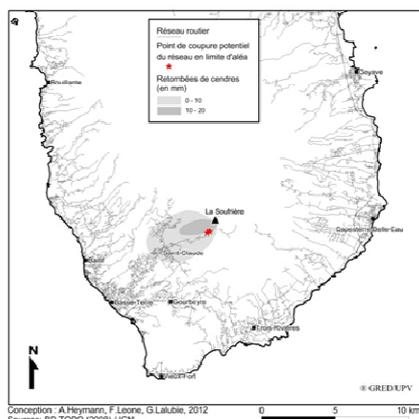


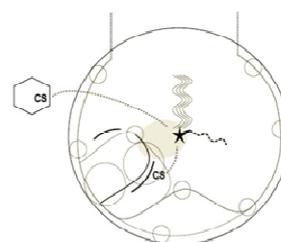
C.3.4 SCENARIOS DE PERTES D'ACCESSIBILITE ROUTIERE POUR LA GUADELOUPE

Scénario 1 : 8 juillet 1976

Points de coupures par aléa :



Chorème synthétique des aléas :



Source : G.Lalubie, 2012

Les chiffres de la perte d'accessibilité :

Date	Scénario	Longueur Inaccessible (km)	Pourcentage Inaccessible
8/07/1976	1	3	0,06%
08/1976	2	63	1,37%
11/1976	3	317	6,92%
01-03/1978	4	317	6,92%

Représentation de l'accessibilité du réseau routier :

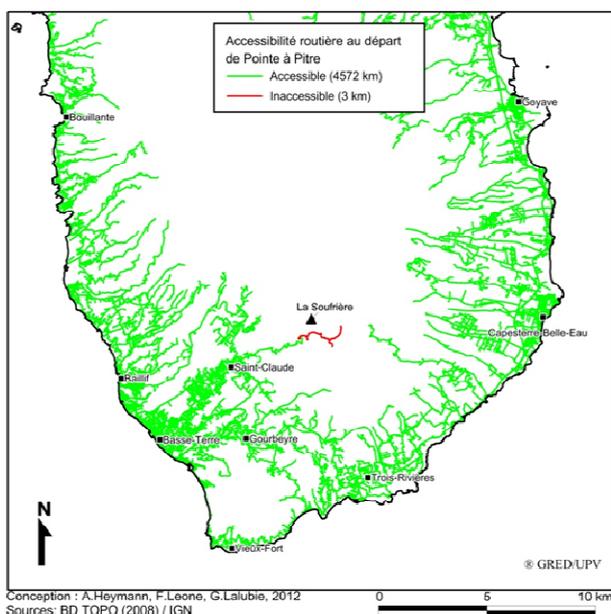
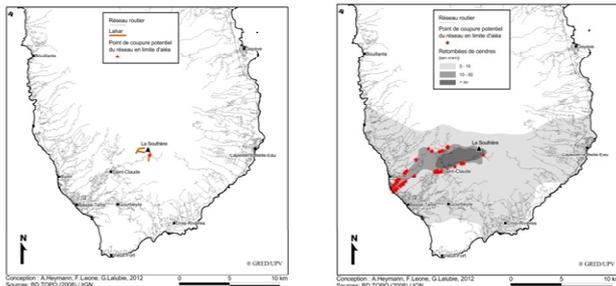


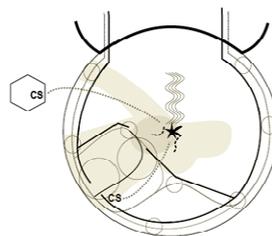
Figure C23 – Pertes d'accessibilité routière pour le scénario du 8 juillet 1976 (Guadeloupe).

Scénario 2 : août 1976

Points de coupures par aléa :

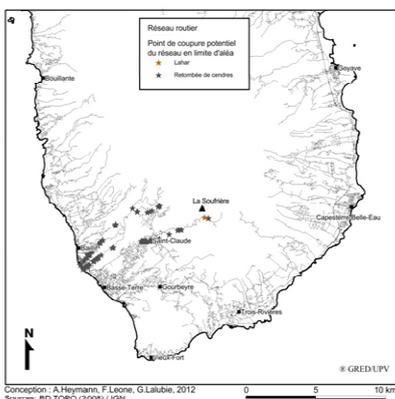


Chorème synthétique des aléas :



Sources : G.Lalubie, 2012

Points de coupures pour l'ensemble des aléas :



Les chiffres de la perte d'accessibilité :

Date	Scénario	Longueur inaccessible (km)	Pourcentage inaccessible
8/07/1976	1	3	0,06%
08/1976	2	63	1,37%
11/1976	3	317	6,92%
01-03/1978	4	317	6,92%

Représentation de l'accessibilité du réseau routier :

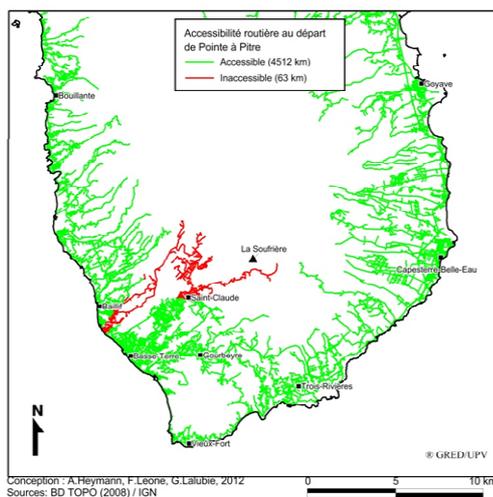
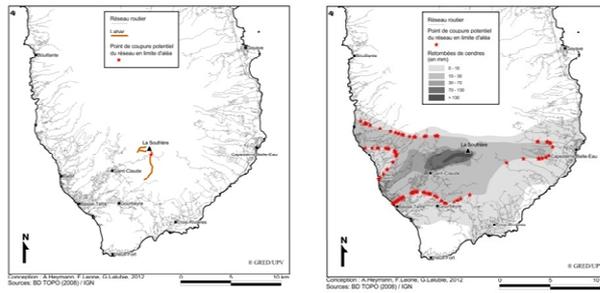


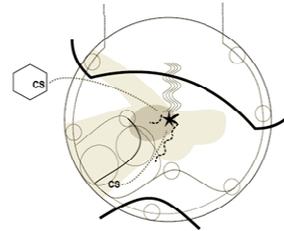
Figure C24 – Pertes d'accessibilité routière pour le scénario d'août 1976 (Guadeloupe).

Scénario 3 : novembre 1976

Points de coupures par aîlé :

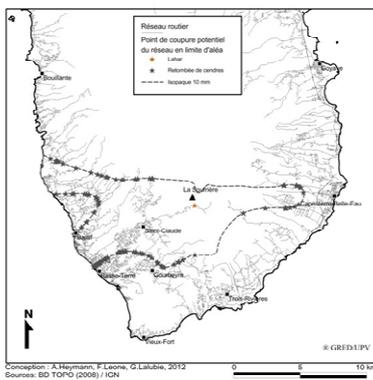


Chorème synthétique des aîlés :



Source: G.Lalubie, 2012

Points de coupures pour l'ensemble des aîlés :



Les chiffres de la perte d'accessibilité :

Date	Scénario	Longueur inaccessible (km)	Pourcentage inaccessible
8/07/1976	1	3	0,06%
08/1976	2	63	1,37%
11/1976	3	317	6,92%
01-03/1978	4	317	6,92%

Représentation de l'accessibilité du réseau routier :

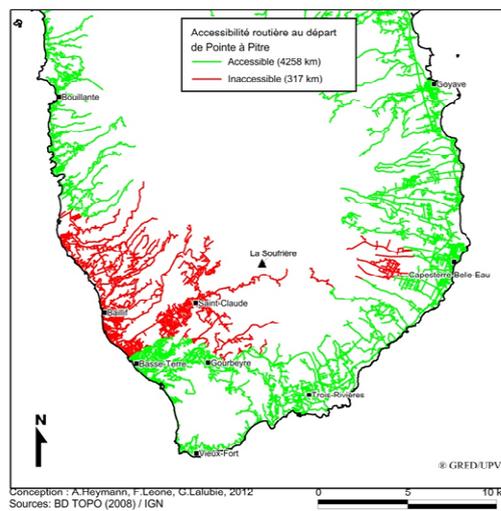
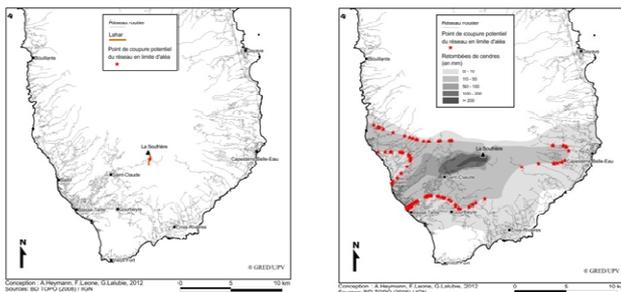


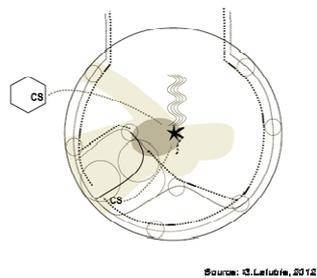
Figure C25 – Pertes d'accessibilité routière pour le scénario de novembre 1976 (Guadeloupe).

Scénario 4 : janvier-mars 1978

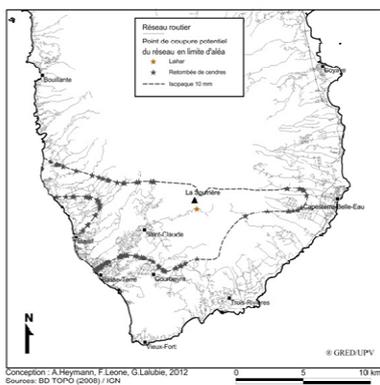
Points de coupures par aléa :



Chorème synthétique des aléas :



Points de coupures pour l'ensemble des aléas :



Les chiffres de la perte d'accessibilité :

Date	Scénario	Longueur Inaccessible (km)	Pourcentage Inaccessible
8/07/1976	1	3	0,06%
08/1976	2	63	1,37%
11/1976	3	317	6,92%
01-03/1978	4	317	6,92%

Représentation de l'accessibilité du réseau routier :

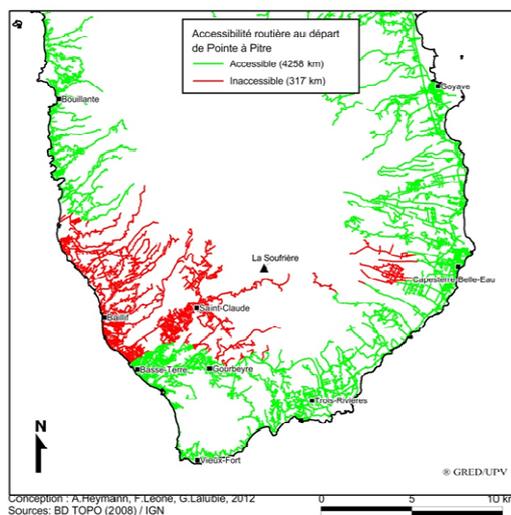


Figure C26 – Pertes d'accessibilité routière pour le scénario de janvier-mars 1978 (Guadeloupe).

D MODELISATION DE L'ACCESSIBILITE ROUTIERE ET GESTION DE CRISE VOLCANIQUE

D.1 INTRODUCTION

Cette problématique de l'accessibilité territoriale par voie routière repose sur plusieurs notions, propres à la géographie des risques ou empruntées à la géographie des transports, ce qui permet d'opérer par la même occasion un couplage entre différentes approches qui apparaît encore sous exploité dans une perspective d'aide à la gestion de crise. En fonction des enjeux (populations exposées, ressources vitales, centres de secours), des lieux de départ et d'arrivée (espaces à risque, refuges ou ressources), mais également en fonction des phases habituelles d'une crise éruptive, plusieurs types d'accessibilité territoriale peuvent être définis et analysés, voire modélisés : (1) entre les zones de danger et les zones refuges en phase d'évacuation préventive, (2) entre les zones ressources et les zones impactées en phase de secours, (3) entre les zones refuges et les zones ressources en phase de récupération (figure D1). Il convient également d'y ajouter les accessibilités et mobilités internes à chaque espace de la crise (Leone, 2013).



Figure D1 - Différents types d'accessibilité territoriale en lien avec une crise volcanique

Dans le projet CASAVA, notre attention s'est focalisée dans un premier temps sur le risque de dégradation du réseau routier en cas de lahars et de l'accessibilité du territoire associée. On sait que les lahars sont des phénomènes qui peuvent survenir dès les premiers stades éruptifs et qu'ils peuvent se manifester durant plusieurs années. Les recherches documentaires ont d'ailleurs permis d'en recenser les principaux effets sur les réseaux routiers de Martinique et de Guadeloupe. Ils agissent préférentiellement par effet d'obstruction des voies et de destructions des ponts comme les autres types de coulées de débris. Dans une démarche probabiliste visant à évaluer le risque d'isolement du territoire, il convient d'abord d'identifier les points de coupure potentiels d'itinéraires privilégiés entre les zones refuges et les zones de danger. Ce risque de coupure du réseau sera mesuré au moyen d'un indice approprié (IRC) au niveau de chaque point de franchissement des cours d'eau. Nous pourrions ensuite évaluer au moyen d'indices synthétiques (IRI) le risque d'isolement des mailles du territoire dont l'accessibilité dépend des itinéraires concernés. Ces itinéraires privilégiés ont été générés au moyen d'algorithmes appliquant la théorie des graphes. Ces mêmes algorithmes permettront dans une seconde approche d'optimiser le découpage des zones à évacuer et de modéliser la charge du réseau routier pour différents scénarios d'évacuation.

D.2 LA VULNERABILITE DES RESEAUX ROUTIERS FACE AUX LAHARS

D.2.1 LES IMPACTS ROUTIERS DES LAHARS HISTORIQUES EN MARTINIQUE ET GUADELOUPE

Depuis le début du XV^{ème} siècle on rapporte un grand nombre de lahars sur les flancs de ces deux volcans. Lalubie (2011) recense 165 lahars dans sa base de données *French Antilles Historial Lahar* (BDfahl) spécialement réalisée dans le cadre du projet CASAVA. On y trouve 39 évènements en Guadeloupe entre 1530 et 2009, dont 11 lahars primaires affectant les rivières du Galion et du Carbet lors de la crise éruptive de 1976. En Martinique, entre 1605 et 2010, ce sont près de 126 lahars qui ont été rapportés. Ce grand nombre s'explique par les crises éruptives majeures de 1902 et 1929 avec 56 lahars pour la seule année 1902, et qui ont causé la mort de près de 430 personnes avant le 8 mai (Kennan, 1902 ; Lacroix, 1904). Entre 1929 et 1932 on recense seulement de 10 lahars. La plupart se sont produits sur le même versant sud-ouest. Il faut aussi souligner le nombre important de lahars secondaires, notamment pour la rivière du Prêcheur. On recense pour cette dernière 51 lahars secondaires, dont 27 pour l'année 2010.

Parmi tous ces lahars historiques, au moins 13 % ont submergé des routes en Guadeloupe, contre 38 % en Martinique (**figure D2**). En Guadeloupe ce sont les RD 4 (Rivière du Grand Carbet, 1976) et RD 11 (Rivière le Galion, 1976) et une route traversant la Grande Rivière de la Capesterre (1843) qui ont été impactées. En Martinique, les dommages sur le réseau routier littoral intéressent principalement les lahars de 1902 au niveau des rivières du Prêcheur, des Pères, Sèche, de Basse Pointe, Falaise et Capot, Claire, Blanche et sans Nom (toutes deux disparues) et Grande Rivière. Mais d'autres évènements plus ponctuels ont également touché le réseau routier martiniquais en 1929, 1970, 1976, 1980 et 2010. D'après ces témoignages historiques, un seul pont aurait été détruit partiellement ou totalement en Guadeloupe (en 1530), contre 9 en Martinique (1902, 1976, 1980, 2010). Le dernier lahar ayant détruit un pont en Martinique date du 20 juin 2010 au Prêcheur, au niveau de la RD qui franchit la rivière du même nom (**figure D3**). Il a été détruit 2 fois auparavant (1976, 1980).

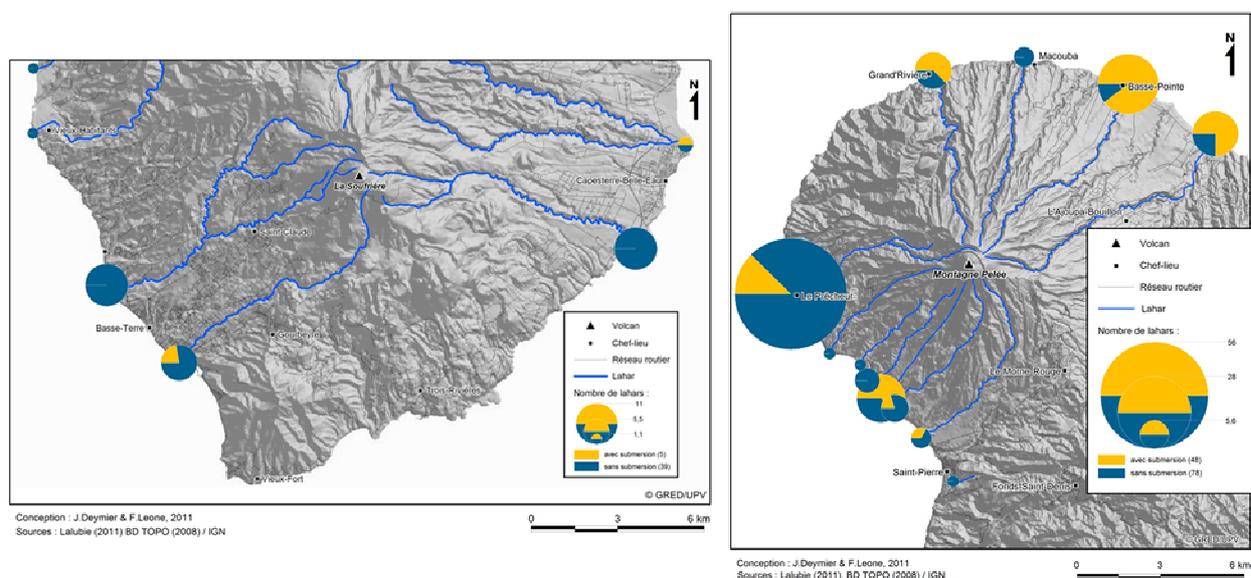


Figure D2 - Fréquence des lahars historiques connus en Guadeloupe et Martinique depuis 1530 (par cours d'eau), avec ou sans impacts sur le réseau routier.



**Figure D3 – Le pont de la Rivière du Prêcheur détruit par le lahar du 20/06/2010
(Photo G. Lalubie, le 23/06/10)**

D.2.2 TYPOLOGIE DES DOMMAGES SUR LES OUVRAGES DE FRANCHISSEMENT

D'après la littérature et nos observations de terrain, nous avons pu établir 6 types principaux d'endommagement des ouvrages de franchissement lors du passage d'un lahar, d'intensité croissante au regard des coûts de réparation et des pertes fonctionnelles induites (temps d'interruption) (**tableau C1**). Les routes longeant les cours d'eau peuvent aussi être endommagées selon deux types de dommages : l'érosion de la berge support de la chaussée qui peut provoquer un effondrement de la chaussée, ou bien encore l'obstruction de la chaussée.

Mode d'endommagement	Intensité	Illustration	Commentaires
Comblement de la section libre	1		C'est le cas le plus fréquent lors de passage de lahars. Les matériaux transportés sont déposés sous le pont. La quasi-totalité de la section libre peut être comblée. Le prélèvement des matériaux s'impose. En dehors d'une fermeture préventive de l'ouvrage lors de l'apparition du phénomène, aucune interruption de la circulation n'est nécessaire par la suite. <i>Rivière du Prêcheur, Martinique. Source OVSM, 1998</i>
Obstruction de la chaussée	2		L'obstruction de la chaussée survient lorsque le lahar submerge l'ouvrage. Elle peut être favorisée par une section libre réduite par le passage d'un précédent lahar. <i>Rivière du Prêcheur, Martinique le 23/06/2010. Obstruction de la chaussée (en rouge). Source Lalubie G.</i>

<p>Dégradation du tablier</p>	<p>3</p>		<p>Cette dégradation est favorisée par des blocs de grande taille. Il peut s'agir d'impacts sur le revêtement, d'arrachage des barrières de sécurité, ou de la destruction d'une partie du tablier</p> <p><i>Rivière du Prêcheur, Martinique le 14/07/2010. Source OVSM</i></p> <p><i>Rivière du Prêcheur, Martinique, avril 2011. Source Leone F. La partie manquante de l'ouvrage est mise ici en évidence en rouge.</i></p>
<p>Affouillement des piles</p>	<p>4</p>		<p>A la faveur du potentiel érosif très élevé, on peut assister à une érosion basale des piles et des culées latérales. Dès lors des « fosses d'affouillement » apparaissent (Warren, 2007). Si l'érosion au pied des piliers est trop importante, la stabilité de l'ouvrage est compromise.</p> <p><i>Affouillement des culées. Source Colson B., USGS (1979)</i></p> <p>Cet affouillement peut avoir lieu sur les culées latérales comme sur la ou les pile(s) centrale(s). Les témoignages vidéos mettent en évidence un affouillement plus fréquent à la base des piliers centraux.</p> <p><i>Rivière Pabelan, Merapi, Indonésie. Source Capture vidéo (JEBATAN TLATAR_dec2010_Pabelan_Merapi)</i></p>
<p>Déstabilisation des piles</p>	<p>5</p>		<p>La déstabilisation des piles est l'étape qui suit leur affouillement. Dès ce moment l'intégrité du pont est compromise, la pile peut basculer entraînant avec elle l'effondrement du tablier.</p> <p><i>Pile d'un pont indonésien déstabilisé. Source Capture de vidéo (JEBATAN TLATAR_dec2010_Pabelan_Merapi)</i></p>
<p>Destruction du tablier</p>	<p>6</p>		<p>La destruction peut survenir suite à la déstabilisation d'un ou plusieurs piliers soutenant le tablier. Elle peut aussi se produire lorsque des blocs importants viennent percuter la structure de l'ouvrage. Le type de matériaux utilisé (bois, maçonnerie en pierre, acier ou béton armé) influence la résistance de l'ouvrage.</p> <p><i>Pont détruit suite à la déstabilisation de sa pile centrale. Source capture vidéo, télévision indonésienne (disponible sur http://jurnalmagelang.wordpress.com/)</i></p>

Tableau D1 - Typologie des principaux modes d'endommagement des points de franchissement de type « pont » face aux lahars.

D.2.3 CONSTITUTION D'UNE BD SUR LES POINTS DE FRANCHISSEMENT DES COURS D'EAU

La base de données « Points de franchissement » a été construite lors d'une mission de terrain de deux semaines en Martinique et Guadeloupe. Nous avons retenu des zones d'étude centrées sur chaque volcan, d'un rayon de 15 km en Guadeloupe et 10 km en Martinique. Elles ont été délimitées en fonction de l'étendue des bassins versants susceptibles d'alimenter des lahars. Pour chaque point de franchissement diagnostiqué (88 en Guadeloupe, 108 en Martinique), nous avons renseigné plusieurs critères pouvant jouer sur leur vulnérabilité physique en cas de lahar : 1. Nature/type de franchissement (ponts en maçonnerie, structure métallique, béton armé ou précontraints ; gués et radiers, buses d'écoulement) (figure D4), 2. nombre de piles centrales pour les ponts, 3. surface de la section libre. Chaque point a été photographié et géoréférencé (figure D5). Des informations fournies par la BD TOPO de l'IGN sur le type de voie passant sur l'ouvrage ont également été précisées. Les métadonnées de la base finale sont :

- ID_TERRAIN : Identifiant des points.
- HAUTEUR_LI : Hauteur libre sous l'ouvrage.
- LONGUEUR_L : Longueur libre sous l'ouvrage.
- DIAM_TRE : Diamètre de la buse (uniquement en présence de buse).
- SECTION_LI : Section libre sous l'ouvrage.
- NBRE_PILE : Nombre de piles centrales.
- NUM_PHOTO : Numéros des photographies prises lors du diagnostic de terrain.
- TYPE_FRANC : Type de franchissement :
gué, radier, buse, structure métallique porteuse, maçonnerie, béton armé ou précontraint.
- NOM_RIVIER : Nom de la rivière franchie.
- ID_ROUTE : Identifiant de la route.
- NATURE : Nature de la route.
- NUMERO : Numéro de la route.
- IMPORTANCE : Importance de la route.)
- CL_ADMIN : Classement administratif de la route.
- LARGEUR : Largeur de la route.
- NB_VOIES : Nombre de voies .
- SENS : Sens de circulation.

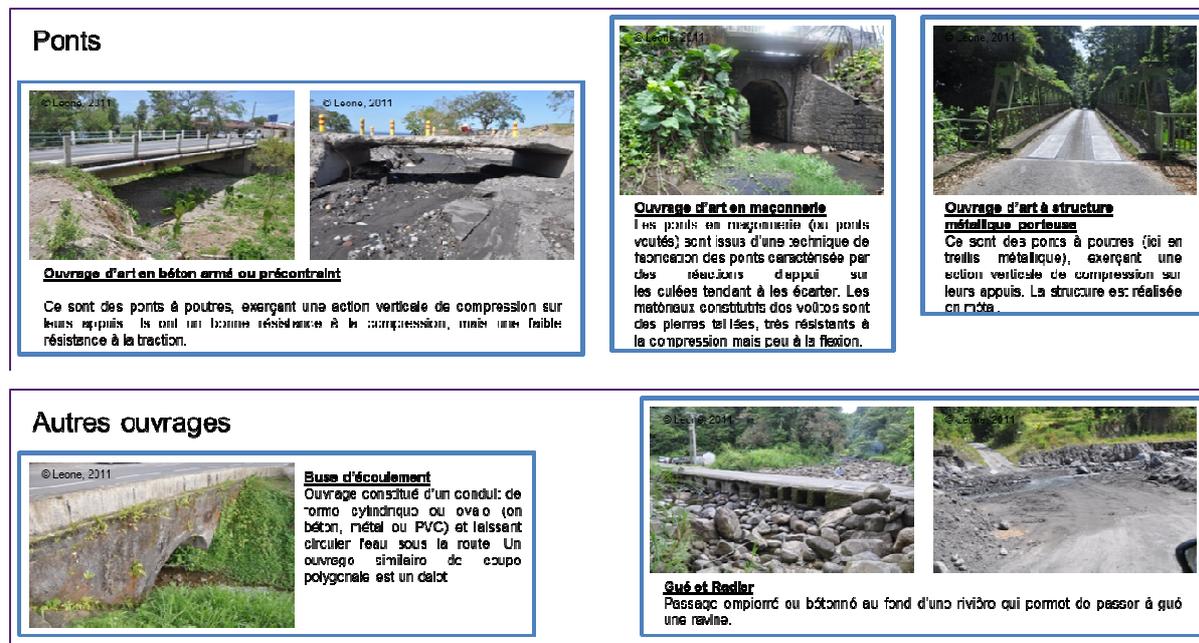


Figure D4 - Typologie des points de franchissement de cours d'eau.

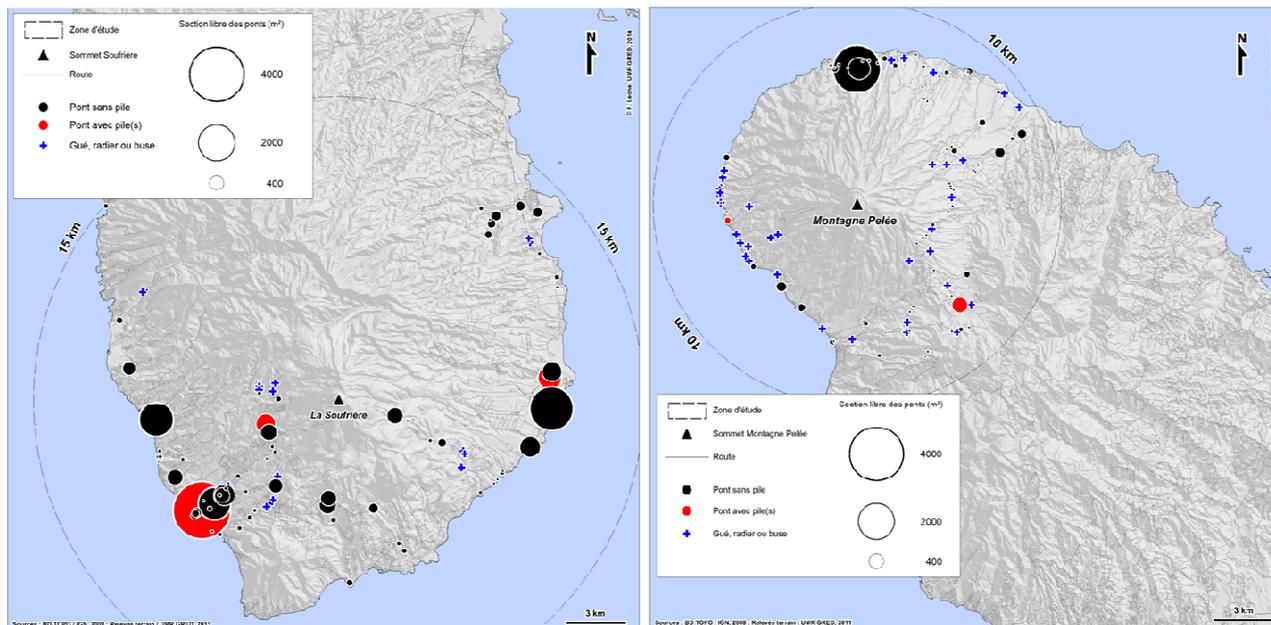


Figure D5 - Les points de franchissement des cours d'eau à lahars potentiels (critères de vulnérabilité).

D.3 MODELISATION DES ITINERAIRES ROUTIERS AU MOYEN DE GRAPHES

Selon Bavoux et al. (2005), l'accessibilité d'un lieu est la plus ou moins grande facilité avec laquelle ce lieu peut être atteint à partir d'un ou de plusieurs autres lieux, à l'aide de tout ou partie des moyens de transport existants. Utilisée aujourd'hui en informatique ou en économie, la théorie des graphes trouve tout particulièrement son intérêt dans le domaine des transports. En effet, la transformation d'un réseau routier « réel » en graphe offre la possibilité de multiples applications. Si la théorie de graphes permet de simplifier le réseau visuellement, c'est avant tout dans les calculs et les représentations graphiques de l'accessibilité qu'elle devient la plus utile. Tout d'abord il faut transformer le réseau en graphe, c'est-à-dire en un objet mathématique composé de sommets et d'arcs. Les sommets (les points) peuvent être associés aux nœuds du réseau, et les arcs (les liaisons) sont associés aux tronçons routiers. Le graphe doit rendre compte fidèlement de la hiérarchie routière urbaine et donc distinguer les différents types de voies qui composent le réseau (Appert & Chapelon, 2008). Dans le cadre des réseaux routiers, il est important d'attribuer des valeurs aux graphes. En effet, les lieux de départs et d'arrivées sont situés dans l'espace et n'ont pas forcément le même poids : les routes ont des vitesses et des capacités différentes. Chaque arc est caractérisé par sa longueur en kilomètres et par la vitesse de circulation automobile permise sur l'infrastructure qu'il représente dans le respect du code de la route.

Le graphe routier utilisé a été construit à partir de la BD TOPO 2009 de l'IGN. Les calculs d'accessibilité ont été réalisés avec l'utilitaire RouteFinder® conçu pour la création et l'exploitation de cartes d'accessibilité dans un environnement SIG MapInfo® (<http://www.routeware.dk>). Les itinéraires ont été définis respectivement au départ de plusieurs points de fuite situés en dehors de la zone de danger (2 en Guadeloupe, 3 en Martinique), vers chaque maille du territoire accessible en temps normal (situation non dégradée). Les points de fuite ont été fixés à 20 km des sommets, sur les axes majeurs permettant de desservir la zone volcanique (nationales N1 et N2 en Guadeloupe, nationales N1, N2 et N3 en Martinique). Afin de réduire les temps de traitement nous avons retenu des mailles radioconcentriques situées dans un rayon de 15 km depuis les sommets des deux

volcans (figure D6). Ce périmètre englobe au moins les zones d'aléas volcaniques de niveau élevé à très élevé, et correspond donc à une zone de d'évacuation prioritaire en cas de crise volcanique (figure A2). Les mailles radioconcentriques offrent l'avantage d'une vision cartographique centrée sur le volcan, donc sur la source de danger. L'autre avantage est de faciliter le découpage de l'espace lors de consignes d'évacuation.

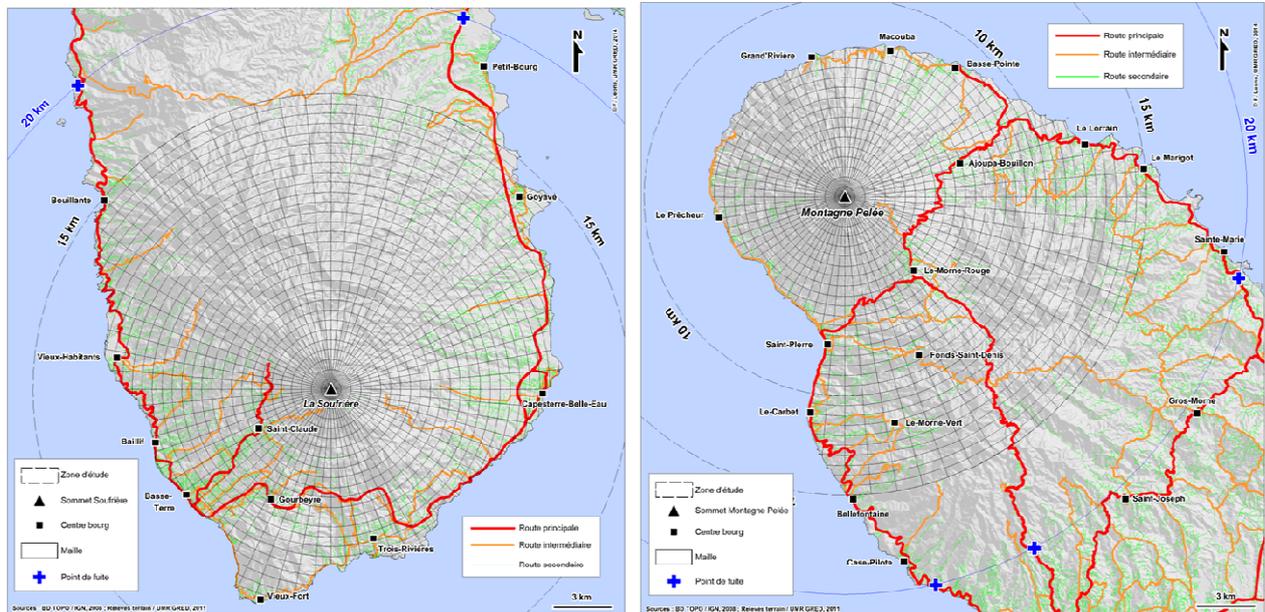


Figure D6 - Graphes routiers de Guadeloupe et Martinique, points de fuite et maillage territorial radioconcentrique retenus pour la modélisation des itinéraires les plus rapides.

Les itinéraires (polylignes) ont été générés dans le SIG selon les chemins les plus rapides donnés par l'algorithme de Dijkstra (1959) (figure D7). On fait en effet l'hypothèse que les usagers retiennent ces itinéraires en cas de déplacement en temps normal ou bien lors d'une évacuation de la zone volcanique. Les vitesses de circulation appliquées au réseau correspondent aux limitations de vitesse officielles en vigueur en France. L'attribution de ces vitesses aux tronçons de route s'est faite en fonction de l'importance du tronçon et aussi de sa nature décrites dans la BD TOPO IGN. Mais compte tenu des conditions locales nous avons réduit ces vitesses officielles de 50%. Nous avons ainsi retenu 5 classes de vitesses qui s'étendent de 5 à 65 km km/h et qui respectent la hiérarchie du réseau routier des deux îles (tableau 5).

Classement réseau	Importance	Nature	Vitesse (km/h)	Vitesse (km/h) 50%
PRIMAIRE	1	Autoroute	130	65
PRIMAIRE	1	Quasi-autoroute	110	55
PRIMAIRE	2	Route à 2 chaussées	110	55
PRIMAIRE	2	Route à 1 chaussée	90	45
PRIMAIRE	2	Bretelle	50	25
SECONDAIRE	3	Route à 2 chaussées	90	45
SECONDAIRE	3	Route à 1 chaussée	90	45
SECONDAIRE	3	Bretelle	50	25
SECONDAIRE	4	Route à 2 chaussées	90	45
SECONDAIRE	4	Route à 1 chaussée	90	45
SECONDAIRE	4	Bretelle	50	25
SECONDAIRE	4	Route empierrée	10	5
SECONDAIRE	5	Route à 2 chaussées	70	35
SECONDAIRE	5	Route à 1 chaussée	50	25
SECONDAIRE	5	Bretelle	50	25
SECONDAIRE	5	Route empierrée	10	5

Tableau D2 – Typologie des voies routières et vitesses de circulation appliquées pour la modélisation des itinéraires (voitures).

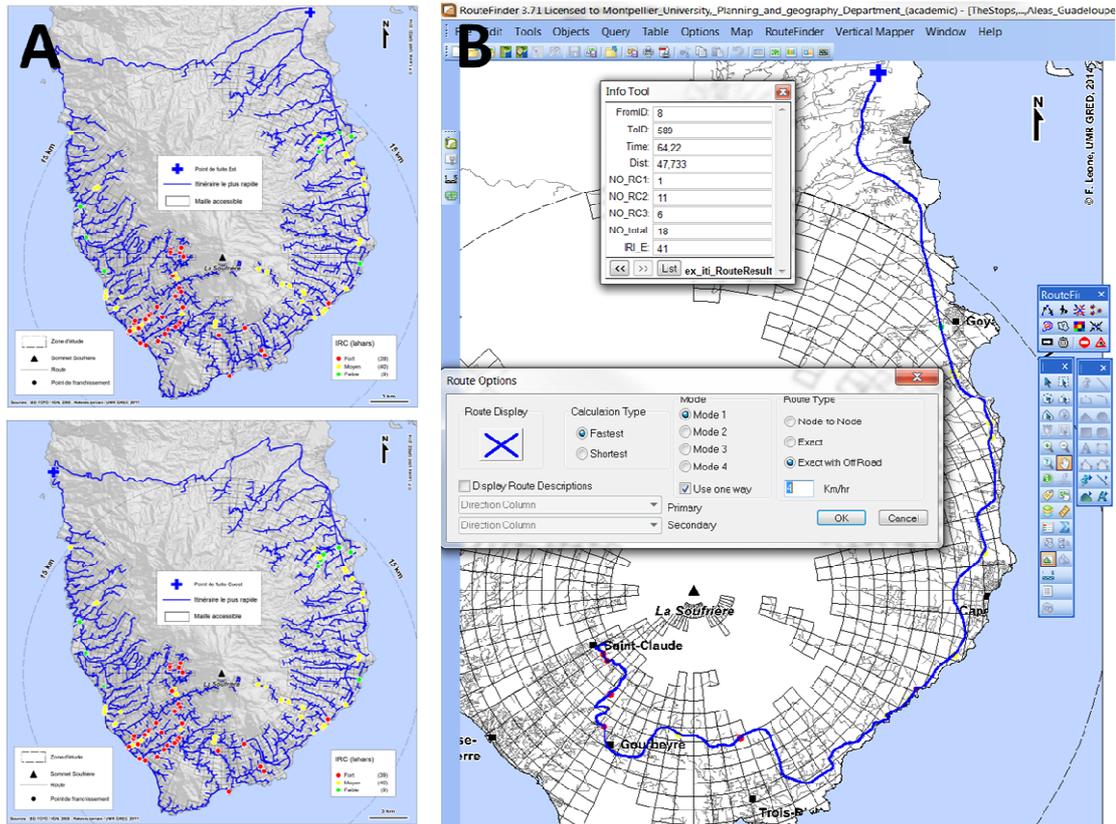


Figure D7 – A : Principe de calcul des itinéraires les plus rapides dans l’interface RouteFinder®.
B : Itinéraires générés pour la Guadeloupe au départ des deux points de fuite sélectionnés.
Les points correspondent aux points de franchissement des cours d’eau.

D.4 SCENARIOS DE PERTE D’ACCESSIBILITE EN CAS DE LAHARS (MARTINIQUE)

D.4.1 SCENARIO 1 - ERUPTION DE 1902

Lors de l’éruption de 1902, sur 56 lahars recensés, 40 auraient entraîné des submersions d’ouvrages (**tableau C3**). En situation actuelle et sur la base d’un tel scénario, nous pouvons isoler 9 points de franchissements qui seraient potentiellement coupés par des lahars : trois gués et 6 ponts. Certains de ces ouvrages, comme le pont du Prêcheur sont d’ailleurs encore affectés aujourd’hui par des lahars secondaires. Au mois de juin, le pont du Prêcheur a été fortement endommagé, obligeant les populations locales à utiliser les bateaux de pêche pour passer d’une rive à l’autre le temps de sa remise en état.

Rivières concernées	Nb de lahars ayant submergé le réseau routier	Dates
Eruption de 1902		
Grande Rivière	5	07/05/1902, 07/05/1902, 08/05/1902, 11/05/1902, 19/05/1902, 06/06/1902, 17/06/1902, 22/06/1902
Rivière de Basse Pointe	17	07/05/1902, 07/05/1902, 08/05/1902, 17/05/1902, 19/05/1902, 20/05/1902, 21/05/1902, 21/05/1902, 22/05/1902, 24/05/1902, 25/05/1902, 31/05/1902, 08/06/1902
Rivière Capot et Rivière Falaise	9	06/05/1902, 07/05/1902, 07/05/1902, 08/05/1902, 30/05/1902, 31/05/1902, 02/06/1902, 04/06/1902, 07/06/1902, 08/06/1902, 15/06/1902, 17/06/1902
Rivière des Pères	1	06/05/1902
Rivière Sèche	1	06/05/1902, 12/06/1902
Rivière Blanche	6	05/05/1902, 05/05/1902, 05/05/1902, 06/05/1902, 07/05/1902, 17/12/1902
Rivière du Prêcheur	1	05/05/1902, 06/05/1902, 07/05/1902, 08/05/1902
Eruption de 1929		
Rivière sans Nom	2	17/10/1929, 20/10/1929
Rivière Sèche	1	17/11/1929
Rivière Claire	1	17/11/1929

Tableau D3 – Les lahars historiques ayant submergé le réseau routier lors des crises éruptives de 1902 et 1929

Au départ de Fort-de-France, une coupure simultanée de ces ouvrages isolerait complètement 3406 bâtiments du Nord de l'île (figure D8A). Les communes de Basse-Pointe, Macouba, Grand'Rivière et du Prêcheur seraient enclavées. Au moins 7624 habitants (population communale cumulée de Basse-Pointe, Macouba, Grand'Rivière, Le Prêcheur) se retrouveraient isolées en cas d'absence ou de retard de la phase d'évacuation préventive. Aucune intervention des secours ne serait possible à partir de Saint Pierre, Ajoupa-Bouillon et du Lorrain.

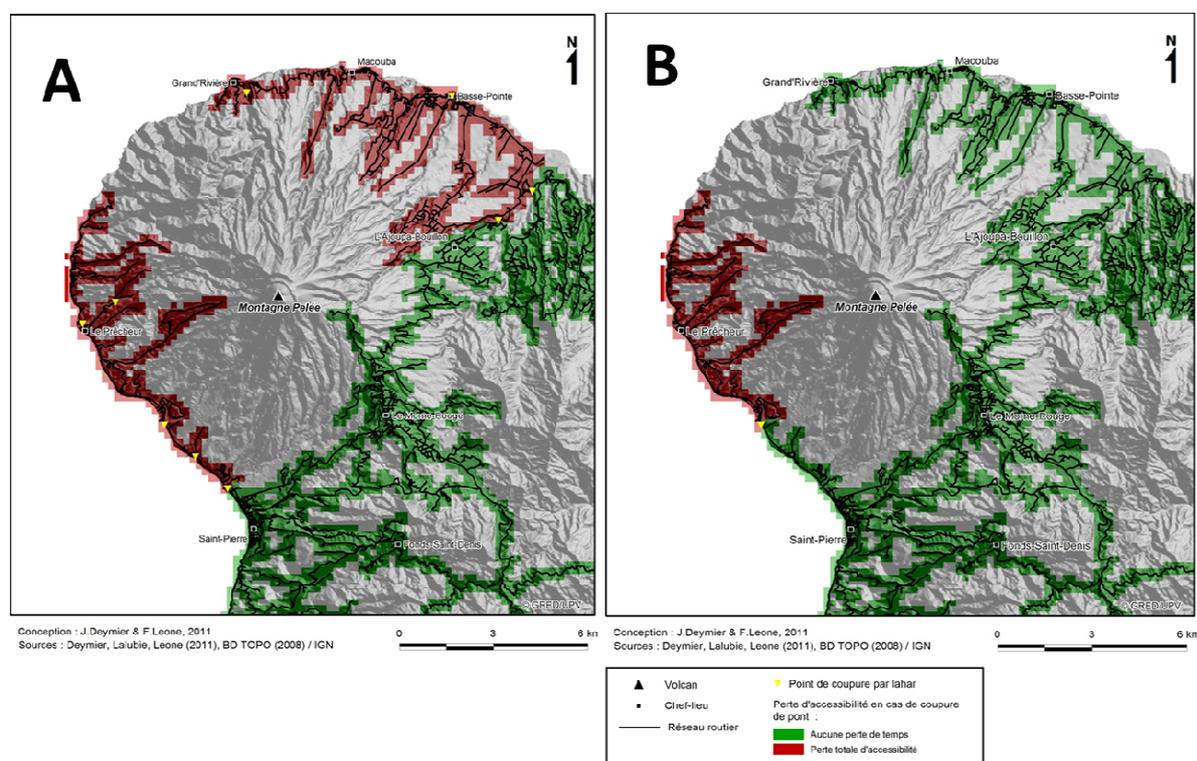


Figure D8 - Territoires rendus inaccessibles par voie routière en cas de lahars (A : scénario 1902, B : scénario 1929).

D.4.2 SCENARIO 2 - ERUPTION DE 1929

Dix lahars ont été recensés lors de la crise de 1929-1931 mais contrairement à l'éruption de 1902, seulement quatre ont affecté le réseau routier avec certitude en 1929 (tableau C3). Ces lahars se sont développés dans le lit d'une rivière aujourd'hui disparue (« Rivière Sans Nom») et des rivières actuelles, Sèches et Claire, qui drainent le même versant et présentent des embouchures situées à proximité de l'ancienne Rivière Sans Nom. En cas de coupure des routes à leur niveau, 778 bâtiments seraient aujourd'hui isolés, situés pour la plupart au bourg du Prêcheur (figure D8B).

D.5 RISQUE D'ISOLEMENT FACE AUX LAHARS

D.5.1 INDICE DE RISQUE DE COUPURE (IRC) DES POINTS DE FRANCHISSEMENT

En parallèle d'une approche déterministe fondée sur la reproduction de scénarios historiques connus, nous proposons d'évaluer et de spatialiser la perte d'accessibilité potentielle du territoire (risque d'isolement, perte de contrôle) selon une approche expérimentale prenant en compte le risque de coupure des itinéraires routiers en fonction de la vulnérabilité des points de franchissement, leur nombre et le niveau d'aléa lahar auxquels ils sont exposés.

Aléa lahar		Section libre du franchissement (en m ²)											
		Gué, Buse, Radier	Ponts										
		0-5	4-50		50-200		200-500		500-1500		1500-4000		
Niveau d'aléa maximal traversé par le BV	SP	P	SP	P	SP	P	SP	P	SP	P	SP		
Très élevé (Z1)	IRC3	IRC3	IRC3	IRC3	IRC3	IRC2	IRC2	IRC2	IRC2	IRC2	IRC2	IRC2	
Elevé (Z2)	IRC3	IRC3	IRC3	IRC2	IRC2	IRC2	IRC2	IRC2	IRC1	IRC1	IRC1	IRC1	
Modéré (Z3)	IRC3	IRC3	IRC2	IRC2	IRC2	IRC2	IRC1	IRC1	IRC1	IRC1	IRC1	IRC1	
Bas (Z4)	IRC2	IRC2	IRC2	IRC2	IRC1	IRC1	IRC1	IRC1	IRC1	IRC1	IRC1	IRC1	

P : avec pile(s) SP : sans pile

Indice de risque de coupure de la route (IRC) au niveau du franchissement en cas de lahar

Fort (IRC3)
Moyen (IRC2)
Faible (IRC1)

Tableau D4 – Matrice expérimentale du risque de coupure d'un point de franchissement en cas de lahar.

Pour ce faire, nous avons d'abord établi pour chaque point de franchissement un indice de risque de coupure (IRC) fondé sur une matrice combinant les principaux critères de coupure préalablement sélectionnés et diagnostiqués. Cette matrice donne trois niveaux d'IRC en fonction du niveau d'aléa lahar menaçant l'ouvrage, sa section libre et la présence ou non de piles venant aggraver sa vulnérabilité en cas de lahar (tableau C4, figure D9). Ainsi les ouvrages à section libre réduite de type gué, radier ou buse, seront plus exposés au risque de coupure que les ponts à grande section libre, de surcroît si ces derniers ne possèdent pas de piles implantées dans le lit du cours d'eau et donc susceptibles d'entraîner le tablier du pont en cas de destruction. Nous avons affecté à chaque ouvrage le niveau d'aléa volcanique maximal recoupé par le bassin versant alimentant le cours d'eau franchi par cet ouvrage. Pour ce faire nous avons retenu uniquement les zones d'aléa lahar telles que définies par le BRGM en Martinique ou l'IPGP en Guadeloupe, ou bien les zones impliquant des phénomènes lahariques du type retombées de cendres et écoulements pyroclastiques. Rappelons que les enveloppes de chacun de ces phénomènes sont intégrées dans les cartes d'aléa volcanique global utilisées pour cette recherche (figure D10).

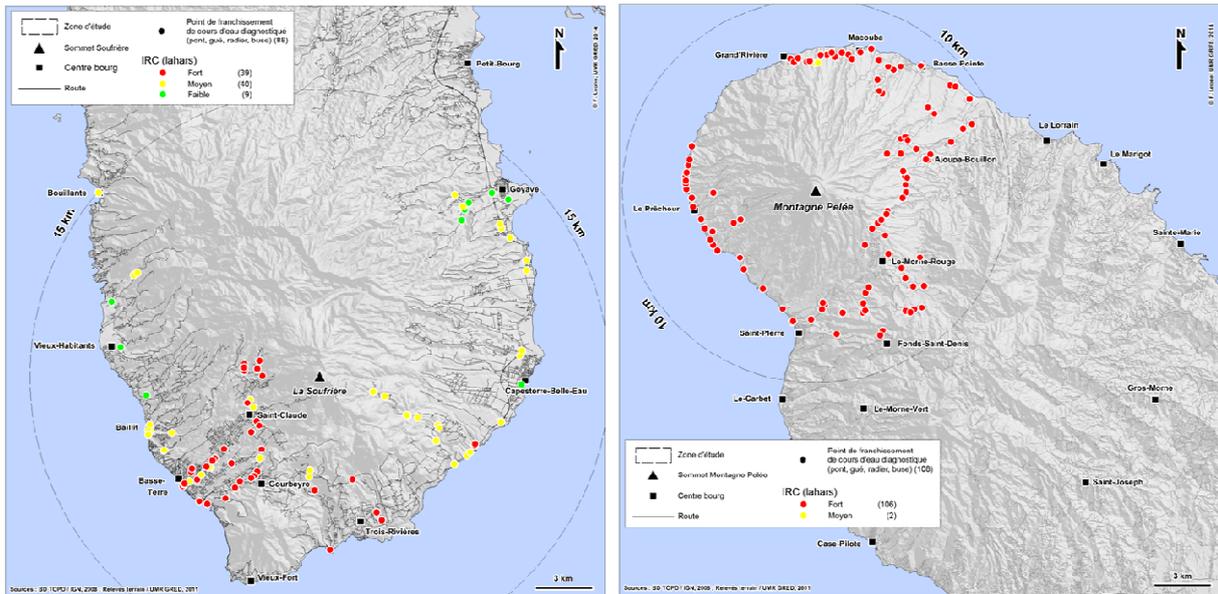


Figure D9 – Classification des points de franchissement en fonction de l'IRC (indice de risque de coupure). Les fortes valeurs obtenues pour la Martinique tiennent à la zone d'aléa maximal particulièrement vaste.

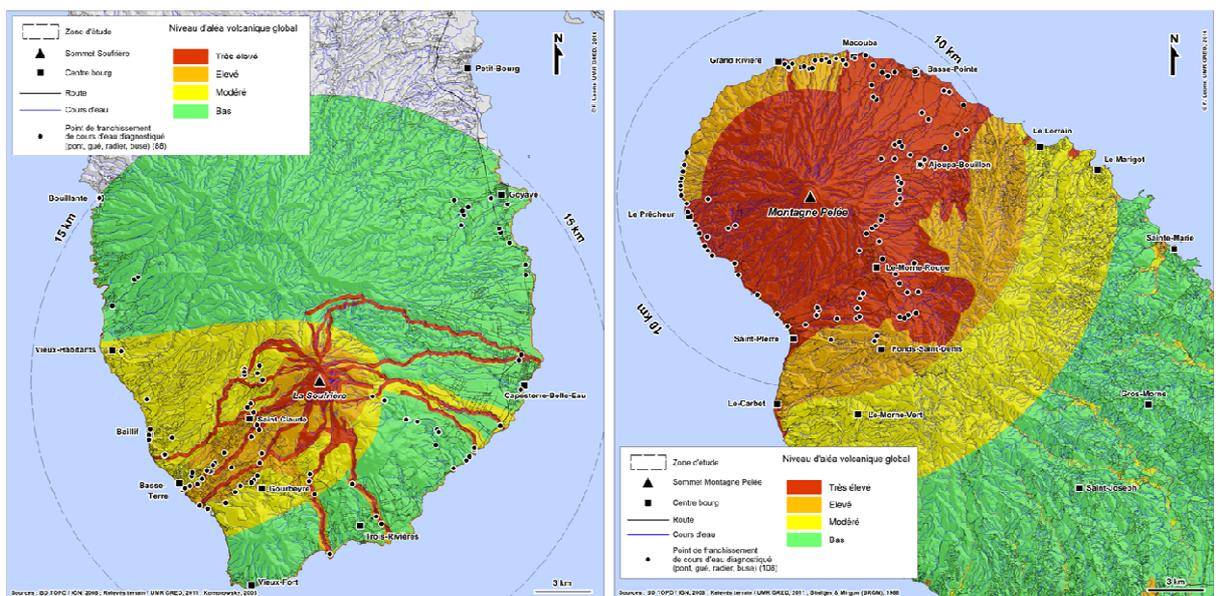


Figure D10 - Position des points de franchissement des cours d'eau par rapport aux enveloppes des différents niveaux de l'aléa volcanique global.

D.5.2 INDICE DE RISQUE D'ISOLEMENT TERRITORIAL ET ENJEUX ASSOCIES

Nous avons ensuite affecté à chaque maille du territoire sélectionné la moyenne des indices de risque d'isolement obtenus (IRI) au départ de chaque point de fuite (2 en Guadeloupe, 3 en Martinique). Chaque IRI est obtenu par la somme pondérée des IRC des différents points de franchissement recoupant l'itinéraire le plus rapide reliant cette maille à son point de fuite (figure D7A), selon la formule suivante :

$$IRI \text{ maille } (0-1) = (Nb \text{ IRC1} + Nb \text{ IRC2} * 2 + Nb \text{ IRC3} * 3) / IRImax$$

Ainsi, plus un itinéraire desservant une maille possédera de points de franchissement à fort risque de coupure (IRC3), et plus il aura de risque d'être coupé et donc d'isoler cette maille. Les IRI ont été définis entre 0 et 1 par division avec la valeur maximale (IRImax de chaque île) et leur traitement cartographique est obtenu par discrétisation selon 5 classes d'isovaleurs (figure D11).

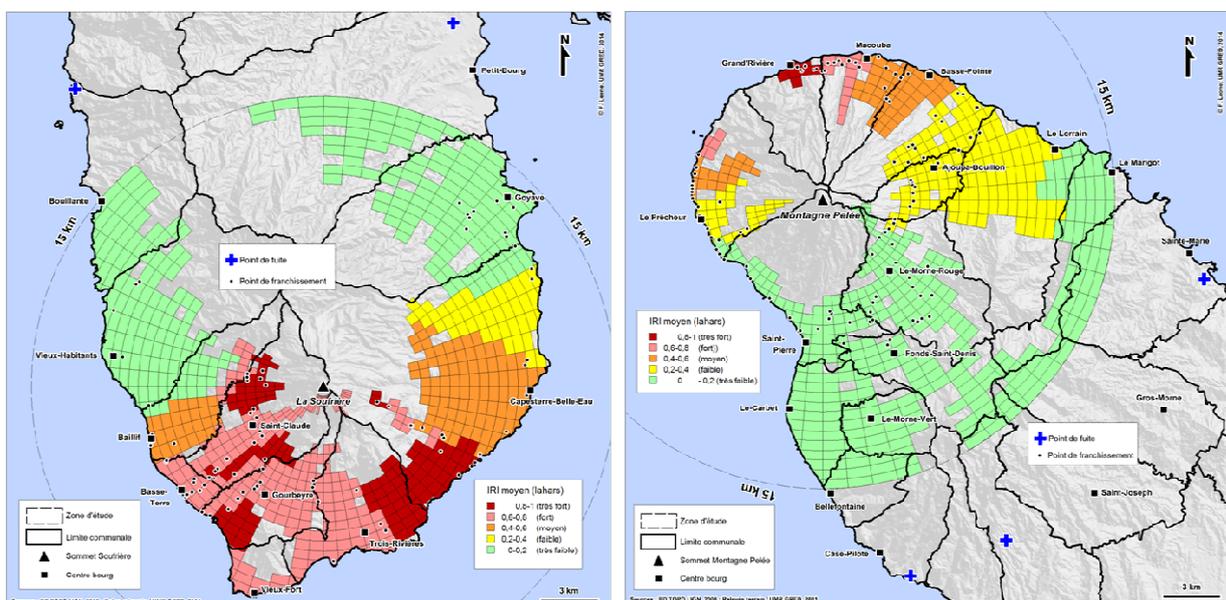


Figure D11 – Risque d'isolement territorial face aux lahars (IRI).

Ces cartographies permettent donc de hiérarchiser les portions du territoire susceptibles d'être isolées partiellement ou totalement en cas de lahars venant couper les routes principales, et de surcroît les routes secondaires. Ici encore, c'est la variabilité spatiale de ce risque indirect qui importe et la possibilité de quantifier les pertes de contrôle que ces phénomènes peuvent occasionner sur certains enjeux, en particulier les ressources vitales dont l'accès et la maintenance restent des conditions essentielles de résilience post-crise (figure D12).

En Guadeloupe, les secteurs les plus menacés d'enclavement routier (IRI > 0.8) sont les quartiers de Matouba-Papaye et Dugommier à Saint-Claude, le mont Houëlmont où se trouve l'Observatoire volcanologique et sismologique à Gourbeyre, le secteur de plateau Zimbimbe vers la deuxième chute du Carbet sur les hauteurs de Capesterre-Belle-Eau et tout un secteur compris entre Trois-Rivière et Bananier plus proche du littoral.

En Martinique, c'est le bourg de Grand'Rivière, situé en bout de réseau routier sur la façade maritime nord atlantique, qui présente le plus fort risque d'isolement, au même titre que son symétrique nord caraïbe sur la commune du Prêcheur à l'Anse Céron.

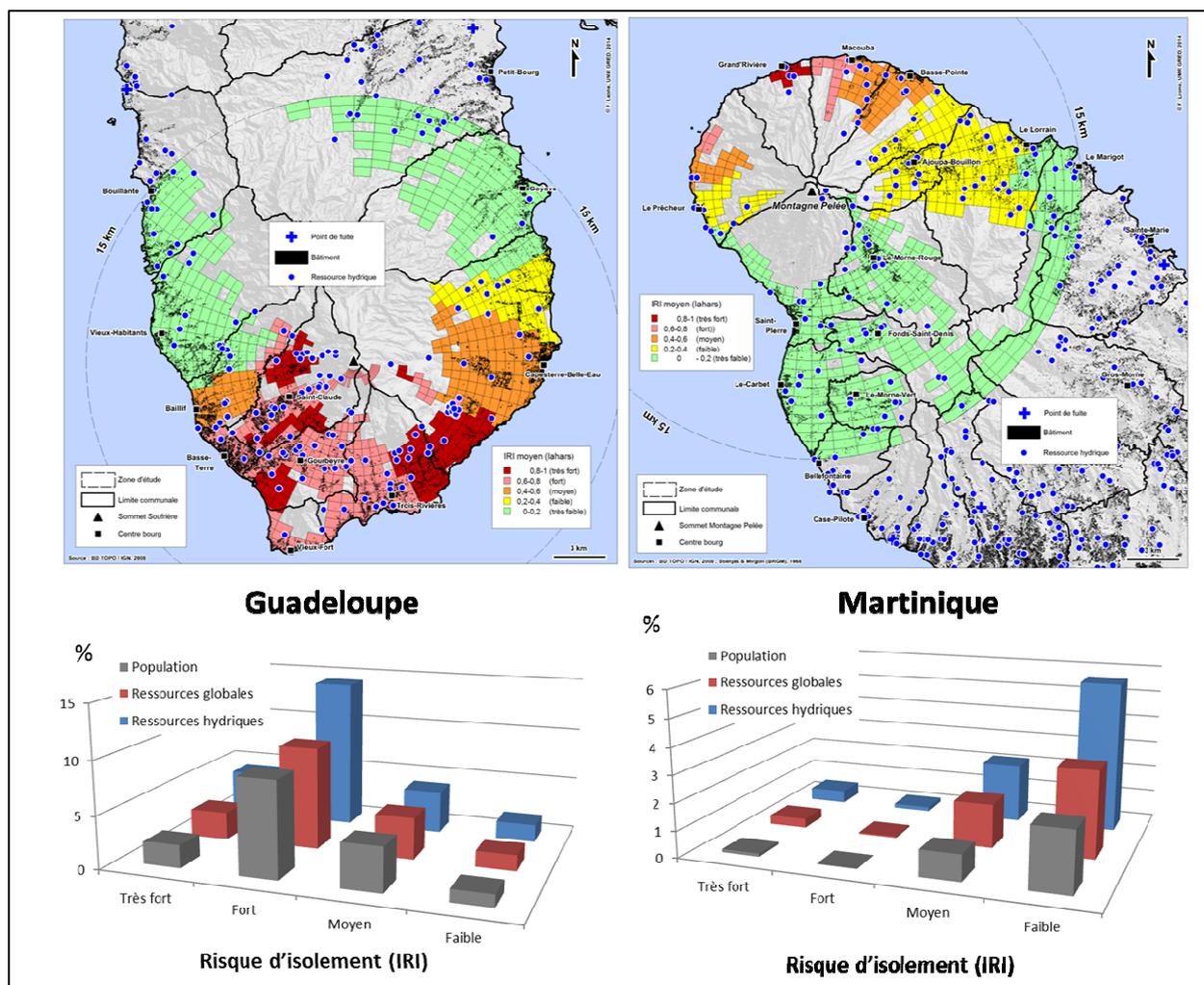


Figure D12 – Ressources et populations exposées au risque d'isolement territorial.

La quantification de cette exposition montre que la Guadeloupe concentre, en valeur relative, le plus d'enjeux « isolables » face aux lahars. La ressource hydrique est la plus concernée. La situation est moins préoccupante en Martinique. Cette exposition indirecte est à rapprocher de celle concernant le risque direct (figure A6), avec un grand nombre d'enjeux soumis à la fois au risque d'isolement territorial et au risque d'impact volcanique. Il s'agit donc d'enjeux à risque, notamment humains, qui pourraient présenter des difficultés d'évacuation en cas de lahars, phénomènes souvent précoces lors d'une crise volcanique. Il faudrait donc évacuer en priorité ces populations avant que les accès ne soient bloqués. Il convient donc d'optimiser ces évacuations par un découpage approprié de l'espace de danger qui garantisse aussi une bonne répartition des charges sur le réseau routier. C'est l'objet des applications suivantes des calculs d'accessibilité sur graphes routiers.

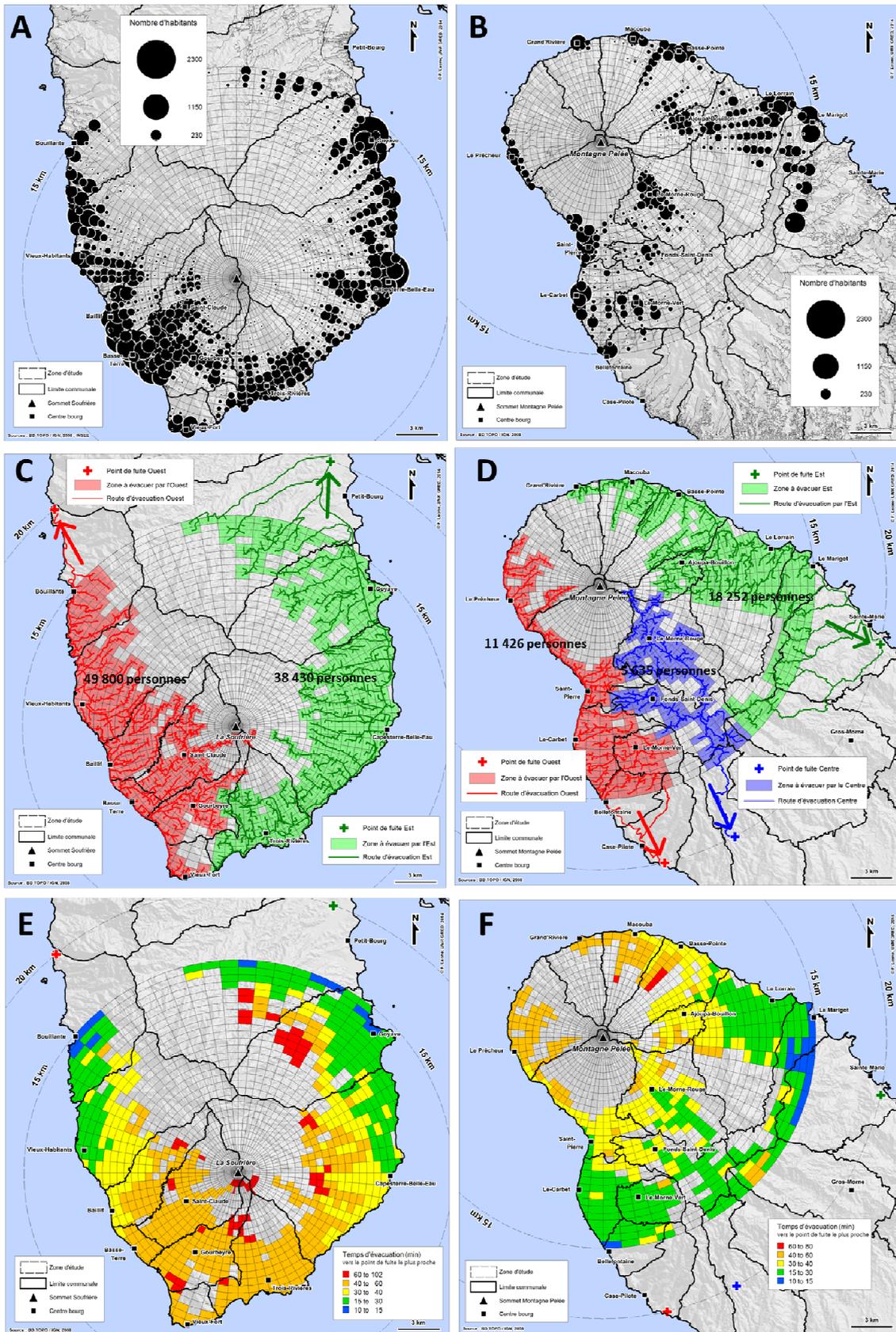


Figure D13 – Proposition de plan d'évacuation des deux zones volcaniques.

A, B : Enjeux humains à évacuer.

C, D : Découpage optimisé des zones à évacuer avec itinéraires associés.

E, F : Temps d'évacuation (en min.) vers le point de fuite le plus proche.

D.6 OPTIMISATION DE L'ACCESSIBILITE EN PHASE D'EVACUATION

Une évacuation massive de population est une parade relativement efficace pour se protéger d'une éruption. C'est un processus complexe (Mei, 2013) qui nécessite un minimum de planification, notamment des zones à évacuer préventivement et des itinéraires à suivre pour gagner des secteurs sécurisés. Les bases de données et les graphes routiers développés dans le projet ANR CASAVA permettent d'optimiser le découpage de ces zones, de calculer les itinéraires de fuite, leur charge statique et les volumes de personnes par secteur évacué (figure D13). Les cartes produites constituent un support d'aide à la décision directement destiné aux autorités en charge de la planification de crise. Ces documents doivent être adaptés en fonction du déroulement d'une éruption et en particulier des occurrences potentielles de lahars susceptibles de couper les routes d'évacuation.

La zone à évacuer correspond au cercle de 15 km de rayon préalablement défini. Cela couvre toutes les communes évacuées en 1976 en Guadeloupe. Les points de fuite retenus sont au nombre de deux en Guadeloupe et de trois en Martinique. Ils se situent sur un rayon de 20 km et sont positionnés sur des routes principales (nationales). Ils permettent de calculer des itinéraires d'évacuation optimisés en temps de parcours ainsi que la charge potentielle statique et cumulée du réseau par tronçon de route. Les algorithmes utilisés permettent aussi d'affecter à chaque point de fuite un bassin d'évacuation et la population totale correspondante. Les modélisations réalisées montrent le gain de charge, et donc d'encombrement potentiel du réseau, en démultipliant le nombre de points de fuite (figure D14). Le schéma d'évacuation proposé permet ainsi de répartir la charge du réseau sur les deux routes littorales en Guadeloupe et Martinique, tout en offrant une possibilité intermédiaire en Martinique via la route centrale dite de la Trace (nationale N3), *prévue en particulier à cet effet lors de sa construction après l'éruption de 1929 (à vérifier)*. Ainsi, nous recommandons ce découpage de l'espace et ces conditions pour optimiser à minima une évacuation, sachant qu'il sera par ailleurs très difficile de déphaser une évacuation face à des populations disposées à évacuer avant même d'en avoir reçu l'ordre, en cas de future éruption. Alors autant se préparer au pire scénario, celui d'une évacuation massive, simultanée et spontanée, en sensibilisant dès aujourd'hui les populations sur le meilleur itinéraire à suivre, c'est-à-dire le plus accessible et le plus rapide vers les zones refuges les plus proches.

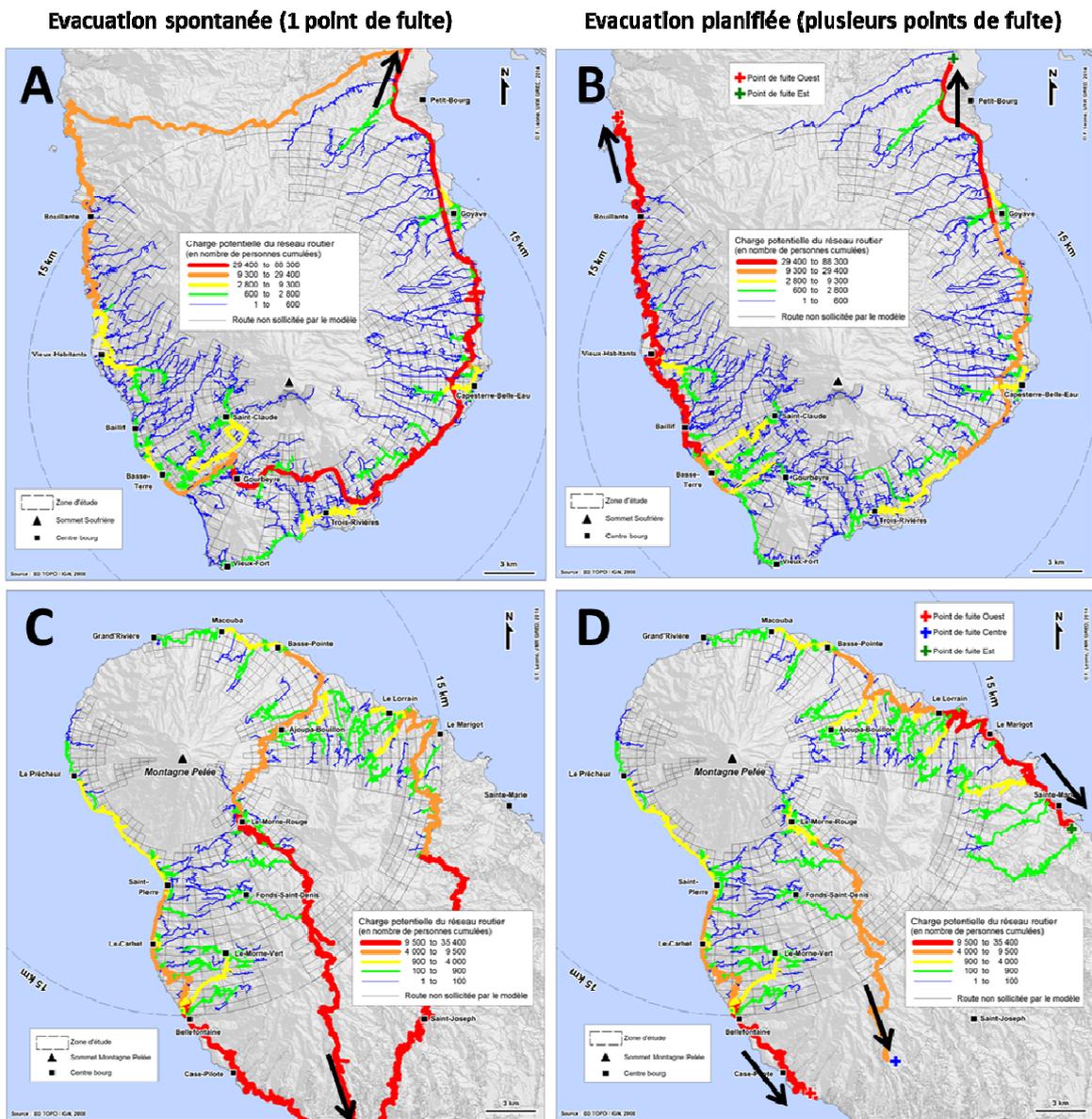


Figure D14 – Charge théorique du réseau routier (en nombre de personnes) pour une évacuation spontanée (1 point de fuite) ou planifiée (plusieurs points de fuite).

CONCLUSION

Le renforcement des capacités face aux crises volcaniques repose au préalable sur un diagnostic territorial du risque qu’il convient de mener en intégrant la connaissance des aléas, une analyse de l’exposition des enjeux humains, des infrastructures et d’autres ressources vitales, des aspects fonctionnels tels que l’accessibilité routière, ou socio-organisationnels plus en lien avec la gestion de crise. Cette étude contribue à un tel diagnostic en mettant en avant des vulnérabilités directes et indirectes dont il faut tenir compte dans la planification de gestion de crise volcanique, mais également dans l’aménagement du territoire pour réduire le risque sur le long terme en limitant l’implantation des enjeux, ou le cas échéant en les diversifiant hors du périmètre de danger volcanique. Le **tableau D5** suivant rappelle les principaux résultats de cette étude comparative et esquisse quelques recommandations pour

renforcer nos capacités locales face à de futures crises volcaniques. C'est une base de travail qu'il convient de prolonger, d'enrichir et d'échanger entre tous les acteurs de la gestion des risques aux Antilles françaises.

Vulnérabilités / Exposition	Guadeloupe	Martinique	Recommandations
Rayon de danger	15 km	15 km	
Population R15 km	88 400 personnes (23 %)	35 900 personnes (9%)	Planifier les évacuations
Population Aléa max. rouge R15km	4650 personnes (1,2 %)	18 150 personnes (5%)	Informar les populations
Population Aléa max. rouge + orange R15km	22 650 personnes (6 %)	23 650 personnes (6,5 %)	Limiter les enjeux
Principales poches de risque humain (Hotspot IRH)	Saint-Claude, Basse-Terre, Baillif	Le Prêcheur, Saint-Pierre Le-Morne-Rouge, Ajoupa-Bouillon, Basse-Pointe, Macouba, Grand'Rivière	Cibler l'information préventive et la planification des évacuations par voies terrestres et maritimes
Bâtiments R15km	13,4%	21,6 %	Limiter les enjeux majeurs dans la zone des 15 km
Ressources globales R15km	669 unités (28,5 %)	264 unités (15 %)	
Ressources globales Aléa max. R15km	37 unités (1,6 %)	128 unités (7,3 %)	Diversifier les captages d'eau potable en dehors des 15 km
Ressources hydriques R15km	167 unités (39,5 %)	143 unités (22,3 %)	
Ressources hydriques Aléa max. R15km	14 unités (3,3 %)	68 unités (10,6 %)	Planifier des réserves d'eau en cas de crise
Production j. AEP R15km	62 %	28 %	
Captages d'eau scénarios historiques	26 unités max.	30 unités max.	
Sites prod. élect. scénarios historiques	2 max. (centrales hydrauliques de Bananier et du Carbet) 0 % besoins	1 max. (centrale thermique de Bellefontaine) 60% des besoins	
Evolution mailles urbaines entre 1955 et 2010 R15km	+ 200 %	+ 50 %	Contrôler l'urbanisation en Guadeloupe
Evolution tache urbaine entre 1955 et 2010	+ 382 % à Saint-Claude	+ 215 % à Saint-Pierre	Freiner les projets de grande envergure de type ERP
Projets majeurs après 2013 R15km	28 unités	14 unités	
Routes inaccessibles scénarios historiques	7 % max.	28 % max.	Planifier l'évacuation préventive de masse
Impacts lahars historiques sur routes	39 lahars (13 % avec impact)	126 lahars (38 % avec impact)	Entretien du réseau routier Préparer la population à une évacuation par zone
Population isolable IRI max.	8 300 personnes (2,2 %)	450 personnes (0,1 %)	Entretien des ouvrages de franchissement
Ressources globales isolables IRI max.	62 unités (3 %)	6 unités (0 %)	Privilégier les ponts sans piles
Ressources hydriques isolables IRI max.	18 unités (4 %)	3 unités (0 %)	
Nombre de points de fuite à 20 km	2 routes	3 routes	
Temps max. d'évac. vers points de fuite	102 min.	80 min.	
Dispositif ORSEC/PSS Volcan	Oui (1999)	Oui (2002)	PSS volcans à actualiser
Zonage réglementaire PPR intégrant le risque volcanique	Non (sauf mention lahars dans le règlement des PPR de Saint-Claude, Gourbeyre et Basse-Terre)	Oui (approuvé en 2004)	Zonage volcanique à introduire dans le PPRn de la Guadeloupe

Tableau D5 – Synthèse des vulnérabilités/expositions territoriales vs propositions de renforcement des capacités de gestion des risques et des crises volcaniques aux Antilles françaises.

BIBLIOGRAPHIE

- Audebert C. (2011) - Les Antilles françaises à la croisée des chemins: de nouveaux enjeux de développement pour des sociétés en crise - Les Cahiers d'Outre-Mer n° 256, Presses universitaires de Bordeaux, pp. 523-549.
- Bardintzeff J.M. (2011) – Volcanologie - Science Sup, Dunod 4e édition, 313 p.
- Bavoux JJ., Beaucaire F., Chapelon L., Zembri P. (2005) - Géographie des transports- UMR espace CNRS, 231p
- Baxter PJ. et al. (2005) - The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufriere Hills volcano, Montserrat, Bull. Volcanol., 67, pp. 292–313.
- Blong R.J. (1996) - Volcanic hazards risk assessment. - In: Scarpa R, Tilling RI (eds) Monitoring and mitigation of volcano hazards. Springer, Berlin Heidelberg New York, 698p.
- Blong R.J., McKee C. (1995) - The Rabaul eruption 1994: Destruction of a town, Natural Hazards Research Centre - Macquarie University, Australia, 52p.
- Blong R.J.. (1984) - Volcanic Hazards : A sourcebook on the effects of eruptions - Academic Press, Australia, 424p.
- Bonnel C. (2011) - Impact de scénarios éruptifs de la Soufrière avec retombées de cendres : analyse de la vulnérabilité et des risques de dysfonctionnement des réseaux d'adduction d'eau potable de la Guadeloupe – Mémoire de Rapport de stage MASTER 2 STEP - Géologie et Risques Naturels, IPGP, 30 p.
- Burac M. (1991) – Défisiscalisation des investissements et urbanisation à la Martinique – in : Vennetier P. (dir) – Urbanisation et développement dans les pays tropicaux – Espace tropicaux, n°4, Talence, CEGET-CNRS, pp103-114.
- Calvet L. & Grislain-Létrémy C. (2011) – L'assurance dans les départements d'Outre-Mer : une faible souscription – Economie et statistique n°447 pp 57-70,
- Cronin S. (2003) - Environmental hazards of fluoride in volcanic ash: a case study from Ruapehu volcano - New Zealand Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol.121, p.271-279
- D'Ercole R. & Metzger P. (2009) - La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain - Cybergeog : European Journal of Geography, 16 p.
- De Vassoigne C. (1997) – Les mutations spatiales de la Martinique : l'affirmation du modèle centre-périphérie – in : Mainet G. (dir)- Iles et littoraux tropicaux, pp453-463.
- De Vassoigne, C. (2000) – D'un centre à l'autre, la Martinique entre l'habitation et la conurbation – TYANABA, Revue de la société d'Anthropologie, n°4, pp 60-89.
- Deymier J. & Leone F. (2012) - Programme CASAVA. Modélisation de l'accessibilité routière en cas de lahars (Montagne Pelée, Martinique & Soufrière de Guadeloupe), Rapport interne, UMR GRED, 39 p.
- Faivre-Perret R & Le Guern F. (1982) - Les gaz volcaniques - in Tazieff H. & Sabroux JC. - Forecasting Volcanic Events - Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Fiard J.P. (1994) - Les forêts du Nord de la Montagne Pelée et des édifices volcaniques du Piton Mont-Conil et du Morne Sibérie (Martinique) - Thèse d'Université, Univ. Antilles Guyane, 615 p.
- Fischer R.V., Schmincke H.U. (1984) – Pyroclastic rocks – Springer Verlag, Berlin.
- Goiffon M. (2003) - Pression foncière et littoralisation à la Martinique - Les Cahiers d'Outre-Mer, n°223, Presses universitaires de Bordeaux, pp. 351-374.

- Heymann A. (2012) - Evaluation de la vulnérabilité face aux aléas volcaniques de type péleén. Réalisation de matrices de dysfonctionnement des enjeux et modélisations de scénarios éruptifs reproductifs. Le cas de la Montagne Pelée et de la Soufrière de Guadeloupe – Mémoire de Master 2 GCRN, Département de Géographie-Aménagement, Université Paul Valéry – Montpellier 3, 119 p.
- Institut d’Emission des Départements d’Outre-Mer - IEDOM (2011) – Guadeloupe, rapport annuel 2011 – IEDOM, 201p.
- Johnston D.M., Nairn I.A., Thordarson T., Daly M. (1997) - Volcanic Impact Assessment for the Auckland Volcanic Field. - Auckland Regional Council Technical Publication No. 79, 207p.
- Johnston D.M., Stewart C., Leonard G.S., Hoverd J. (2004) - Impacts of volcanic ash on water supplies in Auckland: Part1- Institute of Geological & Nuclear Sciences science report.
- Lacroix A. (1904) - La Montagne Pelée et ses éruptions - Editions Masson et Cie, Paris, 662 p.
- Lalubie G. (2011) – Les lahars historiques aux Antilles françaises : inventaire des sources documentaires et analyse de l’activité hydro-volcano-géomorphologique, Université Antilles-Guyane, 77 p.
- Lalubie G. (2012) – Atlas des éruptions de la Montagne Pelée et de la Soufrière de Guadeloupe – Les éruptions historiques aux Antilles Françaises : inventaire et spatialisation des impacts physiques et humains, Université Antilles-Guyane, 33p
- Lemaitre E. (2012) - Caractérisation spatio-temporelle de la vulnérabilité humaine. Cas de Basse-Terre et Saint-Claude en Guadeloupe, Mémoire de Master 2 GCRN, Département de Géographie-Aménagement, Université Paul Valéry – Montpellier 3, 143 p.
- Leone F. (2002) – Implications territoriales et socio-économiques des menaces naturelles en Martinique (Antilles françaises) : une approche spatiale assistée par SIG – Annales de géographie, n°627-628, pp. 559-573.
- Leone F. (2004) - Une approche quantitative de la cartographie des risques naturels : application expérimentale au patrimoine bâti de la Martinique (Antilles françaises) - Géomorphologie : relief, processus, environnement. Avril-juin, vol. 10, n°2. pp. 117-126.
- Leone F. (2006) – Contribution méthodologique à la cartographie des risques naturels. Exemple d’application à la Martinique – in : Burac M. (dir.) - La Caraïbe, données environnementales, Editions Karthala, Paris, pp 33-50.
- Leone F. (2007) – Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes « naturelles » : contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones) – Mémoire d’Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), Section 23 (Géographie), Université Paul Valéry, Montpellier III, Laboratoire GESTER, Montpellier, 245 p. + Annexes.
- Leone F. & Lesales T. (2006) – Des cartes pour gérer le risque volcanique à la Martinique (Antilles françaises) – Revue internationale de géomatique, n°16, pp. 341-358.
- Leone F., Meschinet de Richemond N., Vinet F. (2010) – Aléas naturels et gestion des risques – Licence géographie coll. Puf, 284p.
- Leone F., Péroche M., Lagahé E., Gherardi M., Sahal A., Vinet F., Hachim S., Lavigne F. (2013) -Modélisation de l’accessibilité territoriale pour l’aide à la gestion de crise tsunami (Mayotte, France) - Territorial Accessibility Modeling for Tsunami Crisis Management in French-Administered Mayotte (Indian Ocean), Annales de géographie, 5/2013 (No 693), pp. 502-524, www.cairn.info/revue-Annales-de-geographie-2013-5-page-502.htm.

- Mazurek H. & Dayre P. (1988) – Analyse de l'utilisation du sol par la méthode du carroyage : le District Urbain de Montpellier – Mappemonde, 1988, t.3, pp27-29
- Mei E.T.W., Lavigne, F., Picquout, A., De Bézizal, E., Brunstein, D., Grancher, D., Sartohadi, J., Cholik, N., Vidal, C. 2013. Lessons learned from the 2010 evacuations at Merapi volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.03.010>
- Olive V. & Riviere F. (2010) - L'habitat dans les Outre-mer français : progrès, enjeux, disparités - Institut d'émission des départements d'Outre-mer (IEDOM), 75p.
- Baxter P. & Gresham A. (1997) - Deaths and injuries in the eruption of Galeras Volcano, Colombia, 14 January 1993 - *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 77: 325–338p.
- Peterson D.W. & Tilling R. (2000) - Lava Flow Hazards - in Sigurdsson, H., 2000, *Encyclopedia of Volcanoes*: Academic Press, San Diego, California, p. 957-971.
- Plantin C. (2011) - L'évolution géo-environnementale de la Martinique entre les années 1956 et 2006 - *Les Cahiers d'Outre-Mer*, n° 256, pp 551-564.
- Pomonis A, Spence R, Baxter P. (1999) - Risk assessment of residential buildings for an eruption of Furnas Volcano, Sao Miguel, the Azores - *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 131p.
- Sastre C. 2002 - Un siècle après : à la recherche de la forêt perdue – séminaire "Vivre de son volcan", *Convergence* 2002, 8p.
- SDAEP 2007 – Programme du schéma directeur d'alimentation en eau potable de la Martinique, document intermédiaire – Conseil Général de la Martinique, SAFEGE Agence Caraïbe, 104p.
- Sedano S. (2013) - Evolution de l'urbanisation en zones volcaniques : étude comparative entre la Guadeloupe et la Martinique (Petites Antilles), Mémoire de Master 2 GCRN, Département de Géographie-Aménagement, Université Paul Valéry – Montpellier 3, 65p.
- Stieltjes L. & Mirgon C. (1998) – Approche méthodologique de la vulnérabilité aux phénomènes volcaniques. Test d'application sur les réseaux de la Martinique. Rapport de synthèse. Rapport BRGM, R 40098, 218p.
- Thorarinsson S. (1979) – The damage casued by volcanic eruptions with special reference to tephra and gases – *Volcanic activity and human ecology*, Academic Press, New York, 159p.
- Torres G. (2000) – Villes et démocratie – TYANABA, *Revue de la société d'Anthropologie*, n°4, pp 21-59.
- Warrick R.A. et al. (1981) - Four communities under ash - after Mount St. Helens - *Program on Technology, Environment and Man*, Mongraph 34, Institute of Behavioral Science, University of Colorado, 143 p.
- Wilson T.M. et al. (2011) - Volcanic ash impacts on critical infrastructure - *J. Phys. Chem. Earth*.