



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

Rapport final

BRGM/RP-71958-FR

Version 4 du 13 décembre 2022

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

M. Chaput et J.-D. Rinaudo

Vérificateur :

Nom : Anthony Rey

Fonction : Ingénieur géotechnicien

Date : 22/08/2022.

Signature :

Approbateur :

Nom : Kevin Samyn

Fonction : Directeur Régional – La Réunion

Date : 27/10/2022

Signature :

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

Contact : qualite@brgm.fr



**PRÉFET
DE LA RÉGION
RÉUNION**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : Aléa mouvement de terrain, Enjeux, Risque, Analyse multicritères, Salazie, La Réunion

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

M. Chaput et J.-D. Rinaudo (2022) – Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion). Rapport final V4. BRGM/RP-71958-FR, 108 p., 77 fig.

Synthèse

Le cirque de Salazie est le territoire de La Réunion le plus soumis aux aléas gravitaires. Des phénomènes des chutes de blocs, d'éboulements, de glissements de terrains rapides et de glissements lents de grande ampleur affectent en permanence ce territoire, notamment au cours d'évènements cycloniques majeurs. Le cirque de Salazie est également un territoire peuplé de plusieurs milliers d'habitants, concentrant une activité économique, agricole, touristique notable et divers enjeux stratégiques, la plupart répartis au sein d'îlets et accessibles par des voies de communication généralement uniques et vulnérables aux aléas. Compte tenu de la configuration du cirque, les enjeux humains, sociaux-économiques et bâtis sont particulièrement exposés à l'aléa mouvement de terrain.

Dans l'optique de la mise en œuvre d'une stratégie territoriale pour la prévention des risques gravitaires, la connaissance de l'aléa, le recensement des enjeux et l'évaluation objective du risque est fondamentale pour orienter de manière cohérente et ordonnée les politiques de gestion du risque et pour prioriser les actions à mener. **Cette étude s'inscrit dans ce cadre. Après une première phase réalisée en 2021 dédiée à la caractérisation de l'aléa, cette seconde phase d'étude vise à réaliser une cartographie du risque sur le territoire de Salazie pour des phénomènes gravitaires susceptibles de se produire à l'échelle des trente prochaines années.**

Dans un premier temps, une cartographie de l'aléa mouvement de terrain, intégrant les chutes de blocs, les glissements de terrains spontanés et les glissements lents de grande ampleur qui affectent le territoire a été réalisée. Comme elle s'intéresse à des événements dont la période d'occurrence est de l'ordre de 30 ans, cette carte d'aléa diffère de la carte d'aléa du Plan de Prévention des Risques, qui s'intéresse elle, à des phénomènes susceptibles de se produire sur une période de 100 ans.

Dans un second temps, une caractérisation fine des enjeux présents sur le territoire est nécessaire. Sept grandes catégories d'enjeux ont été identifiées et recensées en fonction de leur typologie : les vies humaines, la vulnérabilité de la population, l'activité économique, le bâti, les réseaux vitaux, les infrastructures critiques et le patrimoine. Ce recensement intègre une dimension socio-économique rarement prise en compte dans la réalisation de cartes de risques pour des phénomènes de mouvement de terrain. La caractérisation des enjeux s'est basée sur la consultation des bases de données disponibles (données SIRENE, données INSEE...) mais également sur la consultation de plusieurs acteurs du territoire. Pour cela, un panel de techniciens (services techniques communaux, collectivités, représentants de l'État, ingénieurs) et d'élus de la commune de Salazie ont été rencontrés. Leur perception du risque et l'importance relative qu'ils donnent aux différentes familles d'enjeux ont été quantifiées à travers un questionnaire et l'application d'une grille de pondération. Les résultats montrent des perceptions très hétérogènes sur l'enjeu « vies humaines » alors que les autres catégories d'enjeux font l'objet d'une certaine homogénéité. La cartographie des enjeux réalisée tient compte de la pondération des acteurs consultés. Croisée avec la carte d'aléa mouvement de terrain, elle permet d'aboutir à une carte de risque qui identifie les secteurs concentrant les enjeux et exposés aux phénomènes gravitaires.

Cette carte de risque permet ainsi de hiérarchiser les secteurs du territoire les plus exposés et sur lesquels prioriser les futures actions de sécurisation. Elle montre que **le secteur de Camp Lilas/Salazie village est de loin le plus exposé, suivi par les secteurs de Grand Ilet, Bras Citronnier, L'Escalier ou La Savane.**

Parmi les actions de sécurisation possible, plusieurs scénarios sont envisageables, qui peuvent différer en fonction du type d'aléa en présence : il peut s'agir de la mise en œuvre d'ouvrages d'interception de blocs en pied de paroi pour l'aléa chute de blocs, d'agir sur l'infiltration des eaux souterraines pour les glissements de terrain ou encore de délocaliser définitivement les enjeux.

Afin de pouvoir comparer ces différentes stratégies de gestion du risque, il faut pouvoir comparer le bénéfice qu'elles apportent en termes de réduction du risque par rapport à leur coût de mise en œuvre sur la période de référence. Dans notre étude, nous proposons une Analyse Coûts-Bénéfices (ACB) préliminaire tenant compte des dimensions économiques et humaines. Elle est appliquée à deux cas d'étude semi-fictifs (situations réelles observées dans le cirque de Salazie, mais pour lesquelles toutes les données n'étant pas disponibles, il a été nécessaire d'émettre certaines hypothèses), appliqués à la problématique « chute de blocs » pour le premier et « glissement de terrain » pour le second. Cette analyse montre qu'en première approche, pour l'aléa chute de blocs, le scénario de protection partielle des enjeux apparaît le plus pertinent d'un point de vue économique si on le compare à un scénario de protection complète et à un scénario de relocalisation des enjeux. Pour l'aléa glissement de terrain, le coût des mesures de sécurisation est largement supérieur à la valeur des dommages qu'elles permettent d'éviter et leur mise en œuvre n'est donc pas pertinente d'un point de vue strictement économique.

Cette analyse restant exploratoire, elle comporte de nombreuses limites, mais elle permet d'amorcer une réflexion pratique et d'illustrer la nature du raisonnement soutenant une analyse coûts-bénéfices. A terme, il s'avèrera indispensable de procéder à une analyse coût-bénéfice complète et exhaustive sur les contours précis des secteurs prioritaires choisis. Pour aller plus loin, une réflexion permettant de poser les bases d'une doctrine de l'ACB appliquée aux risques gravitaires est également nécessaire, basée sur un état de l'art de l'ACB opérationnelle, notamment dans le domaine des autres risques naturels (inondations...).

Cette étude, mêlant démarche participative, analyse multicritère et ACB, constitue une approche novatrice pour la définition du risque mouvement de terrain, rarement réalisée dans ce contexte. La plus-value de cette approche, celle d'objectiver le niveau de risque, incite à la décliner sur d'autres territoires soumis aux aléas naturels et sur lesquels des stratégies de sécurisation et/ou d'adaptation à l'échelle locale doivent être mises en œuvre.

Sommaire

1	Introduction	12
2	Objectifs et méthodologie	13
2.1	Vue d'ensemble	13
2.2	Méthodologie de cartographie de l'aléa	15
2.2.1	<i>Aléa chute de blocs</i>	15
2.2.2	<i>Aléa glissement de terrain</i>	16
2.3	Évaluation des enjeux – Principes méthodologiques	16
2.3.1	<i>Les sept familles d'enjeux prises en compte</i>	16
2.3.2	<i>Le choix d'une représentation spatiale : carroyage INSEE</i>	19
2.3.3	<i>Une démarche participative</i>	20
2.4	Principe du croisement alea-enjeux pour l'obtention d'une carte de risque	21
3	Cartographie de l'aléa à l'échelle du cirque de Salazie	23
3.1	Rappels méthodologiques	23
3.1.1	<i>Aléa chute de blocs</i>	23
3.1.2	<i>Aléa Glissement de terrain</i>	25
3.1.3	<i>Agrégation des cartes d'aléa pour l'obtention d'une carte d'aléa Mouvement de terrain globale</i>	27
4	Caractérisation des familles d'enjeux.....	31
4.1	Enjeu « Vies humaines »	31
4.2	Enjeu « Personnes vulnérables »	33
4.3	Enjeu « Biens matériels »	37
4.4	Enjeu « Activité économique »	40
4.5	Enjeu « Réseaux »	41
4.6	Enjeu « Infrastructures critiques »	44
4.7	Enjeu « Patrimoine »	45
4.8	Cartographie multicritères des enjeux.....	46
4.8.1	<i>Normalisation et agrégation des variables</i>	46
4.8.2	<i>Présentation générale de l'approche multicritère</i>	49
4.8.3	<i>Détermination de la pondération des critères</i>	50
5	Cartographie des enjeux à l'échelle du cirque de Salazie	52
5.1	L'évaluation participative de la pondération	52
5.1.1	<i>Une grande hétérogénéité des perceptions</i>	52
5.2	Cartographie finale des enjeux	55
6	Cartographie du risque et identification de secteurs prioritaires	58
6.1	Cartographie du risque tenant compte de l'ensemble des enjeux	58
6.2	Cartographie du risque associé à l'enjeu « vies humaines » seul	65
6.3	Identification de secteurs moins exposés au risque	71
7	Analyse coûts-bénéfices des stratégies de gestion du risque : méthode et application	73
7.1	Introduction.....	73
7.1.1	<i>Objectif</i>	73
7.1.2	<i>Cadre conceptuel simplifié de l'analyse coûts-bénéfices (ACB)</i>	73
7.2	ACB sur un secteur exposé à des chutes de blocs	75
7.2.1	<i>Hypothèses et scénarios</i>	75
7.2.2	<i>Évaluation économique du scénario de référence</i>	78
7.2.3	<i>Évaluation économique du scénario de protection partielle</i>	80

7.2.4	<i>Évaluation économique du scénario protection totale</i>	82
7.2.5	<i>Évaluation économique du scénario « délocalisation »</i>	83
7.2.6	<i>Conclusion</i>	84
7.3	ACB sur un secteur exposé aux glissements de terrain	85
7.3.1	<i>Hypothèses et scénarios</i>	85
7.3.2	<i>Évaluation des dommages associés au scénario de référence</i>	88
7.3.3	<i>Évaluation du cout des mesures de sécurisation</i>	89
7.3.4	<i>Résultats de l'ACB</i>	90
7.3.5	<i>Discussion</i>	93
7.4	Conclusion.....	94
7.4.1	<i>Un travail exploratoire</i>	94
7.4.2	<i>Limites des études de cas et pistes d'amélioration</i>	94
8	Conclusion	95
9	Références bibliographiques	96

Liste des figures

Figure 1 – Vue générale du Cirque de Salazie (fond carte IGN 1/25 000, 2015). La zone d'étude est délimitée par les tirets noirs.	13
Figure 2 : Vue d'ensemble des différentes étapes de travail.....	15
Figure 3 – Les sept familles d'enjeux soumises à l'aléa mouvement de terrain et impacts potentiels.....	18
Figure 4 : Répartition du carroyage INSEE (en orange) et du carroyage additionnel (en bleu) couvrant la zone d'étude.	20
Figure 5 – Principe d'agrégation des sept familles d'enjeux pour l'obtention d'une carte d'enjeux globale.	21
Figure 6 - Principe de croisement des cartes d'aléa et d'enjeux pour l'obtention d'une carte de risque.	22
Figure 7 – Localisation des profils trajectographiques réalisés sur la zone d'étude et des limites de probabilités d'atteinte forte, moyenne, faible obtenues. L'emprise des sept glissements lents de grande ampleur est également reportée.....	25
Figure 8 : Cartographie de l'aléa « Chute de Blocs » pour une période de référence « fréquente » (~30 ans).	28
Figure 9 : Cartographie de l'aléa « Glissement de terrain » pour une période de référence « fréquente » (~30 ans).	29
Figure 10 : Cartographie de l'aléa Mouvement de terrain pour une période de référence « fréquente » (~30 ans).....	30
Figure 11 : Répartition de la population (équivalent temps plein) par classe d'effectif.	31
Figure 12 : Répartition de la population en nombre de personnes équivalent temps plein....	32
Figure 13 : Écart entre la population au lieu de résidence (INSEE) et le nombre de personnes en équivalent temps plein calculé.....	33
Figure 14 : Proportion de ménages pauvres (définition INSEE).....	35
Figure 15 : Proportion d'enfants de moins de 10 ans dans la population au lieu de résidence (source INSEE).	35
Figure 16 : Proportion de personnes âgées de plus de 65 ans dans la population au lieu de résidence (source : INSEE).	36
Figure 17 : Nombre d'habitats insalubres recensés (source : CIREST).	37
Figure 18 : Indice des prix de l'immobilier dans la zone d'étude (valeur moyenne des biens immobiliers en % de la valeur moyenne sur la zone). Source : données de transactions immobilières 2014-2020, Ministère de l'Économie et des Finances.	38
Figure 19 : Nombre de bâtiments (tous usages confondus). Source : BD topo, IGN.....	39
Figure 20 : Indicateur de valeur du bâti, intégrant le nombre de bâtiment et l'indice des prix.	39
Figure 21 : Cartographie des emplois (carreaux) élaborée à partir des données SIRENE (points violet = entreprises déclarées).	40
Figure 22 : Cartographie du nombre d'emplois dans la zone d'étude.	41

Figure 23 : Cartographie du réseau routier, indiquant le nombre de personnes vivant en amont de chaque tronçon.....	42
Figure 24 : Cartographie du réseau électrique principal (HTA/HTB) de la zone d'étude.	43
Figure 25 : Cartographie des canalisations principales du réseau d'alimentation en eau potable.	43
Figure 26 : Nombre d'infrastructures critiques recensées.	45
<i>Figure 27 : Cartographie des objets patrimoniaux (monuments religieux ou historiques, cimetières).....</i>	<i>46</i>
Figure 28 : Cartographie de l'enjeu « Population vulnérable » intégrant les 4 variables utilisées pour caractériser cette population.	47
Figure 29 : Cartographie de l'enjeu réseau intégrant les informations relatives aux réseaux routiers, alimentation en eau potable et électricité.	48
Figure 30 : Cartographie intégrée des sept familles d'enjeux réalisée sans pondération.	48
Figure 31 : Illustration du principe de pondération des cartes d'enjeux.	49
Figure 32 : Illustration utilisée dans le questionnaire pour comparer les variables deux par deux.	51
Figure 33 : Matrice issue de la comparaison de l'importance des familles d'enjeu deux par deux (exemple des préférences individuelles d'une personne interrogée) et poids calculés à partir de la matrice (wf1 à 7).	51
Figure 34 : Pondération issue de l'entretien avec deux élus de Salazie illustrant deux représentations différentes des enjeux importants.....	53
Figure 35 : Pondération issue des entretiens avec 7 élus de la commune de Salazie.	53
Figure 36 : Pondération issue des entretiens avec 10 techniciens.....	54
Figure 37 : Pondération moyenne pour l'ensemble des personnes consultées (N = 17).	55
Figure 38 : Carte des enjeux pondérée d'après la moyenne des résultats de l'ensemble des personnes consultées (élus et techniciens).	56
Figure 39 : Principaux enjeux concentrés sur le secteur d'Hell-Bourg (les nombres en blanc italique correspondent aux valeurs mesurées dans le carreau pour le critère considéré).	57
Figure 40 : Principaux enjeux concentrés sur le secteur de Salazie-Camp Lilas (les nombres en blanc italique correspondent aux valeurs mesurées dans le carreau pour le critère considéré).	58
Figure 41 : Carte de risque en lien avec l'aléa mouvement de terrain et les enjeux recensés sur la zone d'étude. Le carroyage non concerné par une note de risque (aléa faible ou enjeu nul) est représenté sans couleur.	60
Figure 42 : Carte de risque zoomée sur le secteur de Salazie-Camp Lilas.	61
Figure 43 : Carte de risque associé à l'aléa chute de blocs / éboulement.....	62
Figure 44 : Carte de risque associé à l'aléa glissement de terrain spontané (rapide).	63
Figure 45 : Carte de risque associé à l'aléa glissement lent de grande ampleur. L'emprise des glissements est représenté en lignes bleues.	64
Figure 46 - Carte de risque associé à l'aléa MVT et à l'enjeu « Vies Humaines » seul. Le carroyage non concerné par une note de risque (aléa faible ou enjeu nul) est représenté sans	

couleur. Un rappel de la carte de risque pour l'ensemble des enjeux est proposé en encart.	67
Figure 47 - Carte de risque associé à l'aléa chute de blocs / éboulement et à l'enjeu « Vies Humaines » seul. Un rappel de la carte de risque pour l'ensemble des enjeux est proposé en encart.	68
Figure 48 - Carte de risque associé à l'aléa glissement de terrain spontané (rapide) et à l'enjeu « Vies Humaines » seul. Un rappel de la carte de risque pour l'ensemble des enjeux est proposé en encart.	69
Figure 49 - Carte de risque associé à l'aléa glissement lent de grande ampleur et à l'enjeu « Vies Humaines » seul. L'emprise des glissements est représentée en lignes bleues. Un rappel de la carte de risque pour l'ensemble des enjeux est proposé en encart.	70
Figure 50 – Secteurs moins exposés au risque sur l'ensemble de la zone d'étude et susceptibles d'accueillir une urbanisation nouvelle, sur les zones A et AU du PLU (en haut) et hors zones déjà bâties (en bas).....	72
Figure 51 : Représentation schématique de la logique d'une analyse coûts-bénéfices appliquée aux risques liés au mouvement de terrain.	74
Figure 52 : Présentation schématique des hypothèses retenues pour un phénomène de type « chute de bloc/éboulement ».....	76
Figure 53 : Evaluation de la probabilité d'atteinte des véhicules dans la situation de référence et avec construction de la protection.	77
Figure 54 : Représentation schématique des trois scénarios de gestion du risque.	78
Figure 55 : Vue aérienne du site ayant inspiré l'étude de cas semi-fictive (plateau Wickers) (Google Earth).....	78
Figure 56 : Représentation schématique des coûts associés au scénario de référence.	79
Figure 57 : Représentation de la distribution temporelle des coûts et des bénéfices pris en compte dans l'ACB.....	81
Figure 58 : Déroulement du scénario de référence (2025-2048).....	86
Figure 59 : Mesures de stabilisation du terrain préconisées par les experts dans le scénario « sécurisation »	87
Figure 60 : Vue en plan de l'évolution de la situation dans le scénario de référence.	88
Figure 61 : Distribution temporelle des coûts et des bénéfices du projet de stabilisation du glissement de terrain de Mare à Nanace (horizon 100 ans).....	91
Figure 62 : Distribution temporelle des coûts et des bénéfices du projet de stabilisation du glissement de terrain de Mare à Nanace (horizon 30 ans).....	93
Figure 63– Définition de l'indice d'intensité de l'aléa rocheux en fonction du volume et du potentiel de dommages (MEZAP, 2014).....	98
Figure 64 – Indice d'activité pris en compte pour un scénario de période de référence 30 ans pour l'aléa chute de blocs.....	98
Figure 65 - Matrice de qualification de la probabilité d'occurrence d'une chute de blocs en un point donné (MEZAP, 2014).	99
Figure 66 - Grille de définition de l'aléa chute de blocs (d'après MEZAP, 2014).	99
Figure 67 - Définition de l'intensité d'un glissement de terrain (Rey, 2016).....	100

Figure 68 - Classification des principales formations géologiques de La Réunion selon leur nature et leur aspect (Rey, 2016)	100
Figure 69 - Probabilité d'occurrence d'un glissement de terrain (Rey, 2016).	101
Figure 70 - Définition de l'aléa glissement de terrain pour les glissements spontanés.	101
Figure 71 – Zones potentiellement urbanisables sur le secteur Mare à Martin. Carte du bas : Zonage excluant les secteurs déjà bâtis.	102
Figure 72 - Zones potentiellement urbanisables sur le secteur Mare à Vieille Place. Carte du bas : Zonage excluant les secteurs déjà bâtis.	103
Figure 73 - Zones potentiellement urbanisables sur le secteur Mare à Citrons. Carte du bas : Zonage excluant les secteurs déjà bâtis.	104
Figure 74 - Zones potentiellement urbanisables sur le secteur Mare à Poule d'Eau. Carte du bas : Zonage excluant les secteurs déjà bâtis.	105
Figure 75 - Zones potentiellement urbanisables sur le secteur d'Hell-Bourg / Illet à Vidot. Carte du bas : Zonage excluant les secteurs déjà bâtis.	106
Figure 76 - Zones potentiellement urbanisables sur le secteur de Mare à Goyaves / Bois de Pomme. Carte du bas : Zonage excluant les secteurs déjà bâtis.	107
Figure 77 - Zones potentiellement urbanisables sur le secteur de l'Illet à Saint-André. Carte du bas : Zonage excluant les secteurs déjà bâtis.	108

Liste des tableaux

Tableau 1 – Intensités et reculs attendus pour des glissements spontanés pour une période de référence trentennale selon les secteurs considérés.	26
Tableau 2 : Données mobilisées pour évaluer le nombre de personnes vulnérables.	34
Tableau 3 : Liste des variables utilisées pour décrire et cartographier les enjeux.	47
Tableau 4 : Evaluation du niveau de préférence entre deux critères a et b. La préférence est notée $P_{a>b}$ si a est préféré à b, $P_{b>a}$ sinon (d'après Saati, 1980).	50
Tableau 5 – Matrice de qualification de la note de risque en fonction de l'aléa et de la note d'enjeu.	59
Tableau 6 – Surfaces potentiellement urbanisables selon les secteurs de la zone d'étude. Ces surfaces sont des ordres de grandeurs issus d'une analyse SIG qui devront faire l'objet de vérifications et validations auprès des services communaux et lors de visites sur site.	71
Tableau 7 : Comparaison des scénarios référence, protection et relocalisation dans un exemple fictif	75
Tableau 8 : Sensibilité du coût des dommages actualisés selon l'année à laquelle survient la chute du bloc.	80
Tableau 9 : Résultats de l'ACB pour le scénario protection partielle.	82
Tableau 10 : Résultats de l'ACB pour le scénario protection totale.	83
Tableau 11 : Résultats de l'ACB pour le scénario délocalisation.	84
Tableau 12 : Comparaison des trois scénarios eu regard des résultats de l'ACB	84
Tableau 13 : Estimation des dommages associés au scénario de référence du glissement de Mare à Nanace.	89

Tableau 14 : Estimations des coûts des mesures de stabilisation du glissement de terrain de Mare à Nanace.....	90
Tableau 15 : Résultats de l'ACB appliquée aux scénarios de sécurisation à 30 et 100 ans..	93

1 Introduction

Dans l'optique de développer à La Réunion une stratégie territoriale pour la prévention des risques gravitaires, la DEAL a missionné le BRGM pour la réalisation d'un diagnostic du territoire de Salazie, particulièrement soumis aux phénomènes de chutes de blocs et de glissements de terrain. Ce diagnostic, réalisé en 2021 et qui a fait l'objet du rapport BRGM/RP-69999-FR, a permis de définir les intensités attendues de ces phénomènes, pour des périodes de référence comprises entre quelques décennies et plusieurs siècles. Ce travail a montré que des événements gravitaires se produisant à l'échelle séculaire ou pluriséculaire, les volumes mis en jeu pouvaient être considérables, de sorte que la réalisation de travaux de sécurisation des enjeux exposés semble techniquement et financièrement difficilement soutenable. Pour des phénomènes se produisant à l'échelle de 10-30 ans en revanche, des opérations de sécurisation restent envisageables. Les différents secteurs du cirque de Salazie n'étant pas exposés de manière identique aux aléas, et les enjeux étant inégalement répartis sur le territoire, il paraît nécessaire d'identifier les zones les plus menacées afin d'orienter de manière objective les priorités de sécurisation à court terme (sur la période de 10-30 ans).

Dans ce contexte, l'objectif de cette seconde phase d'étude est de réaliser, sur le territoire de Salazie, une cartographie des risques associés aux mouvements de terrain **prenant en compte la dimension socio-économique des enjeux exposés** et de proposer une hiérarchisation des zones les plus menacées afin d'orienter les priorités d'action.

Le secteur d'étude couvre l'ensemble de la commune de Salazie ainsi que l'encaissement de la Rivière du Mât entre le pont Bengalis et le Pont de l'Escalier sur la commune de Saint-André. Le travail a été mené en plusieurs étapes :

- (1) **Réalisation de la carte d'aléa Mouvement de Terrain** à l'échelle de la zone d'étude pour une période de référence de l'ordre de 30 ans. Cette carte est établie à partir du travail de caractérisation de l'aléa réalisé en phase 1 (rapport RP-69999-FR¹). Elle prend en compte les phénomènes de chute de blocs, de glissements « spontanés » et de glissement « lents » pour lesquels des cartes distinctes ont été réalisées avant de les agréger en une carte d'aléa mouvement de terrain global.
- (2) **Réalisation de la carte des enjeux sur le territoire.** Un recensement et une évaluation des enjeux en fonction de leur typologie ont été menés, à partir des bases de données disponibles. Grâce à la consultation d'un certain nombre d'acteurs du territoire, une **analyse multicritère** et un travail de pondération ont pu être réalisés et intégrés à la carte finale.
- (3) **Réalisation de la carte de risques** croisant l'aléa mouvement de terrain à échéance 30 ans et les enjeux pondérés. Cette carte permet de hiérarchiser les zones à risques à travers une classification par niveaux de risques (1 à 5).
- (4) **Déroulement d'une méthode d'analyse coûts/bénéfices** tenant compte des dimensions économiques et humaines des enjeux afin de comparer différentes stratégies de sécurisation et de gestion du risque. Ce travail a été testé sur un secteur soumis à un aléa de type chute de bloc et sur un secteur soumis à un aléa de type glissement de terrain.

Ce travail permet d'aboutir à un outil préliminaire permettant d'identifier objectivement les secteurs les plus exposés et d'orienter les stratégies de sécurisation à court terme du territoire.

2 Objectifs et méthodologie

2.1 VUE D'ENSEMBLE

La zone d'étude comprend l'ensemble du Cirque de Salazie, à savoir le cirque stricto sensu ainsi que l'encaissement de la Rivière du Mât à l'exutoire du Cirque. Elle s'étale de ce fait sur les communes de Salazie, de Saint-André et de Bras Panon. Le Cirque de Salazie est l'un des trois cirques découpant le massif du Piton des Neiges. Situé à l'Est du sommet du Piton des Neiges, il s'agit d'une dépression globalement circulaire (diamètre ~10 km) de plus de 100 km² (Figure 1). Salazie présente un paysage au relief très escarpé où les ravines découpent les terrains en plateaux plus ou moins étendus (ilets) sur lesquels sont installés les différents secteurs habités du Cirque. L'exutoire du cirque au nord-est est caractérisé par un important encaissement où s'écoule la Rivière du Mât en direction de la ville de Saint-André et de l'océan (Figure 1). Ce défilé étroit, de plus de 10 km de long est bordé, notamment dans sa moitié amont par des remparts de hauteur comprise entre 400 et 800 m de haut. La Route Départementale 48 qui dessert les zones habitées du défilé et le Cirque de Salazie circule au pied de cet encaissement.

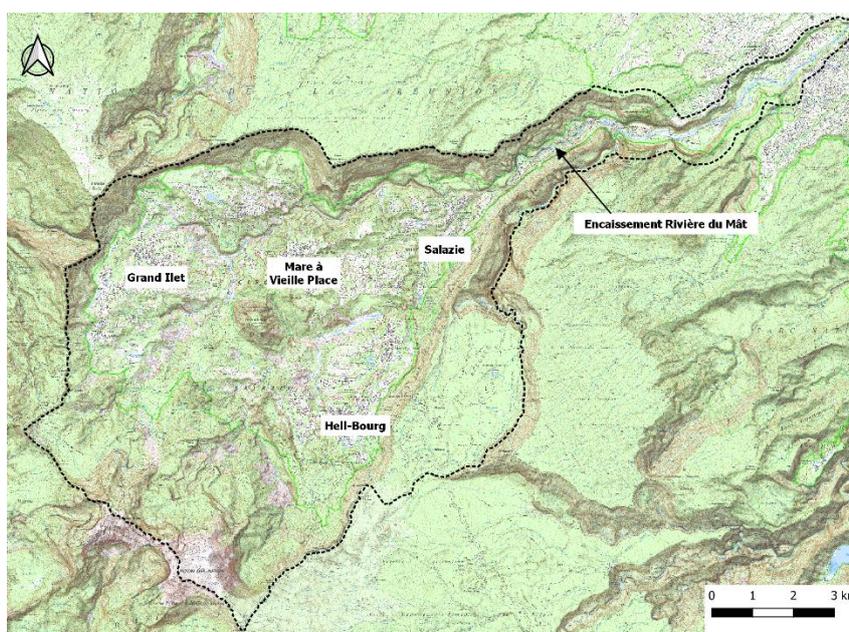


Figure 1 – Vue générale du Cirque de Salazie (fond carte IGN 1/25 000, 2015). La zone d'étude est délimitée par les tirets noirs.

Comme d'autres territoires de montagne, le cirque de Salazie est caractérisé par une très forte exposition aux risques naturels, notamment associés aux phénomènes gravitaires, qu'il s'agisse de glissements de terrain ou de chutes de blocs. De nombreux enjeux (habitations, bâtiments accueillant du public, routes et autres réseaux) sont situés dans des zones où l'aléa est considéré comme fort dans le plan de prévention des risques (PPR). Les bases de données existantes permettent de recenser plus d'un millier d'événements gravitaires sur la zone d'étude. Il s'agit principalement de chutes de blocs/éboulements (N= 824) et de glissements de terrain (N = 290) se produisant généralement au droit des remparts et dans les versants composant les bordures des ilets. Ces événements peuvent mobiliser des volumes variables, allant de quelques centaines de litres à quelques milliers de m³ mais des phénomènes majeurs se produisent également. L'évènement de référence sur la zone reste à ce titre

l'ensevelissement du hameau de Grand Sable en 1875 sous un volume de matériaux estimé à 18 millions de m³. Par ailleurs, le cirque de Salazie est impacté par sept glissements de terrain actifs de grande ampleur. Ces glissements de grande ampleur mobilisent des volumes considérables de matériaux (plusieurs millions à centaines de millions de m³) et subissent des phases d'accélération en lien avec la pluviométrie. Du fait de la morphologie abrupte au front de certains glissements, des phénomènes d'érosion régressive, de déboulés, d'effondrements ou de glissements y sont communément observés. Ces désordres sont brutaux (instantanés) et potentiellement très destructeurs, mettant directement en danger les occupants des parcelles situées à proximité immédiate.

L'objectif général de cette étude est de développer une méthode permettant de cartographier ce risque à l'échelle du territoire, en croisant une analyse de l'aléa et une cartographie des enjeux exposés. Une telle carte devrait permettre d'identifier les secteurs qui pourraient être considérés comme prioritaires pour la mise en œuvre de mesures de sécurisation. Il s'agit d'une démarche d'aide à la décision destinée aux pouvoirs publics (collectivités et Etat), susceptible de leur permettre d'optimiser l'allocation des moyens techniques et financiers limités dont ils disposent dans l'optique d'améliorer et de prioriser la sécurisation des enjeux identifiés.

La démarche déployée consiste en sept étapes principales, représentées dans la Figure 2 et décrites dans les paragraphes suivants :

- L'aléa a d'abord été cartographié à l'échelle communale (cirque de Salazie), en distinguant le phénomène de chute de blocs ❶ et celui de glissement de terrain ❷. L'aléa a été évalué pour des phénomènes susceptibles d'intervenir de manière fréquente, c'est-à-dire selon une période de référence de l'ordre de 30 ans. Une carte générale d'aléa, englobant les aléas associés aux deux phénomènes a ensuite été élaborée en prenant en compte le niveau d'aléa le plus élevé des deux aléas ❸. Cette analyse de l'aléa est réalisée en utilisant la méthodologie développée et testée sur deux sites spécifiques de la zone d'étude dans la première phase de cette étude (rapport BRGM RP-69999-FR¹).
- L'étape suivante a consisté à réaliser un inventaire détaillé des enjeux socio-économiques exposés aux phénomènes gravitaires ❹. La typologie des enjeux à prendre en compte a été établie sur la base d'une consultation d'acteurs du territoire et d'experts. Des données statistiques et cartographiques ont ensuite été mobilisées pour construire une carte décrivant chaque type d'enjeu. Une analyse multicritère a enfin été déployée pour construire une carte finale intégrant les différents enjeux, en pondérant leur importance relative ❺. La pondération des différents types d'enjeu est issue d'une enquête auprès des acteurs, afin de refléter leurs préférences.
- La carte d'aléa et la carte des enjeux ont été croisées afin d'obtenir **une cartographie du risque** à l'échelle du territoire étudié ❻. Cette carte permet de **hiérarchiser les zones les plus exposées à des aléas susceptibles de se produire sur la période de retour considérée (30 ans)**.
- La dernière étape se concentre sur ces zones prioritaires, à l'échelle desquelles les solutions de sécurisation doivent être étudiées et analysées d'un point de vue économique. L'étude développe une méthode d'analyse coûts-bénéfices ❼, permettant de comparer différentes interventions (réduction de l'aléa par protection, délocalisation des enjeux). La méthode est appliquée à des cas d'étude fictifs, inspirés de situations réelles observées sur le territoire d'étude.

¹ Chaput M. (2021) – Caractérisation des aléas chute de blocs et glissement de terrain pour différentes périodes de référence (démarche STEPRIM) – Application à deux sites pilotes du Cirque de Salazie. Rapport final. BRGM/RP-69999-FR, 125 p., 55 fig., 30 tabl.

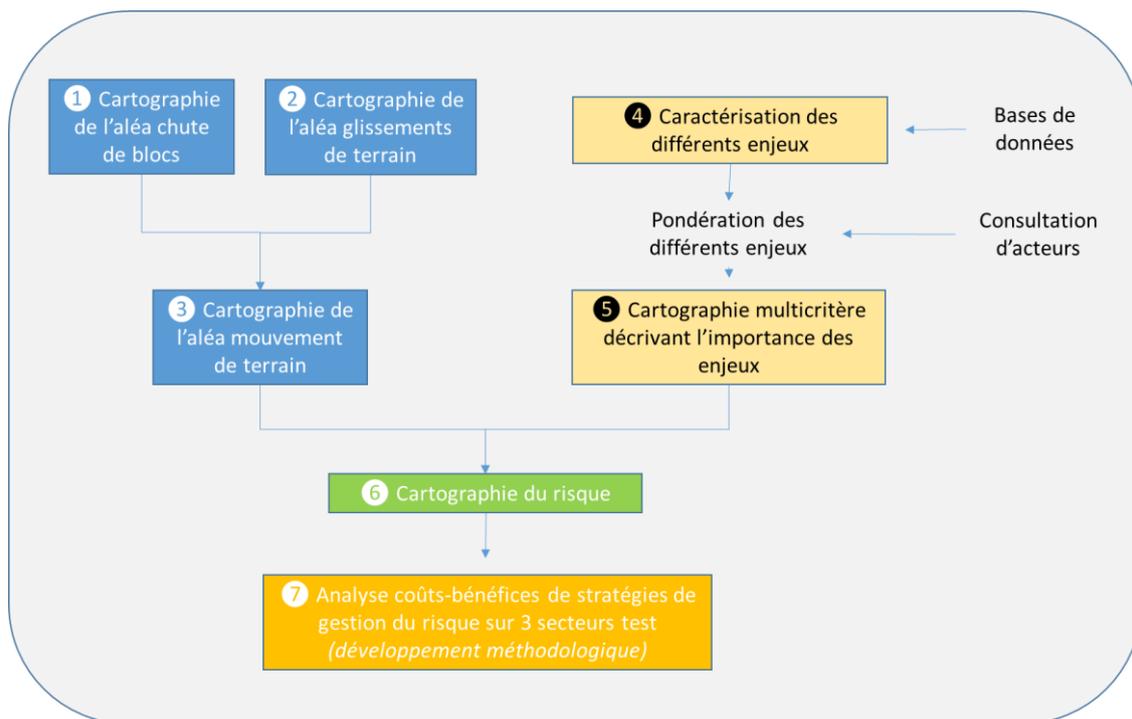


Figure 2 : Vue d'ensemble des différentes étapes de travail.

2.2 MÉTHODOLOGIE DE CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA

Pour cette étude, l'aléa mouvement de terrain a été défini pour des phénomènes d'occurrence fréquente, c'est-à-dire susceptibles de survenir à l'échéance 30 ans. Les aléas chute de blocs/éboulement et glissements de terrain ont été considérés et agrégés pour obtenir une carte d'aléa Mouvement de Terrain globale à l'échelle de la zone d'étude.

La méthodologie employée pour la définition des aléas a fait l'objet d'un rapport détaillé en 2021 (Rapport BRGM/RP-69999-FR¹). Cette dernière n'est donc rappelée que succinctement dans les paragraphes suivants.

2.2.1 Aléa chute de blocs

L'aléa chute de bloc a été évalué pour un scénario fréquent d'après la méthodologie MEZAP (Méthodologie de caractérisation de l'aléa rocheux), qui a fait l'objet de la publication d'un guide en 2021 pour la caractérisation de l'aléa rocheux dans le cadre des PPR ou d'un Porter à Connaissance².

Plusieurs étapes sont nécessaires à la caractérisation de cet aléa à savoir :

- L'analyse des phénomènes historiques afin de mettre en avant des relations fréquence/volume sur une zone d'étude découpée en secteurs homogènes d'un point de vue géologique et géomorphologique ;

² Groupe de travail MEZAP – Guide technique MEZAP. Caractérisation de l'aléa rocheux dans cadre d'un Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRn) ou d'un Porter à Connaissance (PAC). BRGM, 2021. Collection scientifique et technique. ISBN : 978-2-7159-2760-5.

- La définition des volumes de référence attendus pour une échéance temporelle donnée (dans notre cas : 30 ans), obtenus à partir des lois fréquence/volume ;
- La définition de probabilité d'atteintes. Dans notre cas, le modèle ELANA développé par le BRGM (Levy et al., 2021) et basé sur la méthode de l'aire normalisée a été utilisé sur la zone d'étude. Dans les secteurs concentrant les enjeux, le modèle a été complété et précisé par des simulations trajectographiques 2D (logiciel probabiliste PIERRE98) ;
- L'application de différentes matrices de qualification permettant d'obtenir l'aléa résultant.

2.2.2 Aléa glissement de terrain

L'aléa glissement de terrain intègre les glissements de terrain dits « spontanés », qui se déclenchent et se propagent de manière rapide et les glissements lents de grande ampleur, où le déplacement est permanent³.

L'évaluation de l'aléa glissement « spontané » est réalisée sur la base des phénomènes historiques recensés sur la zone d'étude, d'une manière similaire à celle des chutes de blocs (relation fréquence-volume, définition de volumes de références attendus...) mais en tenant compte de plusieurs facteurs de prédisposition et facteurs aggravants que sont la nature des formations, la pente des terrains, la pluviométrie, *etc.*

La probabilité d'occurrence est alors définie en fonction de la conjonction de ces différents facteurs (Rey, 2016). L'aléa est obtenu par le croisement entre cette probabilité d'occurrence et l'intensité du phénomène (i.e., le volume de l'évènement).

L'évaluation de l'aléa glissement « lent » est réalisée à partir des données de monitoring des glissements actifs sur la zone d'étude. Le niveau d'aléa est déterminé en fonction du secteur géographique (front/bordure du glissement, corps et arrière du glissement), des vitesses de déplacements et de la pluviométrie.

2.3 ÉVALUATION DES ENJEUX – PRINCIPES MÉTHODOLOGIQUES

2.3.1 Les sept familles d'enjeux prises en compte

Lorsqu'un évènement de type glissement de terrain ou chute de bloc se produit, il est susceptible d'endommager plusieurs types d'enjeux. Nous distinguons **sept grandes familles d'enjeux** (Figure 3 3) dont nous avons essayé de quantifier l'importance sous forme de cartes. Ces sept familles peuvent inclure plusieurs sous-enjeux. L'ensemble a été défini en concertation avec les différents partenaires impliqués dans ce travail (DEAL, Commune de Salazie, Agorah, Préfecture de La Réunion, CIREST...), afin d'aboutir à un recensement des enjeux le plus représentatif du territoire possible.

Les sept familles d'enjeux et les critères utilisés pour les décrire sont les suivants :

- L'enjeu **Vies Humaines** est décrit par le nombre de personnes pouvant être physiquement impactées (blessures ou décès) par une chute de blocs ou un glissement de terrain ;

³ Les phénomènes de déboulé, aux mécanismes de déclenchement complexe et encore mal appréhendés ne sont pas pris en compte dans les glissements « spontanés ».

- L'enjeu **Population Vulnérable** correspond aux personnes dont l'existence pourra être fortement perturbée si leur logement est directement affecté par un mouvement de terrain. Il s'agit notamment :
 - Des jeunes enfants (risque d'impact psychologique durable d'une catastrophe) ; le critère retenu est le nombre de personnes de moins de 10 ans ;
 - Des personnes âgées (risque d'impact psychologique, médical ou matériel plus élevé en cas de catastrophe que pour une personne plus jeune) ; le critère retenu est le nombre de personnes âgées de plus de 65 ans ;
 - Des ménages vivant sous le seuil de pauvreté ou en logement insalubre ; les critères retenus sont le nombre de ces ménages, sur la base de données statistiques (cf. infra).
- L'enjeu **Biens matériels** correspond à l'ensemble des biens mobiliers et immobiliers pouvant être endommagés voire détruits par les phénomènes gravitaires ; le critère utilisé pour quantifier cet enjeu est le nombre de bâtiments exposés, sur lequel un indice du prix de l'immobilier est agrégé.
- L'enjeu **Activité Economique** correspond à l'ensemble des entreprises dont le fonctionnement peut-être directement impacté par un mouvement de terrain ; le critère utilisé pour quantifier cet enjeu est le nombre d'emploi concernés.
- L'enjeu **Réseaux**, incluant les réseaux (lignes) essentiels au fonctionnement socio-économique du territoire et dont le fonctionnement peut être interrompu par un mouvement de terrain. Il s'agit :
 - Des routes,
 - Des principales canalisations d'eau potable,
 - Du réseau électrique ;
- L'enjeu **Infrastructures critiques**, regroupe les infrastructures contribuant aux services essentiels à la population et à la sécurité civile en cas de crise. Il s'agit notamment :
 - De la Mairie et ses annexes,
 - Des écoles,
 - Des hébergements d'urgence,
 - De la caserne de pompiers,
 - De la gendarmerie,
 - De la station Essence,
 - Des antennes relais téléphoniques,
 - Des postes transformateurs EDF,
 - Des captages d'eau potable et réservoirs ;
- Enfin, l'enjeu **Patrimoine** inclut les bâtiments ou les lieux ayant une valeur patrimoniale, historique, religieuse et indirectement contribuant à l'attractivité touristique :
 - Lieux de culte,
 - Cimetières,
 - Monuments historiques classés.

Le schéma ci-dessous illustre les sept familles d'enjeux soumis à des impacts potentiels en cas de mouvement de terrain (MVT) :

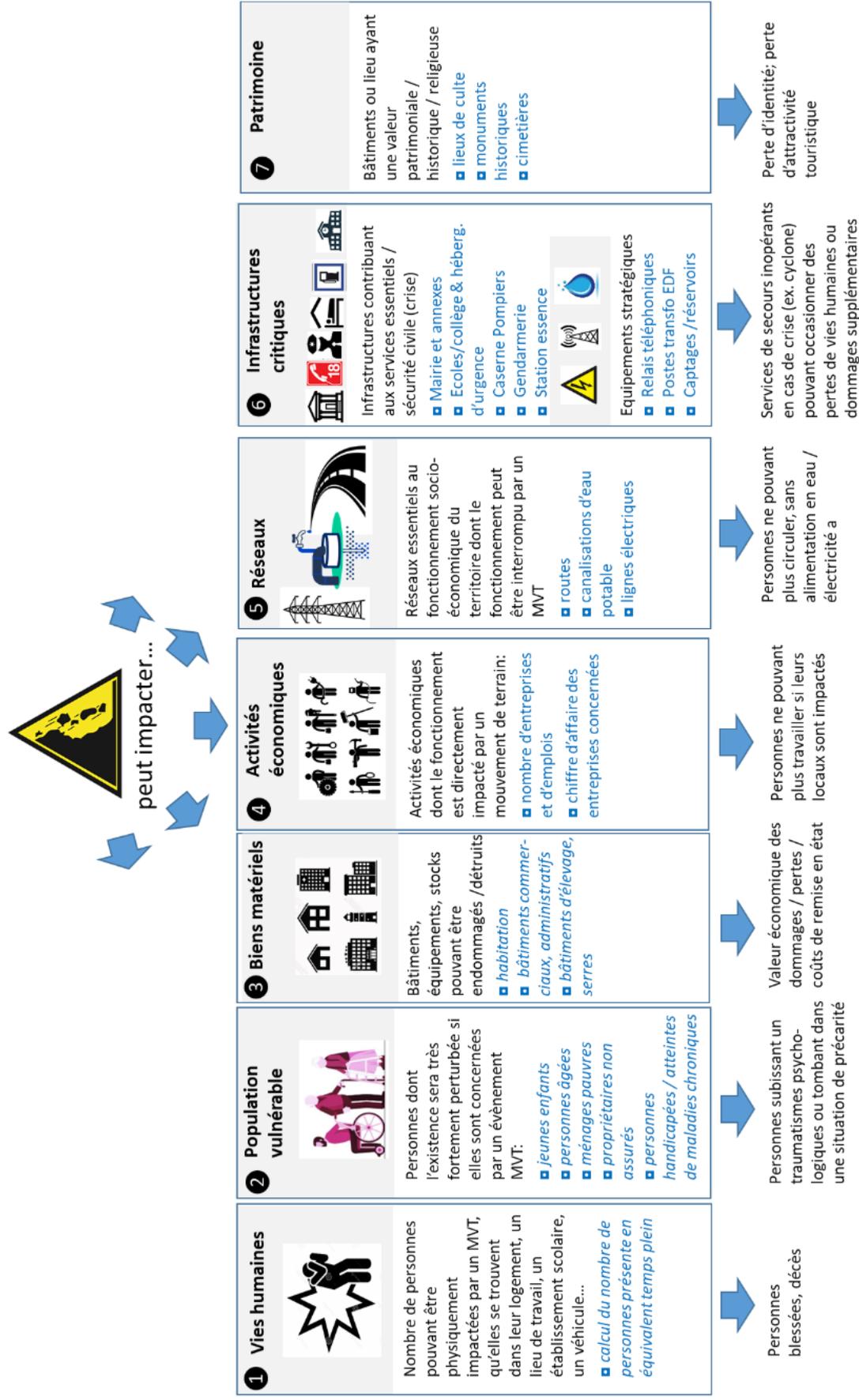


Figure 3 – Les sept familles d'enjeux soumises à l'aléa mouvement de terrain et impacts potentiels

2.3.2 Le choix d'une représentation spatiale : carroyage INSEE

Nous avons fait le choix d'une représentation spatiale des données d'enjeux sur la base du carroyage de l'INSEE. Le carroyage est une technique de quadrillage qui consiste à découper le territoire en carreaux de taille identique pour y diffuser de l'information statistique à un niveau faiblement agrégé. Le maillage du territoire qui en résulte est plus ou moins fin selon la taille du carreau choisie. Le carroyage nécessite de disposer de données pour lesquelles on connaît précisément la position géographique de chaque observation. Ces données sont ensuite agrégées au carreau au sein duquel elles se situent.

L'INSEE diffuse régulièrement ses données sous forme carroyées. La dernière diffusion date de 2019 et compile les données du Fichier Local Social et Fiscal (FILOSOFI) de 2015.

Ce fichier, produit à partir de données fiscales, permet d'avoir accès à de nombreux indicateurs économiques et sociaux qui nous sont utiles dans la caractérisation des enjeux du territoire de Salazie (nombre d'individus, nombre de ménages, nombre de ménages « pauvres », catégorie d'âge des individus, type de logement...). Pour des raisons de confidentialité, ces données ne peuvent être diffusées publiquement à l'échelle du ménage et de la parcelle cadastrale sur laquelle il vit. Les données INSEE sont donc agrégées au sein de carreaux, permettant une représentation des données statistiques de manière relativement précise tout en respectant les règles de confidentialité.

Pour notre étude, la majorité des données utilisées sont issues de l'INSEE et donc consultables uniquement sous forme carroyées. Le maillage disponible sur La Réunion est **de 200 m x 200 m**, ce qui constitue une échelle plutôt adaptée pour notre analyse du territoire.

Sur notre zone d'étude (encaissement de la Rivière du Mât à partir du pont Bengalis et cirque de Salazie), le carroyage INSEE est constitué de 427 carreaux sur lesquels il existe des enjeux économiques (population, entreprises...). Toutefois, ce carroyage a été complété par la suite par l'ajout de nouveaux carreaux afin d'intégrer des portions de la zone d'étude non couvertes par les données INSEE mais incluant certains enjeux retenus dans la présente étude. En effet, certains secteurs de Salazie, dépourvus de données fiscales, peuvent par exemple comprendre des portions de route ou des infrastructures critiques (captages...). De ce fait, ce sont 471 carreaux supplémentaires qui ont été rajoutés au carroyage initial. La zone d'étude est ainsi couverte par **898 carreaux** de 200 m de côté, permettant de couvrir l'ensemble des enjeux recensés sur la zone d'étude (Figure 4).

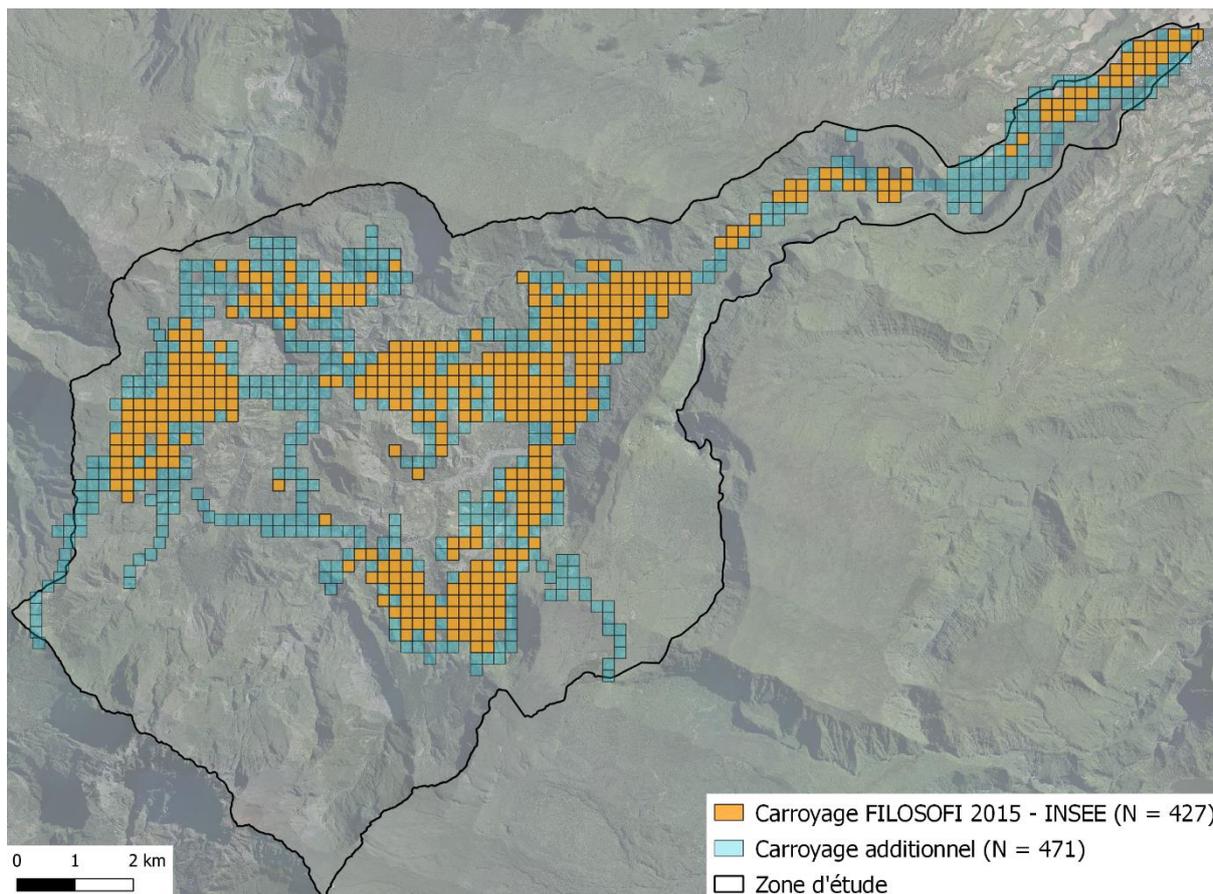


Figure 4 : Répartition du carroyage INSEE (en orange) et du carroyage additionnel (en bleu) couvrant la zone d'étude.

2.3.3 Une démarche participative

Afin d'aboutir à une caractérisation des enjeux la plus exhaustive possible, nous avons consulté en entretiens individuels des experts et des acteurs du territoire. Parmi eux, on peut citer :

- Sept élus de la commune de Salazie et des représentants des services techniques ;
- La DEAL (Service Prévention des Risques) ;
- La Préfecture de La Réunion, notamment l'Etat-Major de Zone (EMZ) ;
- L'Agorah, agence d'urbanisme de La Réunion ;
- La CIREST ;
- Le BRGM.

Les objectifs de cette approche participative sont (1) d'identifier et caractériser tous les enjeux devant être intégrés par la suite dans l'analyse multicritère, (2) de recueillir la perception des acteurs concernant l'importance relative des différents enjeux et (3) de quantifier cette perception sous forme d'une pondération.

NB : A noter que les services techniques de la commune de Saint-André ont également été sollicités mais sans réponse.

2.4 PRINCIPE DU CROISEMENT ALEA-ENJEUX POUR L'OBTENTION D'UNE CARTE DE RISQUE

L'évaluation du niveau de risque repose sur le croisement de l'aléa et des enjeux. Comme vu précédemment, les enjeux sur le territoire sont classés en 7 grandes familles. Afin d'obtenir une carte unique d'enjeu, un regroupement de ces sept familles est réalisé par addition des valeurs obtenues pour chaque dimension et dans chaque carreau du carroyage couvrant le territoire. La note d'enjeu obtenue permet de produire une carte unique décrivant l'importance des enjeux dans chaque carreau (Figure 5). La méthodologie détaillée d'agrégation des différents enjeux est présentée au paragraphe 4.8.

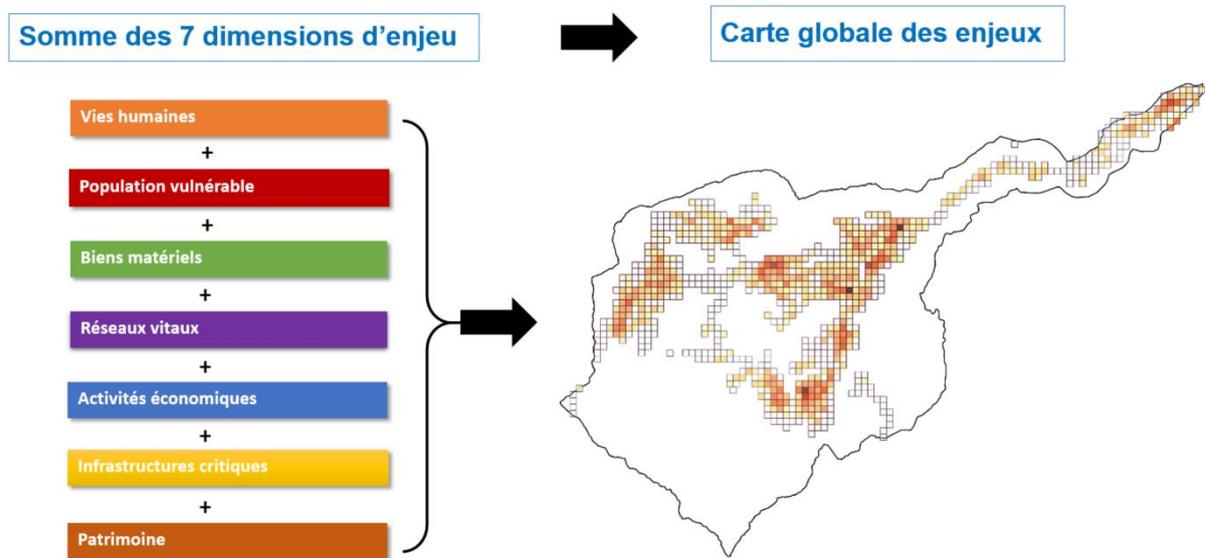


Figure 5 – Principe d'agrégation des sept familles d'enjeux pour l'obtention d'une carte d'enjeu globale.

La cartographie de risque est ensuite obtenue en croisant cette carte globale des enjeux avec la carte d'aléa global (Figure 6). Pour cela, les notes d'enjeux sont recoupées avec les niveaux d'aléa mouvement de terrain, permettant de définir une note de risque en fonction de l'importance des enjeux et de l'aléa (cf. paragraphe 5.3).

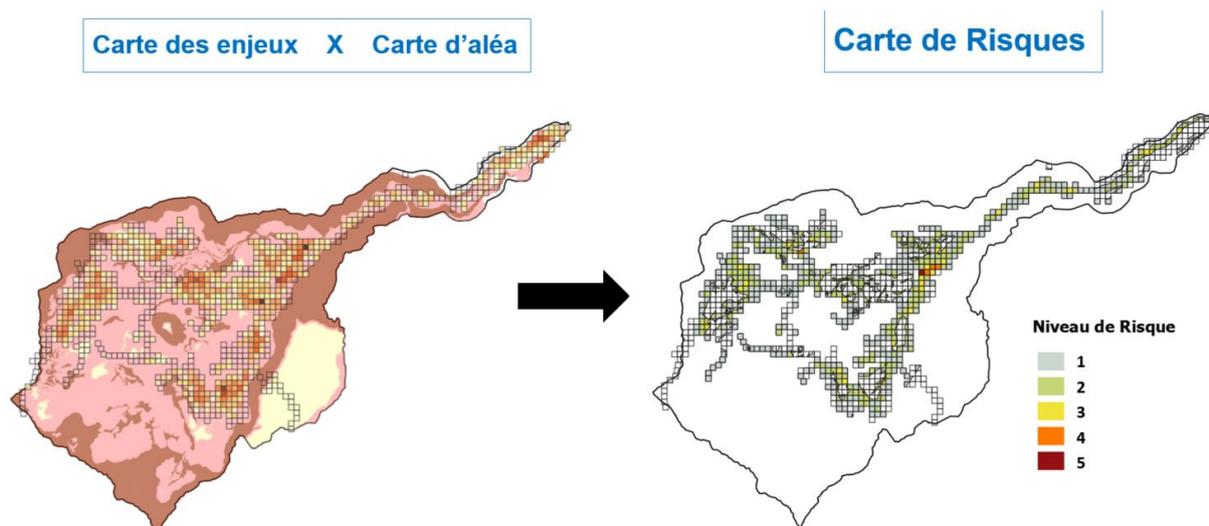


Figure 6 - Principe de croisement des cartes d'aléa et d'enjeux pour l'obtention d'une carte de risque.

3 Cartographie de l'aléa à l'échelle du cirque de Salazie

Pour rappel, les cartes d'aléa sont définies pour des phénomènes d'occurrence fréquente, c'est-à-dire pouvant se produire à **l'échéance 30 ans**. La méthodologie de caractérisation des aléas ayant notamment permis de définir les intensités attendues à cette échéance est présentée en détail dans le rapport BRGM/RP-69999-FR et rappelée brièvement ci-dessous.

Ces cartes n'ont pas de valeur réglementaire et n'ont pas vocation à remplacer les cartes d'aléa du Plan de Prévention des Risques (PPR) en vigueur sur la zone d'étude. Par ailleurs, l'aléa de référence du PPR est défini pour une période centennale et ne peut donc être pertinemment comparé à l'aléa défini dans le cadre de cette étude.

3.1 RAPPELS METHODOLOGIQUES

3.1.1 Aléa chute de blocs

La méthodologie générale d'évaluation de l'aléa chute de blocs est adaptée de la méthodologie MEZAP, guide de référence pour la caractérisation de l'aléa rocheux dans le cadre des PPR ou d'un Porter à Connaissance⁴. La méthodologie MEZAP définit un scénario de référence, notamment basé sur le volume du plus gros bloc susceptible de se propager jusqu'aux enjeux sur la période de référence, dans notre cas 30 ans. Pour caractériser l'aléa de référence, il convient de définir 5 paramètres successifs :

- (1) Les zones de départ potentielles ;
- (2) Le volume de référence pouvant être mis en mouvement sur ces zones de départ identifiées (appelé également indice d'intensité) ;
- (3) La fréquence à laquelle ce volume peut être déstabilisé (appelé également indice d'activité ou probabilité de départ) ;
- (4) La probabilité d'atteinte, basée sur les observations historiques ou calculée via des simulations trajectographiques ;
- (5) La probabilité d'occurrence, résultant du croisement entre l'indice d'activité et la probabilité d'atteinte ;

L'aléa de référence résultant correspond au croisement de la probabilité d'occurrence et de l'intensité.

Pour notre étude, nous avons fait l'hypothèse qu'à l'échelle du cirque, tous les reliefs de pente supérieure à 45° étaient à même de produire des blocs, en particulier les ensembles géologiques constitués de coulées de lave et de formations pyroclastiques indurées (ignimbrites). Ces zones de départ ont été identifiées par SIG à l'aide de Modèles Numériques de Terrain (MNT IGN, 2011 et MNT Lidar Sintegra-Région Réunion, 2015).

⁴ Groupe de travail MEZAP – Guide technique MEZAP. Caractérisation de l'aléa rocheux dans cadre d'un Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRn) ou d'un Porter à Connaissance (PAC). BRGM, 2021. Collection scientifique et technique. ISBN : 978-2-7159-2760-5.

L'indice d'intensité a été défini à partir de l'analyse des données historiques de chutes de blocs, dont le recensement commence à être exhaustif, notamment sur les données de volumes, depuis 1998. Cette analyse a montré que la grande majorité des chutes de blocs recensées depuis 1998 sont de volumes inférieurs à 50 m³, avec une prédominance de volumes entre 1 et 10 m³. L'application d'une loi fréquence-volume (loi puissance) et le calcul de probabilités de départ (loi de Poisson) sur les données historiques de Salazie a permis de définir un volume unitaire de référence pour l'échéance 30 ans compris entre 1 et 10 m³ selon les secteurs. D'après le référentiel MEZAP (Annexe 1), cette gamme de volume correspond à un **indice d'intensité Elevé**.

L'indice d'activité a été défini par l'analyse de la fréquence des phénomènes historiques sur un lieu donné. Selon le référentiel MEZAP, adapté à notre période de référence de 30 ans (cf. Annexe 1), **l'indice d'activité varie de Fort à Moyen** selon la zone considérée.

La probabilité d'atteinte a été déterminée de deux façons distinctes et complémentaires. Dans un premier temps, l'outil de cartographie ELANA (Levy et al., 2021), basé sur la méthode de l'aire normalisée, a été utilisé afin de cartographier les probabilités de propagation de manière globale, à l'échelle du cirque. Dans un second temps, les enveloppes de propagation ont été précisées au droit de chaque ilet, dans les secteurs concentrant les enjeux via des simulations trajectographiques 2D (logiciel probabiliste Pierre98). Vingt-trois profils trajectographiques ont été réalisés sur l'ensemble de la zone d'étude profils (Figure 7). Une vérification à dire d'expert a ensuite été réalisée, notamment dans les zones à configuration particulière (forts encaissements par exemple). La probabilité d'occurrence a ensuite été qualifiée par le croisement de la probabilité d'atteinte et de l'indice d'activité selon la matrice MEZAP de référence (Annexe 1). Enfin l'aléa chute de blocs résultant est obtenu par croisement de l'indice d'intensité et de la probabilité d'occurrence (Annexe 1).

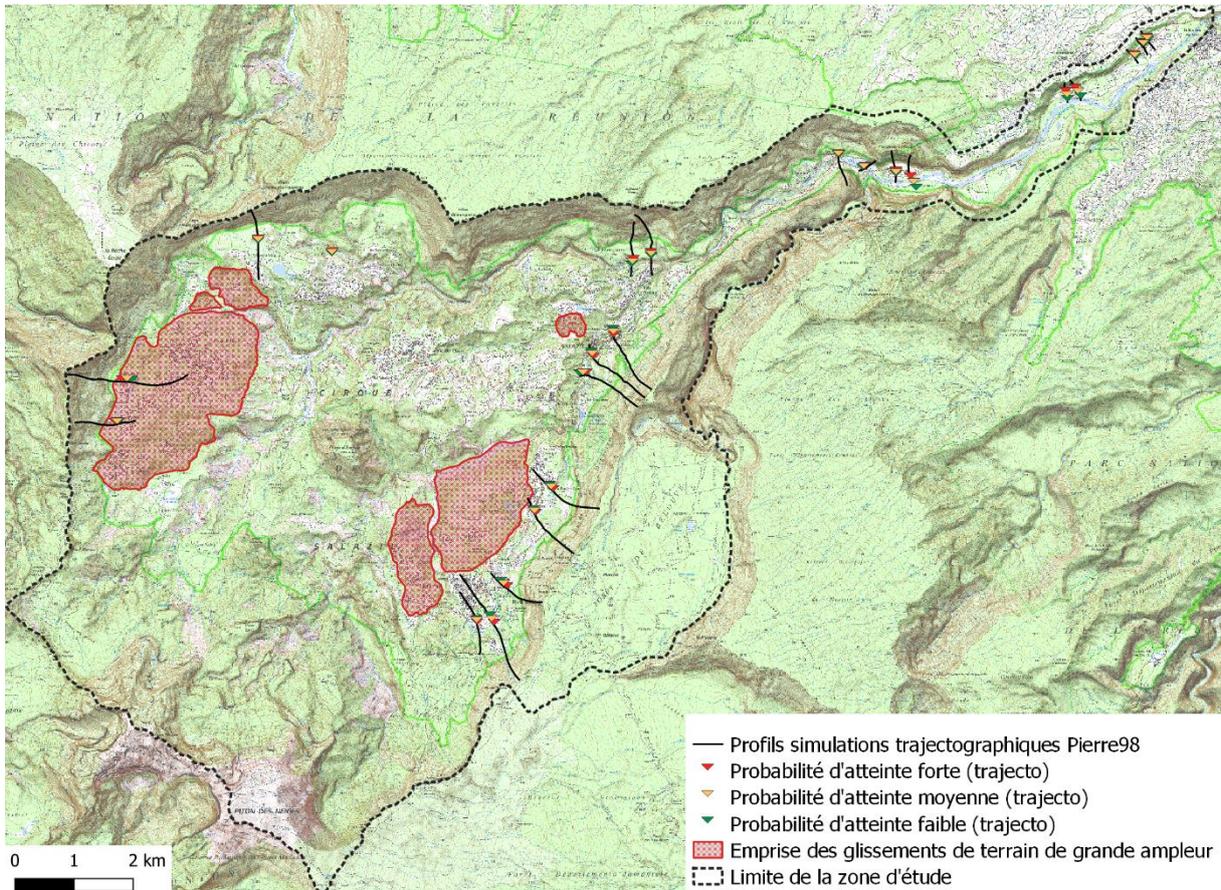


Figure 7 – Localisation des profils trajectographiques réalisés sur la zone d'étude et des limites de probabilités d'atteinte forte, moyenne, faible obtenues. L'emprise des sept glissements lents de grande ampleur est également reportée.

3.1.2 Aléa Glissement de terrain

Deux types de glissements sont pris en compte dans cet aléa : les glissements spontanés, au déclenchement soudain et à la propagation rapide, et les glissements lents de grande ampleur, actifs de manière permanente, aux vitesses de propagation de l'ordre du cm au m/an. Les phénomènes de type déboulé ne sont pas considérés.

Pour les glissements spontanés, l'analyse des phénomènes historiques et l'application d'une loi fréquence-volume et d'une loi de probabilité discrète (similaire au cas des chutes de blocs) a permis de définir les intensités attendues d'événements pour une période de référence de l'ordre de 30 ans (Tableau 1). Les valeurs de recul des bordures de versant ont été estimées à dire d'expert à partir des données historiques disponibles. D'après la grille de définition des intensités définie par Rey (2016) et faisant référence à La Réunion pour l'élaboration des cartes d'aléa (Annexe 1), les volumes considérés à l'échéance 30 ans, correspondent à des **intensités moyennes à élevées**.

Période de référence 30 ans	Volume attendu (intensité)	Recul attendu
Bordure de Grand Ilet	15-20 000 m ³	Jusqu'à 100 m
Bordure des autres ilets	5-10 000 m ³	Jusqu'à 50-70 m
Escarpements topo H= 20-25 m	~1000 m ³	Jusqu'à 10-15 m

Tableau 1 – Intensités et reculs attendus pour des glissements spontanés pour une période de référence trentennale selon les secteurs considérés.

La définition de l'aléa « glissement spontanée » s'est ensuite basée sur l'analyse de facteurs de prédisposition tels que la pente et la géologie. Les terrains soumis aux glissements de terrain dans le cirque sont principalement constitués de brèches d'origines diverses (avalanches de débris, colluvions...etc.) et au degré d'induration variable (classes de sols 2 et 3 – cf. Annexe 1). Compte tenu de cette nature bréchique de sols, des déclenchements de glissements de terrain ont été jugés possibles à partir d'une pente de 20°. Par ailleurs, au vu de la forte pluviométrie annuelle sur la zone d'étude, ce paramètre a été systématiquement considéré comme un facteur aggravant de déclenchement d'instabilités. La probabilité d'occurrence d'un glissement de terrain a ensuite été évaluée à partir de la grille de définition proposée par Rey (2016, Annexe 1) tenant compte notamment, du type de sol, de la pente et de la présence de facteurs aggravant. Dans notre cas, les probabilités d'occurrence oscillent entre **Moyen et Elevé**, avec des niveaux **faibles** dans les secteurs de plus faible pente (<20°) situés au cœur des ilets. Enfin, l'aléa final est obtenu à partir du croisement entre probabilité d'occurrence et intensité (Annexe 1).

Pour les sept glissements lents identifiés dans le cirque (Figure 7), la probabilité d'occurrence est toujours égale à 1 car le glissement est permanent. C'est donc l'intensité du phénomène qui conditionne le degré d'aléa. Les valeurs de déplacements planimétriques et verticaux (suivis depuis 2002 par le BRGM), en particulier les phases d'accélération en lien avec la pluviométrie, ont été utilisées pour définir l'intensité des phénomènes. Pour une période de référence de 30 ans, l'évènement de référence considéré correspond à une accélération des glissements consécutive à une pluie décennale sur 24 à 72h (~600 à 800 mm).

Au front et en bordure des glissements lents, un aléa élevé a été systématiquement considéré car ces zones sont soumises à des déplacements importants et à des accélérations notables lors de phénomènes pluvieux pouvant engendrer d'importants désordres. Au sein de l'emprise des glissements lents, qui subissent ou subiront des désordres, deux niveaux d'aléa sont distingués :

- Un aléa moyen pour les secteurs affectés par des déplacements horizontaux inférieurs à 6-10 cm/an, sans tassements significatifs ni désordre connu en surface.
- Un aléa élevé pour les secteurs affectés par des déplacements horizontaux supérieurs à 6-10 cm/an et/ou des tassements significatifs (≥10 cm/an).

La cartographie des vitesses de déplacement permettant de définir le niveau d'aléa est obtenue par interpolation des données ponctuelles issues des relevés de bornes géodésiques ou de GPS permanents.

3.1.3 Agrégation des cartes d'aléa pour l'obtention d'une carte d'aléa Mouvement de terrain globale

Trois cartes distinctes ont été obtenues grâce au travail précédent : une carte d'aléa chute de blocs (Figure 8), une carte d'aléa glissement spontané et une carte d'aléa glissement lent de grande ampleur.

Les cartes d'aléa glissement spontané et glissement lent ont été agrégées afin d'obtenir une carte générale pour les glissements de terrain (Figure 9). Puis cette carte a été agrégée à la carte d'aléa chute de blocs pour obtenir une carte d'aléa mouvement de terrain finale (Figure 10).

Le regroupement des différentes cartes a été réalisée selon le principe que l'aléa le plus élevé parmi les trois phénomènes définit systématiquement le niveau d'aléa final.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

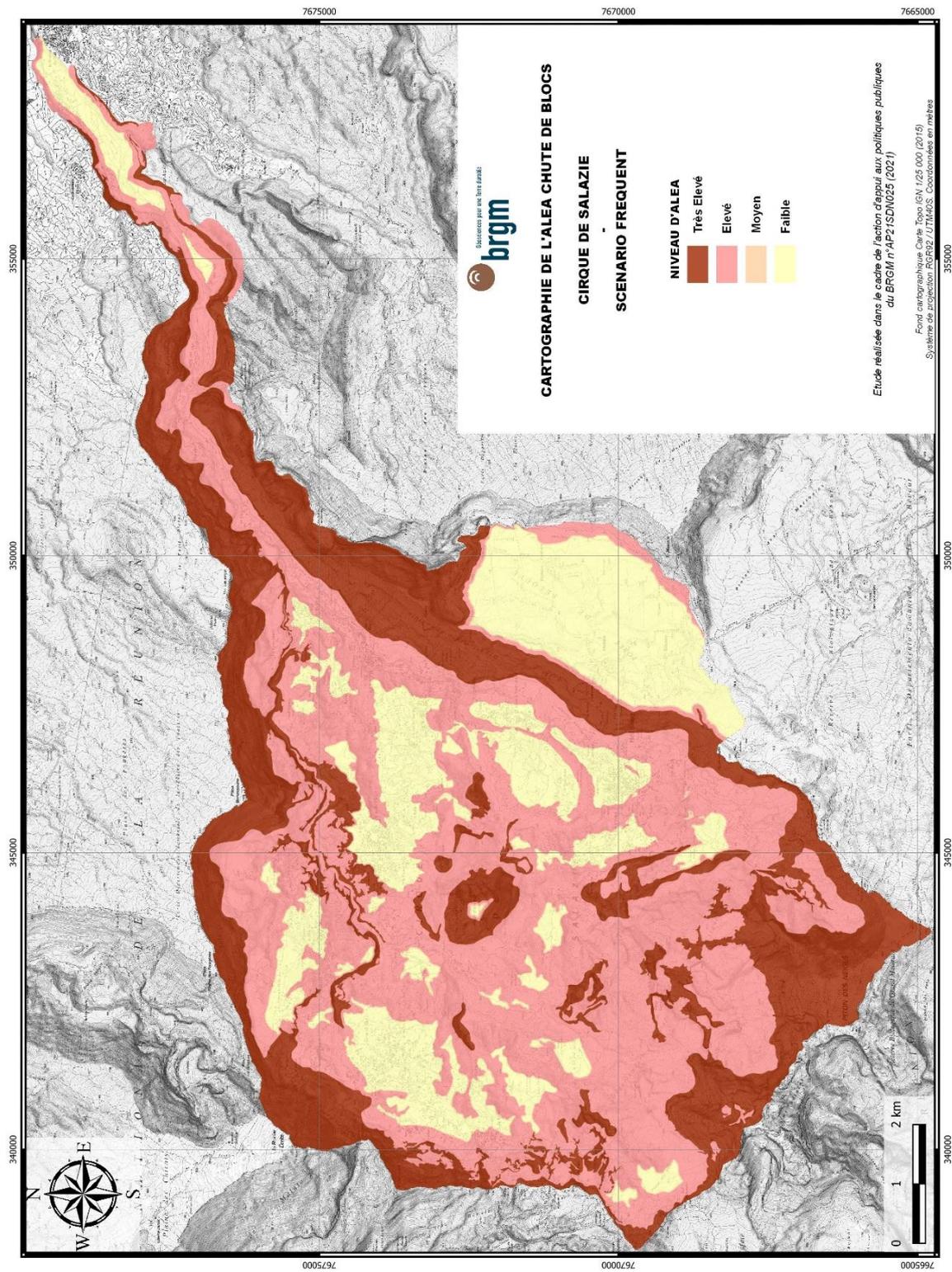


Figure 8 : Cartographie de l'aléa « Chute de Blocs » pour une période de référence « fréquente » (~30 ans).

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

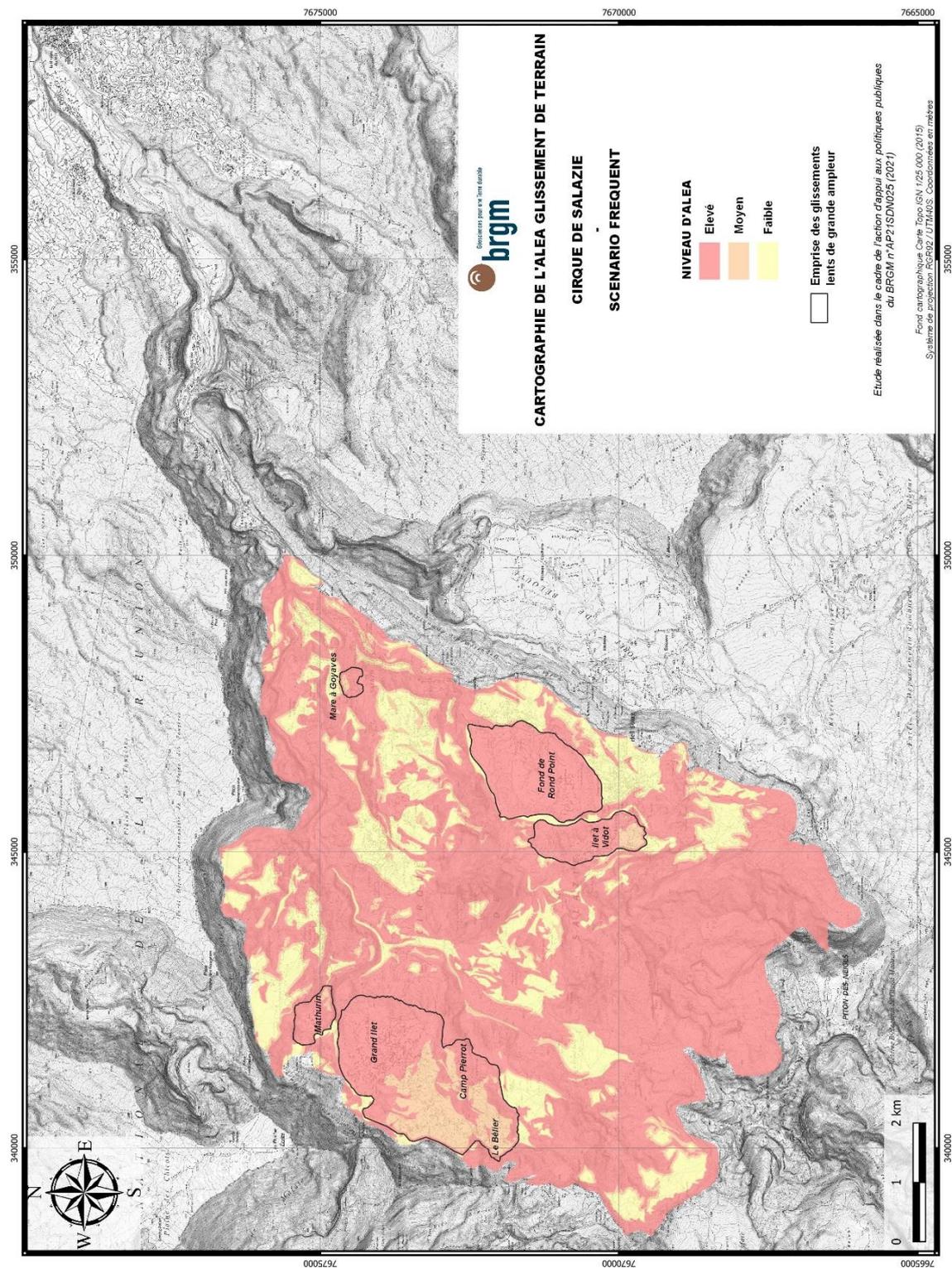


Figure 9 : Cartographie de l'aléa « Glissement de terrain » pour une période de référence « fréquente » (~30 ans).

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

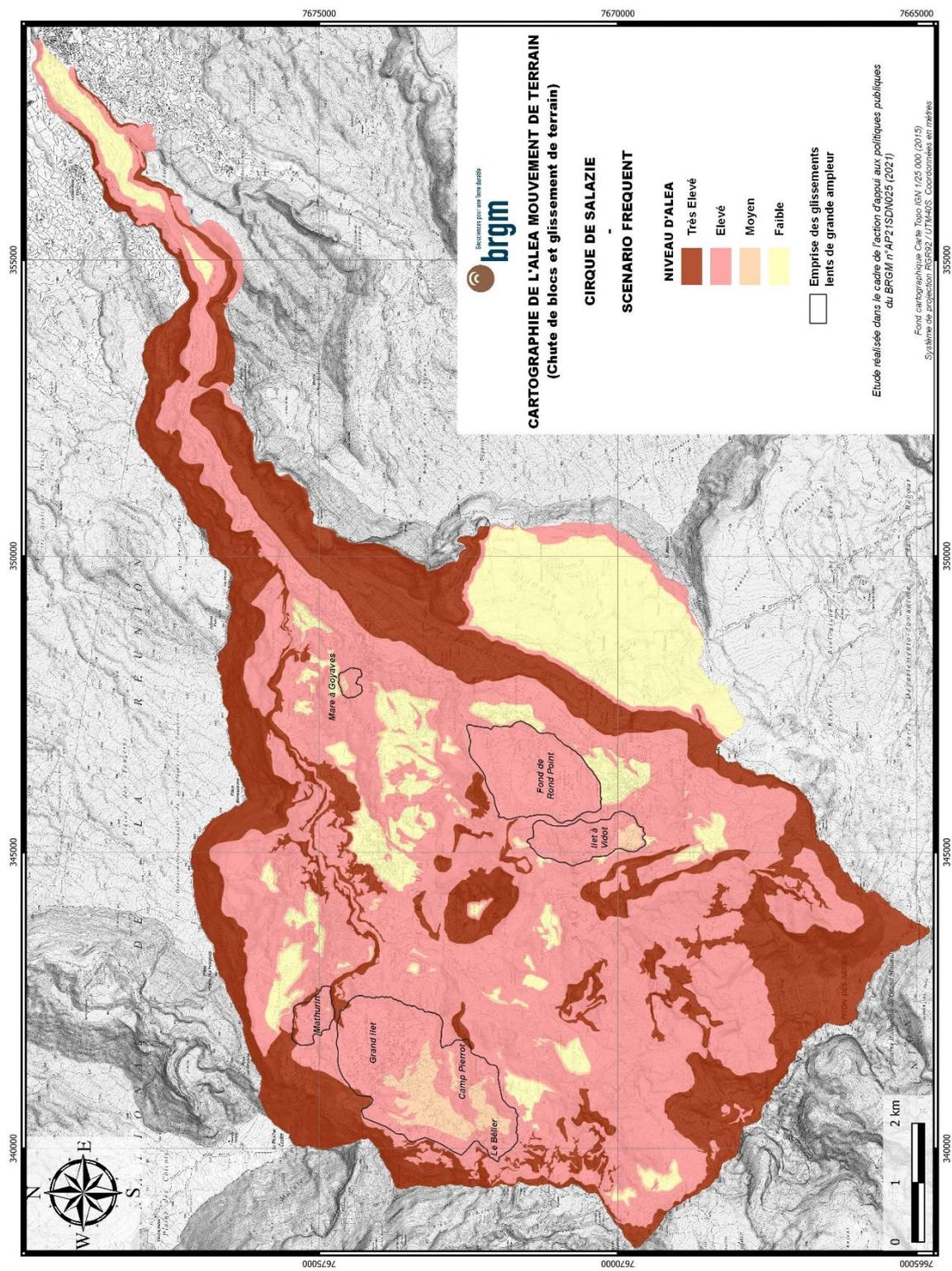


Figure 10 : Cartographie de l'aléa Mouvement de terrain pour une période de référence « fréquente » (~30 ans)

4 Caractérisation des familles d'enjeux

4.1 ENJEU « VIES HUMAINES »

Les personnes présentes sur le site impacté par le phénomène peuvent être blessées, voire décéder selon l'ampleur du phénomène. Les données INSEE permettent de quantifier le nombre d'habitants dans chacun des carreaux (200 x 200 m). D'après ces données, 8076 habitants sont recensés sur la zone d'étude. Toutefois, les personnes exposées peuvent se trouver dans leur logement mais également sur leur lieu de travail, dans un établissement scolaire ou dans un véhicule lorsque le phénomène survient. Pour évaluer le nombre de personnes exposées dans chaque carreau, nous avons donc réalisé des hypothèses relatives à la mobilité des personnes pendant la journée et la nuit. On suppose par exemple que :

- Les enfants âgés de moins de 3 ans sont principalement à la maison jour et nuit ;
- De 4 à 15 ans, les enfants sont à l'école ou collège le jour, à la maison la nuit ;
- De 16 à 18 ans, les jeunes sont au lycée en dehors de la commune ou non scolarisés ;
- Les 18-65 ans résidant dans la commune travaillent à 43% (calcul sur base des données INSEE, 2018). On affecte donc cette population dans les lieux de travail (données SIRENE), le reste est réparti entre habitations et extérieur (50-50 %) ;
- Les plus de 65 ans sont principalement à la maison ou dans les environs immédiats jour et nuit.

Ces hypothèses permettent de calculer un **nombre de personnes en équivalent temps plein**. Par exemple, la présence de 150 élèves dans une école pendant 8 heures est équivalente à 50 personnes présentes en permanence sur 24 heures. La présence des touristes est négligée dans ce calcul car il est difficile de savoir où ils se trouvent dans la journée. Par ailleurs, la capacité d'hébergement étant relativement faible à l'échelle de la population du cirque, nous avons fait le choix de négliger les touristes logeant sur place.

Au final, la population équivalent temps plein est concentrée dans un nombre relativement limité de carreaux (Figure 11). Ainsi, 39 carreaux (soit 4,5% du nombre de carreaux) accueillent plus de 40 personnes équivalent temps plein, et 10% des carreaux accueillent plus de 20 personnes.

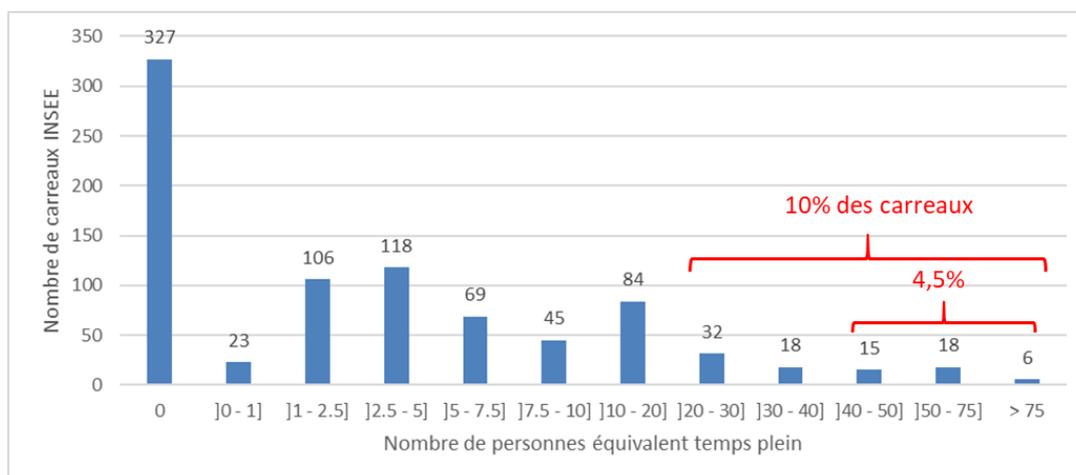


Figure 11 : Répartition de la population (équivalent temps plein) par classe d'effectif.

La distribution spatiale du nombre de vies humaines exposées est présentée dans la Figure 12. La carte met en évidence quelques zones présentant une très forte concentration, notamment liée à la présence d'établissements scolaires (Collège, Ecole de Bois de Pomme...). La Figure 13 représente l'écart entre la population au lieu de résidence (données INSEE) et la population présente en équivalent temps plein. Les écarts peuvent être significatifs, notamment dans les zones qui concentrent des établissements scolaires ou de l'activité économique. C'est le cas par exemple du collège Auguste Lacaussade qui enregistre un important effectif (550 élèves et personnels). La population équivalent temps plein calculée sur le carreau incluant le collège est la plus importante du cirque et s'élève à 265. En comparaison, la population INSEE sur ce carreau ne s'élève qu'à 51 personnes.

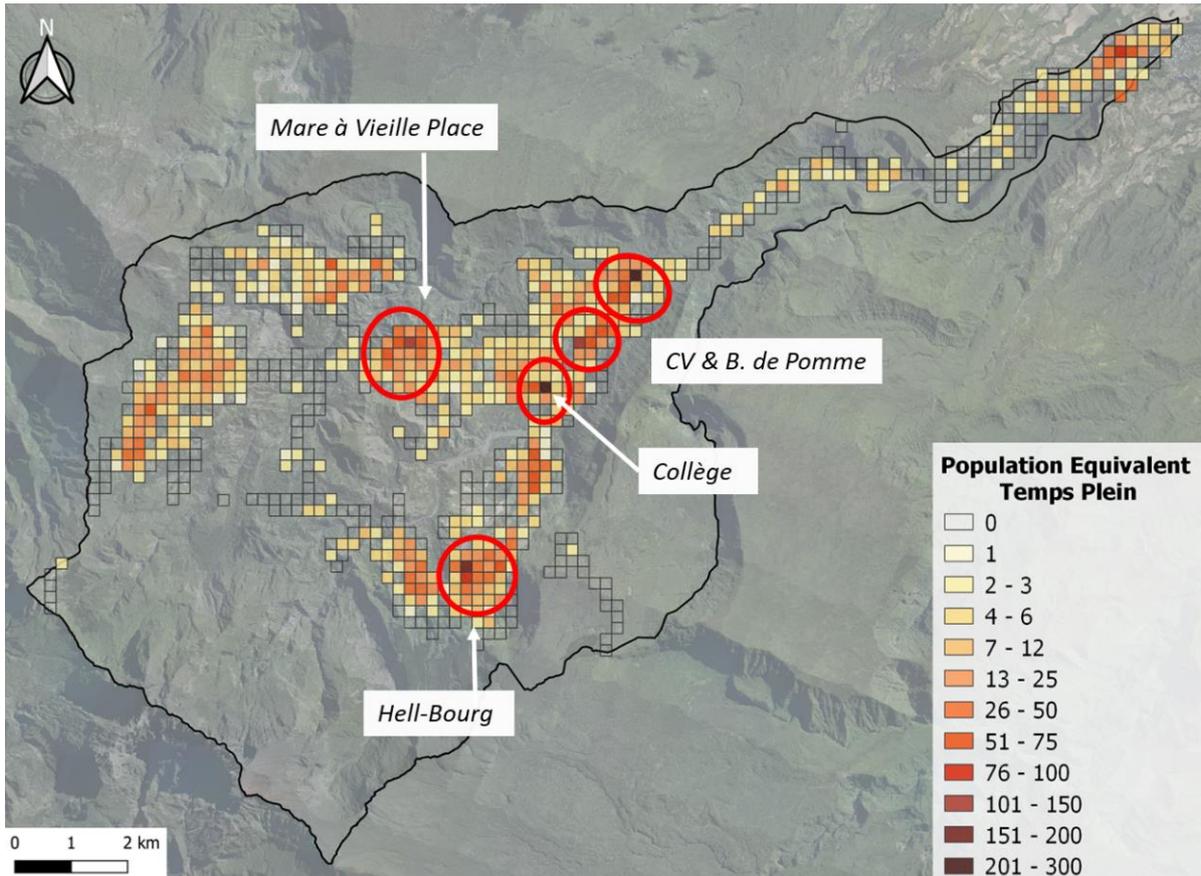


Figure 12 : Répartition de la population en nombre de personnes équivalent temps plein.

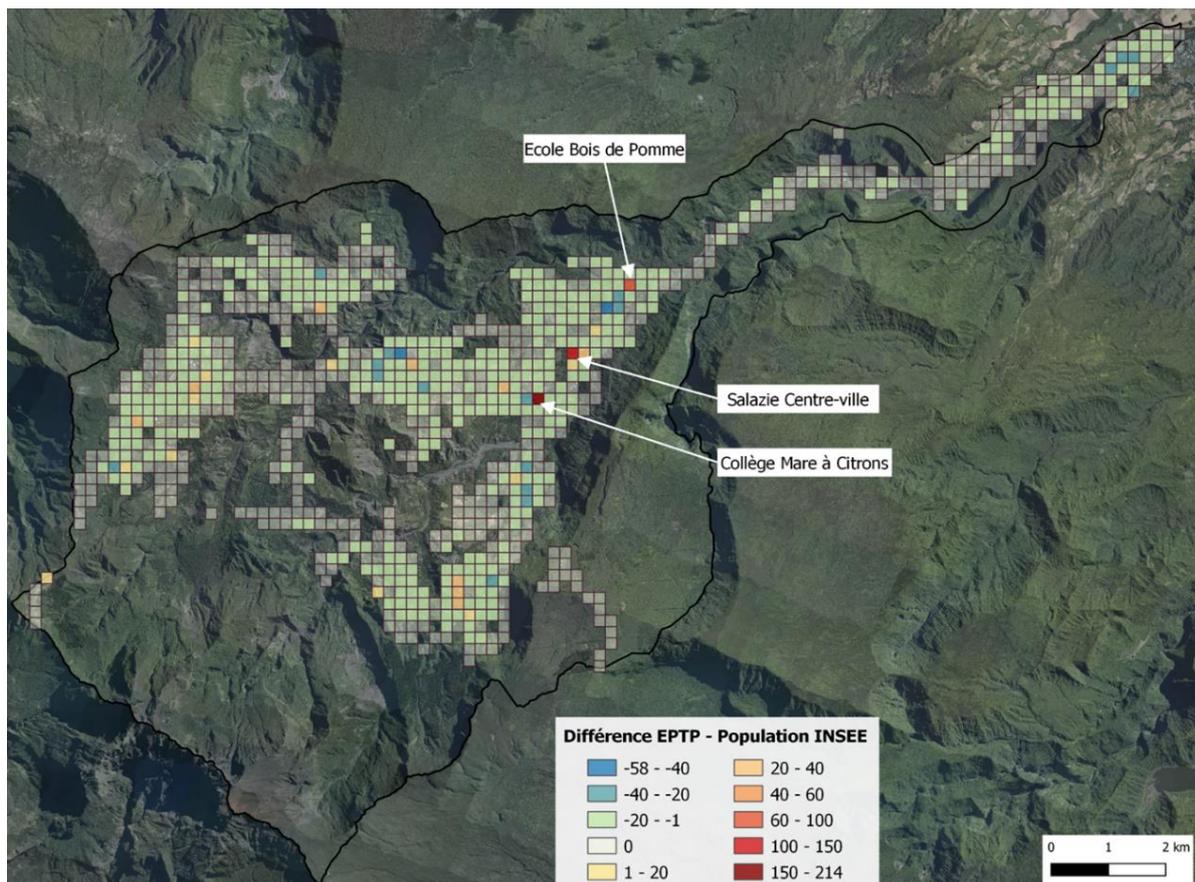


Figure 13 : Écart entre la population au lieu de résidence (INSEE) et le nombre de personnes en équivalent temps plein calculé.

4.2 ENJEU « PERSONNES VULNERABLES »

Lorsque qu'un mouvement de terrain impacte une zone habitée, certaines personnes sont susceptibles d'être plus fortement impactées que d'autres, en raison d'une plus grande **vulnérabilité**.

- Cette vulnérabilité peut être de nature économique, lorsque qu'il s'agit de personnes ayant des ressources limitées (très faibles revenus, absence de véhicule, logement non assuré) ;
- Elle peut découler d'un manque de connaissance des procédures administratives, ce qui les handicapera pour faire face au sinistre ;
- Il peut également s'agir d'une vulnérabilité psychologique, les jeunes enfants ou les personnes âgées étant par exemple susceptibles d'être profondément marqués (voire traumatisés) par la perte de leur logement et des repères associés ;
- Enfin, il peut s'agir d'une vulnérabilité physique, dans le cas de personnes à mobilité réduite ou souffrant de maladies chroniques qui les rendent dépendantes d'un appareillage (diabète, insuffisance respiratoire...).

Pour caractériser l'importance de la population vulnérable dans chaque carreau du territoire de Salazie, nous avons utilisé les données suivantes (Tableau 2) :

Type de vulnérabilité	Données mobilisées	Source de données
Economique	Nombre de ménages dont les revenus sont inférieurs au seuil de pauvreté ⁵ .	INSEE, FILOSOFI (2015)
	Nombre de logements insalubres	CIREST (2019) ⁶
Psychologique	Nombre d'enfants de moins de 10 ans	INSEE, FILOSOFI (2015)
Psychologique et physique	Nombre de personnes âgées de plus de 65 ans	INSEE, FILOSOFI (2015)

Tableau 2 : Données mobilisées pour évaluer le nombre de personnes vulnérables.

La répartition des variables décrites dans le tableau ci-dessus est représentée dans les figures suivantes :

- La proportion de ménages vivant sous le seuil de pauvreté, qui est en moyenne de 57 % sur la zone d'étude, est particulièrement élevée dans les écarts comme Mare d'Affouches, Le Bélier, Bé Cabot mais aussi sur le secteur Mare à Poule d'Eau/Hell-Bourg (Figure 14) ;
- La proportion d'enfants de moins de 10 ans est également variable, avec une concentration plus importante à Salazie-village et dans le secteur de Mare à Vieille Place, alors que ce taux est plus faible à Grand Ilet (< 10 %) (Figure 15) ;
- La proportion de personnes âgées de plus de 65 ans est plus élevée dans le secteur Grand Ilet, Mathurin, Hell-Bourg et La Pointe. Elle est plus faible sur Mare à Citrons, Mare à Vieille Place et Casabois (Figure 16) ;
- Enfin, les habitats insalubres (451 répertoriés sur la zone d'étude) sont répartis de manière assez uniforme sur tout le territoire, avec des concentrations très ponctuelles à Hell-Bourg et dans le centre-ville de Salazie (Figure 17).

⁵ Le seuil de pauvreté est généralement fixé à 60% du niveau de vie médian en France (22 040 € annuel – définition INSEE).

⁶ Hydrétudes (2019) Etudes pré-opérationnelles – Habitats indignes en zone à risque d'aléa fort, RE17-140, Phase 2.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain –
Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

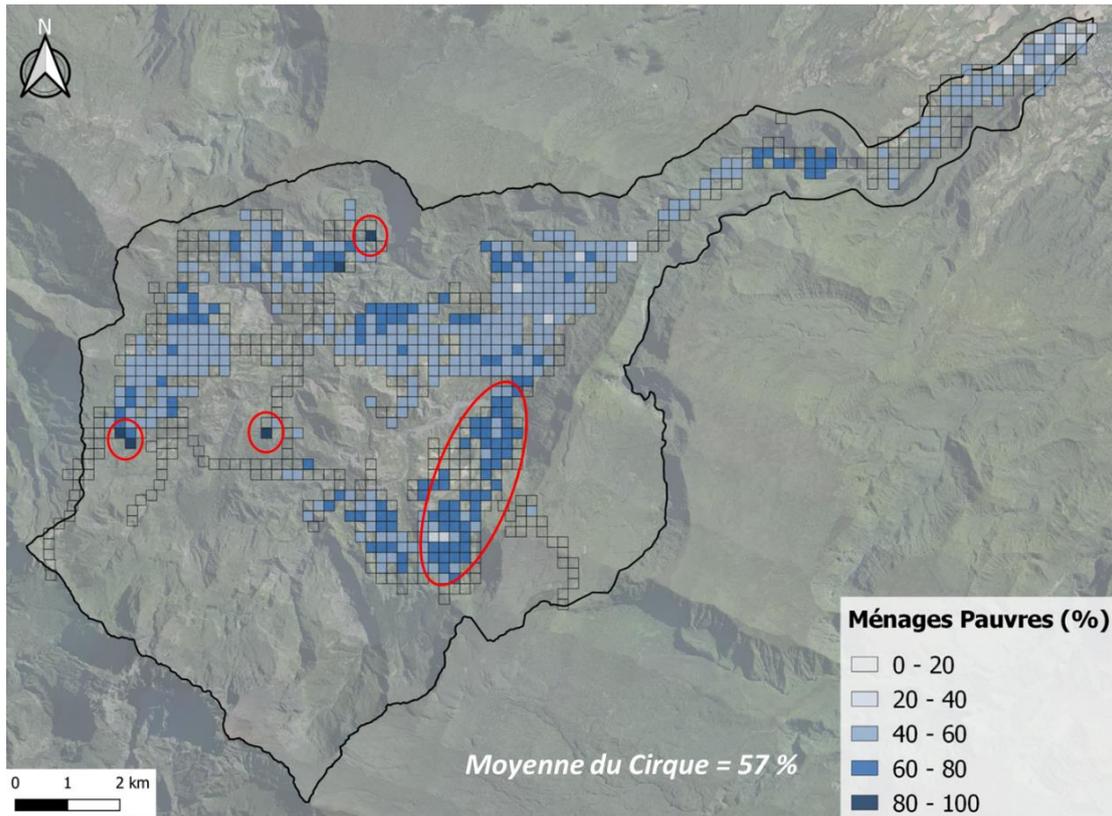


Figure 14 : Proportion de ménages pauvres (définition INSEE).

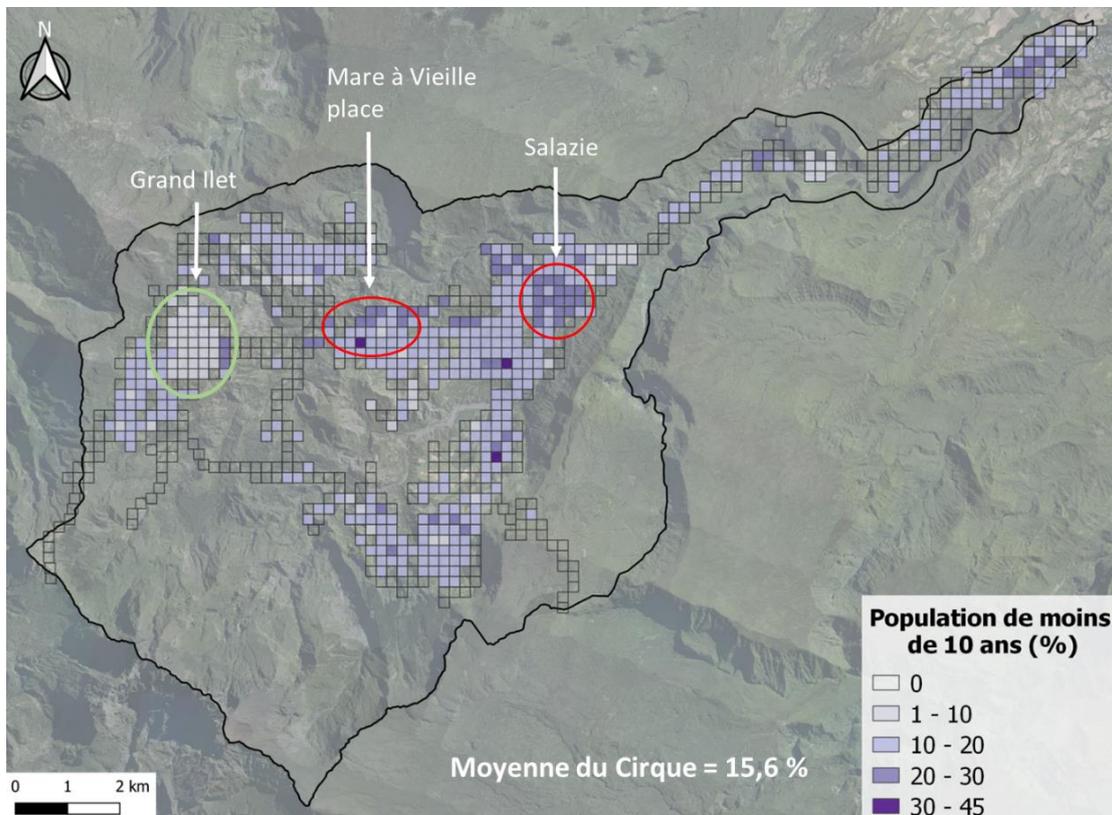


Figure 15 : Proportion d'enfants de moins de 10 ans dans la population au lieu de résidence (source INSEE).

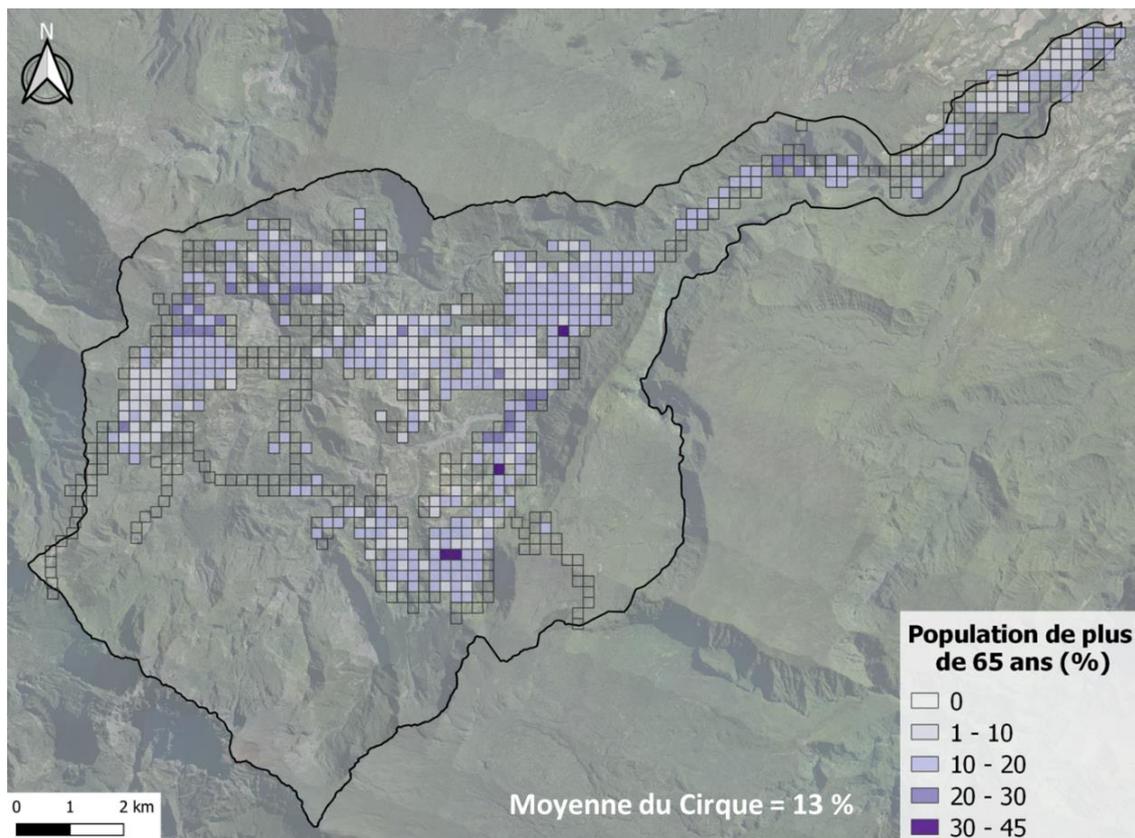


Figure 16 : Proportion de personnes âgées de plus de 65 ans dans la population au lieu de résidence (source : INSEE).

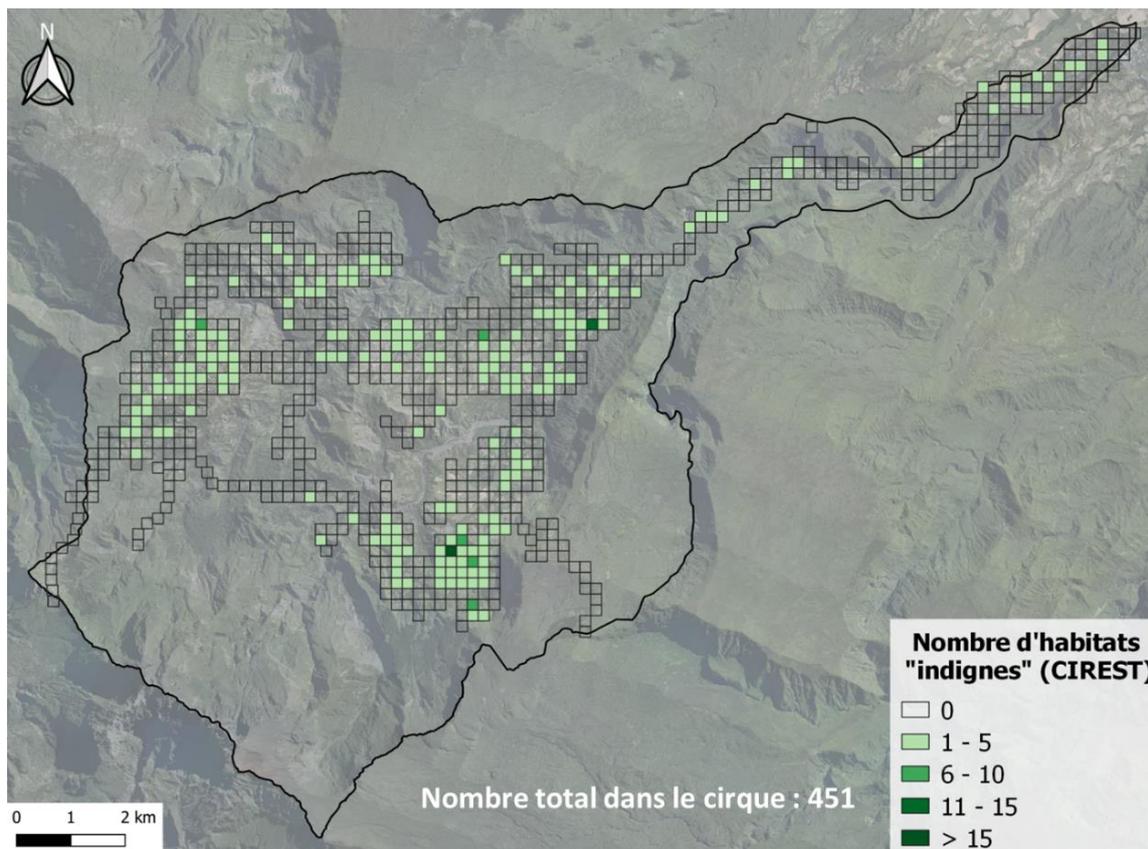


Figure 17 : Nombre d'habitats insalubres recensés (source : CIREST).

4.3 ENJEU « BIENS MATERIELS »

Les évènements considérés dans cette étude (qu'il s'agisse de chute de blocs ou de glissements de terrain) peuvent entraîner une destruction partielle ou totale des biens matériels impactés. Ces biens matériels relèvent de trois grandes catégories :

- Les bâtiments (immobilier) : logements, bureaux, commerces, bâtiments d'élevage et serres, bâtiments administratifs, historiques, religieux, etc. ;
- L'équipement (mobilier domestique, matériel et outils de production pour les entreprises) ;
- Les stocks d'intrants ou de produits finis, animaux vivants dans le cas de l'élevage, etc.

Aucune donnée n'étant disponible pour quantifier la valeur des équipements et des stocks, nous avons uniquement construit un indicateur permettant d'estimer très approximativement la valeur totale des bâtiments⁷ situés dans chaque carreau. Cet indicateur est égal au nombre de bâtiments N_{bat} situés sur le carreau (Figure 19) multiplié par un indice de prix de l'immobilier I_{im} (Figure 18). L'indice de prix I_{im} a été calculé à partir des prix de vente réalisées dans les différents secteurs de la commune⁸ (données des valeurs foncières à la transaction entre 2014 et 2020 – Ministère de l'Économie et des Finances).

⁷ Les données de localisation du bâti sont issues de la BD Topo 2021 de l'IGN.

⁸ Cet indice est un indicateur imparfait de la valeur des biens immobiliers car il est construit en intégrant des données de ventes réalisées sur une assez longue période dont les prix n'ont pas été actualisés et qui concernent principalement des logements.

Le prix moyen de vente à l'échelle de la zone d'étude est de l'ordre de 1050 €/m² de surface bâtie.

Le résultat met en évidence trois zones où l'indicateur de valeur du bâti est significativement plus élevé que dans le reste du cirque : Hell-Bourg, Mare à Veille Place et l'Ilet à la sortie du cirque sur la commune de Saint-André (Figure 20).

Cet indicateur est très imparfait car il ne tient pas compte de la surface des bâtiments, de la qualité du bâti (case bois tôle ou maison en dur), ni de leur usage (habitation, entreprise, bâtiment d'élevage). Ces informations ne sont en effet pas fournies dans les principales bases de données. Leur mobilisation supposerait de solliciter différents producteurs de données (chambre d'agriculture, chambre des métiers, données Majic, etc.), de les compiler et de collecter par enquête les données manquantes, ce qui dépasse largement les objectifs de cette étude. Cela constitue une piste d'amélioration dans le cadre de futures études similaires.

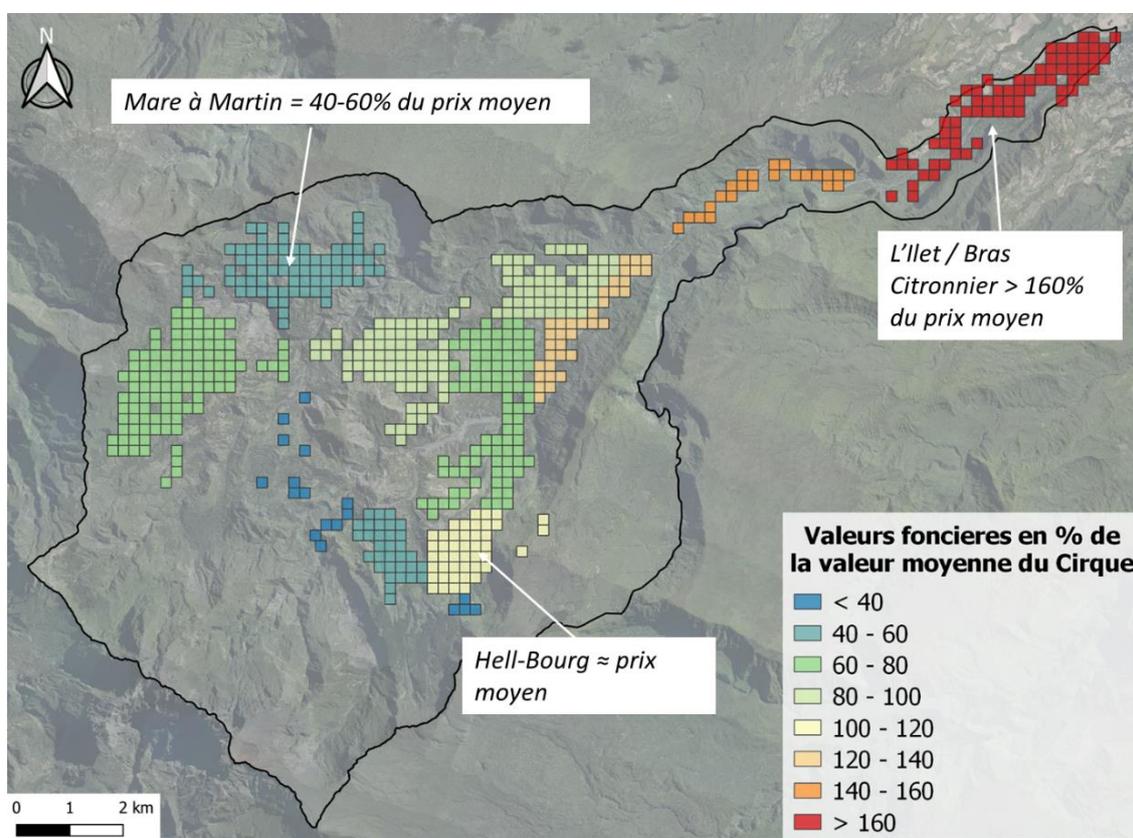


Figure 18 : Indice des prix de l'immobilier dans la zone d'étude (valeur moyenne des biens immobiliers en % de la valeur moyenne sur la zone). Source : données de transactions immobilières 2014-2020, Ministère de l'Économie et des Finances.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain –
Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

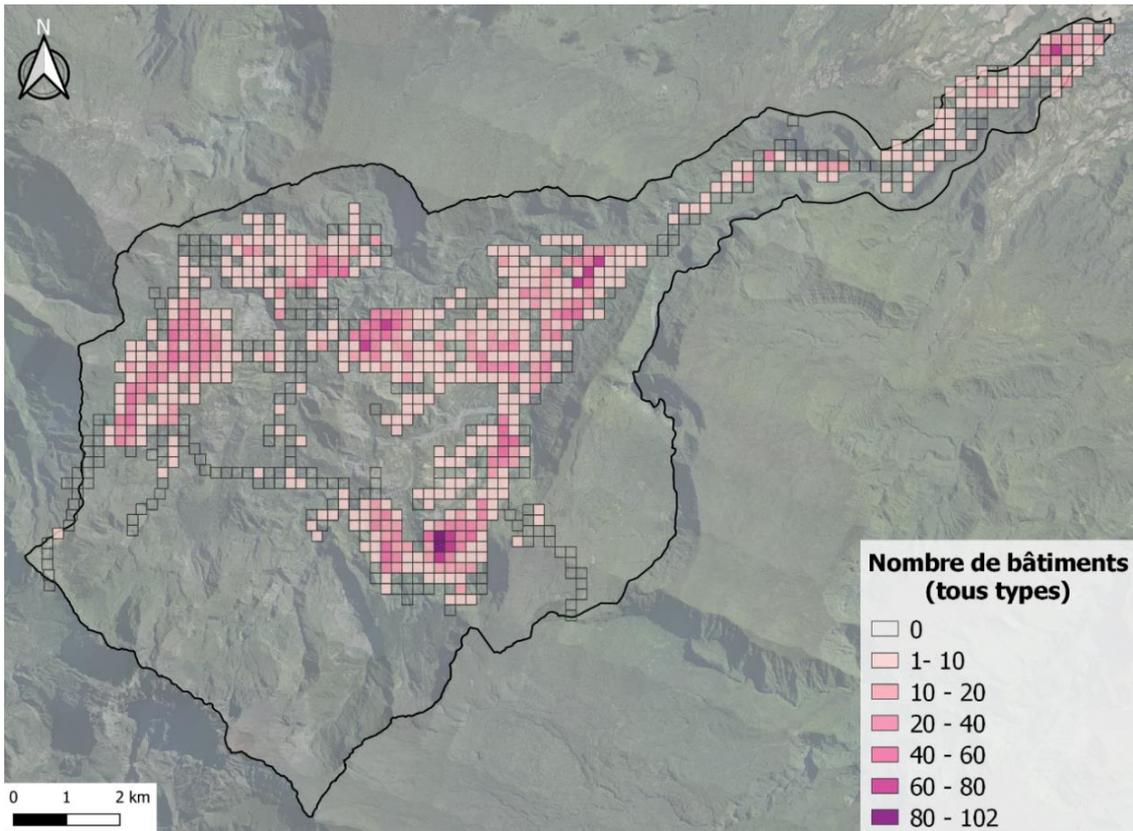


Figure 19 : Nombre de bâtiments (tous usages confondus). Source : BD topo, IGN.

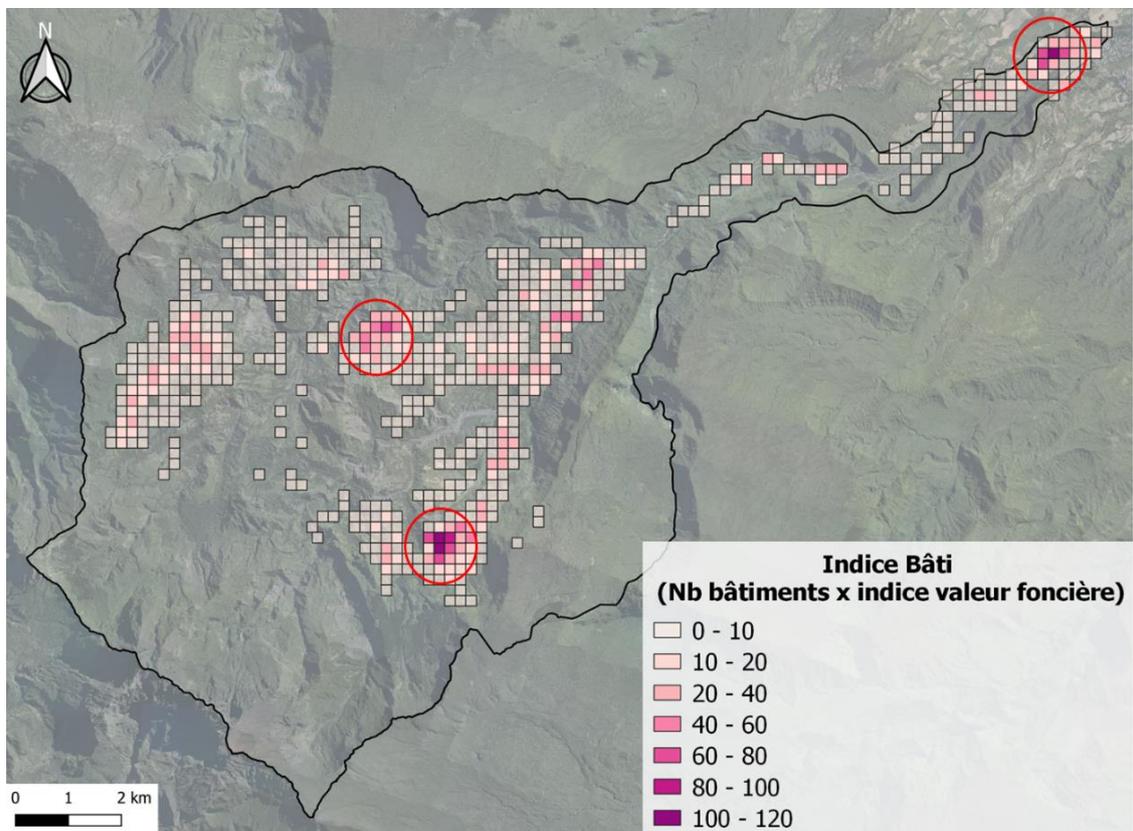


Figure 20 : Indicateur de valeur du bâti, intégrant le nombre de bâtiment et l'indice des prix.

4.4 ENJEU « ACTIVITE ECONOMIQUE »

L'activité économique est la quatrième famille d'enjeux intégrée dans l'analyse. Nous avons créé une carte qui rend compte de l'importance des activités économiques qui se situent dans chaque carreau. Pour cela, nous avons utilisé la base de données SIRENE (Base V3, novembre 2021) qui recense toutes les entreprises déclarées, et pour lesquelles nous connaissons l'activité principale et l'effectif d'employés. **Sur la zone d'étude, 1041 établissements sont recensés dans la base Sirene.**

Le nombre de personnes dont l'emploi dépend des entreprises qui se situent dans chaque carreau a été calculé et retenu comme un indicateur de l'activité économique. La Figure 21 illustre la représentation spatiale des données utilisées : les entreprises déclarées sont représentées par des points violet, et la couleur des carreaux indique le nombre total d'employés présents. La base Sirene ne donnant pas l'effectif exact d'employés mais des valeurs par classes (par ex. de 2 à 5 employés), nous avons affecté à chaque entreprise la moyenne de la classe (par exemple 3,5 emplois pour les entreprises de la classe 2 à 5 emplois). Nous avons compté 1 emploi pour les entreprises unipersonnelles n'ayant pas d'employés (le patron ou gérant). Ce calcul conduit à estimer le nombre d'emplois déclarés sur la zone d'étude à près de 1700.

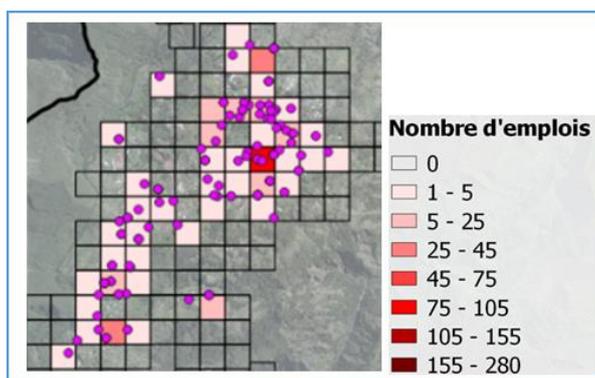


Figure 21 : Cartographie des emplois (carreaux) élaborée à partir des données SIRENE (points violet = entreprises déclarées).

Le résultat met en évidence une concentration d'emplois dans le secteur du centre-ville de Salazie (emplois municipaux, commerces), d'Hell-Bourg (gites, restaurants, commerces de centre-bourg...) et de Grand-Ilet (tourisme, emploi agricole, commerces de centre-bourg) (Figure 22).

À noter que cet indicateur reflète l'effectif au siège social de l'établissement et ne prend donc pas en compte les personnels en déplacement ou travaillant dans d'autres locaux que le siège social. Il ne reflète pas non plus le chiffre d'affaire de l'activité, qui pourrait constituer un critère intéressant pour définir le niveau d'activité économique d'un secteur géographique (dans notre cas, le secteur agricole joue un rôle majeur dans l'activité économique du cirque). Ces informations ne sont malheureusement pas fournies dans les bases de données principales et leur mobilisation supposerait de solliciter de nombreux producteurs de données, de les compiler et de collecter par enquête les données manquantes, ce qui dépasse largement les objectifs de cette étude. Il s'agit clairement d'une piste d'amélioration possible dans le cadre de futures études similaires, afin d'améliorer la qualité du recensement d'enjeux.

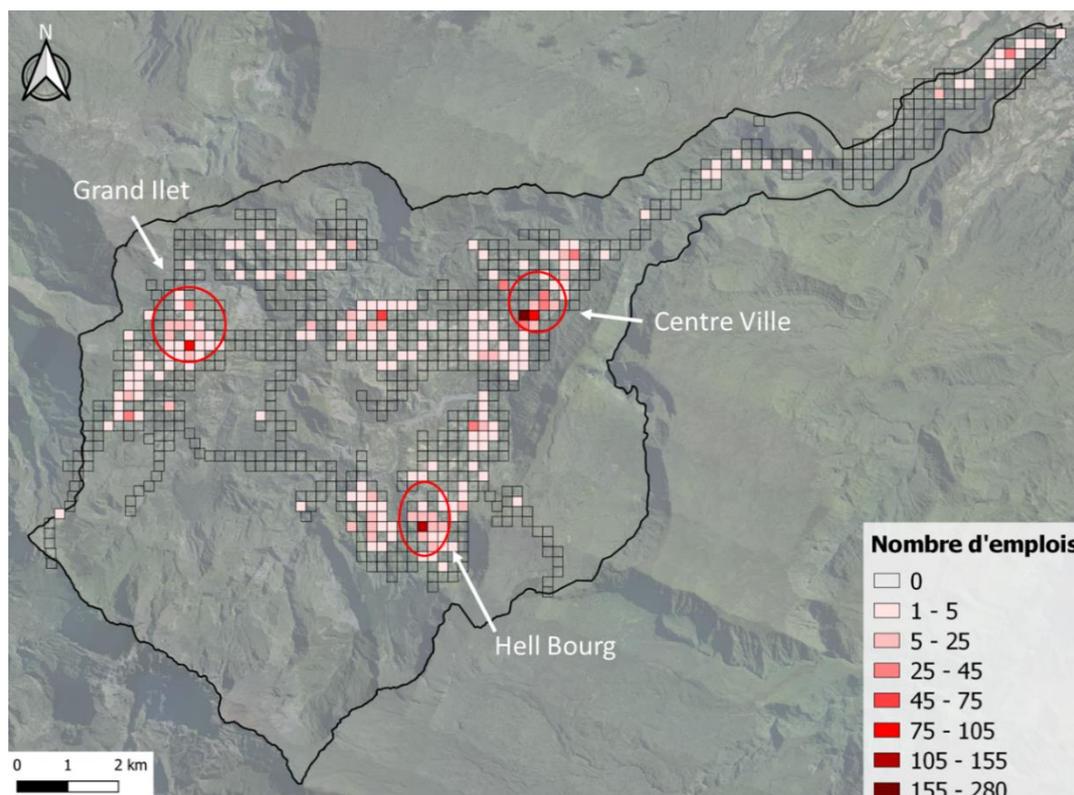


Figure 22 : Cartographie du nombre d'emplois dans la zone d'étude.

4.5 ENJEU « RESEAUX »

Compte tenu de la situation d'enclavement de la commune de Salazie, les réseaux vitaux routiers, d'alimentation électrique et d'eau potable représentent des enjeux importants. En effet, s'ils sont endommagés et coupés par un mouvement de terrain, une partie importante de la population peut se retrouver isolée.

L'importance de chaque tronçon de réseau peut être mesurée par le nombre de personnes qu'elle dessert. Ainsi, un tronçon routier situé en aval du cirque et qui dessert toute la population du cirque est plus important qu'un tronçon de même longueur qui ne dessert qu'un petit écart de 20 personnes. Pour rendre compte de cette importance relative des différents tronçons routiers⁹, chacun est caractérisé par la population desservie en amont (Figure 23).

Concernant les réseaux électriques (Figure 24) et d'alimentation en eau potable (Figure 25), seul le réseau principal est cartographié, compte tenu de l'impact direct potentiel sur une large population en cas de rupture. Il s'agit des lignes haute tension (HTA/HTB) pour le réseau électrique et des canalisations primaires pour l'AEP (diamètre > 200 mm et/ou sortie de captage majeur). Une variable binaire est attribuée à chaque carreau, avec la valeur 1 si le carreau contient un tronçon de réseau, et une valeur 0 dans le cas contraire. Les autres composantes techniques des réseaux, comme les transformateurs électriques, les captages et réservoirs d'eau potable, sont des infrastructures ponctuelles et sont donc incluses dans la famille d'enjeux « Infrastructures critiques » (voir ci-dessous).

⁹ Le réseau routier est issu de la BD Topo 2019 de l'IGN et la population issue des données INSEE décrites au paragraphe 4.1.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain –
Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

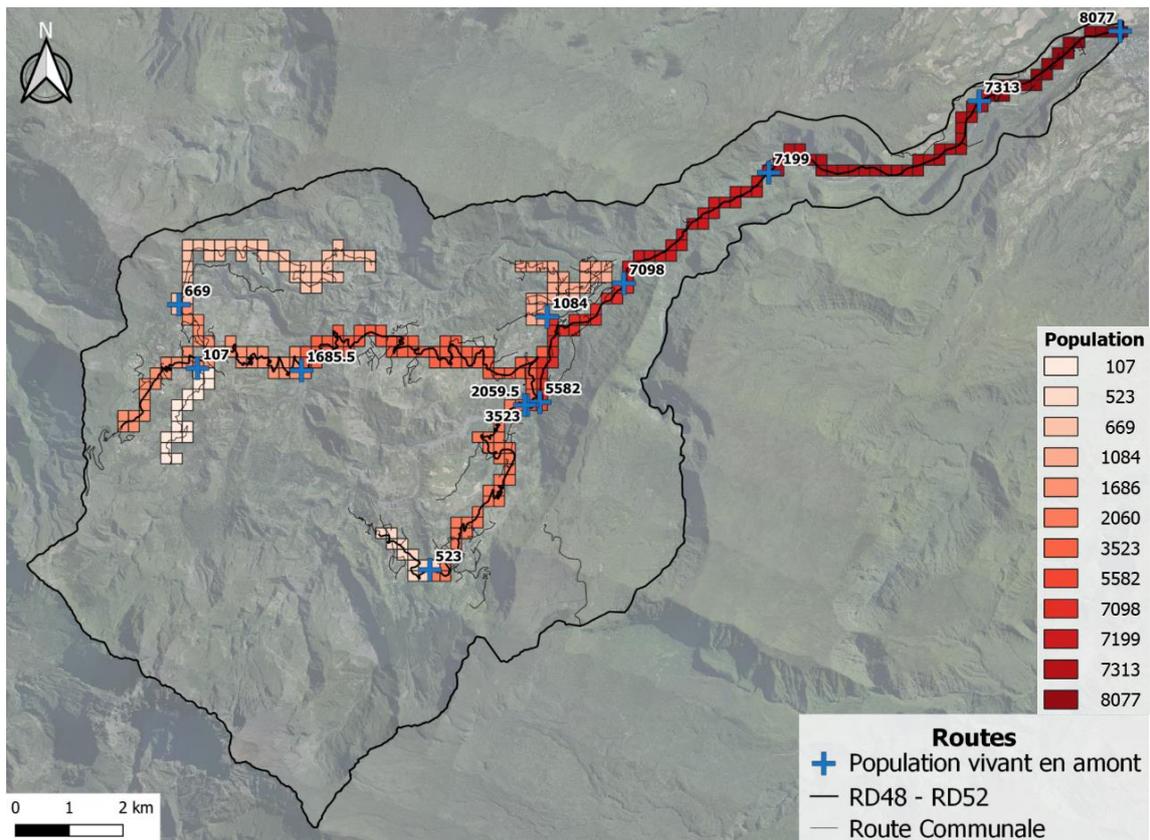


Figure 23 : Cartographie du réseau routier, indiquant le nombre de personnes vivant en amont de chaque tronçon.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

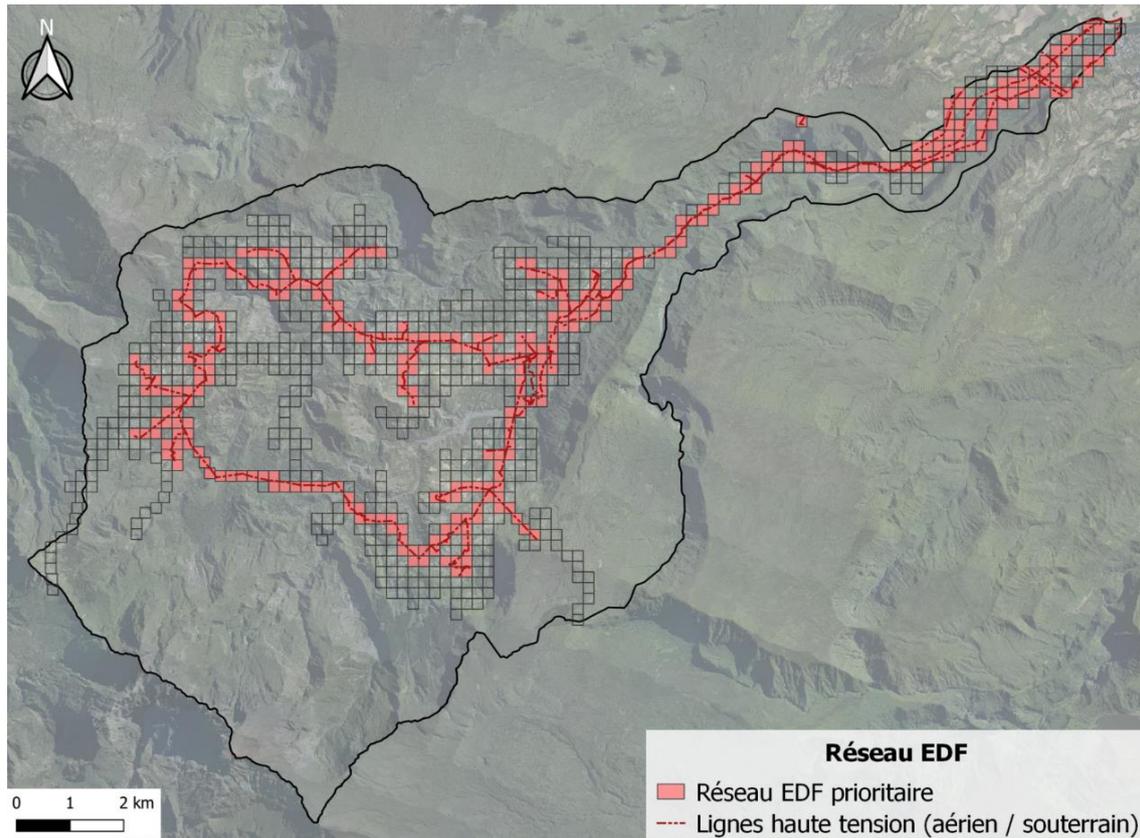


Figure 24 : Cartographie du réseau électrique principal (HTA/HTB) de la zone d'étude.

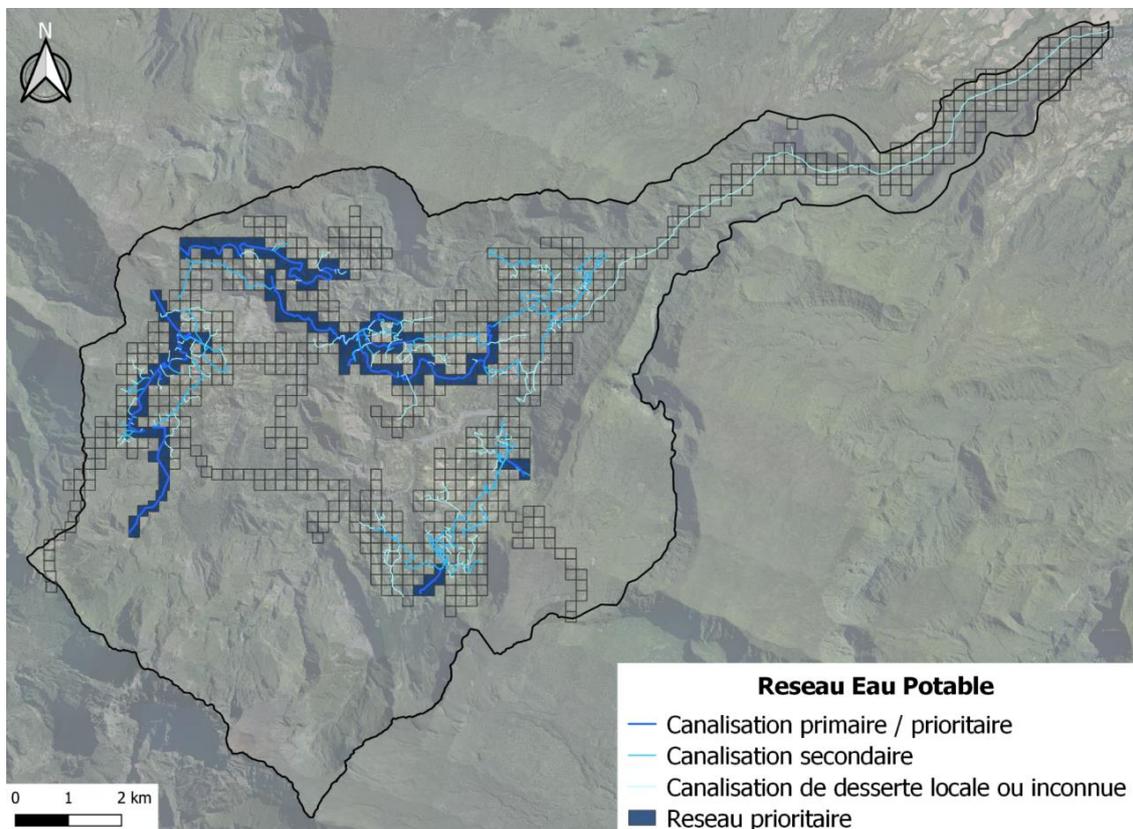


Figure 25 : Cartographie des canalizations principales du réseau d'alimentation en eau potable.

Les cartes représentant les réseaux routiers, électriques et alimentation eau potable ont été combinées pour produire une carte représentant l'importance globale de l'enjeu « Réseau » (cf. §4.8.1, Figure 29). La RD48, route de Salazie, qui dessert le cirque constitue notamment un réseau critique. D'autres secteurs, tels que Grand Ilet/Mare à Martin, Camp Pierrot/Le Bélier ou Mare à Vielle Place concentrent des réseaux prioritaires, notamment d'eau potable pour les deux premiers et routier et électrique pour le dernier.

4.6 ENJEU « INFRASTRUCTURES CRITIQUES »

La liste des infrastructures critiques a été établie sur la base des échanges que nous avons eus avec les personnes consultées lors de l'enquête. Les infrastructures cartographiées sont de trois types :

- Il s'agit d'abord de toutes les infrastructures qui peuvent être mobilisées en cas de crise pour assurer la sécurité des habitants : caserne de pompier, gendarmerie, hébergement d'urgence (qui sont souvent des écoles). Un endommagement de ces infrastructures suite à un mouvement de terrain pourrait détériorer le fonctionnement des services d'urgence en cas de crise, et indirectement générer des victimes supplémentaires ;
- Il s'agit également des infrastructures qui, si elles étaient paralysées suite à un mouvement de terrain, impacteraient fortement la vie des habitants : établissements scolaire (si fermés, problème de garde d'enfants et de scolarisation), mairies annexes (réalisation de toutes les formalités administratives), station essence (une seule est présente dans le cirque, au niveau du village principal le long de la RD48) ;
- Il s'agit enfin des équipements critiques pour le fonctionnement des réseaux vitaux, notamment les relais de téléphonie mobile, les transformateurs électriques, les captages d'eau potable et les réservoirs.

Ces infrastructures ont toutes été répertoriées et localisées. Le nombre d'infrastructures critiques dans chaque carreau a ensuite été calculé et représenté sur une carte (Figure 26). Les écoles également utilisées comme hébergements d'urgences sont comptées comme deux infrastructures, afin de les distinguer des établissements scolaires « simples ».

Le nombre d'infrastructures critiques est réparti de manière relativement homogène à l'échelle de la zone d'étude, avec une concentration légèrement plus marquée dans le secteur d'Hell-Bourg et de Salazie-village/Mare à Citrons.

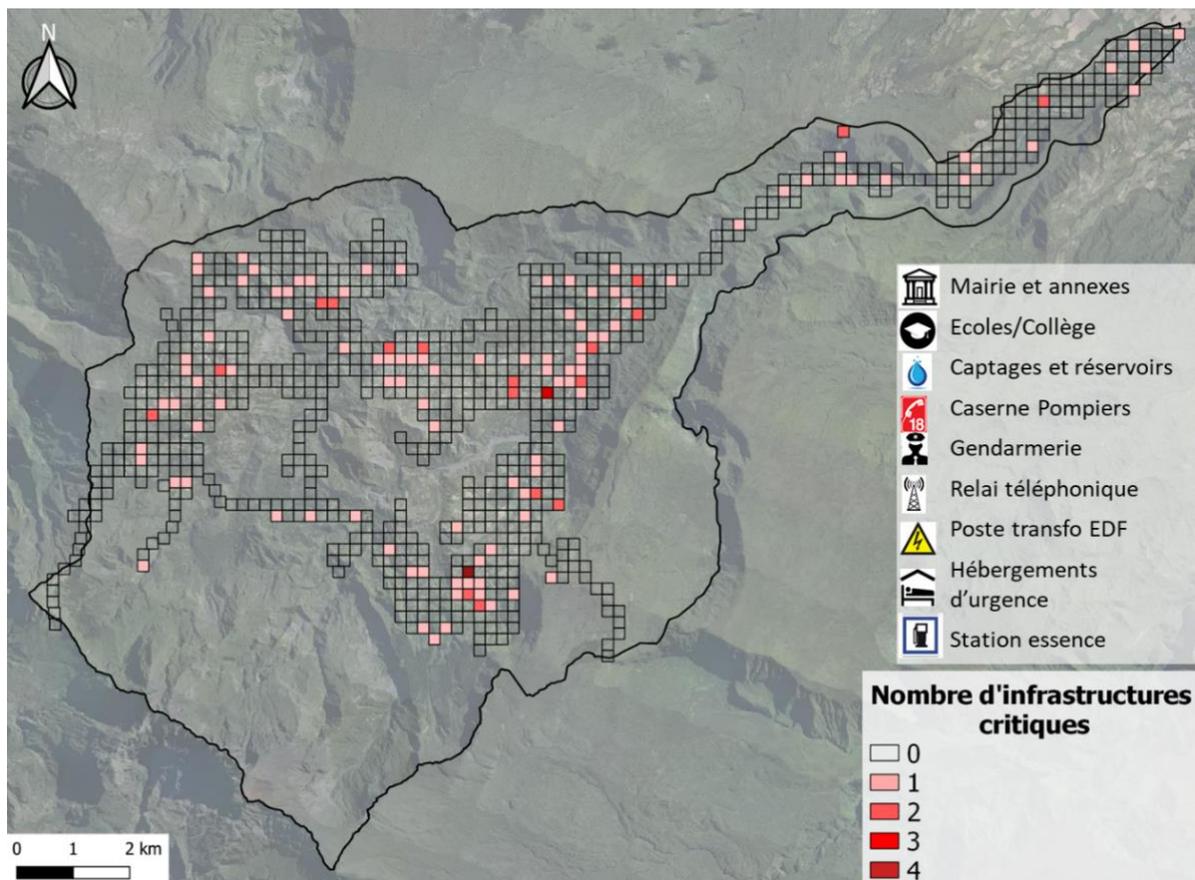


Figure 26 : Nombre d'infrastructures critiques recensées.

4.7 ENJEU « PATRIMOINE »

Nous avons recensé les bâtiments religieux, les monuments historiques classés et les cimetières pour construire la carte représentée sur la Figure 27. Celle-ci fait apparaître un nombre très limité de carreaux sur lesquels se trouvent des enjeux patrimoniaux. Ces derniers sont principalement localisés à Hell-Bourg. Un lieu de culte classé monument historique compte pour une valeur deux (exemple de l'église de Grand Ilet).

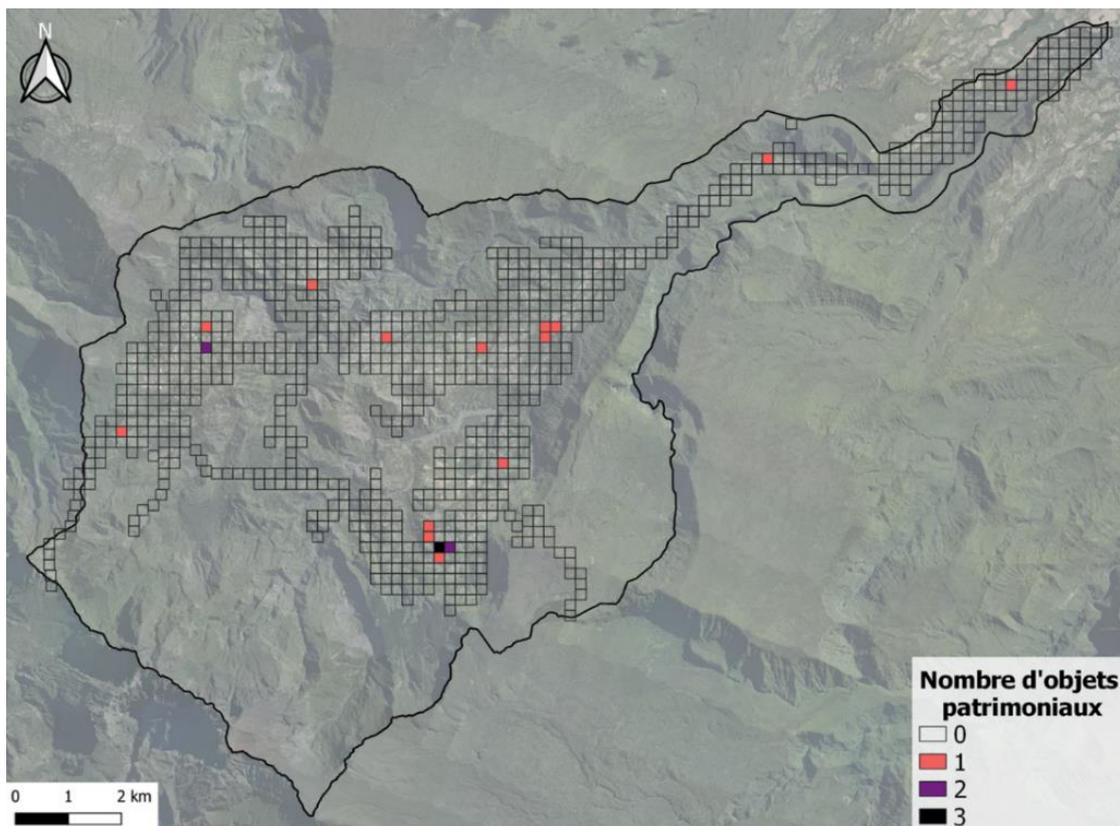


Figure 27 : Cartographie des objets patrimoniaux (monuments religieux ou historiques, cimetières).

4.8 CARTOGRAPHIE MULTICRITÈRES DES ENJEUX

4.8.1 Normalisation et agrégation des variables

Nous disposons désormais d'un ensemble de cartes décrivant chacune une ou plusieurs variables. Néanmoins, comme ces cartes ne sont pas exprimées dans des unités comparables (voir Tableau 3), elles ne peuvent pas être directement agrégées. Les valeurs obtenues pour chaque variable d'enjeu ont donc été normalisées, c'est à dire exprimées en pourcentage de la valeur maximale. Ainsi transformées, les valeurs normalisées obtenues sont toutes adimensionnelles, présentent des valeurs comprises entre 0 et 1 et peuvent donc être sommées pour produire des cartes intégrant plusieurs variables.

Enjeu	Variable utilisée pour caractériser chaque carreau	Plage de valeurs [min-max] par carreau
Vie humaine	<ul style="list-style-type: none"> Nombre de personnes équivalent temps plein 	Continue [0 ; 265]
Population vulnérable	<ul style="list-style-type: none"> % de ménages pauvres (au sens de l'INSEE) 	Continue [0 ; 100%]
	<ul style="list-style-type: none"> Enfants de moins de 10 ans en % de la population habitant dans le carreau 	Continue [0 ; 100%]
	<ul style="list-style-type: none"> Personnes âgées de plus de 65 ans en % de la population habitant dans le carreau 	Continue [0 ; 100%]
	<ul style="list-style-type: none"> Nombre d'habitats insalubres recensés 	Continue [0 ; 18]
Biens matériels	<ul style="list-style-type: none"> Indice de valeur du parc immobilier = nombre de bâtiments pondéré par un indice de prix 	Continue [0 ; 120]

Activité économique	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre d'emplois associés aux entreprises dont le siège social se trouve dans le carreau 	Continue [0 ; 276]
Réseaux vitaux	<ul style="list-style-type: none"> • Route : nombre d'habitants vivant en amont du tronçon de route situé sur le carreau (et pouvant être isolés si le tronçon est endommagé) • Electricité : présence d'une ligne haute tension en aérien ou souterrain • Eau potable : présence d'une canalisation principale (distribution ou adduction depuis captage) 	Continue [0 ; 8077] Binaire (0 / 1) Binaire (0 / 1)
Infrastructures critiques	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre totale d'infrastructures critiques située sur le carreau 	Discrète [0 ; 4]
Patrimoine	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre d'objets à valeur patrimoniale 	Discrète [0 ; 3]

Tableau 3 : Liste des variables utilisées pour décrire et cartographier les enjeux.

Ce regroupement de variables est d'abord mené à l'intérieur de certaines familles d'enjeux caractérisées par plusieurs variables, comme « Population vulnérable » (Figure 28) et « Réseaux vitaux » (Figure 29). Ce regroupement est réalisé en additionnant les valeurs de des variables composant une famille d'enjeu et en normalisant le résultat. Le regroupement peut ensuite être effectué pour les sept familles d'enjeux, par addition des valeurs normalisées obtenues dans chaque carreau, ce qui permet de produire une carte unique décrivant l'importance des enjeux. Cette agrégation peut être réalisée en donnant le même poids à chaque famille d'enjeux (Figure 30) ou en leur affectant une pondération différente (voir section suivante).

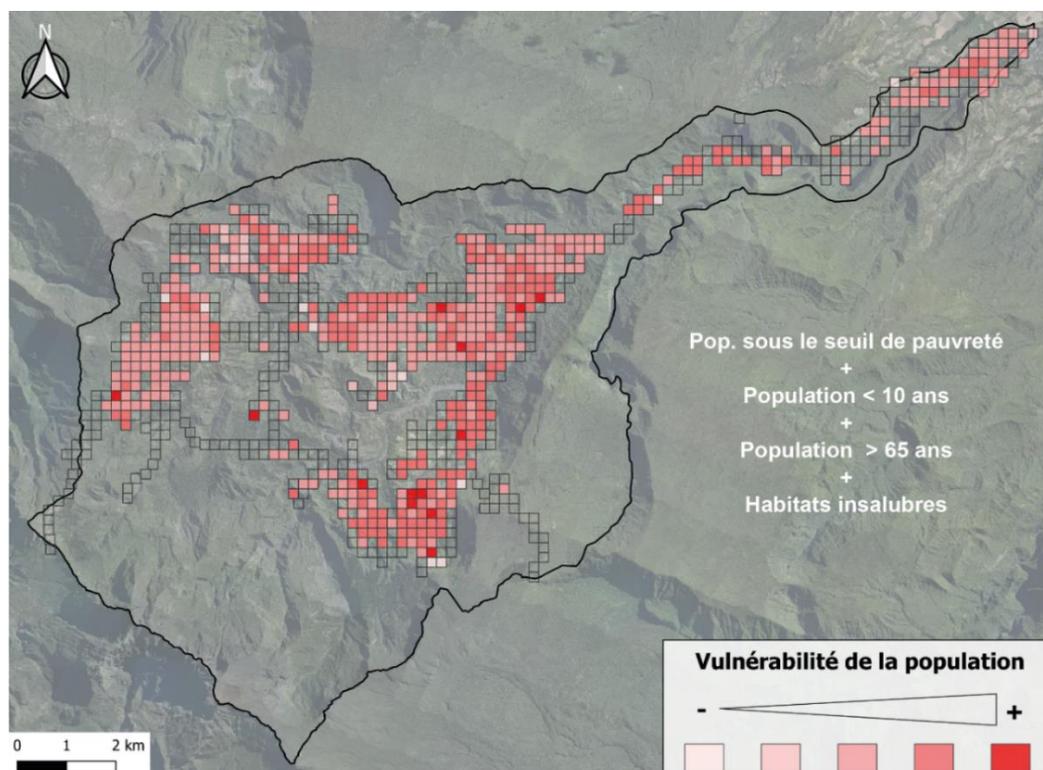


Figure 28 : Cartographie de l'enjeu « Population vulnérable » intégrant les 4 variables utilisées pour caractériser cette population.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

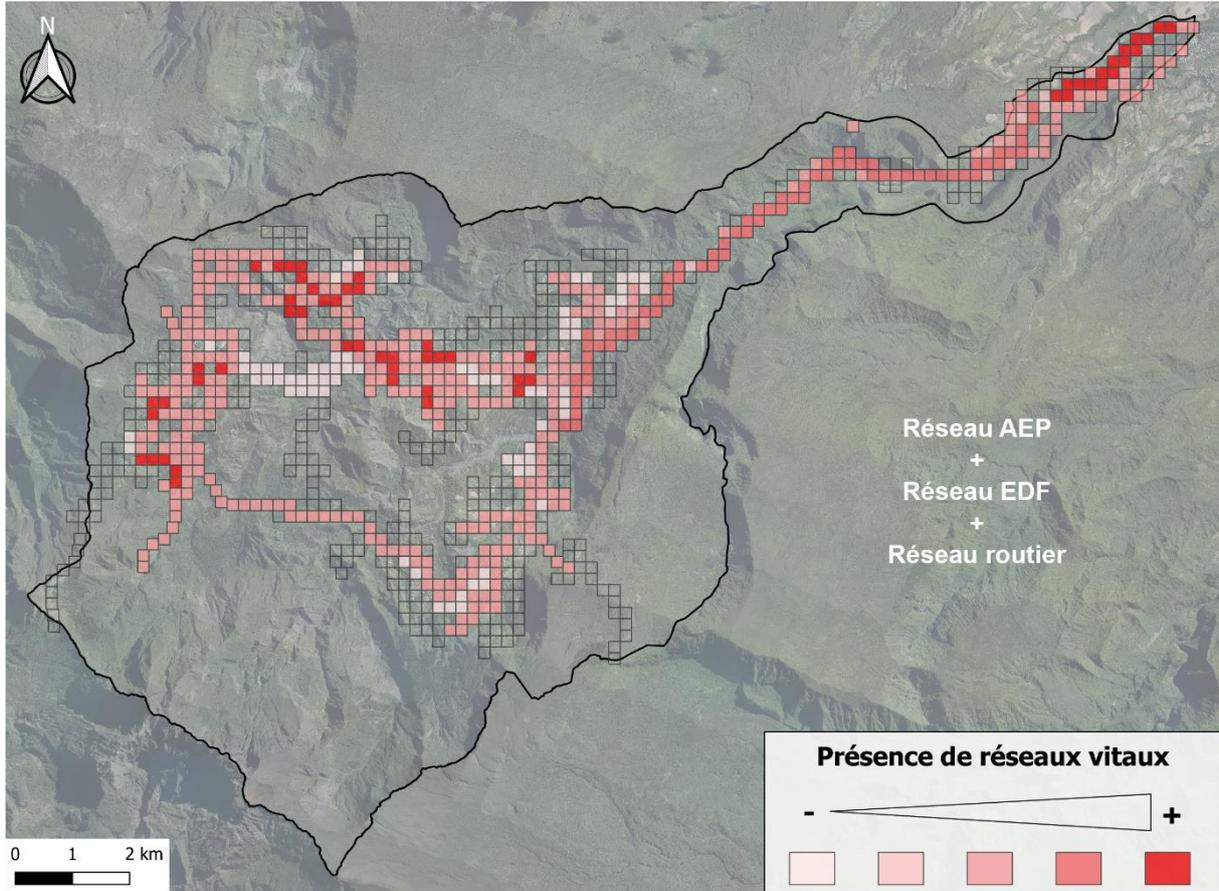


Figure 29 : Cartographie de l'enjeu réseau intégrant les informations relatives aux réseaux routiers, alimentation en eau potable et électricité.

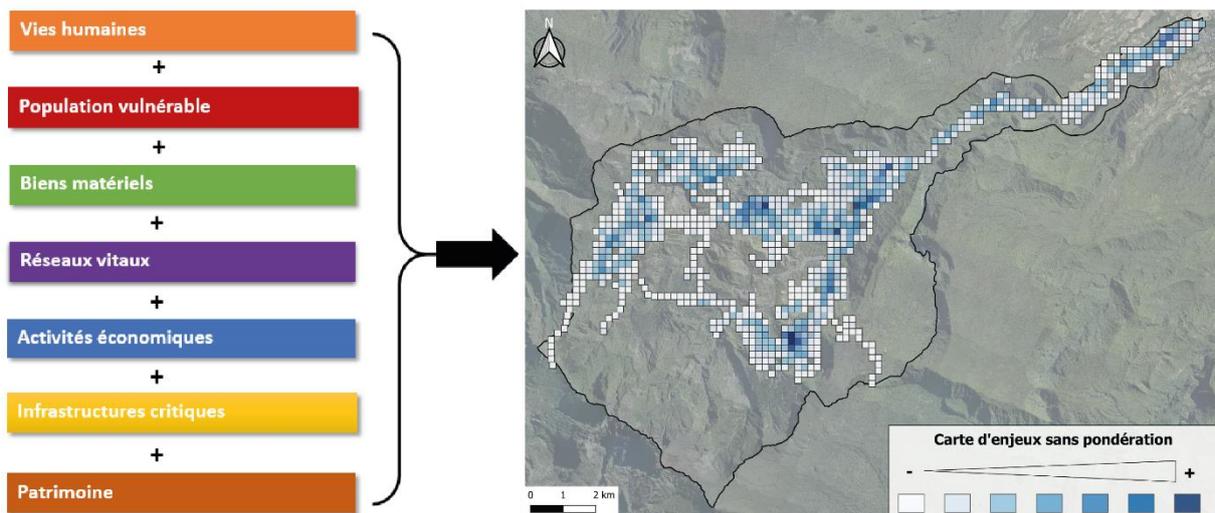


Figure 30 : Cartographie intégrée des sept familles d'enjeux réalisée sans pondération.

4.8.2 Présentation générale de l'approche multicritère

Lors de l'élaboration de la carte d'enjeu qui intègre les sept famille d'enjeux, il est possible de donner plus d'importance à certains enjeux qu'à d'autres. On peut par exemple considérer que l'enjeu « vie humaine » est plus important que l'enjeu « biens matériels » et dans ce cas affecter un poids plus important au premier qu'au second.

Le principe de la pondération est schématiquement illustré dans la Figure 31 ci-dessous :

- Chaque grille représente une carte, comportant 9 carreaux numérotés de A1 à D3. La carte des « vies humaines » (en haut à gauche) décrit l'importance de l'enjeu « vies humaines », avec une note allant par exemple de 0 (pas de vies humaines) à 0,7 (carreau contenant le plus grand nombre de vies humaines). La carte « biens matériels » représente l'importance des biens matériels dans chaque carreau sur une échelle de 0 à 0,9;
- Si les deux cartes sont combinées sans pondération, c'est-à-dire que l'on accorde la même importance aux deux familles d'enjeux, on produit la carte 1 (en haut à droite). Celle-ci met en évidence que le carreau qui présente le plus d'enjeux est B2, avec une note de 1 (somme des valeurs des carreaux) ;
- Si l'on affecte un poids de 3 à la variable « vies humaines », et 1 aux biens matériels, la carte finale fait ressortir le carreau C3 comme celui présentant le plus d'enjeux (note 2,2).

C'est ce principe qui sera appliqué par la suite, en affectant un poids à chacune des sept familles d'enjeux pour produire une carte globale d'enjeux. La section suivante explique comment nous avons procédé pour déterminer la pondération des variables.

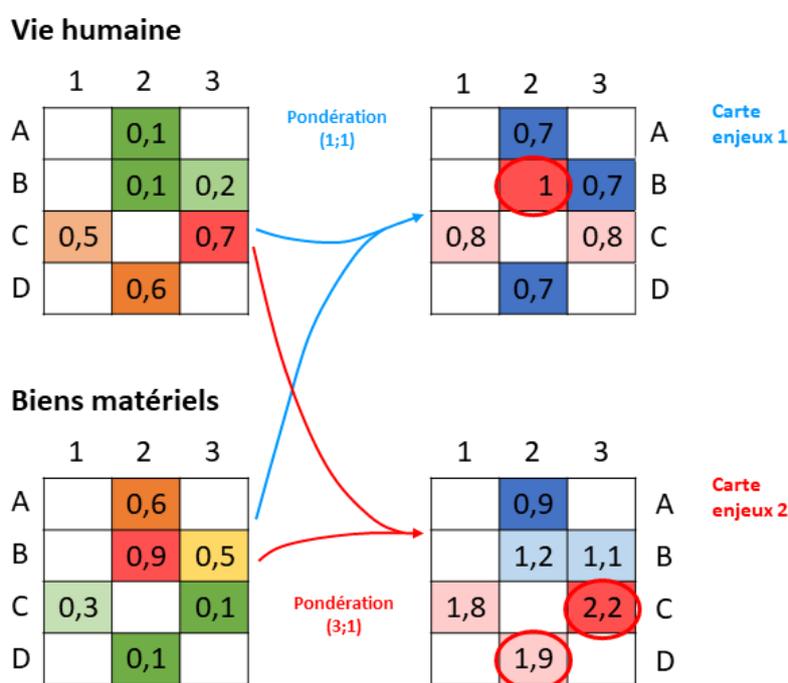


Figure 31 : Illustration du principe de pondération des cartes d'enjeux.

4.8.3 Détermination de la pondération des critères

L'étape suivante a donc consisté à déterminer une pondération qui reflète le plus possible les préférences des acteurs consultés pour les différents types d'enjeux. Or, ces préférences sont variables d'un individu à l'autre, en fonction de leur histoire, de leur connaissance du territoire, de leur expérience personnelle des risques, de leurs missions professionnelles, de leurs valeurs et positionnement éthique, etc.

Notre approche a donc consisté à interroger un échantillon de personnes susceptibles d'avoir des visions différentes des enjeux à protéger en priorité. Nous avons demandé à chacun de comparer les familles d'enjeux par paire.

Pour faciliter le raisonnement, nous avons adopté une méthode inspirée des travaux de Saati (1980), reprise par Carladous (2017). Elle consiste à comparer les critères deux par deux en demandant aux personnes interrogées d'établir leur niveau de préférence entre les critères **a** et **b** (notée $P_{a>b}$). Pour cela, on leur propose de s'appuyer sur une échelle quantitative de 1 à 9, avec les propositions linguistiques présentées dans le Tableau 4.

	$P_{a>b}$	$P_{b>a}$
<i>a</i> est aussi important que <i>b</i>	1	1
<i>a</i> est modérément plus important que <i>b</i>	3	1/3
<i>a</i> est fortement plus important que <i>b</i>	5	1/5
<i>a</i> est très fortement plus important que <i>b</i>	7	1/7
<i>a</i> est extrêmement plus important que <i>b</i>	9	1/9

Tableau 4 : Evaluation du niveau de préférence entre deux critères *a* et *b*. La préférence est notée $P_{a>b}$ si *a* est préféré à *b*, $P_{b>a}$ sinon (d'après Saati, 1980).

Lors de l'entretien, on demande ainsi à chaque personne d'exprimer son opinion personnelle concernant l'importance relative d'un facteur par rapport à un autre, en utilisant la représentation de la Figure 32. Cette démarche est répétée pour toutes les combinaisons de facteurs, ce qui permet de remplir la matrice représentée sur la Figure 33.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

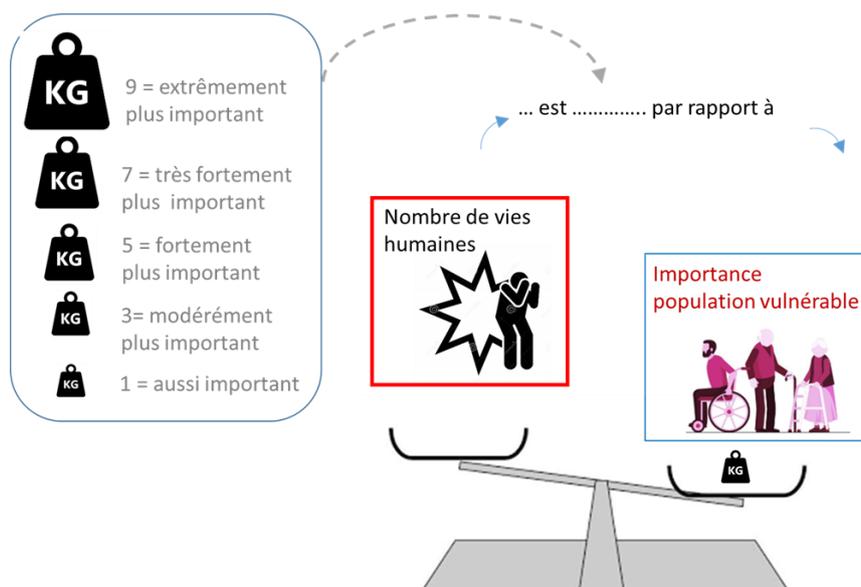


Figure 32 : Illustration utilisée dans le questionnaire pour comparer les variables deux par deux.

Réponses d'un participant								Poids calculés	
Arbitrage entre familles de critères	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7		
F1 Vies humaines	1	1	7	7	7	7	9	wf1=	0,361
F2 Population vulnérable	1	1	7	7	7	7	9	wf2=	0,361
F3 Biens matériels	0,14	0,14	1	1	1	3	3	wf3=	0,072
F4 Activités économiques	0,14	0,14	1,00	1	1	3	3	wf4=	0,072
F5 Infrastructures critiques	0,14	0,14	1,00	1	1	1	3	wf5=	0,059
F6 Réseaux	0,14	0,14	0,33	0,3	1	1	3	wf6=	0,049
F7 Patrimoine	0,11	0,11	0,33	0,3	0,3	0,3	1	wf7=	0,027
sum col.	2,68254	2,7	18	18	18	22	31	Somme = 1	

Figure 33 : Matrice issue de la comparaison de l'importance des familles d'enjeu deux par deux (exemple des préférences individuelles d'une personne interrogée) et poids calculés à partir de la matrice (wf1 à 7).

A partir de cette matrice, une formule permet de calculer le poids relatif que chaque personne affecte aux différentes familles d'enjeu. Ces poids sont calculés de manière à ce que leur somme soit égale à 1. Autrement dit, le poids calculé pour chaque famille d'enjeu est exprimé en pourcentage du poids total. A titre d'exemple, la personne dont les réponses figurent dans la matrice affecte :

- 36,1% du poids total à l'enjeu vie humaine,
- 36,1% à l'enjeu population vulnérable,
- 7,2% à l'enjeu biens matériels,
- 7,2% à l'enjeu activités économiques,
- 5,9% à l'enjeu infrastructures critiques,
- 4,9% à l'enjeu réseaux,
- 2,7% à l'enjeu patrimoine.

Le calcul de ces poids permet de comparer les préférences des différents acteurs (voir section suivante).

5 Cartographie des enjeux à l'échelle du cirque de Salazie

5.1 L'ÉVALUATION PARTICIPATIVE DE LA PONDÉRATION

5.1.1 Une grande hétérogénéité des perceptions

Les entretiens réalisés en janvier 2022 ont permis d'interviewer 17 acteurs du territoire, dont 10 techniciens/experts (Services techniques de la commune, DEAL, Agorah, Préfecture, BRGM) et 7 élus de la commune de Salazie. Les personnes interviewées constituent un panel représentatif d'acteurs du territoire impliqués dans la gestion du risque à La Réunion et plus localement à l'échelle de Salazie.

Les échanges avec les personnes interrogées ont permis d'une part de recueillir divers témoignages renseignant sur leur perception générale du risque sur le territoire réunionnais et plus spécifiquement à Salazie. D'autre part, chaque personne interrogée s'est vue remplir la matrice de comparaison deux à deux des familles d'enjeux.

Les pondérations obtenues à l'issue de la consultation sont très hétérogènes. Cette hétérogénéité est forte au sein de l'échantillon d'élus comme dans celui des techniciens. La Figure 34 illustre la diversité des postures à travers **l'exemple de deux élus** :

- L' élu F (en orange) accorde une grande importance aux enjeux « vies humaines » et « population vulnérables », ces deux facteurs représentant 70 % de la pondération. La dimension matérielle et économique des enjeux est pour lui secondaire. Il explique sa position par le fait qu'il a failli perdre la vie dans un véhicule écrasé par un bloc sur la route de Salazie : « *quand vous avez reçu un gros galet sur la voiture et que vous vous en êtes miraculeusement tiré, vous réalisez que la vie humaine, c'est plus important que le matériel et tout le reste* » ;
- L' élu E (en bleu) accorde au contraire une grande importance à la dimension économique des enjeux. Il affecte près de 70 % de sa pondération à la protection des biens matériels, de l'activité économique, des réseaux et des infrastructures critiques, et seulement 30 % aux enjeux vies humaines et population vulnérable. Pour lui, il est essentiel de protéger ce qui permet aux habitants de vivre sur le territoire, ainsi que les réseaux et infrastructures qui font fonctionner l'économie, notamment en temps de crise cyclonique. « *À Salazie, on est tellement exposé au risque qu'on ne peut plus construire nulle part, ni développer de l'activité économique. C'est la paralysie. Il faut arbitrer entre ne plus pouvoir vivre ici ou vivre en acceptant le risque* ».

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

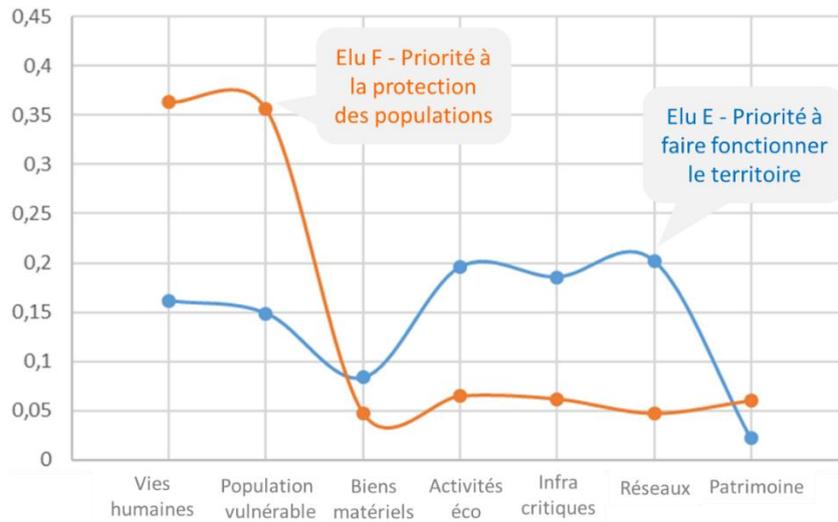


Figure 34 : Pondération issue de l'entretien avec deux élus de Salazie illustrant deux représentations différentes des enjeux importants.

Ces deux exemples confirment que la pondération établie par chaque individu reflète sa connaissance des risques, son vécu, sa mission professionnelle et plus généralement une philosophie de la vie.

Cette **diversité des perceptions** s'exprime chez les élus comme chez les techniciens, comme le montrent la Figure 35 et la Figure 36. Sur ces figures, la pondération de chaque personne interrogée est représentée par une série de points de couleur différente. Le trait noir et le chiffre indiquent la moyenne du groupe pour chaque enjeu considéré.

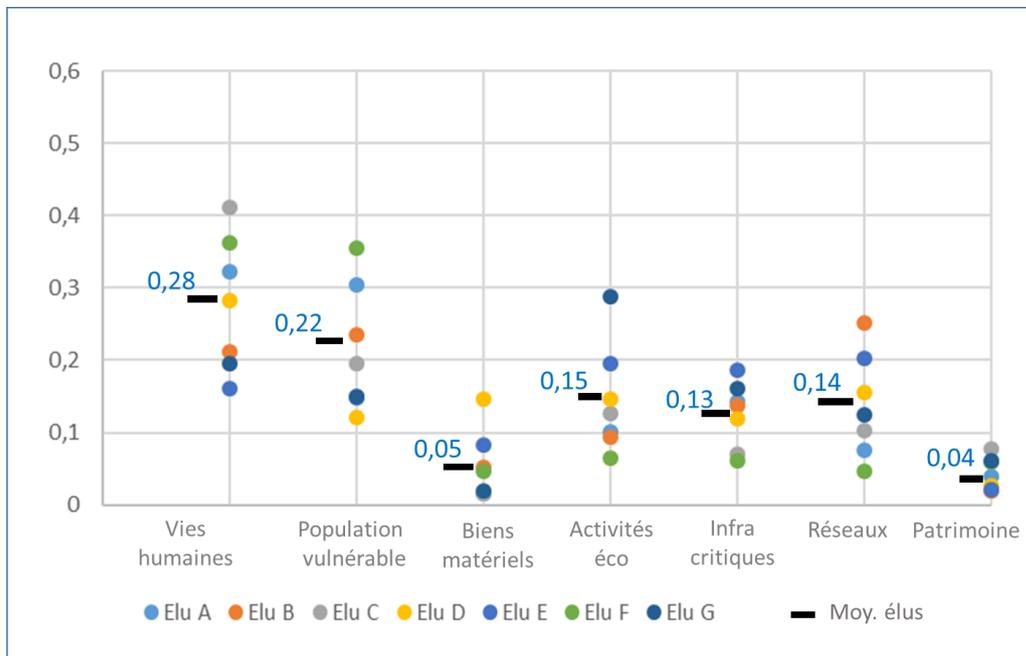


Figure 35 : Pondération issue des entretiens avec 7 élus de la commune de Salazie.

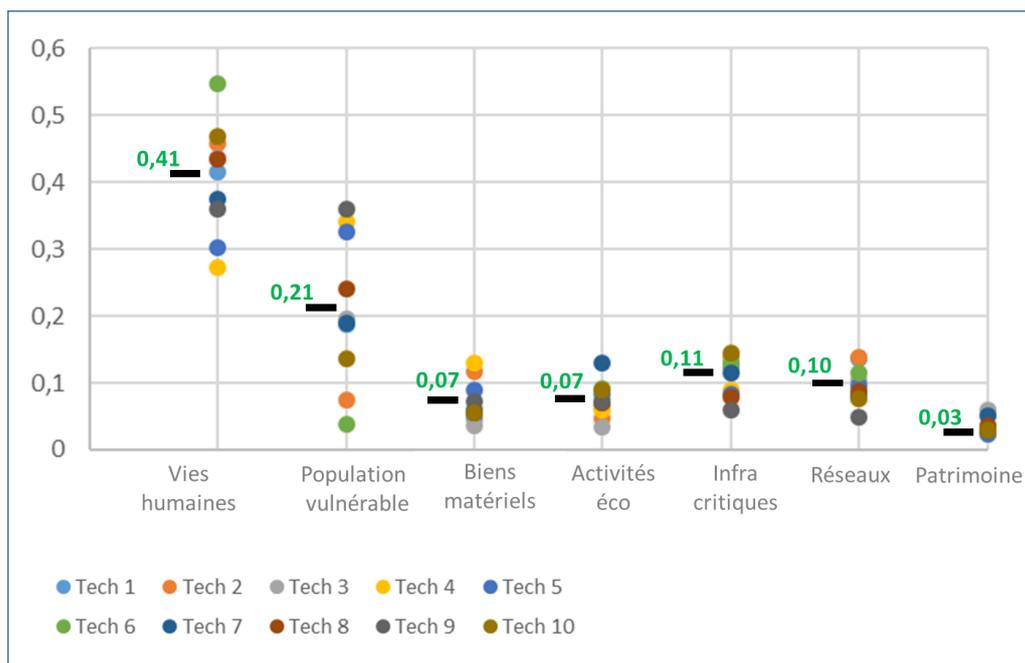


Figure 36 : Pondération issue des entretiens avec 10 techniciens.

La principale **différence entre les techniciens et les élus** est relative au poids de la vie humaine : alors que les élus affectent en moyenne 28 % de la pondération à ce facteur, les techniciens lui accordent 41 %. Ces derniers sont en effet très influencés par leurs missions professionnelles, qui consistent pour la plupart à assurer la sécurité des populations. Au contraire, les élus sont plus préoccupés par la satisfaction des besoins essentiels de leurs administrés, notamment le logement, l'emploi, le développement économique et la protection sociale des plus démunis. On constate en revanche une certaine convergence des visions concernant les autres dimensions de l'analyse, les valeurs moyennes du groupe d'élus et du groupe de techniciens étant assez peu différentes.

Sur la base de ces informations¹⁰, nous avons utilisé la **pondération moyenne** de l'ensemble des personnes interrogées pour la suite du travail. Cette pondération moyenne est présentée dans la Figure 37.

¹⁰ Afin d'avoir une meilleure représentativité des résultats d'un point de vue statistique, l'interview d'un plus large échantillon serait utile (population de Salazie par exemple), de l'ordre d'environ 300 personnes. Ceci dépasse le cadre de la présente étude mais constitue une piste d'amélioration pour de futures études du même ordre.

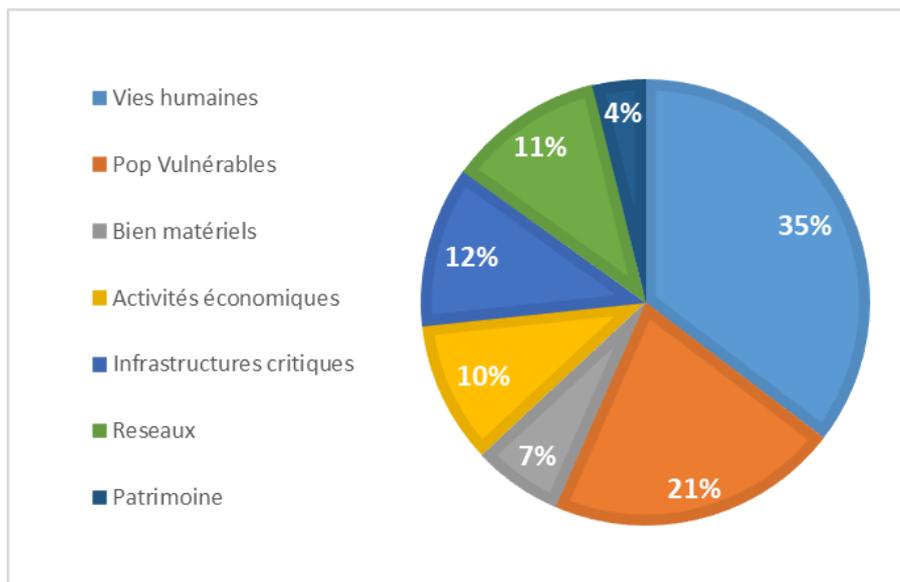


Figure 37 : Pondération moyenne pour l'ensemble des personnes consultées (N = 17).

5.2 CARTOGRAPHIE FINALE DES ENJEUX

Comme indiqué précédemment, la cartographie finale des enjeux dépend des pondérations appliquées à chaque critère. Une note d'enjeu est obtenue à partir de ces calculs pour chaque carreau et permet de représenter la répartition et la concentration des enjeux sous forme cartographique. Cette note est comprise entre 0 et 0.69.

La carte ci-dessous (Figure 38) représente la répartition des enjeux de la zone d'étude en utilisant la pondération moyenne de l'ensemble des personnes consultées (Figure 37).

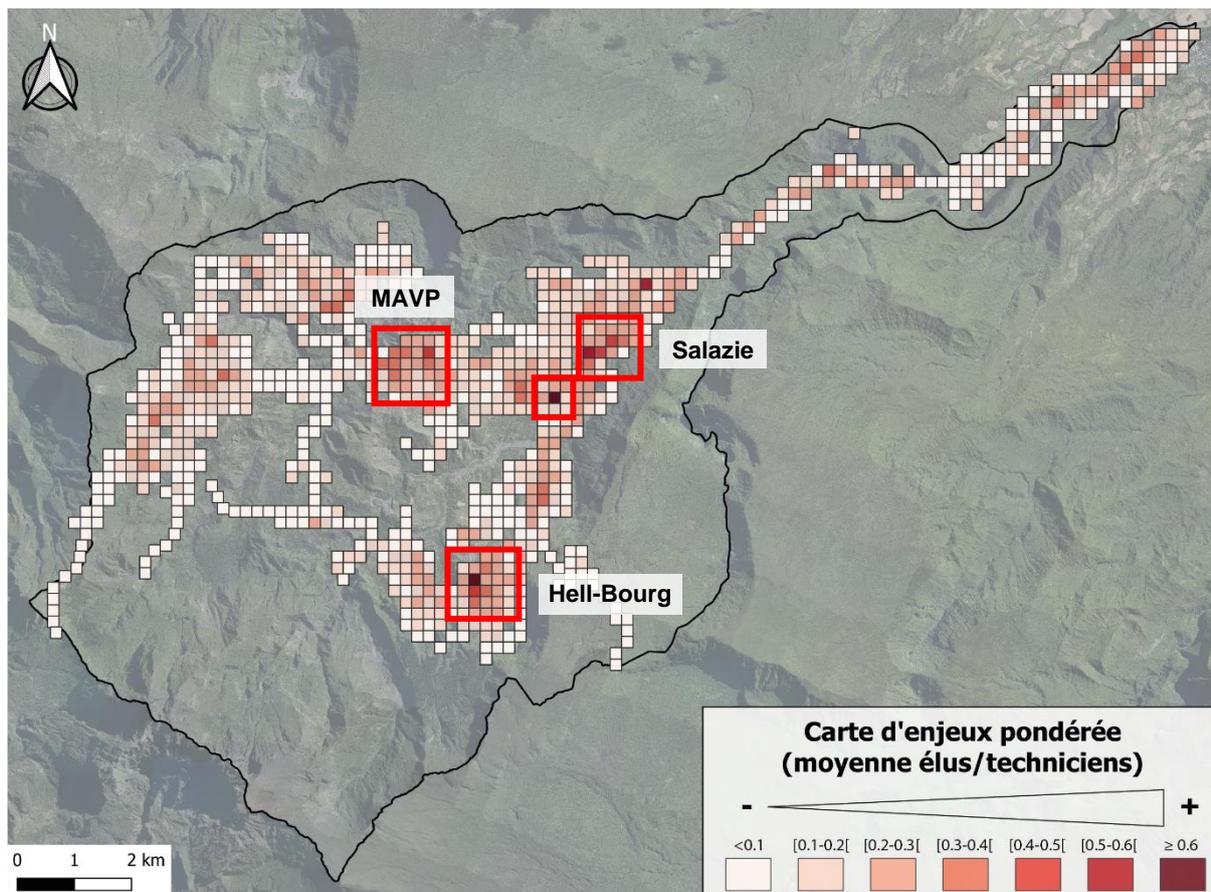


Figure 38 : Carte des enjeux pondérée d'après la moyenne des résultats de l'ensemble des personnes consultées (élus et techniciens).

D'après cette carte, on distingue plusieurs secteurs au sein du cirque qui concentrent les enjeux. On peut par exemple citer les secteurs d'Hell-Bourg, de Salazie/Camp Lilas, de Mare à Vieille Place (MAVP) et de Mare à Citrons.

Ce dernier secteur peu étendu (limité à 1 carreau) est essentiellement caractérisé par la présence du collège Auguste Lacaussade qui concentre un important effectif (population équivalent temps plein élevée et emplois) et joue également le rôle de centre de vie en cas de crise (Infrastructure critique).

Sur Hell-Bourg, le secteur est caractérisé par une population importante, relativement vulnérable (proportion de personnes âgées, d'habitats insalubres et de personnes vivant sous le seuil de pauvreté, mais également par une activité économique importante (tourisme) et une concentration de monuments historiques (Figure 39).

Sur le secteur de Salazie village et Camp Lilas (Cf. Figure 40) , la population est également élevée et associée à un degré de vulnérabilité important (proportion de personnes âgées, de jeunes enfants, et de ménages vivant sous le seuil de pauvreté). Ce secteur concentre également une forte activité économique (nombreux commerces et services par exemple) ainsi qu'un nombre élevé d'infrastructures critiques. Au sein du village passe également le seul réseau routier desservant le reste du cirque.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

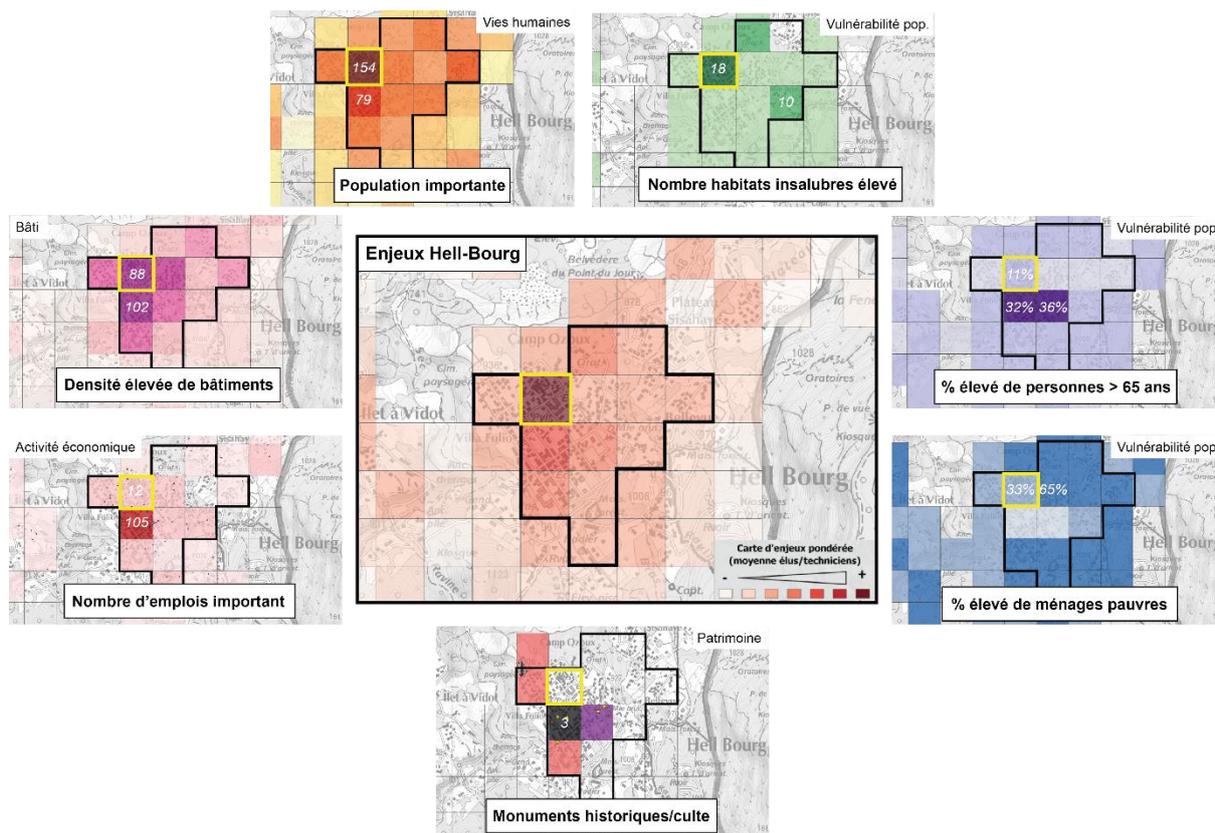


Figure 39 : Principaux enjeux concentrés sur le secteur d'Hell-Bourg (les nombres en blanc italique correspondent aux valeurs mesurées dans le carreau pour le critère considéré).

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

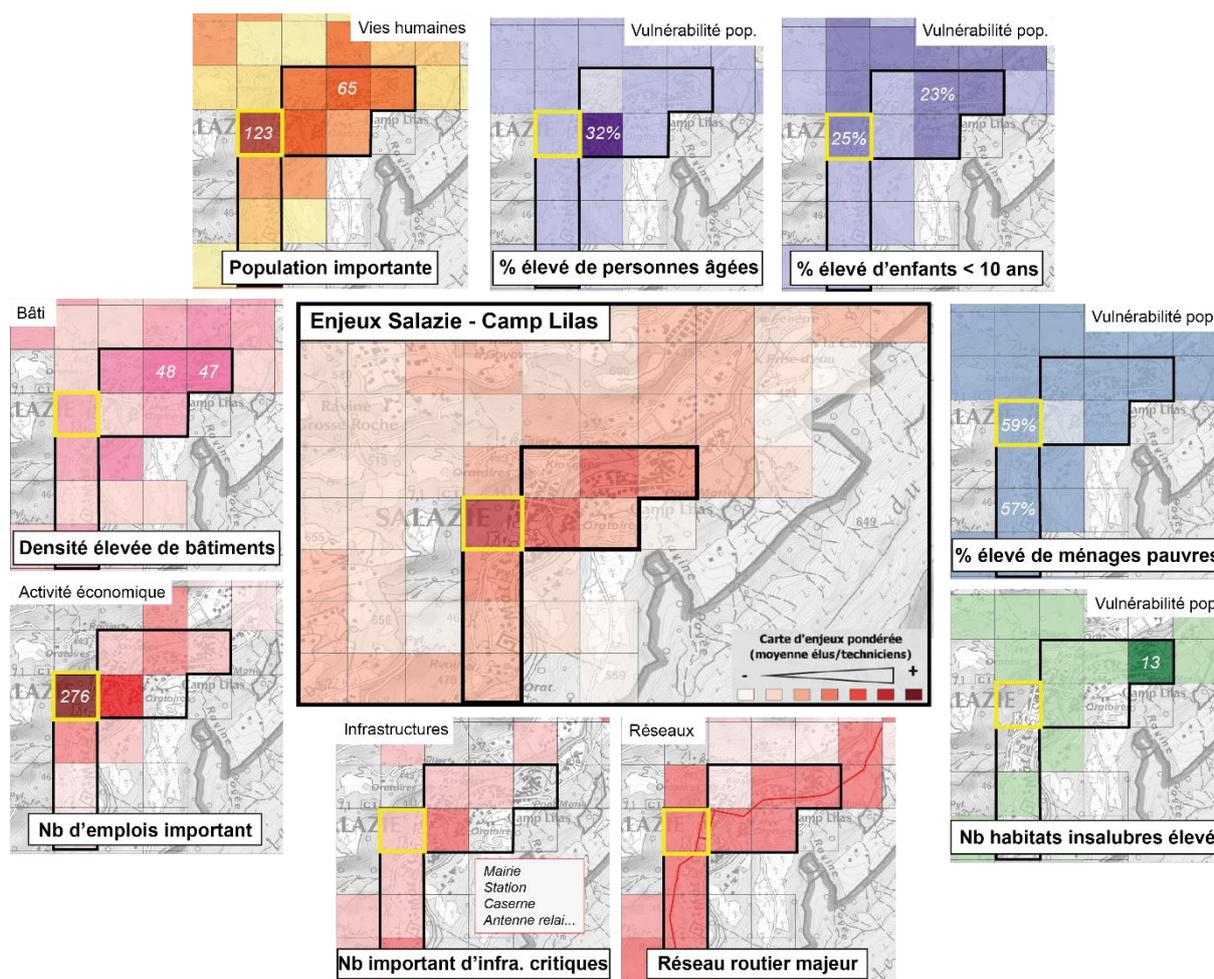


Figure 40 : Principaux enjeux concentrés sur le secteur de Salazie-Camp Lilas (les nombres en blanc italique correspondent aux valeurs mesurées dans le carreau pour le critère considéré).

6 Cartographie du risque et identification de secteurs prioritaires

6.1 CARTOGRAPHIE DU RISQUE TENANT COMPTE DE L'ENSEMBLE DES ENJEUX

La cartographie du risque est obtenue par croisement de l'aléa et des enjeux. Pour cela, le carroyage de la carte d'enjeux a été recoupé avec la carte d'aléa Mouvement de Terrain. Seuls les aléas Très Elevé, Elevé et Moyen ont été retenus pour la définition du niveau de risque, permettant ainsi de mettre en avant les secteurs les plus exposés aux aléas Mouvement de Terrain. Ainsi, des secteurs concentrant des enjeux mais situés en zone d'aléa Faible ne ressortent pas dans la cartographie du risque. C'est le cas par exemple de la zone du centre-ville d'Hell-Bourg.

Il n'a pas été fait de distinction entre les niveaux d'aléa Très Elevé, Elevé et Moyen, c'est-à-dire qu'il n'a pas été attribué une « note » d'aléa entre ces différents niveaux. En effet, les aléas très élevé et élevé caractérisent tous les deux des phénomènes d'intensité importante avec de potentiels impacts forts sur les enjeux. L'aléa moyen est principalement présent sous la forme d'un bandeau d'incertitude en recul de l'aléa élevé et est donc intégré à la définition de la zone à risque. Les zones de glissement lent en aléa moyen sont des secteurs subissant fréquemment des désordres, notamment sur le bâti, ce qui justifie également leur intégration dans la définition des zones à risque.

Sur les secteurs concernés par un aléa Moyen à Très Elevé, une **note de risque de 1 à 5** a été définie à partir de la note d'enjeux, afin de hiérarchiser les zones les plus/les moins à risques selon la matrice ci-dessous (Tableau 5). Les carreaux concernés à la fois par un aléa Très Elevé/Elevé/Moyen et un aléa faible sont « découpés » selon les limites de ces aléas.

NOTE DE RISQUE		ALEA
		Très Elevé/Elevé/Moyen
NOTE D'ENJEU	< 0.1	1
	[0.1 – 0.2[2
	[0.2 – 0.3[3
	[0.3 – 0.4[4
	≥ 0.4	5

Tableau 5 – Matrice de qualification de la note de risque en fonction de l'aléa et de la note d'enjeu.

La carte ci-dessous correspond à la carte de risque obtenue pour l'aléa mouvement de terrain (Figure 41). Le secteur qui ressort principalement est le secteur de Salazie village/Camp Lilas, avec une note comprise entre 3 et 5 selon le carreau (Figure 42). Il s'agit en effet d'une zone située en aléa élevé mouvement de terrain (à la fois pour des phénomènes de chute de blocs et de glissement de terrain) et qui concentre une forte densité d'enjeux (Cf. paragraphe précédent).

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

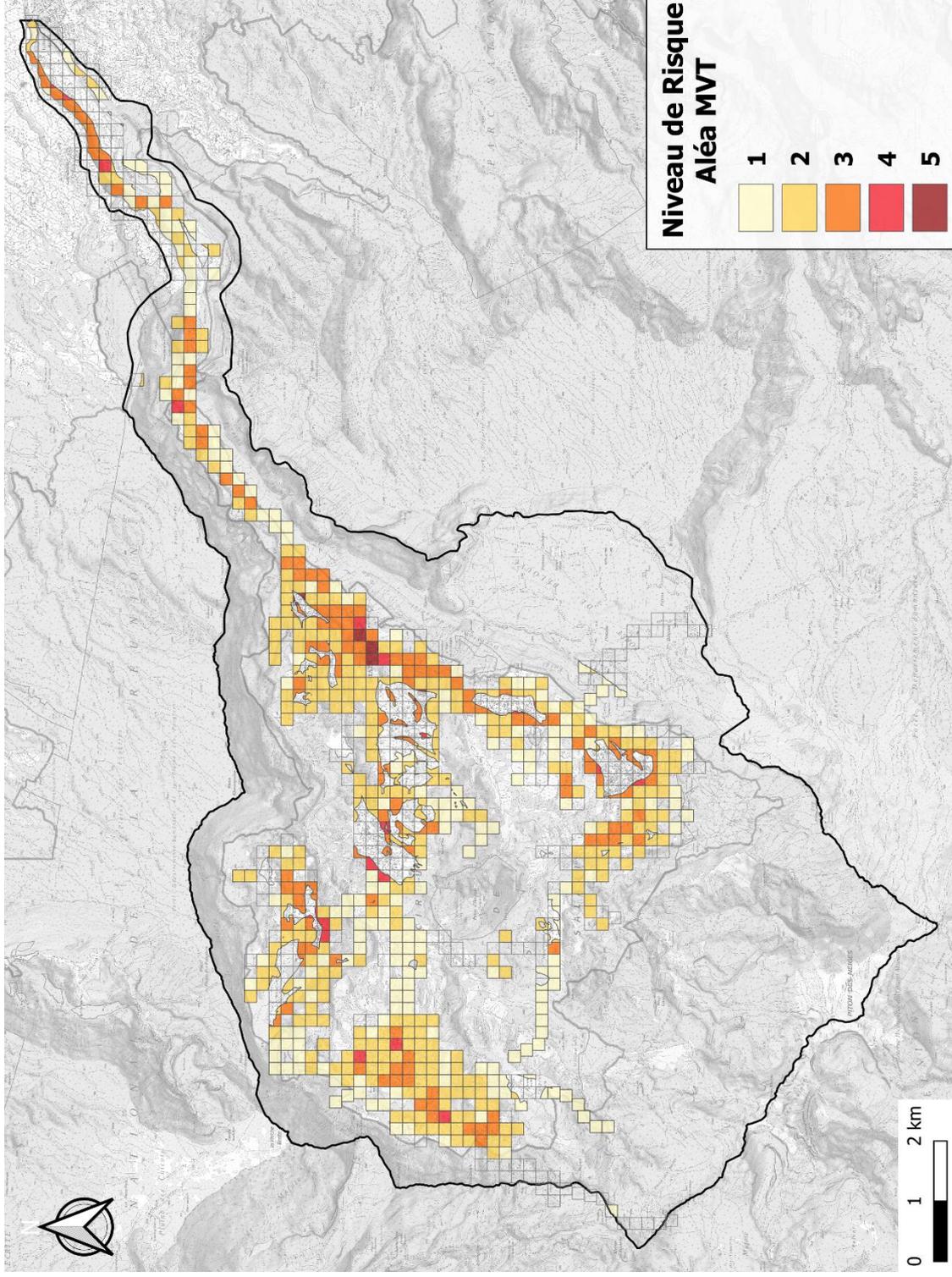


Figure 41 : Carte de risque en lien avec l'aléa mouvement de terrain et les enjeux recensés sur la zone d'étude. Le carroyage non concerné par une note de risque (aléa faible ou enjeu nul) est représenté sans couleur.

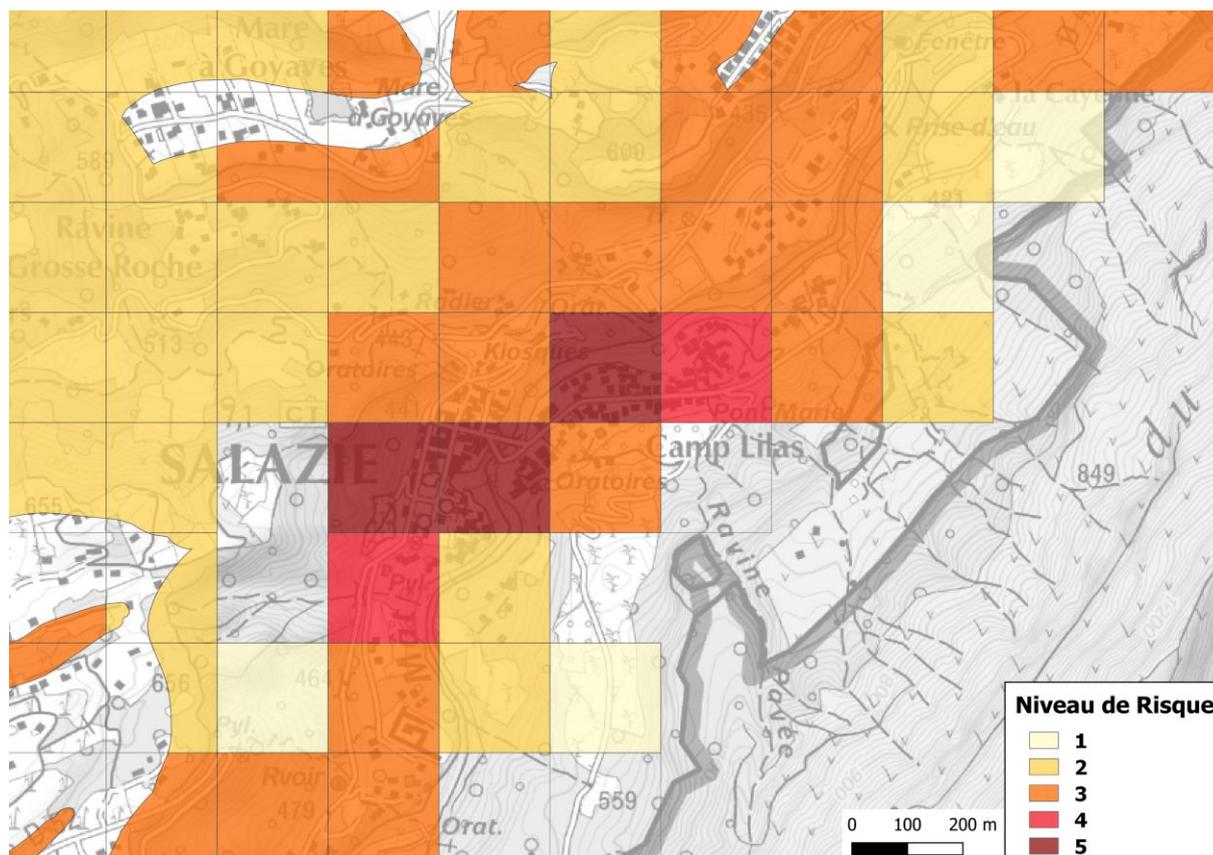


Figure 42 : Carte de risque zoomée sur le secteur de Salazie-Camp Lilas.

D'autres secteurs (i.e., zones regroupant plusieurs carreaux) sont identifiés, concernés par des niveaux de risque sensiblement inférieurs (niveaux 3 à 4). Il s'agit :

- Des secteurs de Grand Ilet/Le Bélier et d'Ilet à Vidot, principalement concernés par un glissement lent de grande ampleur ;
- De la zone de L'ilet/Bras Citronnier à l'entrée du cirque de Salazie (commune de Saint-André), concerné par des phénomènes de chutes de blocs ;
- Le secteur du Pont de L'Escalier, concerné par les chutes de blocs et stratégique par la présence d'un pont enjambant la rivière du Mât, unique itinéraire pour rejoindre l'intérieur du cirque ;
- Le secteur de Petit Sable/la Savane, concerné par des mouvements gravitaires sur l'encaissement en rive gauche de la Rivière du Mât, et stratégique car il constitue le seul itinéraire pour desservir à la fois la zone de Mare à Poule d'Eau/Hell-Bourg/Ilet à Vidot et la zone de Mare à Citrons/Mare à Vieille Place/ Grand Ilet.

Les mesures de sécurisation à envisager contre les phénomènes de glissement de terrain étant différentes des mesures de sécurisation contre les éboulements rocheux, il est possible de distinguer le risque associé à l'un ou l'autre des phénomènes.

Les cartes ci-dessous représentent les cartes de risques associées uniquement à l'aléa chute de blocs/éboulement, à l'aléa glissement de terrain « spontané » et à l'aléa glissement lent (Figure 43, Figure 44, Figure 45).

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

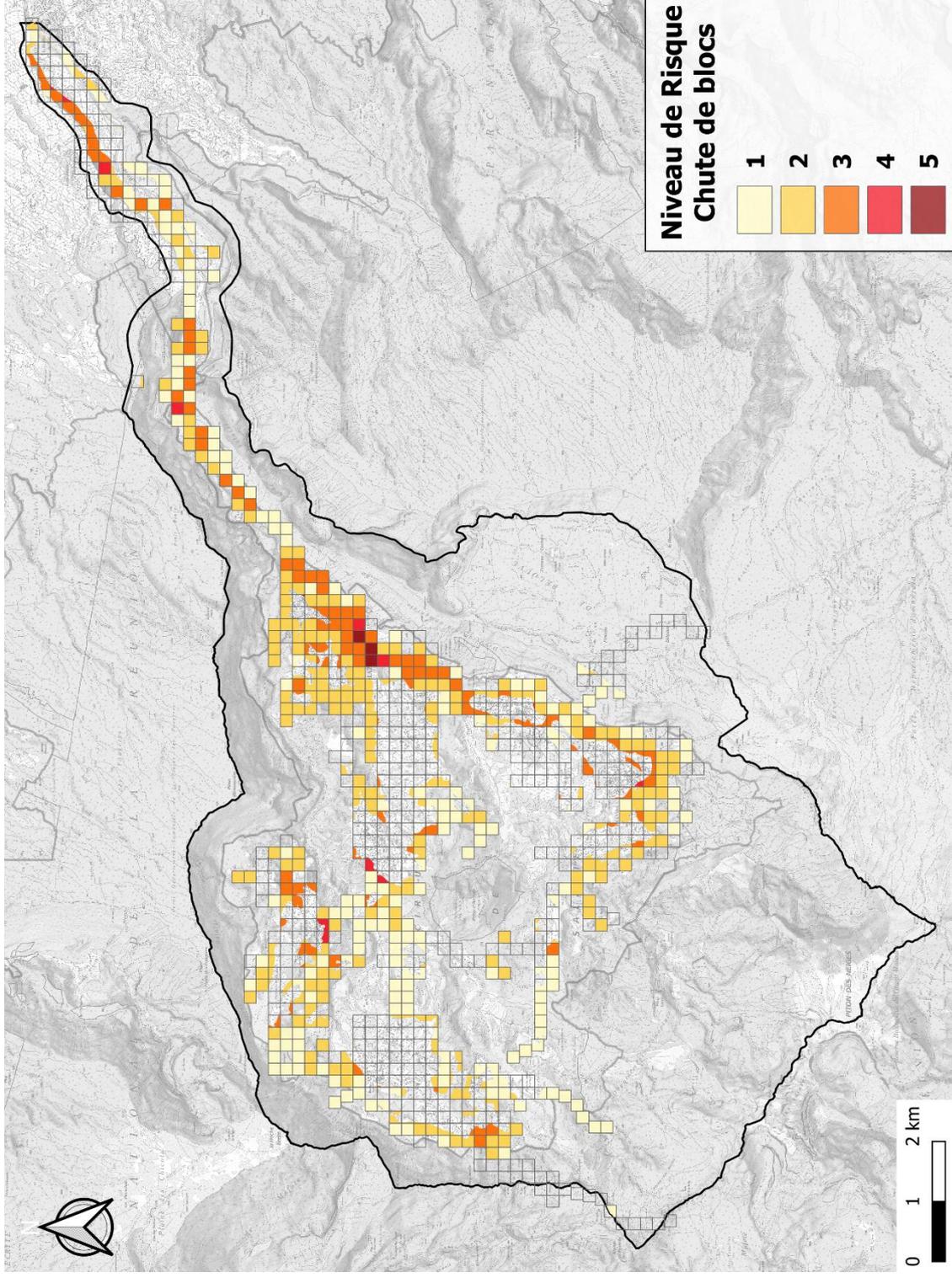


Figure 43 : Carte de risque associé à l'aléa chute de blocs / éboulement.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

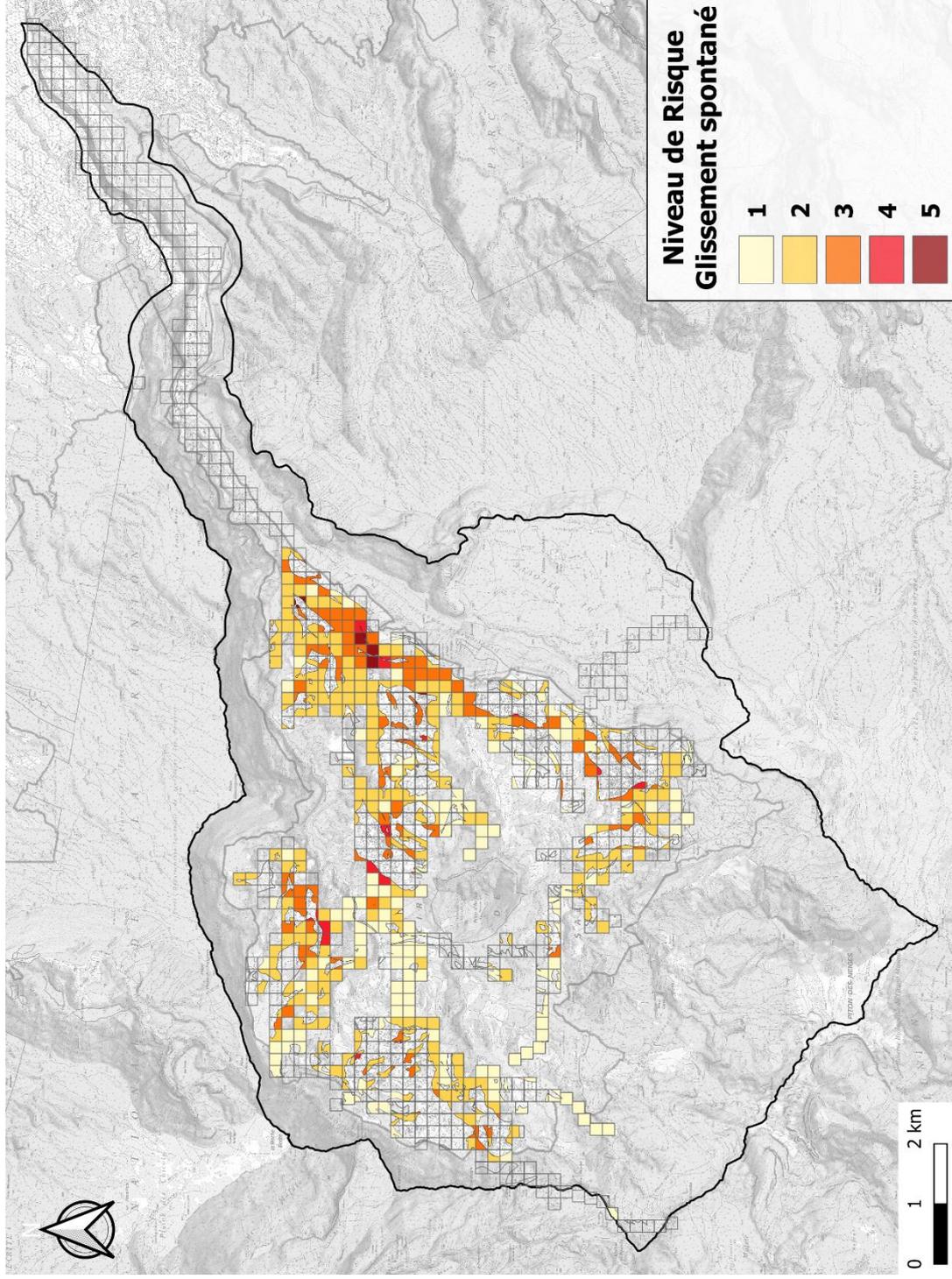


Figure 44 : Carte de risque associé à l'aléa glissement de terrain spontané (rapide).

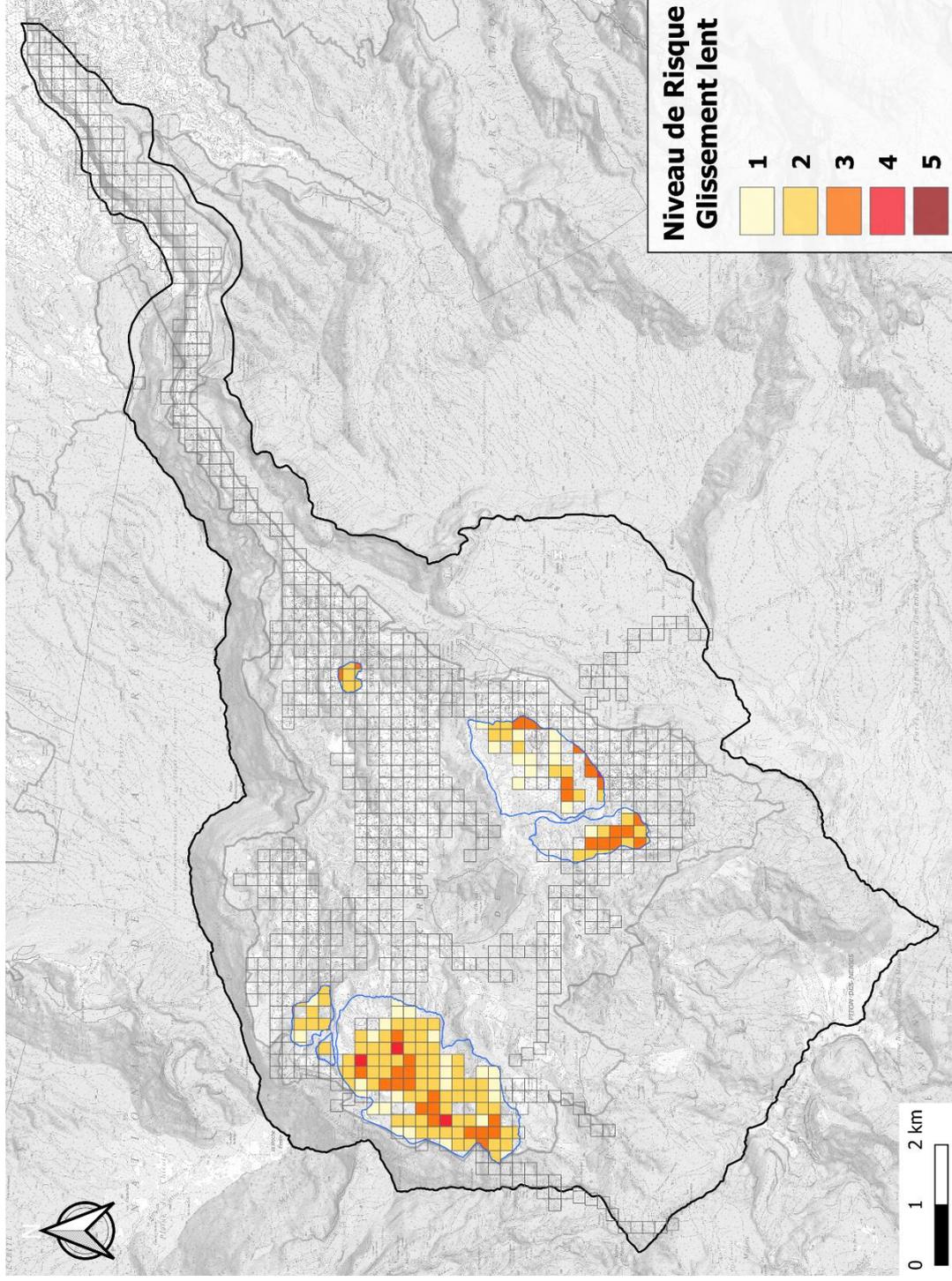


Figure 45 : Carte de risque associé à l'aléa glissement lent de grande ampleur. L'emprise des glissements est représenté en lignes bleues.

Les secteurs concernés par l'aléa chute de blocs sont essentiellement situés dans l'encaissement de la Rivière du Mât et au pied des remparts bordant le cirque. La zone de Camp Lilas et Salazie Village reste le principal secteur concerné par ces phénomènes.

Les secteurs situés au cœur du cirque sont majoritairement concernés par un aléa glissement de terrain ou par des phénomènes « hybrides » mêlant les mécanismes de glissement et de chute de blocs (la nature des formations – brèches hétérogènes – favorise ces mécanismes hybrides). Ces phénomènes affectent les bordures d'îlets avec un recul de la limite de crête (Mare à Vieille Place, Hell-Bourg, Grand Ilet...) ou les secteurs encaissés, situés en pied de reliefs (Salazie village, La Savane, Pente Carozin...). Là encore, le niveau de risque est le plus élevé dans le secteur de Salazie village, compte tenu de la concentration des enjeux.

Enfin, les glissements lents de grande ampleur affectent des îlets entiers, tel qu'à Grand Ilet, Mare à Govaves ou Ilet à Vidot. Sur le secteur d'Hell-Bourg/Fond de Rond-Point, les secteurs les plus exposés se situent plutôt en partie haute du glissement, au niveau du belvédère Point du Jour (bordure des secteurs Camp Ozoux/Plateau Sisahaye, concernée par de forts tassements) et des secteurs habités de Fond de Rond-Point. La bordure Est-aval du glissement, concernée par des fortes vitesses de déplacement et la présence du village de Mare à Poule d'Eau constitue également un secteur à risque.

L'analyse détaillée de ces cartes de risque couplée à une évaluation « experte » des territoires concernés, basée sur les retours d'expériences et les connaissances de terrain permettra d'orienter les choix en matière de sécurisation de manière objective et hiérarchisée.

6.2 CARTOGRAPHIE DU RISQUE ASSOCIE A L'ENJEU « VIES HUMAINES » SEUL

Nous avons vu précédemment que l'enjeu « Vies humaines » est le facteur dominant dans la pondération des enjeux puisqu'il représente 35% du poids total (les 65% restants étant répartis au sein des six autres familles d'enjeux). Compte tenu de la priorité donnée à l'enjeu « Vies Humaines » par la grande majorité des acteurs consultés, une autre approche pourrait consister à ne prendre en compte que ce paramètre pour l'analyse du niveau de risque. Nous avons donc produit des cartes de risques ne tenant compte que de l'importance de la population équivalent temps plein dans chaque carreau (cf. §4.1.). Le nombre de personnes équivalent temps plein vivant dans chaque carreau est normalisé pour qu'il soit réparti entre 0 (absence de population sur le carreau) et 1 (carreau le plus « peuplé »). De la même manière qu'au paragraphe 6.1., sur les secteurs concernés par un aléa Moyen à Très Elevé, une note de risque de 1 à 5 est attribuée à cette donnée de population normalisée, selon la même matrice que proposée dans le Tableau 5.

Les cartes ci-dessous présentent les résultats obtenus pour l'aléa MVT dans son ensemble et pour chaque catégorie d'aléa (chute de blocs, glissement spontané et glissement lent) (Figures 46 à 49).

Globalement, les résultats montrent des notes de risques plus faibles à l'échelle du territoire et des secteurs exposés plus concentrés (1-2 carreaux) qu'avec prise en compte de l'ensemble des enjeux. Le secteur de Salazie village – Camp Lilas demeure cependant le plus exposé, pour des aléas chute de blocs et glissement spontané (cercle rouge Figure 46). Parmi les autres secteurs avec un nombre important de vies humaines exposées aux aléas MVT, on peut citer (cercles noirs Figure 46) :

- Le quartier de Bois de Pomme, notamment le quartier résidentiel en bordure sud et sud-ouest et la zone de l'école, surplombant la rive gauche de la rivière du Mât (chute de blocs et glissement spontané) ;
- L'extrémité Est du collège de Mare à Citrons ainsi qu'une petite partie des quartiers résidentiels de cet îlet de part et d'autre de la RD52 à l'ouest du collège (glissement spontané) ;
- Le quartier de Bellevue à Hell-Bourg (chute de bloc et glissement spontané) ;
- Ilet à Vidot dans sa partie sud, le secteur de l'école de Casabois et du Bélier, affectés par des phénomènes de glissements lents de grande ampleur.
- Ponctuellement, quelques habitations en bordure amont de la RD48 dans le quartier de l'Ilet à l'entrée du Cirque (chute de blocs).

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

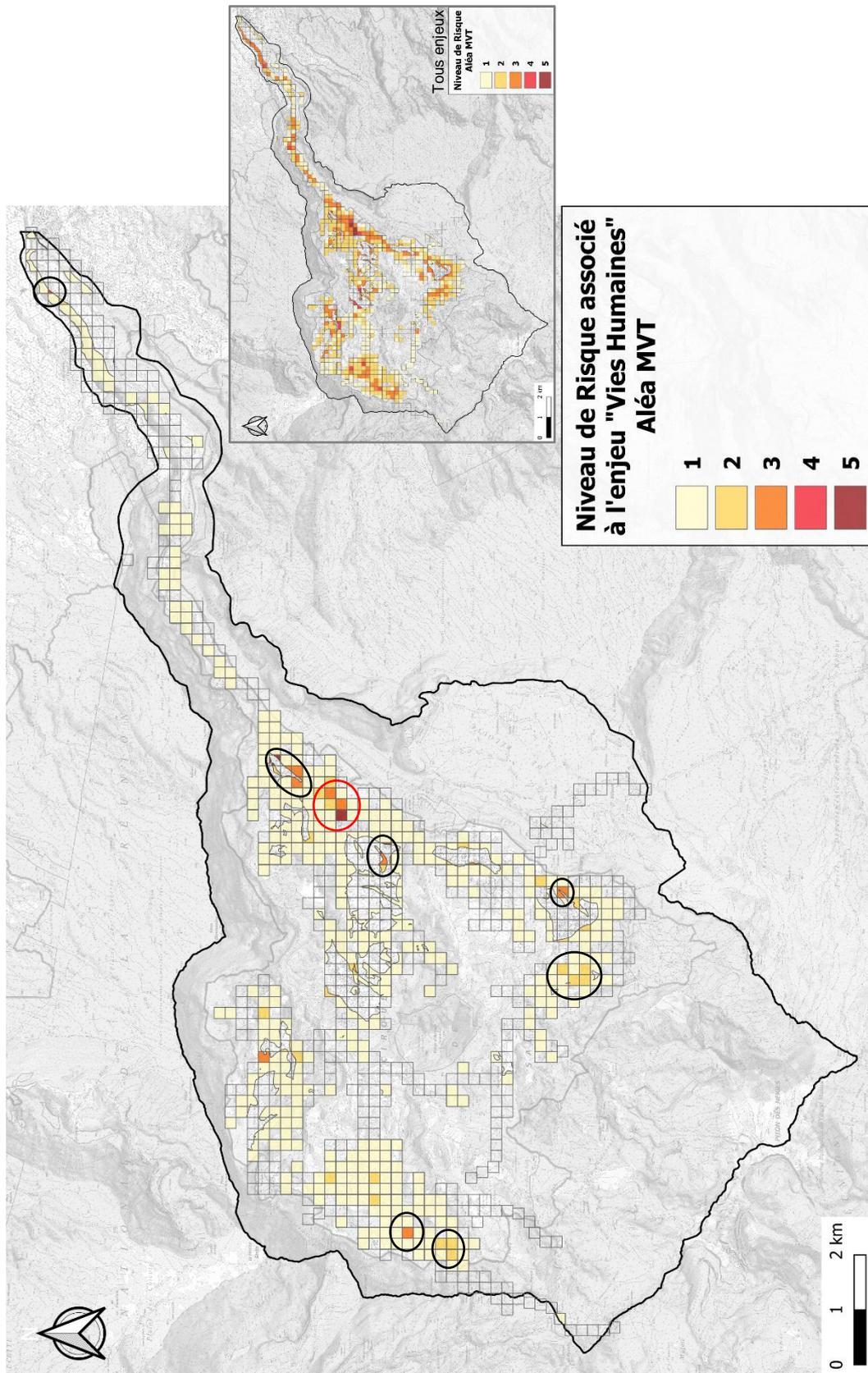


Figure 46 - Carte de risque associé à l'aléa MVT et à l'enjeu « Vies Humaines » seul. Le carroyage non concerné par une note de risque (aléa faible ou enjeu nul) est représenté sans couleur. Un rappel de la carte de risque pour l'ensemble des enjeux est proposé en encart.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

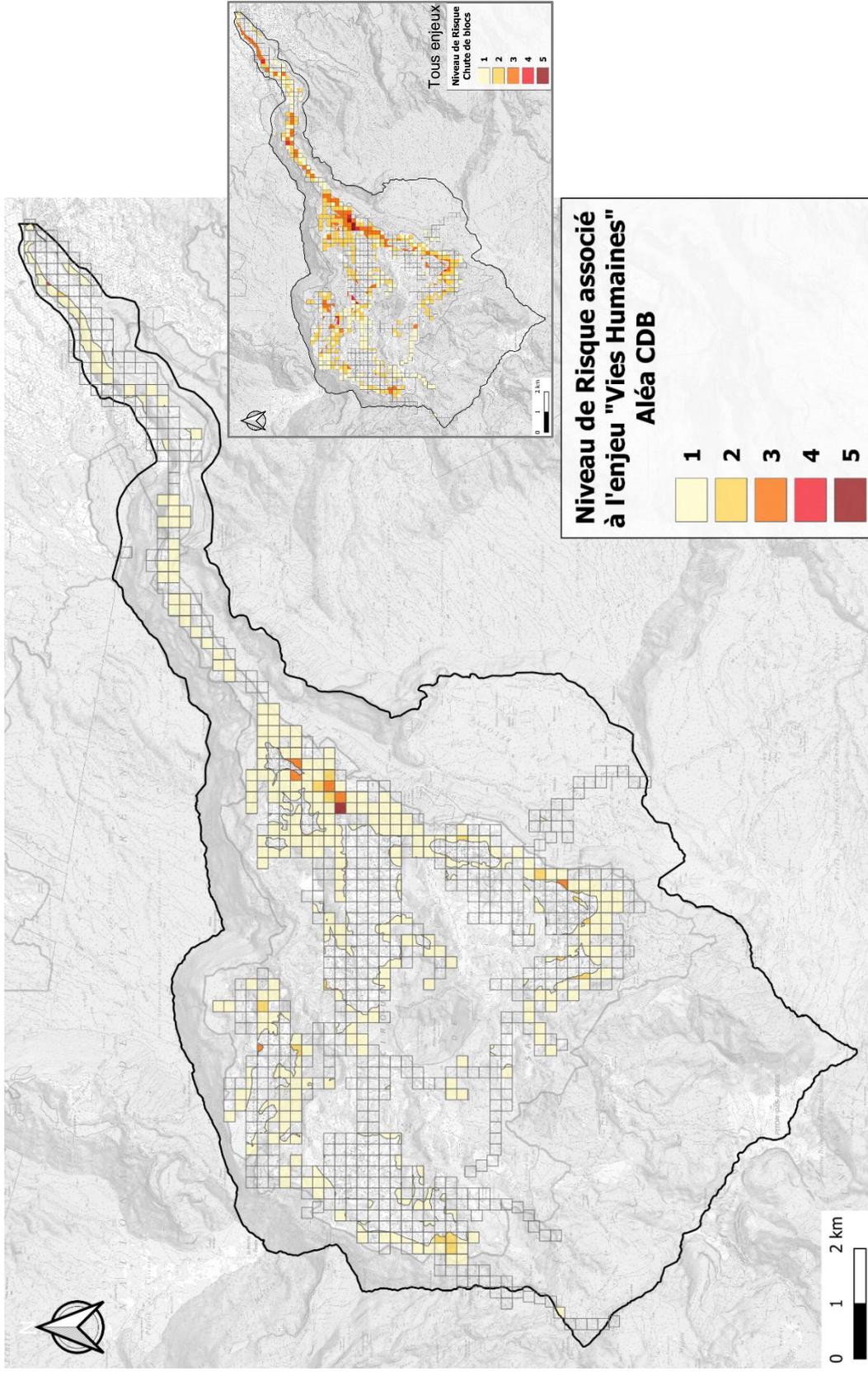


Figure 47 - Carte de risque associé à l'aléa chute de blocs / éboulement et à l'enjeu « Vies Humaines » seul. Un rappel de la carte de risque pour l'ensemble des enjeux est proposé en encart.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

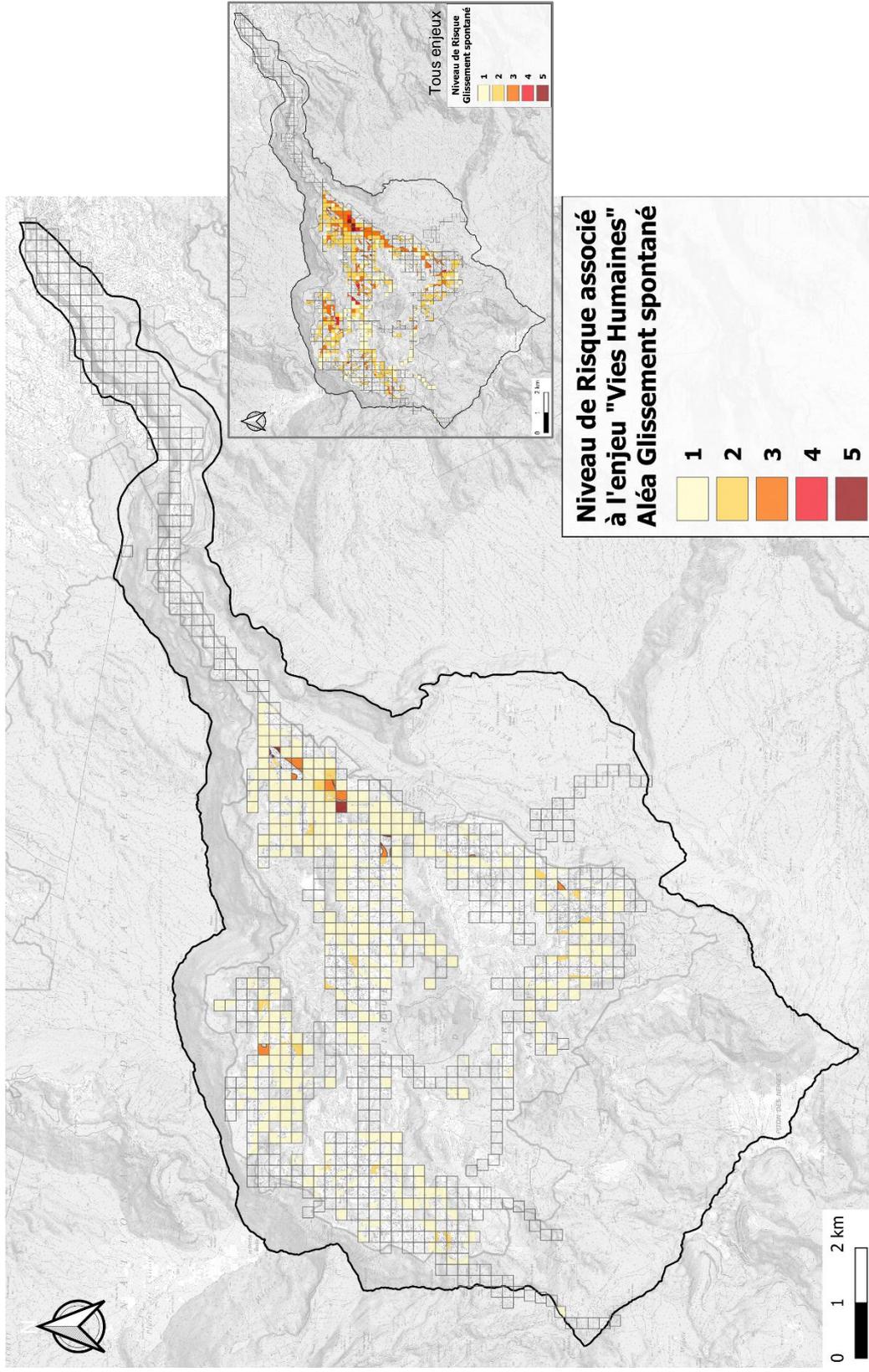


Figure 48 - Carte de risque associé à l'aléa glissement de terrain spontané (rapide) et à l'enjeu « Vies Humaines » seul. Un rappel de la carte de risque pour l'ensemble des enjeux est proposé en encart.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

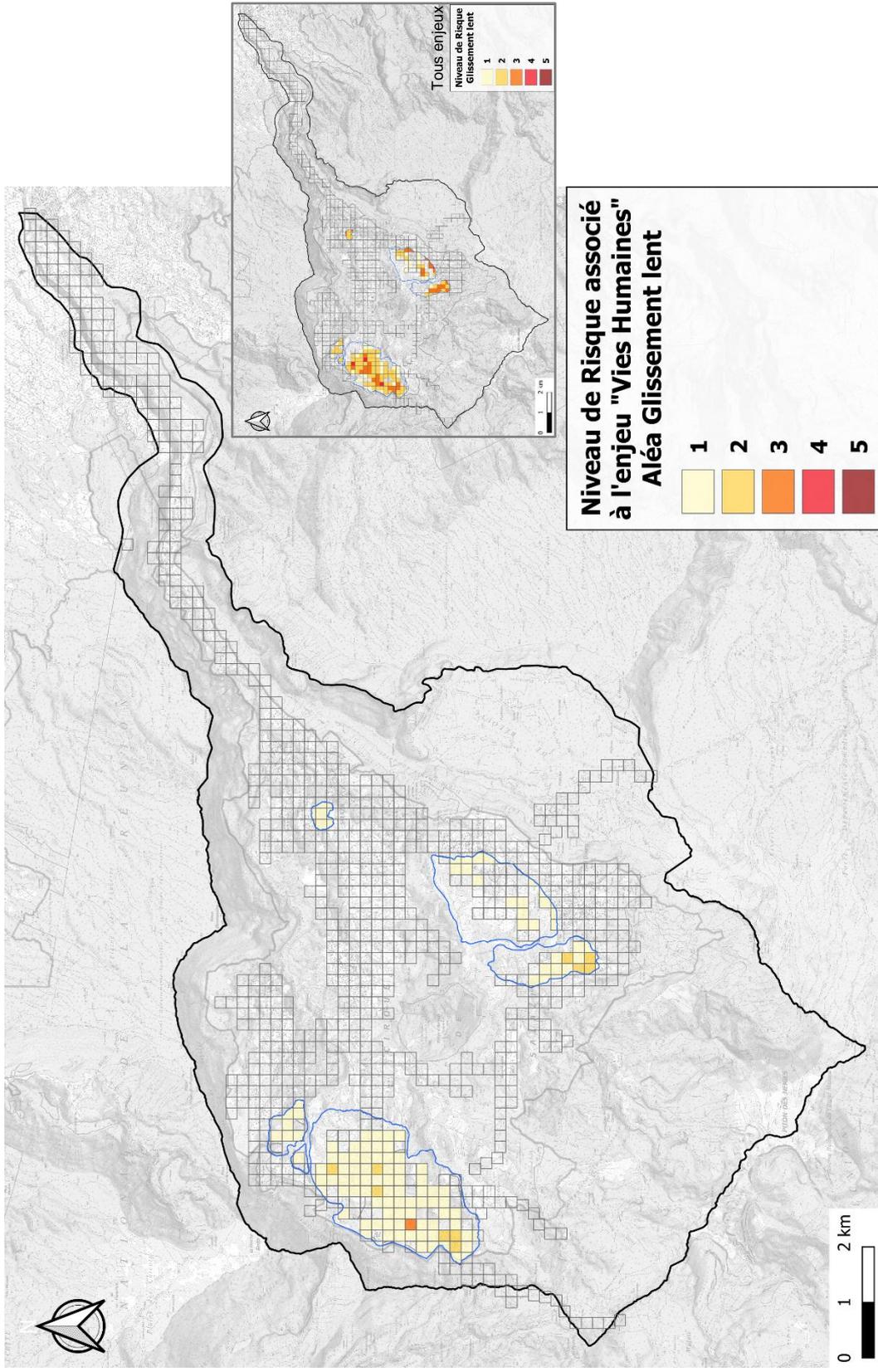


Figure 49 - Carte de risque associé à l'aléa glissement lent de grande ampleur et à l'enjeu « Vies Humaines » seul. L'emprise des glissements est représentée en lignes bleues. Un rappel de la carte de risque pour l'ensemble des enjeux est proposé en encart.

6.3 IDENTIFICATION DE SECTEURS MOINS EXPOSES AU RISQUE

Le territoire de Salazie étant fortement contraint par l'aléa MVT, avec plus de 80% de sa surface classée en aléa élevé au Plan de Prévention des Risques (PPR, approuvé en 2019), la recherche de foncier disponible, moins exposé à l'aléa (aléa faible voire moyen dans certains cas) est indispensable pour (1) anticiper le développement urbain et économique du Cirque et (2) disposer d'espaces constructibles pour la délocalisation potentielle d'habitations actuellement fortement exposées et soumises à des procédures d'expropriation.

Pour cela, nous avons croisé les données issues des cartographies des PPR de Salazie (approuvé) et Saint André (en phase concertation) et de la cartographie d'aléa MVT à échéance 30 ans issue de cette étude afin d'identifier des secteurs actuellement peu ou pas urbanisés situés en aléa faible MVT¹¹ où une urbanisation future pourrait être envisagée (sous réserve de conformité avec les autres documents réglementaires : PLU, zonage environnemental, etc.).

Les cartes ci-dessous (Figure 50 – Secteurs moins exposés au risque sur l'ensemble de la zone d'étude et susceptibles d'accueillir une urbanisation nouvelle, sur les zones A et AU du PLU (en haut) et hors zones déjà bâties (en bas présentent les secteurs moins exposés au risque et potentiellement urbanisables, situées en zone U ou AU du PLU (zonage 2022 pour Salazie et 2019 pour Saint-André). Au sein de ces secteurs, une pré-analyse par SIG des images aériennes les plus récentes (Google Earth/Maps, 2022) a permis d'extraire les zones déjà bâties et ne pouvant a priori pas faire l'objet de nouvelles constructions. Ces cartes sont données à titre indicatif et le zonage proposé devra nécessairement être vérifié et précisé (échanges avec la commune, propriétaires, visites sur site...) afin de confirmer l'occupation du sol et le projet urbain sur ces secteurs. Les cartes détaillées sur les différents quartiers de Salazie et Saint-André concernés sont insérées en Annexe 2.

D'après le zonage proposé, les surfaces disponibles en aléa faible, situées en zone A ou AU du PLU et hors parcelles déjà bâties représentent les ordres de grandeur suivants (Tableau 6):

Secteurs	Mare à Martin	Mare à Vieille Place	Mare à Citrons	Hell-Bourg/Ilet à Vidot	Mare à Poule d'Eau	Mare à Goyaves	Bois de Pomme	L'Ilet (St André)
Surface	2.7 ha	19 ha	22.5 ha	7.5 ha	9.7 ha	1.3 ha	1.7 ha	3.6 ha

Tableau 6 – Surfaces potentiellement urbanisables selon les secteurs de la zone d'étude. Ces surfaces sont des ordres de grandeurs issus d'une analyse SIG qui devront faire l'objet de vérifications et validations auprès des services communaux et lors de visites sur site.

¹¹ A la fois dans la cartographie PPR et dans la cartographie de l'aléa à échelle 30 ans.

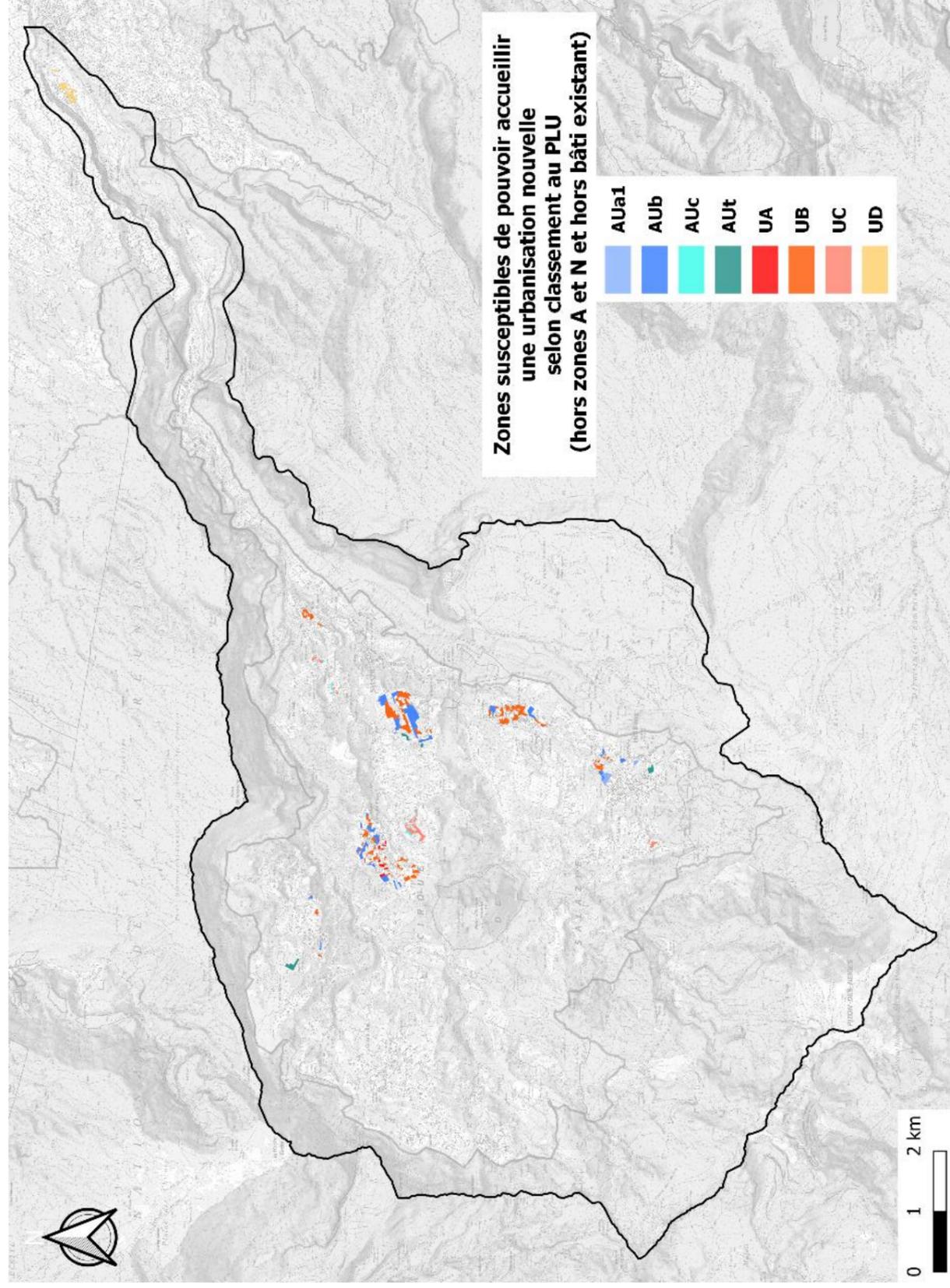
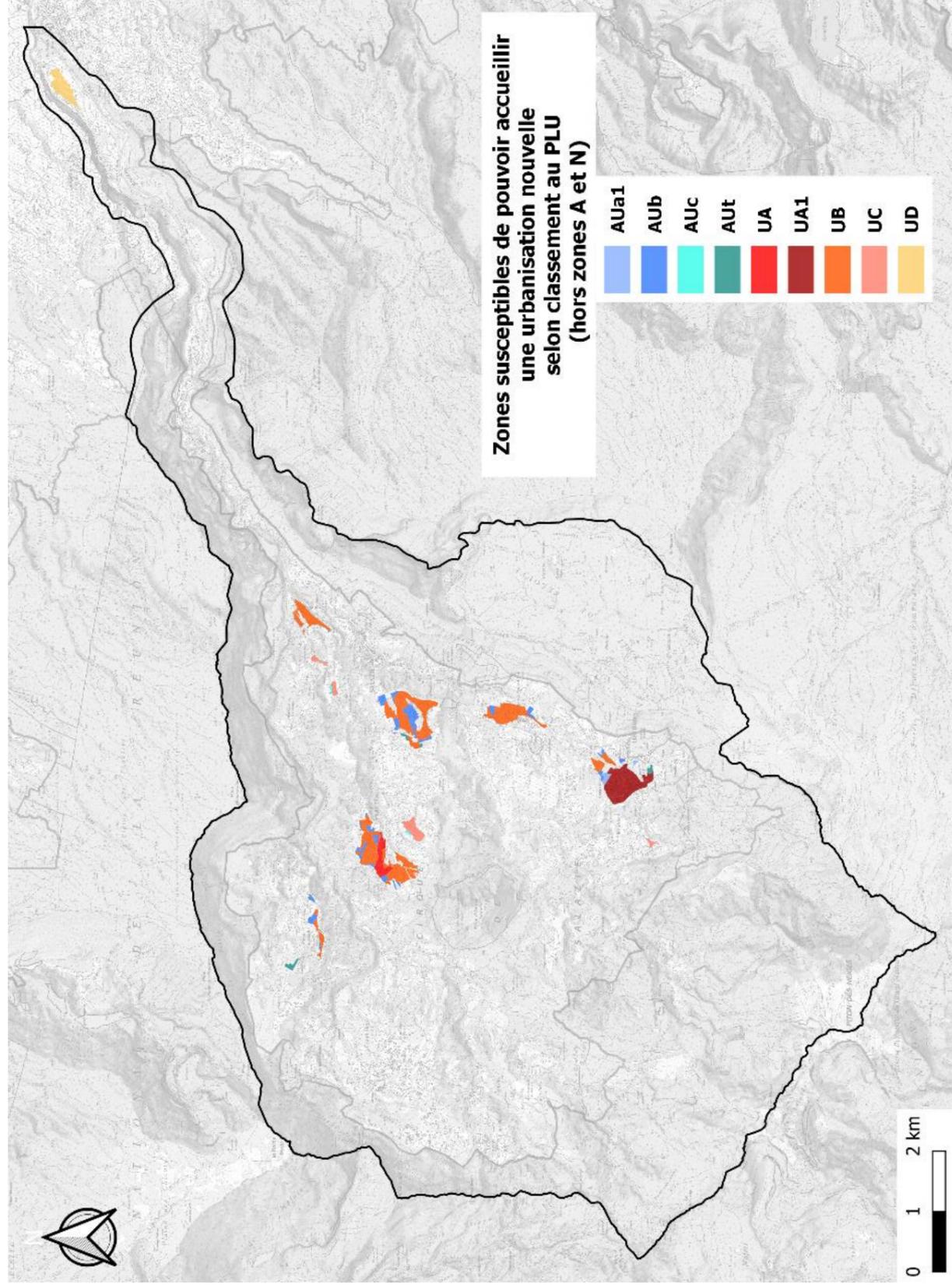


Figure 50 – Secteurs moins exposés au risque sur l'ensemble de la zone d'étude et susceptibles d'accueillir une urbanisation nouvelle, sur les zones A et AU du PLU (en haut) et hors zones déjà bâties (en bas).

7 Analyse coûts-bénéfices des stratégies de gestion du risque : méthode et application

7.1 INTRODUCTION

7.1.1 Objectif

La méthode de cartographie du risque présentée dans les sections précédentes a permis d'identifier, à l'échelle d'un territoire d'assez grande taille, des secteurs géographiques caractérisés par un niveau de risque élevé. L'étape suivante consiste à dimensionner et comparer les actions pouvant être mises en œuvre dans chacun de ces secteurs pour réduire le risque, en réduisant l'aléa (ex. protection des maisons par des ouvrages), en réduisant leur vulnérabilité (par exemple renforcement en béton armé des façades des maisons exposées), ou encore en délocalisant les enjeux exposés.

Ces actions peuvent être comparées puis hiérarchisées au regard de critères humains (nombre de victimes évitées), économiques (coûts et bénéfices), techniques (facilité de mise en œuvre) ou encore sociaux (acceptabilité). Les critères humains et économiques sont ceux qui sont le plus fréquemment mobilisés pour guider les décisions publiques. Ils sont en effet plus facilement quantifiables, donc objectivables, que des critères sociaux.

Cette partie du rapport présente le résultat d'une réflexion méthodologique relative à la mise en œuvre de l'analyse coûts-bénéfices pour comparer différentes stratégies de gestion du risque à l'échelle locale. L'approche proposée tient compte des dimensions économiques et humaines. Elle est appliquée à deux cas d'étude semi-fictifs : il s'agit de situations réelles observées dans le cirque de Salazie, mais pour lesquelles toutes les données nécessaires ne sont pas disponibles. La méthode est donc déployée en réalisant des hypothèses pour pallier au manque de données, ce qui permet d'illustrer les étapes de la démarche, mais pas d'appuyer une prise de décision sur les cas retenus. Le premier cas est représentatif d'une situation d'aléa chute de bloc tandis que le second porte sur un risque glissement de terrain.

7.1.2 Cadre conceptuel simplifié de l'analyse coûts-bénéfices (ACB)

Schématiquement, l'analyse coûts-bénéfices va consister à mettre en regard les coûts et les avantages (ou bénéfices) associés à différentes mesures de gestion du risque, que l'on traite comme des scénarios.

Pour illustrer simplement la logique de l'analyse coûts-bénéfices, nous proposons de raisonner sur un exemple fictif, représenté dans la Figure 51, dans lequel :

- Le phénomène à l'origine du risque (par ex. chute de bloc) va se produire de manière certaine au cours d'une période de référence (30 ans par exemple) ;
- En absence de protection (scénario de référence), le phénomène occasionnera des dommages liés à l'endommagement / destruction de bâtiments et d'infrastructures (dont le coût sera ici de 3 millions d'euros) et causera la perte de 6 vies humaines ;
- La mise en place des mesures de protection (scénario 1) coûte 6 millions d'euros. Elle permet de réduire considérablement la probabilité d'atteinte des enjeux sans totalement l'annuler ; il subsiste des dommages résiduels (1 million €) et une victime (sur 6 en

absence de protection supplémentaire), ces pertes étant associées à des phénomènes qui dépassent la capacité de protection des ouvrages (événement de fréquence centennale ou millénaire). Les dommages évités (2 millions €) et les vies sauvées représentent les bénéfices de ce scénario.

- La délocalisation des enjeux (scénario 2) présente un coût de mise en œuvre supérieur à celui de la protection (9 millions €) mais elle permet d'éviter toutes les victimes (6 vies humaines sauvées) et tous les dommages matériels (puisqu'il n'y a plus de biens exposés).

La Figure 51 compare les coûts (plateau de gauche de la balance) et les bénéfices (plateau gauche) associés à chaque scénario. Le scénario 1 coûte 6 M€ et permet d'éviter 2 M€ de dégâts matériels et de sauver 5 vies humaines. Le scénario 2 coûte 9 M€ et permet d'éviter 3 M€ de dégâts matériels et de sauver 6 vies humaines.

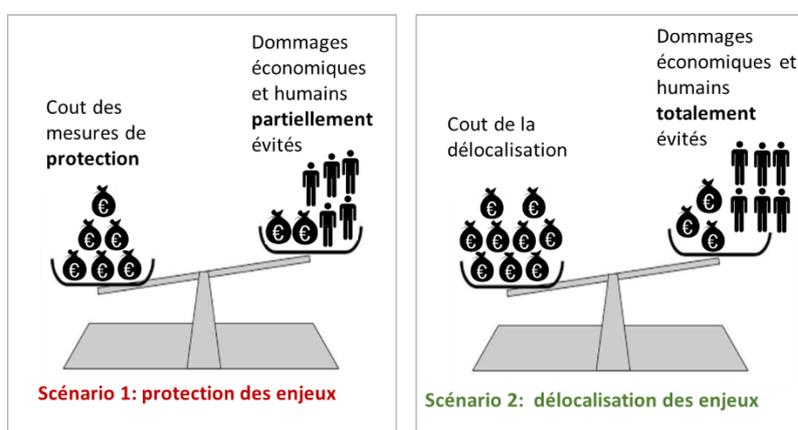


Figure 51 : Représentation schématique de la logique d'une analyse coûts-bénéfices appliquée aux risques liés au mouvement de terrain.

Les scénarios *Référence*, *Protection* et *Relocalisation* peuvent être comparés au regard de différents critères, présentés dans le Tableau 7 ci-dessous.

Le scénario de référence reste le scénario le moins coûteux d'un point de vue strictement économique mais engendre un nombre important de pertes humaines, ce qui tend à le rendre moins acceptable d'un point de vue social (coût net avec prise en compte des vies humaines de 21 M€).

En effet, bien que l'approche ne fasse pas consensus, certains économistes proposent de pousser plus loin l'analyse coût-bénéfices en attribuant une valeur monétaire à la vie humaine. Le chiffre de 3 millions d'euros, proposé par le Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective en 2013¹², est utilisé dans cet exemple fictif pour illustrer la démarche. On l'intègre dans le calcul du coût net des vies sauvées (dernière colonne du tableau). Dans cet exemple, le scénario « *Relocalisation* » est le plus performant puisqu'il dégage un bénéfice net de 12 M€ contre 7 M€ pour le scénario « *Protection* ». Le scénario de référence devient alors nettement défavorable.

¹² Voir le rapport : <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/archives/Elements-pour-une-r%C3%A9vision-de-la-valeur-de-la-vie-humaine.pdf>

	Coût (coût des mesures de gestion + dommages résiduels)	Coût total avec monétarisation des vies perdues	Bénéfice (dommages évités)	Bénéfice total avec monétarisation des vies sauvées	Coût net (coût – bénéfice)	Coût net total avec monétarisation des vies humaines
Référence	3 M€	3 M€ + (6*3M€) = 21 M€	0 M€	0 M€	3 M€	21 M€
Protection	7 M€	7 M€ + (1*3M€) = 10 M€	2 M€	2 M€ + (5*3M€) = 17 M€	5 M€	-7 M€
Relocalisation	9 M€	9 M€	3 M€	3 M€ + (6*3M€) = 21 M€	6 M€	-12 M€

Tableau 7 : Comparaison des scénarios référence, protection et relocalisation dans un exemple fictif

Dans la suite de cette étude, compte tenu des débats relatifs à la valeur de la vie humaine, celle-ci ne sera pas intégrée dans le calcul économique mais présentée sous forme d'un critère spécifique (coût net par victime épargnée).

7.2 ACB SUR UN SECTEUR EXPOSÉ À DES CHUTES DE BLOCS

La méthode coûts-bénéfices est d'abord déployée pour comparer plusieurs stratégies de gestion du risque de chute de blocs, en s'appuyant sur un cas semi fictif, inspiré d'une situation réelle à Plateau Wickers à Salazie.

7.2.1 Hypothèses et scénarios

L'aléa principal est lié aux chute de blocs et éboulements ;

- sur la base d'évaluations techniques présentées dans le rapport précédent (Cf. RP-69999-FR), on estime qu'un évènement mobilisant plusieurs centaines de m³ de matériaux rocheux avec des volumes unitaires maximum de l'ordre de 5 m³, est susceptible de survenir avec une probabilité égale à 1 sur un linéaire de 1 kilomètre et sur une période de 30 ans. Compte tenu des volumes importants en jeu, la probabilité d'atteinte de la zone d'enjeu est également égale à 1, c'est-à-dire que chaque évènement se traduira par une atteinte de la zone d'enjeu. L'année de l'évènement n'est pas connue, il y a équiprobabilité pour toutes les années (soit 1/30).
- La zone de départ et la trajectoire exacte de l'évènement ne sont pas prévisibles ; néanmoins, on considère comme certain qu'au moins un bloc de 5 m³ se propagera et atteindra la zone considérée correspondant à un linéaire de 1 kilomètre générant ainsi un risque pour les enjeux présents dans cette emprise (bâtis, route). Le linéaire exposé ne faisant que 450 m (ligne en pointillés rouges sur la Figure 52), la probabilité qu'un bloc atteigne la zone d'étude est de 0.45.

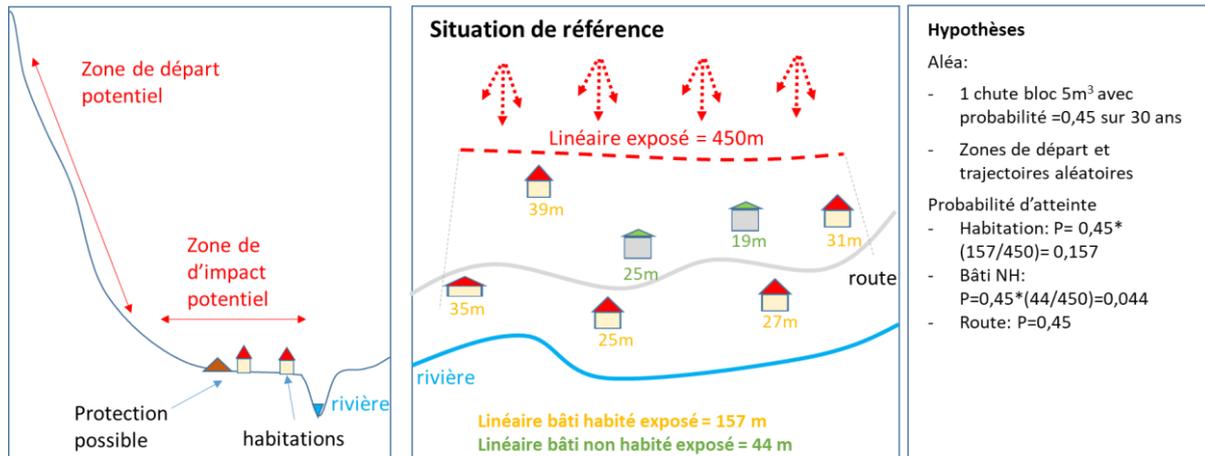


Figure 52 : Présentation schématique des hypothèses retenues pour un phénomène de type « chute de bloc/éboulement ».

Les enjeux exposés sont :

- Un tronçon de 450 m de route, caractérisée par un trafic de 4446 véhicules/jour, une vitesse moyenne de 50 km/h ; chaque véhicule a une valeur estimée à 15 k€ (tenant compte de la présence de véhicules de marchandise, de tourisme, d'artisans) et transporte 2 passagers en moyenne.
- Deux bâtiments non habités (hangars, cabanons, garages) dont la valeur unitaire est évaluée à 50 k€ ; on suppose qu'ils abritent en moyenne 0,2 personne,
- Cinq habitations, dont la valeur est estimée à 130 000 € (par soucis de simplification, on suppose une valeur identique pour toutes les habitations). En cas d'évènement, la taille du bloc conduit à une destruction du bâti. La valeur du terrain n'est pas impactée car étant situé en zone rouge du PPR, il n'est pas constructible avant l'évènement. Le taux d'occupation est de 2 personnes en moyenne (équivalent temps plein sur 24h¹³).
- L'une de ces habitations héberge une activité de chambre d'hôtes, qui génère un résultat comptable de 11 000 € par an. Si cette habitation est impactée par le bloc, l'activité cesse.

Le risque peut être caractérisé comme suit :

- La probabilité que le bloc impacte une habitation est égale au ratio de la longueur totale des habitations sur la longueur du secteur exposé, soit $157m/450m = 0,3489$ (Figure 52) ; le bloc ayant une probabilité de passage de 0.45, la probabilité d'impact d'une habitation est de $0.3489 * 0.45 = \mathbf{0.157}$.
- Avec le même calcul, la probabilité qu'un bâtiment non habité soit atteint en 30 ans est de $44/450 * 0.45 = \mathbf{0.044}$
- Lorsque l'évènement survient, la probabilité qu'il atteigne un véhicule sur la route est calculée¹⁴ en tenant compte du trafic (4446 véhicules/jour dans notre exemple), de la

¹³ Ce taux d'occupation équivalent temps plein tient compte du fait qu'une partie des membres de la famille partent travailler ou à l'école en journée mais qu'ils sont tous présents la nuit.

¹⁴ La méthodologie est adaptée de Nicolet et al. (2016) dont les travaux permettent de calculer une probabilité d'impact en un point du réseau routier (alors que nous travaillons sur un tronçon).

vitesse moyenne (50 km/h) et de la longueur moyenne des véhicules (4.5m) Avec ces valeurs, la probabilité d'atteinte d'un véhicule est de **0.0075** (voir détail dans la Figure 53).

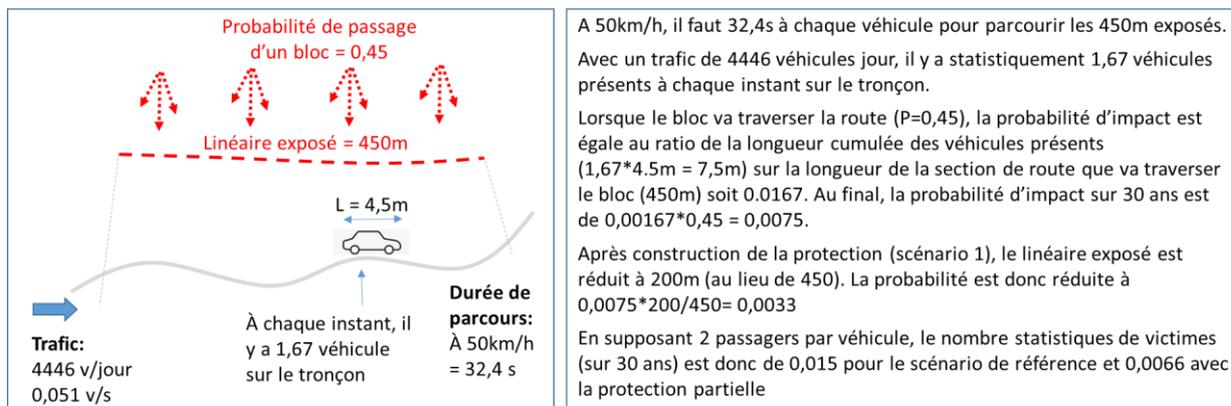


Figure 53 : Evaluation de la probabilité d'atteinte des véhicules dans la situation de référence et avec construction de la protection.

Les stratégies de gestion du risque qui feront l'objet de l'analyse coûts-bénéfices sont les suivantes (voir Figure 54) :

- Situation de référence : en absence de mesures de gestion du risque, le bloc impactera et détruira (avec les probabilités estimées ci-dessus) un ou plusieurs enjeux (possibilité qu'une trajectoire particulière impacte une habitation + un bâtiment non habité + un véhicule).

Les dommages concernent les biens matériels (valeur des constructions), les vies humaines (2 personnes équivalent temps plein par maison, 0,2 par bâtiment non habité, 2 personnes par véhicule), et l'activité économique de chambres d'hôtes (interrompue si la maison est impactée).

- Scénario 1 - Protection partielle : des merlons ou digues en terre sont construits en amont des habitations, permettant de protéger les biens matériels et les vies humaines (avec une efficacité de 100 % pour le volume considéré). Les bâtiments non habités ne sont pas protégés ; la route est partiellement protégée (200 m sur 450) par les merlons sécurisant les maisons, sur le tronçon où ils sont situés en amont de la route.
- Scénario 2 - Protection totale : les protections (identiques au scénario 2) sont dimensionnées pour protéger tous les bâtiments (habités et non habités) et indirectement une plus grande portion de la route. Tous les dommages potentiels sont ainsi supprimés (pour l'aléa trentenal considéré)¹⁵.
- Scénario 3 – Relocalisation des enjeux : on relocalise les habitations exposées, le coût est alors celui de l'acquisition du foncier (300 m² à 140 €/m², terrain viabilisé) et la construction d'une maison neuve (90 m² à 1 800 €/m²). Les bâtiments agricoles non habités ne sont pas

¹⁵ Par souci de simplification, on ne considère pas dans cette étude la possibilité d'un éboulement plus important correspondant à un événement centennal ou millénial. Dans la réalité, cette possibilité existe et les protections construites ne suffiraient pas à protéger les enjeux. Une analyse rigoureuse devrait tenir compte de ce risque résiduel. Nous ne disposons malheureusement pas des éléments techniques permettant de le quantifier (probabilité de départ, probabilité d'atteinte, volumes probables, etc.).

relocalisés ni protégés, ils continuent d'être utilisés ; la route reste exposée comme dans la situation de référence¹⁶.

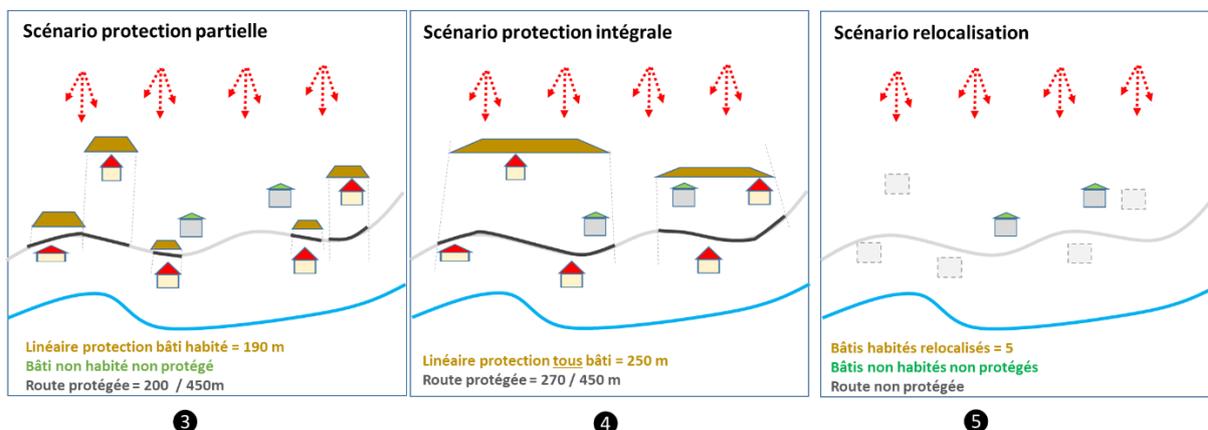


Figure 54 : Représentation schématique des trois scénarios de gestion du risque.



Figure 55 : Vue aérienne du site ayant inspiré l'étude de cas semi-fictive (plateau Wickers) (Google Earth).

7.2.2 Évaluation économique du scénario de référence

L'évènement, qui va se produire de manière certaine au cours d'une période de 30 ans, a la même probabilité de survenir chaque année, de la première à la 30^{ème}. Par souci de simplification, on suppose qu'il survient la 15^{ème} année¹⁷. Le coût des dommages associés à cet évènement sont les suivants (voir Figure 56) :

¹⁶ À noter que ce scénario permet de supprimer tous les aléas (fréquents, centennal, exceptionnels) par opposition aux deux précédents qui ne permettent de s'affranchir que des évènements fréquents.

¹⁷ Une approche alternative aurait consisté à calculer un cout moyen annualisé des dommages, comme cela est pratiqué dans le domaine des inondations (voir Erdenbruch et al., 2008, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00602482/document>). L'intérêt de cette approche est d'intégrer le coût de différents évènements d'intensité et de probabilité variable. Cette approche n'est pas nécessaire dans notre cas d'étude car nous ne considérons qu'un seul évènement (probabilité trentennale).

- Dommages aux habitations : destruction d'une maison valant en moyenne 130 k€ avec une probabilité de 0.157 soit une espérance de coût de 20.4 k€ (sur 30 ans).
- Dommages aux bâtiments non habitables : 50k€ avec une probabilité d'atteinte de 0.044 soit une espérance de coût de 2.2 k€.
- Dommages aux véhicules = 15 000€ avec une probabilité de 0.0075, soit une espérance de coût de 112 €.
- Perte d'activité économique pour la chambre d'hôtes de 11 k€ par an, avec une probabilité $0.157 / 5 = 0.0314$ que la maison d'hôtes soit impactée, soit une espérance de coût de 345€/an (à partir de la date de l'évènement et jusqu'à la fin de la période de 30 ans).

Le scénario de référence est également caractérisé par des victimes, dont le nombre est estimé comme suit :

- Dans les habitations, on suppose la présence de 2 personnes (équivalent temps plein) au moment de l'impact ; la probabilité d'atteinte de la maison est de 0.157, il y a donc **0.314 victimes**.
- Dans les bâtiments non habités, il y a 0.2 personnes (équivalent temps plein) la probabilité d'atteinte est de 0.044, il y a donc **0.0088 victimes** ;
- Dans le véhicule impacté, il y a 2 personnes en moyenne, la probabilité d'impact est de 0.0075, il y a donc **0.015 victimes**.

Au total, le scénario de référence suppose que l'évènement peut statistiquement faire 0.3378 victimes.

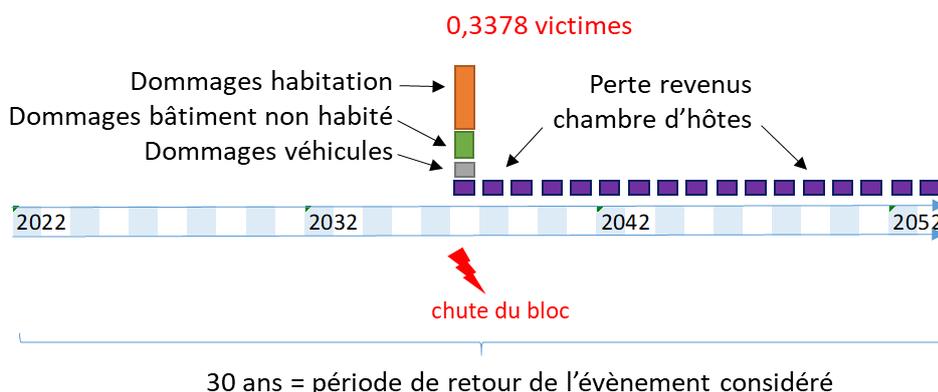


Figure 56 : Représentation schématique des coûts associés au scénario de référence.

Pour calculer la valeur du coût total des dommages, on raisonne sur l'ensemble de la période. Les coûts sont actualisés avant d'être sommés, de manière à rendre compte de la préférence des acteurs pour le présent. Compte tenu du fait que l'on raisonne sur un horizon temporel long (30 ans), on utilise dans cet exemple un taux d'actualisation de 4% (de 0 à 30 ans), progressivement décroissant de 30 à 60 ans, se stabilisant à 2% au-delà¹⁸. Le Tableau 8 met en évidence la sensibilité du dommage total estimé à la date à laquelle survient l'évènement. Si le bloc chute la première année, les coûts ne sont pas dépréciés ; en revanche, s'il survient à 15

¹⁸ Le taux d'actualisation est un taux de substitution entre le futur et le présent ; il traduit la valeur du temps pour une entreprise ou une collectivité : c'est en quelque sorte le *prix du temps*. Selon les recommandations du Commissariat général du plan, le taux d'actualisation de base s'élève à 0,04. Il est ensuite décroissant avec le temps à partir de trente ans pour approximer 0,02 à très long terme.

ans ou à 30 ans, les dommages sont dépréciés de respectivement 26% et 44% de la valeur nominale.

Année	Dépréciation du coût des dommages
1	0%
15	42%
30	68%

Tableau 8 : Sensibilité du coût des dommages actualisés selon l'année à laquelle survient la chute du bloc.

Les coûts associés au scénario de référence vont pouvoir être partiellement ou totalement évités par la mise en place des scénarios de protection ou de relocalisation.

7.2.3 Évaluation économique du scénario de protection partielle

L'ACB vise à comparer les coûts de la protection mise en place avec les dommages qu'elle permet d'éviter. La comparaison des deux termes doit être effectuée pour la période correspondant à la durée de vie de l'infrastructure développée (60 ans pour la digue en terre / merlons).

Les coûts de l'infrastructure de protection, se décomposent comme suit :

- **C1** = Investissement 570 000 € pour 190 m linéaires avec une durée de vie estimée à 60 ans,
- **C2** = Entretien annuel estimé à 1% de l'investissement tous les 3 ans pour la protection considérée soit 5700€,
- **C3** = Réparation (réfection de 10 m linéaires = 30 000 €) suite à interception d'un gros bloc, une fois sur 30 ans avec probabilité 0,45 (soit environ 13 500 € de coût espéré) ;

Les bénéfices sont égaux :

- Aux dommages que la protection permet d'éviter. **B1** = valeur de l'habitation détruite en cas d'évènement multipliée par la probabilité d'atteinte, **B2** : valeur des bâtiments non habitables impactés ; **B3** : valeur des véhicules endommagés ; **B4** : perte de revenu pour la chambre d'hôtes, cumulée pour les années qui suivent l'évènement, et multipliée par la probabilité d'atteinte de cette maison spécifiquement (0.314/5).
- Aux victimes évitées, c'est-à-dire 0.3378¹⁹ sur chaque période de 30 ans (soit 0.6756 au total).

¹⁹ 2 personnes dans l'habitation impactées avec une probabilité de 0.157 + 0.2 personnes dans le bâtiment agricole impacté avec une probabilité de 0.044 + 2 personnes dans le véhicule impacté avec une probabilité de 0.015

L'évaluation de ce scénario peut être réalisée comme suit (voir Figure 57) :

- On calcule la somme des coûts et bénéfices actualisés *sur 60 ans*, qui est la durée de vie des ouvrages construits. Le calcul est réalisé avec un taux d'actualisation de 4% pour les 30 premières années puis décroissant à 4 à 2 % entre 30 et 60 ans.
- Pendant cette période de 60 ans, on peut s'attendre à ce que 2 événements surviennent. La protection mise en place évite donc les dommages qui auraient été occasionnés par la chute de ces 2 blocs. Ces blocs sont susceptibles de partir à n'importe quelle date au cours de la période. Le choix de la date n'est pas neutre sur le résultat en raison de l'actualisation (plus on s'éloigne dans le temps, plus la valeur des bénéfices décroît). La date des bénéfices est arbitrairement placée au centre de chaque période, soit 15 et 45 ans²⁰.
- Au final, le scénario de protection partielle génère une valeur nette actualisée de -609 000€, et un ratio Bénéfices/Coûts de **2.7%** (Tableau 9).
- Les mesures de protection permettent d'éviter 0,658 victimes, ce qui revient à dépenser 918 000 € par victime épargnée. Si on suppose que la plupart des victimes décèdent lors de l'évènement (hypothèse plausible compte tenu de la taille du bloc considéré), le montant dépensé pour sauver chaque vie est trois fois inférieur à la valeur de la vie humaine proposée dans la littérature économique (3 millions €). Ce constat milite en faveur de la mise en place de la protection.

En conclusion, **la construction de la protection partielle est préférable à la situation de référence**, sa mise en œuvre se justifie d'un point de vue économique, principalement parce qu'il permet de sauver des vies humaines. Les dommages matériels évités sont négligeables par rapport aux coûts de l'infrastructure à réaliser.

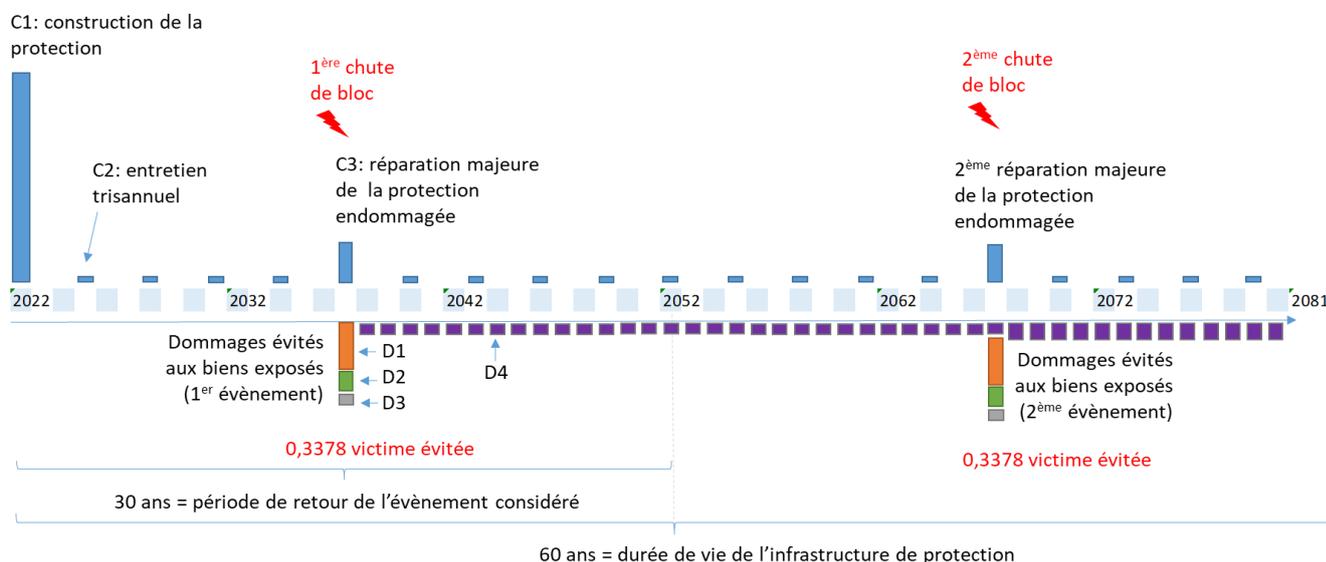


Figure 57 : Représentation de la distribution temporelle des coûts et des bénéfices pris en compte dans l'ACB.

²⁰ Les coûts et bénéfices associés à des événements survenant à 15 et 45 ans (milieu de chacune des périodes de 30 ans) sont statistiquement égaux à la moyenne des coûts / bénéfices que l'on aurait pu calculer pour toutes les dates possibles.

	Description	Valeur actualisée sur 60 ans
Coûts	C1 - Construction de l'ouvrage	570 k€
	C2 - Maintenance ouvrage tous les 3 ans (1% de l'investissement)	46 k€
	C3 - Réparation de l'ouvrage suite à interception de blocs (2 fois sur 60 ans)	10 k€
	Total	626 k€
Bénéfices	B1 - Dommages aux habitations évités	16,9k€
	B3 - Dommages aux véhicules évités	~ 0
	Victimes évitées	0.658
Ratios ACB	Bénéfices / coûts	4 %
	Valeur Actualisée Nette	-609k€
	Coût net / victime évitée	918 k€

Tableau 9 : Résultats de l'ACB pour le scénario protection partielle.

7.2.4 Évaluation économique du scénario protection totale

Ce scénario repose sur la construction d'un ouvrage de protection identique à celui du scénario précédent mais sécurisant un linéaire plus long (270 m au lieu de 190) et mettant à l'abri les bâtiments non habités et une plus grande portion de la route.

Les coûts d'investissement et de maintenance sont plus élevés (puisque proportionnels au linéaire²¹). Le coût de réparation en cas de chute de bloc reste identique.

Les dommages évités sont ceux du scénario précédent. S'y ajoute le bénéfice lié à la protection des deux bâtiments non habités (valeur nominale de 50k€). Le dommage aux véhicules est également réduit par ce scénario (le bénéfice financier associé est totalement négligeable).

Concernant le nombre de victimes évitées, on ajoute au scénario précédent 0.088 victimes correspondant aux 0.2 personnes présentes dans les bâtiments non habités (qui sont impactés avec une probabilité de 0.044). Le nombre de victime dans les véhicules baisse légèrement (0.011 au lieu de 0.015). On obtient un nombre total de victime évitées de 0.6676 pour 60 ans.

Les résultats de l'ACB sont présentés dans le Tableau 10. On constate que ce scénario de protection renforcé dégrade les résultats de l'ACB par rapport au scénario protection partielle : le ration B/C baisse de 4 à 3% et le coût net par victime épargnée augmente à 1,28 M€. **Ce scénario est donc moins favorable d'un point de vue économique que le scénario de protection partielle**²².

²¹ Nous négligeons ici d'éventuels effets d'échelle qui font que le cout unitaire (au mètre linéaire) de la protection renforcée sera, en pratique, légèrement inférieur à la protection partielle.

²² La protection étendue permet aussi de réduire l'exposition des personnes qui se situent autour des maisons (dans les jardins, enfant jouant dans la rue). Le calcul présenté ci-dessus ne tient pas compte de vies qui pourraient être sauvées dans ces espaces. Il sous-estime ainsi l'intérêt de cette protection étendue.

	Description	Valeur actualisée sur 60 ans
Coûts	C1 - Construction de l'ouvrage	810 k€
	C2 - Maintenance ouvrage tous les 3 ans (1% de l'investissement)	58.8 k€
	C3 - Réparation de l'ouvrage suite à interception de blocs (2 fois sur 60 ans)	10 k€
	Total	880 k€
Bénéfices	B1 - Dommages aux habitations évités	23 k€
	B2 - Dommage aux bâtiments non habitables évités	1.6 k€
	B3 - Dommages aux véhicules évités	~ 0
	Victimes évitées	0.6676
Ratios ACB	Bénéfices / coûts	3%
	Valeur Actualisée Nette	-856 k€
	Coût net / victime évitée	1,28 M€

Tableau 10 : Résultats de l'ACB pour le scénario protection totale.

7.2.5 Évaluation économique du scénario « délocalisation »

Le coût de ce scénario est celui de la reconstruction des habitations expropriées (les bâtiments non habités ne sont pas relocalisés). Ce coût est estimé en supposant l'acquisition de 300 m² de terrain viabilisé pour chaque habitation (140 €/m²) et la construction d'une maison neuve (90 m² à 1 800 €/m²). Le coût total s'élève à 1,02 M€. L'activité chambre d'hôtes peut redémarrer dans la nouvelle localisation, elle n'est donc pas compensée.

Les bénéfices sont le coût des dommages évités pour les habitations (déjà évalués dans les scénarios précédents).

En termes de victimes, la relocalisation supprime le risque pour les habitations, mais pas pour la route. Le scénario permet donc d'éviter 0.628 victimes.

L'ACB montre que **ce scénario est encore plus défavorable que le précédent**, avec un ratio B/C de **2%**, une valeur actualisée nette plus défavorable (-996 k€) et un coût par victime évité (1.6 M€) très supérieur aux autres scénarios (Tableau 11).

	Description	Valeur sur 60 ans
Coûts	Coût de la relocalisation des habitations	1 020 k€
Bénéfices	Dommages aux habitations évités	23 k€
	Victimes évitées	0.628
Ratios ACB	Bénéfices / couts	2%
	Valeur Actualisée Nette	-996 k€
	Coût net / victime évitée	1.6 M€

Tableau 11 : Résultats de l'ACB pour le scénario délocalisation.

7.2.6 Conclusion

L'ACB présentée ci-dessus (voir synthèse dans le Tableau 12) montre que **la mise en place d'une protection partielle est le scénario le plus pertinent d'un point de vue économique. L'action n'est justifiée que si l'on accorde une valeur à la vie humaine de l'ordre du million d'euros.** La valeur des dommages matériels évités par l'infrastructure de protection est négligeable.

	Protection partielle	Protection totale	Relocalisation
Bénéfices / coûts	4%	3%	2%
Valeur Actualisée Nette	-609 k€	-856 k€	-996 k€
Coût net / victime évitée	918 k€	1,28 M€	1.6 M€

Tableau 12 : Comparaison des trois scénarios eu regard des résultats de l'ACB

La principale limite de l'analyse est de ne pas tenir compte de toute la gamme des évènements susceptibles de survenir à d'autres fréquences que la trentennale considérée ici. En effet, la mise en place de la protection permet aussi d'éviter des dommages de moindre ampleur mais plus fréquents occasionnés par la chute de blocs de diverses tailles inférieure à 5 m³. Nous avons donc sous-estimé les bénéfices en ne calculant pas les dommages évités pour ces évènements dont la protection permet de s'affranchir.

De même, le scénario « relocalisation » permet de s'affranchir des évènements extrêmes de fréquence centennale ou plus (tels qu'un effondrement de rempart) qui pourraient occasionner des dommages matériels très élevés (destruction de toutes les habitations) et un nombre important de victimes (tous les habitants des maisons). Les bénéfices associés peuvent être très importants, et même si la probabilité d'occurrence est faible, leur prise en compte améliorerait la performance économique du scénario « relocalisation ».

7.3 ACB SUR UN SECTEUR EXPOSÉ AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN

7.3.1 Hypothèses et scénarios

- **Le contexte hypothétique de Mare à Nanace**

La configuration retenue pour réaliser cette analyse coûts-bénéfices est inspirée d'un cas réel se situant dans la commune de Salazie, auquel nous attribuerons le nom fictif d'îlet *Mare à Nanace*. Cet îlet, qui porte le nom de l'étang qui s'y trouve, comporte deux zones d'habitations. La principale zone d'habitation occupe un plateau, bordé par un talus d'une quarantaine de mètres de haut. Ce plateau surplombe une deuxième zone d'habitations, située sur des pentes plus raides. Une ravine s'écoule en pied de versant. Une route en lacets relie l'îlet à la route départementale.

Vu la configuration géomorphologique, cette zone habitée est susceptible d'être affectée par des glissements de terrain de moyenne à grande ampleur. Bien que rien ne permette actuellement d'anticiper un tel phénomène, nous avons construit un scénario décrivant une série d'évènements susceptibles de se produire sur une période de 23 ans, entre 2025 et 2048. Nous élaborons ensuite un scénario théorique d'action visant à stabiliser ce glissement dont nous réalisons l'analyse économique. L'objectif de cet exemple fictif est purement pédagogique, il s'agit d'illustrer la manière dont conduire une ACB pour une situation de glissement de terrain.

- **Scénario de référence**

En 2025, un glissement lent de moyenne ampleur, connu mais peu actif, subit une phase d'accélération. Il provoque quelques fissures dans les maisons du quartier bas d'îlet à Nanace et sur la route (voir représentation schématique sur la Figure 58). Les experts jugent alors que la stabilisation de ce glissement, bien que techniquement possible, serait disproportionnée par rapport à la valeur des enjeux exposés. Des mesures accrues de surveillance du glissement sont mises en place sans qu'aucune action ne soit entreprise pour le stabiliser.

Entre 2030 et 2035, le glissement se poursuit et les dommages aux habitations prennent de l'ampleur (fissures). La mairie doit faire procéder à l'évacuation de 11 maisons concernées et enclenche une procédure d'expropriation « fonds Barnier ». En 2035, les maisons sont évacuées, la route est abandonnée et reconstruite en dehors du glissement.

En 2048, un glissement de terrain spontané (rapide) se produit en tête du plateau suite à un cyclone. Il est probablement induit par le glissement de grande ampleur en aval qui a déstabilisé le talus amont mais également lié à la saturation des sols en eau lors du cyclone. Ce glissement entraîne un endommagement irréversible de 5 habitations et du réservoir d'eau potable. La route située en aval est détruite. Il n'y a pas de victimes.

Le recul de la bordure du plateau conduit l'État à réviser le PPR : une partie du plateau est alors reclassée en zone rouge, devenant inconstructible. Près de 1,2 hectare de foncier perdent alors leur valeur et les maisons situées dans la nouvelle zone rouge subissent aussi une décote de l'ordre de 30%.

Au final, en 23 ans, l'îlet à Nanace a perdu 11 maisons dans le quartier bas, 5 en haut, un réservoir, plusieurs sections de route et une surface de 1,2 hectare de surface constructible.

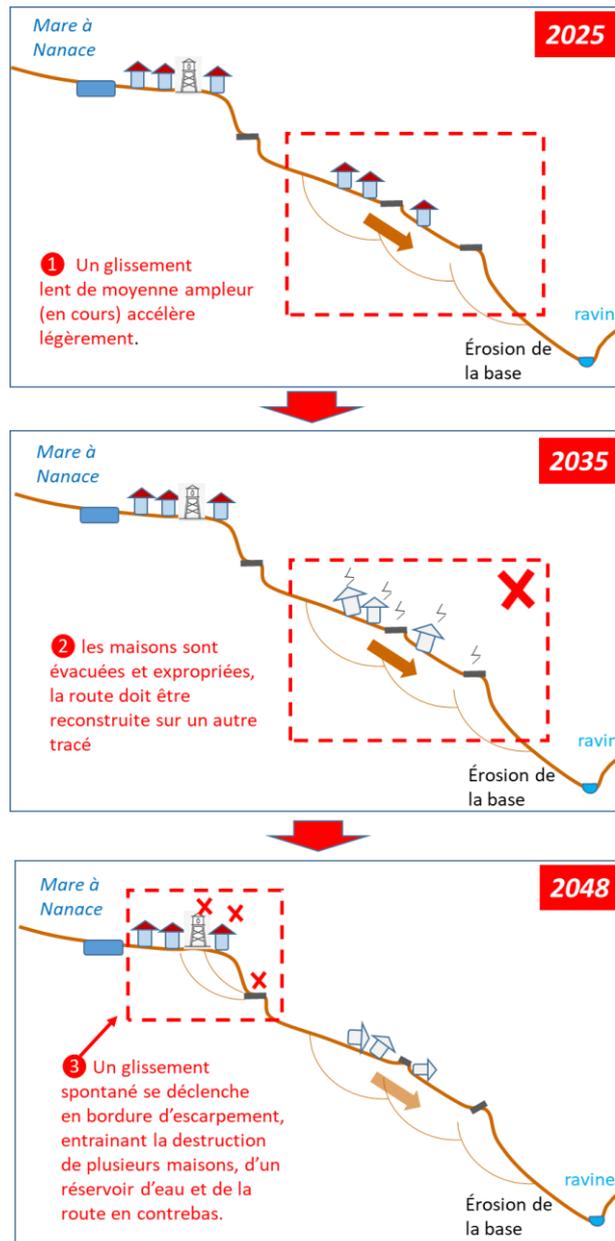


Figure 58 : Déroulement du scénario de référence (2025-2048).

▪ Scénario de sécurisation

Projetons-nous maintenant dans un scénario alternatif. Lorsque le glissement lent accélère en 2025, on suppose que les pouvoirs publics réalisent une étude géotechnique pour évaluer les possibilités de le stabiliser. Les experts consultés concluent que le glissement lent peut être stoppé en mettant en place une série de mesures de drainage du massif (Figure 59). Il s'agit des ouvrages suivants :

- 1- La construction d'une série de **drains subhorizontaux** dans les terrains du glissement lent, mais aussi dans la pente sous le plateau, qu'ils jugent instable et susceptible de donner lieu à un glissement rapide. Les drains subhorizontaux sont généralement des tubes en PVC crépinés d'un diamètre de 44 à 118 mm, introduits dans des forages de

diamètre approprié et inclinés de 5 à 10°, afin d'assurer l'écoulement gravitaire et l'autocurage. Les drains sont disposés en éventail. Ils sont généralement revêtus de nappes géotextiles pour éviter l'engorgement ou le colmatage par les particules fines. Les profondeurs maximales atteignables sont de l'ordre de 50 à 60 m²³.

- 2- **Un aménagement de la mare** à Nanace pour éviter tout débordement en cas de fortes pluies.
- 3- La construction de **fossés d'interception des eaux pluviales** voire de tranchées drainantes qui visent à évacuer les eaux pluviales et les eaux drainés par les drains installés pour éviter qu'elles ne s'infiltrent dans le massif ; l'objectif est de réduire la pression interstitielle.
- 4- Le **pied du glissement** qui est érodé par la ravine doit également être protégé et conforté par un ouvrage qui vise à limiter les risques d'érosion liés aux crues répétées de la ravine et ainsi réduire la perte de butée de pied afin de participer à contenir les déplacements de la masse instable ; en effet, l'érosion par la rivière sape la base du glissement et favorise l'accélération du mouvement.

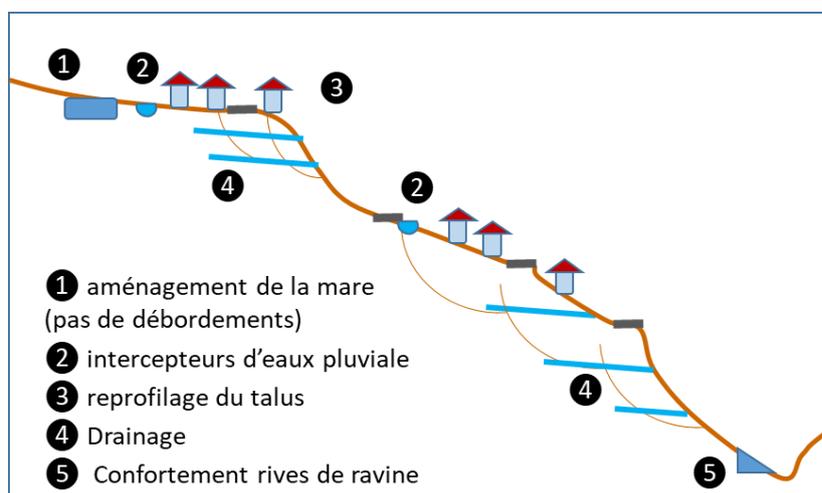


Figure 59 : Mesures de stabilisation du terrain préconisées par les experts dans le scénario « sécurisation »

Tous ces ouvrages qui assurent la stabilisation, notamment les drains, ont une durée de vie limitée. Pour être efficaces et éviter la réactivation du glissement, ils devront être entretenus tous les 15 ans et renouvelés tous les 30 ans. Confrontés à l'importance des coûts, les pouvoirs publics proposent d'étudier deux stratégies de gestion du risque :

- La première vise à stabiliser le glissement de manière quasi-définitive (horizon 100 ans) ; on accepte dès lors l'idée qu'il faudra régulièrement renouveler les ouvrages de drainage, avec des coûts récurrents ; par souci de simplification de l'analyse, on suppose que les pouvoirs publics s'engagent à maintenir les ouvrages sur une période de 100 ans, qui correspond à la durée de vie des habitations concernées. Au-delà de ces 100 ans, la valeur résiduelle des maisons étant considérée comme nulle, la sécurisation ne sera plus assurée. Les maisons seront alors abandonnées sans compensation financière par l'Etat.

²³ http://www.risknat.org/projets/riskydrogeo/docs/guide_pratique/Activite5_Parades/A5-14-Drainage%20profond.pdf

- La seconde logique consiste à sécuriser le site pendant une période de 30 ans seulement, pour se donner le temps d'évacuer les maisons en minimisant les conséquences pour les habitants. Les pouvoirs publics annoncent dès le départ le caractère temporaire de la sécurisation mise en place et la perspective inévitable de la délocalisation à terme. Ils font dès le départ l'acquisition de la nue-propriété des habitations menacées (expropriation partielle), en laissant aux usagers le droit d'usage pendant 30 ans. A l'issue de cette période, les ouvrages ne sont pas renouvelés et les habitations sont démolies dès que le glissement se réactive.

L'analyse coûts-bénéfices va permettre de comparer ces deux stratégies, mettant en regard les dommages évités (qui représentent les bénéfices de notre scénario) avec le coût des mesures de stabilisation. L'évaluation porte sur des périodes différentes, 100 et 30 ans, conformément aux hypothèses des deux scénarios de gestion du risque.

7.3.2 Évaluation des dommages associés au scénario de référence

La Figure 60 représente l'évolution de la situation dans le scénario de référence vue de dessus. Elle permet de visualiser les impacts associés aux deux glissements qui ont lieu en 2035 (lent) et en 2048 (rapide).

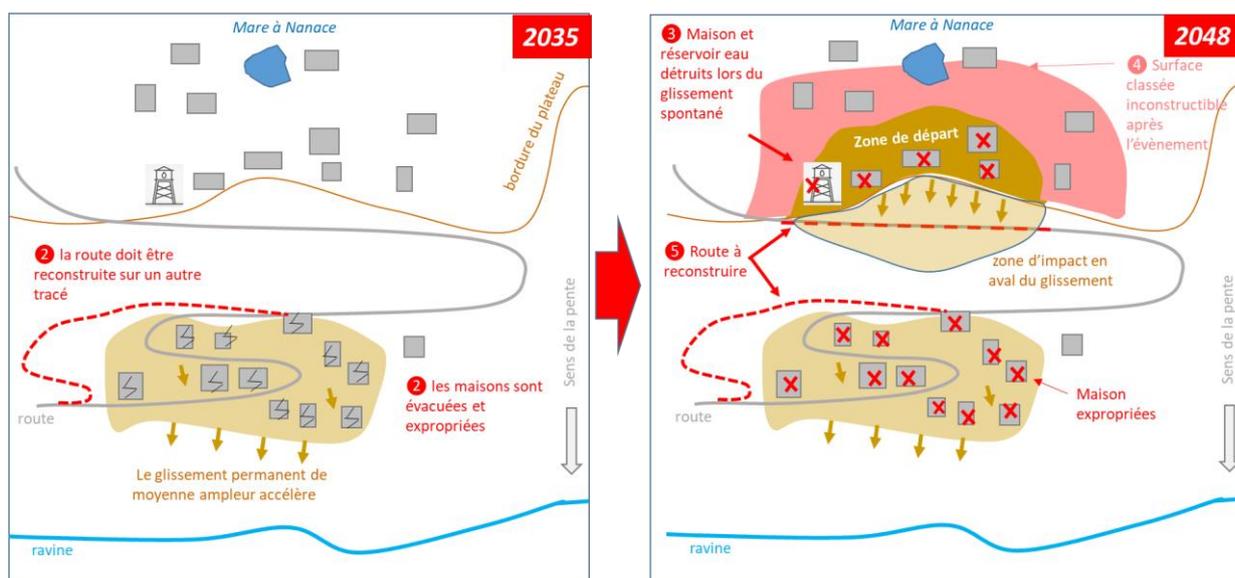


Figure 60 : Vue en plan de l'évolution de la situation dans le scénario de référence.

Les dommages associés au scénario de référence sont estimés dans le Tableau 13. Une fois actualisés d'après la formule ci-dessous, la somme de ces coûts s'élève à **3.59 millions d'euros**.

$$C = \frac{2.587}{(1 + 0.04)^{(2035-2025)}} + \frac{4.548}{(1 + 0.04)^{(2048-2025)}} = 3.59$$

Avec 2.587 et 4.548 les coûts ayant respectivement lieu en 2035 et 2048, et 0.04 le taux d'actualisation.

Date	Nature du dommage	Eléments d'estimation du coût	Coût
Gliss. lent (2035)	Expropriation de 11 habitations de Mare à Nanace bas + coûts de relogement temporaire	Estimation 130 k€ par maison (sur base données DGFIP et 4 expropriations par Etat – 140k€ en moyenne, source DEAL) + 1 an de location temporaire (1000€/mois).	1.58 M€
	Démolition des 11 habitations endommagées	37 k€ pour maison 100m ² - données DEAL pour 4 habitations à Mare à Goyaves	407 k€
	Reconstruction d'un tronçon de 500 m de route	1,2 M€ / km pour route communale y compris réseau d'eaux pluviales (source mairie Salazie)	600 k€
Gliss. rapide (2048)	Remplacement réservoir AEP de 120 m ³ et canalisation	Construction d'un réservoir de 370 m ³ à Mare à Martin pour 750 k€ en 2012 (source mairie Salazie)	245 k€
	Expropriation et démolition de 4 maisons (haut de l'îlet)	Voir ci-dessus	668 k€
	Reconstruction totale de la route par un autre itinéraire (1.7 km)	Voir ci-dessus	2.04 M€
	Déclassement de 1.2 ha de zone constructible	Différentiel entre prix du terrain constructible et prix du terrain agricole (~120€/m ²)	1.4 M€
	Perte de valeur (30%) des 5 habitations classées en zone rouge	Décote estimée sur la base de l'étude BRGM RP-69239-FR (Rinaudo et al., 2019)	195 k€
Total			7.14 M€
Total actualisé			3.59 M€

Tableau 13 : Estimation des dommages associés au scénario de référence du glissement de Mare à Nanace.

7.3.3 Évaluation du coût des mesures de sécurisation

Le coût des mesures de sécurisations (investissement et maintenance) ont été sommairement estimés en se basant sur des coûts observés dans d'autres contextes (Tableau 14). Les chiffres présentés sont à considérer comme des ordres de grandeur très approximatifs qui, bien que basés sur des dires d'experts, ne tiennent pas compte de la réalité géotechnique et hydrogéologique du terrain (lequel étant fictif, ne peut pas être précisément décrit). Le lecteur est invité à les considérer comme des hypothèses nécessaires à la réalisation de l'analyse coûts-bénéfices, qui est déroulée à titre d'illustration méthodologique uniquement. L'évaluation des coûts dans une situation réelle nécessiterait l'intervention d'un bureau d'étude spécialisé qui pourrait dimensionner le nombre, la disposition et la profondeur des ouvrages proposés.

Il est important de noter que les ouvrages ont une durée de vie limitée et qu'ils doivent être renouvelés. La durée de vie est de 15 ans pour les drains, qui finissent par se colmater et de 30 ans pour l'enrochement dans la ravine, les ouvrages de récupération d'eau pluviale et l'aménagement de la mare. Le coût de la sécurisation est donc très dépendant de la durée pendant laquelle les ouvrages seront entretenus et renouvelés.

La section suivante propose une analyse économique des deux scénarios présentés ci-dessus, le premier consistant à assurer une stabilisation temporaire du glissement pendant 30 ans, tandis que le second maintient les mesures pendant 100 ans.

Nature de l'action	Description de la mesure	Coûts et durée de vie
Etudes	Etude permettant d'évaluer le fonctionnement du glissement. Installation d'inclinomètres, de piézomètres. Dimensionnement des ouvrages.	200 k€
Aménagement de la mare	Mise en place d'un système permettant la surverse de la mare en période de hautes eaux pour limiter l'infiltration dans le sous-sol (inspiré des travaux réalisés à Mare à Goyaves).	Investissement : 500 k€ Maintenance : 0.5%/an Durée de vie : 30 ans
Intercepteurs d'eau pluviale (cunettes béton) et évacuation vers ravines	Visent à éviter l'infiltration d'eau dans le massif, en amont du plateau et en amont du mouvement lent en partie basse de l'ilet. Evacuent aussi les eaux des drains. Longueur totale : 250 ml sur le plateau ; 1250 ml en aval (le long de la route + en amont). Coût unitaire : 100€/ml	Investissement : 150 k€ Maintenance : 0.5%/an Durée de vie : 30 ans
Drains subhorizontaux glissement lent	Drains de 50 ml, espacement de 5 m sur 4 lignes de niveau décalées de 20 m, soit 200 unités à 5000€	Investissement : 1M€ Maintenance ²⁴ : 2%/an Durée de vie : 15 ans
Drains subhorizontaux glissement rapide	1 drain tous les 5 m sur 2 lignes soit 80 unités à 5000€	Investissement : 400 k€ Maintenance : 2%/an Durée de vie : 15 ans
Confortement pied de glissement dans la ravine	Enrochement lié sur 200m de long, comprenant construction d'une piste d'accès à 10 000€/ml (coût Réunion)	Investissement : 2M€ Maintenance : 0 Durée de vie : 30 ans
Total		Investissement : 4 M€ Maintenance : 30k€/an

Tableau 14 : Estimations des coûts des mesures de stabilisation du glissement de terrain de Mare à Nanace.

7.3.4 Résultats de l'ACB

- **Scénario sécurisation à 100 ans**

La Figure 61 illustre la distribution dans le temps des coûts (au-dessus de la ligne de temps) et des bénéfices (en dessous) :

- Coûts : Les ouvrages sont construits pour la première fois en 2025 ; les drains sont renouvelés tous les 15 ans (6 fois) et les autres ouvrages tous les 30 ans (2 fois²⁵). Le

²⁴ Les drains subhorizontaux doivent être décolmatisés régulièrement avec des jets à haute pression d'eau ou d'air, et remplacés lorsqu'ils sont hors d'usage. De plus, l'exutoire et les collecteurs qui peuvent être endommagés doivent régulièrement être nettoyés et curés. Le coût associé est évalué à 2% de l'investissement par an ce coût dépendra en grande partie des difficultés d'accès aux drains).

²⁵ Lors du dernier renouvellement en 2085, on suppose qu'on sera capable d'augmenter leur durée de vie de 30 à 40 ans, pour tenir jusqu'à la fin de la période de 100 ans.

coût de maintenance (30 k€) est récurrent chaque année. Ces coûts s'étalant dans le temps, leur actualisation va en réduire l'importance dans le calcul de la valeur actualisée nette.

- **Bénéfices** : les bénéfices ont lieu en début de période ; on évite la perte de 11 maisons en 2035, de 4 autres ainsi que celle du réservoir AEP en 2048 et de deux portions de route. On évite également la perte de valeur foncière sur le plateau et la perte de valeur des maisons classées en zone rouge en 2048.

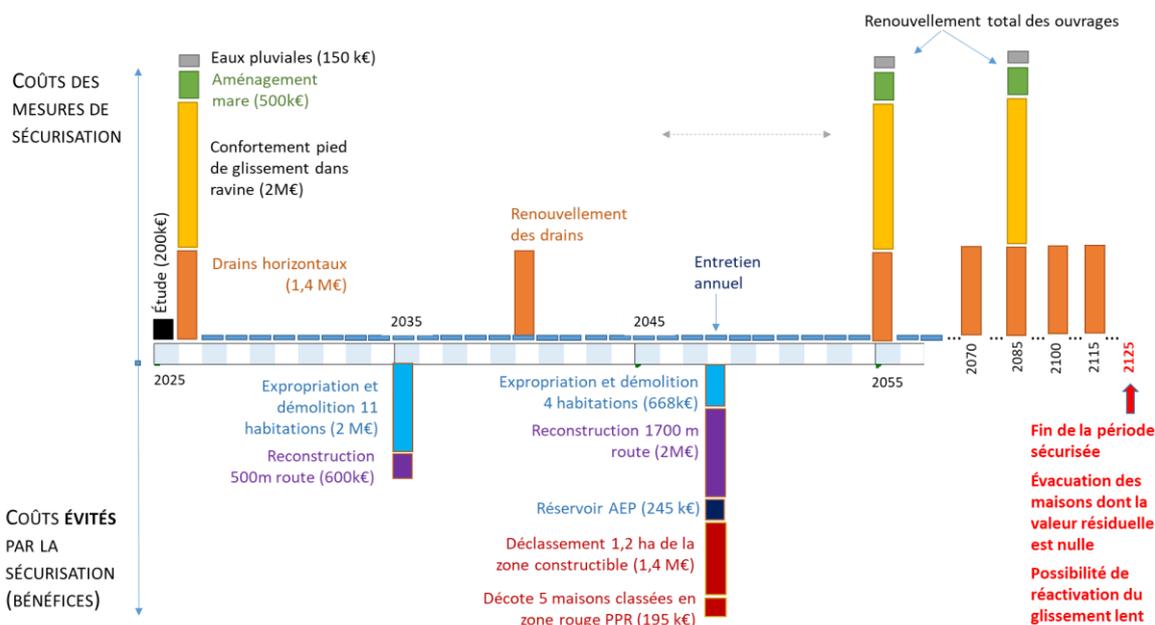


Figure 61 : Distribution temporelle des coûts et des bénéfices du projet de stabilisation du glissement de terrain de Mare à Nanace (horizon 100 ans).

Le calcul de la Valeur Actualisée Nette (VAN) est ensuite effectué. Il consiste à déprécier les montants des coûts et des bénéfices avec le temps, de manière à rendre compte de la préférence pour le présent des agents économiques. On choisit comme précédemment un taux d'actualisation de 4% pendant les 30 premières années, décroissant à 2% sur les 30 années suivantes et stable au-delà. Les résultats du calcul sont présentés dans le Tableau 15. La somme des coûts actualisés est égale à 9.2 M€ et celle des bénéfices à 3.8 M€, soit un coût net de 5.4 M€.

A noter que cette stratégie de protection ne permet pas de sauver de vies humaines puisqu'il n'y a pas de victimes dans le scénario de référence (à la différence de l'exemple précédent sur les chutes de blocs).

Avec une valeur actualisée nette (VAN) de -5.4 M€, ce scénario reste plus coûteux que le scénario de référence dont la VAN est de -3.59 M€. **La sécurisation à 100 ans ne semble donc pas pertinente d'un point de vue économique.**

▪ **Scénario sécurisation à 30 ans**

Ce scénario permet de décaler dans le temps une partie des dommages associés aux glissements. La Figure 62 présente la distribution temporelle des coûts et des bénéfices :

- Coûts :

- On construit les ouvrages en 2025, leur durée de vie est de 30 ans ; pendant cette période les drains doivent être renouvelés une fois. La maintenance annuelle est aussi nécessaire. Les hypothèses de coûts sont les mêmes que précédemment.
- Au moment de la mise en œuvre des mesures de sécurisation (2025), l'état rachète la nue-propriété des habitations aux habitants. Ceux-ci peuvent continuer d'habiter le bien pendant 30 ans mais ne disposent plus du droit de le vendre, de le transmettre ni de le louer. Conformément aux barèmes en vigueur, le montant de la compensation pour cette expropriation partielle est fixé à 58.6% de la valeur des biens, les 41.4% restant correspondant à la valeur de l'occupation pendant 30 ans²⁶. Le coût de cette expropriation partielle est de 1.23 M€.
- Au bout de 30 ans (2055), les ouvrages de sécurisations arrivant en fin de vie, le glissement se réactive. Les habitations sont évacuées et démolies par l'Etat qui est alors propriétaire (la période d'usus de 30 ans concédée aux anciens propriétaires étant terminée).
- Le glissement qui se réactive rend alors nécessaire la reconstruction de 500 m linéaires de la route ; ce coût a été différé de 30 ans, par rapport à la situation de référence.
- De même, en 2078, le 2^{ème} glissement rend nécessaire la reconstruction du 2^{ème} tronçon de route et la reconstruction du réservoir d'eau potable. Ces coûts ont été différés de 30 ans par rapport à la situation de référence.

- Bénéfices :

- En stabilisant le glissement pendant 30 ans, on évite le coût des expropriations qui auraient été nécessaires en absence d'action en 2035 (11 habitations) et 2048 (4 habitations).
- On évite également le coût de destruction de la route en 2035 et en 2048 ainsi que celle du réservoir AEP tout en les reportant de 30 ans.

²⁶ Selon les barèmes fiscaux en vigueur, la valeur d'usage d'un bien (usus) correspond à 60% de l'usufruit, qui lui-même correspond à un pourcentage de la valeur totale du bien décroissant en fonction de la durée de l'usufruit. Un usufruit temporaire de 30 ans représente par exemple 69% de la valeur totale du bien, alors qu'un usufruit temporaire de 20 ans représente 46% de la valeur totale du bien. Donc l'usus d'un bien sur 30 ans représente 41.4% de la valeur totale (60% * 69%).

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

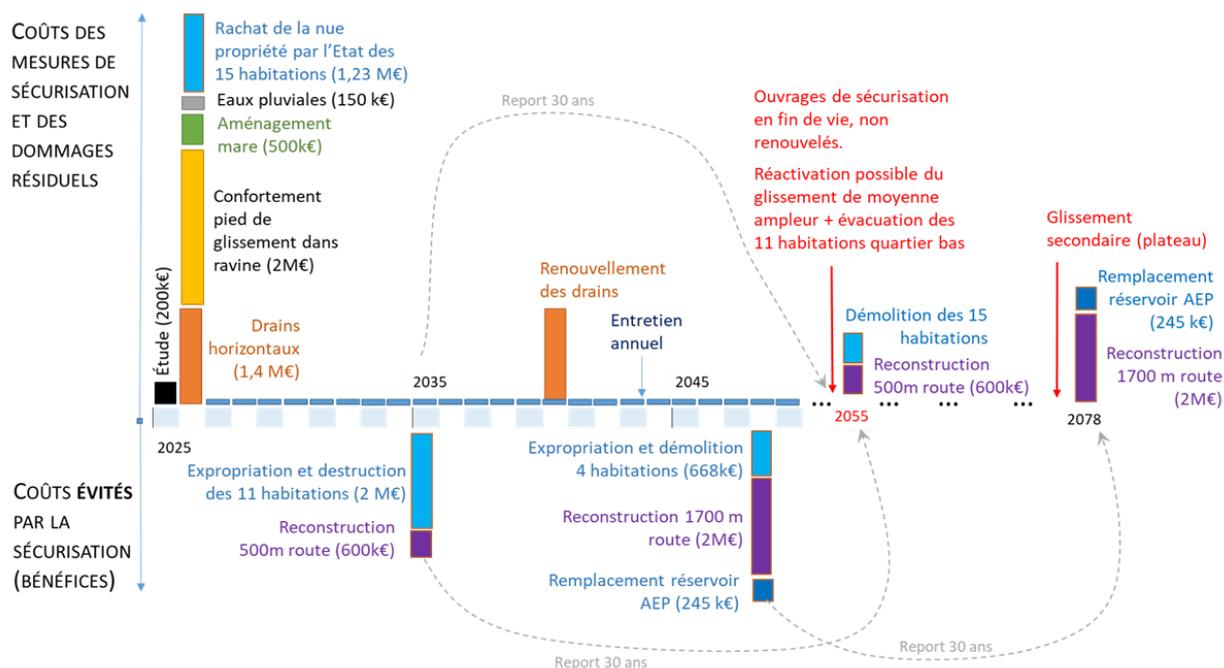


Figure 62 : Distribution temporelle des coûts et des bénéfices du projet de stabilisation du glissement de terrain de Mare à Nanace (horizon 30 ans)

Le calcul de la valeur actualisée nette (VAN) est effectué comme précédemment. Le cout actualisé est de 7.5 M€ et le bénéfice actualisé de 3.15 M€ soit une valeur actualisée nette de - 4.3 M€ et un ratio Bénéfices / couts de 42%. Ce scénario présente un **résultat légèrement plus favorable que le précédent**. Néanmoins, sa VAN reste inférieure à celle du scénario de référence. Sa mise en œuvre n'est donc pas pertinente au regard du critère économique.

7.3.5 Discussion

Les résultats de l'analyse montrent que, pour le cas semi-fictif considéré, et avec les nombreuses hypothèses réalisées, le coût des mesures de sécurisation, qu'elles soient mises en œuvre pendant 30 ou 100 ans, présentent une VAN inférieure au scénario de référence (Tableau 15). Leur mise en œuvre ne serait donc pas souhaitable d'un point de vue strictement économique d'autant qu'elles ne permettent pas d'éviter des victimes.

	Scénario de référence (acquisitions des habitations et reconstruction des équipements publics en fonction des dégâts)	Scénario sécurisation 30 ans	Scénario sécurisation 100 ans
Somme des coûts actualisés	3.59 M€	7.5 M€	9.2 M€
Somme des bénéfices actualisés	-	3.15 M€	3.8 M€
VAN	-3.59 M€	-4.3M€	-5.4 M€
Bénéfices/Coutés	-	42%	41%

Tableau 15 : Résultats de l'ACB appliquée aux scénarios de sécurisation à 30 et 100 ans.

7.4 CONCLUSION

7.4.1 Un travail exploratoire

L'analyse coûts-bénéfices n'est que très peu mobilisée pour éclairer les décisions publiques dans le domaine des risques gravitaires. Les deux ACB présentées ci-dessous représentent donc un travail exploratoire, dont le but est d'amorcer une réflexion pratique à travers des cas concrets, bien que semi-fictifs. L'objectif est d'illustrer la nature du raisonnement soutenant une analyse coûts-bénéfices visant à évaluer des scénarios de sécurisation vis-à-vis d'aléas gravitaires.

Pour aller plus loin, il serait intéressant de passer en revue de manière exhaustive la littérature scientifique et de réaliser un état de l'art relatif à l'utilisation de l'ACB appliquée à la gestion des risques gravitaires dans le monde. Cet état de l'art serait complété par une consultation d'experts et d'agences publiques qui utilisent déjà l'ACB de manière opérationnelle, notamment dans certains cantons de la Confédération Helvétique ou en région Piémont (Italie).

Une deuxième piste de progrès consisterait à passer en revue les guides méthodologiques relatifs à l'utilisation de l'ACB et l'AMC (analyse multicritère) dans le domaine de la gestion des inondations afin d'identifier les recommandations qui peuvent s'appliquer à l'ACB appliquée aux risques gravitaires. Cette réflexion mettra en évidence de nombreuses différences liées aux phénomènes eux-mêmes²⁷. Cette réflexion pourrait poser les bases d'une doctrine de l'ACB appliquée aux risques gravitaires et il n'y a probablement pas de meilleur laboratoire pour développer cette doctrine que l'île de La Réunion.

7.4.2 Limites des études de cas et pistes d'amélioration

Les études de cas présentées ci-dessus sont conduites avec des valeurs qui n'ont pas été vérifiées sur le terrain, qu'il s'agisse de la valeur des biens exposés, du coût des mesures de sécurisation et des probabilités d'impact. Cette réflexion pourrait donc se poursuivre en appliquant la méthode à un ou plusieurs cas réels, avec collecte des données nécessaires sur le terrain. Une fois ces cas identifiés, les pistes d'amélioration sont les suivantes :

- Pour l'aléa chute de blocs comme pour le glissement de terrain, il serait nécessaire d'affiner la caractérisation des enjeux (valeur, taux d'endommagement pour différents événements, caractérisation des dommages indirects) et le coût des mesures de sécurisation (donc leur dimensionnement technique).
- Concernant l'aléa chute de blocs, il faudrait intégrer dans l'analyse les événements de fréquence supérieure et inférieure à 30 ans. Il s'agit en particulier de tenir compte de probabilités de chute (plus fréquente) de plus petits blocs que celui de 5 m³ considéré dans cet exemple, et qui peuvent endommager les biens sans les détruire et sans faire de victimes. La protection mise en place permet d'éviter les dommages associés à ces événements de moindre ampleur, générant des bénéfices que nous n'avons pas considérés, sous-estimant ainsi l'intérêt de la mesure de protection. Il faudrait également

²⁷ Par exemple, l'inondation génère des dommages répétitifs aux biens, mais jamais irréversibles. Les biens peuvent être réparés après chaque événement. Ceci permet de raisonner en dommage moyen annuel. Dans le cas des risques gravitaires, le dommage est le plus souvent irréversible, c'est-à-dire que les biens sont détruits (et ne sont pas reconstruits).

tenir compte de la probabilité faible que survienne un écroulement de grande ampleur, affectant toutes les habitations et générant un nombre important de victimes. Les dommages associés, peu probables mais importants, peuvent en effet être évités par le scénario « relocalisation », ce qui contribue à en justifier l'intérêt, de même pour la solution de protection totale, certes non dimensionnée pour un tel événement mais qui contribuera à réduire son impact sur les enjeux. Ces pistes de progrès supposent une amélioration de la connaissance de l'aléa, via un travail de modélisation physique plus poussé sur un site réel. Le site de « Camp Lila » à l'entrée du bourg de Salazie semble être un bon candidat pour une telle étude de cas.

- Concernant l'aléa glissement de terrain, la principale lacune de l'exemple semi-fictif présenté ci-dessus est relative au dimensionnement des mesures de sécurisation à mettre en place. Ces mesures présentant des coûts très importants, toute erreur sur leur dimensionnement impacte fortement le résultat de l'analyse. Le choix d'un terrain d'étude pour réaliser une ACB doit donc être guidé par le niveau de connaissance des phénomènes et la capacité des experts à dimensionner puis évaluer les coûts des mesures de stabilisation.
- L'analyse coûts-bénéfices pourrait enfin être utilisée comme support de discussion avec les acteurs concernés par les aléas. Elle procure en effet un cadre d'analyse qui facilite les échanges, car proposant un cadre unique de quantification de tous les effets en unité monétaires. Il semblerait donc utile de poursuivre le travail initié dans cette étude en associant quelques acteurs locaux à une éventuelle étude de cas réelle.
-

8 Conclusion

Cette étude, cofinancée par la DEAL de La Réunion et le BRGM a eu pour objectif d'élaborer une cartographie du risque de mouvements de terrain sur le territoire de Salazie afin d'identifier les secteurs les plus exposés et de prioriser les actions de sécurisation à envisager.

La cartographie de l'aléa mouvement de terrain, incluant les phénomènes de chute de blocs et glissements de terrain a été réalisée pour des événements dits « fréquents », dont la période de retour est de l'ordre de trente ans. Cette cartographie diffère donc de l'aléa cartographié dans le cadre du PPR, évalué pour une période de référence de 100 ans et ne peut donc lui être comparé.

Dans un second temps, la caractérisation des enjeux du territoire a été réalisée à partir des bases de données existantes et via une approche participative qui a conduit à la consultation de divers acteurs du territoire, techniciens et élus. Les sept catégories d'enjeux retenues, incluant des critères tels que la vulnérabilité de la population ou l'activité économique sur le territoire ont fait l'objet d'une analyse multicritères et d'une pondération établie à partir des entretiens avec les acteurs et visant à mettre en avant les différentes perceptions du risque chez chacun d'entre eux. Ce travail a révélé une grande hétérogénéité des perceptions vis-à-vis de l'enjeu vies humaines, entre techniciens et élus mais également au sein même de chaque groupe. Ceci indique que chaque acteur, en fonction de ses missions professionnelles, de son expérience du risque et de son vécu, tend à donner un niveau de priorité différent à la protection des vies humaines, dans le cadre d'une stratégie globale de sécurisation des enjeux d'un territoire.

La carte des enjeux pondérée, croisée à l'aléa mouvement de terrain permet d'obtenir une carte de risque, déclinée en 5 niveaux de risque (1 à 5). Cette carte fait ressortir le secteur de Camp Lilas/Salazie village comme le secteur le plus exposé avec des niveaux de risque élevés, aussi bien pour l'aléa chute de blocs que pour l'aléa glissement de terrain spontané. D'autres secteurs tels que Grand Ilet (aléa glissement lent), Bras Citronnier (chute de blocs), L'Escalier ou la Savane constituent des zones exposées.

Enfin, une analyse coût-bénéfices (ACB) préliminaire réalisée sur deux cas semi-fictifs, permet d'illustrer les étapes de la démarche pouvant être mise en œuvre pour réduire le risque, en comparant différents scénarios (sécurisation partielle, complète ou délocalisation des enjeux) au regard de critères humains, économiques et techniques. Le critère social (acceptabilité par la population), plus difficilement quantifiable, n'est pas inclus dans l'analyse.

Dans le cadre d'une poursuite du plan d'action de sécurisation des enjeux de Salazie, une analyse coût-bénéfice complète et détaillée sur une zone cible sera nécessaire afin d'orienter vers les choix définitifs et la prise de décision. L'élaboration d'une doctrine de l'ACB appliquée aux risques gravitaires, notamment basée sur les cas d'études concrets menés à La Réunion constitue une piste de développement quasi-inexplorée et pouvant s'avérer particulièrement utile dans le domaine de la gestion des risques.

La démarche suivie au cours de ce travail (approche participative, intégration de l'aspect socio-économique des enjeux, analyse multicritère, ACB...) permet d'inclure des dimensions d'enjeux rarement prises en compte (vulnérabilité de la population...), de s'extraire du seul dire d'expert et d'objectiver le niveau de risque. Cette démarche est ainsi particulièrement intéressante à décliner sur d'autres territoires soumis aux aléas naturels et sur lesquels des stratégies de sécurisation et/ou d'adaptation à l'échelle locale doivent être mises en œuvre.

9 Références bibliographiques

Carlados, S. (2017). Approche intégrée d'aide à la décision basée sur la propagation de l'imperfection de l'information – application à l'efficacité des mesures de protection torrentielles. Thèse de doctorat, ENSMSE ; Sciences et génie de l'environnement, Saint-Etienne, France, 394p.

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

Groupe de travail MEZAP (2021). Guide technique MEZAP. Caractérisation de l'aléa rocheux dans cadre d'un Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRn) ou d'un Porter à Connaissance (PAC). BRGM, 2021. Collection scientifique et technique. ISBN : 978-2-7159-2760-5.

HYDRETUDES (2019). Etudes pré-opérationnelles. Habitats indignes en zone à risque d'aléa fort. Phase 2 : Enquêtes – Diagnostic de vulnérabilité des habitats indignes. Rapport RE17-140, V1, Mai 2019 – Etude sous maîtrise d'ouvrage CIREST.

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

Nicolet, P., Jaboyedoff, M., Cloutier, C., Crosta, G. B., & Lévy, S. (2016). Brief communication: On direct impact probability of landslides on vehicles. Natural Hazards and Earth System Sciences, 16(4), 995-1004.

Rey, A. (2016). PPR multi-aléas des communes de La Réunion. Propositions d'évolutions méthodologiques. Rapport Final. BRGM/RP-66346-FR, 167p.

Rinaudo, J.D., Rey, A., Ritter, A., Desprats J.F., Magat, E., David, D. (2019) – Evaluation de l'impact des zones rouges des Plans de Prévention des Risques sur les transactions immobilières à La Réunion. Rapport final. BRGM/RP-69239-FR, 69p., 17 fig.

Saati, T. (1980). Multicriteria decision-making – the analytical hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. Pittsburgh: Mc Graw-Hill (Tx) USA, 297 p.

Annexe 1 -

Grilles de définition de l'aléa chute de blocs et glissement de terrain spontané

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

Figure 63– Définition de l'indice d'intensité de l'aléa rocheux en fonction du volume et du potentiel de dommages (MEZAP, 2014).

Indice d'activité	Description
Faible	De l'ordre d'un évènement tous les 30 ans
Moyen	De l'ordre d'un évènement tous les 3 ans
Fort	De l'ordre d'un évènement tous les 0.3 ans (3 évènements/an)

Figure 64 – Indice d'activité pris en compte pour un scénario de période de référence 30 ans pour l'aléa chute de blocs.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain – Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

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

Figure 65 - Matrice de qualification de la probabilité d'occurrence d'une chute de blocs en un point donné (MEZAP, 2014).

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

Figure 66 - Grille de définition de l'aléa chute de blocs (d'après MEZAP, 2014).

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

Figure 67 - Définition de l'intensité d'un glissement de terrain (Rey, 2016).

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

Figure 68 - Classification des principales formations géologiques de La Réunion selon leur nature et leur aspect (Rey, 2016)

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

Figure 69 - Probabilité d'occurrence d'un glissement de terrain (Rey, 2016).

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

Figure 70 - Définition de l'aléa glissement de terrain pour les glissements spontanés.

Annexe 2 Cartes détaillées des secteurs moins exposés au risque susceptibles de pouvoir accueillir une urbanisation nouvelle, selon le zonage du PLU et la présence de bâti existant

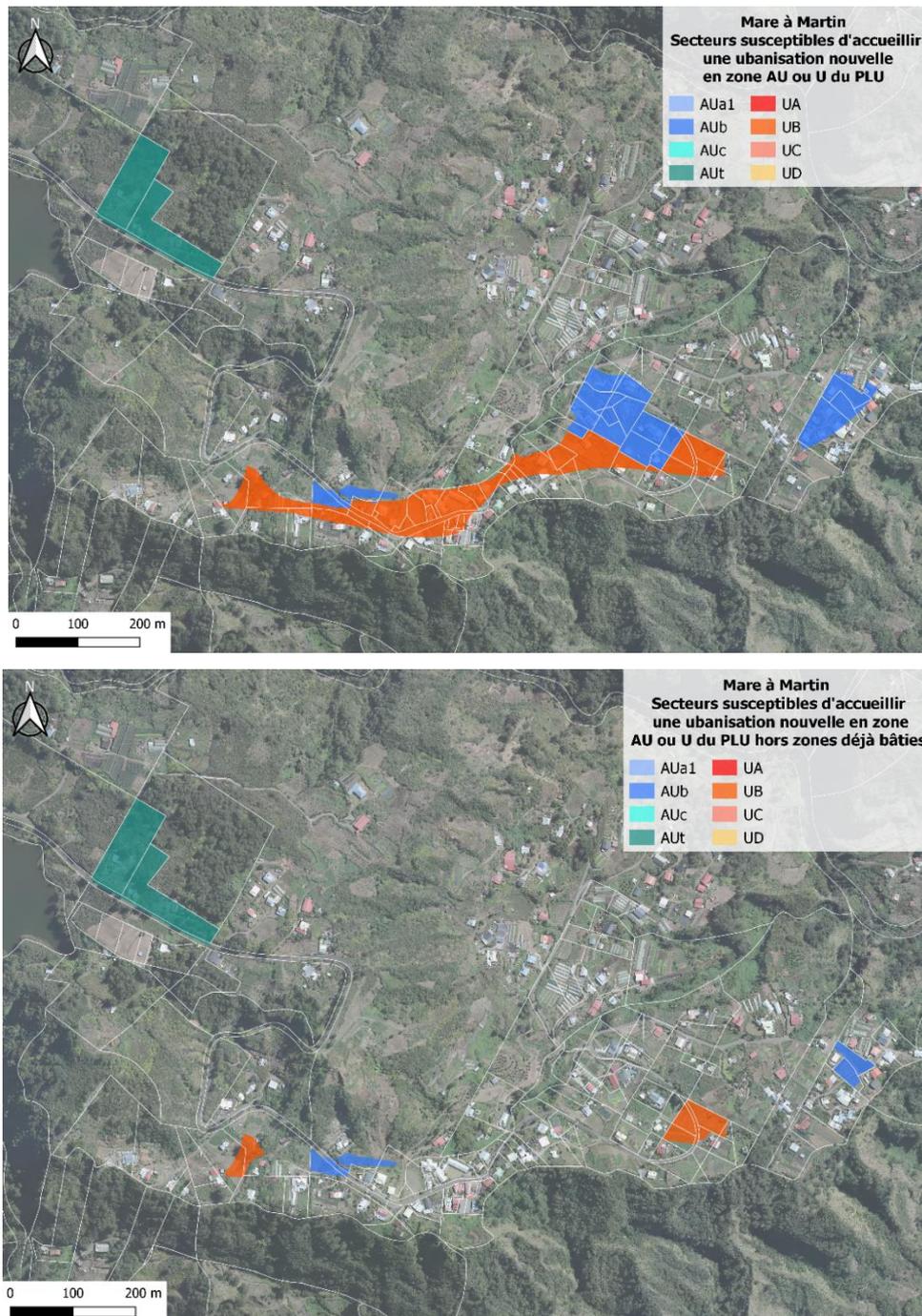


Figure 71 – Zones potentiellement urbanisables sur le secteur Mare à Martin. Carte du bas : Zonage excluant les secteurs déjà bâtis.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain –
Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

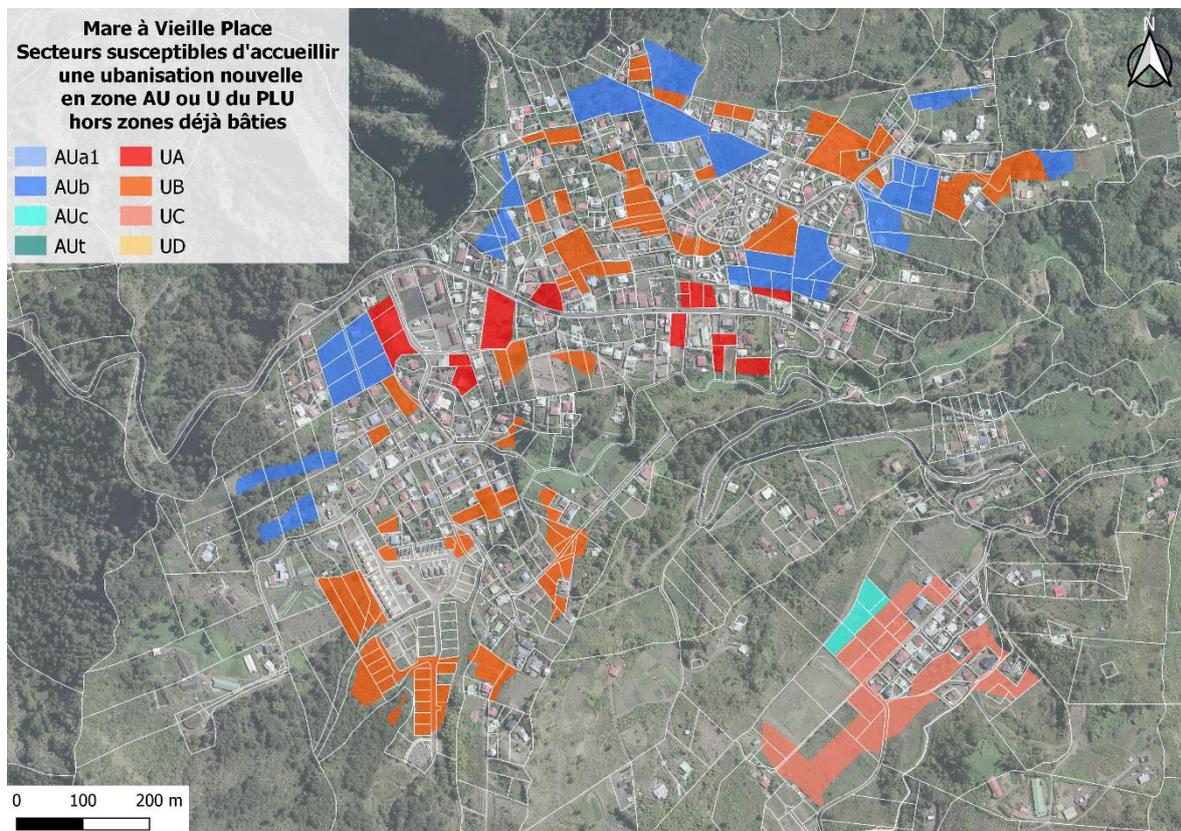
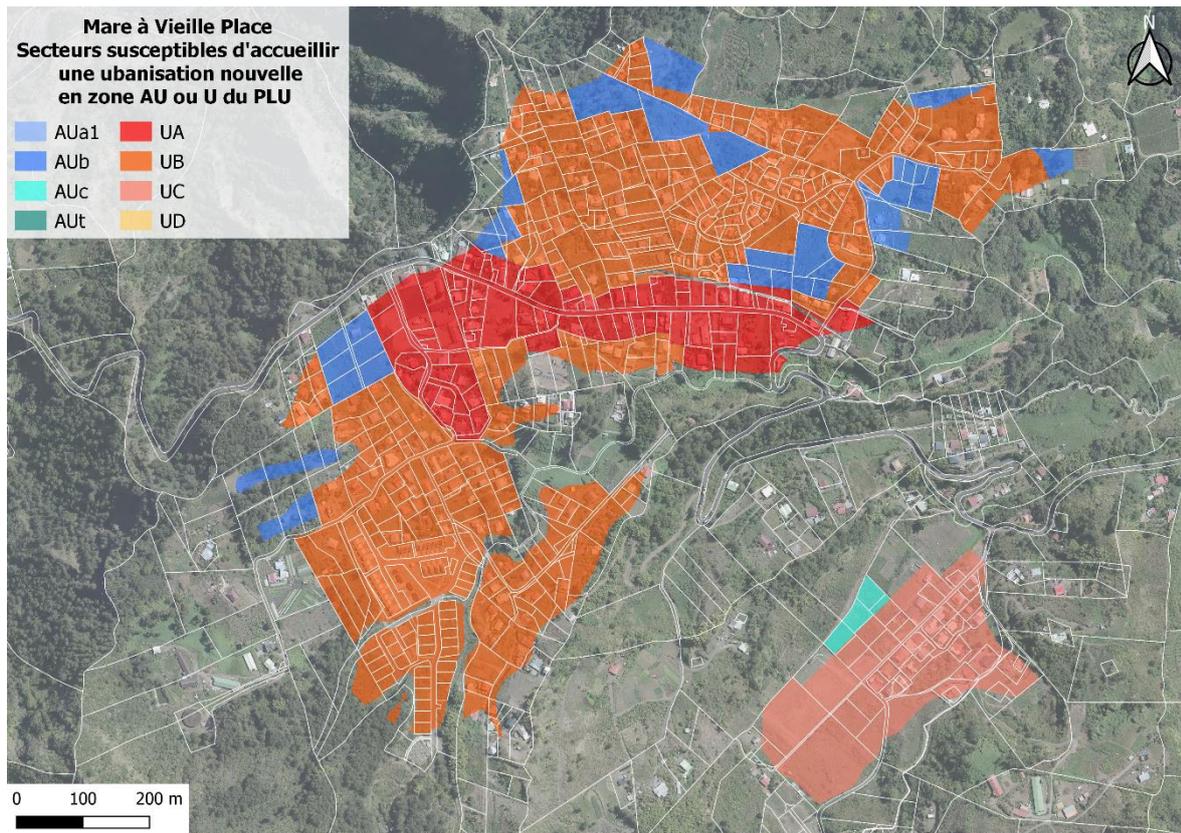


Figure 72 - Zones potentiellement urbanisables sur le secteur Mare à Vieille Place. Carte du bas :
Zonage excluant les secteurs déjà bâtis.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain –
Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

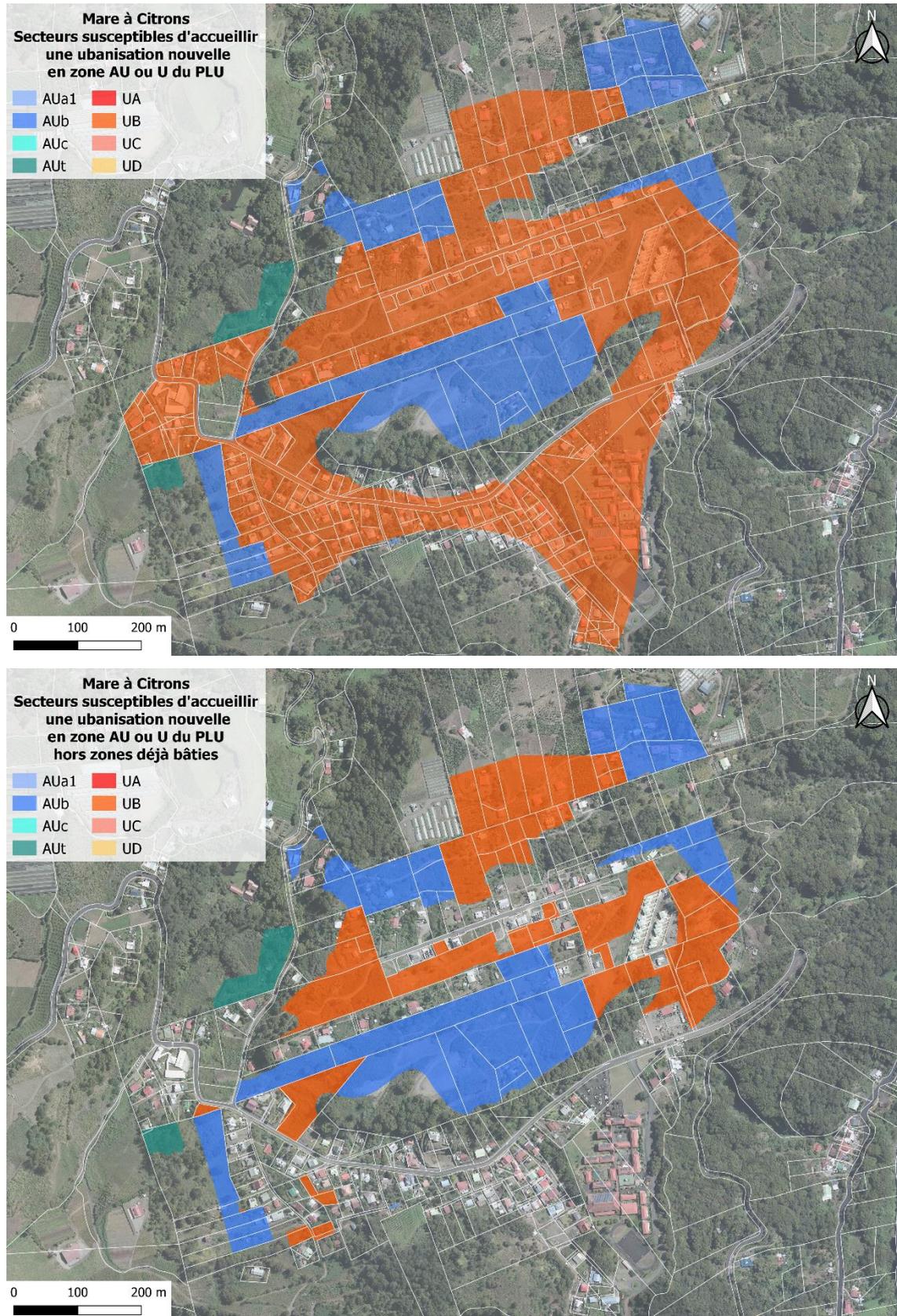


Figure 73 - Zones potentiellement urbanisables sur le secteur Mare à Citrons. Carte du bas : Zonage excluant les secteurs déjà bâtis.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain –
Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

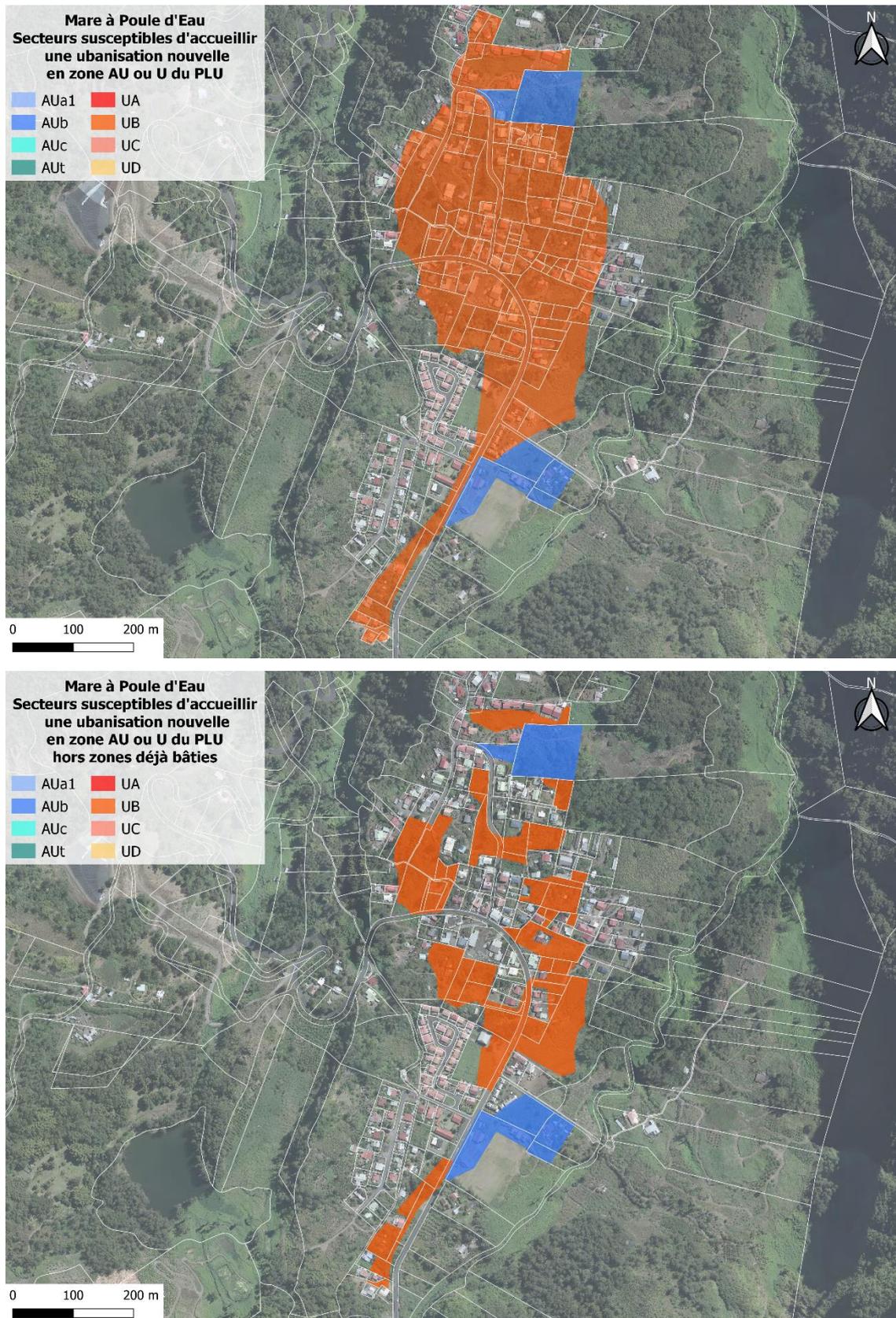


Figure 74 - Zones potentiellement urbanisables sur le secteur Mare à Poule d'Eau. Carte du bas : Zonage excluant les secteurs déjà bâtis.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain –
Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

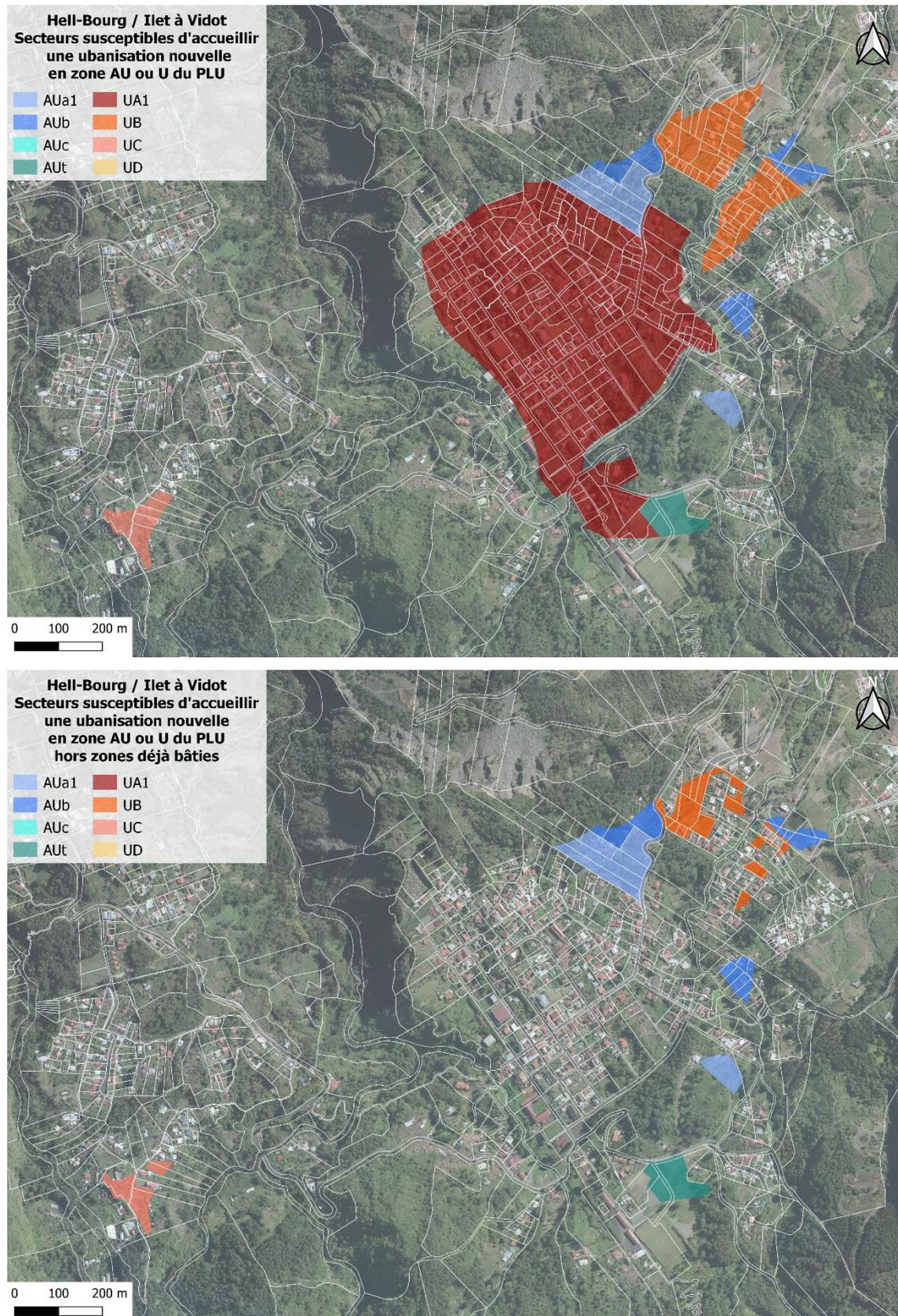


Figure 75 - Zones potentiellement urbanisables sur le secteur d'Hell-Bourg / Ilet à Vidot. Carte du bas :
Zonage excluant les secteurs déjà bâtis.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain –
Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

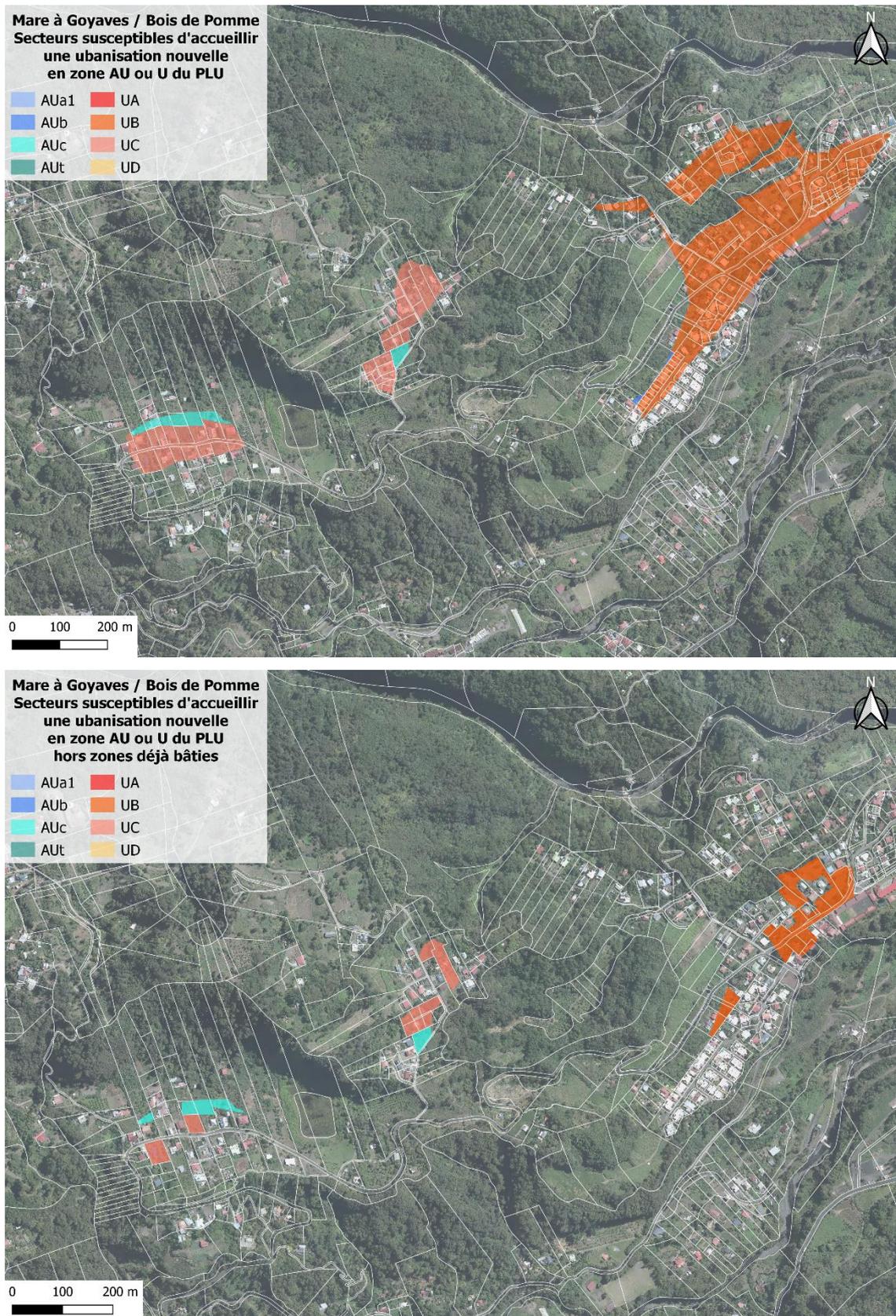


Figure 76 - Zones potentiellement urbanisables sur le secteur de Mare à Goyaves / Bois de Pomme.
Carte du bas : Zonage excluant les secteurs déjà bâtis.

Cartographie de la vulnérabilité socio-économique d'un territoire soumis aux mouvements de terrain –
Hiérarchisation du niveau de risque (Cirque de Salazie, La Réunion).

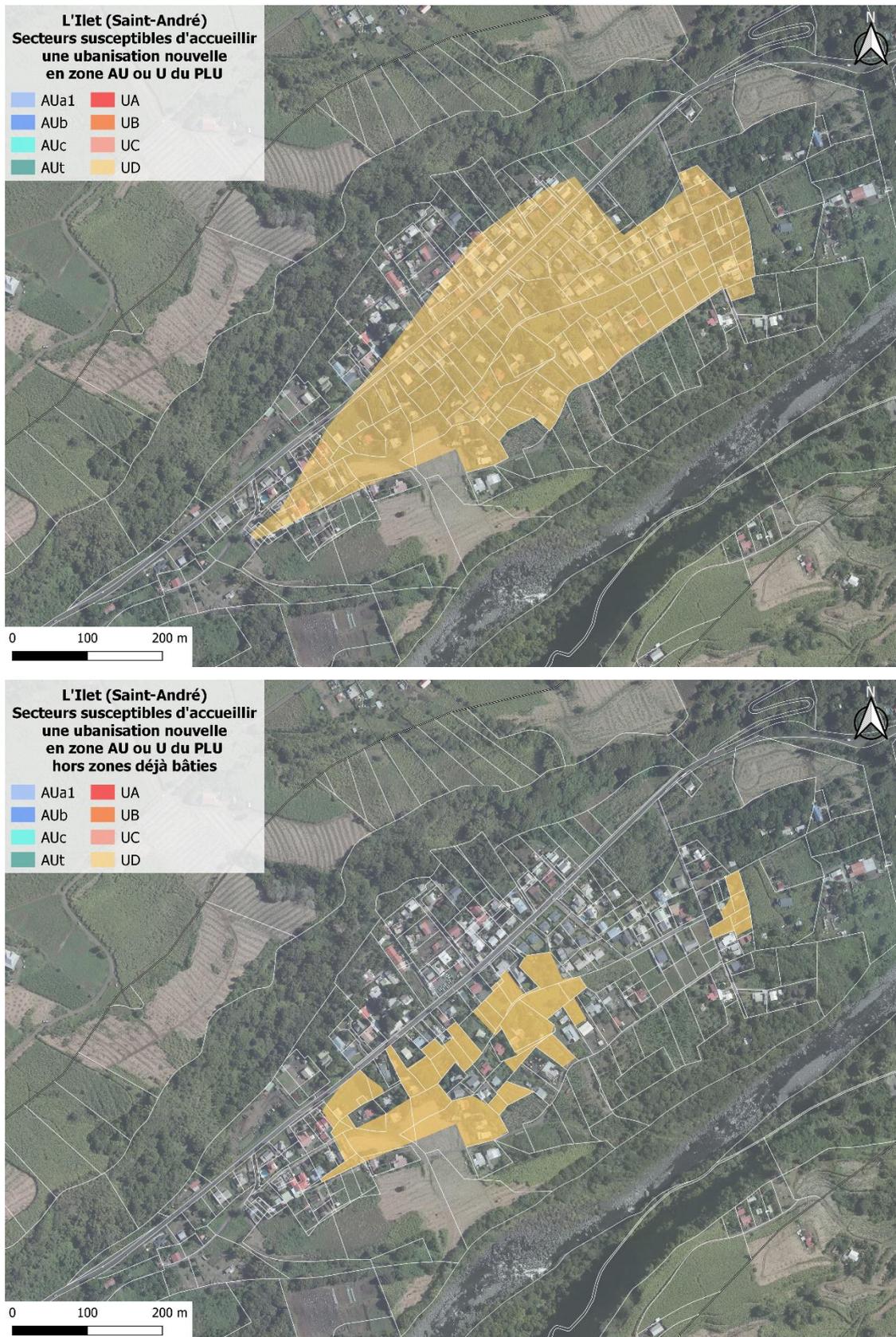


Figure 77 - Zones potentiellement urbanisables sur le secteur de l'Ilet à Saint-André. Carte du bas : Zonage excluant les secteurs déjà bâtis.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34
Direction régionale de La Réunion
5 Rue Sainte-Anne 97400 Saint-Denis
Tél. : 02 62 21 22 14
www.brgm.fr