

L'aléa naturel glissements de terrain en Nouvelle-Calédonie

Yaël Guyomard¹, Mathieu Mengin¹, Bastien Colas², Yannick Thiery², Vincent Mardhel², Olivier Monge¹.

La Nouvelle-Calédonie, pays montagneux et situé sur un axe de passage de cyclones, est régulièrement le théâtre de glissements de terrain avec des conséquences parfois lourdes (i.e. humaines ou matérielles). En novembre 2016, la commune de Houailou a connu de nombreuses coulées boueuses/laves torrentielles ayant provoqué 8 victimes. D'une manière générale, la connaissance de l'aléa glissements de terrain est limitée : les données d'inventaires et les couvertures cartographiques disponibles sont parcelaires et disparates et restent peu accessibles à la population et aux autorités pour une application réglementaire.

La Nouvelle-Calédonie, via le Service de la Géologie (SGNC) de la DIMENC (Direction de l'industrie, des mines et de l'énergie), en partenariat avec le BRGM, a entrepris depuis fin 2018 un programme pluriannuel de cartographie de l'aléa mouvements de terrain à l'échelle du pays. Ce programme s'inspire initialement des PPRNP (Plan de Prévention des Risques Naturels Prévisibles) et a défini une liste de 15 communes prioritaires sur 33. Le programme comprend la définition d'une méthode (i.e. test, calage et validation) sur la commune pilote du Mont Dore avant un déploiement sur les autres communes.

Plusieurs facteurs ont motivé le choix du Mont Dore comme commune pilote pour le programme. Bien que largement occupée par des terrains rattachés à la nappe des péridotites (91 % des 631 km² de sa surface), la commune offre une bonne représentabilité des contextes géologiques et géomorphologiques néo-calédoniens. Outre les terrains ultrabasiques de la nappe des péridotites, il est possible d'observer à la fois des terrains du socle volcano-sédimentaire (6 %) ainsi que des terrains rattachés à la nappe de Poya (1 %) dans des secteurs faciles d'accès. Le relief est également varié avec la présence de secteurs montagneux au réseau hydrographique encaissé, de plaines et de falaises. Enfin, la commune présente des phénomènes pour lesquels il existe des connaissances historiques valorisables.

La démarche suivie au Mont Dore pour la détermination quantitative d'un aléa comprend :

- la réalisation d'un inventaire ;
- la définition d'une typologie ;
- la mise à jour de la cartographie du régolithe ;
- le calcul de la susceptibilité pour chaque type de phénomène observé selon les préconisations du JTC-1³ ;
- le calcul de la propagation des phénomènes à partir de la notion d'angle d'énergie et l'intégration de la probabilité temporelle d'occurrence ;
- l'intégration de l'intensité à partir d'une estimation du volume mobilisé ou de la vitesse selon le type de phénomène. La démarche pour les étapes 4 à 6 est déclinée pour les différents types d'objets retenus.

Rappel sémantique et méthodologique

L'aléa correspond à la probabilité spatiale (susceptibilité) et temporelle 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). 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. Les méthodes ont toutes le même objectif et sont fondées sur la relation entre les phénomènes existants et les facteurs environnementaux du site investigué. On distingue deux méthodes principales : qualitative et quantitative (Fig. 1).

L'approche retenue en Nouvelle-Calédonie est fondée sur la méthode quantitative, considérée comme objective et reproductible pour des environnements similaires aux caractéristiques environnementales proches dès lors que le même jeu de variables est disponible (Thiery *et al.*, 2020).

Inventaire des phénomènes

Etat des connaissances

Les connaissances sur les glissements de terrain en Nouvelle-Calédonie relèvent essentiellement des travaux menés par le BRGM en collaboration avec la DIMENC entre 1998 et 2007, dans le cadre d'un programme de cartographie des risques naturels. Ce programme intitulé « Cartographie des aléa naturels (mouvements de terrain et érosion) en Nouvelle-Calédonie : étude préalable à l'élaboration d'un plan de prévention des risques » a permis la réalisation d'atlas sur 16 zones d'intérêt avec : i) mise à jour de la cartographie des formations superficielles à 1/25 000, ii) inventaire des phénomènes et iii) de

1. DIMENC/SGNC, Nouvelle-Calédonie. Courriels : yael.guyomard@gouv.nc ; mathieu.mengin@gouv.nc ; olivier.monge@gouv.nc

2. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Courriels : b.colas@brgm.fr ; y.thiery@brgm.fr ; v.mardhel@brgm.fr

3. 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 (Fell *et al.*, 2008).

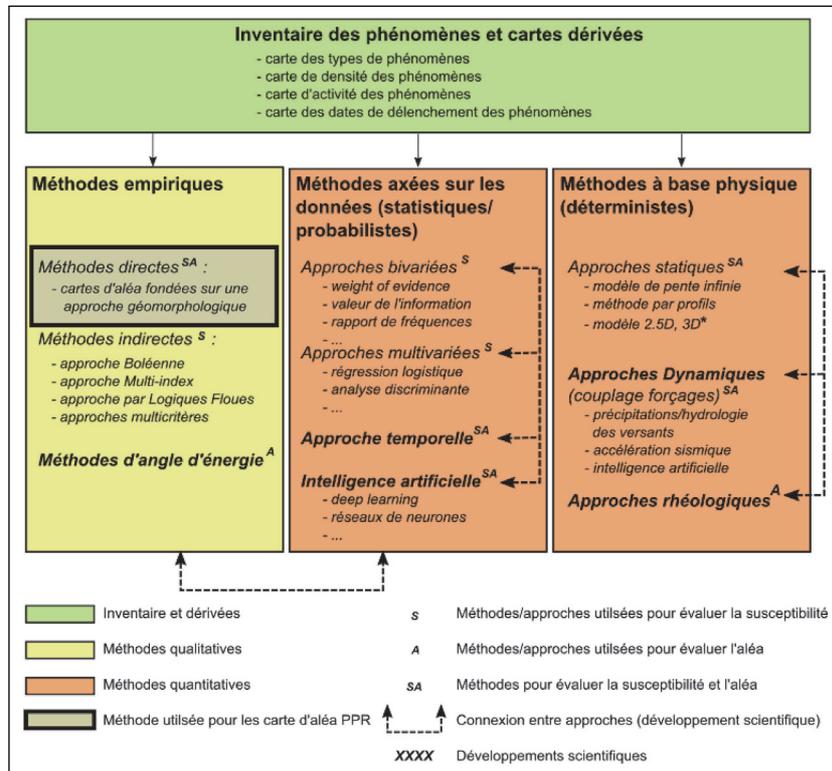


Figure 1. Méthodes pour évaluer la susceptibilité et l'aléa glissement de terrain (d'après Thiery et al., 2019).

façon non systématique, une cartographie experte de la susceptibilité aux glissements de terrain sur la base de critères géologiques (lithologie, altération), géomorphologiques et topographiques (pentes). Ces travaux ont permis la réalisation en 2003 d'un document de synthèse dont la principale conclusion fait de la géologie du substrat un facteur déterminant sur la nature et la distribution spatiale des formations d'altération. Il en résulte une distinction fondamentale entre le contexte du substrat volcano-sédimentaire et celui du substratum ultrabasique des massifs de péridotites. Les péridotites offrent un contexte favorable à certains phénomènes les plus redoutables et destructeurs (Maurizot, 2007) comme les laves torrentielles survenues à Houailou en 2016.

Par ailleurs, des travaux spécifiques ont été menés sur des localités précises comme le massif du Mont Dore et sa zone glissée de grande ampleur (Rouet, 2009). Des relevés disponibles (observations de terrain, localisation de phénomènes, coupes géologiques, etc...) auprès des services techniques ont également été valorisés. En dehors de la commune du Mont Dore, des travaux plus récents ont été consultés, notamment des études sur les laves torrentielles du massif de Bel Air à Houailou (BRGM, 2017 ; bureau d'étude GeolImpact, 2017).

Mise à jour de l'inventaire

Il n'existe pas à l'heure actuelle de base de données des mouvements de terrain généralisée (incluant les glissements de terrain) et homogène sur l'ensemble du territoire de la Nouvelle-Calédonie. Ainsi, une base de données fondée sur une analyse multidate de photographies aériennes, images satellites sous Google Earth et d'observations de terrain pour le projet a été constituée. Parmi les jeux de photos aériennes disponibles, deux jeux (1976 et 2008) couvrant l'ensemble de la Grande Terre sont disponibles sous SIG avec orthorectification et géoréférencement. Ces derniers ont été utilisés comme source de référence pour l'identification des différents types de glissement de terrain. Les images Google Earth couvrant les périodes plus proches (entre 2003 et 2019) ont permis de préciser temporellement les phénomènes plus récents. En complément, sont également valorisés les phénomènes signalés dans diverses

sources : atlas BRGM, articles de presse, documents techniques sur la thématique.

Ainsi, sur la commune du Mont Dore, 1682 objets ont été recensés. Le parti pris a été de relever sous SIG les enveloppes des glissements de terrain, en distinguant d'une part l'enveloppe globale du phénomène incluant la zone de rupture (ou d'ablation) et la zone de propagation (ou d'accumulation), et d'autre part l'enveloppe de la zone de rupture seule. Au final, deux bases de données spatialisées sont créées : i) une base de données spatialisée des enveloppes totales des objets recensés et ii) une base de données spatialisée des zones de rupture des mêmes objets. Des reconnaissances de terrain ont été menées sur des secteurs tests pour valider les emprises.

La saisie de ces enveloppes permet d'intégrer des informations relatives à la morphométrie des phénomènes par traitement semi-automatique comme la largeur, la longueur, les pentes, les dénivelés, l'angle d'énergie, à partir du MNT à 10 m de résolution. Outre la localisation et la géométrie, la période d'occurrence est estimée à partir de l'analyse diachronique des orthophotographies (Tabl. 1). La précision temporelle comprend donc trois périodes mentionnées dans le tableau 1. La précision spatiale est quant à elle liée à la précision des orthophotographies et des images Google Earth (ex. 1/20 000 pour

RISQUES NATURELS

la campagne de 1976). Toutefois, les reconnaissances de terrain et la prise de points GPS ont montré que la précision spatiale était inférieure à 5 m, ce qui au regard de l'échelle d'analyse demandée s'avère correct.

Typologie des mouvements

Les reconnaissances de terrain et l'analyse des phénomènes figurant dans l'inventaire ont permis de retenir 6 grands types de mouvement de terrain (Tabl. 2) qui sont décrits ci-après.

Les glissements grossiers (GG)

Les glissements grossiers, ou glissements de débris, se déclenchent typiquement dans les massifs de péridotites et mobilisent principalement la saprolite grossière rocheuse ainsi que des matériaux latéritiques. L'initiation est brutale, sans précurseur. La propagation est considérée comme rapide ($>$ plusieurs $m.s^{-1}$; Cruden et Varnes, 1996) jusqu'à la zone de dépôt. Il s'agit du type de glissement de terrain le plus commun, représentant 73 % des événements répertoriés.

Les glissements fins (GF)

Les glissements fins sont très courants en contexte volcano-sédimentaire dans les profils d'altération argileux, et se déclenchent également en domaine ultrabasique dans les profils d'altération latéritique et la saprolite fine. Les matériaux issus de l'altération et/ou du colluvionnement sont fins, les éléments rocheux peu abondants. La rupture initiale est lente à brutale avec de fréquents précurseurs (i.e. fissures de traction). La propagation est lente à rapide (de quelques $m.h^{-1}$ à quelques $m.s^{-1}$; Cruden et Varnes, 1996), avec une accumulation en pied de phénomène et étalement possible selon le niveau de saturation des matériaux (17 % des événements répertoriés).

COMMUNE	Nombre de glissements de terrain		
	ANCIEN (<1976)	RECENT (1976-2008)	ACTUEL (>2008)
MONT-DORE	1481	176	25

Tableau 1. Nombre de mouvements de terrain par période temporelle répertoriés à l'échelle de la commune du Mont Dore.

COMMUNE	Glissements Fins GF	Glissements Grossiers (GG)	Laves Torrentielles (LT)	Coulées (COUL)	Chute de Blocs (CB)	Grands Glissement de Versant (GGV)
MONT-DORE	279	1235	68	11	65	24

Tableau 2. Type de phénomènes glissements de terrain répertoriés sur la commune du Mont Dore.

Les laves torrentielles (LT)

Les connaissances bibliographiques et les relevés d'inventaire montrent que ces phénomènes ne sont connus que sur substratum ultrabasique. Le matériau, saturé en eau, est un mélange extrêmement hétérogène de gros blocs (parfois supérieurs à plusieurs m^3), de blocs, de graviers et d'une matrice latéritique fine. L'initiation se fait par glissement rotationnel ou translationnel ou encore éboulement rocheux. La propagation se concentre dans les axes des talwegs et se fait par bouffées successives (Remaître, 2006). Les matériaux sont principalement issus de l'arrachement des berges et du lit des talwegs. Des levées latérales sont communes ainsi que la présence d'un bourrelet frontal organisé en lobes (4% des événements répertoriés).

Les coulées (COUL)

Il s'agit d'une évolution d'un glissement fin qui évolue en coulée dans un contexte morphologique et hydrologique favorable. Les coulées mobilisent des horizons d'altération et des matériaux colluvionnés de nature argileuse sur substratum volcano-sédimentaire ou de nature latéritique/saprolitique fin sur substratum ultrabasique. La teneur en eau et la pente contribuent à la propagation du phénomène sur le versant (1% des événements répertoriés). Compte tenu du faible nombre d'objets identifiés, les coulées n'ont pas été retenues pour la suite de l'étude.

Les chutes de blocs (CB)

Les chutes de blocs concernent toutes les formations géologiques capables de former des falaises, escarpements ou versants rocheux à fortes pentes. Elles sont typiquement observées dans les massifs péridotitiques et dans les barres calcaires. La rupture est brutale, généralement sans précurseurs, avec des détachements de blocs, des éboulements de dièdres et de pans dans un matériau rocheux fracturé. La propagation, très rapide (5 à 10 $m.s^{-1}$; Cruden et Varnes, 1996), se fait par chutes et rebonds avec fragmentation éventuelle des blocs et cesse par perte graduelle d'énergie cinétique ou arrêt contre un obstacle (4% des événements répertoriés).

Les grands glissements de versant (GGV)

Les massifs de péridotites sont connus pour être le siège de grands glissements de versant (ou deep-seated gravitational slope deformation en anglais, Hungr *et al.*, 2014). 200 objets de taille pluri-hectométrique sont répertoriés à partir d'observations géomorphologiques dans les massifs péridotitiques et n'ont pas d'équivalent sur le socle volcano-sédimentaire ou les basaltes de la nappe de Poya (Maurizot, 2007). Ils sont interprétés comme des témoins du démantèlement précoce des massifs. La

morphologie typique montre une surface de rupture anguleuse et abrupte, une masse glissée aval avec développement de profils d'altération latéritique.

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. 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

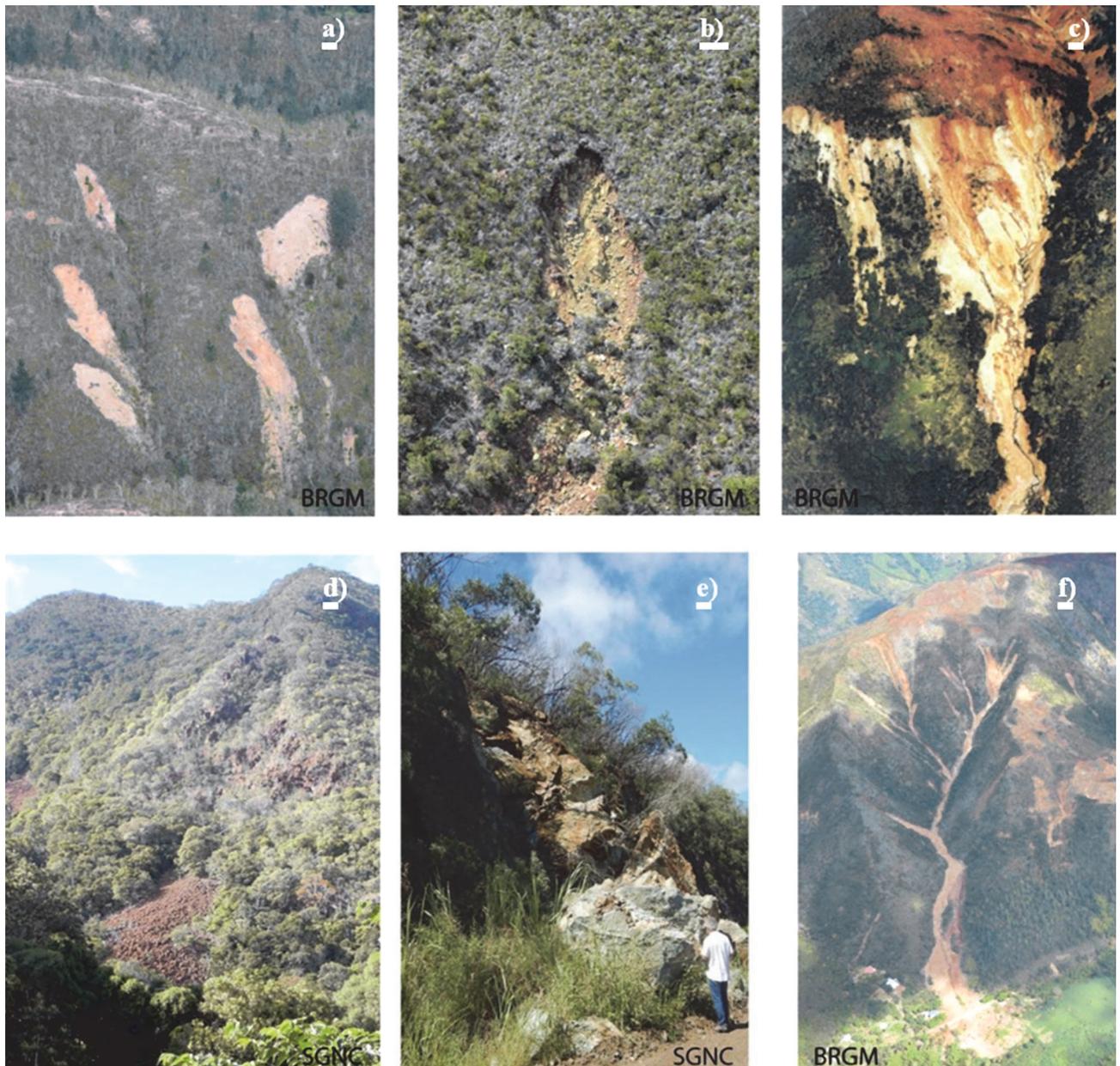


Figure 2. Illustration des différents types de glissements de terrain observés en Nouvelle-Calédonie. a) vue sur les GF dans les formations crétacées (Houailou 2016) ; b) GG dans péridotites (Houailou 2016) ; c) Coulée latéritique (Massif du Mont Dore 1988) ; d) Barre rocheuse dans les péridotites avec accumulation de blocs en pierrier (Canala) ; e) Bloc décroché (Houailou 2019) ; f) Lave torrentielle (Houailou, 2016).

indices de déformation du réseau routier. Ces phénomènes sont considérés comme ayant une récurrence faible à l'échelle des temps géologiques (Maurizot, 2007) et ne font pas l'objet d'une caractérisation de l'aléa en tant que tels ; seuls les phénomènes périphériques sont pris en compte.

Mise à jour de la cartographie du régolithe

Un des traits caractéristiques des paysages calédoniens est la présence généralisée des formations du régolithe. Bien que l'altération soit ubiquiste, son expression reste moins développée sur le domaine volcano-sédimentaire. L'argilitisation conduit à la formation de profils relativement peu épais, typiquement de l'ordre de quelques mètres, et exceptionnellement jusqu'à plus d'une dizaine de mètres sur certains faciès et de façon localisée. En comparaison, le domaine des massifs péridotiques présente un développement de profils d'altération latéritique bien plus important, parfois sur des épaisseurs pluri-décamétriques.

Le régolithe comprend l'ensemble des formations superficielles résultat de processus supergènes. Sont distinguées : i) les formations en place issues de l'altération *in situ* et ii) les formations remaniées qui regroupent l'ensemble des formations issues d'une remobilisation sur versant (Dewolf et Bourrié, 2008). Les formations en place comprennent typiquement les faciès du profil d'altération des péridotites (saprolite grossière, latérites, cuirasse), de même que les horizons argilités des roches volcano-sédimentaires. Les formations remaniées regroupent l'ensemble des formations issues d'un remaniement lors d'une phase de transport plus ou moins longue sans intervention de la diagenèse.

Compte tenu des phénomènes redoutés en domaine ultrabasique, un effort particulier y a été mené pour l'amélioration de la cartographie des formations du régolithe. Cette mise à jour de la cartographie a notamment porté sur les formations remaniées qui étaient jusqu'à présent cartographiées de manière non systématique. Une distinction sur la nature des matériaux a été introduite entre faciès à dominante rocheuse, à blocs, et faciès à dominante latéritique.

Méthodologie retenue

La méthodologie pour cartographier l'aléa glissements de terrain comprend trois étapes avec i) l'analyse de la susceptibilité à la rupture, ii) l'intégration de la propagation et de l'intensité des phénomènes, iii) l'analyse de l'aléa comprenant la probabilité annuelle d'avoir les dif-

férents types de phénomène pris en compte et l'évaluation de l'atteinte par type de phénomène.

Analyse de la susceptibilité

La méthode déployée consiste à pondérer l'influence de facteurs permanents pour chaque type de phénomène selon une approche statistique bivariée (Weight of evidence, Bonham-Carter, 1996) comprenant six étapes détaillées dans Thiery *et al.*, 2007. La méthodologie repose sur une carte par type d'évènement, une analyse de sensibilité, des tests statistiques de validation, le reclassement des cartes en 5 classes de susceptibilité fondées sur les seuils établis par le JTC-1 (Fell *et al.*, 2008).

Les probabilités de rupture sont calculées par type de phénomène à partir des surfaces de rupture de l'inventaire sur un secteur de calage correspondant à la moitié ouest de la commune. À l'issue de l'analyse de sensibilité, quatre variables (ou facteurs de prédisposition) ont été retenues :

- la nature géologique du substratum rocheux ;
- la nature lithologique des formations superficielles suite à la mise à la jour de la cartographie du régolithe (les entités géologiques sont requalifiées en termes de formations en place très minces / minces / épaisses / cuirasse démantelée ou de formations remaniées anthropiques / colluvions / colluvions à blocs / formations alluviales) ;
- un paramètre intégrateur descriptif des paysages et des morphologies (LANDFORM : versants, crêtes, talwegs, etc...Iwahashi and Pike, 2007) ;
- la pente.

Analyse de la propagation et de l'intensité

Propagation

Pour les glissements grossiers, les glissements fins et les laves torrentielles, la propagation est calculée avec l'outil Flow-R (Horton *et al.*, 2013). Il s'agit d'un modèle empirique spatialement distribué pour l'évaluation de la susceptibilité aux glissements gravitaires. Il permet d'effectuer une évaluation du périmètre d'atteinte fondée sur le choix de différents algorithmes de propagation empiriques (sur la base de lois de frottement et d'algorithmes de direction d'écoulement) éprouvés aux échelles locales et régionales à partir de zones sources. Les zones sources sont issues de l'étape précédente (susceptibilité). Le volume des débris écoulés ainsi que la hauteur des masses propagées ne sont pas évalués.

Pour les chutes de blocs, la propagation est éva-

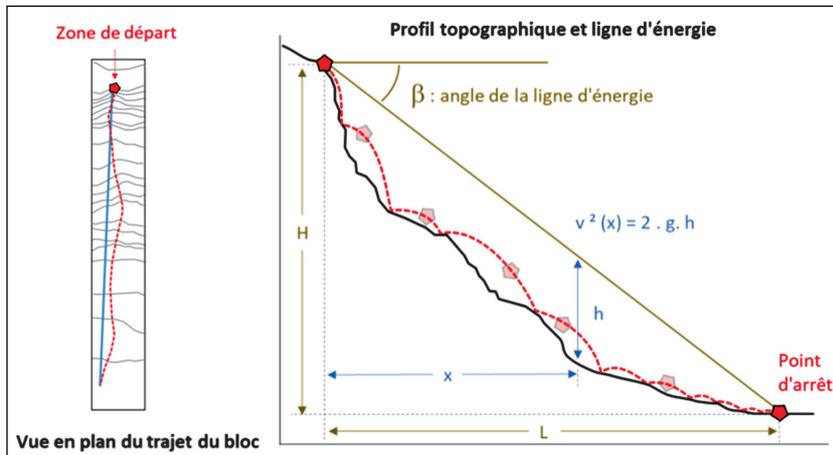


Figure 3. Principe de la ligne d'énergie (angle d'atteinte β), v : vitesse en un point de trajectoire (Hein, 1932).

luée à partir de l'application de la méthode dite de la ligne d'énergie déclinée en 3D à l'appui du logiciel ConeFall (Jaboyedoff et Labieuse, 2011). La méthode repose sur le principe qu'un bloc ne peut progresser sur une pente que si celle-ci est suffisamment raide. 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. Cette ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β , l'angle de la ligne d'énergie. À partir du profil en long de la pente depuis une zone de départ, on peut alors, connaissant la valeur de l'angle β , déterminer le point maximal probable qu'atteindra tout projectile qui se détachera de la zone de départ (Fig. 3). Compte tenu de la possibilité de déviation de leur trajectoire, suite à leur forme ou bien aux obs-

tales rencontrés, les blocs peuvent 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. Quant à la valeur de l'angle du cône de déviation, elle dépend de la configuration topographique du versant étudié. La valeur la plus communément utilisée est de l'ordre de 30° . L'outil ConeFall permet de cartographier l'extension prévisible des cônes de propagation et donc des atteintes probables, selon les valeurs de l'angle de la ligne d'énergie choisies.

Intégration de l'intensité

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

La classification MEZAP (Méthode d'Évaluation du Zonage de l'Aléa chute de Pierres) retenue pour qualifier l'aléa de référence pour les phénomènes de chute de bloc (CB) est donnée par le tableau 3.

Pour les autres phénomènes (LT, GG, GF), une approche selon la vitesse de propagation est privilégiée au regard des données effectivement accessibles et sur la base des recommandations internationales (Tabl. 4).

Analyse de l'aléa

La détermination de l'aléa est réalisée en deux étapes complémentaires, en intégrant la probabilité

Indices d'intensité	Description	Indications sur les dommages
Très faible	Le volume unitaire pouvant se propager est inférieur ou égal à 50 litres ($0,05 \text{ m}^3$)	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 $0,25 \text{ m}^3$)	Peu de dommage au gros œuvre, perturbation des activités humaines.
Moyen	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur ou égal à $0,25 \text{ m}^3$ 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

Tableau 3. Échelle d'intensité retenue pour les CB (Colas, 2020).

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		
0.000005 =>	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

Tableau 4. Échelle d'intensité retenue pour les GF, GG et LT (Colas, 2020).

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

Tableau 5. Recommandations pour les descriptifs pour le zonage d'aléa (JTC-1, Fell et al. 2008) et adaptation au projet.

d'atteinte pour chaque type de phénomène sur la base de la susceptibilité, de la probabilité de propagation et de la probabilité annuelle de rupture.

Notion d'atteinte

L'évaluation de l'atteinte est issue du croisement de la probabilité de rupture et de la probabilité de propagation (Tabl. 6). La rupture intègre une dimension temporelle (Tabl. 5). Mais une fois la rupture initiée, la propagation de la masse en mouvement est indépendante du temps.

Aléa par type de phénomène

L'aléa par phénomène est obtenu par croisement de matrice occurrence / intensité. L'évaluation de l'intensité des phénomènes varie selon le type (Tabl. 3 : CB et Tabl. 4 : GG, GF, LT). La matrice de croisement est commune aux différents phénomènes. Les niveaux d'aléa pour chaque type de phénomène sont comparables entre eux indépendamment du phénomène considéré. Les classes pour qualifier les atteintes sont celles définies pour la susceptibilité (Tabl. 7).

		Probabilité de propagation							
		Négligeable	Très faible	Faible	Moyenne	Fort	Très forte		
Probabilité annuelle de rupture		10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	
Très faible	10^{-5}	Nul à négligeable				Négligeable	Très faible	Faible	
Faible	10^{-4}	Nul à négligeable			Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	
Moyen	10^{-3}	Nul à négligeable		Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort	
Fort	10^{-2}	Nul à négligeable	Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort	
Très fort	10^{-1}	Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort	Très fort	
Très fort	1	Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort	Très fort	
Valeur d'angle (°) de la ligne d'énergie	GG		10	13	17	23			
	GF		7	9	12	15			
	LT		12 (calcul des probabilités relatives directement à partir de <u>FlowR</u>)						
	CB		28	30	32	35	38		

Tableau 6. Matrice d'atteinte croisant rupture et propagation des aléas (Colas, 2020).

Phénomène	Intensité				
	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
GF, GG, LT	Extrêmement lent	Très lent qq mm / an	Lent à rapide # qq m / jour	Très rapide # qq m / min	Extrêmement rapide
CB	Pierres	Petits blocs	Blocs	Gros blocs	Très gros blocs
Probabilité d'occurrence	Négligeable	Négligeable	Très faible	Faible	Faible
	Très faible	Négligeable	Faible	Modéré	Modéré
	Faible	Négligeable	Faible	Elevée	Elevée
	Moyen	Très faible	Modéré	Elevée	Elevée
	Elevée	Faible	Modéré	Elevée	Très élevée
Très élevée	Faible	Modéré	Elevée	Très élevée	
			GF, CB	GG	LT

Tableau 7. Matrice d'aléa, principe général (modifié d'après Colas, 2020).

Résultats - Discussion

Une carte d'aléa est produite pour chaque type de phénomène GG, GF, LT et CB au format SIG (raster ©ArcGis). Ces quatre cartes sont agrégées dans une carte unique en retenant pour chaque maille du raster la valeur d'aléa la plus pénalisante. Une codification permet de retrouver le ou les types de phénomène concernés. La valeur d'aléa finale est codée suivant l'échelle suivante : 0 : Nul à négligeable ; 1 : Très faible ; 2 : Faible, 3 : Moyen, 4 :

Elevé. L'échelle de validité retenue est le 1/25 000 (Fig. 4).

La synthèse des surfaces par niveau d'aléa sur l'ensemble de la commune (Tabl. 8) montre que 63 % (400 km²) du territoire de la commune est concerné par un niveau d'aléa très faible à élevé. Les niveaux d'aléa très faible à faible couvrent 42 % (265 km²) du territoire (19 % et 23 % respectivement). Les niveaux d'aléa modéré couvrent 17 % (109 km²). Enfin, le niveau d'aléa élevé couvre 4 % (26 km²) de la commune ; il est associé à la propagation des laves torrentielles dans les talwegs.

Les taux de reconnaissance des zones de rupture ont été calculés pour les différents types de phénomène. Ils le sont d'abord sur un secteur de calage équivalent à la

moitié ouest de la commune avec introduction de 50 % des événements. Les 50 % restants sont ensuite introduits dans la simulation de la susceptibilité pour recalculer ces taux. Enfin, les taux sont recalculés sur l'ensemble du territoire de la commune.

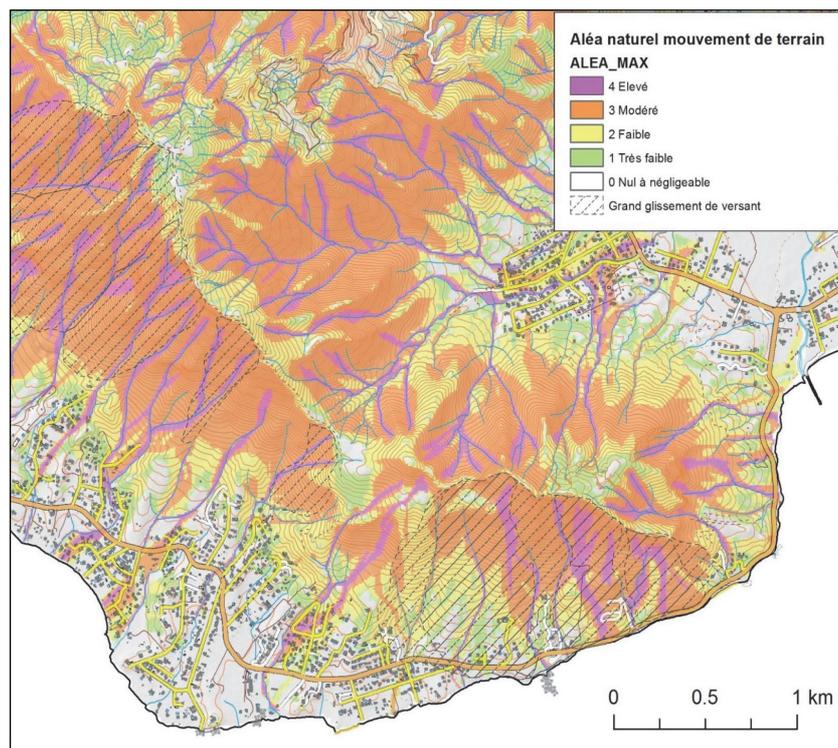


Figure 4. Exemple de rendu cartographique de la carte d'aléa générale intégrée.

	GG		GF		LT		CB		Alea	
	km ²	%								
Nul à négligeable	260	41	311	49	376	60	479	76	231	37
très faible	153	24	99	16	108	17	55	9	122	19
Faible	115	18	217	34	85	14	47	7	144	23
Modéré	104	16	4	1	36	6	51	8	109	17
Elevé	0	0	0	0	26	4	0	0	26	4
Total Aléas	371	58	320	51	255	41	153	24	400	63

Tableau 8. Synthèse des surfaces par niveau d'aléa et par type de phénomène.

Taux de reconnaissance sur les classes de susceptibilité modérés, forte et très forte				Taux de non reconnaissance sur les classes de susceptibilité très faible			
TYPE	SECTEUR CALAGE (50 % données)	SECTEUR CALAGE (50 % données restantes)	COMMUNE MONT DORE	TYPE	SECTEUR CALAGE (50 % données)	SECTEUR CALAGE (50 % données restantes)	COMMUNE MONT DORE
GG	93%	93%	94%	GG	1.4%	1.4%	1.4%
GF	76%	75%	65%	GF	5.0%	3.5%	5.4%
LT	82%	73%	76%	LT	4.4%	2.1%	4.0%
CB	95%	88%	95%	CB	0.0%	0.0%	2.6%

Tableau 9. Taux de reconnaissance des événements selon les phénomènes (modifié d'après Colas, 2020).

Les taux recalculés pour les classes de susceptibilité à la rupture « modérée », « forte » et « très forte » montrent des valeurs tout à fait satisfaisantes pour les GG et les CB (>94 %). Le taux de 76 % pour les LT est satisfaisant. Seuls les GF montrent un taux de reconnaissance de seulement 65%. Les différences s'expliquent par la plus ou moins grande richesse de l'inventaire et le nombre plus ou moins important d'objets identifiés (respectivement 279 et 68 de GF et LT comparativement aux 1235 de GG), associés à un MNT (10 m) relativement moins précis qui entraîne un lissage des données de pente et de morphologie. Cependant, ce taux de 65% est jugée acceptable.

Outre la validation statistique, les cartes produites ont été confrontées aux observations de terrain afin d'apprécier la finesse des rendus. Ainsi, une lave torrentielle et un glissement grossier se sont produits dans le grand sud de la commune suite à un épisode orageux en février 2020 (385 mm en 6 heures, récurrence centennale) ; les secteurs de rupture et la propagation ont été correctement identifiés.

Conclusion

La méthode apparaît satisfaisante du point de vue des niveaux de reconnaissance statistique qu'elle apporte sur

les phénomènes. Basée sur des recommandations internationales, en mettant en œuvre une approche quantitative, la méthode semble robuste, reproductible et innovante. Elle permet d'envisager une réévaluation de la susceptibilité et de l'aléa à partir d'un MNT de meilleure qualité.

La carte produite permet d'améliorer grandement la connaissance des phénomènes et de leur emprise spatiale en termes de susceptibilité à la rupture et de propagation. L'échelle de validité retenue est le 1/25 000. La prise en compte de l'intensité permet d'envisager la traduction des cartes d'aléa en support pour l'aide à la décision et à l'aménagement. Au regard des résultats, l'approche est applicable sur l'ensemble des autres communes du programme et permettra à terme d'avoir une couverture quantitative et homogène de l'aléa sur les 15 communes.

Bibliographie

- Colas B., Thiery Y., Guyomard Y., Mengin M., Vandromme R. et Monge O., 2020. Cartographie de l'aléa mouvement de terrain, Commune du Mont Dore. (Nouvelle-Calédonie). Echelle 1 : 25 000. Rapport final. BRGM/RP-70346-FR
- Dewolf Y. et Bourrié G. (Eds.), 2008. Les formations superficielles : Genèse – Typologie – Classification – Paysages et environnements – Ressources et risques, 896 p. Ellipses.
- Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E. et Savage W., 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning; *Engineering geology* 102, 85-98.
- Horton P., Jaboyedoff M., Rudaz B. et Zimmermann M., 2013. Flow-R A model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 13, 869-885.
- Hungr O., Leroueil S. et Picarelli L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* vol.11, issue 2.
- Iwahashi J. et Pike R.J., 2007. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nestedmeans algorithm and a three-part geometric signature, *Geomorphology*, Vol. 86, 409-440.
- Jaboyedoff M. et Labiouse V., 2011. Technical note: preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 11, 819-828.
- Maurizot P., 2003. L'aléa naturel mouvement de terrain en Nouvelle-Calédonie – Synthèse des connaissances. Rapport BRGM RP-52213-FR, 179 p.
- Maurizot P., Rouet I., Robineau B., Allenbach M. et Parisot J.-C., 2007. Mécanismes fondamentaux des mouvements de terrain dans les massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie. Rapport BRGM RP-55041-FR.
- Remaitre A., 2006. Morphologie et dynamique des laves torrentielles. Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud), Thèse de doctorat, Université de Caen.
- Rouet I., 2009. Caractérisation et éléments de quantification d'aléas naturels liés à l'évolution des versants dans les massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie. Thèse de doctorat. Université de Nouvelle-Calédonie.
- Thiery Y., 2007. Susceptibilité du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) aux mouvements de versant : cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste. Thèse de doctorat, Université de Caen.
- Thiery Y., Malet J.-P., Sterlacchini S., Puissant A. et Maquaire O., 2007. Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales : application to a complex mountainous environment, *Geomorphology*, Vol. 92, 38-59.
- Thiery Y. et Terrier M., 2018. Évaluation de l'aléa glissements de terrain : état de l'art et perspectives pour la cartographie réglementaire en France, *Rev. Fr. Geotech.*, 156.
- Thiery Y., Terrier M., Colas B., Fressard M., Maquaire O., Grandjean G. et Gourdière S., 2020. Improvement of landslide hazard assessments for regulatory zoning in France : state of the art perspectives and considerations, *Int. Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 47.