualifiées de "moyenne" à "très forte"							

Illustration 99 – Qualification des atteintes (glissement fins GF)

Les choix de valeurs d'angles seront a priori adaptés à chaque commune en fonction des évènements effectivement répertoriés.

→ Aléa

L'aléa est évalué à partir de la matrice générique de l'illustration 97 en appliquant l'intensité des phénomènes de référence retenue.

5.4.1.3 Chutes de blocs (CB)

→ Intensité de phénomène

L'intensité des phénomènes est appréhendée à partir des volumes mis en jeu (Illustration 84). En 1^{ère} approche il est considéré des volumes jugés représentatifs inférieurs à 1 m³ (classe 0,25-1 m³) pour qualifier l'intensité des phénomènes de chute de blocs (intensité « moyenne »). Dans certains contextes difficilement isolables à l'échelle du 1:25 000^{ème}, des volumes supérieurs peuvent être observés en contexte de massif péridotitique (péridotites saines) ou pour certaines formations spécifiques (listvénites par exemple). Le parti pris de considérer une intensité « moyenne » pour l'ensemble des faciès susceptibles relève essentiellement du manque de données quantifiées à l'échelle communale. L'enrichissement des inventaires dans le future et/ou le développement d'approches expertes pourrait moduler cette approche ultérieurement.

→ Occurrence (ou atteinte)

La qualification de la probabilité annuelle de rupture est menée prioritairement à partir de l'analyse statistique comme présentée § 5.3.2.1 (Rupture). Cette analyse permet de spatialiser selon les faciès et les contextes morphologiques, la susceptibilité à la rupture. Cette approche est complétée par une analyse experte en tenant compte du fait que, pour des raisons de méthode d'inventaire (sur photographies aériennes), l'inventaire n'est pas exhaustif pour les phénomènes de taille inférieure à 100 m³, alors même que des chutes de blocs isolées ou les éboulements de taille modeste sont reconnus comme largement prégnants sur le territoire (berges rocheuses de creeks, barres rocheuses dans les massifs péridotitiques).

De façon expert on évalue **dans les zones les plus susceptibles** spatialement cartographiées des départs potentiels entre 1 et 10 évènements / 10 km² / an ce qui correspond à une probabilité de rupture de niveau « moyen » (ceci correspond à environ 1 évènement pour 100 ans par hectare). On considère ainsi que, globalement, chaque zone de départ identifiée fournira au moins un éboulement dans la période de référence (de 100 ans). Les autres classes sont qualifiées en fonction par décroissance du niveau de rupture.

La propagation des phénomènes est évaluée à partir de la méthode de la ligne d'énergie. Les retours d'expérience de chutes de blocs dans différents contextes montrent des atteintes qualifiées de fortes pour des valeurs d'angle de la ligne d'énergie de 38 à 40° dans le cas de parois très redressées avec terrain plat ou peu pentu en pied, ou de 32 à 33° pour des configurations plus propices aux propagations à l'aval (travaux MEZAP).

La pauvreté relative de l'inventaire sur la 1^{ère} commune traitée (Mont-Dore) ne permet pas de valoriser la donnée événementielle pour qualifier la propagation (36 évènements discriminant emprises de rupture et de propagation). En conséquence il est retenu de calquer les emprises

de propagation sur les valeurs usuelles retenues pour la cartographie en contexte montagneux en hiérarchisant de la façon suivante la probabilité de propagation :

Probabilité de propagation	Valeurs d'angle d'énergie
Très forte	$\beta > 35$ à 38°
Forte	$32^\circ < \beta < 35^\circ$
Moyenne	$30^\circ < \beta < 32^\circ$
Faible à très faible	$28^\circ < \beta < 30^\circ$
Négligeable	$\beta < 28^\circ$

Illustration 100 – Valeurs d'angle d'énergie selon les atteintes

Ces valeurs s'inscrivent dans les quantiles entre 25 et 50% des données observées – qualifiant principalement des éboulements en masse dont les propagations peuvent être plus lointaines que celles de blocs isolés. La matrice de qualification des atteintes, basée sur celle générique exposée § 5.3.2.3 est présentée ci-dessous :

		Probabilité de propagation					
Probabilité annuelle de rupture		Négligeable	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
		10^{-6}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
Très faible	10^{-6}	Nul à négligeable					Négligeable
Faible	10^{-5}	Nul à négligeable				Négligeable	Très faible
Moyen	10^{-4}	Nul à négligeable			Négligeable	Très faible	Faible
Fort	10^{-3}	Nul à négligeable		Négligeable	Très faible	Faible	Moyen
Très fort	10^{-2}	Nul à négligeable	Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort
Très fort	10^{-1}	Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort
Très fort	1	Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort
Valeurs d'angle de la ligne d'énergies selon probabilité de propagation			28°	30°	32°	35°	38°
Propagations calculées pour les ruptures qualifiées de "faible" à "très forte"							

Illustration 101 – Qualification des atteintes (chute de blocs CB)

→ Aléa

L'aléa est évalué à partir de la matrice générique de l'illustration 102 en appliquant l'intensité des phénomènes de référence retenue :

		Intensité					
		Pierres	Petits blocs	Blocs	Gros blocs	Très gros bloc	
		Très faible 0.05 m ³	Faible 0.25 m ³	Moyenne 1 m ³	Elevée 10 m ³	Très élevée	
Probabilité d'atteinte	Négligeable 10 ⁻⁶	Négligeable	Négligeable	Très faible	Faible	Faible	
	Très faible 10 ⁻⁵	Négligeable	Très faible	Faible	Modéré	Modéré	
	Faible 10 ⁻⁴	Négligeable	Faible	Modéré	Elevée	Elevée	
	Moyen 10 ⁻³	Très faible	Modéré	Modéré	Elevée	Elevée	
	Elevée 10 ⁻²	Faible	Modéré	Elevée	Elevée	Très élevée	
	Très élevée	Faible	Modéré	Elevée	Très élevée	Très élevée	

CB

Illustration 102 – Matrice d'aléa pour phénomène de chute de bloc (CB)

5.4.1.4 Laves torrentielles (LT)

→ Intensité de phénomène

L'intensité des phénomènes est appréhendée à partir des vitesses estimées des phénomènes et de leur pouvoir destructeur (illustration 41). Les laves torrentielles fins sont qualifiés avec un niveau d'intensité « très élevée » (Illustration 85), correspondant à des vitesses très rapides, supérieures à 5 m/s. Il s'agit là du phénomène de référence, redouté dans la période de 100 ans.

→ Occurrence (ou atteinte)

La qualification de la probabilité annuelle de rupture est menée prioritairement à partir de l'analyse statistique comme présentée § 5.3.2.1 (Rupture). Cette analyse permet de spatialiser selon les faciès et les contextes morphologiques, la susceptibilité à la rupture. Compte tenu des données nombreuses d'inventaire pour ce phénomène on considère que les probabilités spatio-temporelles caractérisent l'aléa de façon pertinente.

La propagation des phénomènes est évaluée à partir de l'outil de modélisation FLOW-R en se calant sur les événements acquis lors de l'inventaire. Les paramètres de calage de l'outil sont :

- La ligne d'énergie, évaluée à partir des retours d'expérience des événements cartographiés (Illustration 95) ;
- La vitesse présumée des mouvements (# 5 m/s) ;
- Le mode de dispersion latérale définie suivant des modèles d'étalement.

Pour la 1^{ère} commune traitée du Mont-Dore, la distribution des valeurs de ligne d'énergie calculées pour les données d'inventaire est valorisée pour paramétrer le modèle :

Données statistiques	Valeur d'angle de ligne d'énergie
Nb. d'observations	68
Minimum	6.3
Maximum	35.8
1er Quartile (25%)	17.3
Médiane (50%)	23.8
3ème Quartile (75%)	28.9
Moyenne	23.0

Illustration 103 – Distribution des valeurs d'angle de ligne d'énergie pour les LT (commune du Mont-Dore)

Pour les laves torrentielles, les résultats de l'outil FLOW-R sont directement valorisés pour évaluer les probabilités de propagation. Le choix de l'angle d'énergie utilisé pour le calage est celui correspondant au quantile à 5% (95% des événements en deçà de cette atteinte). La gradation des atteintes est appréhendée par le modèle qui restitue fidèlement les propagations de type « écoulement ».

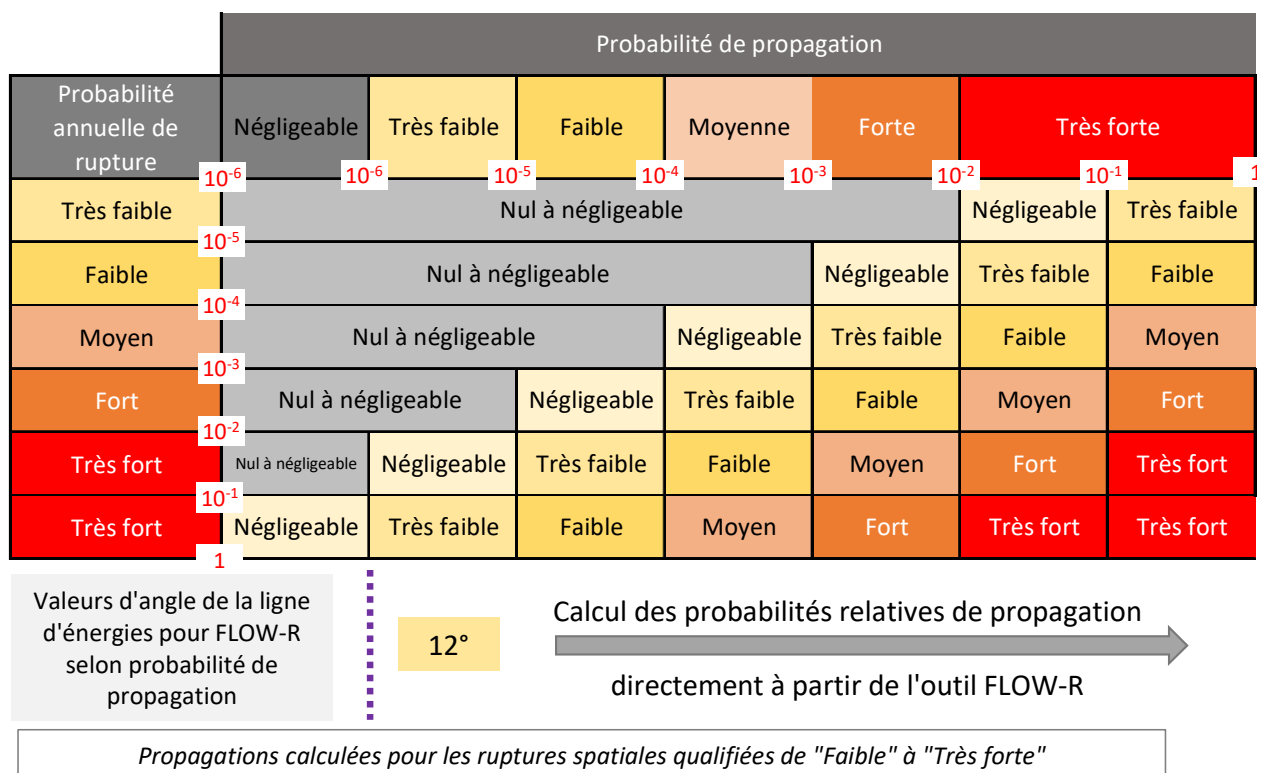


Illustration 104 – Qualification des atteintes (laves torrentielles LT)

Le choix de la valeur d'angle sera a priori adapté à chaque commune en fonction des événements effectivement répertoriés.

L'annexe 3 rassemble pour chacune des communes traitées :

- Les résultats de l'analyse statistique par phénomène pour la rupture (poids relatifs des variables dans l'analyse) ;
- Les paramètres valorisés pour l'évaluation des propagations :
 - o Calages FLOW-R
 - o Valeurs de la ligne d'énergie pour les éboulements rocheux

■ *Cette annexe a vocation à être amendée au fil du temps en fonction des communes traitées*

5.4.2 VALIDATION DES MÉTHODES ET DES RÉSULTATS, CORRECTION ÉVENTUELLES

La validation des cartographies par type de phénomène s'effectue à l'avancement de l'analyse par rétro-analyse sur les données collectées, densité par faciès, occurrences, taux de reconnaissance, ... et en fonction de l'expertise et essentiellement par comparaison qualitative avec la connaissance actuelle de l'aléa « mouvement de terrain » au niveau des documents d'information existants et par visite de terrain (SGNC).

En fonction de ces analyses, des corrections éventuelles soit par évolution des méthodes d'analyses ou de traitement SIG, soit par modification locale sont apportées.

5.4.3 CARTES D'ALÉA PAR PHÉNOMÈNE

■ *Ce chapitre a vocation à être amendé au fil du temps en fonction des mouvements effectivement répertoriés au cours du programme et de l'avancement des communes traitées*

Les cartes finales sont fournies pour les quatre phénomènes au format SIG (raster ©ArcGis). La table attributaire du fichier SIG fournit en tout point du territoire communal les données relatives aux aléas (Illustration 105).

La codification retenue est la suivante :

- 0 : Nul à négligeable
- 1 : Très faible
- 2 : Faible
- 3 : Moyen
- 4 : Elevé

Rowid	COUNT	CB	GF	GG	LT	LIBELLE	ALEA
0	2311972	0	0	0	0	NEANT	0
1	987	1	0	0	0	CB	1
2	359	2	0	0	0	CB	2
3	21	3	0	0	0	CB	3
4	21086	0	1	0	0	GF	1
5	1301	1	1	0	0	CB, GF	1
6	8	2	1	0	0	CB	2
7	4	3	1	0	0	CB	3

Illustration 105 – Table attributaire qualifiant les aléas par phénomène et global pour chaque cellule du raster SIG

Sur cette base, les cartes d'aléa par phénomène et pour l'ensemble des phénomènes peuvent être formalisées. L'illustration 107 présente la carte d'aléa « Glissement grossier » à l'échelle communale (échelle environ du 1 :150 000^{ème}) et l'illustration 108 à l'échelle du 1:25 000^{ème}.

5.5 CARTE D'ALÉA MOUVEMENT DE TERRAIN – SYNTHÈSE

Afin d'obtenir une carte d'aléa « Mouvement de terrain », une agrégation des aléas est proposée en retenant en tout point du territoire cartographié le niveau d'aléa maximal considéré, en gardant en mémoire l'(les) aléa(s) au(x)quel(s) il réfère.

Les illustrations 109 et 110 présentent les cartes d'aléa « Mouvement de terrain » à l'échelle communale (échelle environ du 1 :150 000^{ème}) et à l'échelle du 1 :25 000^{ème}.

Les restitutions des cartes sont réalisées sous forme d'atlas au format A3, à l'échelle du 1 :25 000^{ème} potentiellement déclinables pour tous les phénomènes.

Pour chaque commune traitée sont rappelées :

- les surfaces communales exposées aux différents aléas (exprimées en valeur absolue et en pourcentage) selon les classes qualifiées ;
- les surfaces communales exposées à l'aléa mouvement de terrain tel que défini (exprimées en valeur absolue et en pourcentage).

Surfaces exposées (km²)

		GG	GF	LT	CB	ALEA MVT
Aléa (km²)	Nul à négligeable	260.3	311.1	376.2	478.5	231.2
	Très faible	152.6	98.9	107.6	55.0	121.6
	Faible	114.5	217.3	85.3	47.0	143.6
	Modéré	104.0	4.0	36.3	50.8	108.9
	Elevé	-	-	26.0	-	26.0
	Total "Aléa"	371.0	320.2	255.2	152.8	400.1

Surfaces exposées (% de la surface communale)

		GG	GF	LT	CB	ALEA MVT
Aléa (% commune)	Nul à négligeable	41%	49%	60%	76%	37%
	Très faible	24%	16%	17%	9%	19%
	Faible	18%	34%	14%	7%	23%
	Modéré	16%	1%	6%	8%	17%
	Elevé	-	-	4%	-	4%
	Total "Aléa"	59%	51%	40%	24%	63%

Illustration 106 – Synthèse des aléas par commune (ex. commune du Mont-Dore)

- Cette synthèse a vocation à être amendée au fil du temps en fonction des communes traitées.

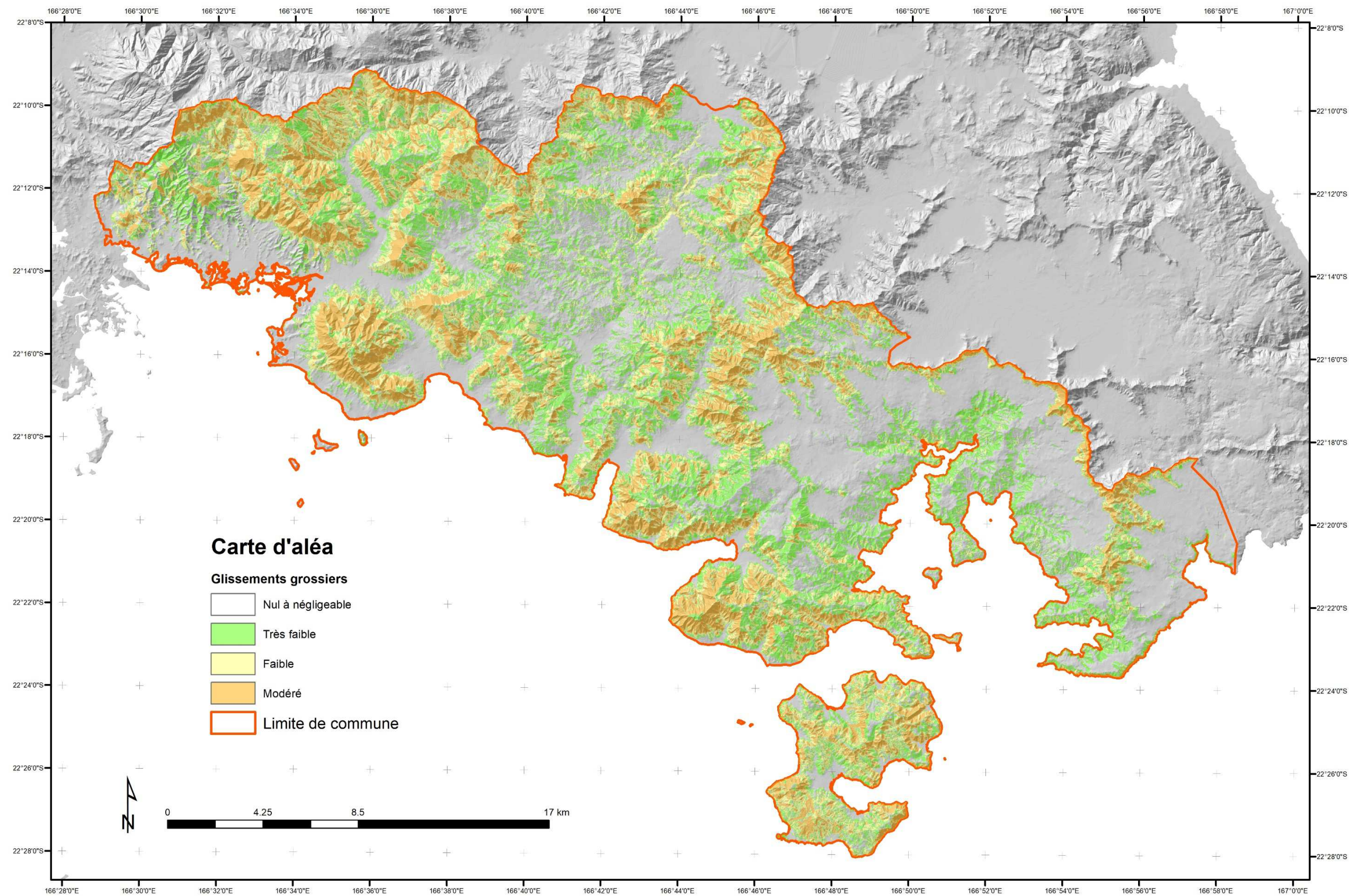


Illustration 107 – Exemple de restitution à l'échelle communale (aléa « Glissement grossier »)

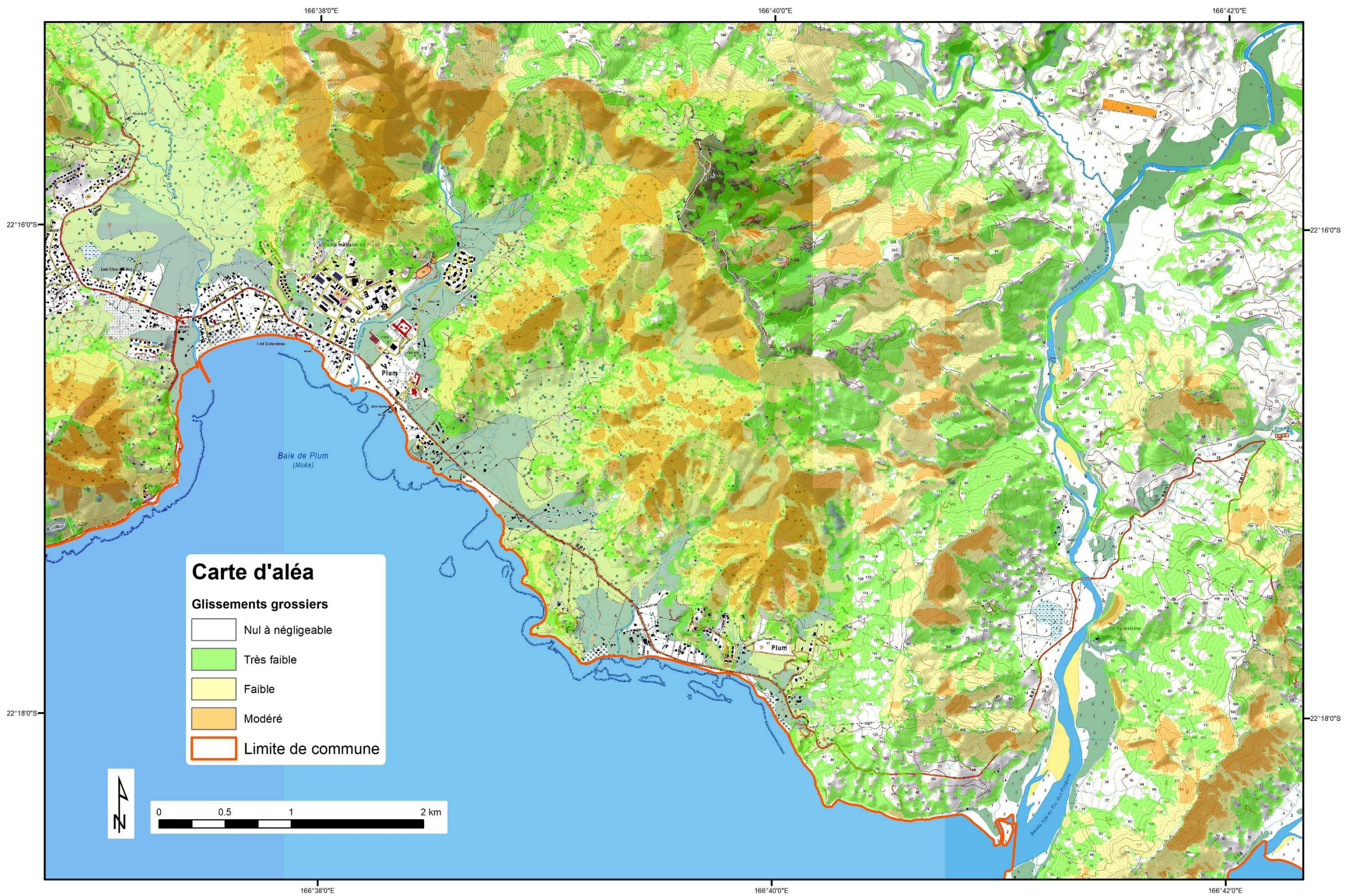


Illustration 108 – Exemple de restitution à l'échelle du 1 :25 000^{ème} (aléa « Glissement grossier »)

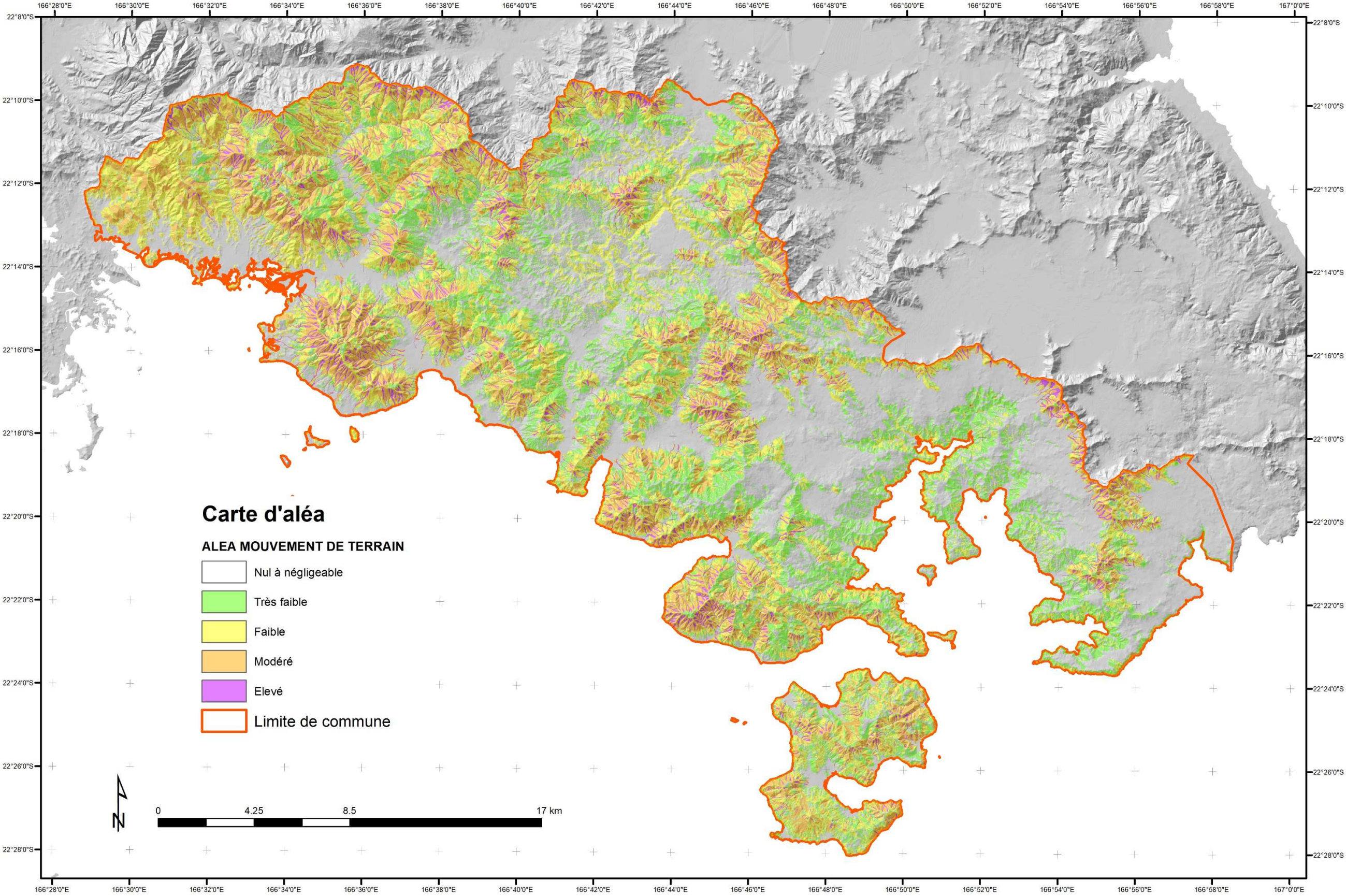


Illustration 109 – Exemple de restitution à l'échelle communale (aléa « Mouvement de terrain »)

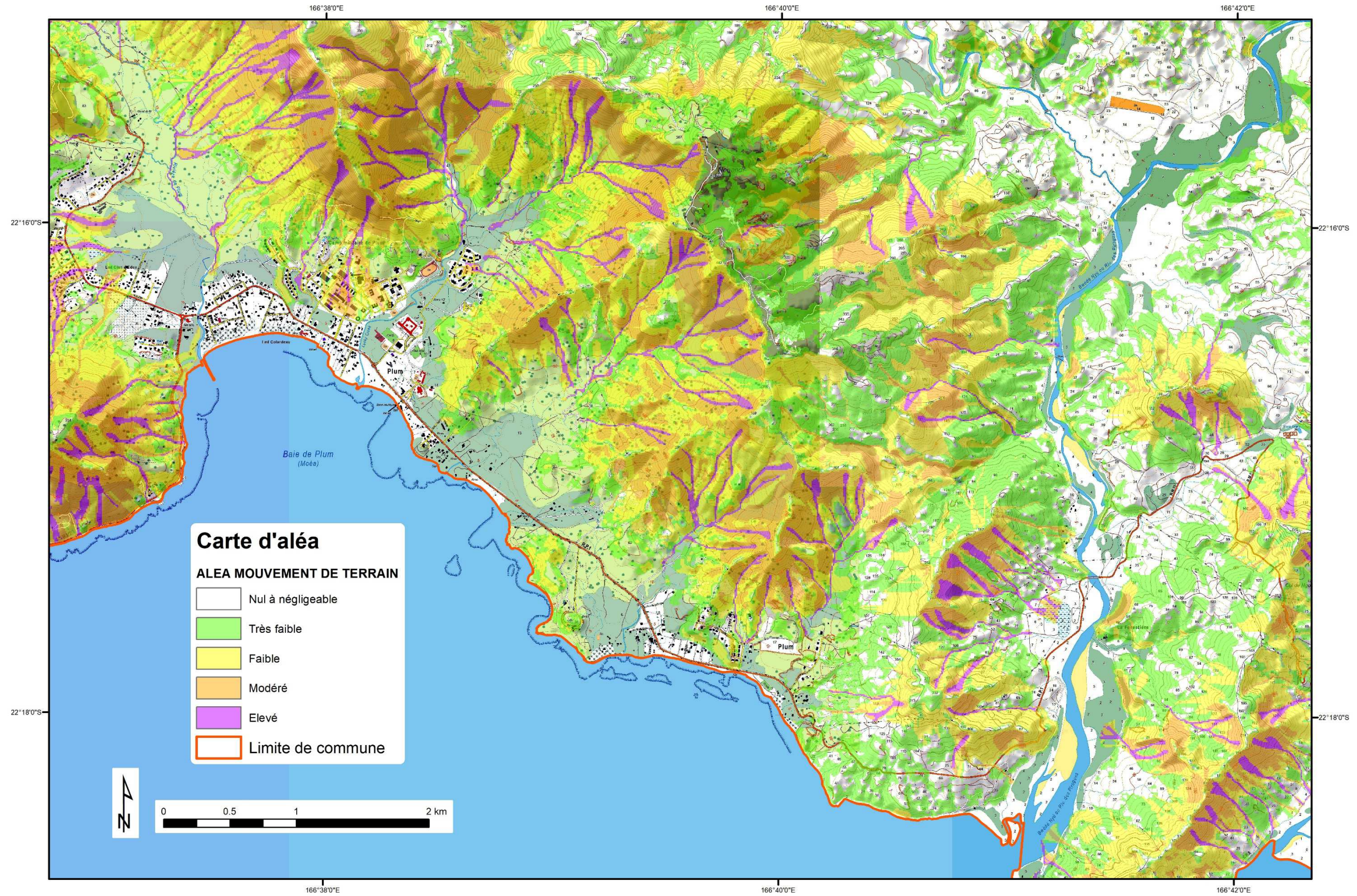


Illustration 110 – Exemple de restitution à l'échelle du 1:25 000^{ème} (aléa « Mouvement de terrain »)

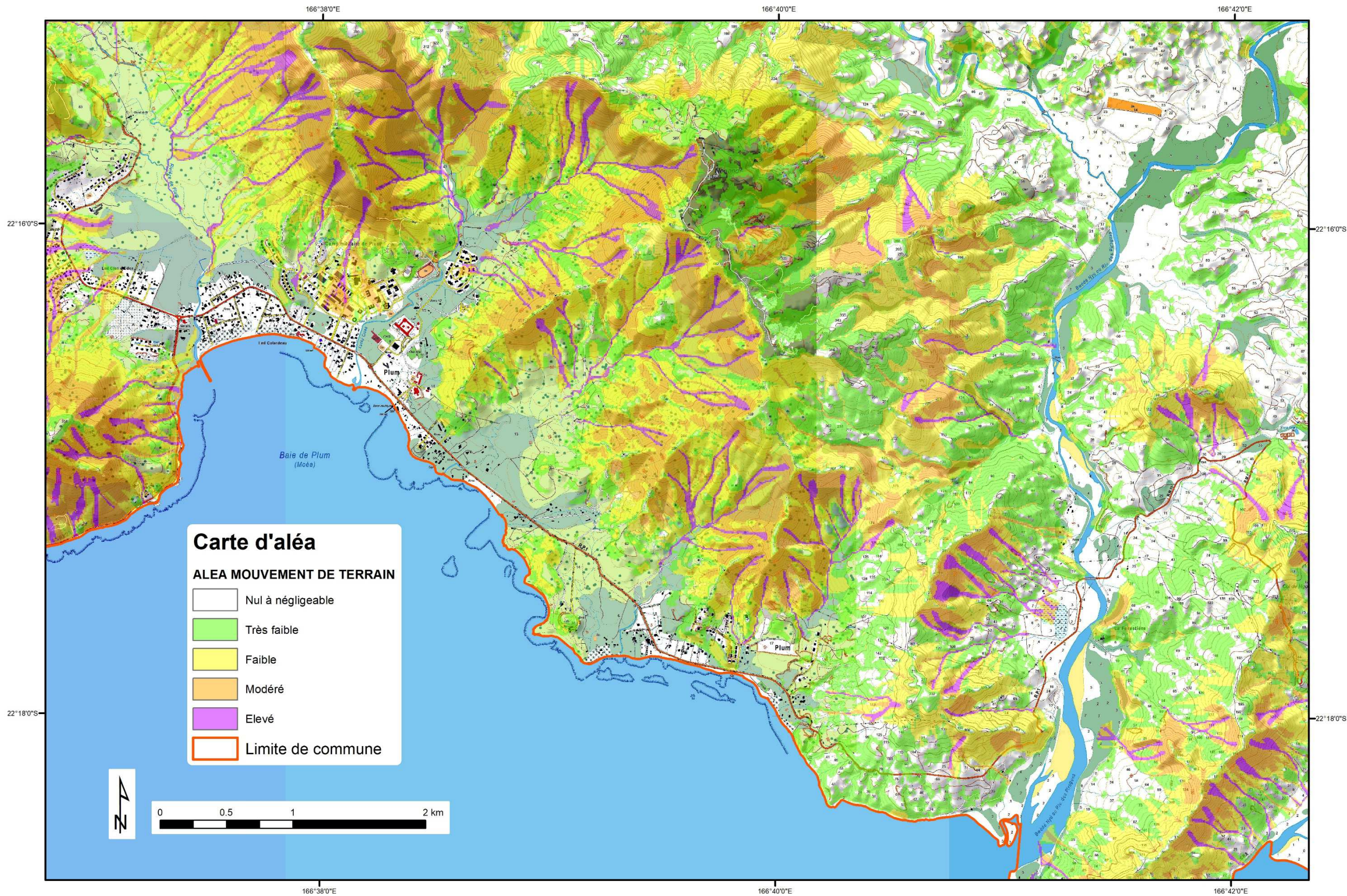


Illustration 111 – Exemple de restitution à l'échelle du 1:25 000^{ème} (aléa « Mouvement de terrain ») sous la forme d'atlas

6 Conclusion et perspectives

Dans le cadre d'un programme de cartographie des aléas mouvement de terrain, à l'échelle du 1 :25 000^{ème}, sur quinze communes de Nouvelle-Calédonie une méthode a été élaborée. L'aléa correspond à la probabilité spatiale (susceptibilité) et temporelle (période de retour) qu'un type de phénomène d'une certaine intensité se produise sur un territoire pour une période temporelle donnée. Le présent document décrit la méthode développée et mise en œuvre à l'échelle d'une commune « pilote » (commune du Mont-Dore).

Le préalable aux approches développées est la constitution d'un **inventaire des événements** passés. A cet égard, le recensement des phénomènes est réalisé à l'échelle du territoire pilote. La donnée d'inventaire est structurée en base de données cartographiques et est décrite en particulier suivant : i) le type de mouvement (défini à partir des classifications internationales) ; ii) les géométries zones d'initiation et de propagation ; ii) la date d'occurrence du phénomène. La donnée est acquise principalement à partir des campagnes d'imagerie aérienne. Les phénomènes objet de cartes d'aléa sont issus de la typologie des mouvements définie :

- GG : Glissement dans matériaux grossiers
- GF : Glissement dans matériaux fins
- LT : Lave-torrentielle
- CB : Chute de blocs

Les phénomènes de « Grand glissement de versant » (GGV) ne font pas l'objet de cartes d'aléa. Les phénomènes connus (actifs-latents ou dormants-stabilisés) sont reportés sur les cartes d'aléa produites.

L'aléa pour chaque type de phénomène répertorié sur le territoire pilote est évalué à l'appui d'une matrice « **occurrence / intensité** » :

- L'intensité traduit l'importance du phénomène (volume mobilisé, dynamique, énergie...) et présume de ses conséquences (dommages aux bâtiments). Il est retenu d'appréhender l'intensité :
 - o Pour les chutes de blocs à partir du volume unitaire en mouvement ;
 - o Pour les autres types (GG, GF, LT) à partir des vitesses de mouvement.
- L'occurrence (spatiale et temporelle) intègre **la rupture** potentielle et **la propagation** des masses en versant.
 - o La rupture est évaluée suivant une approche statistique calée sur les données d'inventaire. Cette méthode consiste à pondérer l'influence des facteurs permanents définis par la typologie de chaque type de phénomène (nature géologique du substratum rocheux ; nature lithologique des formations superficielles ; paramètre intégrateur descriptif de paysages et de morphologies ; pente des terrains). La méthode déclinée est bivariable (poids des évidences). Les coupures entre les différentes classes de probabilité de rupture sont appuyées sur les travaux du JTC-1 adaptées au programme ;
 - o l'évaluation de la propagation des phénomènes est réalisée à partir de méthodes empirique (méthode de la ligne d'énergie pour les chutes de blocs) ou à l'appui de simulation numérique (outil Flow-R).

La qualification de l'occurrence repose sur une matrice croisant rupture et propagation, en conservant les coupures de classes du JTC-1.

La validation des cartes par type de phénomène s'effectue à l'avancement du projet par : i) rétro-analyse sur les données collectées, densité par faciès, occurrences, taux de reconnaissance ; ii) expertise et visite de terrain ; iii) par comparaison qualitative avec la connaissance actuelle de l'aléa « mouvement de terrain » au niveau des documents d'information existants.

Afin d'obtenir une carte d'aléa « Mouvement de terrain », une agrégation des aléas est proposée en retenant en tout point du territoire cartographié le niveau d'aléa maximal considéré, en gardant en mémoire l'(les) aléa(s) au(x)quel(s) il réfère.

Les restitutions des cartes sont réalisées sous forme d'atlas au format A3, à l'échelle du 1:25 000^{ème} potentiellement déclinables pour tous les phénomènes. Pour la commune pilote traitée sont rappelées :

- les surfaces communales exposées aux différents aléas (exprimées en valeur absolue et en pourcentage) selon les classes qualifiées ;
- les surfaces communales exposées à l'aléa mouvement de terrain tel que défini (exprimées en valeur absolue et en pourcentage).

La caractérisation des aléas à l'échelle communale, n'est pas une fin en soi. Au-delà, il convient d'apprécier dans quelle mesure les enjeux sont exposés aux aléas naturels, mouvements de terrain et autres. Afin d'initier une réflexion sur le sujet, une proposition de synthèse est formulée en calculant la distribution des bâtiments exposés à l'aléa mouvements de terrain, en nombre et en pourcentage.

7 Bibliographie

7.1 GUIDES

Ministère de l'Aménagement, du Territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (1997) – Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) – Guide général. *Edit. La Documentation Française, Paris.*

Ministère de l'Aménagement, du Territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (1999) – Plans de prévention des risques naturels (PPR) – Risques de mouvements de terrain – Guide méthodologique. *Edit. La Documentation Française, Paris.*

Antoine P., Cojean R., Durville J.L., Landry J., Leroi E., Marie R., Pothérat P., Toulemont M., Villain J. (2000) – Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain – Guide technique – LCPC.

Effendiantz L., Guillemin P., Pauly J.C., Payany M., Rochet L. (2004) – Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux – Guide technique – LCPC.

Parriaux A., Bonnard C., Tacher L. (2010) – Glissements de terrain: hydrogéologie et techniques d'assainissement par drainage. Guide pratique. Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement n° 1023: 128 p.

7.2 RAPPORTS

Géologie

Maurizot P., Vendé-Leclerc M., 2009 - Carte géologique de la Nouvelle-Calédonie au 1/500 000, DIMENC - SGNC, BRGM. Notice explicative par Maurizot P. et Collot J., 2009

Carte géologique de la Nouvelle-Calédonie au 1/200 000 - D'après Paris J.P., 1981, Géologie de la Nouvelle-Calédonie, un essai de synthèse. Mémoire BRGM, N°113, 279 p..

Sevin B., Maurizot P., Vendé-Leclerc M. (2012). Carte géologique du Grand Sud de Nouvelle-Calédonie au 1/50 000, Service Géologique de Nouvelle-Calédonie, Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

Mouvements de terrain

Zones d'emprise couvertes dans le cadre du programme pluriannuel Nouvelle-Calédonie-BRGM de "Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie" (1998-2005), 2005, DIMENC-SGNC, BRGM

Guyomar O. (1997). Cartographie des formations géologiques superficielles et de l'aléa mouvements de terrains sous climat tropical : La région de Robinson (NE de Nouméa), Nouvelle-Calédonie. Rapport de stage, DESS Géologie de l'aménagement. Service des Mines et de l'Énergie, Nouméa

Maurizot P., Lafoy Y. (2003). L'aléa naturel mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie – Synthèse des connaissances (2003). BRGM/RP-52213-FR

Maurizot, P., Lafoy., Y., Poupée, M. (2002) – Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie – Zone de Goro, Rap. BRGM/RP – 51 623 FR (pdf)

Maurizot, P., Lafoy., Y., Poupée, M., 2002 – Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie – Zone du Koniambo, Rap. BRGM/RP – 51 624 FR (pdf)

Maurizot, P., Lafoy., Y., 2001 – Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie – Zone de Touho-Poindimié, Rap. BRGM/RP – 50 846-FR (pdf)

Maurizot, P., Lafoy., Y., Brière de l'Isle, B., Marcangéli, Y., 2003 – Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie – Zone de Yaté, Rap. BRGM/RP – 52 497 FR, 29 p. + 2 Pl. HT. (pdf)

Maurizot, P., 2001 – Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain et érosion en Nouvelle-Calédonie – Massif du Mont Dore Etude complémentaire pour la prise en compte des risques naturels dans le plan d'Urbanisme Directeur de la commune du Mont Dore, Rap. BRGM/RP – 50 725 FR (pdf)

Maurizot, P., Lafoy, Y., 1999 – Cartographie des aléas naturels (mouvements de terrain et érosion) dans le Territoire de Nouvelle-Calédonie, Zone de Koné, Rap. BRGM N°40775, Décembre 1999, 31 p., 20 Pl., 1 Annexe, 2 cartes HT (pdf)

Maurizot, P., Lafoy., Y., 2001 – Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie – Zone de Thio, Rap. BRGM/RP – 50 845-FR (pdf)

Maurizot, P., Lafoy, Y., 1999 – Cartographie des aléas naturels (mouvements de terrain et érosion) dans le Territoire de Nouvelle-Calédonie, Zone de Tontouta, Rap. BRGM N°40776, Décembre 1999, 31 p., 16 Pl., 1 Annexe, 2 cartes HT (pdf)

Maurizot, P., Lafoy, Y., 1998 – Cartographie des aléas naturels (mouvements de terrain et érosion) dans le Territoire de Nouvelle-Calédonie, Zone de Dumbéa-Païta, Rap. BRGM N°40403, Décembre 1998, 31 p., 27 Pl., 1 Annexe, 2 cartes HT (pdf)

Maurizot, P., Lafoy, Y., 1998 – Cartographie des aléas naturels (mouvements de terrain et érosion) dans le Territoire de Nouvelle-Calédonie, Zone de Pouembout, Rap. BRGM N°40404, Décembre 1998, 31 p., 19 Pl., 1 Annexe, 2 cartes HT (pdf)

Maurizot P., Lafoy Y., Mercier-des-Rochettes N., Vendé-Leclerc M., 2005 – Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie – Zone de Bouloupari, Rap. BRGM /RP 53 926-FR.

Maurizot P., Lafoy Y., 1998, Cartographie des aléas naturels (Mouvements de terrain, érosion) dans le Territoire de Nouvelle-Calédonie, Zone de Dumbéa - Païta, Rapport BRGM N° 40 403.

Maurizot P., 2007, Cartographie d'aide à l'aménagement dans la zone Voh-Koné-Pouembout-Poya. Phase 1 : Mise à jour de la carte géologique et bilan des données existantes, BRGM/RP - 54 898 - FR, DIMENC-SGNC, BRGM.

Maurizot P., Lafoy Y., Vendé-Leclerc M., 2004 - Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie, Carte géologique du substrat et des formations superficielles au 1/25 000 - Zone de Kouaoua.

Maurizot P., Lafoy Y., Vendé-Leclerc M., 2004 - Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie, Carte géologique du substrat et des formations superficielles au 1/25 000 - Zone de Prony

Maurizot P., Lafoy Y., Mercier-des-Rochettes N., Vendé-Leclerc M., 2005 - Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en NC, Carte géologique du substrat et des formations superficielles au 1/20 000 - Zone de Kaala.

Maurizot P., Lafoy Y., Vendé-Leclerc M., 2004 - Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie, Carte géologique du substrat et des formations superficielles au 1/25 000 - Zone de Kouaoua. (pdf)

Maurizot, P., Lafoy, Y., Brière de l'Isle, B., Marcangéli, Y., 2003 – Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie, Cartographie des phénomènes recensés au 1/25 000 - Zone de Canala (pdf)

Maurizot P., 1990, Commune de terrain du Mont Dore, Mouvements de terrain du 27/02/90, Rapport provisoire des études de phase 1 après cartographie géologique au 1 / 10 000 et campagne de sondages électriques. Rapport BRGM TA/514/90.

Maurizot P., Lafoy Y., Mercier-des-Rochettes N., Vendé-Leclerc M., 2005 - Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en NC, Carte géologique du substrat et des formations superficielles au 1/20 000 - Zone de Kaala. (pdf)

Maurizot P., Lafoy Y., Mercier-des-Rochettes N., Vendé-Leclerc M., 2005 - Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie, Cartographie des phénomènes recensés au 1/25 000 - Zone de Bouloupari. (pdf)

Maurizot P., Lafoy Y., Vendé-Leclerc M., 2004 - Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie, Carte géologique du substrat et des formations superficielles au 1/25 000 - Zone de Kouaoua. (pdf)

Maurizot P., (2006) – Evaluation du potentiel hydrogéologique du domaine de Gouaro-Déva. Phase préliminaire d'amélioration de la couverture cartographique géologique. Rapport BRGM RP - 54 788 – FR

Maurizot P., Rouet I., Robineau B., Allenbach M., Parisot J.C. (2007) – Mécanismes fondamentaux des mouvements de terrain dans les massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie. Rapport BRGM RP –55 041 - FR.

Riondy G., 1990, Etudes géologique et géotechnique préliminaire de trois zones affectées par des mouvements de terrains, Rapport BRGM n° 30690 GEG 4S 90.

Baltzer F., Trescases J.J., 1971, Erosion, transport et sédimentation liés aux cyclones tropicaux dans les massifs d'ultrabasites de Nouvelle-Calédonie Première approche du bilan général de

l'altération, de l'érosion et de la sédimentation sur péridotite en zone tropicale. Cah. ORSTOM, série Géol., III, 2, pp. 221-244.

Humbert M., Maurizot P., 1989, Cartes au 1 / 25 000^{ème} de zonage et hiérarchisation des risques liés à des mouvements de terrains : 1) dans le Grand Nouméa (Mont-Dore, Dumbéa, Païta). 3 cartes □ 2) à Poindimié, 1 carte.). Rapport BRGM.

Laganier R., 1994, Contribution à l'étude des processus d'érosion et des risques naturels dans les îles du Sud Ouest Pacifique (Nouvelle-Calédonie et Iles Salomon), Thèse Doctorat d'Université.

Maurizot P., Gasc P., 1986, Carte géologique (au 1 / 25 000^{ème}) et d'aptitude à l'aménagement (au 1 / 25 000^{ème}) de la zone urbaine de Nouméa et notice explicative. 45 p.

Maurizot P., Delfau M., 1995, Cartographie de la sensibilité à l'érosion, Province Sud de Nouvelle-Calédonie, Rap. BRGM R. 38660, Nombreuses cartes.

Hydrogéologie

Espirat J.J., 1967, Étude hydrogéologique de la Côte ouest de la Nouvelle-Calédonie, Rapport BRGM. (pdf)

Carte hydrogéologique de la Nouvelle-Calédonie au 1/200 000, 2007, SGNC-DIMENC

Jeanpert J., 2010. Hydrogéologie des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie. Bilan des connaissances et hypothèses de travail. Rapport SGNC-DIMENC. (pdf)

Jeanpert J., Vendé-Leclerc M., 2013. Dictionnaire des tables de la base de données Forages "SIGFORAGE"- Utilisation et organisation. SGNC-DIMENC. (pdf)

Jeanpert J., 2017, Structure et fonctionnement hydrogéologiques des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie (Thèse de doctorat, Université de la Réunion)

Maurizot P., Rouet I., juillet 2006, Aide à la mise au point d'une méthodologie de traitement de la couverture SPOT5 pour le calcul des superficies dégradées par l'ancienne activité minière en Nouvelle-Calédonie. Rapport Final BRGM/RP -54 787 –FR. (pdf)

Rouet I., Bani P., Juillet 2006, « Participation à l'inventaire des sites dégradés par l'activité minière par traitement semi-automatique d'images SPOT 5 : Validation méthodologique des traitements par télédétection » UNC. (pdf)

Wernert P.L., 2007, Cartographie des corps de serpentinite en domaine métamorphique et sédimentaire, reconnaissance des formations et affleurements potentiellement amiantifères. Houaïlou Zone témoin de Houaïlou, Nouvelle-Calédonie, mémoire d'ingénieur de l'Institut polytechnique Lasalle-Beauvais, 81 p + annexes. (pdf)

Climat et météorologie

Garcin M., 2017. Forçage météorologique de 1952 à 2016 sur le bassin de la Thio. Note technique BRGM DRP 17-182, 41 p., 10 fig., 10 tabl.

7.3 DOCUMENTS ACADÉMIQUES

Varnes D.J. (1984) – Landslide hazards and zonation: a review of principles and practice.

Cruden DM, Varnes DJ (1996) Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (eds) Landslides investigation and mitigation. Transportation research board, US National Research Council. Special Report 247, Washington, DC, Chapter 3, pp. 36–75

Hervás, J. (Ed.), 2007. Guidelines for Mapping Areas at Risk of Landslides in Europe. Proc. Experts Meeting, JRC, Ispra, Italy, 23-24 October 2007. JRC Report EUR 23093 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 53 pp

Horton P, Jaboyedoff M, Rudaz B and Zimmermann M: Flow-R (2013). A model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. Natural Hazards Earth System Sciences, 13, 869-885, doi:10.5194/nhess-13-869-2013

Ollier, C.-D.; Calcaterra, D.; Parise, M. (2007). Studies in weathering and slope movements-an introduction. Geomorphology, 87, 101–103.

Geological Society Engineering Group Working Party, 1990. Tropical residual soils. Engineering Group Working Party Report. Q. J. Eng. Geol. 23, 1–101.

Greenway, D.R., (1987). Vegetation and slope stability. In Anderson and Richards (Eds), Slope Stability, Wiley and Sons, 187-231.

K.M. Schmidt, J.J. Roering, J.D. Stock, W.E. Dietrich, D.R. Montgomery, and T. Schaub., (2001). The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. Canadian Geotechnical Journal 38. 995-1024. doi : 10.1139/cgj-38-5-995

International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI) (1995) A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. Bull Inter Assoc Eng Geol 52:75–78

USGS (2004) <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/pdf/fs2004-3072.pdf>

8 Annexes

Annexe 1

Catalogue des cyclones, dépressions tropicales et tempêtes (d'après meteo.nc)

Date début	Localisation	Dépression / Cyclone	Conséquences	Valeurs remarquables
24/01/1880	Moitié sud du territoire	Cyclone	16 morts - Dégâts majeurs aux bâtiments et aux plantations. Docks effondrés. 9 navires coulés ou échoués. Recul érosif de 8m sur la plage de l'îlot Amédée	
08/03/1880	Bourail, Thio, Nouméa	Très violente tempête	Importants	Pluies diluviennes
09/02/1880	Moitié sud	Ouragan dévastateur	Très importants, fortes inondations	
11/03/1885	Moitié nord	Cyclone	Nombreux dégâts.	
30/01/1898	Partie centrale du territoire	Cyclone	Importants. Perte d'un navire de 640 tonneaux et de son équipage.	Pluies torrentielles.
27/03/1910	Maré, Sud	Cyclone	Enormes dégâts à Lifou, Maré et l'île des Pins ; dégâts importants sur le sud. Raz-de-marée sur la côte sud de la Grande Terre et Maré. Chalands coulés	Marée de tempête.
14/02/1917	Le nord et le centre	Cyclone	3 morts à Thio, 2 morts et 20 blessés à Ouaco. Usines ravagées à Ouaco et Mueo. Plusieurs navires et bâtiments détruits.	Pluies : 356 mm au col d'Amieu, 264 mm à Pouébo.
24/02/1932	Le nord et le centre	Cyclone	Maisons endommagées et plantations détruites.	Pluies : 126 mm à La Foa. Le niveau de la Tontouta s'est élevé de 7,40 m.
08/04/1933	Iles Loyauté, Sud	Cyclone dévastateur	Majeurs. Toitures enlevées, arbres déracinés, plantations détruites. Plusieurs navires échoués ou coulés. Inondations dévastatrices.	
25/03/1939	Iles Bélep et Loyauté nord.	Cyclone dévastateur	3 morts. Cases détruites, 130 000 cocotiers abattus. Un bateau de 180 tonnes échoué.	
20/02/1940	Passage sur la ligne Hienghène-Ouaco.	Cyclone dévastateur	Maisons endommagées, plantations détruites, ponts enlevés, plus de 200 éboulements sur les routes.	Pluies : 257 mm à Canala, 250 mm à Gomen, 210 mm à Hienghène.
13/03/1948	Tout le territoire, sauf îles du nord.	Cyclone	Constructions légères détruites, constructions en dur fortement endommagées, plantations, routes, ponts ayant beaucoup	Pluies sur 2 jours : 351 mm à Bourail, 366 mm à Koné.

Date début	Localisation	Dépression / Cyclone	Conséquences	Valeurs remarquables
			souffert des crues, plusieurs cotres perdus, installations de Tontouta et Magenta endommagées.	
26/02/1951	Tout le territoire	Cyclone	Très importants. 2 morts, Marée de tempête de 1,50 m. La rivière Tontouta s'est élevée de plus de 9 m en quelques heures.	Pluies : 620 mm du 19 au 28 dont 275 mm le 27 à Houaïlou, 500 mm en 48 heures à Bourail.
18/01/1959	Cote est	Cyclone Béatrice	Majeurs aux habitations et cultures.	Pluies : 455 mm en 24 h et 750 mm en 3 jours à Tiwaka.
06/02/1961	Le nord, côte Ouest et Maré	Cyclone Catherine	Rivières en crue, arbres abattus, navires, maisons et installations minières endommagées.	Pluies en 48 h : 335 mm à Ouénarou, 407 mm à Plum.
01/02/1969	Tout le territoire sauf les îles du nord	Cyclone Coleen	Nombreuses constructions, navires, véhicules, cultures endommagés ou détruits. Avions détruits à Magenta et Tontouta. Installations ORTF et Doniambo très endommagées. Nombreuses têtes de bétail perdues. 10 000 cocotiers abattus à Ouvéa.	Pluies : 214 mm en 4 h et 364 mm en 7 h à Dumbea. Crue de 8 m de la Dumbea.
01/06/1972	Tout le territoire, sauf îles du nord.	Dépression tropicale forte Ida	3 morts par noyade. Pluies torrentielles.	Pluies : 201 mm en 24 h à Nouméa, 247 mm à Ouénarou.
07/03/1975	Cote est	Cyclone Alison	Dégâts très importants sur la côte Est. Constructions légères rasées, en dur très endommagées. Cultures dévastées.	Pluies (le 7) : 300 mm à Canala - 372 mm à Haut Coulna. Crues de plus de 10 m au nord de Houaïlou (max de 18 m).
12/02/1981	Tout le territoire	Cyclone Cliff	1 mort - Inondations dévastatrices. Toitures emportées, routes coupées, arbres déracinés. Plusieurs tribus isolées par les eaux ou les éboulements.	Pluies en 24 h : 411 mm a La Ouinne, 350 mm a La Thy, 201 mm a La Foa.
23/12/1981	Tout le territoire, saufs les Loyautés	Cyclone Gyan	2 morts par noyade, 1 mort par électrocution. Marée de tempête de 1 m entraînant le déracinement de cocotiers sur la côte Est. Dégâts habituels dus aux vents violents et aux pluies localement torrentielles.	Pluies en 24 h : 500 mm à Gomen le 23, 513 mm à Yaté le 24, 634 mm le 24 et 813 mm en 48h à La Ouinné.
12/01/1988	Tout le territoire	Cyclone Anne	3 morts par noyade - Pluies diluviennes qui ont généré des crues et des inondations très importantes. Cultures et habitations légères détruites. 1 000 interventions d'EEC en 3	Pluies en 24 h : 913 mm a Canon (DAVAR), 713 mm a Goro, 519 mm a Thio, 427 mm a Koutio, 371 mm a Moue.

Date début	Localisation	Dépression / Cyclone	Conséquences	Valeurs remarquables
			jours.	
10/04/1989	Côte Est et moitié sud	Cyclone Lili	30 bateaux de plaisance coulés. Fortes inondations.	Pluies : 238 mm à La Ouinné, 240 mm à Poindimié.
11/02/1989	Nord	Cyclone Harry	Très importants aux maisons, bateaux, infrastructures, cultures. Koumac, Gomen, Poupou et Ouégoa sinistrées à 100%.	Pluies : 233 mm à Poupou le 11, 233 mm à Kiel le 12.
02/01/1989	Le nord et centre-est	Cyclone Delilah	2 morts. Graves inondations.	Pluies en 48h : 330 mm à Pouébo et Ponérihouen.
22/01/1990	Particulièrement sur Bourail	Episode pluvieux hors dépression	Fortes précipitations qui ont engendré la destruction de cultures	
10/03/1992	Moitié nord	Cyclone Fran	Inondations et glissements de terrain. 150 cases endommagées ou détruites.	Pluies le 10 : 237 mm à Tango, 231 mm à Dzouma, 206 mm à Koumac et à Ouégoa.
04/03/1992	Moitié nord	Cyclone Esau	1 mort. Voh sinistrée à 100%. 130 cases endommagées ou détruites.	Pluies le 4 : 528 mm à Kopéto, 395 mm à Tiendanite, 354 mm à Tiwaka.
27/03/1994	Iles Loyauté	Dépression tropicale forte Usha	Bien qu'ayant touché la Nouvelle Calédonie au stade de dépression tropicale modérée, Usha a généré sur les îles Loyauté et en particulier sur Maré de fortes rafales de vents accompagnées de précipitations abondantes.	Pluies : 220 mm à La Roche le 27.
27/02/1994	Iles Loyauté	Cyclone Théodore	1 mort à Maré - L'île d'Ouvéa sinistrée	Pluies : 164 mm à Ouloup en 24 h.
26/01/1994	Iles Loyauté	Cyclone Sarah	Cultures vivrières détruites - Nombre important de dégâts aux habitations.	Pluies : 213 mm à Ouanaham, 160 mm à La Roche, et 155 mm à Ouloup le 26.
05/01/1994	Moitié sud et Iles Loyauté	Cyclone Rewa	Crues importantes de tous les cours d'eau. 1 mort. Nombreux itinéraires routiers fermés à la circulation. Glissements de terrain. La digue du port de Tadine (Maré) partiellement détruite par la houle.	Pluies : 275 mm en 48 h à La Coulée, 165 mm à Moué (Ile des Pins) le 6.

Date début	Localisation	Dépression / Cyclone	Conséquences	Valeurs remarquables
27/03/1996	Tout le territoire	Cyclone Béti	Quelques blessés légers. 1 500 personnes évacuées. Très nombreux dégâts sur les réseaux routiers, électriques et hydrauliques ainsi que sur les cultures. Habitat précaire endommagé à 50 % à Nouméa. Dégâts légers aux îles Loyauté.	Pluies en 24 h : 294 mm a Pouebo, 296 mm a La Foa.
07/01/1997	cote ouest	Cyclone Drena	Quasi-totalité des cultures vivrières détruite. Nombreuses routes inondées - Habitats endommagés. Nombreuses coupures locales des réseaux électriques, hydrauliques et de communications.	Cumul de pluie sur 48h : 474 mm au Dzumac, 202 à La Foa, 177 mm à Koumac.
23/03/1998	Loyauté, Grand Sud , Ile des Pins	Cyclone yali	Quelques dégâts à Maré, Yaté et à l'Ile des Pins : toitures arrachées, arbres déracinés.	Pluies : 137 mm à Moué (Ile des Pins) le 23.
20/02/1999	nord de la Grande Terre	Cyclone Franck	Dégâts très importants : routes impraticables, coupures d'eau, d'électricité et de téléphone, dommages agricoles considérables, habitations endommagées.	Cumul de pluie sur 3 jours : 414 mm à Tango (Chaîne), 330 mm à Hienghène.
12/02/1999	Iles Loyauté	Dépression tropicale forte Ella	Lifou : habitations endommagées. coupures d'électricité, d'eau et de téléphone. Maré : toitures arrachées, arbres déracinés, dispensaire et tour de contrôle de l'aéroport inondés. Tiga : une partie du wharf arrachée par les vagues.	
21/01/1999	Maré et cote est	Cyclone Dani	Fortes précipitations à Maré (dégâts modérés) - inondations sur la côte Est. Dani fut suivi au large le 23 janvier de la dépression tropicale forte Olinda qui fit 3 morts par noyade sur le territoire.	Pluie en 24 h : 183 mm à Poindimié, 178 mm à Hienghène, 125 mm à Touho
06/03/2002	Cote Ouest	Dépression tropicale forte Des	Rivières en crues , routes abîmées, cultures agricoles détruites.	Pluie en 24 h : 276 mm à Aoupinié, 197 mm à Houaïlou, 175 mm à Yaté.
13/03/2003	Grande terre et ile des Pins	Cyclone Erica	2 morts - Dégats considerables sur l'ensemble des infrastructures : reseaux electriques et de telecommunications, routes et batiments, agriculture, bateaux,	Pluie (3 jrs) : 297 mm a Dzumac, 255 mm au Col des Roussettes, 231 mm a La Coulee

Date début	Localisation	Dépression / Cyclone	Conséquences	Valeurs remarquables
			etc. Plus de 3 milliards de francs CFP de dégâts déclarés.	
29/01/2003	Ouvéa Lifou	Cyclone Béni	Habitations endommagées, coupures électriques et téléphoniques, chutes d'arbres.	Cumuls de pluie sur 3 jours : 160 mm à la Montagne des Sources, 135 mm à Yaté.
27/02/2004	Iles Loyauté	Cyclone Ivy	Fortes houles (vagues de 7 mètres) sur les côtes des îles Loyauté.	Pluies : 126 mm à Maré.
08/01/2005	Moitié nord	Cyclone Kerry	Fortes précipitations : nombreuses inondations (notamment à Bourail). Bitume de routes emporté, toitures envolées.	Pluies : 179 mm à Bourail, 200 mm à Tango (Chaîne).
25/03/2007	Iles Loyauté	Dépression tropicale forte Becky	Grosse mer et fortes pluies	Pluies : 118 mm à Yaté, 105 mm à Goro, 67 mm à Tadine
25/12/2011	Houaïlou	Episode pluvieux hors dépression	ruine du centre de secours et glissements sur Gouareu et Warhawa	528 mm / 24 h à Houaïlou
11/01/2011	Tout le territoire sauf les îles du nord	Dépression tropicale forte Vania	Fortes précipitations et inondations Dommages agricoles importants	Pluies en 24 h : 450 mm à Goro (Station Vale NC), 331 mm à Montagnes des Sources, 284 mm à Tadine, 260 mm à Nouméa
27/12/2012	Nord de la Grande Terre et Iles Loyauté	Cyclone Freda	Dégâts sont essentiellement dus aux pluies diluviennes qui ont provoqué un grand nombre de débordements de rivière avec des coupures de routes et des dégâts aux ouvrages d'art, des glissements de terrains et de nombreuses habitations inondées (par exemple 400 personnes sans abri à Thio).	Pluies en 12 h : 298 mm à Goro - ancienne pépinière (station Vale NC), 293 mm à Houaïlou et 189 mm à Poindimié Pluies en 24 h : 438 mm à Goro - ancienne pépinière (station Vale NC), 425 mm à Houaïlou et 348 mm à Poindimié
03/07/2013	Particulièrement sur Thio	Episode pluvieux hors dépression	Nombreux dégâts sur Thio.	> 300 mm / 24 h à Canala
03/02/2014	Tout le territoire	Episode pluvieux hors dépression	2 morts à Bourail	

Date début	Localisation	Dépression / Cyclone	Conséquences	Valeurs remarquables
04/02/2014	Tout le territoire	Cyclone Edna	2 morts emportés par les eaux et 2 supposés disparus. Routes impraticables en raison des inondations ou des éboulements. Problèmes sur le réseau électrique à Canala et à Bourail.	
17/01/2014	Grande Terre	Dépression tropicale modérée June	Deux victimes emportés par la crue de la rivière Houaïlou alors qu'ils circulaient en voiture. Principaux dégâts causés par les crues, en particulier à Koumac, sur la côte Est et dans la Chaîne, ainsi que pour certaines rivières de la côte Ouest. Des pertes agricoles (céréales, cultures maraichères, bananiers, etc...) car les champs ont été noyés par endroits et les fortes rafales ont endommagé les bananeraies.	Pluies en 24 h : 315 mm à Camp des Sapins, 315 mm à Pouébo, 240 mm à Thio-Plateau (station Vale NC), 220 mm à Hienghène et 216 mm à Thiébaghi Pluies en 48 h : 425 mm à Pouébo.
24/12/2014	Houaïlou	Episode pluvieux hors dépression	8 disparus à Houaïlou en raison de coulées de boues sur le massif de Bel Air	En 24 heures, il est tombe l'équivalent d'un quart de la quantité annuelle moyenne de précipitations (1 914,2 mm).
09/04/2015	Côte est et îles Loyauté	Dépression tropicale forte Solo	Une victime indirecte est à déplorer. Les dégâts sont mineurs et essentiellement dus aux précipitations (quelques routes coupées par des inondations et arrêt de la distribution d'eau potable à Pouébo).	Pluies en 12 h : 200 mm à Goro (station Vale NC). Pluies sur 24 h : Les cumuls sont généralement compris entre 50 et 100 sur la côte ouest de la Grande Terre, entre 100 et 150 mm sur le Nord et la côte Est où très localement les 200 mm ont été dépassés.
30/01/2015	Nord de la Grande Terre et chaîne centrale	Cyclone Ola	Aucune victime n'est à déplorer. Perturbations principalement causées quelques crues de rivières, en particulier sur le nord-est de la Grande Terre : inondations localisées, réseau routier secondaire impraticable par endroits, coupures de l'alimentation électrique pour 150 foyers de la commune de Hienghène le 1er février.	Pluies en 48 h : cumul compris entre 50 et 100 mm sur le littoral Est et entre 100 et 250 mm sur le relief de la Grande Terre avec des valeurs (249,3 mm à Méa 189,9 mm à Camp des Sapins et 188,4 mm à Tiébaghi)

Date début	Localisation	Dépression / Cyclone	Conséquences	Valeurs remarquables
02/05/2017	Iles Loyauté et cote est	Cyclone Donna	Aucune victime à déplorer 325 habitations détruites (5 à Maré, 50 à Ouvéa et 270 à Lifou)	Pluies sur 24 h : maximum mesurée à Goro (station Vale NC) : 80,2 mm ; maximum estimée à Wé : entre 100 et 150 mm
07/04/2017	Tout le territoire	Cyclone Cook	1 personne décédée (Kouaoua) 4 blessés 23 communes touchées 1 milliard de XPF de dégâts estimés	Pluies en 6 h : Boulouparis, La Foa, Kouaoua et Thio enregistrent des cumuls mesurés en moyenne une fois tous les 10 ans Pluies sur 24 h : plus de 200 mm de précipitations dans une région allant d'une ligne Yaté-Dumbéa à une ligne Kouaoua-La Foa avec le cumul maximal mesuré à Thio Plateau (station SLN) avec plus de 400 mm.

Annexe 2

Descriptif des champs de la base de données « mouvements de terrain » constituée dans le cadre du projet

BASE DE DONNEES DES ENVELOPPES TOTALES DE MOUVEMENT (1)

Champ	Lexique	Définition
TYPE	CB COUL GF GG GGV LT	Chute de blocs Coulée Glissement dans matériaux fins Glissement dans matériaux grossiers Grand glissement de versant Lave-torrentielle
SOUS_TYPE	CB_ECROUL CB_ISOLEE COUL_GLISS COUL_RAVIN DSGSD GLISS_DEBRIS_GROSSIER GLISS_DEBRIS_ROCHEUX GLISS_ROCHEUX GR_DEBRIS_FINS GT_DEBRIS_FINS LT_GRANUL LT_COHES	Eboulement en masse Chute de bloc isolée Glissement-coulée Coulée de boue / ravinement Déformations profondes de versants Glissement de débris dans matériaux grossiers (coarse debris-slide) Glissement de débris rocheux (rock debris-slide) Glissements rocheux Glissement rotationnel dans débris fins Glissement translationnel dans débris fins Lave torrentielle granulaire Lave torrentielle cohésive
TYPE_ZONE	ENVELOPPE INIT	Emprise totale du mouvement Zone d'initiation
PROFONDEUR	ELEVEE MOY (2-5/6 m) SUP(< 2m) ND	Profondeur estimée du mouvement > 5-6 m Profondeur estimée du mouvement 2-5-6 m Profondeur estimée du mouvement < 2 m Profondeur estimée du mouvement non déterminée
ORIGINE	ANTHROPIQUE MIXTE NATUREL	Origine anthropique estimée dominante Origine mixte estimée dominante Origine naturelle estimée dominante
MULTI_SOUR	ND NON OUI	Non définie Enveloppe de mouvement avec une source unique associée Enveloppe de mouvement avec plusieurs sources d'initiation associées
ACTIVITE	ACTIF LATENT STABILISE	Mouvement actif Mouvement latent (possiblement réactivable) Mouvement stabilisé
AGE	ACTUEL ANCIEN RECENT	Repéré depuis 2008 (images Google Earth / terrain) Repéré avant 1976 (présent sur les images de 1976) Repéré entre les campagnes 1976 et 2008
CONT_MORPH	BAS_VERSANT BERGES HAUT_VERSANT MI_VERSANT PROX_COTE VERSANT	Mouvement plutôt en pied de versant Mouvement concernant des berges de cours d'eau Mouvement plutôt en tête de versant Mouvement plutôt à mi-versant Mouvement à proximité de la côte Mouvement en versant sans distinction
ACTIV_HYDR	NULL AXE_RUISSEL RES_HYDRO_PIED	Non définie Mouvement situé dans un axe de ruissellement Mouvement situé en amont immédiat d'un réseau hydrographique
DATE_DEBUT	Valeur saisie	Valeur de la date
PREC_DATE	ANNUEL DECENNIE JOUR SIECLE	Précision annuelle Précision décennie Précision journalière Précision du siècle
COMMUNE	Valeur saisie	Nom de la commune
CODE_COMMU	Valeur saisie	Code de la commune
LIEU_DIT	Valeur saisie	Information complémentaire sur localisation
X_RGNC	Valeur saisie	Coordonnée X du centroïde
Y_RGNC	Valeur saisie	Coordonnée Y du centroïde
Z_RGNC	Valeur saisie	Coordonnée Z du centroïde

BASE DE DONNEES DES ENVELOPPES TOTALES DE MOUVEMENT (2)

Champ	Lexique	Définition
PREC_XY	Valeur saisie	Précision de la donnée XY (m)
PREC_Z	Valeur saisie	Précision de la donnée Z (m)
OPERATEUR	Valeur saisie	Initiales de l'opérateur de saisie
GEOL_SGNC	Valeur saisie	Formation géologique
FORM_SUP	Valeur saisie	Formation superficielle
DESC_LITHO	Valeur saisie	Description lithologique
SOURCE_INF	GE2000 GE2001 ... GE2018 GE2019 ORTHO1976 ORTHO2008 PHOTO1992	Source 1 d'information (image Google Earth 2000) Source 1 d'information (image Google Earth 2001) Source 1 d'information (image Google Earth 2xxx) Source 1 d'information (image Google Earth 2018) Source 1 d'information (image Google Earth 2019) Source 1 d'information (Photo aérienne 1976) Source 1 d'information (Photo aérienne 2008) Source 1 d'information (Photo 1992)
SOURCE_I_1	idem SOURCE_INF	Source 2 d'information
SOURCE_I_2	idem SOURCE_INF	Source 3 d'information
SOURCE_I_3	idem SOURCE_INF	Source 4 d'information
SOURCE_I_4	idem SOURCE_INF	Source 5 d'information
OBSERVATIO	Valeur saisie	Commentaire / description
FIABILITE	CERTAIN SUPPOSE-PROBABLE	Information certaine Information suppose-probable
EPAISSEUR	Valeur saisie	Epaisseur probable en mouvement (m)
SURFACE_M2	Champ calculé	Surface du mouvement (m2)
VOL_TOT_M3	Valeur saisie	Volume total estimé (m3)
VOL_UNIT_M3	Valeur saisie	Volume unitaire estimé (m3 pour CB)
ALT_MAX	Champ calculé	Altitude RGNC max
ALT_MIN	Champ calculé	Altitude RGNC min
DENIVELLE	Champ calculé	Zmax - Zmin (m)
ANGLE_NRJ	Champ calculé	Angle de la ligne d'énergie
LONGUEUR_T	Champ calculé	Longueur en plan (enveloppe)
LARGEUR_T	Champ calculé	Largeur en plan (enveloppe)
LONGUEUR_I	Champ calculé	Longueur en plan (initiation)
LARGEUR_I	Champ calculé	Largeur en plan (initiation)
LONGUEUR_A	Champ calculé	Longueur en plan (propagation)
LARGEUR_A	Champ calculé	Largeur en plan (propagation)
LONGUEUR_R	Champ calculé	Longueur réelle (enveloppe)
SURFACE_I	Champ calculé	Surface en plan (initiation)
SURFACE_T	Champ calculé	Surface en plan (enveloppe)
SURFACE_A	Champ calculé	Surface en plan (propagation)
PROPAG	CBISO COULEE ECROUL GLISS GLISS_LARGE LT ND RUISSELL	Propagation type chute de bloc isolée Propagation type coulée Propagation type chute écoulement en masse Propagation type glissement Propagation type grand glissement Propagation type lave torrentielle Propagation non déterminée Propagation type ruissellement
MATERIAUX	Valeur saisie	Matériau impliqué (rocheux, débris, fin meuble, etc...)

BASE DE DONNEES DES ENVELOPPES D'INITIATION DES MOUVEMENTS

Champ	Lexique	Définition
TYPE	CB COUL GF GG GGV LT	Chute de blocs Coulée Glissement dans matériaux fins Glissement dans matériaux grossiers Grand glissement de versant Lave-torrentielle
SOUS_TYPE	CB_ECROUL CB_ISOLEE COUL_GLISS COUL_RAVIN DSGSD GLISS_DEBRIS_GROSSIER GLISS_DEBRIS_ROCHEUX GLISS_ROCHEUX GR_DEBRIS_FINS GT_DEBRIS_FINS LT_GRANUL LT_COHES	Eboulement en masse Chute de bloc isolée Glissement-coulée Coulée de boue / ravinement Déformations profondes de versants Glissement de débris dans matériaux grossiers (coarse debris-slide) Glissement de débris rocheux (rock debris-slide) Glissements rocheux Glissement rotationnel dans débris fins Glissement translationnel dans débris fins Lave torrentielle granulaire Lave torrentielle cohésive
TYPE_ZONE	ENVELOPPE INIT	Emprise totale du mouvement Zone d'initiation
PROFONDEUR	ELEVEE MOY (2-5/6 m) SUP(< 2m) ND	Profondeur estimée du mouvement > 5-6 m Profondeur estimée du mouvement 2-5-6 m Profondeur estimée du mouvement < 2 m Profondeur estimée du mouvement non déterminée
ACTIVITE	ACTIF LATENT STABILISE	Mouvement actif Mouvement latent (possiblement réactivable) Mouvement stabilisé
AGE	ACTUEL ANCIEN RECENT	Repéré depuis 2008 (images Google Earth / terrain) Repéré avant 1976 (présent sur les images de 1976) Repéré entre les campagnes 1976 et 2008
CONT_MORPH	BAS_VERSANT BERGES HAUT_VERSANT MI_VERSANT PROX_COTE VERSANT	Mouvement plutôt en pied de versant Mouvement concernant des berges de cours d'eau Mouvement plutôt en tête de versant Mouvement plutôt à mi-versant Mouvement à proximité de la côte Mouvement en versant sans distinction
ACTIV_HYDR	NULL AXE_RUISSEL RES_HYDRO_PIED	Non définie Mouvement situé dans un axe de ruissellement Mouvement situé en amont immédiat d'un réseau hydrographique
X_RGNC	Valeur saisie	Coordonnée X du centroïde
Y_RGNC	Valeur saisie	Coordonnée Y du centroïde
Z_NGNC	Valeur saisie	Coordonnée Z du centroïde
PREC_Z	Valeur saisie	Précision de la donnée Z (m)
LONG_INIT	Champ calculé	Longueur de l'enveloppe source
LARG_INIT	Champ calculé	Largeur de l'enveloppe source
SFCE_INIT	Champ calculé	Surface de la zone d'initiation
PERIM_INIT	Champ calculé	Périmètre de la zone d'initiation
PROPAG	CBISO COULEE ECROUL GLISS GLISS_LARGE LT ND RUISSELL	Propagation type chute de bloc isolée Propagation type coulée Propagation type chute écoulement en masse Propagation type glissement Propagation type grand glissement Propagation type lave torrentielle Propagation non déterminée Propagation type ruissellement

Annexe 3

Paramètres de calage des analyses sur la commune pilote

- Pondérations retenues pour l'évaluation de la rupture par commune et par phénomène
- Paramètres de calage pour l'évaluation des propagations
 - Données FLOW-R
 - Valeurs de la ligne d'énergie pour les éboulements rocheux

Aléas mouvement de terrain

MONT-DORE

Surfaces exposées

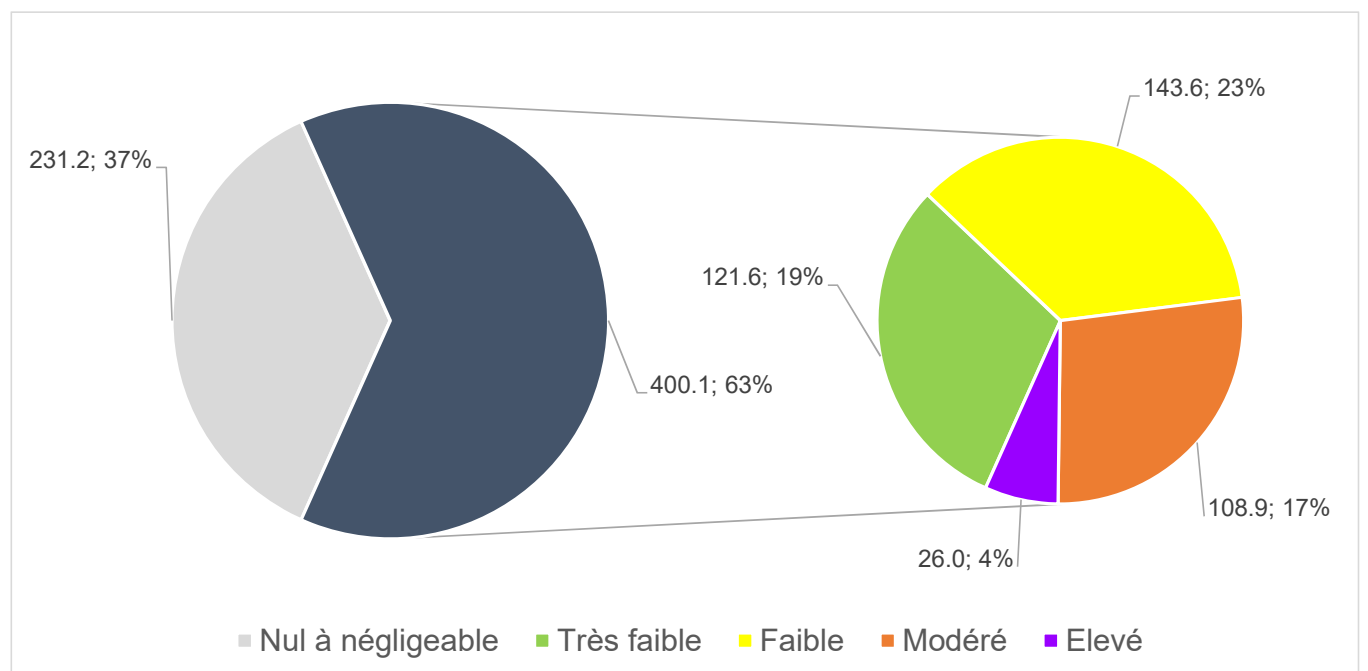
		GG	GF	COUL	LT	CB	ALEA MVT
Aléa (km²)	Nul à négligeable	260.3	311.1	-	376.2	478.5	231.2
	Très faible	152.6	98.9	-	107.6	55.0	121.6
	Faible	114.5	217.3	-	85.3	47.0	143.6
	Modéré	104.0	4.0	-	36.3	50.8	108.9
	Elevé	-	-	-	26.0	-	26.0

Aléa (% commune)	Très faible	41%	49%	-	60%	76%	37%
	Très faible	24%	16%	-	17%	9%	19%
	Faible	18%	34%	-	14%	7%	23%
	Modéré	16%	1%	-	6%	8%	17%
	Elevé	-	-	-	4%	-	4%

Paramètres de propagation (Flow-R / Ligne d'énergie)

		GG	GF	COUL	LT	CB*	
Ligne d'énergie	Très faible	10°	7°	-	12° ↓	28°	
	Faible			-		30°	
	Moyenne	13°	9°	-		32°	
	Forte	17°	12°	-		35-38°	
	Très forte	23°	15°	-			

Paramètres Flow-R	Inertie	Weight = Cosinus	Weight = Cosinus	-	Direction memory: length =10 - open =120	12° (ouverture 1/2 cône)	
	Direction	Holmgren (1994) = 25	Holmgren (1994) = 25	-	Holmgren (1994) = 5.0		
	Vitesse	≤ 5.m.s-1	≤ 0.5 m.s-1	-	≤ 10.m.s-1		



Poids des variables (WoE methode > valeur W+, W-, C

Glissements grossiers (GG)		Nb de cellules de la classe	W+	W-	C
Pentes (°) (PENTE)	[0-5]	3	-5.1748	0.1314	-5.3062
	[5-10]	29	-2.6430	0.1278	-2.7708
	[10-15]	115	-1.4021	0.1376	-1.5397
	[15-20]	222	-0.7848	0.1059	-0.8907
	[20-55]	340	-0.1950	0.0292	-0.2242
	[25-30]	369	0.1393	-0.0191	0.1584
	[30-35]	419	0.6314	-0.0774	0.7088
	[35-40]	547	1.3587	-0.1621	1.5208
	[40-45]	548	2.0747	-0.1886	2.2633
	[45-50]	197	2.3931	-0.0648	2.4579
	> 50	75	3.4594	-0.0258	3.4852
Substrat (SUBSTRAT)	Flyschs	0	nd	nd	nd
	Péridotites / Wehrlites	2721	0.3364	-1.8619	2.1983
	Serpentinites	2	-4.3386	0.0543	-4.3929
	Gabbro	73	-1.0474	0.0496	-1.0970
	Basalte	0	nd	nd	nd
	Argilites, grès, schistes tufacés indifférenciés	13	-3.3437	0.1331	-3.4768
	roches siliceuses indifférenciées	55	-0.4647	0.0116	-0.4763
	laves et dépôts volcano-sédimentaires	0	nd	nd	nd
Formation superficielle (FORMSUP)	FAU-mince	407	-0.4674	0.1039	-0.5713
	FAU-épais	182	-1.3796	0.2254	-1.6050
	FAL-chaos blocs	236	0.3597	-0.0268	0.3865
	FAL-colluvions-ND	13	-2.9631	0.0874	-3.0505
	FAU-très mince	1501	1.1237	-0.5558	1.6795
	FAL-colluvions à blocs	226	0.3709	-0.0262	0.3971
	FAL-formations alluviales	284	-0.2839	0.0368	-0.3207
	FAU-cuirasse démantelée	7	-1.8463	0.0132	-1.8595
	FAL-anthropique	8	-0.1733	0.0005	-0.1738
Landform (LANDFORM)	gentle slope, coarse texture, low convexity (1)	61	-2.2371	0.2010	-2.4381
	gentle slope, coarse texture, low convexity (17)	25	-1.6815	0.0393	-1.7208
	gentle slope, coarse texture, high convexity(33)	72	-1.7114	0.1244	-1.8358
	gentle slope, fine texture, high convexityv (49)	42	-1.7349	0.0720	-1.8069
	steep slope, coarse texture, low convexity (6)5	319	0.2700	-0.0292	0.2992
	steep slope, fine texture, low convexity (81)	517	0.3075	-0.0567	0.3642
	steep slope, coarse texture, high convexity (97)	473	0.6412	-0.0895	0.7307
	steep slope, fine texture, high convexity (113)	1355	0.7364	-0.3839	1.1203

Poids des variables (WoE methode > valeur W+, W-, C

Glissements fins (GF)		Nb de cellules de la classe	W+	W-	C
Pentes (°) (PENTE)	[0-5]	13	-1.8773	0.1129	-1.9902
	[5-10]	25	-1.2566	0.0997	-1.3563
	[10-15]	52	-0.7703	0.0998	-0.8701
	[15-20]	105	-0.1081	0.0208	-0.1289
	[20-55]	154	0.4470	-0.0991	0.5461
	[25-30]	178	0.8353	-0.1807	1.0160
	[30-35]	99	0.6128	-0.0743	0.6871
	[35-40]	44	0.2604	-0.0156	0.2760
	[40-45]	11	-0.4162	0.0084	-0.4246
	[45-50]	6	0.3215	-0.0024	0.3239
	> 50				
Substrat (SUBSTRAT)	Flyschs	0	nd	nd	nd
	Péridotites / Wehrlites	298	-0.4496	0.5687	-1.0183
	Serpentinites	5	-1.9953	0.0476	-2.0429
	Gabbro	197	1.3729	-0.2620	1.6349
	Basalte	3	-1.8967	0.0251	-1.9218
	Argilites, grès, schistes tufacés indifférenciés	143	0.4815	-0.0956	0.5771
	roches siliceuses indifférenciées	42	0.6925	-0.0320	0.7245
	laves et dépôts volcano-sédimentaires	0	nd	nd	nd
Formation superficielle (FORMSUP)	FAU-mince	152	-0.0257	0.0074	-0.0331
	FAU-épais	57	-1.1138	0.2043	-1.3181
	FAL-chaos blocs	59	0.3993	-0.0304	0.4297
	FAL-colluvions-ND	141	0.8482	-0.1375	0.9857
	FAU-très mince	92	-0.2444	0.0437	-0.2881
	FAL-colluvions à blocs	11	-1.2262	0.0399	-1.2661
	FAL-formations alluviales	170	0.6296	-0.1426	0.7722
	FAU-cuirasse démantelée	6	-0.5735	0.0068	-0.5803
	FAL-anthropique	0	nd	nd	nd
Landform (LANDFORM)	gentle slope, coarse texture, low convexity (1)	19	-1.9766	0.1943	-2.1709
	gentle slope, coarse texture, low convexity (17)	12	-0.9886	0.0304	-1.0190
	gentle slope, coarse texture, high convexity(33)	42	-0.8235	0.0868	-0.9103
	gentle slope, fine texture, high convexityv (49)	42	-0.3079	0.0237	-0.3316
	steep slope, coarse texture, low convexity (6)5	95	0.4847	-0.0597	0.5444
	steep slope, fine texture, low convexity (81)	65	-0.3404	0.0432	-0.3836
	steep slope, coarse texture, high convexity (97)	168	1.0318	-0.1889	1.2207
	steep slope, fine texture, high convexity (113)	245	0.4513	-0.1830	0.6343

Poids des variables (WoE methode > valeur W+, W-, C

Chutes de blocs (CB)		Nb de cellules de la classe	W+	W-	C
Pentes (°) (PENTE)	[0-5]	0	nd	nd	nd
	[5-10]	0	nd	nd	nd
	[10-15]	2	-3.5124	0.1780	-3.6904
	[15-20]	2	-3.4496	0.1658	-3.6154
	[20-55]	7	-1.8914	0.1054	-1.9968
	[25-30]	6	-1.6551	0.0665	-1.7216
	[30-35]	9	-0.8254	0.0299	-0.8553
	[35-40]	32	0.9510	-0.0518	1.0028
	[40-45]	94	2.7856	-0.2525	3.0381
	[45-50]	126	4.3360	-0.3731	4.7091
	> 50	123	4.7033	-0.3636	5.0669
Substrat (SUBSTRAT)	Flyschs	0	nd	nd	nd
	Péridotites / Wehrlites	432	0.0864	-1.8096	1.8960
	Serpentinites	0	nd	nd	nd
	Gabbro	7	-1.7531	0.0805	-1.8336
	Basalte	0	nd	nd	nd
	Argilites, grès, schistes tufacés indifférenciés	0	nd	nd	nd
	roches siliceuses indifférenciées	0	nd	nd	nd
	laves et dépôts volcano-sédimentaires	0	nd	nd	nd
Formation superficielle (FORMSUP)	FAU-mince	10	-1.9535	0.1521	-2.1056
	FAU-épais	22	-2.1355	0.5003	-2.6358
	FAL-chaos blocs	16	0.3161	-0.0102	0.3263
	FAL-colluvions-ND	0	nd	nd	nd
	FAU-très mince	390	1.7097	-2.0175	3.7272
	FAL-colluvions à blocs	0	nd	nd	nd
	FAL-formations alluviales	0	nd	nd	nd
	FAU-cuirasse démantelée	1	-3.5058	0.0766	-3.5824
	FAL-anthropique	0	nd	nd	nd
Landform (LANDFORM)	gentle slope, coarse texture, low convexity (1)	0	nd	nd	nd
	gentle slope, coarse texture, low convexity (17)	1	-3.0462	0.0468	-3.0930
	gentle slope, coarse texture, high convexity(33)	0	nd	nd	nd
	gentle slope, fine texture, high convexityv (49)	3	-2.4298	0.0739	-2.5037
	steep slope, coarse texture, low convexity (6)5	10	-0.9482	0.0376	-0.9858
	steep slope, fine texture, low convexity (81)	287	1.7941	-0.9455	2.7396
	steep slope, coarse texture, high convexity (97)	5	-1.6951	0.0526	-1.7477
	steep slope, fine texture, high convexity (113)	133	0.5448	-0.1677	0.7125

Poids des variables (WoE methode > valeur W+, W-, C

Laves totentielles (LT)		Nb de cellules de la classe	W+	W-	C
Pentes (°) (PENTE)	[0-5]	0	nd	nd	nd
	[5-10]	0	nd	nd	nd
	[10-15]	4	-1.7228	0.1489	-1.8717
	[15-20]	11	-0.7519	0.1030	-0.8549
	[20-55]	19	-0.0333	0.0055	-0.0388
	[25-30]	27	0.5614	-0.1002	0.6616
	[30-35]	15	0.3379	-0.0346	0.3725
	[35-40]	28	1.4208	-0.1780	1.5988
	[40-45]	17	1.6318	-0.1079	1.7397
	[45-50]	16	2.9154	-0.1178	3.0332
	> 50	0	nd	nd	nd
Substrat (SUBSTRAT)	Flyschs	0	nd	nd	nd
	Péridotites / Wehrlites	133	0.3576	-2.3976	2.7552
	Serpentinites	0	nd	nd	nd
	Gabbro	3	-1.1986	0.0532	-1.2518
	Basalte	0	nd	nd	nd
	Argilites, grès, schistes tufacés indifférenciés	0	nd	nd	nd
	roches siliceuses indifférenciées	1	-1.4317	0.0237	-1.4554
	laves et dépôts volcano-sédimentaires	0	nd	nd	nd
		0			
Formation superficielle (FORMSUP)	FAU-mince	19	-0.4914	0.1078	-0.5992
	FAU-épais	8	-1.4634	0.2306	-1.6940
	FAL-chaos blocs	20	0.9312	-0.0986	1.0298
	FAL-colluvions-ND	0	nd	nd	nd
	FAU-très mince	60	0.9421	-0.3890	1.3311
	FAL-colluvions à blocs	30	1.3912	-0.1911	1.5823
	FAL-formations alluviales	0	nd	nd	nd
	FAU-cuirasse démantelée	0	nd	nd	nd
	FAL-anthropique	0	nd	nd	nd
Landform (LANDFORM)	gentle slope, coarse texture, low convexity (1)	3	-2.2085	0.2001	-2.4086
	gentle slope, coarse texture, low convexity (17)	1	-1.8596	0.0407	-1.9003
	gentle slope, coarse texture, high convexity(33)	0	nd	nd	nd
	gentle slope, fine texture, high convexityv (49)	5	-0.8223	0.0495	-0.8718
	steep slope, coarse texture, low convexity (6)5	7	-0.5097	0.0365	-0.5462
	steep slope, fine texture, low convexity (81)	27	0.3949	-0.0770	0.4719
	steep slope, coarse texture, high convexity (97)	2	-1.7786	0.0764	-1.8550
	steep slope, fine texture, high convexity (113)	92	1.0856	-0.8561	1.9417

