

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

Rapport final

BRGM/RP- 77240 -FR
DIMENC SGNC-2022(17)
Février 2024

Document public

Cartographie de l'aléa mouvement de terrain Commune de VOH (Nouvelle Calédonie) Echelle 1:25 000

Rapport final

BRGM/RP-77240-FR
DIMENC SGNC-2022(17)
Février 2024

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

B. Colas, Y. Thiery, Y. Guyomard, M. Mengin, M. Premaillon, M. Edet, O. Monge

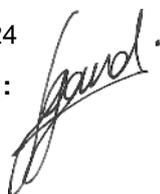
Vérificateur :

Nom : S. Gourdier

Fonction : Ingénieur
géotechnicien

Date : 23 février 2024

Signature :



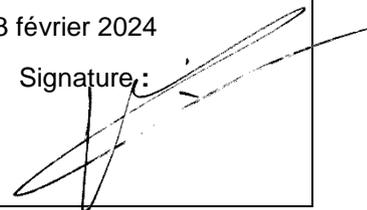
Approbateur :

Nom : V. Mardhel

Fonction: Directeur Antenne
Nouvelle Calédonie

Date : 23 février 2024

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, susceptibilité, mouvement de terrain, glissement de terrain, chutes de blocs, laves torrentielles, Nouvelle Calédonie, Voh

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

Colas B., Thiery Y., Guyomard Y., Mengin M., Premaillon M., Edet M., Monge O. (2024) – Cartographie de l'aléa mouvement de terrain. Commune de VOH (Nouvelle-Calédonie). Echelle 1:25 000^{ème}. Rapport final. BRGM/RP-77240-FR DIMENC SGNC 2022(17), 43 p., 27 illustrations, 7 annexes.

SYNTHESE

Lors des événements météorologiques intenses de novembre 2016, la commune de Voh a éprouvé des phénomènes de mouvements de terrain dramatiques (8 victimes). Cette menace fait partie des risques naturels auxquels le pays est soumis, dont les plus notables sont les risques cycloniques (vent, pluie, submersion), les inondations, les incendies, les séismes et les tsunamis.

L'aléa « mouvements de terrain » à l'échelle du pays reste encore méconnu et insuffisamment pris en compte par les populations et les autorités. En conséquence, une démarche de caractérisation des aléas « mouvement de terrain » a été engagée à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie. Ainsi, dans le cadre d'un programme pluriannuel, le gouvernement de Nouvelle-Calédonie, grâce au service géologique de la DIMENC, et le BRGM ont convenu de mutualiser leurs moyens et leurs compétences pour établir des cartes communales d'aléas mouvements de terrain, à l'échelle du 1 : 25 000^{ème}.

La méthode d'évaluation des aléas est relativement innovante, déclinée par type de phénomène (éboulement rocheux, glissements fins et grossiers et laves torrentielles), basée sur une approche quantitative intégrant intensité (ampleur) et probabilité d'occurrence des phénomènes considérés. Cette démarche est détaillée dans un rapport spécifique (BRGM/RP-72236-FR / DIMENC/SGNC-2022(20)). L'ensemble des réalisations sont menées de façon partenariale entre le service de la géologie de Nouvelle Calédonie (SGNC) et le BRGM, suivant l'état de l'art porté par les groupes de travaux nationaux relatifs aux mouvements de terrain.

Le présent rapport se veut très illustré et abordable par le plus grand nombre, dans un souci d'information et de prévention. Il expose et présente pour la commune de VOH :

- Le contexte communal ;
- La démarche méthodologique ;
- L'inventaire des phénomènes passés ;
- Les données produites et utilisées ;
- Les résultats.

Les annexes permettent le cas échéant d'approfondir certains points.

Ce programme de cartographie de l'aléa « mouvements de terrain » est la première brique de la politique publique de gestion des risques (PPGR, 10/2022), élaborée à la demande du gouvernement de Nouvelle-Calédonie et coordonnée par la direction de la sécurité civile et de la gestion des risques (DSCGR). Pour rappel :

- La Nouvelle-Calédonie est compétente en matière de sécurité civile, et donc de prévention des risques, depuis que ce transfert est effectif (1er janvier 2014).
- Les Plans de Prévention des Risques (PPR) naturels prévisibles ne s'appliquent pas en Nouvelle-Calédonie.

A la place, il est envisagé de superposer l'aléa aux enjeux actuels ou futurs (définis en concertation avec les collectivités locales), afin que des recommandations voire des prescriptions, en matière d'aménagement ou de construction, puissent être appliquées le cas échéant, selon des principes directeurs à définir, ou le volontarisme de communes et provinces.

Sommaire

Contenu

1	PRESENTATION DE LA COMMUNE	11
2	PRESENTATION DE LA DEMARCHE.....	13
2.1	Evaluation de la rupture	13
2.2	Evaluation de la propagation	14
2.3	Evaluation de l'aléa	14
3	INVENTAIRE DES EVENEMENTS PASSES.....	16
4	LES DONNEES NECESSAIRES : VARIABLES PREDICTIVES	23
4.1	Données géologiques.....	23
4.1.1	Le substratum géologique.....	23
4.1.2	Les formations superficielles du régolithe	23
4.2	Données morphologiques.....	28
4.2.1	Pentes	28
4.2.2	Indice de position topographique (TPI)	29
4.2.3	Landform	30
5	RESULTATS	31
5.1	Cartographie de l'aléa mouvements de terrain	31
5.2	Validation des résultats	32
5.2.1	Rétro-analyse : aléa de rupture.....	32
5.2.2	Rétro-analyse : enveloppes globales	33
5.3	Enjeux et risques.....	41
6	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	43
7	BIBLIOGRAPHIE.....	45
7.1	Guides.....	45
7.2	Rapports	45
7.3	Documents académiques	45
8	ANNEXES.....	47
8.1	Annexe 1 – Lexique des termes utilisés	47
8.2	Annexe 2 – Indicateurs morphométriques des évènements	54
8.3	Annexe 3 – Susceptibilité de rupture par phénomène	56
8.4	Annexe 4 – Méthode d'évaluation de l'aléa mouvement de terrain	73

8.5	Annexe 5 – Application sur la commune de VOH	79
8.6	Annexe 6 – Atlas cartographiques : phénomènes de mouvement de terrain	87
8.7	Annexe 7 – Atlas cartographiques : aléa mouvement de terrain	89

ILLUSTRATIONS

Illustration 1 – Présentation de la commune de Voh.....	12
Illustration 2 – Matrice d'évaluation de l'aléa croisant Intensité et Atteinte	14
Illustration 3 – Synthèse méthodologique	15
Illustration 4 – Exemple de cartographie des enveloppes des mouvements de terrain sur la commune.....	17
Illustration 5 – Localisation des différents types de phénomènes de mouvements de terrain recensés sur la commune de Voh (Annexe 6 – Atlas cartographiques : phénomènes de mouvement de terrain)	18
Illustration 6 – Différents types de phénomènes :	19
Illustration 7- Contexte de chute de blocs sur la commune de Voh.	20
Illustration 8 – Vue panoramique, Grand glissement de versant, Tribu de Boyen, commune de Voh.	21
Illustration 9 – Dénombrement des phénomènes de mouvements de terrain par période	22
Illustration 10 – Distribution des surfaces [m ²] et des pentes [°] par typologie de mouvements de terrain	22
Illustration 11 – Cartographie du substratum géologique.....	25
Illustration 12 – Exemple de mise à jour de la carte du régolithe.....	26
Illustration 13 – Cartographie des classes de formations du régolithe sur la commune de Voh	27
Illustration 14 – Cartographie des classes de pentes sur la commune de Voh	28
Illustration 15 – Cartographie des classes de paysages (TPI) sur la commune de Voh.....	29
Illustration 16 – Cartographie des classes de paysages (landform) sur la commune de Voh	30
Illustration 17 – Exposition du territoire communal (km ² et %) aux différents types de phénomène et niveau d'aléa	32
Illustration 18 – Taux de reconnaissance selon le type de phénomène (rupture)	32
Illustration 19 – Taux de reconnaissance des événements (rupture et propagation) selon la classe d'aléa finale pour chaque type de phénomène	33
Illustration 20 – Exemple de propagation de LT hors emprise de zone soumise théoriquement à aléa, plaine alluviale de la Voh.....	34
Illustration 21 – Cartographie de l'aléa chutes de blocs sur la commune de Voh	35
Illustration 22 – Cartographie de l'aléa glissements fins sur la commune de Voh.....	36
Illustration 23 – Cartographie de l'aléa glissements grossiers sur la commune de Voh.....	37
Illustration 24 – Cartographie de l'aléa laves torrentielles sur la commune de Voh	38
Illustration 25 – Cartographie générale de l'aléa mouvement de terrain sur la commune de Voh	39
Illustration 26 – Exposition des constructions à l'aléa mouvements de terrain sur la commune de Voh	41
Illustration 27 – Les 7 piliers de la prévention des risques naturels, au service de la Politique Publique de Gestion des Risques (PPGR) en Nouvelle-Calédonie.....	44

1 Présentation de la commune

D'une superficie de 805 km², la commune de Voh est située dans la région Nord de la côte Ouest de la Grande Terre, entre la commune de Koné au Sud-Est, Kaala-Gomen au Nord-Ouest et la commune de Hienghène au Nord-Est. Elle est située en province Nord.

La commune de Voh est centrée sur le village de Voh qui se développe sur la plaine alluviale de la rivière Voh au pied des massifs du Koniambo et du Kathépaïk.

La limite nord-est de la commune correspond à une ligne de crête qui marque la limite de séparation des eaux entre la côte ouest et la côte est et dont l'altitude avoisine ou dépasse les 1000 m (Watilu 1103 m).

Au Sud, le relief est marqué par la présence de zones de plateaux qui se développent au sommet du massif du Koniambo (934 m), et qui se prolonge vers l'ouest jusqu'au Plateau du Kaféaté, à l'amont de la tribu de Oundjo.

Au Nord-Ouest, la limite de la commune est marquée par une ligne de crête du massif du Taom qui culmine à 1092 m.

La population de la commune était d'environ 2 900 habitants en 2019 (Illustration 1) soit une densité de 3,5 habitants/km² (14.6 habitants/km² en Nouvelle-Calédonie). La population est essentiellement localisée au niveau du village de Voh. Huit tribus sont présentes sur la commune, où vivent près de la moitié des habitants de la commune de Voh. Les tribus de Ouahat, Ouengo, Boyen, Tiéta sont situées à l'intérieur des terres et Témala et Ouelis dans la vallée de la Témala. Les tribus de Gatope et Oundjo étant situées au bord de mer.

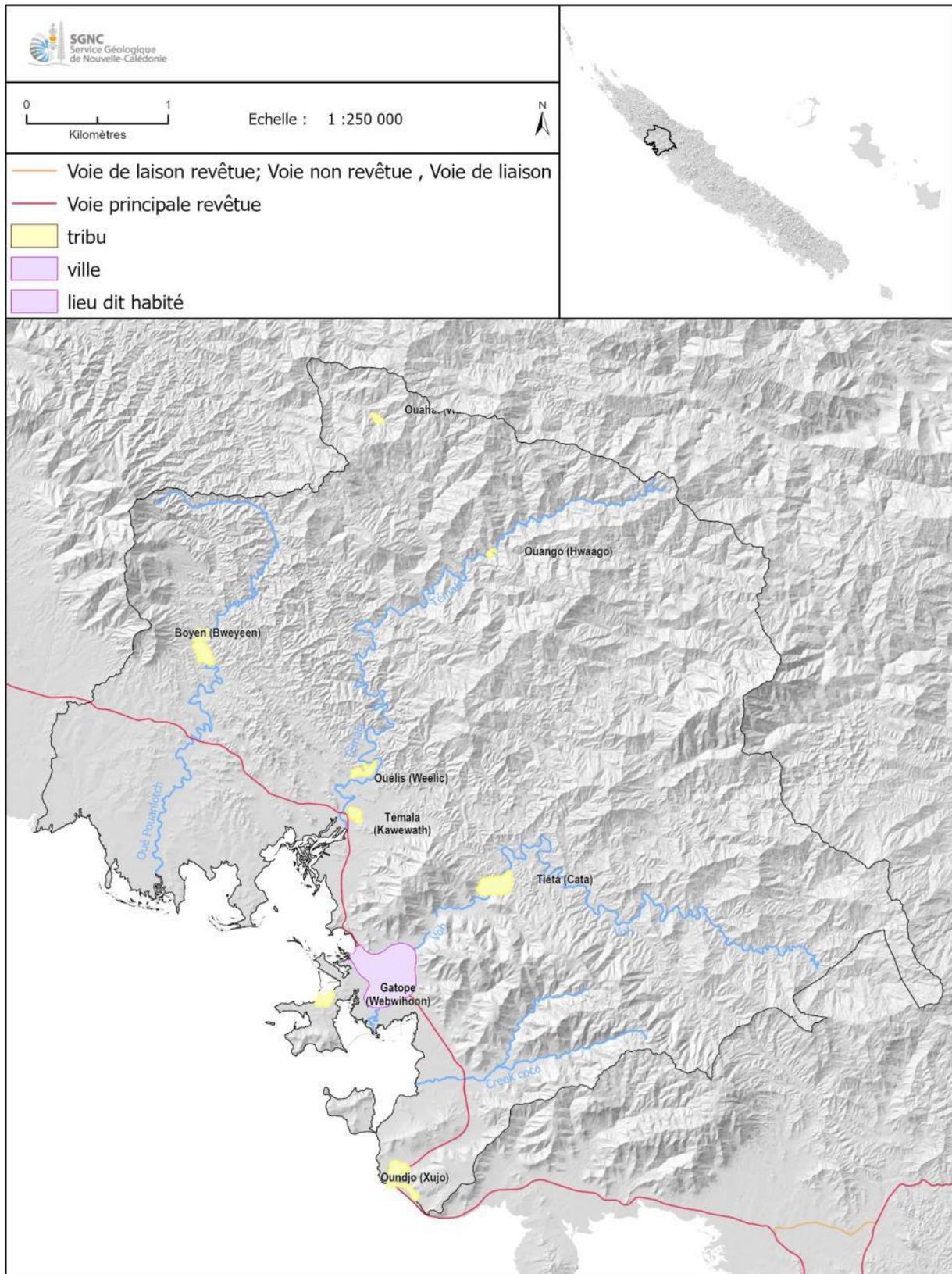


Illustration 1 – Présentation de la commune de Voh

2 Présentation de la démarche

L'aléa se définit comme la manifestation d'un phénomène ou un événement naturel d'**occurrence** et d'**intensité** données (C2ROP, 2022). Caractériser l'aléa mouvement de terrain sur un territoire revient à définir la probabilité spatiale (susceptibilité) et temporelle (période de retour) qu'un type de phénomène, d'une certaine intensité (ampleur et conséquences du phénomène) se produise à l'échelle de ce territoire, pour une période temporelle donnée (Cruden et Fell, 1997 ; Fell et al., 2005).

La caractérisation de l'aléa est menée pour **quatre types de mouvements de terrain** : les chutes de blocs (CB), les glissements fins (GF), les glissements grossiers (GG) et les laves torrentielles (LT) (voir Lexique en annexe, § 8.1). Les grands glissements de versant (GGV), phénomènes exceptionnels et plus anciens sont délimités pour mémoire, mais l'aléa associé n'est pas caractérisé.

L'**inventaire des phénomènes** passés constitue un préalable indispensable à l'évaluation des aléas pour identifier les conditions d'apparition des événements. Il est réalisé sur l'ensemble du territoire communal principalement à partir de photo-interprétation (photos aériennes et images satellites) à différentes dates (1976, 2008, 2011, etc.).

L'évaluation de l'occurrence du phénomène (ou atteinte) intègre **la rupture et la propagation** de celui-ci. 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 successivement (voir annexe 8.4) : analyse de la rupture (dimension spatiale et temporelle du phénomène) puis celle de la propagation (composante spatiale uniquement).

2.1 Evaluation de la rupture

Globalement la méthode déployée consiste à pondérer l'influence des facteurs de prédisposition (variables prédictives) définis par la typologie de chaque phénomène :

- Géologie du substratum, formations superficielles (régolithe), pentes et paysages (*landform*, paramètre géomorphologique issu du MNT¹) pour les GF et GG,
- Formations du régolithe, pentes, MNT et indice de positionnement topographique (TPI, *Topographic Position Index*) pour les LT.

Pour les LT, GF et GG la méthode valorisée est statistique (WoE : poids des évidences) en valorisant les données d'inventaire.

Pour les CB l'approche est experte basée sur la morphologie et la lithologie des formations géologiques.

¹ MNT : Modèle Numérique de Terrain, altitude du sol à la maille de 10 m (DITTT)

2.2 Evaluation de la propagation

L'évaluation de la propagation des phénomènes diffère selon les aléas. Pour les GG, GF et LT une modélisation numérique² a été mise en œuvre. Cette modélisation permet de réaliser une hiérarchisation des périmètres de propagation en se basant sur les retours d'expérience fournis par l'inventaire. Le paramétrage du modèle dépend du type de phénomène. Le volume d'écoulement des débris, et de fait les hauteurs des masses propagées, ne sont pas évalués.

Pour les CB la propagation des chutes de blocs et éboulements est évaluée à partir de l'application de la méthode dite de la ligne d'énergie déclinée en 3D³.

2.3 Evaluation de l'aléa

La caractérisation de l'aléa se fait par croisement entre l'intensité du phénomène et la probabilité d'atteinte. Pour les GF, GG et LT, l'intensité est directement déduite de la vitesse du phénomène. Pour les CB, l'intensité dépend du volume de bloc en mouvement et de sa vitesse. Dans le cadre de l'étude, le volume du bloc est considéré homogène entre 0,25 et 1 m³ indépendamment des formations géologiques concernées.

La matrice de croisement entre intensité et atteinte est présentée en Illustration 2. L'aléa est défini suivant sept niveaux : Nul à négligeable, Négligeable, Très faible, Faible, Modéré, Elevé, Très élevé. Les différentes approches pour la détermination des probabilités d'intensité, de rupture et de propagation par type de phénomène sont synthétisées dans le tableau en Illustration 3.

		Intensité				
		Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Classe d'atteinte	1 Nulle à négligeable	Nul à négligeable	Nul à négligeable	Nul à négligeable	Très faible	Très faible
	2 Négligeable	Nul à négligeable	Nul à négligeable	Très faible	Faible	Faible
	3 Très faible	Nul à négligeable	Très faible	Faible	Modéré	Modéré
	4 Faible	Nul à négligeable	Faible	Modéré	Elevée	Elevée
	5 Moyenne	Très faible	Modéré	Modéré	Elevée	Elevée
	6 Elevée	Faible	Modéré	Elevée	Elevée	Très élevée
	7 Très élevée	Faible	Modéré	Elevée	Très élevée	Très élevée

Illustration 2 – Matrice d'évaluation de l'aléa croisant Intensité et Atteinte

A titre d'exemple sur la caractérisation des aléas, un aléa élevé de glissement fin suppose une atteinte (occurrence) élevée à très élevée alors qu'une atteinte « faible » lave torrentielle induit un aléa élevé, compte tenu du caractère particulièrement rapide et destructeur de ce phénomène.

² Avec l'outil Flow-R (Flow path assessment of gravitational hazards at Regional scale, Horton et al., 2013), Flow-R est un modèle empirique distribué pour l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements gravitaires

³ Avec l'outil ConeFall développé par l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) et QUANTERRA (<https://quanterra.ch/resources/software/>).

		Type de phénomène				
		CB	GF	GG	LT	
Intensité	Taille des blocs	Vitesse				
	Moyenne	Modérée	Elevée	Très élevée		
	Volume compris entre 0.25 et 1 m ³	Lent (0,005mm/s) à Rapide (50 mm/s)	Très rapide (50 mm/s à 5 m/s)	Extrêmement rapide (>5 m/s)		
Atteinte	Rupture	Probabilité présence escarpement rocheux (selon un seuil de pente déduit de la résolution du MNT) + Probabilité chute de bloc (selon une approche experte à partir des lithologies)	Calculs statistiques " <i>Weight of Evidence</i> " à partir de variables prédictives et de l'inventaire des phénomènes			
			Variables prédictives :			
			Géologie du substratum		Formations du régolithe	
			Formations du régolithe		Pentes (dérivées du MNT)	
			Pentes (dérivées du MNT)		TPI (indice de position topographique, dérivée du MNT)	
	<i>Landform</i> (dérivée du MNT)		-			
Propagation	Calculs basés sur la notion de ligne d'énergie					
	Logiciel ConeFall	Logiciel Flow-R				

Illustration 3 – Synthèse méthodologique

3 Inventaire des événements passés

3729 évènements ont été recensés sur le territoire communal de Voh et représentés cartographiquement par leur extension (Illustration 4, Annexe 6 – Atlas cartographiques : phénomènes de mouvement de terrain). Ils se répartissent selon cinq types (Illustration 5, Illustration 6, Annexe 1 – Lexique des termes utilisés) :

- Les glissements grossiers (GG) comptent 1750 mouvements (47% de l'inventaire) ;
- Les glissements fins (GF) comptent 1757 mouvements (47%) ;
- La présence de 30 laves torrentielles (LT), (1% des évènements) ;
- Relativement peu de chutes de blocs (CB), 13 évènements (<1%), compte tenu de la difficulté à repérer des blocs éboulés par photo-interprétation ;
- Des coulées de matériaux fins et /ou grossiers qui résultent de mécanismes érosifs (ravinement), affectant les zones de décharges minières (177 cas, 5% des évènements) ;
- Notons également deux grands glissements de versants (GGV) (<1% des phénomènes).

Spatialement les mouvements affectent la totalité de la commune, avec cependant une répartition dépendante de la géologie et du relief. Les glissements grossiers et laves torrentielles affectent majoritairement les massifs de péridotites du Koniambo, du Watilu et du Kathépaïk dans la partie Sud et du Taom au Nord de la commune, tandis que les glissements fins sont concentrés sur les formations sédimentaires de la chaîne centrale au Nord-Est. Les enveloppes des mouvements sont cartées en distinguant zones de rupture (ou d'ablation) et zone de propagation (ou d'accumulation).

Temporellement (Illustration 9), la majorité (59%) des évènements recensés est datée d'avant 1976 (phénomènes repérés sur les images de la campagne 1976) Enfin, 41% sont identifiés entre 1976 et 2008 et sont qualifiés de « récents ».

L'effort considérable de recensement et de caractérisation des événements passés permet une exploitation statistique robuste et précieuse pour l'évaluation des aléas (Illustration 10 ; Annexe 2 – Indicateurs morphométriques des évènements).

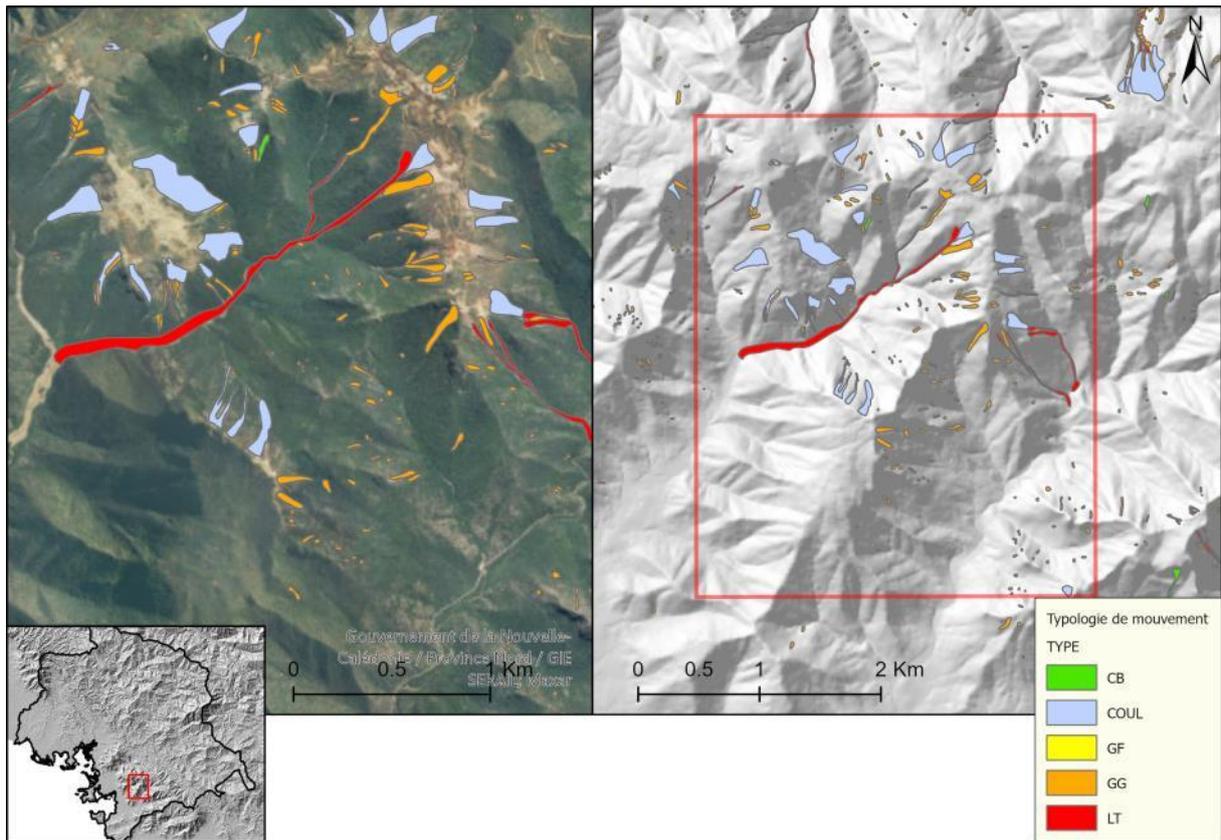


Illustration 4 – Exemple de cartographie des enveloppes des mouvements de terrain sur la commune

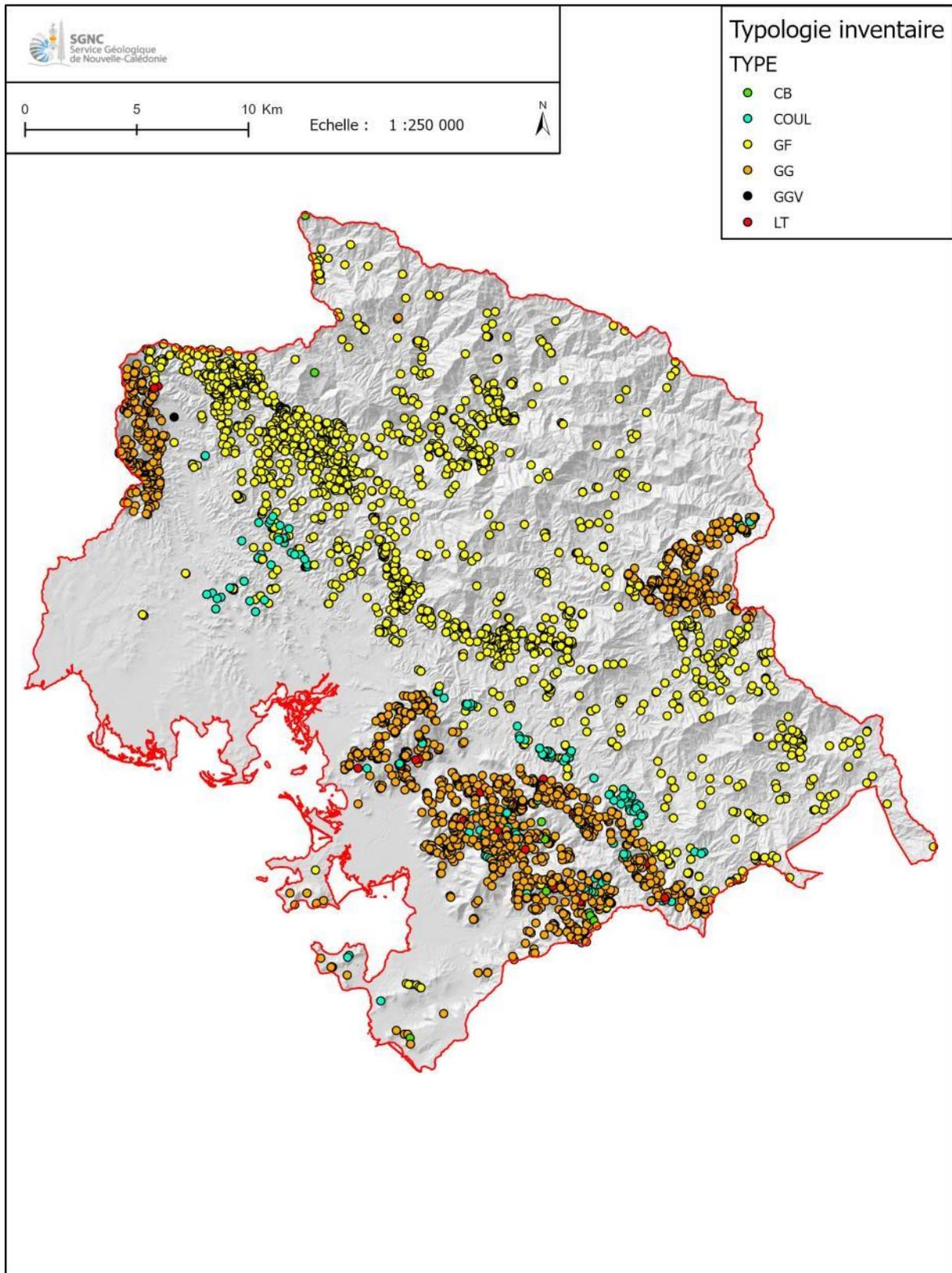


Illustration 5 – Localisation des différents types de phénomènes de mouvements de terrain recensés sur la commune de Voh (Annexe 6 – Atlas cartographiques : phénomènes de mouvement de terrain)

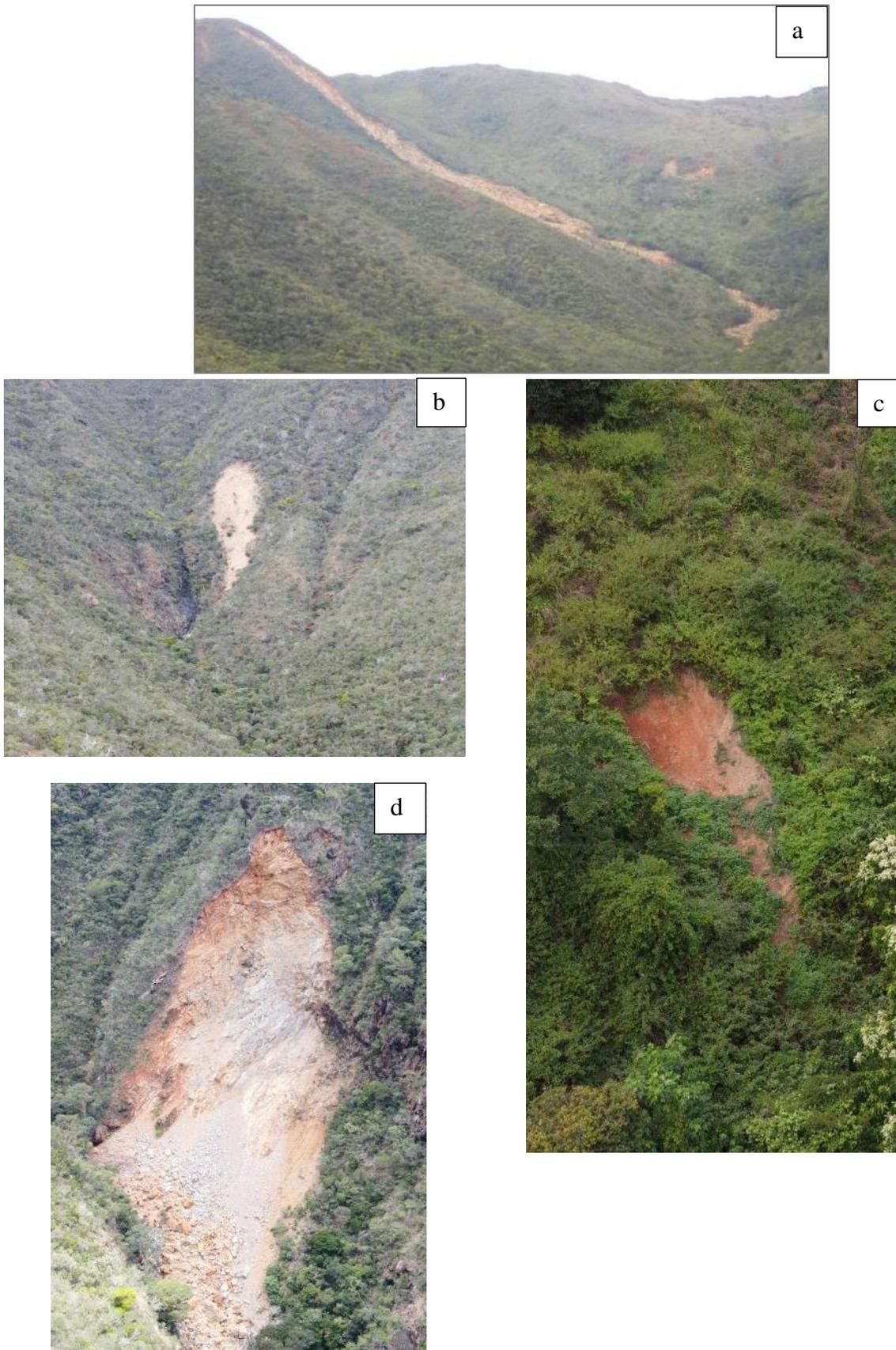


Illustration 6 – Différents types de phénomènes :

a) Exemple de Lave torrentielle, presqu'île de Bogota Commune de Canala ; b) Glissement grossier, Voh ; c) Glissement fin, Commune de voh; d) Eboulement rocheux - Kaala Gomen



Illustration 7- Contexte de chute de blocs sur la commune de Voh.

- a) Versant rocheux péridotitique producteur de blocs, route de Tiéta, Mont Tahafe ; b) tablier d'accumulation de blocs de péridotites, rive droite de la Taléa branche sud*



Illustration 8 – Vue panoramique, Grand glissement de versant, Tribu de Boyen, commune de Voh.

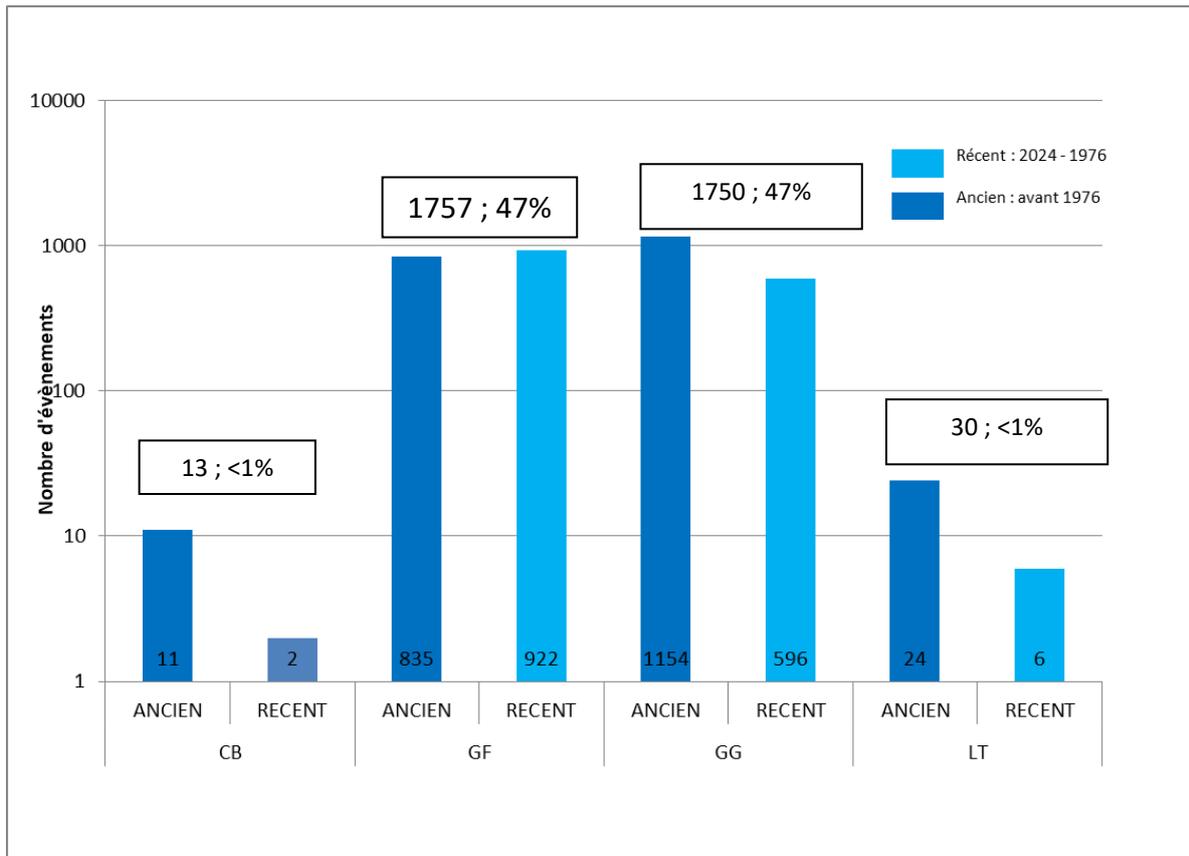


Illustration 9 – Dénombrement des phénomènes de mouvements de terrain par période

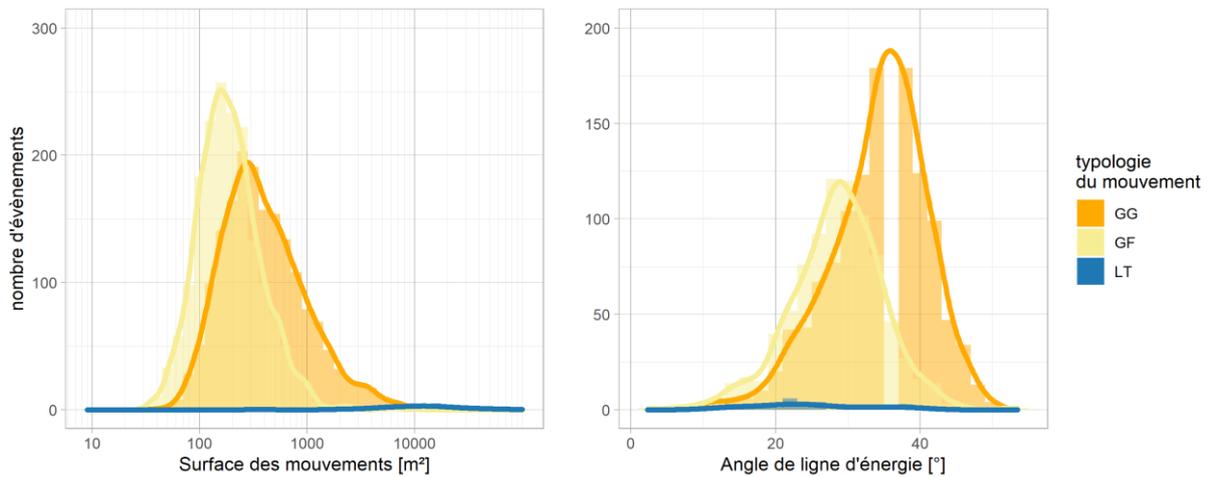


Illustration 10 – Distribution des surfaces [m²] et des pentes [°] par typologie de mouvements de terrain

4 Les données nécessaires : variables prédictives

Les variables prédictives sont utilisées conjointement avec les données de l'inventaire pour évaluer la probabilité de rupture pour l'ensemble des phénomènes (approche statistique pour GG, GF, LT et hiérarchisation experte pour CB). Outre les données d'ordre géologique : nature du substratum et des formations du régolithe, les calculs se basent également sur des données morphologiques, issues du traitement du MNT : pente, *landform* et TPI (*Topographic Position Index* ou indice de position topographique).

4.1 Données géologiques

4.1.1 Le substratum géologique

Sur la commune de Voh, on distingue trois grands ensembles (Illustration 11) :

- Les terrains de la séquence ophiolitique (roches magmatiques) : nappe des péridotites et basaltes de Poya, qui constituent un vaste ensemble couvrant près du tiers Ouest (frange littorale) de la commune. La nappe des péridotites forme trois sous-ensembles : le Koniambo Sud, le Taom au Nord-Ouest et le Watilu à l'Est. Les formations basaltiques de la nappe de Poya s'étendent entre les massifs du Koniambo et du Taom sur la frange littorale;
- L'ensemble de formations volcano-sédimentaire forment une large bande orienté NO-SE, sur la moitié Nord-Est de la commune. Cet ensemble agrège des formations d'âges divers : du trias et du jurassique de la chaîne centrale et de la Boghen aux formations du crétacé supérieur – Paléocène.
- Au Nord, l'ensemble du complexe métamorphique éocène de l'unité du Diahot Panié. Elle forme une bande, d'environ 4 km de large orienté NO-SE. Ce sont des unités haute pression basse température (HP/BT) dont le protolithe est similaire à celui de la couverture sédimentaire du crétacé supérieur.

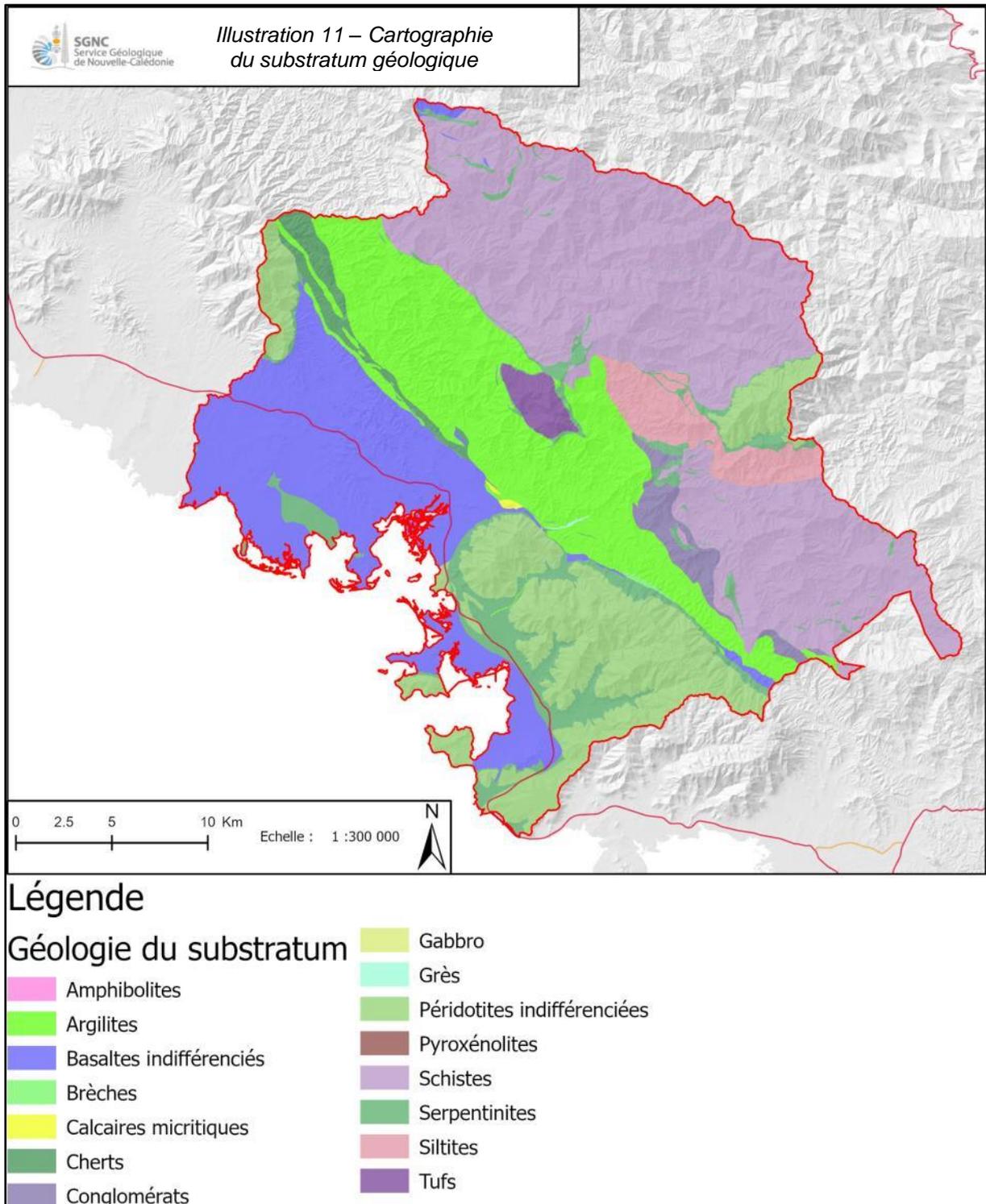
4.1.2 Les formations superficielles du régolithe

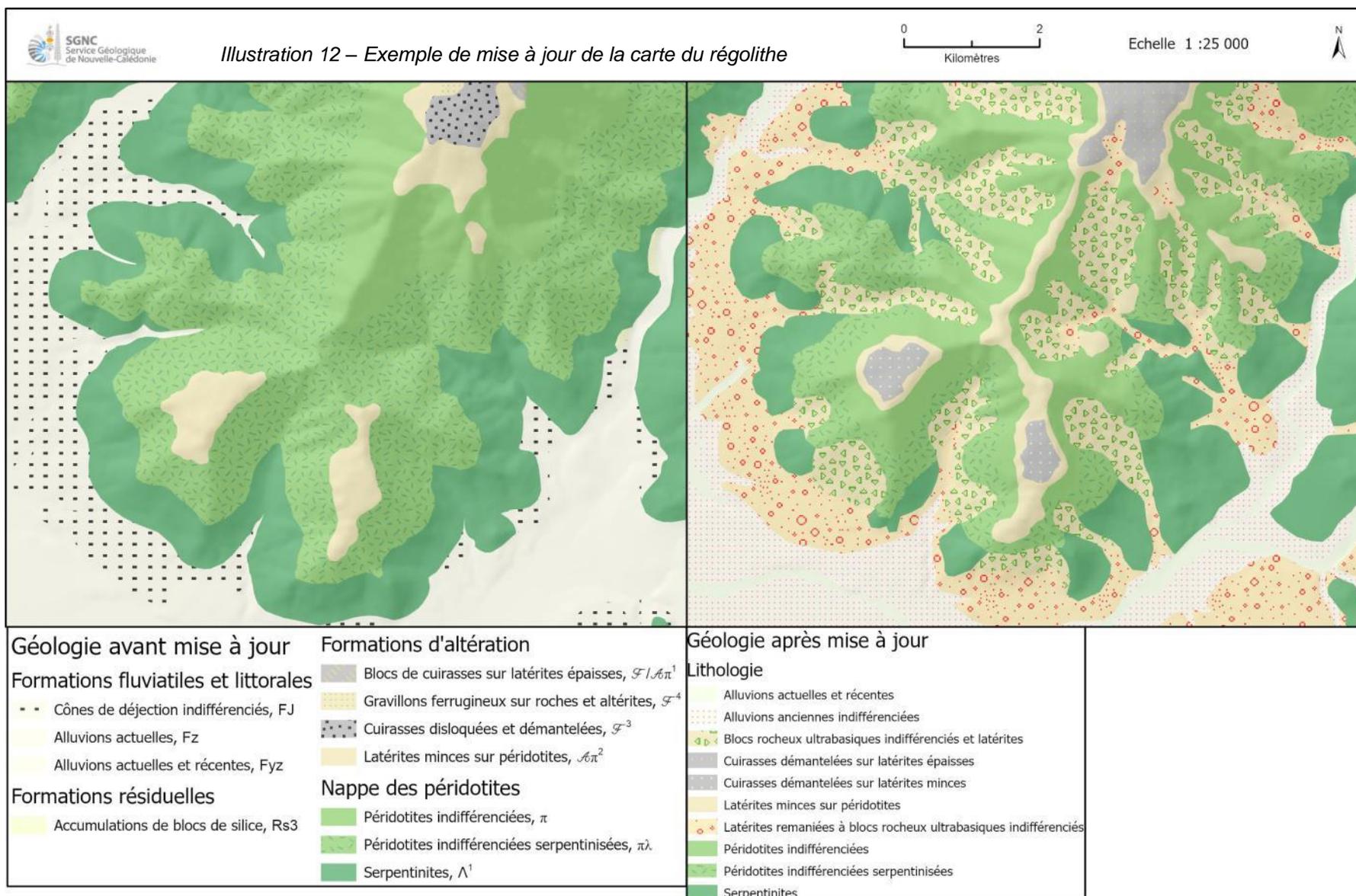
Un des traits caractéristiques des paysages calédoniens est la présence généralisée d'un couvert d'altération. L'ensemble de ces formations superficielles est désigné par le terme de « régolithe » pour lequel sont typiquement distinguées les formations en place ou autochtones et celles remaniées ou allochtones. Dans le cadre de ces travaux sur l'aléa mouvements de terrain, une attention toute particulière a été portée à la connaissance et la **cartographie du régolithe** (Illustration 12), donnée essentielle pour la caractérisation de l'aléa. En effet, les phénomènes de mouvement de terrain mobilisent principalement la partie superficielle du profil d'altération, leur connaissance est une donnée fondamentale dans le cadre de la caractérisation des aléas.

- Massifs péridotites : Sur substrat péridotitique, le régolithe regroupe l'ensemble des faciès du profil d'altération, 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 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.

- Formation volcano-sédimentaire : Le trait principal de l'altération sur le substrat volcano-sédimentaire est l'argilisation qui affecte également les faciès sédimentaires et volcaniques et conduit à la formation d'un profil peu épais, d'un à quelques mètres tout au plus et exceptionnellement décimétrique pour les épaisseurs les plus importantes.

La carte des formations du régolithe est reclassée selon une typologie à huit classes (Illustration 12) qui permet de discriminer les formations autochtones (FAU) ou en place des formations allochtones (FAL) ou démantelée et selon la nature des terrains.





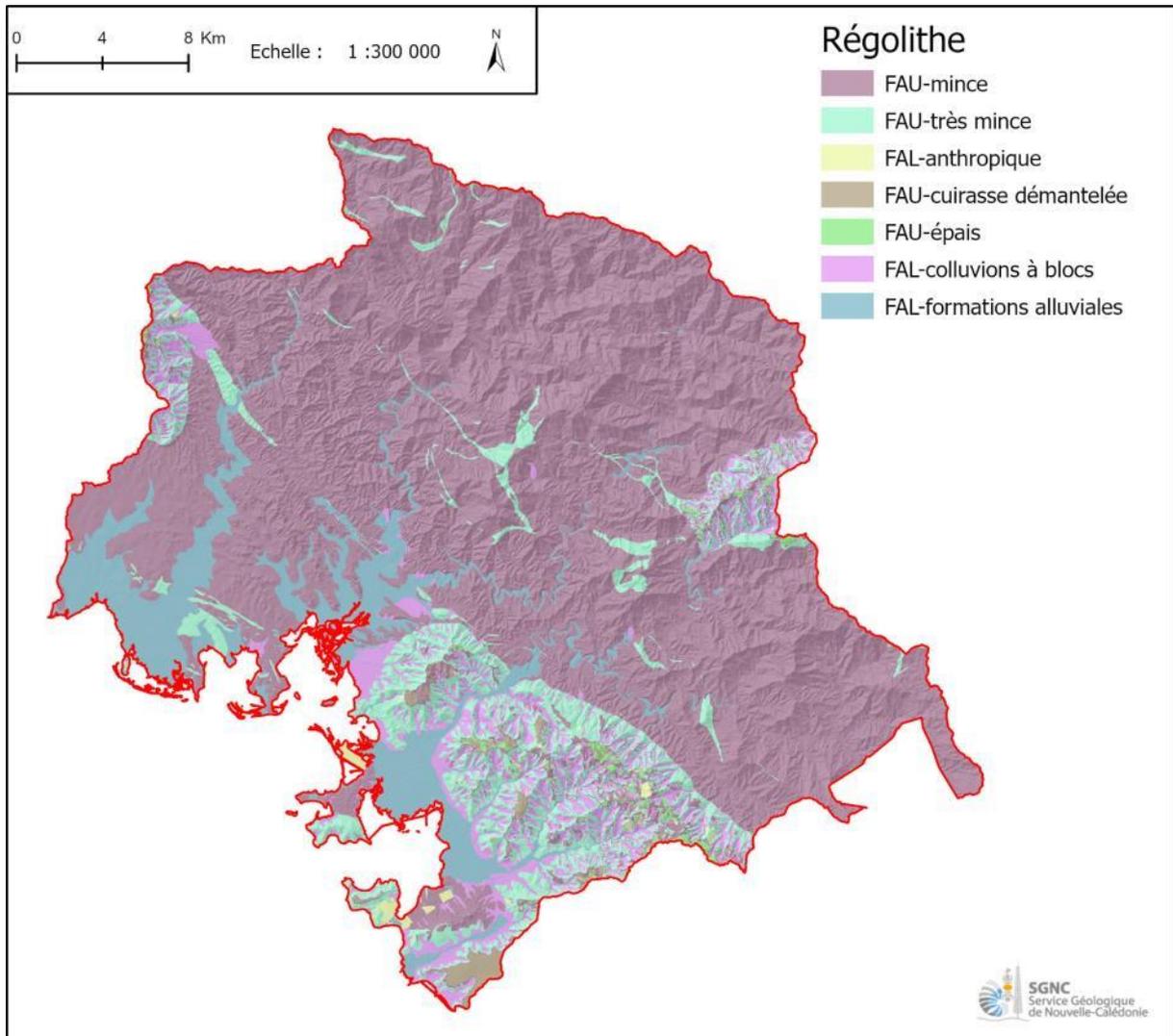


Illustration 13 – Cartographie des classes de formations du régo-lite sur la commune de Voh

4.2 Données morphologiques

Les données morphologiques dérivent de la donnée topographique, définie sur le territoire par le MNT (grille de 10 m). La résolution et la précision des résultats sont directement liée à la qualité du MNT source. Pour limiter les incertitudes associées à la qualité du MNT initial, un **traitement spécifique pour les besoins du projet** a été engagé afin de pallier notamment l'insuffisance de précision des thalwegs (non représentés, problème d'encaissement trop faible, réseau non conforme à la réalité) qui sont essentiels pour modéliser notamment l'écoulement des laves torrentielles et les cônes d'étalement. Néanmoins, le MNT tant par sa résolution que par sa définition est une donnée perfectible qui peut altérer localement les résultats et limite la résolution exploitable.

4.2.1 Pentés

Les valeurs de pentes sont calculées à partir de la donnée MNT. Les valeurs sont reclassées en plage de 5° pour les valeurs de pente entre 0 et 50°. Au-delà de 50°, les pentes sont agrégées dans une seule et unique classe (Illustration 14).

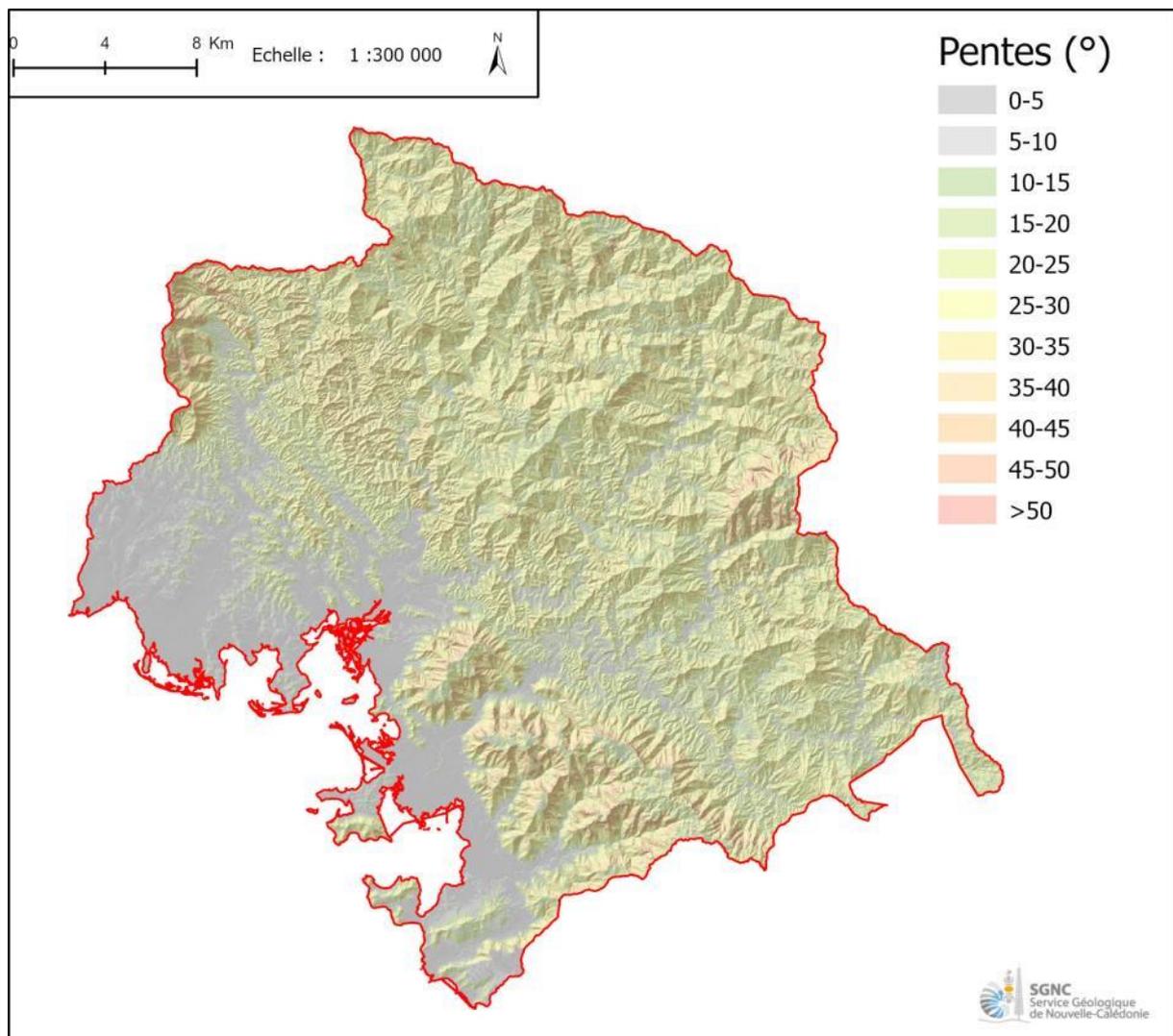


Illustration 14 – Cartographie des classes de pentes sur la commune de Voh

4.2.2 Indice de position topographique (TPI)

L'Indice de Position Topographique (TPI) est un premier paramètre intégrateur, descriptif des paysages et morphologies. Il est calculé selon la méthode proposée par Jones et al. (2000) et permet de classer le territoire suivant dix types morphologiques (Illustration 15) : zones de crêtes, de vallées, de versants, etc.

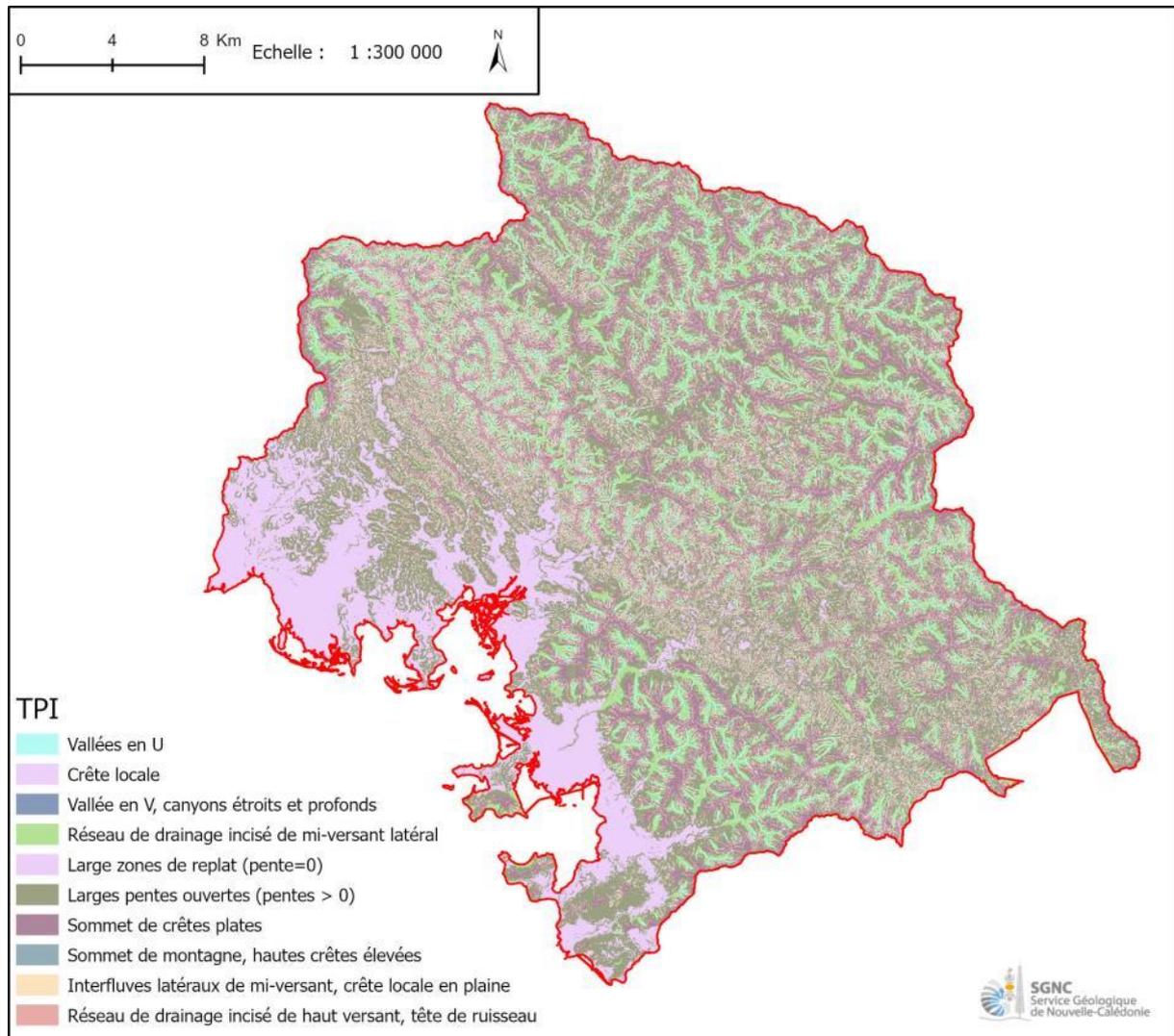


Illustration 15 – Cartographie des classes de paysages (TPI) sur la commune de Voh

4.2.3 Landform

Le *landform* est un second paramètre intégrateur, descriptif des paysages et des morphologies en termes de pentes, texture et convexité. Il est calculé avec la méthode d'Iwashashi et Pike (2007) et permet de classer le territoire selon huit types morphologiques (Illustration 16).

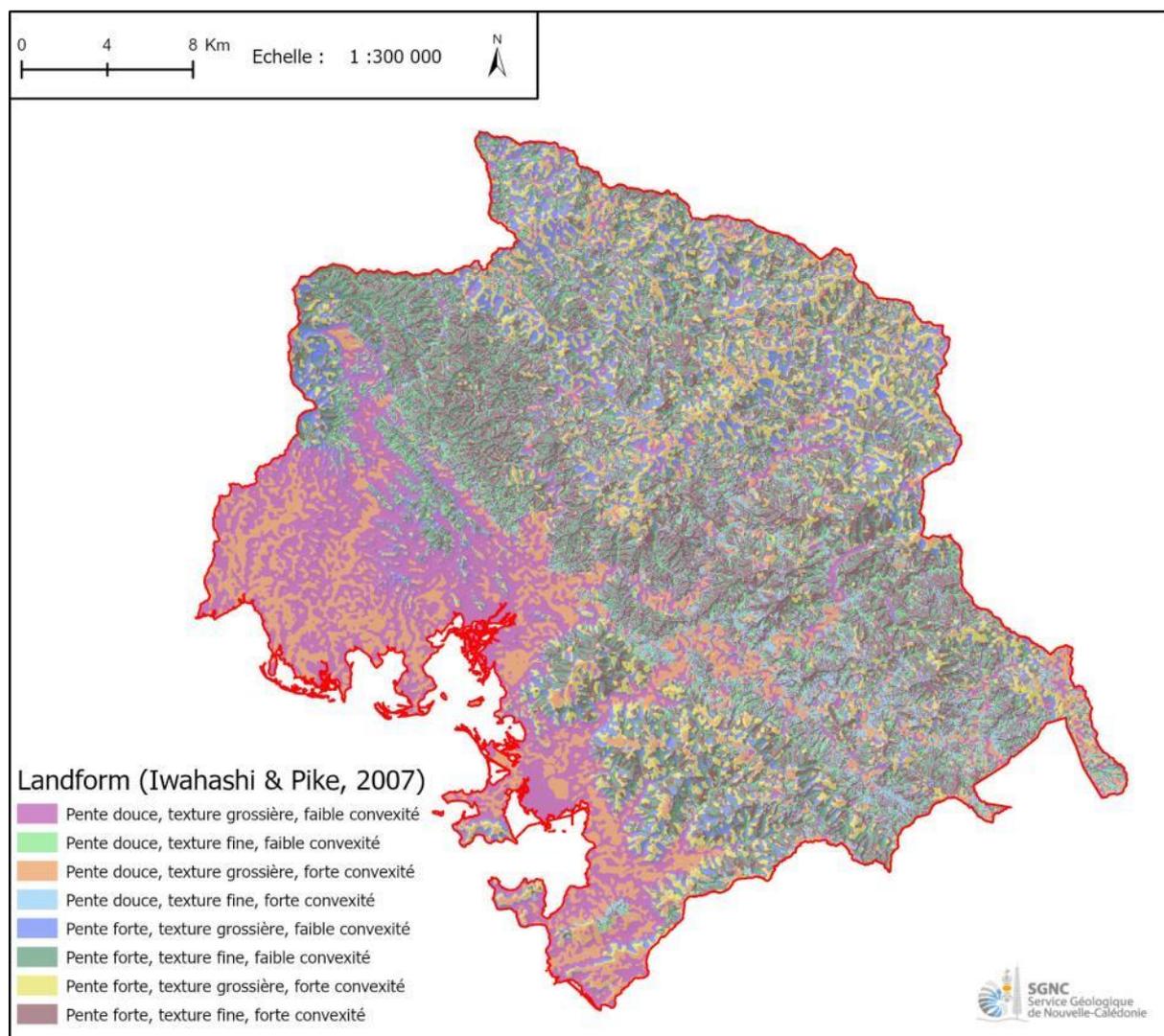


Illustration 16 – Cartographie des classes de paysages (*landform*) sur la commune de Voh

5 Résultats

5.1 Cartographie de l'aléa mouvements de terrain

La carte de l'aléa « mouvements de terrain » est réalisée :

- pour chaque phénomène (CB, GF, GG et LT, respectivement Illustration 21, Illustration 22, Illustration 23, Illustration 24) afin de conserver l'information la plus pertinente ;
- et en combinant les cartes précédentes, dans une perspective plus opérationnelle, en retenant en tout point du territoire cartographié le niveau d'aléa maximal évalué (Illustration 25).

Cette cartographie de l'aléa « mouvements de terrain » est fournie sous forme d'un atlas au format A3 à l'échelle du 1 :25 000 sur l'ensemble du territoire communal (Annexe 7 – Atlas cartographiques) ainsi que sous forme numérique (système d'information géographique).

Ainsi, 79% du territoire communal est exposé à un aléa mouvement de terrain non négligeable (Illustration 25) et le tiers de la commune (33%) est concernée par un aléa Modéré à Elevé :

- L'aléa élevé concerne essentiellement les versants et les axes de talwegs des massifs de péridotites (Koniambo, Taom et Watilu), du fait des laves torrentielles ou des glissements grossiers qui peuvent s'y produire. A noter que l'aléa se prolonge en forme de cône dans les axes des talwegs à cause de la propagation des laves torrentielles ;
- L'aléa modéré affecte les pieds de versant des massifs de péridotites précédents, mais également les versants sur substrat volcano-sédimentaire sur la moitié Nord de la commune ;
- le niveau d'aléa mouvements de terrain est considéré nul à négligeable au sein des larges plaines alluviales des rivières Témala, Voh, Pouanlotch et du creek Coco ainsi que les zones de replat du plateau du Kaféaté.

L'évaluation des aléas les plus élevés est cohérente avec les phénomènes recensés (Illustration 5) :

- Les zones d'aléa chutes de blocs et éboulement (Illustration 21) de niveau modéré couvrent 8% de la commune et sont principalement réparties sur les versants en domaine ultrabasique au Sud, à l'Est et au Nord-Ouest de la commune ;
- Les glissements fins de niveau faible et modérés (55%, Illustration 22) concernent essentiellement le substrat sédimentaire au centre-Nord de la commune ;
- Les glissements grossiers de niveau modéré et élevé (15%, Illustration 23) sont particulièrement présents sur les versants des massifs de péridotites au Sud, à l'Est et au Nord-Ouest de la commune ;
- Les laves torrentielles de niveau modéré et élevé (7%, Illustration 24) sont particulièrement présentes dans les axes des talwegs sur les versants des massifs de péridotites au Sud, à l'Est et au Nord-Ouest de la commune.

		GG	GF	LT	CB	ALEA MVT
Aléa (Km ²)	Nul à négligeable	553	293	612	709	167
	Très faible	-	64	71	5	44
	Faible	123	298	63	16	321
	Modéré	59	141	38	67	198
	Elevé	63	-	14	-	67
Surface totale soumise à aléa		244	504	186	88	630
% de la commune soumis à aléa		31%	63%	23%	11%	79%

		GG	GF	LT	CB	ALEA MVT
Aléa (% commune)	Nul à négligeable	69%	37%	77%	89%	21%
	Très faible	0%	8%	9%	1%	6%
	Faible	15%	37%	8%	2%	40%
	Modéré	7%	18%	5%	8%	25%
	Elevé	8%	0%	2%	0%	8%

Illustration 17 – Exposition du territoire communal (km² et %) aux différents types de phénomène et niveau d'aléa

5.2 Validation des résultats

Afin de juger de la validité des résultats, une rétro-analyse est effectuée sur les phénomènes recensés en distinguant :

- Les enveloppes de rupture des phénomènes ;
- Les enveloppes globales de phénomène (rupture + propagation).

5.2.1 Rétro-analyse : aléa de rupture

L'analyse est menée en calculant (Illustration 18) :

- Un taux de reconnaissance, proportion de phénomènes se trouvant au sein de classes de susceptibilité à la rupture « moyenne » à « très forte » ;
- Un taux de non reconnaissance, proportion de phénomènes se trouvant au sein de classes de susceptibilité à la rupture « nulle à négligeable » et « négligeable ».

Type	Glissements Grossiers	Glissements Fins	Laves Torrentielles
Taux de reconnaissance	92,2%	62,2%	61,5%
Taux de « non reconnaissance »	3,3%	2,9%	2,3%

Illustration 18 – Taux de reconnaissance selon le type de phénomène (rupture)

Le taux de reconnaissance calculé est très élevé (> 90%) pour les glissements grossiers et un peu plus faible de l'ordre de 60% pour les laves torrentielles et les glissements fins. Les événements recensés mais « non reconnus » sont globalement faibles aux alentours de 3%. Ils peuvent s'expliquer par la qualité localement médiocre du modèle numérique de terrain exploité.

La rétro-analyse n'est pas menée pour les chutes de blocs, compte tenu du trop faible nombre d'évènements répertoriés dans l'inventaire.

5.2.2 Rétro-analyse : enveloppes globales

Pour chaque type de phénomène, il est calculé (Illustration 19) la distribution des emprises des mouvements de terrains recensés (enveloppes totales) au sein de **chaque zone d'aléa** (associée au phénomène considéré) :

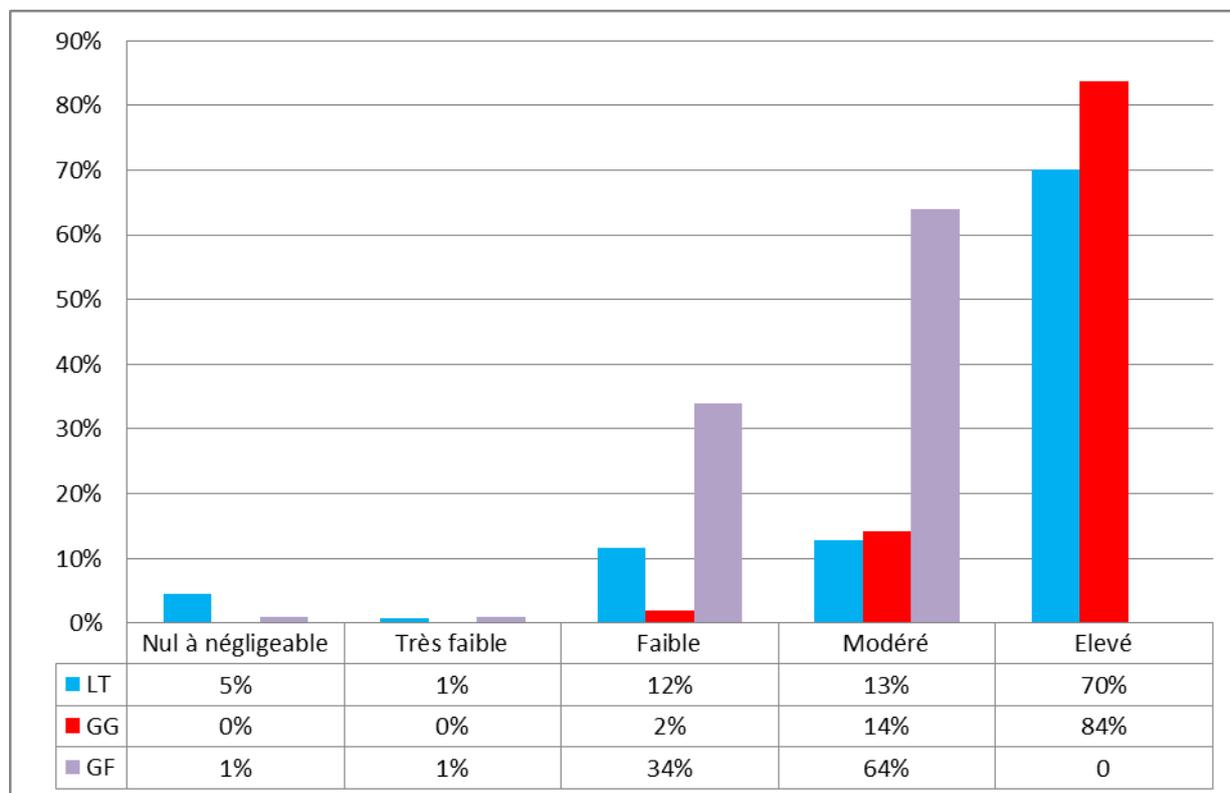


Illustration 19 – Taux de reconnaissance des évènements (rupture et propagation) selon la classe d'aléa finale pour chaque type de phénomène

Cette analyse montre un pourcentage de phénomènes reconnus globalement croissant avec le niveau d'aléa. Par phénomène on identifie :

- Pour les LT et les GG, respectivement 83% et 98% des enveloppes en zones d'aléa modéré à élevé ;
- Pour les GF 98% des enveloppes en zones d'aléa modéré à faible (pas d'aléa fort associé aux GF par méthode) et 64% en zone d'aléa modéré. A noter que pour les GG, tous les évènements sans exception sont inclus dans une zone d'aléa non négligeable.

5% des emprises de LT sont cartées en zone d'aléa de niveau « Nul à négligeable ». Ces secteurs ont été visés lors de l'analyse critique du modèle de propagation. Avec la donnée topographique disponible au pas de 10 m, les modèles ne permettent pas d'atteindre complètement ces emprises, même en ajustant excessivement certains paramètres. Outre la qualité du modèle numérique de terrain, une autre raison peut expliquer ce constat. Les évènements sont anciens (avant 1976, Illustration 20). La topographie a probablement évolué à cause du phénomène lui-même. Le chenal récepteur de l'écoulement s'est comblé est le dépôt crée désormais un obstacle à la propagation de nouveaux évènements (dans la simulation au moins).

Ces zones doivent toutefois être considérées comme potentiellement sensibles en cas d'aménagement et à ce titre l'inventaire historique doit toujours bien être rappelé et considéré (Annexe 6 – Atlas cartographiques : phénomènes de mouvement de terrain). En effet, les simulations n'intègrent pas la reprise du stock solide dans les zones de propagation de LT (stocks présents sur les emprises de laves anciennes) qui peuvent modifier les conditions de propagation.

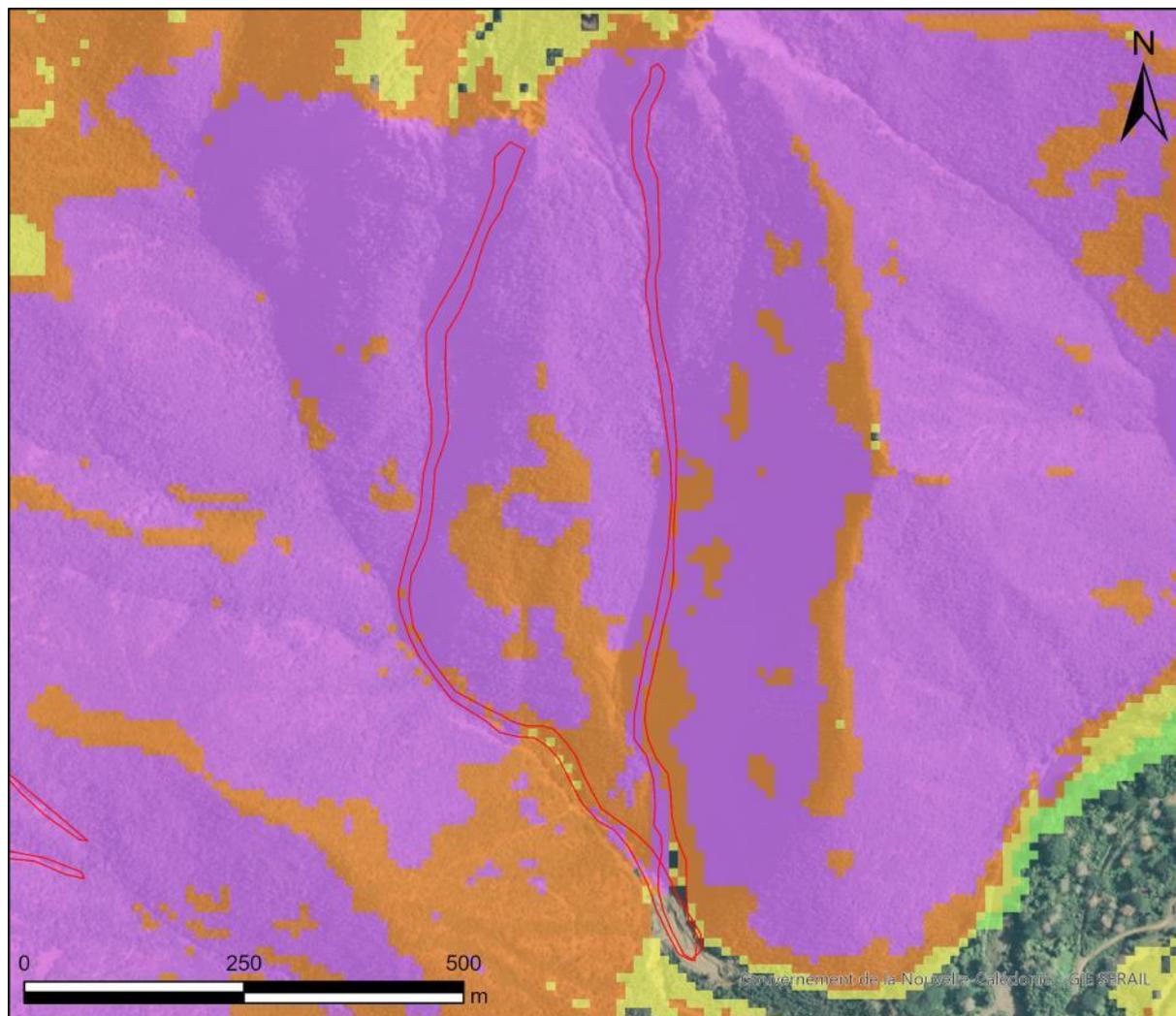
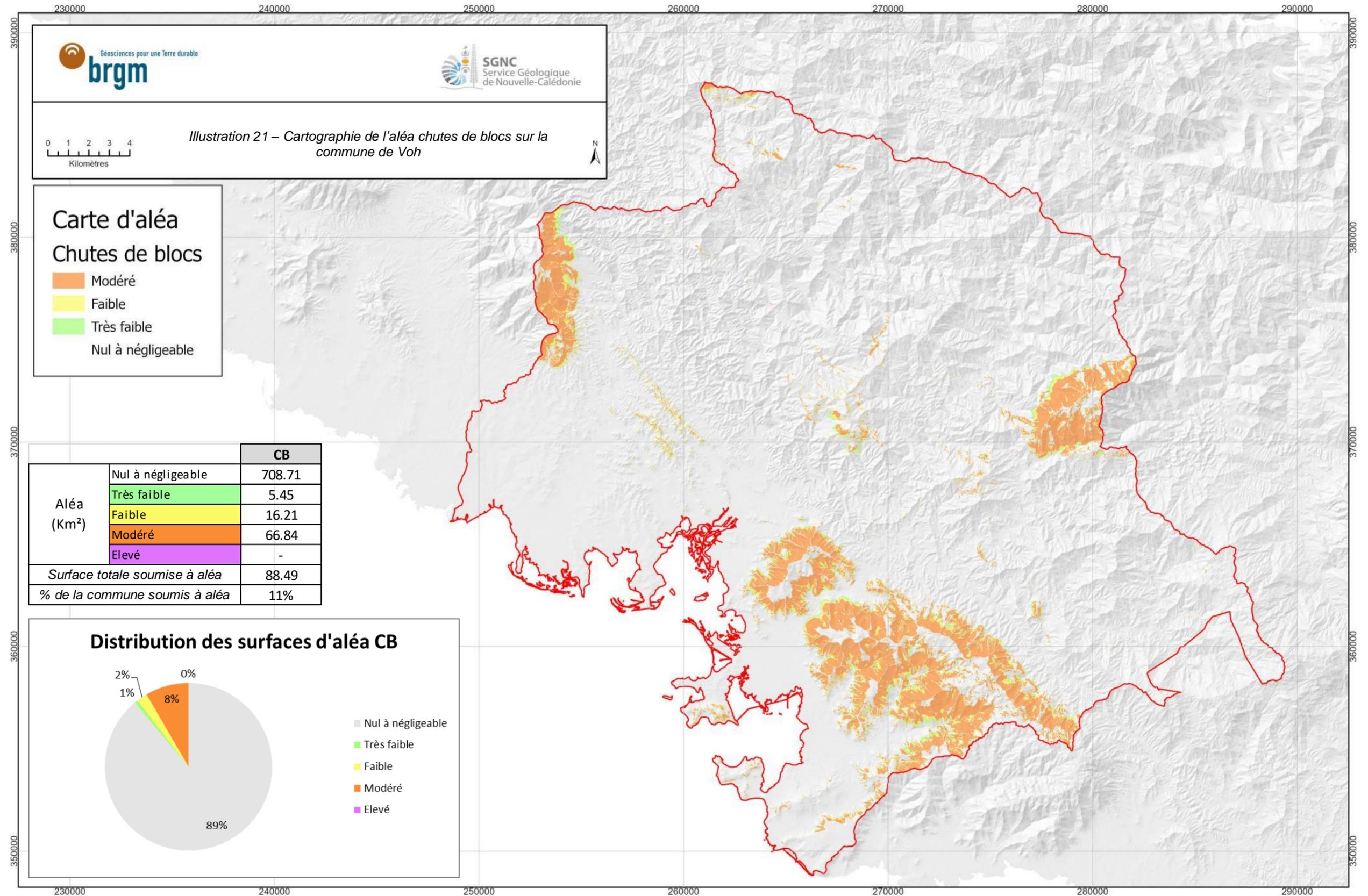
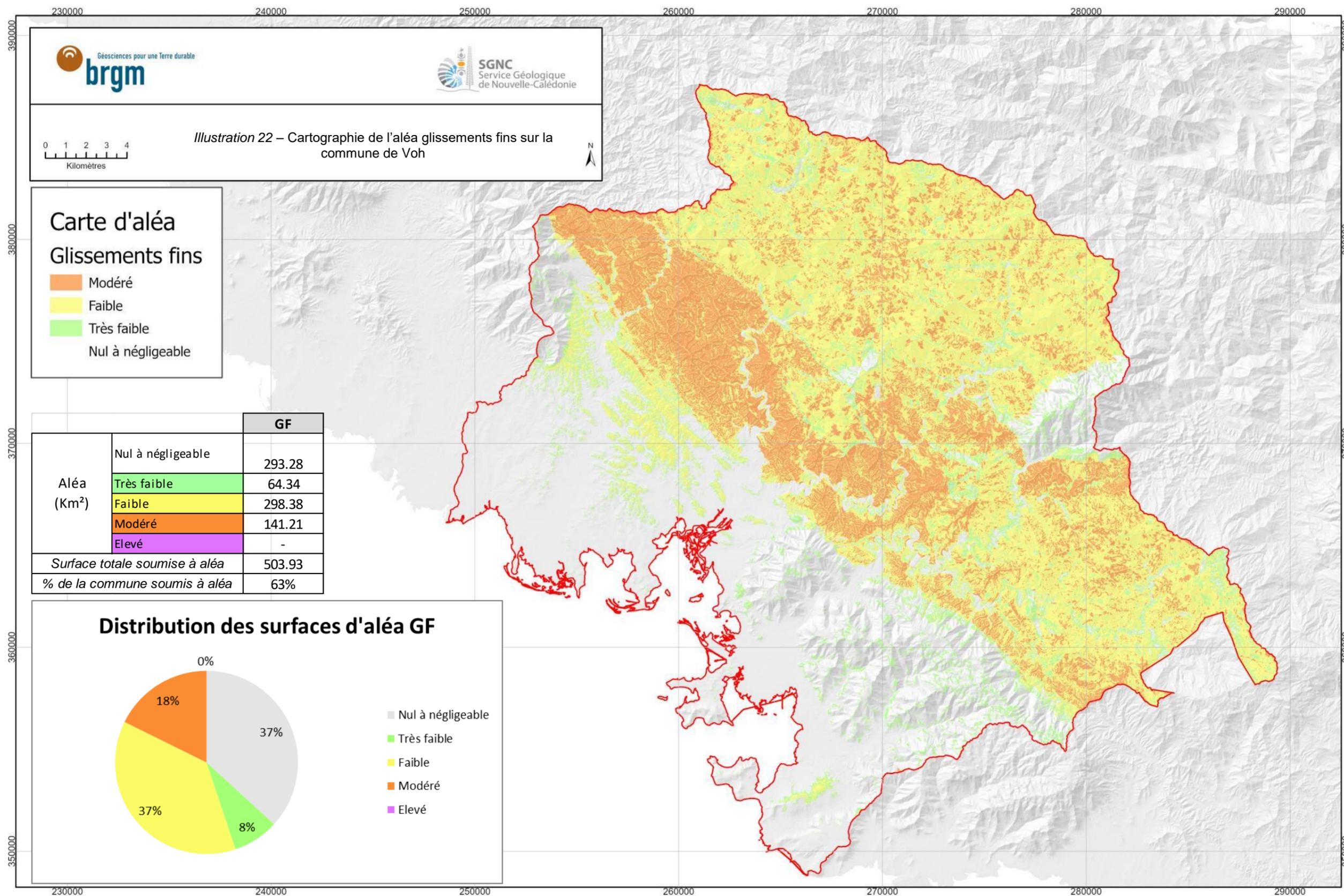
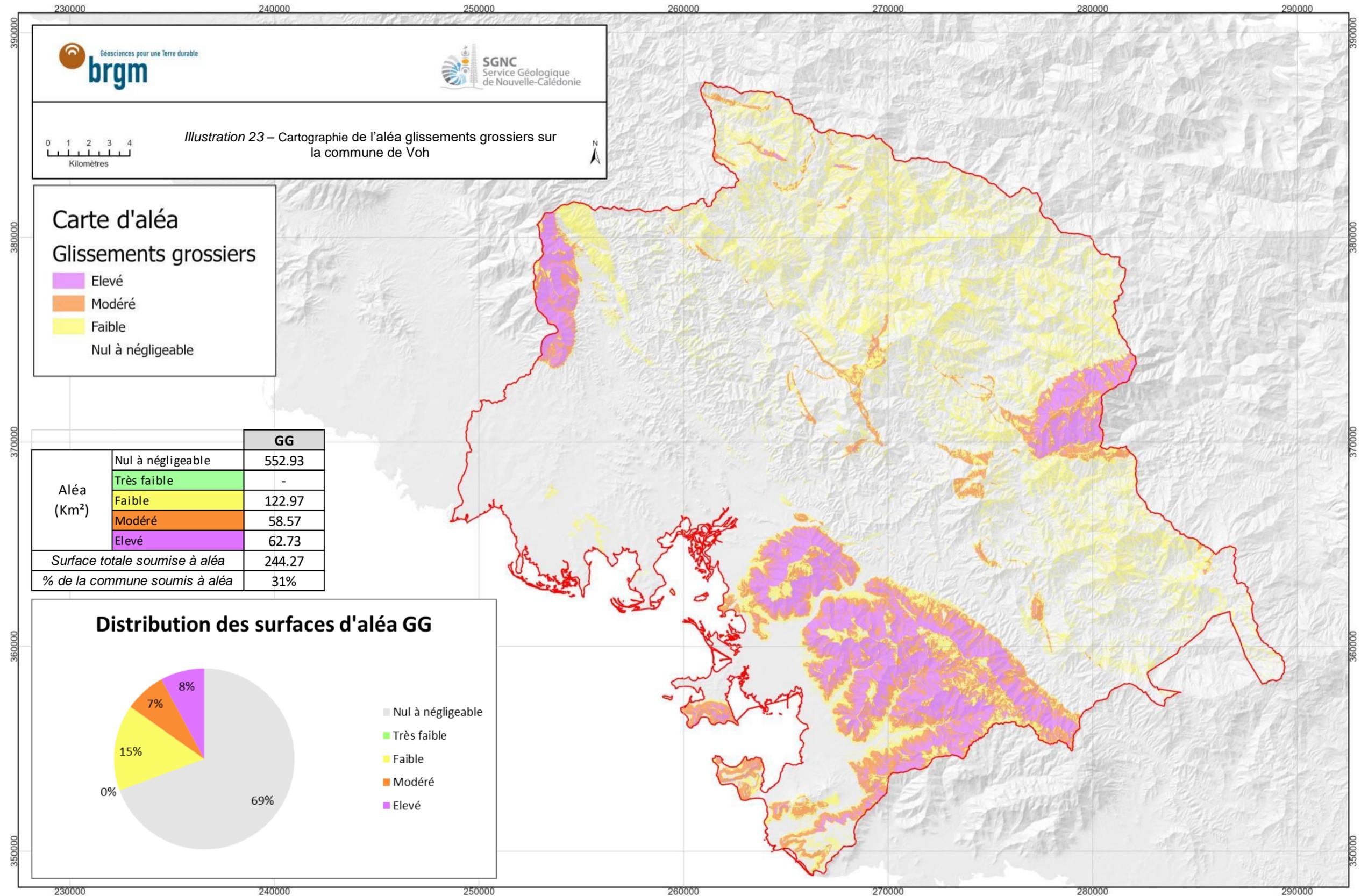
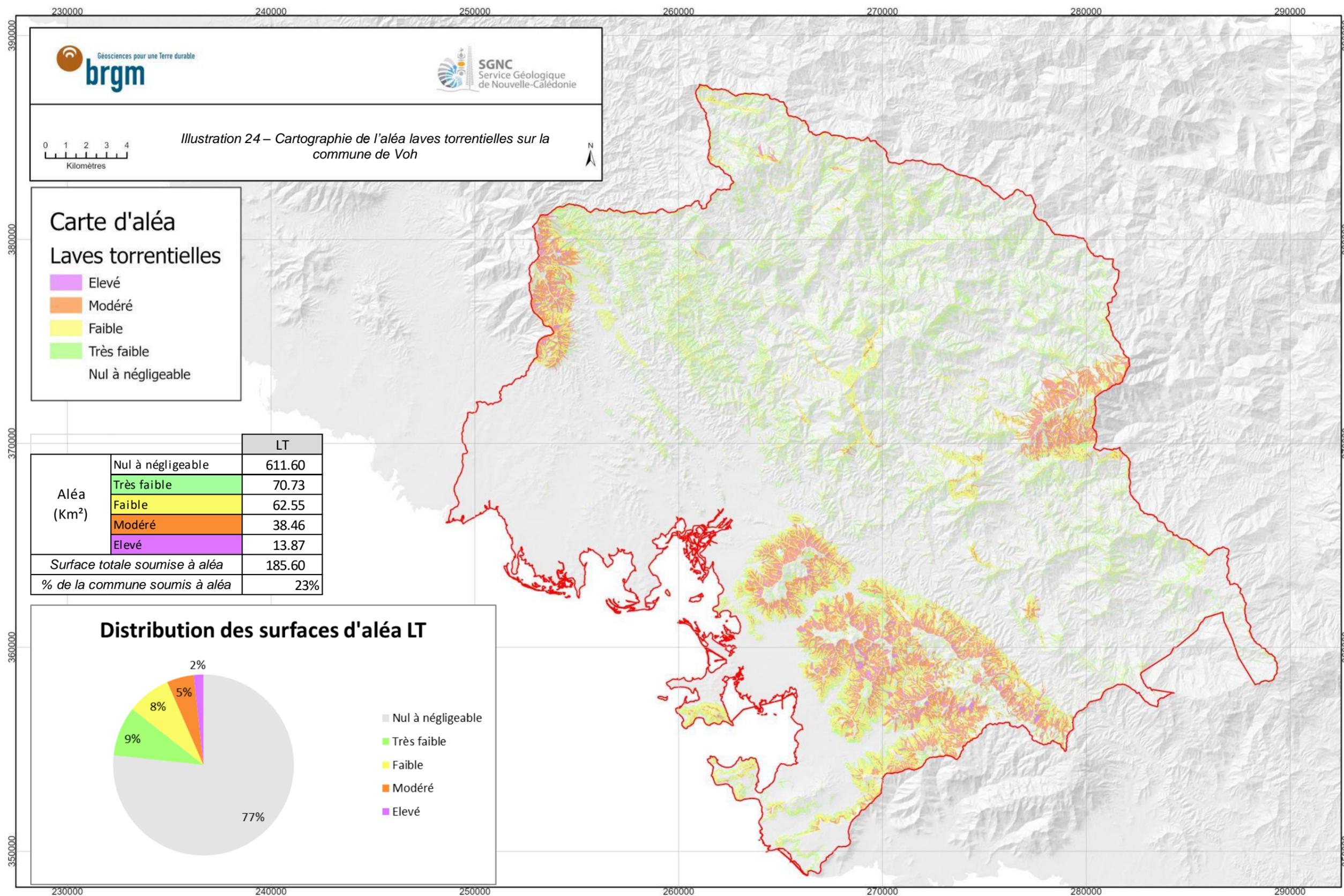


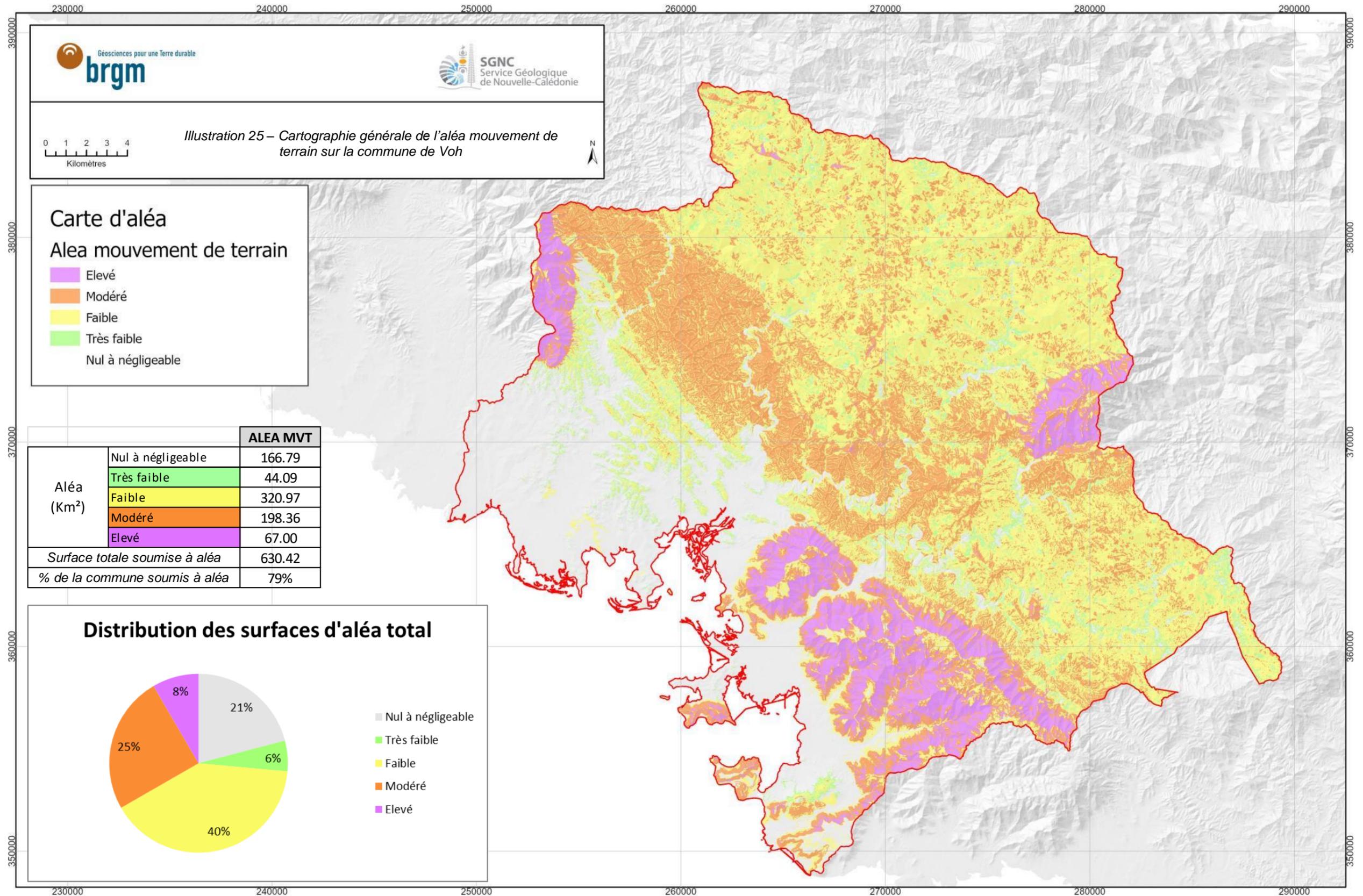
Illustration 20 – Exemple de propagation de LT hors emprise de zone soumise théoriquement à aléa, plaine alluviale de la Voh.











5.3 Enjeux et risques

Au-delà, de la caractérisation de l'aléa mouvement de terrain, il convient d'apprécier dans quelle mesure les enjeux communaux sont exposés aux aléas naturel. Afin d'initier une réflexion sur le sujet, il est proposé de dénombrer les bâtiments exposés à l'aléa mouvements de terrain à partir de la base de données topographique de la DITTT. Les bâtiments sont pris dans leur ensemble sans distinction de leur usage (bâtiments publics, privés, habitations, techniques, industriels, etc.) ni de leur taille. Il s'agit ici de fournir un ordre de grandeur de la proportion d'enjeux concernés.

Au final, tous phénomènes confondus, 3,2% des constructions sont concernés par un niveau d'aléa qualifié de modéré (3,0%) à élevé (0,2 soit 10 bâtiments). Cette estimation est à rapprocher des 33% du territoire communal exposé à ces mêmes niveaux d'aléa. Autrement dit, l'implantation actuelle des constructions a préférentiellement évité les versants les plus exposés aux instabilités.

Niveau d'aléa	Nombre de bâtiment	Pourcentage du parc bâti
Elevé	10	0.2%
Modéré	118	3%
Faible	485	11%
Très faible	171	4%
Négligeable	3 488	82%
Total	4 272	100%

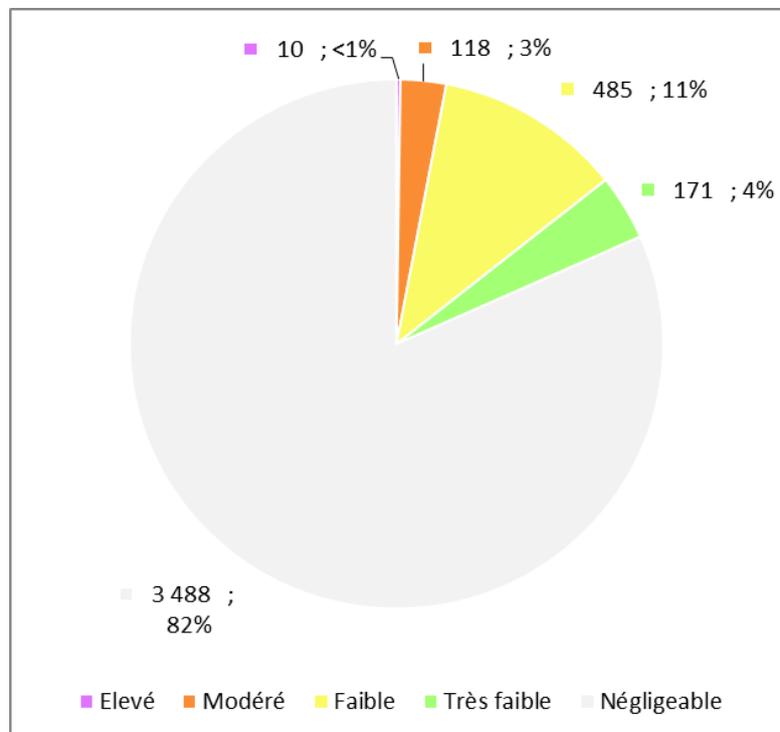


Illustration 26 – Exposition des constructions à l'aléa mouvements de terrain sur la commune de Voh

6 Conclusion et perspectives

La cartographie de l'aléa mouvement de terrain à l'échelle du 1 :25 000^{ème} menée sur la commune de Voh s'inscrit dans le cadre d'un programme pluriannuel portant sur quinze communes de Nouvelle-Calédonie. Cette démarche contribue également à la politique publique de gestion des risques du gouvernement de Nouvelle-Calédonie.

La méthode déployée est décrite de manière approfondie dans un rapport méthodologique distinct. La cartographie proposée par type de phénomène permet une approche homogène sur l'ensemble du territoire communal en distinguant rupture et propagation et en développant une approche pseudo-quantifiée.

Outre une méthode conforme aux meilleures pratiques, ce travail a bénéficié :

- D'un effort important de cartographie des formations superficielles (régolithe) et
- D'un inventaire particulièrement conséquent des phénomènes d'instabilité recensés et décrits suivant leur type :
 - o GG : Glissement dans matériaux grossiers (1750 évènements, 47% des cas)
 - o GF : Glissement dans matériaux fins (1757 évènements, 47%)
 - o LT : Lave-torrentielle (30 évènements, 1%)
 - o CB : Chute de blocs (13 évènements, <1%).

Plus de la moitié (59%) des phénomènes sont datés d'avant 1976. 41% des évènements sont identifiés entre 1976 et 2008.

Ces données permettent d'élaborer des cartes d'aléa pour chacun des phénomènes identifiés. Ces cartes définissent à l'échelle de la commune la possibilité de survenance du phénomène dans le futur.

Au final une carte d'aléa « mouvements de terrain » est produite en agrégeant les cartes d'aléa par phénomène. La synthèse des résultats à l'échelle communale montre que la commune est concernée par l'aléa mouvements de terrain sur 79% de son territoire, les niveaux d'aléa élevé et modéré couvrant respectivement 8% et 25% de la commune.

Pour autant, un peu plus de 3% des constructions sont concernés par un niveau d'aléa qualifié de modéré à élevé (tous phénomènes confondus). Autrement dit, l'implantation actuelle des constructions a préférentiellement évité les versants les plus exposés aux instabilités.

Ce programme de cartographie de l'aléa « mouvements de terrain » est la première étape d'une politique publique de gestion des risques : 1) Connaissance de l'aléa, du risque du territoire. Il permet en outre d'alimenter les autres piliers de la prévention (Illustration 27), notamment :

- L'information préventive et l'éducation des citoyens (3), grâce au Dossier sur les Risques Majeurs (DRM), au Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs (DICRIM) ou à la diffusion des résultats ;
- La prise en compte des risques dans l'aménagement (4) au travers par exemple d'un porté à connaissances ou de schémas d'aménagements (dont PUD) ;
- La réduction de la vulnérabilité (5) ;
- La préparation de l'organisation des secours (6) avec le Schéma Directeur d'Analyse et de Couverture des Risques (SDACR) et les Plans Communaux de Sauvegarde (PCS).
- Enfin, la prise en compte du retour d'expérience (7) alimentera nos bases de données et affinera notre démarche.



Illustration 27 – Les 7 piliers de la prévention des risques naturels, au service de la Politique Publique de Gestion des Risques (PPGR) en Nouvelle-Calédonie

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.*

Projet national C2ROP. Glossaire du risque rocheux. Cerema, (2020). Collection : Références. ISBN : 978-2-37180-452-4

7.2 Rapports

Maurizot P., Rouet I., Robineau P., Allenbach M. Parisot J-C. (2007). Mécanismes fondamentaux des mouvements de terrain dans les massifs ultra-basiques en Nouvelle Calédonie. BRGM/RP-55041-FR.

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

7.3 Documents académiques

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

Iwahashi, J. and R. J. Pike (2007). "Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature." *Geomorphology* 86(3-4): 409-440.

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

8 ANNEXES

8.1 Annexe 1 – Lexique des termes utilisés

GEOLOGIE

SUBSRATUM ROCHEUX

ROCHES MAGMATIQUES

PERIDOTITE : La péridotite est une roche magmatique qui constitue la majeure partie du manteau supérieur. De nature ultrabasique (pauvre en silice) et grenue, elle se compose essentiellement d'olivines, de pyroxène et de serpentine. Il existe plusieurs types de péridotites en fonction de leur teneur en olivine et en pyroxènes : dunite, wehrlite, harzburgite et lherzolite. En Nouvelle-Calédonie, par l'action de l'altération météoritique, un profil d'altération parfois très épais s'est développé sur cette formation (terres rouges).

BASALTE : Le basalte est une roche magmatique volcanique issue d'un magma refroidi rapidement et caractérisée par sa composition minéralogique : plagioclases (50 %), pyroxènes (25 à 40 %), olivine (10 à 25 %), et de 2 à 3 % de magnétite. Il a une origine volcanique et est un des constituants principaux de la croûte océanique.

ROCHES METAMORPHIQUES

SERPENTINITE : La serpentinite est une roche métamorphique. Elle tire son nom de son aspect semblable à celui d'écailles et provoque une sensation au toucher qui a pu faire penser à la peau d'un serpent. Elle ne doit pas être confondue avec la serpentine, qui est un nom général pour plusieurs espèces minérales. Cette roche apparaît en filons, en petites lentilles ou en masses importantes (semelle des péridotites).

ROCHES SEDIMENTAIRES

GRES : Le grès est une roche sédimentaire détritique, issue de l'agrégation de grains de taille majoritairement sableuse et consolidé lors de la diagenèse. Issues de l'érosion des roches qui déterminent en grande partie sa composition, les grains sont principalement du quartz cimenté par de la silice, de la calcite, de l'oxyde de fer ou de l'argile. Selon le degré de cimentation, de sa composition et de son altération, il peut s'agir d'une roche très friable ou au contraire très dure. Il se rencontre dans une grande variété de milieux de dépôt depuis le domaine continental (rivière, plage) au domaine marin (turbidites). Non consolidé, son équivalent est le sable.

SILTITE : Une siltite est une roche sédimentaire détritique consolidée, de granulométrie intermédiaire entre un grès (plus grossier) et une argilite. Elle est composée au 2/3 de limon (grains dont la taille se situe entre les argiles et les sables). Elle se différencie du grès en raison des pores plus petits et d'une plus grande proportion de fraction d'argile. D'un point de vue minéralogique, elle se compose de quartz, feldspaths de minéraux argileux (micas) et avec des carbonates ou oxydes de fer.

ARGILITE : Une argilite est une forme de roche sédimentaire détritique, argileuse indurée, à grain fin (<2microns) très peu perméable. Elles résultent de la consolidation de micro feuillets d'argile parallèles et/ou de boue argileuse fine. Elles sont composées de micas, quartz et d'argile, mais le grain de cette roche est si fin qu'elle semble homogène. C'est une roche tendre et légèrement « grasse » au toucher.

CHERT : Un chert, ou phtanite (terme anciennement utilisé en NC) ou une chaille (terme français moins utilisé), est une roche sédimentaire siliceuse.

CALCAIRE : Le calcaire est une roche sédimentaire qui se forme essentiellement en milieu marin, par accumulation des débris de coquilles et coraux. A la mort de ces animaux, les coquilles s'accumulent sur le fond marin formant des boues carbonatées. Elles se transforment en roche calcaire grâce à la pression et au temps. Néanmoins, les coquilles calcaires peuvent se dissoudre, et ce, d'autant plus facilement quand la température de l'eau est froide et la pression élevée. Ces conditions, expliquent que le calcaire se forme essentiellement dans des eaux chaudes et peu profondes, comme les lagons ou les lagunes.

FLYSCH : Formation sédimentaire détritique, souvent épaisse, constituée par des alternances répétées de grès plus ou moins grossier et d'argile plus ou moins schisteuse, provenant de l'érosion de chaînes de montagne en cours de surrection.

FORMATIONS DU REGOLITHE

Le régolithe (également écrit régolite) (du grec ancien : ῥήγος/rhêgos, signifiant couverture et λίθος/lithos, signifiant roche) est en pédologie la partie du sol recouvrant la roche-mère, qui peut contenir du matériel meuble, comme de la poussière ou de la terre, et des roches saines. Le régolithe peut être autochtone s'il provient de l'altération des roches en présence (altérite) ou allochtone lorsqu'il est amené par un processus quelconque (comme les alluvions ou le démantèlement de versant).

Les formations allochtones sont les sédiments fluviatiles, lacustres, côtiers, glaciaires, ou éoliens, les éboulis, les colluvions et les formations de pente.

Les formations autochtones sont les profils d'altération formés in situ sur tous types de roches. Les « altérites » formées dans ces profils sont des roches dont la genèse ou les propriétés actuelles résultent de processus d'altération supergène, quel qu'en soit l'âge. À ce titre, on peut dire que le régolithe est formé par interaction de la géosphère avec l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère.

FORMATIONS AUTOCHTONES (FAU)

ALTERITE : Une altérite est une formation géologique (généralement meuble) superficielle, formée in situ, résultant de l'altération physico-chimique de roches antérieures sans transformations pédologiques notables. Les processus d'altération conduisent à la formation de sables, de limons et d'argiles d'altération.

CUIRASSE : La cuirasse, en pédologie, est une croûte superficielle, pouvant avoir plusieurs mètres d'épaisseur, elle est fortement durcie à la suite de la précipitation d'hydroxydes de fer et d'alumine. Elle se forme principalement dans les régions de climat intertropical présentant une alternance de saisons, mais surtout à saisons sèches nettement marquées. La cuirasse joue donc, vis à vis de l'érosion, un rôle protecteur.

LATERITE : La latérite (du latin later, brique) est une roche rouge ou brune, qui se forme par altération des roches sous les climats tropicaux. Au sens large, elle désigne l'ensemble des matériaux, meubles ou indurés, riches en hydroxydes de fer ou en hydroxyde d'aluminium, qui constituent les sols, les horizons superficiels et les horizons profonds de profil d'altération. On trouve des latérites surtout en milieu intertropical.

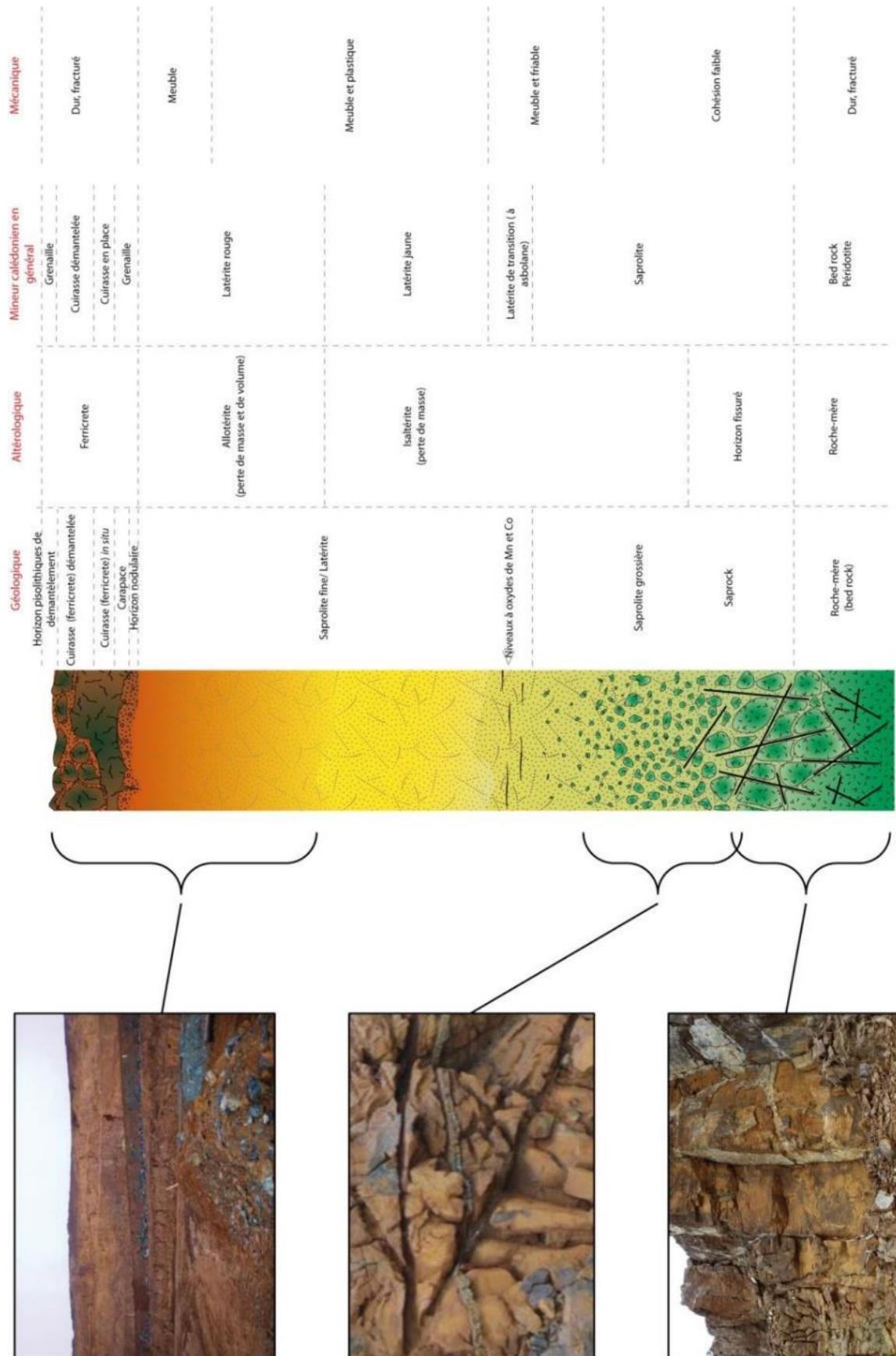
SAPROLITE : Une saprolite (du grec ancien sapos, décomposé) est une roche généralement meuble à dominante argileuse. Formant une couche géologique, surmontant dans des coupes de sol profondes la roche-mère, cette altérite résulte de l'altération chimique d'une roche-mère, due à l'action du climat, de l'eau ou l'action hydro-thermale, sans avoir été transportée. Elle est friable et présente les structures de la roche d'origine et de nouvelles structures.

FORMATIONS ALLOCHTONES (FAL)

ALLUVIONS : Une alluvion consiste en un dépôt sédimentaire émergé, constitué par des matériaux solides non consolidés, transportés et déposés par les eaux courantes. Les alluvions qualifient les regroupements de cailloux, graviers, galets, sables ou limons. Les dépôts alluviaux se réalisent lorsque le débit devient insuffisant pour transporter la matière. Les alluvions peuvent se déposer dans le lit du cours d'eau ou dans les estuaires marins et s'accumuler au point de rupture de pente.

COLLUVIONS : Une colluvion ou un dépôt de pente est un dépôt meuble sur un versant, mis en place par gravité. Le terme s'emploie presque toujours au pluriel. Les colluvions reflètent la lithologie du haut du versant. Elles nappent, sur le bas du versant, la roche en place. Les éléments ont subi un faible transport, à la différence des alluvions.

EBOULIS : Un éboulis, parfois appelé pierrier, résulte de la chute de fragments rocheux déplacés pierre par pierre par gravité et dont l'accumulation se fait à la base de pentes rocheuses montagneuses, typiquement des falaises, dont ils se sont détachés. Liés à différents facteurs comme l'érosion ou les conditions météorologiques, ces dépôts tapissent ainsi souvent le pied des versants ou des abrupts rocheux. Une éboulisation (chute de pierres) est la formation d'un éboulis. Les géomorphologues distinguent les processus selon le volume détaché : l'éboulisation est un détachement de quelques blocs (volume < 1 m³), l'éboulement comprend un volume entre 1 et 100 m³ et l'éroulement implique des volumes supérieurs à 100 m³.

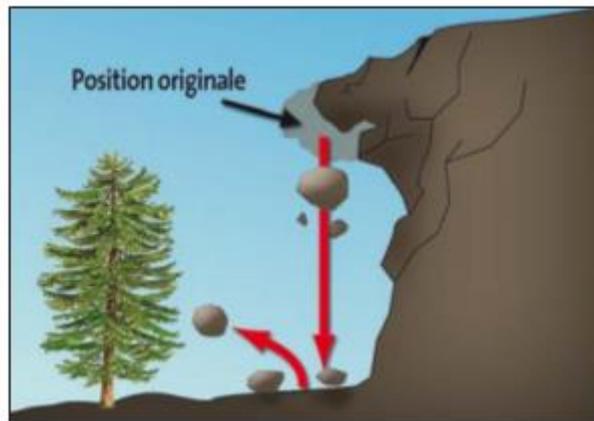


Profil d'altération en contexte de massif ultrabasique

MOUVEMENTS DE TERRAIN

CHUTES DE BLOCS

Ce sont des mouvements rapides, discontinus et brutaux résultant de l'action de la pesanteur et affectant des matériaux rigides et fracturés tels que calcaires, grès, roches cristallines, etc. Ces chutes sont caractérisées par une zone de départ, une zone de propagation et une zone d'épandage. Les blocs décrochés suivent généralement la ligne de plus grande pente. Les distances parcourues sont fonction de la position de la zone de départ dans le versant, de la pente du versant, de la taille, de la forme et du volume des blocs éboulés, de la nature de la couverture superficielle, de la végétation...

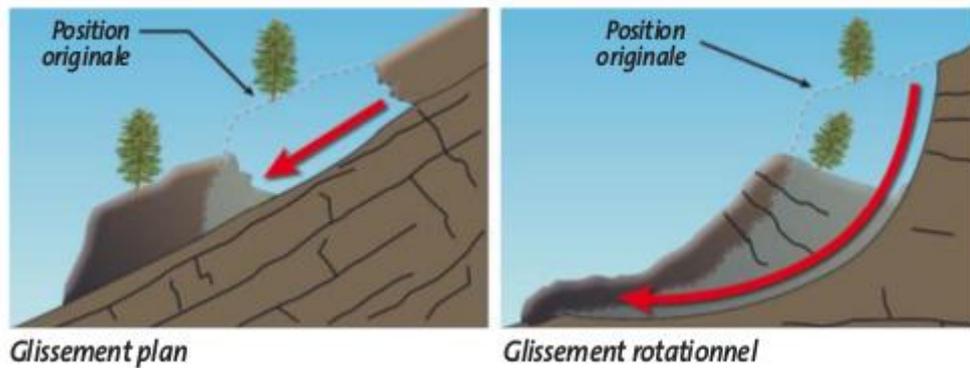


GLISSEMENTS DE TERRAIN

Un glissement de terrain correspond à un déplacement généralement lent (de quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) sur une pente, le long d'une surface de rupture dite surface de cisaillement, d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseur variables : quelques mètres cubes dans le cas du simple glissement de talus ponctuel à quelques millions de mètres cubes dans le cas d'un mouvement de grande ampleur pouvant concerner l'ensemble d'un versant.

Trois types de glissement sont distingués en fonction de la géométrie de la surface de rupture :

- glissement plan ou translationnel, le long d'une surface plane ;
- glissement circulaire ou rotationnel, le long d'une surface convexe ;
- glissement quelconque ou composite lorsque la surface de rupture est un mélange des deux types.



Dans le cadre de cette étude, la distinction est faite entre glissements fins et glissements grossiers sans distinction du mécanisme plan ou rotationnel :

GLISSEMENTS GROSSIERS

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.

GLISSEMENTS FINS

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.

LAVES TORRENTIELLES

Une lave torrentielle est un phénomène géologique en situation de relief, notamment de montagne. Son déclenchement est lié à des précipitations météorologiques violentes, soudaines et concentrées. La déstabilisation à une altitude élevée d'éléments solides dans une pente déclenche par les dévalements une importante accumulation d'énergie cinétique qui initie des vagues destructives impossibles à arrêter, érodant berges et zones de passage très rapidement et brutalement. Ces mélanges d'eau, de sédiments fins, d'éléments rocheux, de blocs parfois énormes, d'arbres, de graviers se déplacent à très grande vitesse.

On observe un consensus pour différencier une coulée de boue d'une lave torrentielle : la première se déclenche en pleine pente sans forcément l'existence préalable d'un chenal (ravine, talweg, torrent, ou autre élément du système hydrographique), alors que la seconde y est liée entièrement.

Ce type de phénomène est particulièrement dévastateur.



Lave torrentielle Houailou décembre 2011 (photo SGNC)

8.2 Annexe 2 – Indicateurs morphométriques des évènements

Pour chaque mouvement, différents indicateurs géométriques et morphologiques ont été calculés (surface, pente...), les distributions des pentes et des surfaces des enveloppes de propagation, par type de phénomène considéré (. Du point de vue des géométries, on note :

- Le nombre d'évènements répertoriés selon les surfaces croissantes montre une diminution globale pour les GG et les GF, dans une moindre mesure pour les LT. Cette décroissance du nombre d'évènements selon la surface (qui représente l'ampleur du phénomène) est cohérente avec les observations menées lors d'inventaires larges : les évènements de plus grande surface (i.e. de volume ou d'ampleur plus grande) sont moins fréquents que les évènements de faible surface. Cette distribution conforte la qualité de l'inventaire qui ne « néglige » pas les évènements de faible ampleur (à la résolution du projet, échelle 1 :25 000^{ème}) ;
- Parmi toutes les typologies, les surfaces des glissements fins sont les plus petites (~ 470 m² en moyenne). Celles des glissements grossiers sont légèrement plus grandes en moyenne (~ 1 012 m²). Enfin, les laves torrentielles, du fait de leur propagation importante, ont les surfaces les plus élevées (~12 367 m² en moyenne) ;
- Les valeurs médianes d'angle de ligne d'énergie sont de 19,8° LT, de 25,4° pour les GF et enfin elle est un plus élevée pour les GG (33,3°).
- 95% des laves torrentielles ont un angle de ligne d'énergie supérieur à 11,8°. Cette valeur est supérieure à 15,2° et 21,1° pour 95% des GF et GG respectivement.

Inventaire des évènements / Données morphométriques

VOH

Enveloppes de zone d'initiation

		GG	GF	COUL	LT	CB
Surfaces (m ²)	Nb	1750	2391	-	30	-
	Min.	37	32.6	-	273.4	-
	Max.	64405.8	4983.0	-	5906.6	-
	Moyenne	690.8	136.3	-	1562.6	-
	Ecart type	1824.4	156.3	-	1379.3	-

Enveloppes totales

		GG	GF	COUL	LT	CB
Surfaces (m ²)	Nb	1387	854		30	13
	Min.	111	109		2269	1121
	Max.	64406	8785		85233	16046
	Moyenne	828	420		16841	5300
	Ecart type	1997	540		17386	4205
Quantiles	5%	183.3	162.9		3547.1	-
	10%	215.3	181.0		3752.9	-
	25%	287.0	224.2		5472.3	-
	50%	456.3	300.5		12061.1	-
	75%	837.4	452.0		18457.5	-

Valeurs d'angle de ligne d'énergie pour la propagation

		GG	GF	COUL	LT	CB
Angle ligne d'énergie (°)	Nb	1387	854		30	13
	Min.	7.8	2.3		12.8	11.6
	Max.	50.7	53.5		38.9	44.1
	Moyenne	34.2	28.5		25.0	36.6
	Ecart type	6.7	6.4		8.0	8.6
Quantiles	5%	22.0	17.0		13.8	21.9
	10%	25.1	20.6		14.3	29.8
	25%	30.3	24.7		20.9	36.2
	50%	35.1	28.7		23.3	38.2
	75%	38.8	32.6		31.2	41.3

Synthèse des valeurs de pente et de surface des enveloppes de propagation

8.3 Annexe 3 – Susceptibilité de rupture par phénomène Poids relatifs des variables par type de phénomène Evaluation des modélisations statistiques.

GLISSEMENTS GROSSIERS

TABLE DES POIDS

Table 1 Poids sur jeu de donnée complet - Landform

landform	Class	Count	Point. Count	W+	Std +	W-	Std W-	Contrast
gentle slope, coarse texture, low convexity	1	1,434,291	67	-2.4291	0.1222	0.1823	0.0155	-2.6114
gentle slope, fine texture, low convexity	17	412,346	17	-2.554	0.2425	0.0494	0.0154	-2.6034
gentle slope, coarse texture, high convexity	33	1,067,150	36	-2.7546	0.1667	0.1348	0.0155	-2.8894
gentle slope, fine texture, high convexity	49	629,064	39	-2.146	0.1601	0.0733	0.0155	-2.2193
steep slope, coarse texture, low convexity	65	722,531	901	0.8566	0.0333	-0.1441	0.0174	1.0007
steep slope, fine texture, low convexity	81	1,064,128	912	0.4812	0.0331	-0.1006	0.0174	0.5818
steep slope, coarse texture, high convexity	97	865,129	612	0.2892	0.0404	-0.0412	0.0166	0.3304
steep slope, fine texture, high convexity	113	1,777,196	1,640	0.5552	0.0247	-0.2387	0.0197	0.7939

Table 2: Poids sur jeu de donnée complet - Régolithe

Régolithe	Class	Count	Point. Count	W+	Std W+	W-	Std W-	Contrast
FAU-mince	1	5,610,553	334	-2.1866	0.0547	1.1351	0.016	-3.3217
FAU-très mince	2	877,986	2,227	1.5679	0.0212	-0.6321	0.0224	2.2
FAL-anthropique	3	35,352	319	2.8435	0.0562	-0.074	0.016	2.9175
FAU-cuirasse démantelée	4	54,838	8	-1.2902	0.3536	0.005	0.0154	-1.2952
FAU-épais	5	51,138	33	0.1972	0.1741	-0.001	0.0155	0.1982
FAL-colluvions à blocs	7	557,829	1,302	1.4845	0.0277	-0.2956	0.0185	1.7801
FAL-formations alluviales	8	781,449	1	-6.0265	1	0.1031	0.0154	-6.1297

Table 3: Poids sur jeu de donnée complet - Substrat

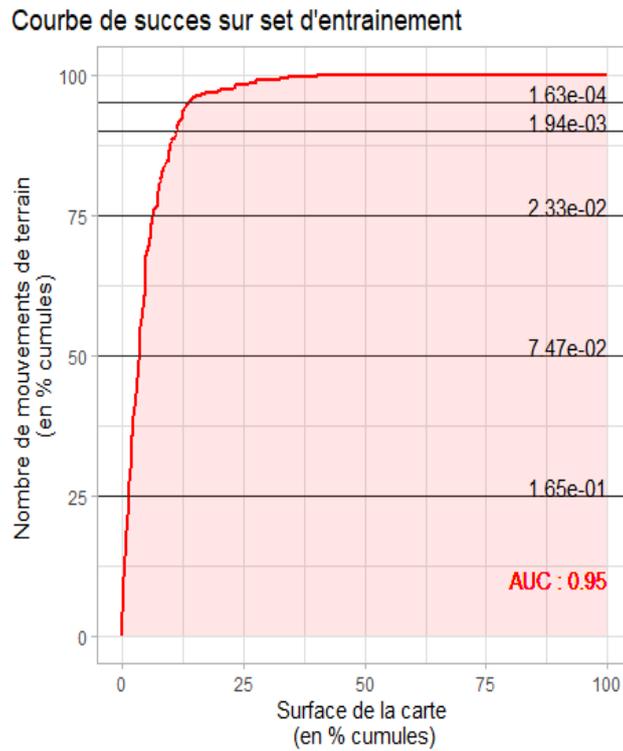
lithologie	Class	Count	Point. Count	W+	Std W+	W-	Std W-	Contrast
Amphibolites	1	397	0	0.6966	100	0.001	0.0154	0.6956
Argilites	2	1,396,295	3	-5.5084	0.5774	0.1926	0.0154	-5.7009
Basaltes indifférenciés	3	1,428,747	2	-5.9368	0.7071	0.1985	0.0154	-6.1353
Brèches	4	6,046	0	-2.0266	100	0.001	0.0154	-2.0276
Calcaires micritiques	5	5,934	0	-2.0079	100	0.001	0.0154	-2.0089
Cherts	6	123,072	2	-3.485	0.7071	0.0161	0.0154	-3.5011
Conglomérats	7	138,898	0	-5.1609	100	0.0182	0.0154	-5.1791
Gabbro	8	179	0	1.4932	100	0.001	0.0154	1.4922
Grès	9	2,613	0	-1.1877	100	0.001	0.0154	-1.1887
Péridotites indifférenciées	11	1,229,461	3,831	1.7743	0.0162	-2.2079	0.0504	3.9822
Pyroxénolites	12	46	0	2.8519	100	0.001	0.0154	2.8509
Schistes	13	2,763,654	46	-3.461	0.1474	0.4151	0.0155	-3.8762
Serpentinites	14	522,733	333	0.1843	0.0548	-0.014	0.016	0.1983
Siltites	15	268,826	7	-3.0135	0.378	0.0326	0.0154	-3.0461
Tufs	16	82,244	0	-4.6369	100	0.0111	0.0154	-4.648

Table 4 : Poids sur jeu de donnée complet – Pente

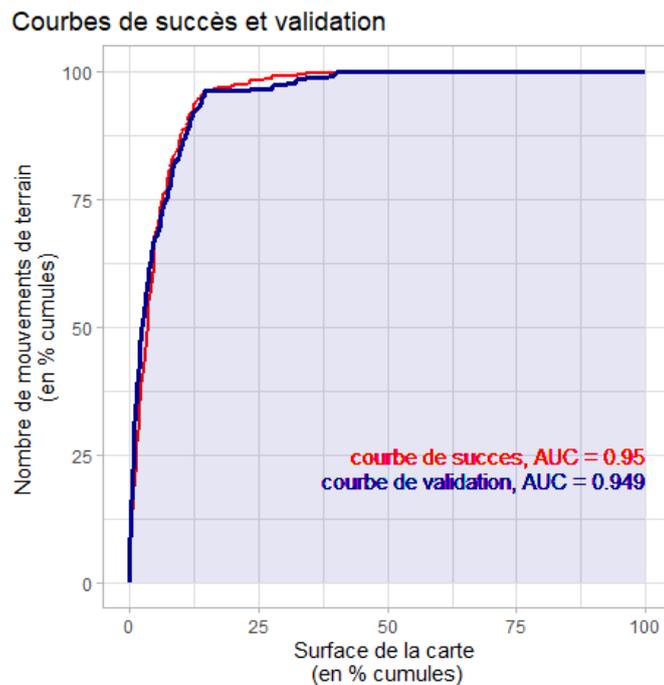
pente	Class	Count	Point. Count	W+	Std W+	W-	Std W-	Contrast
0-5	1	1,221,574	0	-7.3351	100	0.1661	0.0154	-7.5012
5-10	2	641,587	14	-3.1903	0.2673	0.0815	0.0154	-3.2717
10-15	3	620,648	53	-1.8258	0.1374	0.0681	0.0155	-1.8939
15-20	4	837,904	72	-1.8195	0.1179	0.0938	0.0155	-1.9133
20-25	5	1,157,408	153	-1.3888	0.0809	0.12	0.0157	-1.5088
25-30	6	1,454,592	352	-0.784	0.0533	0.1155	0.0161	-0.8995
30-35	7	1,152,260	740	0.1924	0.0368	-0.0357	0.0169	0.2281
35-40	8	598,171	1,183	1.3185	0.0291	-0.2505	0.0181	1.5691
40-45	9	219,114	1,113	2.2649	0.0301	-0.2778	0.0179	2.5427
45-50	10	55,365	441	2.7177	0.0478	-0.1028	0.0163	2.8205
>50	11	13,212	103	2.696	0.0989	-0.0223	0.0156	2.7183

SUR LES JEUX DE DONNEES D'ENTRAINEMENT ET DE VALIDATION

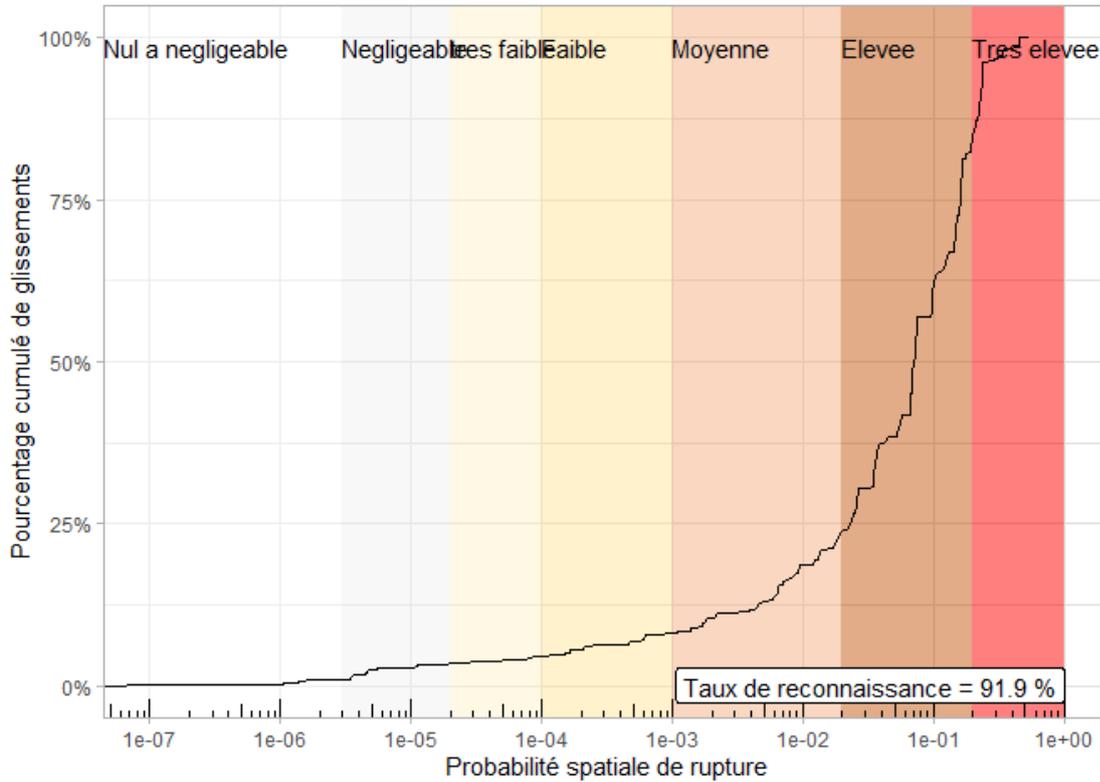
COURBE DE SUCCES ET AIRE SOUS LA COURBE



COURBE DE VALIDATION



COURBE DE RECONNAISSANCE SUR SET D'ENTRAINEMENT

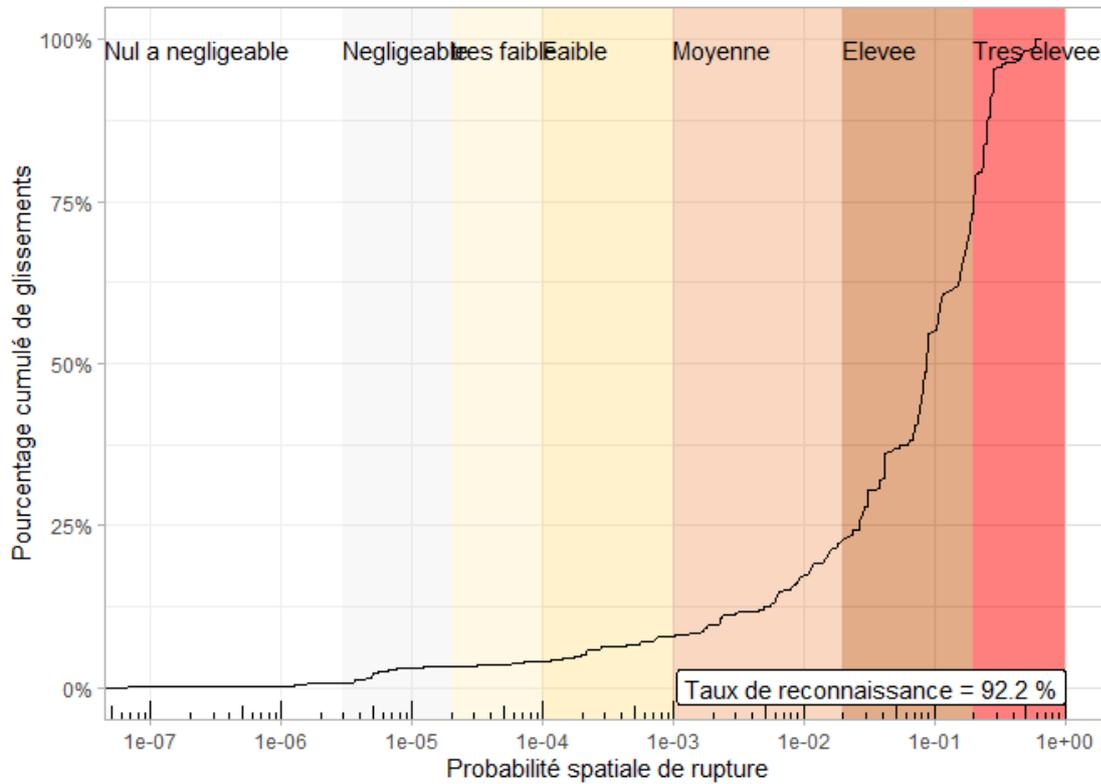


CONFIANCE STATISTIQUE

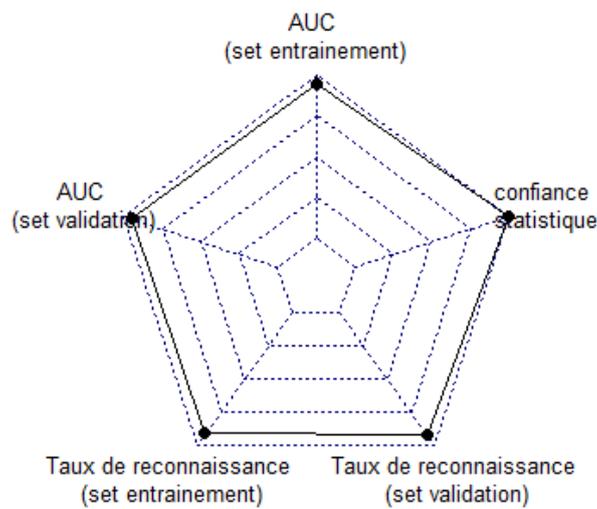
lower	upper	hazard_class	ncell	ncell_sup95	prct_sup95
0.000000	0.000003	Nul a négligeable	5,738,971	2,202,445	38.37700
0.000003	0.000020	Négligeable	848,500	773,071	91.11031
0.000020	0.000100	très faible	242,827	218,509	89.98546
0.000100	0.001000	Faible	175,962	168,396	95.70021
0.001000	0.020000	Moyenne	381,263	380,610	99.82873
0.020000	0.200000	Elevée	511,456	511,409	99.99081
0.200000	1.000000	Très élevée	70,166	70,166	100.00000

SUR LE JEU DE DONNEES COMPLET

COURBE DE RECONNAISSANCE



INDICATEURS STATISTIQUES



PROBABILITE ANNUELLE DE RUPTURE

probabilité de rupture spatiale	valeur raster	Npix classe	Npix gliss	proba temporelle	classe atteinte (jtc1)	classe atteinte
nulle à négligeable	1	5562175	14	5.72E-08	nulle à négligeable	nulle à négligeable
négligeable	2	976199	48	1.12E-06	très faible	négligeable
très faible	3	237913	18	1.72E-06	très faible	négligeable
faible	4	206184	44	4.85E-06	très faible	très faible
moyenne	5	395811	174	9.99E-06	très faible	très faible
forte	6	474826	557	2.67E-05	faible	faible
très forte	7	116037	303	5.93E-05	faible	faible

GLISSEMENTS FINS

TABLE DES POIDS

Table 5: Poids sur jeu de donnée complet - Landform

landform	Class	Count	Point. Count	W+	Std +	W-	Std W-	Contrast
gentle slope, coarse texture, low convexity	1	1,434,291	28	-2.6644	0.189	0.1854	0.0213	-2.8497
gentle slope, fine texture, low convexity	17	412,346	25	-1.5311	0.2	0.0423	0.0213	-1.5734
gentle slope, coarse texture, high convexity	33	1,067,150	34	-2.1745	0.1715	0.1288	0.0213	-2.3033
gentle slope, fine texture, high convexity	49	629,064	152	-0.1483	0.0811	0.0119	0.0219	-0.1601
steep slope, coarse texture, low convexity	65	722,531	104	-0.6664	0.0981	0.0473	0.0217	-0.7137
steep slope, fine texture, low convexity	81	1,064,128	451	0.4138	0.0471	-0.0829	0.0237	0.4968
steep slope, coarse texture, high convexity	97	865,129	199	-0.1975	0.0709	0.0222	0.0222	-0.2197
steep slope, fine texture, high convexity	113	1,777,196	1,241	0.9134	0.0284	-0.5596	0.0317	1.473

Table 6: Poids sur jeu de donnée complet - Régolithe

Régolithe	Class	Count	Point. Count	W+	Std W+	W-	Std W-	Contrast
FAU-mince	1	5,610,553	2,202	0.337	0.0213	-3.0513	0.1768	3.3883
FAU-très mince	2	877,986	27	-2.2099	0.1925	0.1056	0.0213	-2.3155
FAL-anthropique	3	35,352	0	-3.7923	100	0.005	0.0212	-3.7973
FAU-cuirasse démantelée	4	54,838	0	-4.2313	100	0.007	0.0212	-4.2384
FAU-épais	5	51,138	1	-2.6627	1	0.007	0.0212	-2.6697
FAL-colluvions à blocs	7	557,829	0	-6.551	100	0.0726	0.0212	-6.6236
FAL-formations alluviales	8	781,449	4	-4.003	0.5	0.1011	0.0212	-4.1041

Table 7: Poids sur jeu de donnée complet – Substrat

lithologie	Class	Count	Point. Count	W+	Std W+	W-	Std W-	Contrast
Amphibolites	1	397	0	0.6969	100	0.001	0.0212	0.6959
Argilites	2	1,396,295	1,138	1.0681	0.0297	-0.5189	0.0302	1.587
Basaltes indifférenciés	3	1,428,747	82	-1.5859	0.1104	0.1607	0.0216	-1.7467
Brèches	4	6,046	2	0.1659	0.7072	0.002	0.0212	0.1639
Calcaires micritiques	5	5,934	0	-2.0076	100	0.001	0.0212	-2.0086
Cherts	6	123,072	47	0.3096	0.1459	-0.0051	0.0214	0.3147
Conglomérats	7	138,898	43	0.0996	0.1525	-0.001	0.0214	0.1006
Gabbro	8	179	0	1.4934	100	0.001	0.0212	1.4924
Grès	9	2,613	0	-1.1874	100	0.001	0.0212	-1.1885
Péridotites indifférenciées	11	1,229,461	3	-4.7439	0.5774	0.1674	0.0212	-4.9113
Pyroxénolites	12	46	0	2.8522	100	0.001	0.0212	2.8512
Schistes	13	2,763,654	734	-0.0537	0.0369	0.0272	0.0258	-0.0809
Serpentinites	14	522,733	22	-1.8961	0.2132	0.0582	0.0213	-1.9544
Siltites	15	268,826	137	0.5983	0.0855	-0.0283	0.0218	0.6266
Tufs	16	82,244	26	0.1206	0.1961	-0.001	0.0213	0.1216

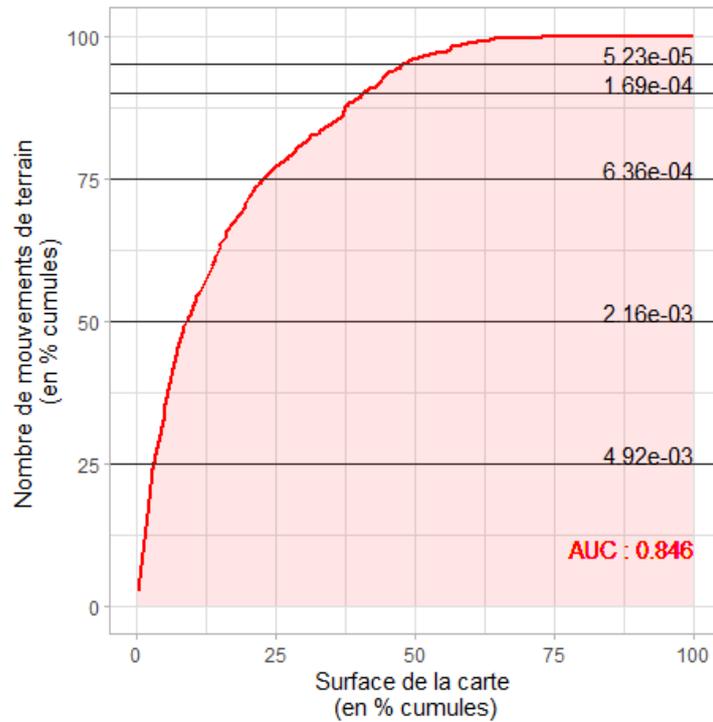
Table 8: Poids sur jeu de donnée complet – Pente

pente	Class	Count	Point. Count	W+	Std W+	W-	Std W-	Contrast
0-5	1	1,221,574	7	-3.8901	0.378	0.1631	0.0212	-4.0532
5-10	2	641,587	19	-2.2476	0.2294	0.0754	0.0213	-2.3231
10-15	3	620,648	44	-1.3747	0.1508	0.061	0.0214	-1.4357
15-20	4	837,904	128	-0.6069	0.0884	0.0522	0.0218	-0.6591
20-25	5	1,157,408	250	-0.2604	0.0633	0.0379	0.0225	-0.2983
25-30	6	1,454,592	599	0.385	0.0409	-0.1111	0.0247	0.4961
30-35	7	1,152,260	679	0.7436	0.0384	-0.2069	0.0254	0.9505
35-40	8	598,171	345	0.7221	0.0539	-0.0893	0.023	0.8114
40-45	9	219,114	134	0.7807	0.0864	-0.0345	0.0218	0.8152
45-50	10	55,365	28	0.5906	0.189	-0.0061	0.0213	0.5967
>50	11	13,212	1	-1.3092	1	0.002	0.0212	-1.3112

SUR LES JEUX DE DONNEES D'ENTRAINEMENT ET DE VALIDATION

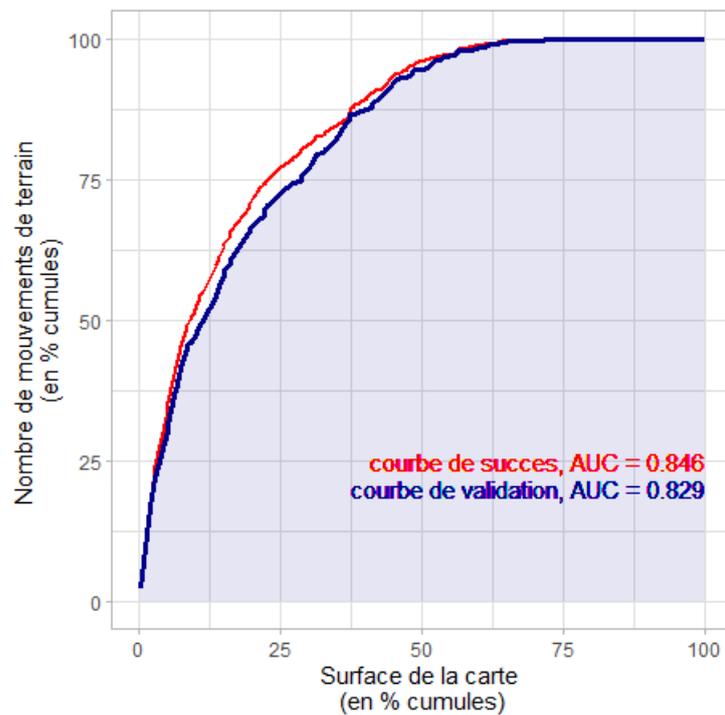
COURBE DE SUCCES ET AIRE SOUS LA COURBE

Courbe de succes sur set d'entrainement

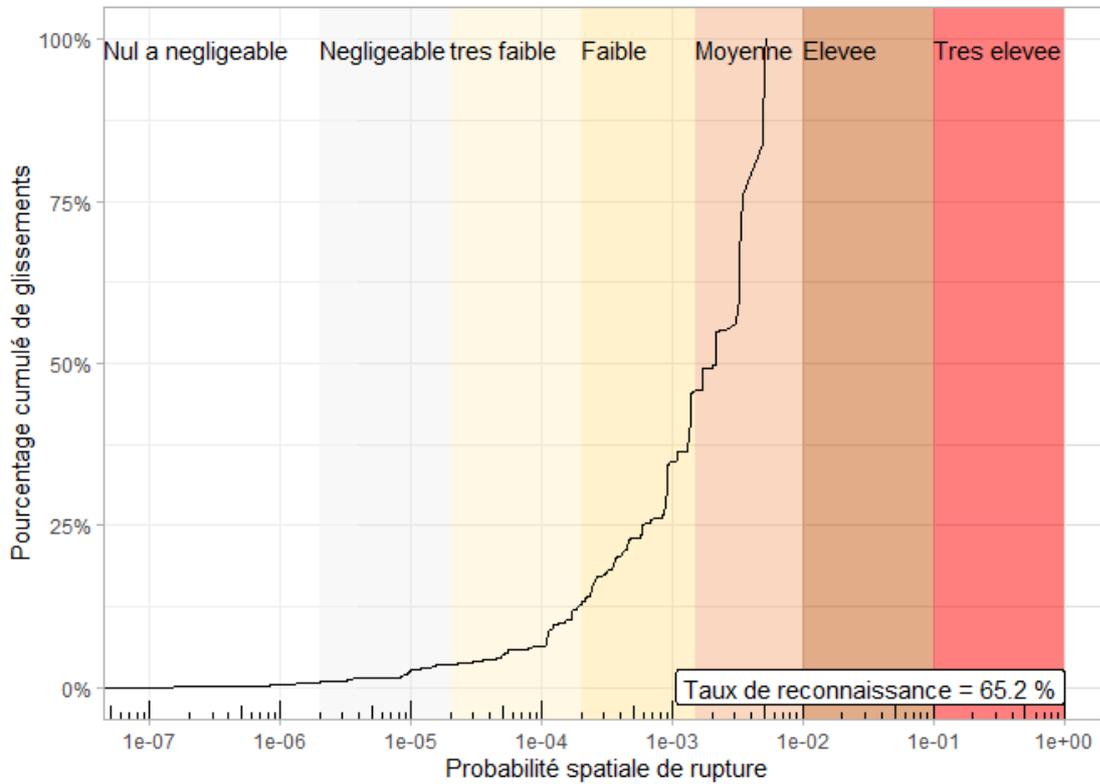


COURBE DE VALIDATION

Courbes de succès et validation



COURBE DE RECONNAISSANCE SUR SET D'ENTRAINEMENT

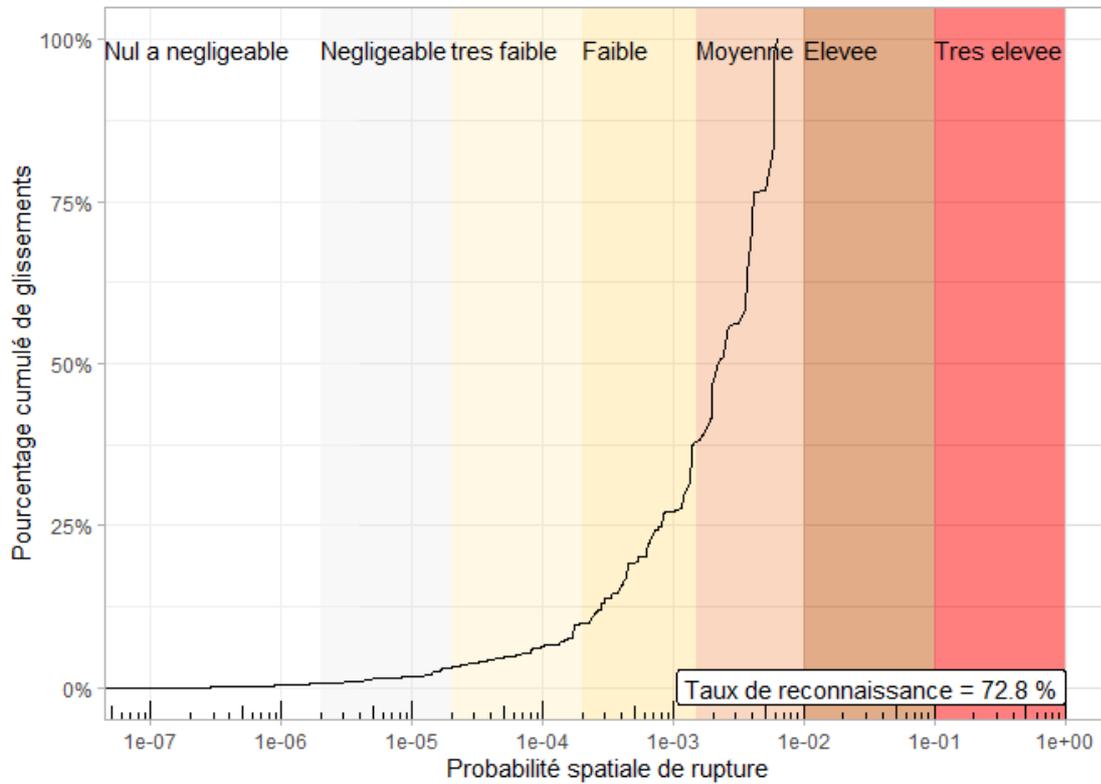


CONFIANCE STATISTIQUE

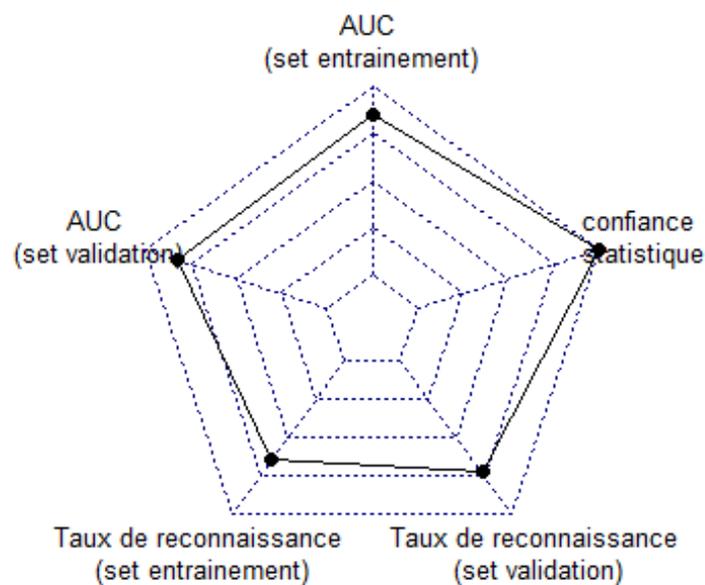
lower	upper	hazard_class	ncell	ncell_sup95	prct_sup95
0.000000	0.000004	Nul à négligeable	2,922,882	412,764	14.12182
0.000002	0.000020	Négligeable	902,918	766,056	84.84226
0.000020	0.000200	très faible	1,161,587	1,155,869	99.50774
0.000200	0.001500	Faible	2,119,123	2,115,474	99.82781
0.001500	0.010000	Moyenne	862,635	861,840	99.90784
0.010000	0.100000	Elevée			
0.100000	1.000000	Très élevée			

SUR LE JEU DE DONNEES COMPLET

COURBE DE RECONNAISSANCE



INDICATEURS STATISTIQUES



PROBABILITE ANNUELLE DE RUPTURE

probabilité de rupture spatiale	valeur raster	Npix classe	Npix gliss	proba temporelle	classe atteinte (jtc1)	classe atteinte
nulle à négligeable	0	2690	NA	NA		
négligeable	1	2938922	2	1.55E-08	nulle à négligeable	nulle à négligeable
très faible	2	653029	25	8.70E-07	négligeable	négligeable
faible	3	1425908	80	1.28E-06	très faible	très faible
moyenne	4	1749080	271	3.52E-06	très faible	très faible
forte	5	1202206	760	1.44E-05	faible	faible
très forte	7	NA	NA	NA		

LAVES TORRENTIELLES

TABLE DES POIDS

Table 9 : Poids sur jeu de donnée complet – Régolithe

Régolithe	Class	Count	Point. Count	W+	Std W+	W-	Std W-	Contrast
FAU-mince	1	5,610,553	12	-3.3145	0.2887	1.1911	0.0468	-4.5055
FAU-très mince	2	877,986	213	1.4169	0.0685	-0.4886	0.0625	1.9055
FAL-anthropique	3	35,352	170	4.4083	0.0769	-0.4444	0.0578	4.8527
FAU-cuirasse démantelée	4	54,838	6	0.6205	0.4083	-0.0061	0.0465	0.6266
FAU-épais	5	51,138	0	-4.1613	100	0.007	0.0462	-4.1683
FAL-colluvions à blocs	7	557,829	68	0.7286	0.1213	-0.0841	0.0499	0.8127
FAL-formations alluviales	8	781,449	0	-6.8879	100	0.1031	0.0462	-6.991

Table 10 : Poids sur jeu de donnée complet – Pentes

pen	Class	Count	Point. Count	W+	Std W+	W-	Std W-	Contrast
0-5	1	1,221,574	0	-7.3346	100	0.1661	0.0462	-7.5007
5-10	2	641,587	0	-6.6907	100	0.0834	0.0462	-6.7741
10-15	3	620,648	0	-6.6575	100	0.0812	0.0462	-6.7387
15-20	4	837,904	3	-2.7993	0.5774	0.1049	0.0463	-2.9042
20-25	5	1,157,408	13	-1.656	0.2774	0.1283	0.0468	-1.7842
25-30	6	1,454,592	22	-1.3584	0.2132	0.1528	0.0473	-1.5112
30-35	7	1,152,260	67	-0.0117	0.1222	0.0023	0.0499	-0.0141
35-40	8	598,171	147	1.4298	0.0825	-0.2975	0.0557	1.7273
40-45	9	219,114	152	2.468	0.0811	-0.3642	0.0562	2.8322
45-50	10	55,365	64	2.9791	0.1251	-0.1392	0.0497	3.1183
>50	11	13,212	1	0.252	1	0.003	0.0462	0.249

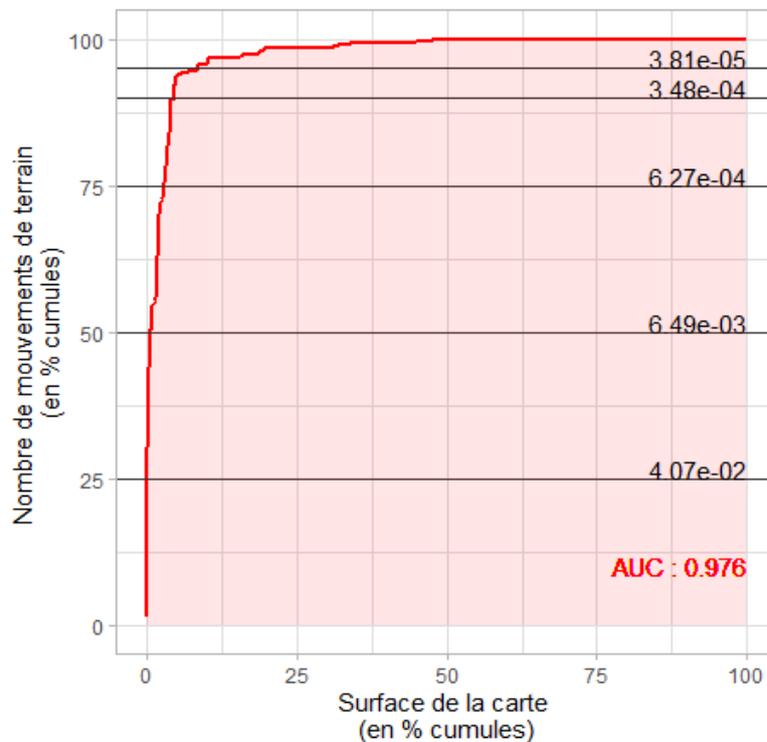
Table 11 Poids sur jeu de donnée complet – TPI

tpi	Class	Count	Point. Count	W+	Std W+	W-	Std W-	Contrast
V-shape river valley. Deep narrow canyons	1	422,789	61	0.8972	0.128	-0.0848	0.0495	0.982
Lateral midslope incised drainage	2	659,106	122	1.1463	0.0905	-0.2145	0.0537	1.3608
Upland incised drainage. Stream headwaters	3	58,286	53	2.7388	0.1374	-0.1129	0.049	2.8517
U-shape valleys	4	643,878	19	-0.69	0.2294	0.0426	0.0471	-0.7326
Broad flat area (slope=0)	5	1,120,693	0	-7.2484	100	0.152	0.0462	-7.4004
Broad open slopes (slopes>0)	6	3,189,000	107	-0.5616	0.0967	0.2521	0.0526	-0.8136
Flat ridge tops mesa tops	7	689,727	91	0.8077	0.1048	-0.1247	0.0514	0.9324
Local ridge/hilltops within broad valleys	8	43,760	1	-0.9457	1	0.003	0.0462	-0.9487
Lateral midslope drainage divides. Local ridges in plains	9	669,091	7	-1.727	0.378	0.0726	0.0465	-1.7996
Mountain top. High narrow ridges	10	475,505	8	-1.2519	0.3536	0.0447	0.0466	-1.2966

SUR LES JEUX DE DONNEES D'ENTRAINEMENT ET DE VALIDATION

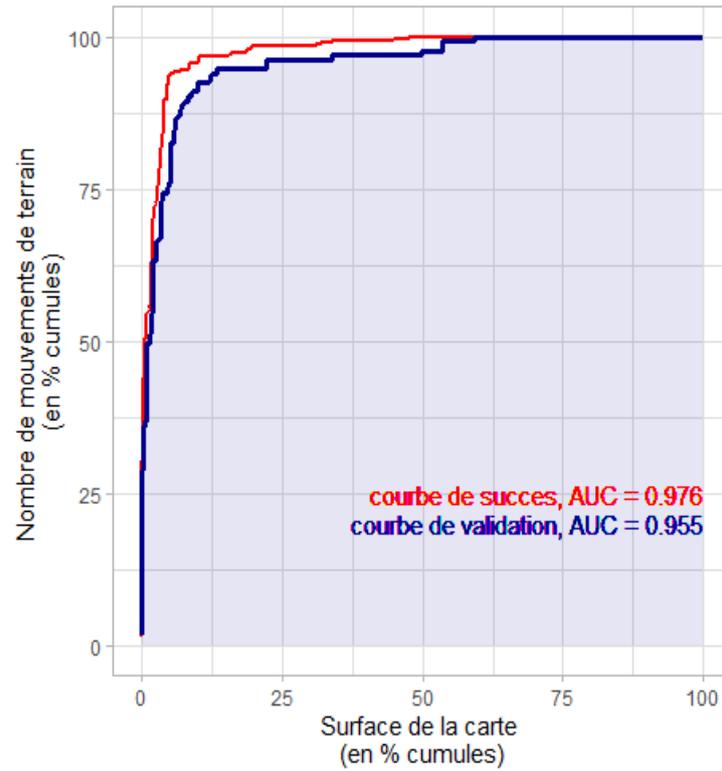
COURBE DE SUCCES ET AIRE SOUS LA COURBE

Courbe de succes sur set d'entrainement

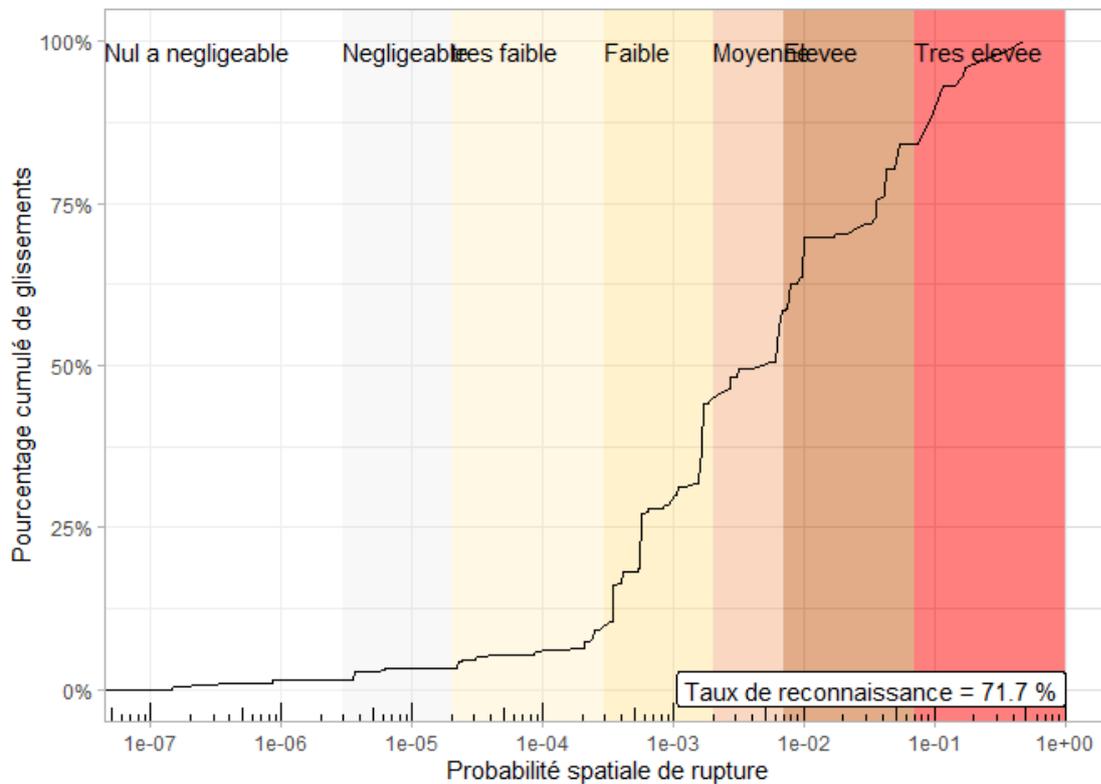


COURBE DE VALIDATION

Courbes de succès et validation



COURBE DE RECONNAISSANCE SUR SET D'ENTRAINEMENT

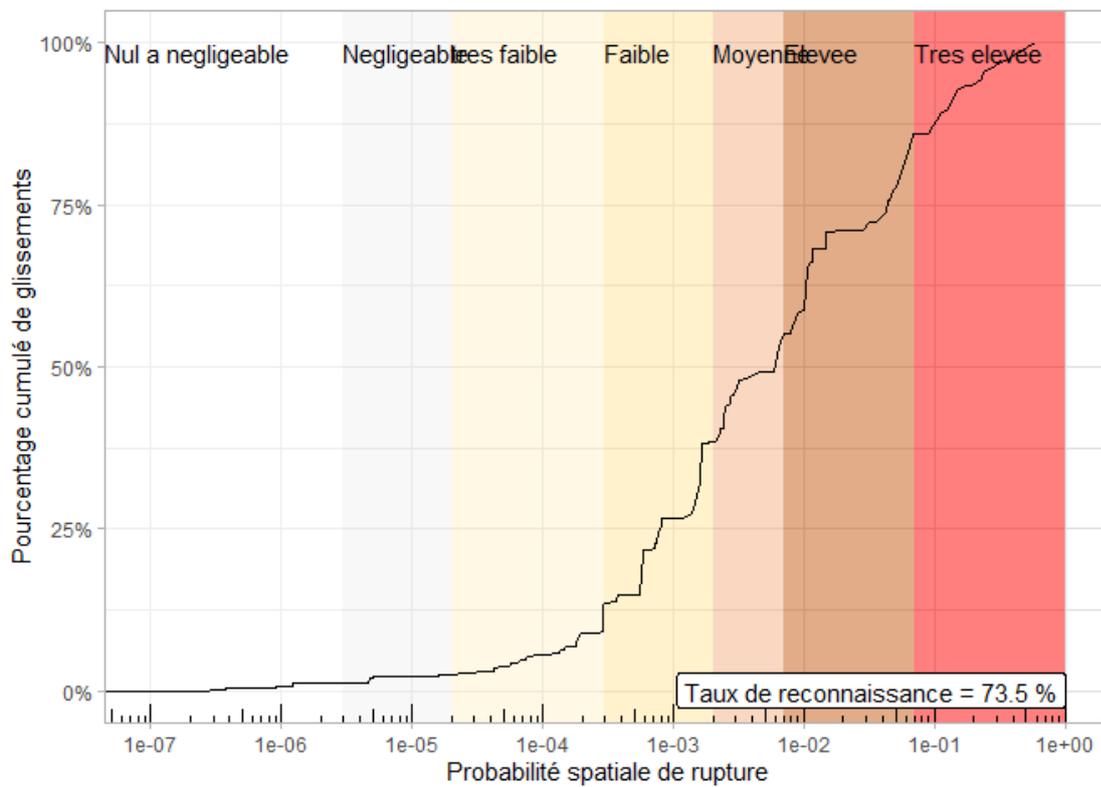


CONFIANCE STATISTIQUE

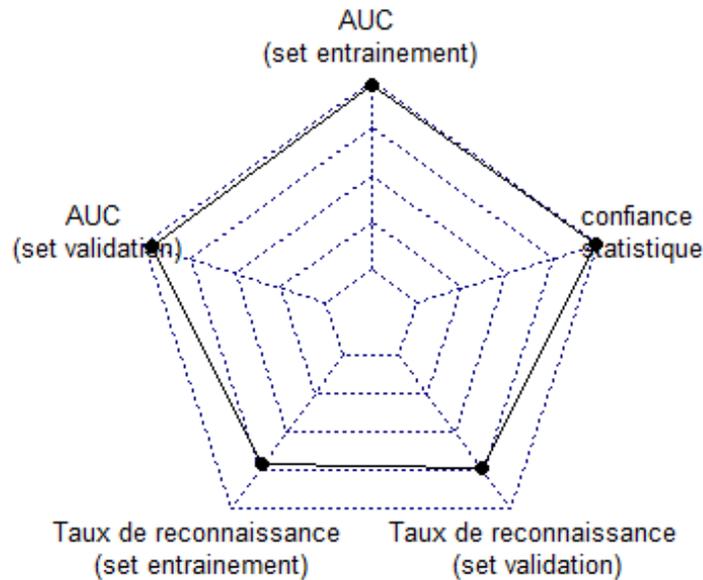
lower	upper	hazard_class	ncell	ncell_sup95	prct_sup95
0.000000	0.000003	Nul à négligeable	6,337,064	472,802	7.46090
0.000003	0.000020	Négligeable	733,569	454,333	61.93460
0.000020	0.000300	très faible	532,635	454,061	85.24806
0.000300	0.002000	Faible	251,064	227,454	90.59602
0.002000	0.007000	Moyenne	82,122	80,858	98.46083
0.007000	0.070000	Elevée	30,438	30,222	99.29036
0.070000	1.000000	Très élevée	2,253	2,211	98.13582

SUR LE JEU DE DONNEES COMPLET

COURBE DE RECONNAISSANCE



INDICATEURS STATISTIQUES



PROBABILITE ANNUELLE DE RUPTURE

probabilité de rupture spatiale	valeur raster	Npix classe	Npix gliss	proba temporelle	classe atteinte (jtc1)	classe atteinte
nulle à négligeable	1	6145272	1	3.70E-09	nulle à négligeable	nulle à négligeable
négligeable	2	737271	2	6.17E-08	nulle à négligeable	nulle à négligeable
très faible	3	700262	20	6.49E-07	négligeable	négligeable
faible	4	258771	21	1.84E-06	très faible	très faible
moyenne	5	93246	NA	NA		
forte	6	31976	30	2.13E-05	faible	faible
très forte	7	2347	4	3.87E-05	faible	faible

8.4 Annexe 4 – Méthode d'évaluation de l'aléa mouvement de terrain

DEFINITIONS 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).

La qualité des données et les objectifs recherchés conditionnent l'approche d'évaluation de l'aléa. Pour la commune, des 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.

ALEA DE REFERENCE

Selon le guide PPRn « Risques de mouvement de terrain » 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 afin de prévoir au mieux le phénomène qui pourrait se produire et dont il faut protéger les populations et les biens concernés.

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 n'est pas, par principe, pris en considération.

Il est traditionnellement retenu d'approcher l'aléa de référence au travers de scénarios dits « de référence », qui doivent spécifier en particulier l'intensité des phénomènes et les conditions de propagation. Plusieurs scénarios de référence peuvent être proposés pour construire l'aléa de référence. Pour la cartographie à échelle du 1 :25 000ème, l'intensité de l'aléa de référence est définie à partir d'un scénario qualifié de probable, non nécessairement maximal.

La période retenue pour qualifier l'aléa de référence est le siècle (probabilité qu'un événement d'un type se déclenche dans les 100 ans à venir).

Les phénomènes objet de cartes d'aléa sont issus de la typologie des mouvements définie dans le rapport méthodologique et de l'inventaire communal réalisé :

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

Les phénomènes de « Grand glissement de versant » (GGV) ne font pas l'objet de cartes d'aléa car aucune méthode ne permet d'appréhender raisonnablement cet aléa à l'échelle des communes. De plus l'occurrence de ce type de phénomène dépasse l'échelle centennale. Les phénomènes repérés géomorphologiquement (actifs-latents ou dormants-stabilisés) sont toutefois reportés sur les cartes d'aléa produites.

La méthode déployée pour définir l'**aléa** (par type de phénomène) consiste à définir pour un phénomène d'intensité donnée (définie comme intensité de l'aléa de référence), la probabilité

(spatiale et temporelle) d'atteinte en tout point du territoire, et pendant une période de référence considérée (ici le siècle).

DETERMINATION DE L'INTENSITE DES PHENOMENES

La notion d'intensité traduit l'ampleur du phénomène (volume mobilisé, dynamique, énergie...). Elle présume de ses conséquences (dommages). Dans le cadre du projet, l'intensité est appréhendée différemment selon le type de phénomène considéré. Pour les phénomènes de chutes de blocs (CB), la classification retenue pour qualifier l'intensité des phénomènes est :

Indices d'intensité	Description	Indications sur les dommages
Faible	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur à 0,05 m ³ mais inférieur ou égal à 0,25 m ³ (50 à 250 litres)	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

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

Pour les autres phénomènes (LT, GG, GF) la vitesse est privilégiée pour qualifier l'intensité au regard des données effectivement accessibles :

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

Echelle d'intensité retenue pour GG, GF, LT

DETERMINATION DE L'ATTEINTE DES PHENOMENES

L'évaluation de l'occurrence du phénomène (ou atteinte) intègre la rupture et la propagation de celui-ci. 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 successivement : analyse de la rupture (dimension spatiale et temporelle du phénomène) puis celle de la propagation (composante spatiale uniquement).

RUPTURE

Pour les LT, GG et GF, la méthode déployée consiste à pondérer l'influence des facteurs de prédisposition définis par la typologie de chaque phénomène. Ce travail s'appuie sur des visites de terrain et du traitement géomatique (SIG). Pour l'analyse à l'échelle communale, les facteurs pris en compte sont :

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

A l'échelle des cartes communales, la méthode déclinée est une analyse statistique qui s'intéresse aux lois de probabilité qui régissent la rupture et la propagation du phénomène. Elle permet de mettre à jour l'estimation de l'atteinte spatiale de celui-ci et s'appuie sur les observations de terrains et d'inventaire.

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. Les pondérations sont ensuite intégrées sur l'ensemble du territoire pour chaque classe de variable et le taux de reconnaissance des événements non inclus initialement est évalué.

La cartographie de la rupture est déclinée spatialement (susceptibilité). À l'aide des données d'inventaire par période, la probabilité spatiale et temporelle est évaluée. Les coupures des différentes classes de probabilité de rupture (et d'atteinte in fine) s'appuient sur les travaux du JTC-1⁴, adaptées au programme ci-après:

⁴ Joint Technical Committee (JTC-1) : Le « Joint International Societies Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes » (ISSMGE, ISRM, IAEG) a préparé des directives cadrant les définitions et terminologies à utiliser sur le plan international ainsi que les méthodes, moyens et résultats attendus pour la cartographie des aléas et le zonage de risques associés aux mouvements de terrain (« Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning ». Fell et al., 2008).

		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 jusque 1 "chance" sur 1 000
	Faible	10^{-5} à 10^{-4}	Peu probable jusque 1 "chance" sur 100
	Moyen	10^{-4} à 10^{-3}	Possible jusque # 1 "chance" sur 10
	Elevée	10^{-3} à 10^{-2}	Probable > 1 "chance" sur 10
	Très élevée	$> 10^{-2}$	Certaine phénomène attendu

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

Pour les chutes de blocs (CB), une approche spécifique est déclinée compte tenu de la difficulté d'inventorier complètement les événements à l'échelle considérée. Cette approche, détaillée dans le rapport méthodologique, définit la probabilité de rupture comme une fonction de la probabilité de présence d'escarpement rocheux et de l'activité géologique (exprimée par surface concernée, en nombre de chute du volume de l'intensité de référence pendant la période de référence).

PROPAGATION

Pour la propagation des phénomènes les approches diffèrent selon les aléas considérés. Les analyses, calage des modèles et résultats types sont décrits en détail dans le rapport méthodologique et résumés à la suite pour les phénomènes étudiés.

GG (GLISSEMENTS GROSSIERS), GF (GLISSEMENTS FINS) ET LT (LAVE TORRENTIELLES)

Pour les glissements, fins ou grossiers et les laves torrentielles une modélisation numérique⁵ a été mise en œuvre. Cette modélisation a permis de réaliser une délimitation semi-automatique des secteurs sources, mais également une évaluation du périmètre d'atteinte. L'application du modèle nécessite deux étapes fondées sur un modèle numérique de terrain (MNT) :

- les zones sources sont d'abord identifiées ;
- les flux de débris sont propagés à partir de ces sources sur la base de lois de frottement (angle de ligne d'énergie) et les algorithmes de direction d'écoulement (voir rapport méthodologique). Le volume d'écoulement des débris, et de fait les hauteurs des masses propagées, ne sont pas évalués.

Le paramétrage est empirique, basé sur des rétro-calages d'évènement passés, selon le type de phénomène à cartographier. Les paramètres de calage de l'outil sont :

- La ligne d'énergie, évaluée à partir des retours d'expérience des évènements cartographiés ;
- La vitesse présumée des mouvements (# 10 m.s-1 au maximum) ;
- Le mode de dispersion latérale définie suivant des modèles d'étalement.

⁵ Avec l'outil Flow-R (Flow path assessment of gravitational hazards at Regional scale, Horton et al., 2013), Flow-R est un modèle empirique distribué pour l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements gravitaires

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.

CB (CHUTES DE BLOCS)

La propagation des chutes de blocs et éboulements est évaluée à partir de l'application de la méthode dite de la ligne d'énergie déclinée en 3D⁶. 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).

Compte tenu de la possibilité de déviation des trajectoires des blocs que ce soit à cause de leur forme ou des obstacles rencontrés, les masses éboulées peuvent donc progresser dans un cône, appelé cône de propagation. Ce cône a une pente β (avec l'horizontale) et son sommet est placé au niveau de la zone de départ. Ainsi, plus l'angle est élevé, plus la distance de propagation est limitée.

En ce qui concerne la valeur de l'angle du cône de déviation, celle-ci dépend de la configuration topographique du versant étudié. 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 valeur la plus communément utilisée est de l'ordre de 30°.

OCCURRENCE (OU ATTEINTE)

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 secteurs sources sont concernés, la probabilité d'atteinte est définie comme la plus forte probabilité calculée.

De façon simplifiée, la qualification de l'atteinte repose sur une matrice croisant rupture et propagation (multiplication des probabilités). Cette matrice qualifiant l'atteinte, **commune à tous les aléas** est proposée ci-dessous :

⁶ Avec l'outil ConeFall développé et l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) et QUANTERRA (<https://quanterra.ch/resources/software/>).

		Probabilité de propagation						
		1	2	3	4	5	6	7
Probabilité annuelle de rupture		Négligeable	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte	Extrêmement forte
		10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1
1	Négligeable	Nulle à négligeable						Négligeable
2	Très faible	Nulle à négligeable					Négligeable	Très faible
3	Faible	Nulle à négligeable				Négligeable	Très faible	Faible
4	Moyen	Nulle à négligeable			Négligeable	Très faible	Faible	Moyenne
5	Fort	Nulle à négligeable		Négligeable	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée
6	Très fort	Nulle à négligeable	Négligeable	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
7	Extrêmement forte	Négligeable	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée	Très élevée

Matrice d'atteinte (ou occurrence) croisant rupture et propagation des aléas

ALEA RESULTANT

L'aléa résultant par phénomène est élaboré par croisement de l'occurrence avec l'intensité. La matrice de croisement est homogène quel que soit le phénomène considéré. Les classes pour qualifier les atteintes sont celles définies pour la rupture. L'évaluation de l'intensité des phénomènes varie selon le type (§ INTENSITE) :

		Intensité				
		Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Classe d'atteinte	1 Nulle à négligeable	Nul à négligeable	Nul à négligeable	Nul à négligeable	Très faible	Très faible
	2 Négligeable	Nul à négligeable	Nul à négligeable	Très faible	Faible	Faible
	3 Très faible	Nul à négligeable	Très faible	Faible	Modéré	Modéré
	4 Faible	Nul à négligeable	Faible	Modéré	Elevée	Elevée
	5 Moyenne	Très faible	Modéré	Modéré	Elevée	Elevée
	6 Elevée	Faible	Modéré	Elevée	Elevée	Très élevée
	7 Très élevée	Faible	Modéré	Elevée	Très élevée	Très élevée

Matrice retenue pour la cartographie de l'aléa

8.5 Annexe 5 – Application sur la commune de VOH

PARAMETRES VALORISES POUR LA COMMUNE DE VOH

Pour l'analyse à l'échelle communale, l'évaluation de l'aléa de rupture est menée suivant la méthode décrite dans le rapport méthodologique (BRGM/RP-72236-FR / DIMENC/SGNC-2022(20)). Les facteurs intégrés sont :

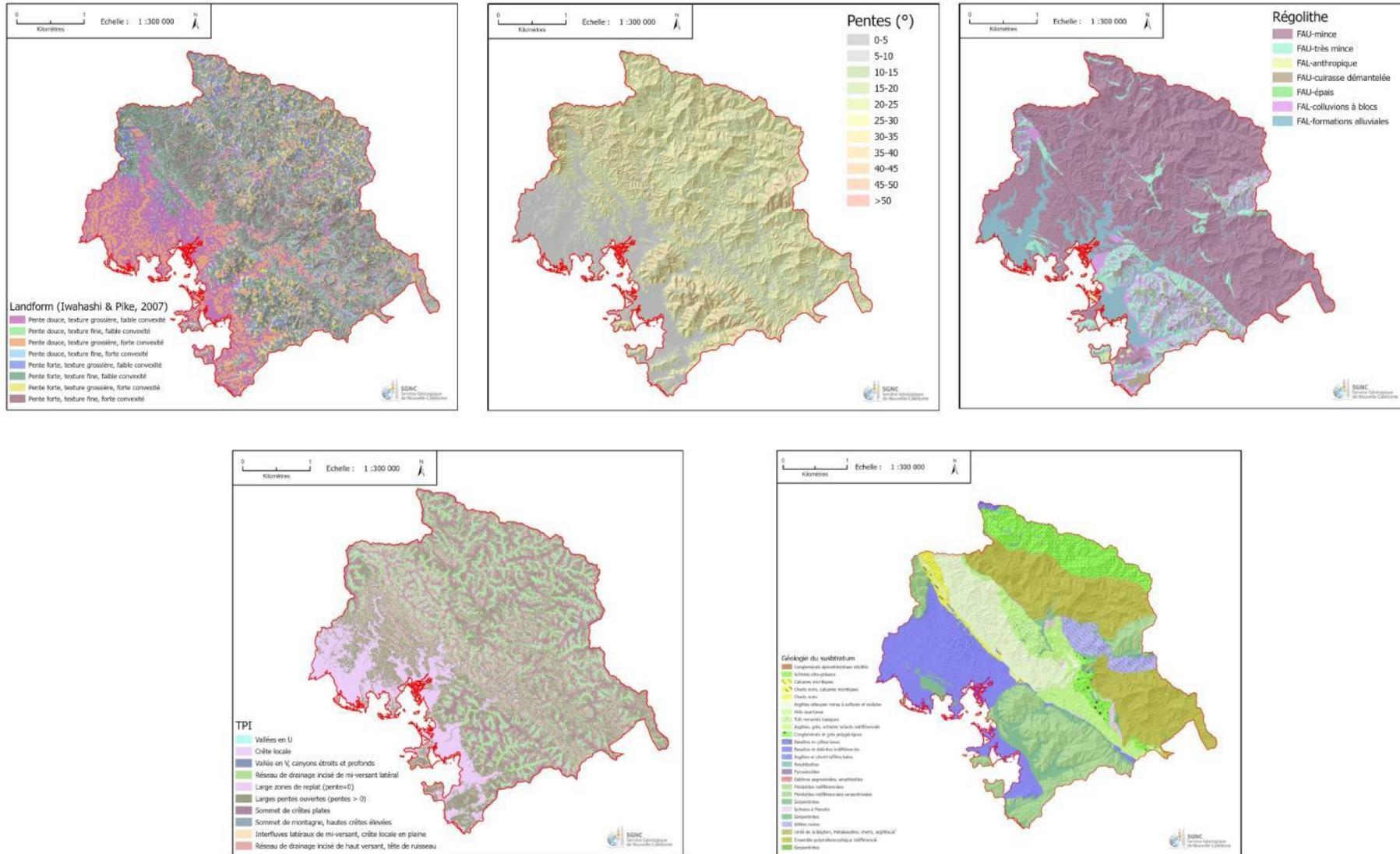
- SUBSTRAT : nature géologique du substratum rocheux ;
- FORM_SUP : nature lithologique des formations superficielles ;
- LANDFORM : paramètre intégrateur descriptif de paysages et de morphologies (versants, crêtes, talwegs, etc...), il est calculé avec la méthode d'Iwashita and Pike (2007) ;
- TPI : paramètre intégrateur descriptif de paysages et de morphologies (versants, crêtes, talwegs, etc...) calculé selon la méthode proposée par Jones et al. (2000). Cet indice permet de classer le territoire suivant 10 types de morphologies ;
- PENTE : pente des terrains évaluée à l'échelle des données topographiques valorisée.

La méthodologie générale est détaillée pour chaque phénomène (GG, GF, LT) dans le rapport méthodologique, et est rappelée en annexe 8.4. Cependant, pour chaque typologie de phénomène, les données d'entrées et divers paramètres diffèrent :

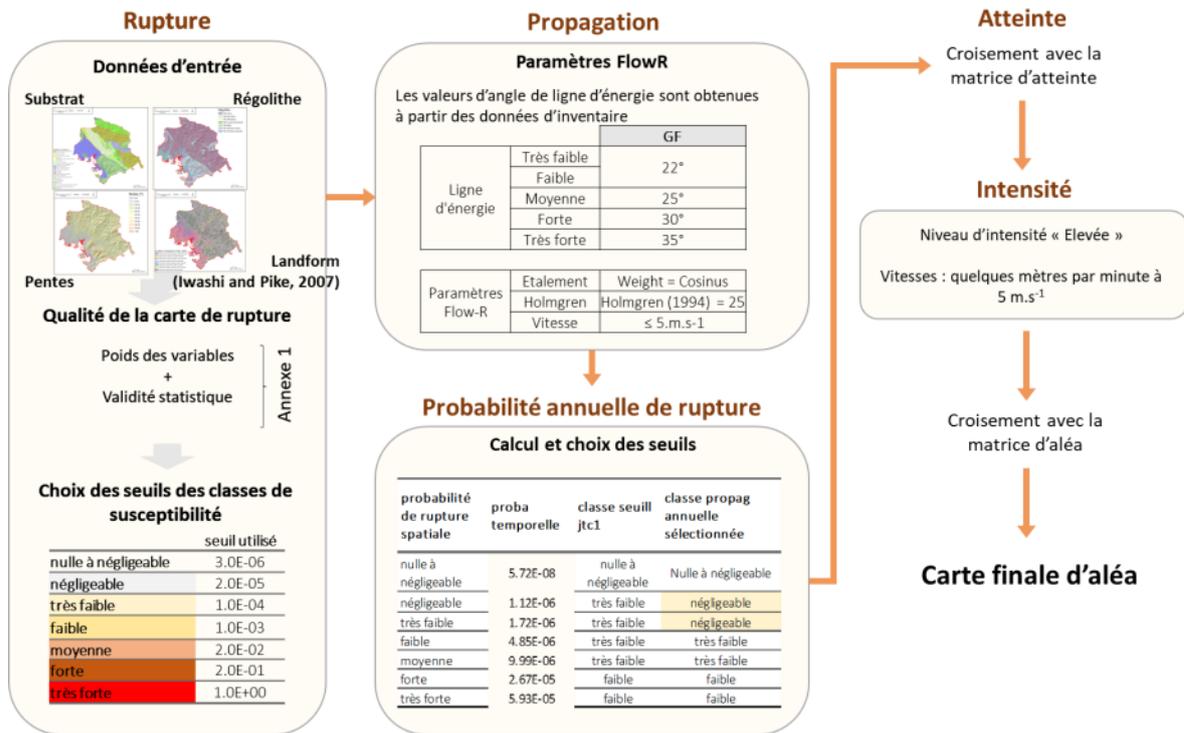
- pour le calcul de la probabilité de rupture les données d'entrées ne sont pas les mêmes ;
- les paramètres entrés dans le modèle de propagation FlowR sont ajustés pour chaque type de phénomène. La distribution des valeurs de ligne d'énergie calculées pour les données d'inventaire communal est valorisée pour paramétrer le modèle ;
- Enfin, les valeurs de seuils de classe pour les cartes de probabilité de rupture spatiale et spatio-temporelle peuvent être ajustées à la marge de manière experte par rapport aux seuils proposés par le JTC1 (Fell et al, 2008).

Pour les chutes de blocs, l'approche est différente et également détaillée dans le rapport méthodologique. Les paragraphes suivants présentent les paramètres d'entrée valorisés et les résultats pour les quatre phénomènes considérés (GG, GF, LT et CB). Les paramètres de l'approche statistique (GG, GF et LT) sont fournis en annexe 8.3.

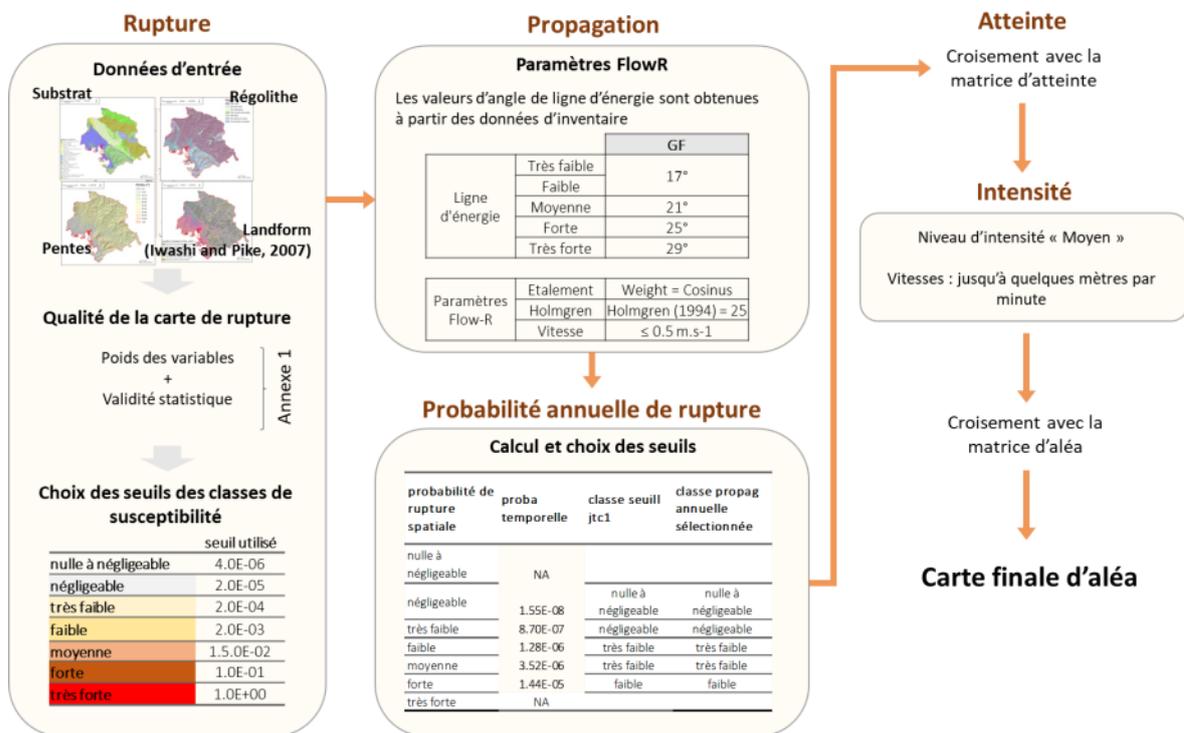
Les paramètres spécifiques à la création des différentes cartes d'aléas sur la commune d'aléas sont rappelés sur les illustrations suivantes pour chaque type d'aléa carté :



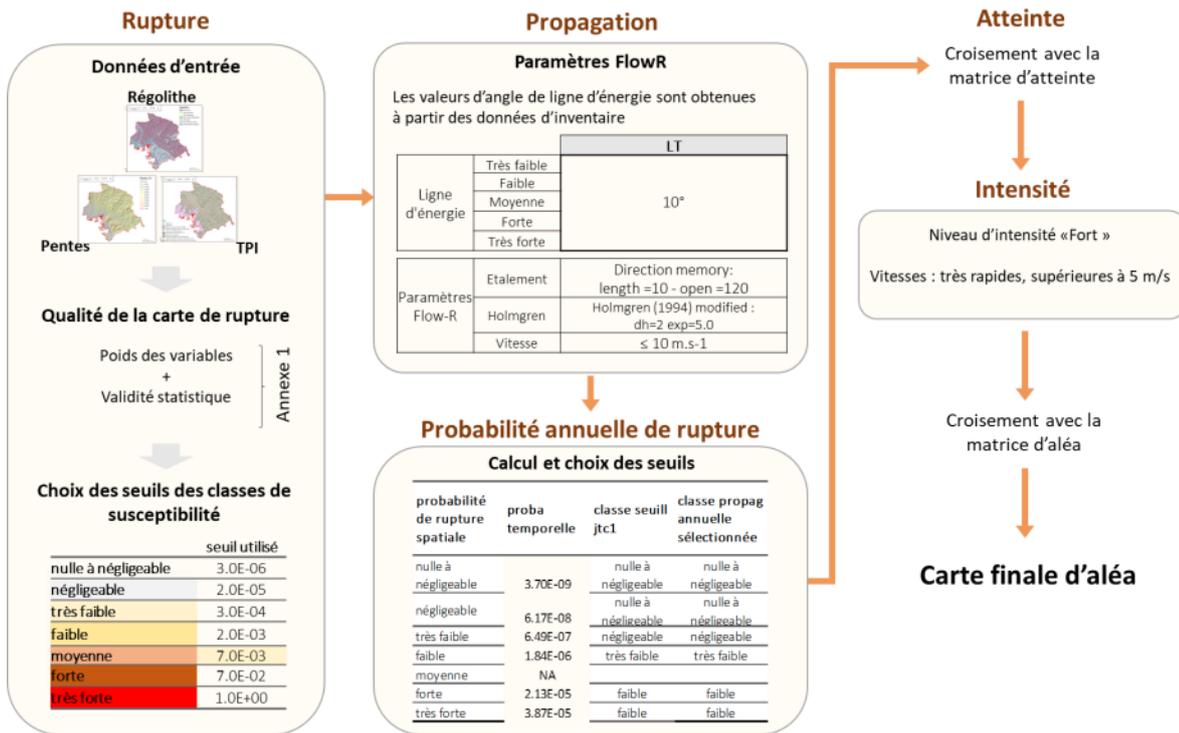
Cartes de référence des variables valorisées



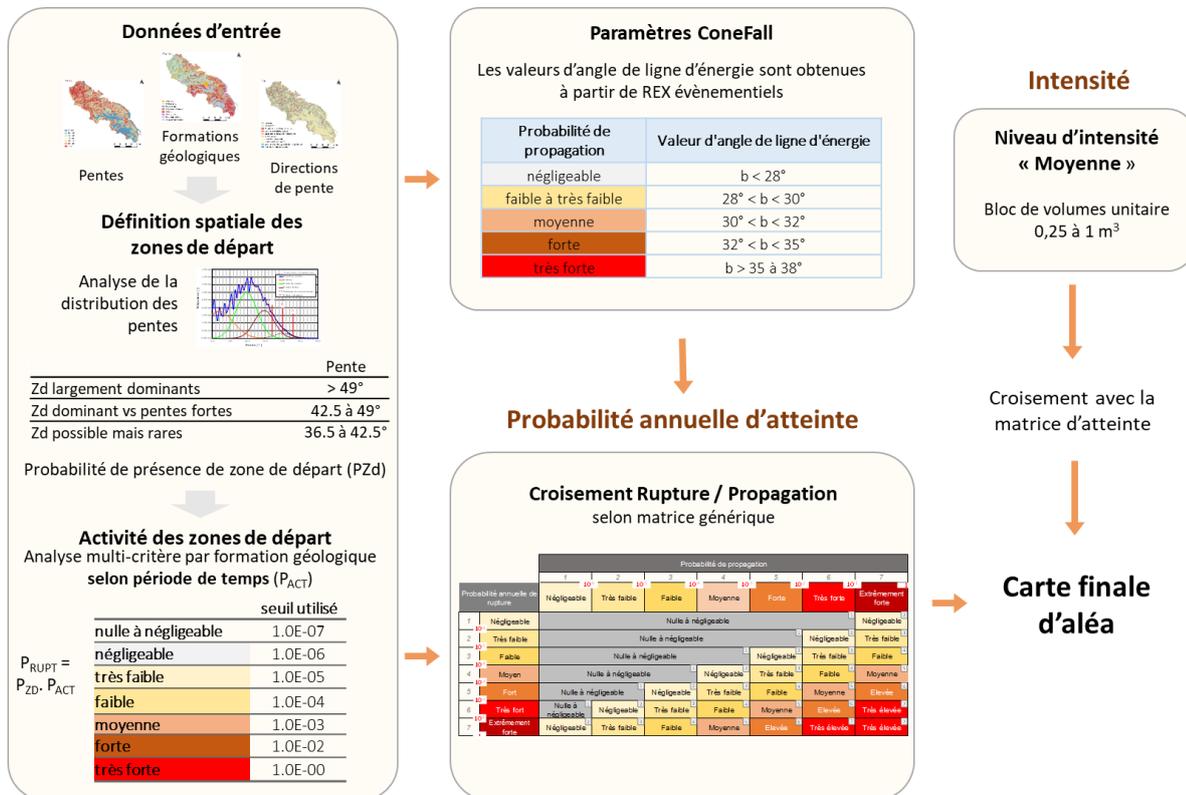
Paramètres et valeurs de seuils utilisés pour calculer la carte d'aléa des glissements grossiers sur la commune de Voh



Paramètres et valeurs de seuils utilisés pour calculer la carte d'aléa des glissements fins sur la commune de Voh



Paramètres et valeurs de seuils utilisés pour calculer la carte d'aléa des laves torrentielles sur la commune de Voh



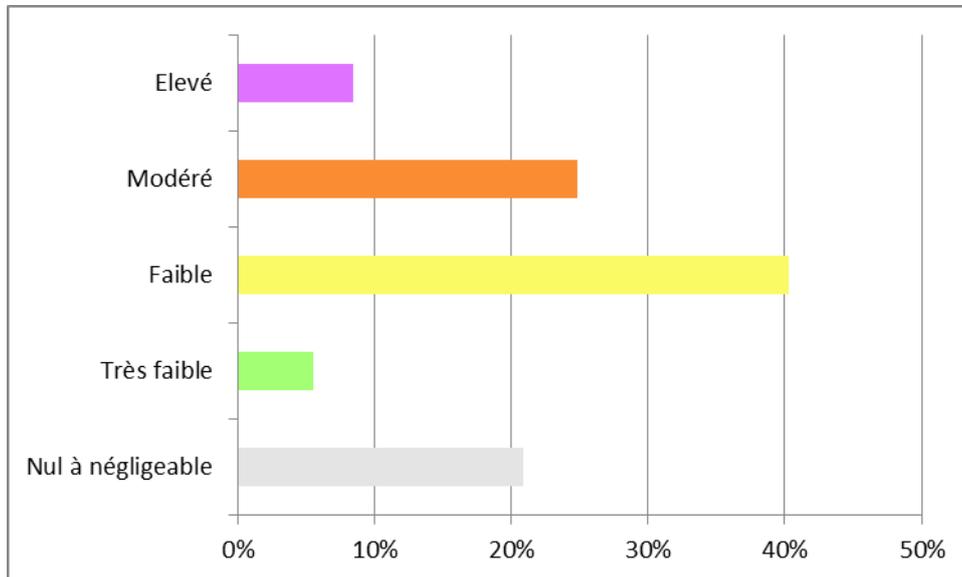
Paramètres et valeurs de seuils utilisés pour calculer la carte d'aléa chute de blocs

CARTE D’ALEA MOUVEMENT DE TERRAIN

L’agrégation des cartes par phénomènes en une carte unifiée de l’aléa mouvement de terrain est réalisée suivant la méthode décrite au rapport méthodologique, 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 se réfère.

		GG	GF	LT	CB	ALEA MVT
Aléa (Km ²)	Nul à négligeable	552.93	293.28	611.60	708.71	166.79
	Très faible	-	64.34	70.73	5.45	44.09
	Faible	122.97	298.38	62.55	16.21	320.97
	Modéré	58.57	141.21	38.46	66.84	198.36
	Elevé	62.73	-	13.87	-	67.00
Surface totale soumise à aléa		244.27	503.93	185.60	88.49	630.42
% de la commune soumis à aléa		31%	63%	23%	11%	79%

		GG	GF	LT	CB	ALEA MVT
Aléa (% commune)	Nul à négligeable	69%	37%	77%	89%	21%
	Très faible	0%	8%	9%	1%	6%
	Faible	15%	37%	8%	2%	40%
	Modéré	7%	18%	5%	8%	25%
	Elevé	8%	0%	2%	0%	8%



Exposition de la commune de Voh à l’aléa mouvement de terrain,

8.6 Annexe 6 – Atlas cartographiques : phénomènes de mouvement de terrain

8.7 Annexe 7 – Atlas cartographiques : aléa mouvement de terrain

