

<p>AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE ANR</p> <p>Programme RISKNAT 2009</p>	<p>Livrable du projet</p> <p>Projet ANR- 09-RISK-002</p> <p>CASAVA</p>	
---	---	---

Livrable : D4.2

Titre du livrable : Exposition, vulnérabilité et accessibilité territoriales en cas d'éruptions volcaniques aux Antilles : une approche comparative Martinique / Guadeloupe.

Responsable du livrable et contact email : Frédéric Leone (Fredoleone@gmail.com)

Titre du work package : WP-4 : Territorial, human, and institutional vulnerability

Auteurs du livrable :

Frédéric Leone (dir.), Monique Gherardi, Thierry Lesales, Guillaume Lalubie, Jean-Raphaël Gros-Désormeaux, Maurice Burac, Julien Deymier, Anthony Heymann, Samuel Sedano, Mathieu Péroche

Partenaire / institution / affiliation : UMR GRED (UPVM & IRD) – Ex. GESTER

Date : mars 2015

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION : LA VULNERABILITE TERRITORIALE, UNE APPROCHE ENJEUX-CENTREE.....	4
A EXPOSITION, RISQUE ET ETALEMENT URBAIN EN ZONE VOLCANIQUE	6
A.1 Une menace volcanique bien identifiée	6
A.2 Des zones d'étude incluant les périmètres de danger.....	7
A.3 Exposition et risque actuels.....	8
A.4 Une urbanisation productrice de risque.....	13
A.5 Deux méthodes d'analyse pour deux échelles d'observation	13
A.5.1 Approche régionale par densités de bâtiments.....	13
A.5.2 Approche locale par tache urbaine	15
A.6 Résultats	16
A.6.1 A l'échelle des aires de menaces des deux volcans	16
A.6.2 Etude de cas : Saint-Pierre et Saint-Claude.....	19
A.7 Les facteurs de l'étalement urbain	20
A.7.1 Les facteurs historiques : une structure héritée	20
A.7.2 Les facteurs sociaux-économiques et culturels	22
A.8 Quelle prise en compte du risque volcanique dans l'aménagement ?	24
A.9 Conclusion	28
B MATRICES DE DYSFONCTIONNEMENT CRITIQUE	29
B.1 Objectifs.....	29
B.2 Enjeux retenus	29
B.3 Les aléas, processus d'endommagement et critères de magnitude	30
B.4 Seuils d'intensité	30
B.5 Effets des retombées de cendres	31
B.5.1 Ensevelissement, accumulation.....	31
B.5.2 Pression verticale continue.....	31
B.5.3 Abrasion-corrosion.....	32
B.5.4 Effets chimiques	32
B.5.5 Effets électriques	34
B.6 Effets des retombées balistiques.....	34
B.6.1 Effets mécaniques	35
B.7 Effets des coulées et intrusion de laves	35
B.7.1 Effets mécaniques	35
B.7.2 Effets thermiques.....	36
B.8 Effets des coulées pyroclastiques	36
B.8.1 Effets mécaniques	37
B.8.2 Effets thermiques.....	37
B.9 Effets des émanations de gaz et pluies acides	38
B.9.1 Effets chimiques	38

B.9.2	Effets thermiques.....	39
B.10	Effets des lahars.....	39
B.10.1	Effets mécaniques.....	39
B.11	Effets des avalanches de débris.....	40
B.11.1	Effets mécaniques.....	40
B.12	Effets des tsunamis.....	40
B.12.1	Effets mécaniques.....	41
B.12.2	effets hydrauliques.....	41
B.13	Effets des ondes de choc.....	41
B.13.1	Effets mécaniques.....	42
B.14	Matrices de dysfonctionnement critique (PDC).....	42
C	EVALUATION DE LA VULNERABILITE DES RESEAUX VITAUX :	
	APPROCHE DETERMINISTE.....	54
C.1	Reconstitution des éruptions historiques.....	54
C.2	Vulnérabilité et exposition des réseaux d'eau potable et d'électricité.....	58
C.2.1	Le réseau d'eau potable de la Martinique.....	58
C.2.2	Le réseau d'eau potable de la Guadeloupe.....	61
C.2.3	Le réseau d'électricité de la Martinique.....	64
C.2.4	Le réseau d'électricité de la Guadeloupe.....	65
C.3	Perte d'accessibilité routière.....	67
C.3.1	Méthode de calcul de l'accessibilité routière.....	67
C.3.2	Mesure de l'exposition du réseau routier.....	68
C.3.3	Scénarios de pertes d'accessibilité routière pour la Martinique.....	69
C.3.4	Scénarios de pertes d'accessibilité routière pour la Guadeloupe.....	81
D	MODELISATION DE L'ACCESSIBILITE ROUTIERE ET GESTION DE	
	CRISE VOLCANIQUE.....	86
D.1	Introduction.....	86
D.2	La vulnérabilité des réseaux routiers face aux lahars.....	87
D.2.1	Les impacts routiers des lahars historiques en Martinique et Guadeloupe.....	87
D.2.2	Typologie des dommages sur les ouvrages de franchissement.....	88
D.2.3	Constitution d'une BD sur les points de franchissement des cours d'eau.....	90
D.3	Modélisation des itinéraires routiers au moyen de graphes.....	91
D.4	Scénarios de perte d'accessibilité en cas de lahars (Martinique).....	93
D.4.1	Scénario 1 - Eruption de 1902.....	93
D.4.2	Scénario 2 - Eruption de 1929.....	95
D.5	Risque d'isolement face aux lahars.....	95
D.5.1	Indice de risque de coupure (IRC) des points de franchissement.....	95
D.5.2	Indice de risque d'isolement territorial et enjeux associés.....	97
D.6	Optimisation de l'accessibilité en phase d'évacuation.....	100
	CONCLUSION.....	101
	BIBLIOGRAPHIE.....	103

INTRODUCTION : LA VULNERABILITE TERRITORIALE, UNE APPROCHE ENJEUX-CENTREE

La notion de vulnérabilité renvoie à une propension au dommage ou au dysfonctionnement d'enjeux particuliers, ce qui implique de prendre en considération une multitude de facteurs, directs et indirects, souvent en interaction dynamique et complexe. Elle peut s'appliquer à un territoire, c'est-à-dire à un système spatial complexe, vécu ou perçu par l'homme, et structuré autour de diverses ressources ou enjeux majeurs. Son analyse en géographie des risques s'appuie sur une posture scientifique enjeux-centrée qui sort des traditionnelles analyses de risque aléa-centrées. Elle va au-delà du seul espace touché par l'aléa pour s'intéresser aussi aux diffusions de vulnérabilités. En effet, « La notion de vulnérabilité territoriale découle de l'idée qu'il existe une solidarité de fait entre enjeux majeurs et territoire : les enjeux majeurs sont identifiés par rapport à un territoire, le territoire dépend de ses enjeux majeurs. Ce lien étroit entre enjeux majeurs et territoire implique la transmission inévitable de la vulnérabilité d'un enjeu majeur identifié et localisé, à l'ensemble du territoire. Autrement dit, la vulnérabilité d'un territoire peut s'appréhender par la vulnérabilité de ses enjeux majeurs » (D'Ercole & Metzger, 2009). Ces mêmes auteurs proposent six grandes catégories d'analyse, qui constituent autant de grilles de lecture de ce qui peut rendre un enjeu vulnérable :

1. La vulnérabilité « intrinsèque » des enjeux majeurs (ressources territoriales)
2. L'exposition des enjeux aux aléas
3. La dépendance (relations fonctionnelles entre enjeux)
4. La capacité de contrôle du territoire (accessibilité des enjeux)
5. Les alternatives de fonctionnement des enjeux
6. Le niveau de préparation à la gestion des crises

Le programme de recherche CASAVA nous a permis d'explorer, d'expérimenter, de cartographier et d'évaluer ces différentes approches de la vulnérabilité de territoires soumis au risque volcanique. Nous avons dû pour cela développer des bases de données appropriées, des indicateurs spécifiques, des protocoles méthodologiques particuliers, afin de proposer une nouvelle analyse de ces territoires en vue d'une aide à la gestion de crises futures. Un gros effort d'harmonisation a été réalisé de manière à privilégier une analyse comparative entre la Guadeloupe et la Martinique, et de la sorte apprécier certaines spécificités de l'une ou de l'autre de ces îles en termes de vulnérabilités directe et indirecte face aux menaces volcaniques. Une importante partie de la recherche a donc été consacrée à la mise au point de référentiels cartographique et méthodologiques totalement inédits. L'objectif est d'aider la planification préventive de gestion de crise et de susciter un débat public sur le niveau de préparation des sociétés antillaises face aux menaces volcaniques en facilitant l'appropriation des risques par le biais de la cartographie et des géo-indicateurs.

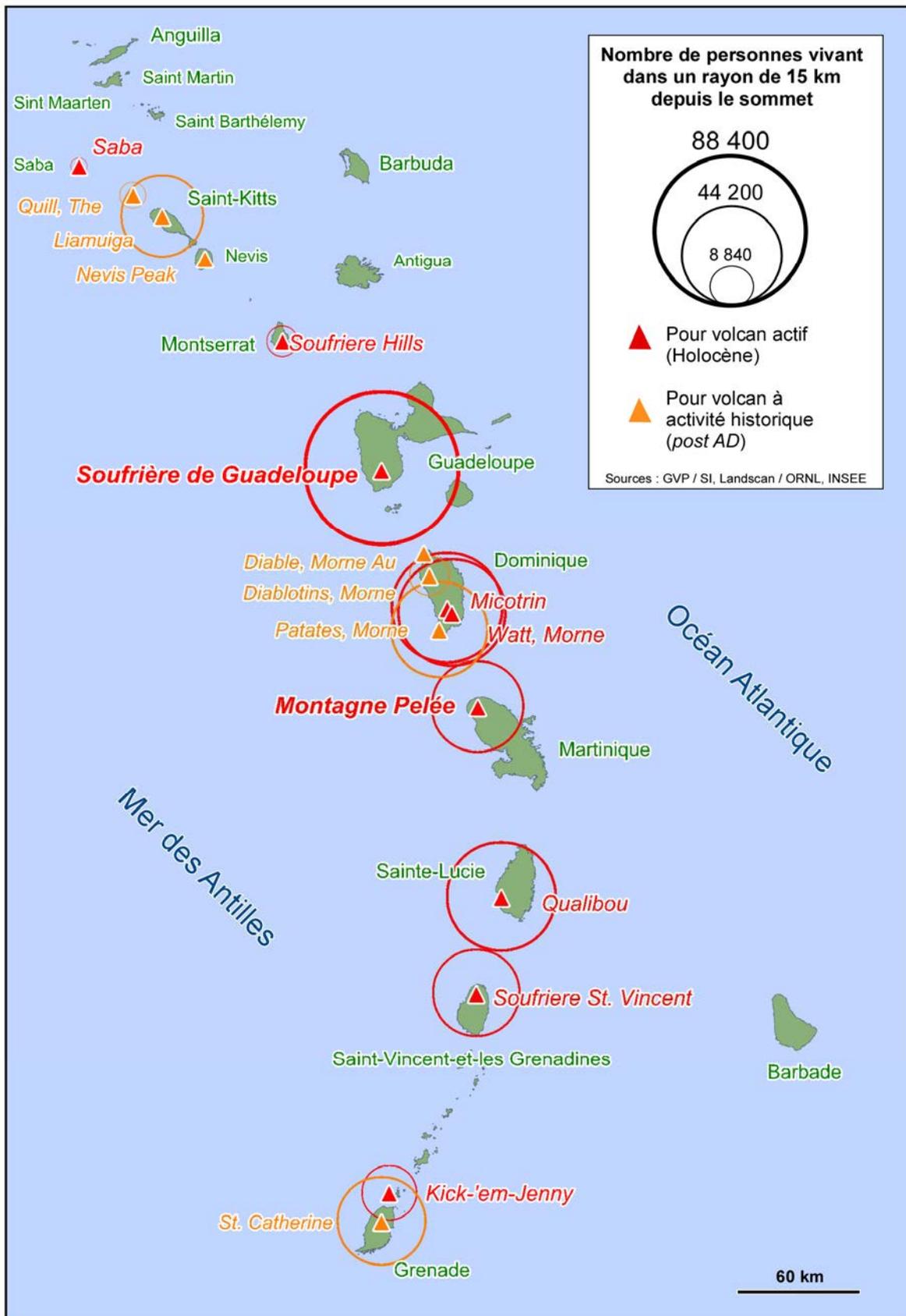


Figure A1 - Les volcans actifs de l'arc antillais et exposition humaine associée (source GVP, SI).

A EXPOSITION, RISQUE ET ETALEMENT URBAIN EN ZONE VOLCANIQUE

A.1 UNE MENACE VOLCANIQUE BIEN IDENTIFIEE

Les Antilles françaises possèdent deux volcans actifs, avec la Montagne Pelée au nord de la Martinique et la Soufrière au sud de la Guadeloupe en Basse-Terre. Ces deux volcans appartiennent à l'arc de subduction intra-océanique des Petites Antilles qui compte 16 volcans actifs (activité durant l'Holocène) entre les îles de Saba au Nord et de Grenade au Sud. Parmi eux, 9 ont connu une activité historique. C'est dans la partie centrale de l'arc que se produit la plus grande activité. Ces volcans émettent des magmas différenciés, visqueux et à forte potentialité explosive. Trois styles éruptifs dominant l'activité : des éruptions péléennes à dôme de lave, des éruptions pliniennes explosives à cheminée ouverte, et des éruptions phréatiques superficielles. On estime que 314 000 personnes vivent à moins de 15 km de ces 16 volcans actifs, soit dans l'enveloppe des aléas les plus meurtriers (figure A1). Cette exposition au risque volcanique représente 260 000 personnes (83 %) si on considère les 9 volcans actifs à activité historique. C'est la Guadeloupe qui détient le record d'exposition (Soufrière), suivie de la Dominique (Micotrin et Morne Watt), puis de Saint-Lucie (Qualibou) et de Saint-Vincent (Soufrière).

Les crises éruptives historiques connues sont au nombre de cinq pour la Soufrière et de quatre pour la Montagne Pelée. Elles se sont caractérisées par des éruptions phréatiques ou magmatiques associant les principaux aléas volcaniques, excepté des coulées de lave. La crise éruptive de la Montagne Pelée de 1902-1903 se solda par près de 30 000 victimes suite aux paroxysmes à écoulements pyroclastiques du 8 mai (29 000 morts à Saint-Pierre) et du 30 août (1000 morts supplémentaires au Morne-Rouge). L'évènement du 8 mai demeure la catastrophe volcanique mondiale et historique la plus meurtrière imputable à un aléa volcanique directement associé au magma. Cette éruption, dont la reconstitution scientifique par le géologue Alfred Lacroix marqua le début de la volcanologie moderne, entraîna la destruction totale de la ville de Saint-Pierre, alors capitale économique de l'île. Elle influença fortement le développement de la Martinique en recentrant l'essentiel des activités sur sa capitale actuelle, Fort-de-France.

La Soufrière de Guadeloupe n'a pas connu d'éruption magmatique depuis l'an 1635 qui marque le début de la colonisation française. L'éruption phréatique de 1976 a cependant fortement marqué les Guadeloupéens et suscité une controverse scientifique qui a fortement compliqué la gestion de la crise par les autorités. Elle a entraîné l'évacuation des sept communes les plus exposées dans le sud de la Basse-Terre et près de 73 000 personnes ont dû trouver refuge durant plusieurs mois principalement en Grande-Terre. Contrairement à la Montagne Pelée qui a connu une décroissance significative de son activité depuis la dernière éruption de 1932 (niveau vert), l'activité sismique, fumerolienne et thermique de la Soufrière est globalement en lente augmentation depuis 1992, ce qui se traduit actuellement par une mise en vigilance instrumentale de l'édifice (niveau jaune). En raison de la présence de gaz toxiques, un arrêté municipal de la ville de Saint-Claude interdit par ailleurs l'accès du public à certaines zones du sommet.

Cette mise en vigilance s'appuie en amont sur une surveillance instrumentale assurée par chacun des observatoires volcanologiques. Elle constitue le premier maillon d'une planification de crise décrite par des plans de secours spécialisés volcans (PSS) et qui doit aller jusqu'à l'organisation d'une évacuation massive et préventive de population en cas de nouveau réveil.

A.2 DES ZONES D'ÉTUDE INCLUANT LES PÉRIMÈTRES DE DANGER

Nos zones d'étude s'étendent dans des périmètres de danger volcanique de 15 km de rayon depuis chaque sommet volcanique. Ces zones englobent les principaux phénomènes volcaniques susceptibles de se produire sur chacun des volcans selon les différents scénarios éruptifs établis. Les deux cartes d'aléa volcanique global de référence utilisées regroupent les mêmes niveaux d'aléa des différents phénomènes volcaniques impliqués (figure A2). Chaque niveau d'aléa est classiquement défini par une probabilité d'occurrence et une intensité potentielle. Ces cartes d'aléas s'appuient sur des études géologiques, géomorphologiques, strato-chronologiques et sur une reconstitution des principales éruptions passées. Pour la Martinique, la carte d'aléa global utilisée provient des travaux du BRGM (Stieltjes et al., 1998). Elle introduit quatre zones de danger (faible à très fort) et intègre sept phénomènes majeurs pour un scénario d'éruption maximale crédible (dôme de lave, gaz, écoulements pyroclastiques, cendres, lahars, tsunamis, mouvements de terrain). Le reste du territoire peut cependant être aussi affecté par des retombées de cendres, mais de moindre épaisseur. La carte d'aléa volcanique de la Guadeloupe a été réalisée par J.C. Komorowski (2005) en s'appuyant sur la reconstitution de cinq scénarios éruptifs passés (depuis 15 000 ans). Elle introduit cinq zones de danger et les mêmes phénomènes volcaniques que pour la Montagne Pelée, la sismicité d'origine volcanique en plus. Pour le niveau d'aléa « fort », une distinction apparaît suivant le type d'éruption considéré, c'est-à-dire avec ou sans explosion latérale dirigée de type « blast ». Le reste du territoire peut aussi subir les effets des retombées de cendres volcaniques. Malgré les multiples incertitudes liées à la complexité des phénomènes volcaniques qu'elles tentent de spatialiser (extension, nature, occurrence, intensité, enchainement, durée), ces cartes permettent cependant d'évaluer et prévenir les risques en localisant les principaux enjeux exposés et les zones prioritaires d'évacuation en cas de crise (Leone F. & Lesales T. 2006). Le projet ANR CASAVA qui soutient cette recherche doit également en préciser et/ou redéfinir les contours en recourant aux outils numériques de modélisation 3D d'éruptions volcaniques.

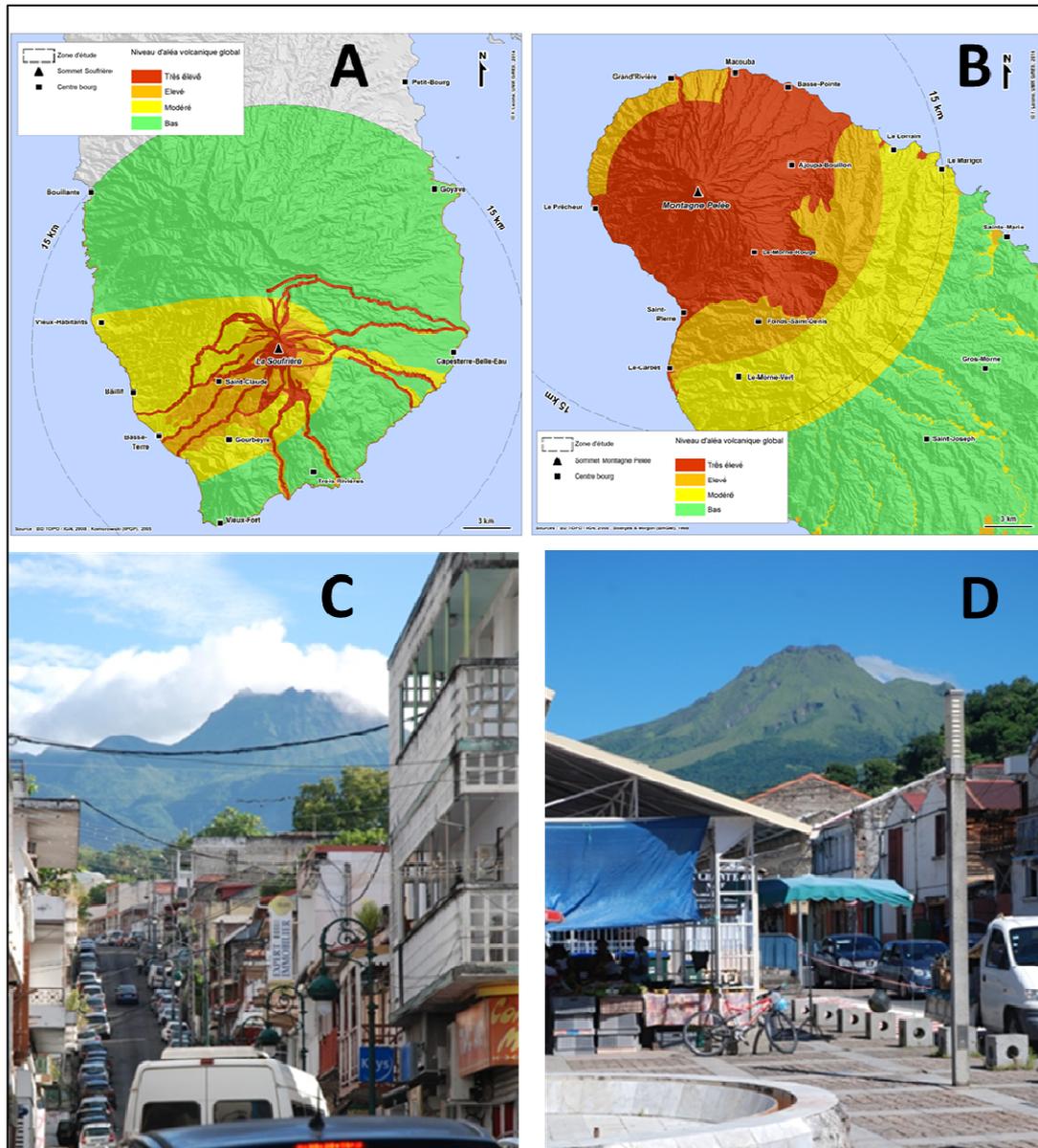


Figure A2 : A & B : Zones d'étude (R=15 km) et niveaux d'aléas volcaniques. C : La Soufrière vue depuis Basse-Terre (Guadeloupe), D : La Montagne Pelée vue depuis Saint-Pierre (Martinique). Photos F. Leone, déc. 2014.

A.3 EXPOSITION ET RISQUE ACTUELS

Un premier niveau d'analyse concerne la mesure du risque direct, résultant de l'exposition spatiale des enjeux situés dans l'enveloppe de danger (aléa), mais sans appréciation de l'intensité des dommages potentiels. Ces dommages dépendront de conditions de vulnérabilité (propension au dommage) de ces enjeux et d'aléas impliqués (durée et intensité) complexes à modéliser mais abordables au moyen de matrices de dysfonctionnement (*cf. partie B*) et de courbes de vulnérabilités (*cf. Jenkins et al. in CASAVA*). Une analyse d'exposition de ce type fait l'hypothèse d'enjeux fixes. Mais elle peut être affinée, en particulier dans la zone du Sud Basse-Terre, en exploitant les données de fréquentation humaine spatialisées et multi-temporelles (au pas horaire) établies par Elodie Lemaitre (2012) dans le cadre de CASAVA en codirection UMR GRED et BRGM (*figure A3*). De telles données de fréquentation

permettront dans un futur proche d'alimenter des scénarios d'impacts humains et ou d'évacuation beaucoup plus précis en jouant sur la variable temporelle et quantitative de l'exposition humaine (nombre de victimes potentielles, ou nombre de personnes à évacuer ou secourir suivant le moment de la journée).

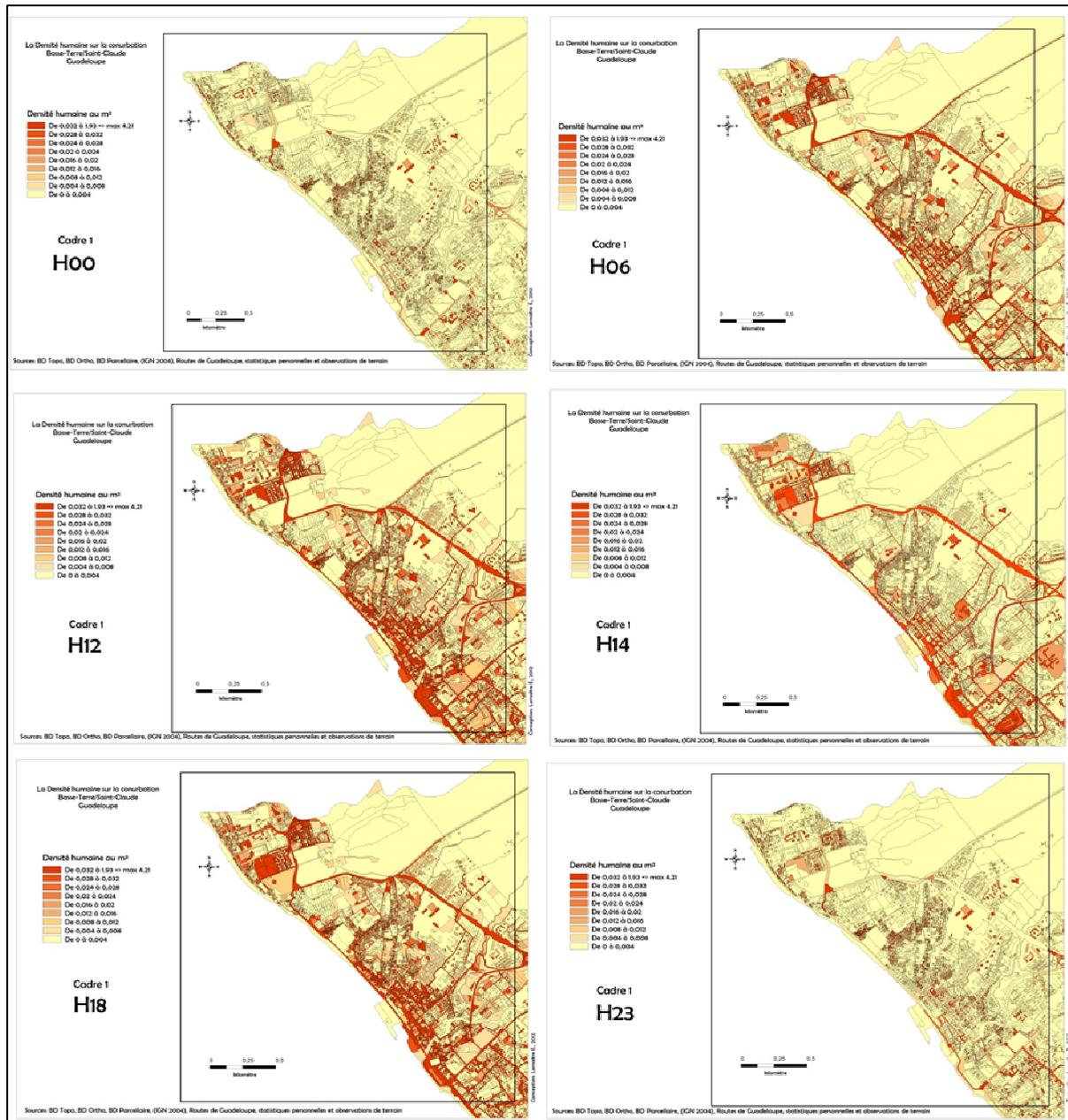


Figure A3 – Extraits de la modélisation des densités humaines multi-temporelles sur le secteur de Basse-Terre (secteur 1, source Lemaitre, 2012).

Une première approximation de cette exposition a été établie pour des enveloppes de danger concentriques de rayon croissant. Elle concerne les ressources majeures (globales) spécialement inventoriées pour chaque île dans le cadre de CASAVA. Pour ce faire nous avons défini 7 classes de ressources matérialisées dans le SIG CASAVA par des points : moyens d’alerte, énergie, hydrique, commerciale et industrielle, administrative et scolaire, médicale et sécuritaire, extérieures (figure A4). L’autre famille d’enjeux concerne la population résidente (nocturne) agrégée sur des mailles de 200 m de côté. Ces informations de

2007 sont issues pour la Martinique des données carroyées de population de l'INSEE (<http://www.insee.fr/>), et pour la Guadeloupe du recensement de population par quartier IRIS, qui a été désagrégé sur le bâti de la BD TOPO IGN puis réagrégé sur des mailles de 200 m. En effet les données carroyées sur la population ne sont disponibles que pour la Martinique et il a donc fallu les reconstituer pour la Guadeloupe de façon à exploiter deux bases équivalentes.

Il apparait que c'est la Guadeloupe qui concentre le plus d'enjeux humains en zone volcanique du fait de la proximité des bourgs de Saint-Claude et de Basse-Terre situés à moins de 15 km du sommet de la Soufrière (88 385 personnes en Guadeloupe contre 35 855 en Martinique) (figure A5). Il en va de même avec les ressources globales (669 unités contre 264) et en particulier hydriques (167 unités contre 143). Une analyse plus détaillée de l'exposition de ces ressources, notamment des réseaux hydriques et électriques, est proposée dans la partie C de ce rapport.

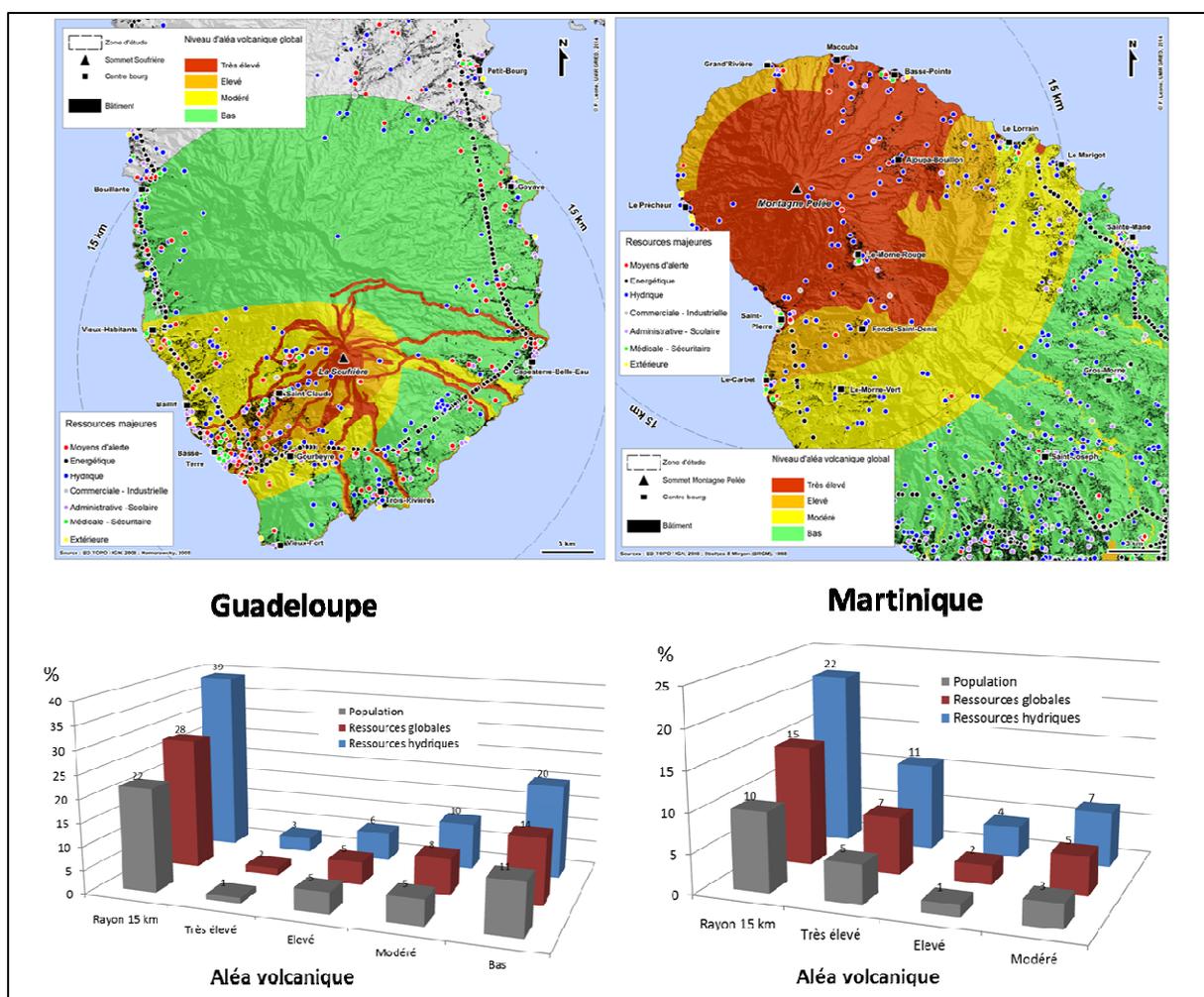


Figure A4 – Enjeux humains et ressources territoriales exposés aux niveaux d'aléas volcaniques en Martinique et Guadeloupe.

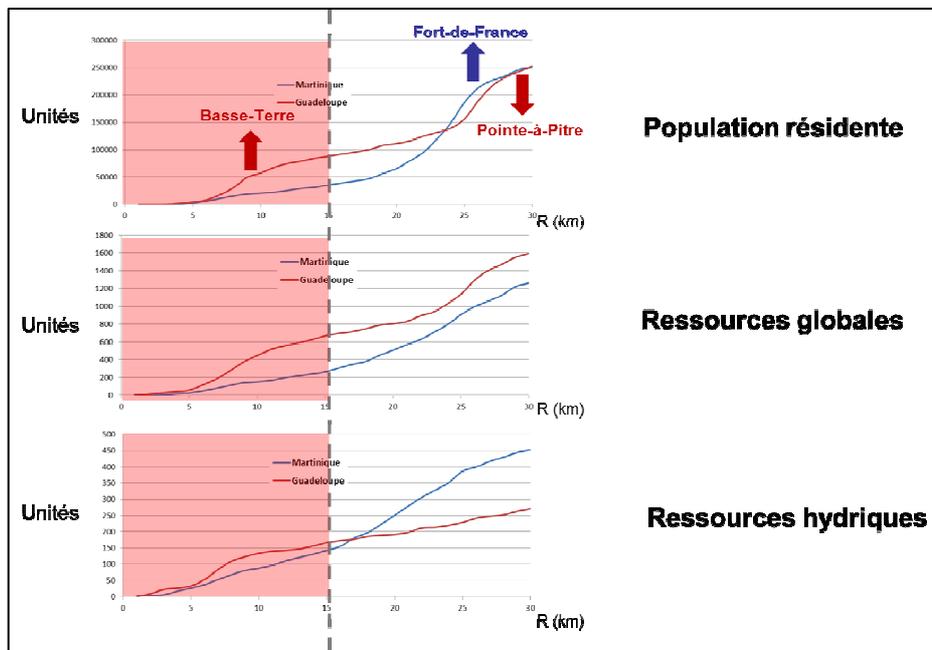


Figure A5 : Evolution de l'exposition des enjeux humains et des ressources territoriales en fonction de la distance au sommet volcanique.

Cette mesure de l'exposition peut être affinée en considérant les quatre enveloppes de niveaux d'aléas de chaque volcan, toujours dans un rayon de 15 km. En supposant que ces cartes d'aléa ont été établies en respectant les mêmes règles d'expertise (ce qui est en partie le cas), la situation est ici inversée avec davantage d'enjeux en zone d'aléa maximal (très élevé) en Martinique qu'en Guadeloupe. C'est particulièrement vrai pour la population résidente (18 143 personnes contre 4 630) ou les ressources globales (128 unités contre 37). C'est le fait d'une enveloppe d'aléa maximal (rouge) beaucoup plus étendue dans la première île. En proportion relative c'est 5% de la population totale de la Martinique qui sont exposés à un niveau d'aléa volcanique très élevé alors que ce taux n'est que de 1% pour la Guadeloupe (figure A4). En revanche, si on considère la zone d'aléa fort (orange), la Guadeloupe totalise 18 000 personnes exposées en plus, puisque cela touche les secteurs de Saint-Claude et de Basse-Terre, alors qu'en Martinique le gain d'exposition humaine n'est que de 5 500 personnes.

La mesure du risque peut également s'établir au moyen d'un indice synthétique, qui conformément à la définition analytique du risque, combine à minima un niveau d'aléa et une valeur d'exposition, humaine dans ce cas précis. Pour ce faire, chaque composante a été traduite par un indicateur compris entre 0 et 1 (IAV pour l'aléa volcanique, IEH pour les enjeux humains). L'objectif est de hiérarchiser de manière relative ce niveau de risque humain (IRH) et d'en apprécier sa variabilité spatiale sur chaque zone volcanique. L'IAV comporte 4 niveaux (0,25 ; 0,5 ; 0,75, 1) correspondant à chaque classe d'aléa d'importance croissante. L'IEH a été établi pour chaque maille de 200 m de côté en divisant la valeur de population (Pop) de chaque maille par la valeur de la maille la plus peuplée (Popmax) de la zone d'étude (rayon de 15 km), soit $IEH = Pop/Pop_{max}$. Pop max est de 745 personnes en Guadeloupe et de 412 en Martinique.

$$\text{Ainsi, } IRH (0-1) = IAV * IEH$$

Les mailles ont ensuite été converties en points de façon à générer une interpolation sur ces valeurs. Les cartes obtenues permettent d'identifier des foyers de risque humain d'origine

volcanique (figure A6). Ces foyers correspondent aux secteurs où les plus fortes densités humaines côtoient les niveaux d'aléa volcaniques les plus élevés. Cela donne en particulier pour la Guadeloupe un cône de risque de pertes humaines maximal dont le sommet est placé sur la Soufrière et qui recouvre les zones habitées de Saint-Claude et Basse-Terre. En Martinique, les secteurs à haut risque humain sont le reflet des densités de population plus que de la variabilité de l'aléa puisque la zone d'aléa volcanique maximale couvre la majeure partie du territoire étudié. Ces deux cartes ne sont pas comparables, du fait de valeurs de Popmax différentes, mais elles offrent une lecture assez fine et parlante des secteurs à fort potentiel de pertes humaines, mais aussi en infrastructures diverses.

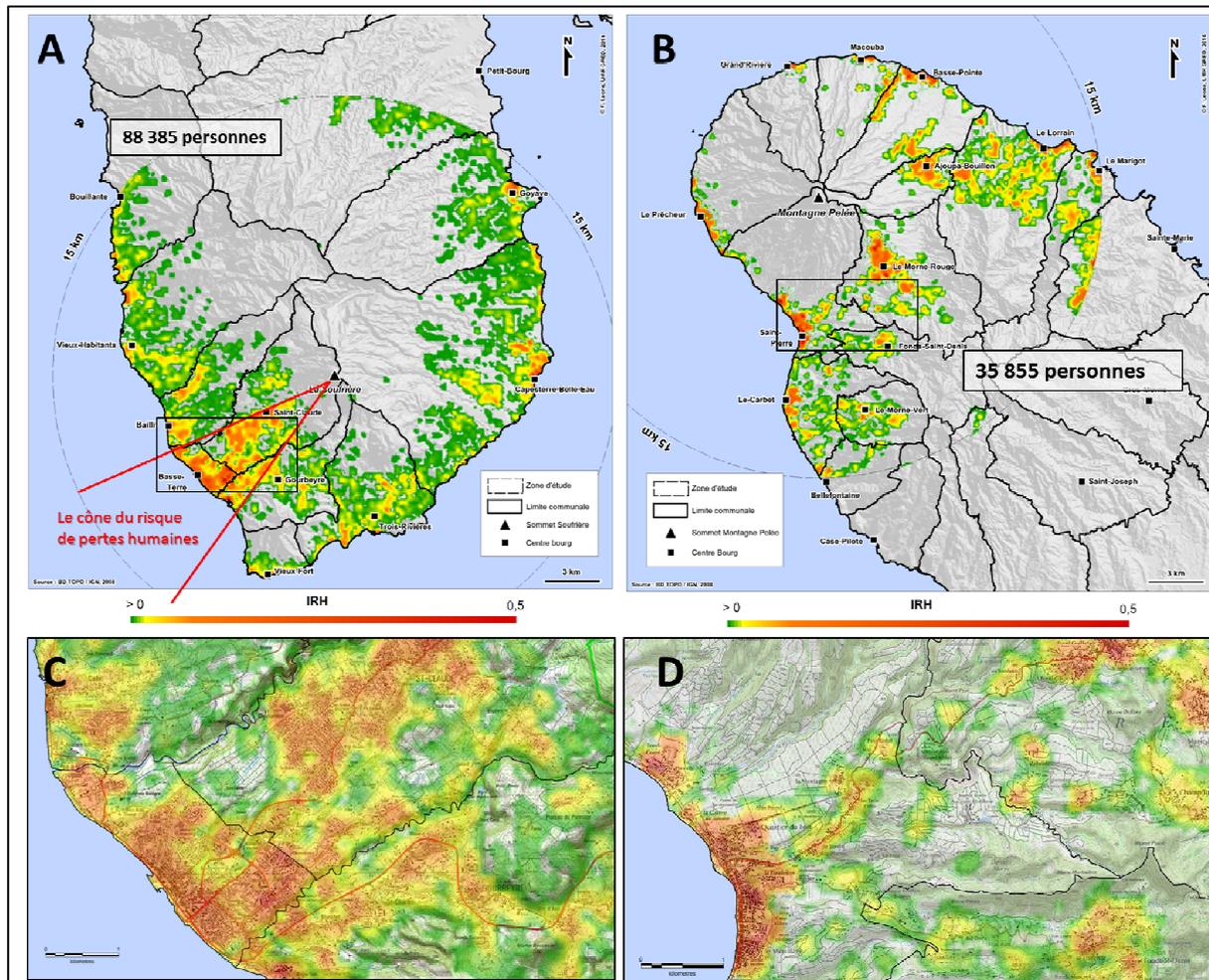


Figure A6 : Indice de Risque Humain (IRH) interpolé (avec zoom C sur : Basse-Terre / Saint-Claude, et D sur : Saint-Pierre / Morne-Rouge).

A.4 UNE URBANISATION PRODUCTRICE DE RISQUE

Depuis les années 60, les Antilles françaises ont connu une augmentation de population et du niveau de vie moyen corrélés à une croissance urbaine rapide et étendue. La fin de l'activité du système de plantation, la départementalisation (1946), les différentes politiques d'aménagement (défiscalisation des investissements, modernisation du système de transport, etc.), les aides sociales, la fonctionnarisation des emplois, la tertiarisation de l'économie et l'augmentation de la mobilité des ménages, sont les principales causes de ces évolutions urbaines (Audebert, 2011 ; Burac, 1991 ; Giocottino, 1991). Cette urbanisation rapide et assez mal maîtrisée, est la marque du passage d'une société de plantation à une société de consommation largement soutenue par la métropole. Elle se caractérise par une macrocéphalie des centres urbains, une forte littoralisation, un étalement urbain le long des axes de communication et par un mitage des espaces naturels ou à vocation agricole (Goiffon, 2003 ; Plantin, 2011 ; De Vassoigne, 1997). Bien que contrainte par l'insularité, un relief marqué et plus récemment par des zonages réglementaires en matière de protection de la nature (réserves) ou de prévention des risques naturels prévisibles (PPRn), cette dynamique urbaine se poursuit, notamment dans les zones volcaniques. Il en découle une augmentation préoccupante d'enjeux structurels, humains et économiques, et donc de conditions propices au risque de catastrophe volcanique visible par exemple sur l'île voisine de Montserrat qui a été amputée de sa capitale Plymouth, entièrement anéantie par une crise éruptive qui dure depuis 1995. Actuellement on estime qu'environ 36 000 personnes résident en permanence à moins de 15 km de la Montagne Pelée (9,2 %) contre 88 500 personnes pour la Soufrière de Guadeloupe (23 %). Cette exposition concerne 13,4 % du patrimoine bâti en Martinique et 21,6 % en Guadeloupe. Plus préoccupant encore en cas d'éruption, même mineure et phréatique, est le risque de se retrouver en pénurie d'eau potable, puisque 50 % des captages d'alimentation en eau potable de la Guadeloupe et 63 % de ceux de Martinique se retrouvent dans ce même périmètre de danger et pourraient être souillés dès les premières retombées volcaniques.

Par conséquent, la connaissance du volcan tout comme la préparation à une future crise, doivent aller de pair avec une évaluation des enjeux présents, et de fait s'intéresser aux dynamiques sociales et territoriales qui tendent à produire le risque sur ces deux espaces insulaires. Dans le cadre de cette partie nous essaierons de reconstituer, de spatialiser, de comprendre et de comparer ces dynamiques en prenant comme indicateur synthétique d'exposition au risque, les surfaces bâties et les grands projets de construction en zone volcanique. Ce travail permettra de cartographier à deux échelles (massif volcanique et communale) et suivant deux approches méthodologiques complémentaires (densité du bâti et tache urbaine) un étalement urbain producteur de risque entre 1955 et les prochaines années. Les bases de données SIG constituées reposent sur un protocole méthodologique reproductible afin d'en assurer la mise à jour régulière pour un suivi sur le long terme.

A.5 DEUX METHODES D'ANALYSE POUR DEUX ECHELLES D'OBSERVATION

A.5.1 APPROCHE REGIONALE PAR DENSITES DE BATIMENTS

La première méthode de cartographie des surfaces bâties a été appliquée à l'échelle des aires de menaces des deux volcans, soit dans un rayon de 15 km (707 km²). Elle repose sur la reconnaissance visuelle du bâti issu des cartes topographiques et des photographies aériennes multidates de l'IGN (tableau A1). Ces différents supports ont été préalablement numérisés,

géoréférencés et reprojetés en vue de leur exploitation au sein d'un même système d'information géographique (SIG CASAVA).

Martinique					
Année	Type/format dispo	Echelle	Feuille-ref carte-couverture	Zone R15km	Géoféréncé
1955	Carte topo/papier	1/20 000	1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10	OK	NON
1983	Carte topo/papier	1/25 000	4501 M, 4502 M	OK	NON
2006	SCAN 25/raster	1/25 000	Toute l'île	OK	OUI
2010	Orthophoto		Toute l'île	OK	OUI
Guadeloupe					
1956	Carte topo/papier	1/20 000	19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26	OK	NON
1969	Carte topo/papier	1/25 000	4605 G, 4606 G	OK	NON
1985	Carte topo/papier	1/25 000	4606 G, 4606 G	OK	OUI
2001	SCAN 25/raster	1/25 000	Toute l'île	OK	OUI
2010	Orthophoto		Toute l'île	OK	OUI

Tableau A1 – Sources de données utilisées pour reconstituer l'étalement urbain

Afin de faciliter leur visualisation et d'atténuer certaines imprécisions de localisation, les résultats ont été traités sur une base carroyée au moyen de mailles carrées de 200 m de côté. Ce maillage territorial est particulièrement adapté à l'analyse diachronique sous SIG car un état d'occupation urbaine peut être attribué à chaque maille et pour différentes dates (Mazurek H. et Dayre P., 1988) ; la cartographie et le traitement statistique en seront d'autant facilités. Pour ce faire, une typologie simplifiée en trois classes a été proposée afin de prendre en compte au mieux l'inégale répartition spatiale des bâtiments et en particulier l'effet de mitage de l'espace très présent aux Antilles (figure A7) :

- Le type A décrit des mailles à urbanisation dispersée. Il s'applique aux mailles contenant un à cinq bâtiments, généralement isolés (habitat, bâtiments agricoles...), dans des zones à dominante rurale.
- Le type B décrit une urbanisation aérée. Les mailles contiennent plus de cinq bâtiments mais l'urbanisation continue ne représente pas plus de 50 % de la surface de la maille. D'après la typologie *Corine Land Cover* utilisée en Europe, une zone d'urbanisation est considérée comme étant continue lorsque les surfaces artificialisées (surfaces bâties et voies de communication) couvrent plus de 80% de la surface. Cela correspond à l'habitat présent le long des voies de communication et à l'habitat diffus.
- Le type C décrit une urbanisation dense et continue. Les bâtiments occupent plus de 50 % de la surface. Cela correspond aux centres-bourgs et aux espaces périurbains denses.

Type	A	B	C
Désignation	Bâtiment(s) dispersé(s)	Urbanisation aérée	Urbanisation dense
Exemple de maille (SCAN 25)			
Exemple de maille (BD ORTHO)			
Caractérisation	La maille contient moins de 6 bâtiments (5max)	La maille contient moins de 50% d'urbanisation continue et plus de 5 bâtiments	L'urbanisation est continue sur plus de 50% de la maille.
Code Mapinfo	10	110	1110

Figure A7 – Typologie des mailles urbanisées.

A.5.2 APPROCHE LOCALE PAR TACHE URBAINE

La seconde méthode, dite de calcul d'une tache urbaine, est tirée des travaux du Certu (2008). Particulièrement adaptée pour représenter l'évolution de l'étalement urbain, elle est fondée sur l'érosion-dilatation numérique d'objets contenus dans un SIG. Elle a été appliquée dans cette étude aux bâtiments de Saint-Pierre en Martinique (4 400 habitants) et de Saint-Claude en Guadeloupe (10 500 habitants), deux agglomérations particulièrement exposées qui sont respectivement situées en zone d'aléa volcanique très fort et fort. Cette approche nous permet de visualiser l'évolution de l'urbanisation à une échelle plus fine sur deux zones de 3,5 km de côté. Cela a nécessité au préalable de vectoriser tous les bâtiments concernés des cartes topographiques de 1955/1956 et 1983/1985 et de récupérer la couche « bâti indifférencié » de la BD TOPO IGN de 2009 dont les données ont été mises à jour par photo-interprétation des images de la BD ORTHO haute résolution (5 m) IGN de 2010.

Cette approche permet d'introduire la notion de continuité du bâti, entendu comme distance entre les bâtiments. La distance retenue dépend du type d'habitat de la zone étudiée et du critère de continuité dont va dépendre le morcelage de la tache urbaine. Par exemple, les unités urbaines de l'INSEE englobent tous les bâtiments distants de moins de 200 m. Pour les agglomérations de Saint-Pierre et de Saint-Claude un critère de continuité (D) de 100 m entre deux bâtiments a été appliqué. Le calcul de l'enveloppe de la tache urbaine est une opération de morphologie mathématique combinant deux opérations élémentaires, une dilatation et une érosion (figure A8). La première étape, dite de fermeture de la tache urbaine par dilatation consiste à agréger entre eux les bâtis distants de moins de D m (critère de continuité) en créant un tampon (buffer) de rayon égal à D/2 m pour chaque objet, puis d'assembler ces tampons. Dans notre cas, c'est donc un tampon positif de 50 m qui a été appliqué. La seconde étape, dite d'érosion, consiste à redonner aux objets leur taille initiale mais en laissant reliés entre eux les objets qui ont été agrégés en appliquant un tampon négatif de rayon -50 m à la zone dilatée précédemment. En zone urbaine, une dilatation-érosion de 50 m des bâtiments permet de détecter les proximités et de tenir compte de l'artificialisation du terrain liée à la construction (Certu, 2008). Ces deux étapes ont été renouvelées pour chaque date et les trois enveloppes ont ensuite été superposées pour montrer l'évolution urbaine de chaque ville entre 1955 et 2010.

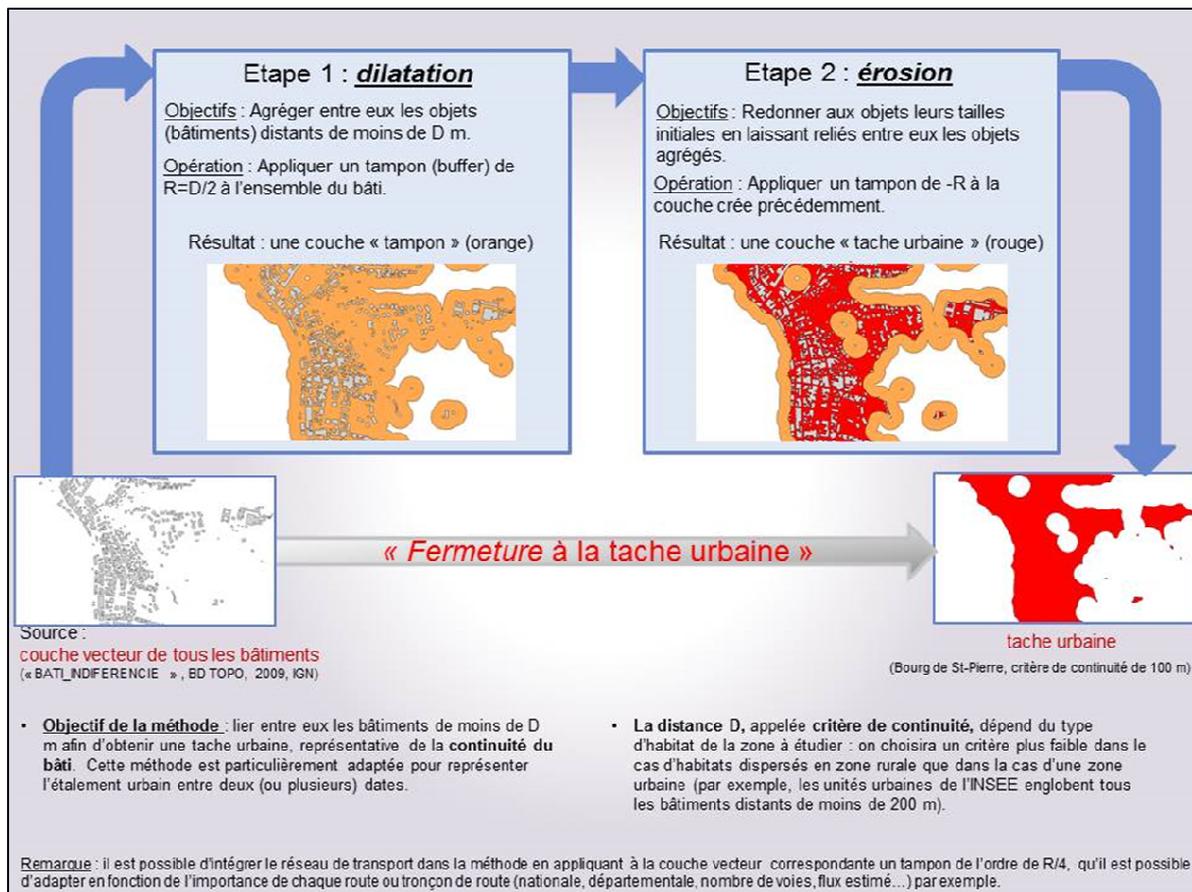


Figure A8 - Méthode de fermeture à la tache urbaine (CERTU).

A.6 RESULTATS

Les bases de données géographiques constituées ont permis la création de deux jeux de cartes complémentaires sur l'évolution du bâti. Celle-ci mettent en avant, par la représentation cartographique, l'augmentation des enjeux structurels autour de la Pelée et de la Soufrière de Guadeloupe et indiquent donc l'augmentation d'un certain niveau de risque, compris comme une exposition toujours grandissante aux aléas volcaniques. Un premier jeu de carte a été créé par analyse thématique à partir du carroyage à l'échelle des deux zones menacées des deux volcans. Ce jeu est constitué de deux types de cartes : une série de cartes de l'état des zones bâties en 1955, en 1985 et en 2010, et une carte de l'évolution de ces zones bâties. Le deuxième jeu de cartes concerne l'évolution des taches urbaines de Saint Pierre et de Saint Claude par superposition des taches de 1955, de 1985 et de 2010.

A.6.1 A L'ÉCHELLE DES AIRES DE MENACES DES DEUX VOLCANS

La mise à profit des données constituées par carroyage est riche d'enseignements à plusieurs niveaux. La taille des mailles ne rend pas cohérente une analyse fine à l'échelle communale, les résultats seront donc commentés au maximum dans leurs globalité, et à l'échelle des aires de menaces volcaniques. Le constat en termes de quantification est sans équivoque : l'emprise spatiale du patrimoine bâti a fortement augmenté sur la période 1955-2010 et ce, sur les deux îles. L'augmentation a été plus importante pour la zone étudiée en Guadeloupe où le nombre de mailles comportant au moins un bâtiment a plus que doublé (+106 %). Il a augmenté sur la même période de 57 % en Martinique (figure A9).

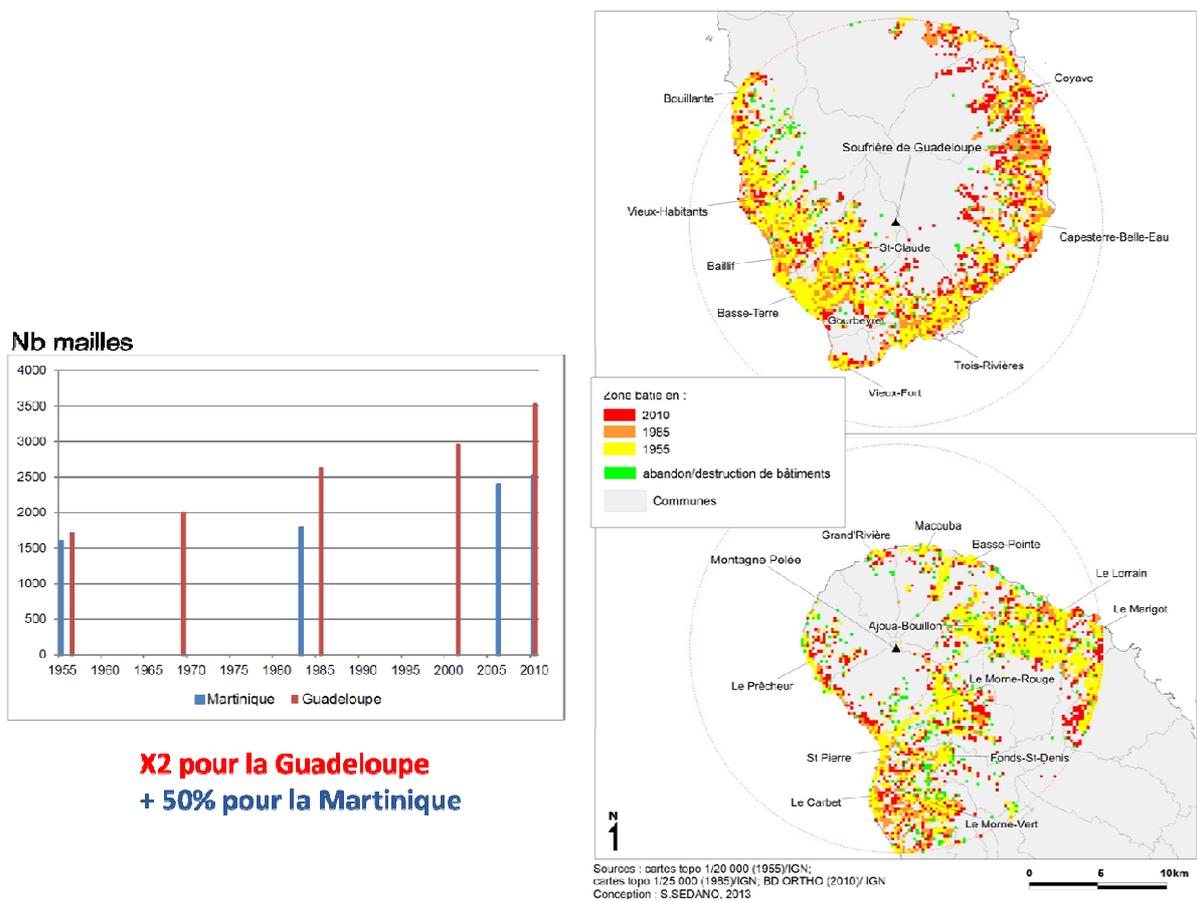


Figure A9 – Evolution des mailles urbanisées entre 1955/56 et 2010.

Dans le détail, c'est l'urbanisation dense qui a eu la plus forte progression. Elle a été multipliée par quatre en Martinique et par dix en Guadeloupe. Elle ne représente cependant qu'une faible proportion des surfaces urbanisées : moins de 5 % en Martinique et moins de 10% en Guadeloupe pour l'année 2010. Cette proportion était plus faible par le passé. Cette évolution correspond à un accroissement des bourgs par l'urbanisation périurbaine dense (figure A10).

Ce sont les surfaces qui ne contiennent que des bâtiments isolés qui occupent le plus d'espace, avec cependant une baisse dans la proportion au cours du temps, baisse qui semble se faire au profit de l'urbanisation aérée. Les zones rurales ont donc tendance à se densifier, à s'urbaniser. De plus, on constate une accélération de l'augmentation des surfaces d'urbanisation aérée à partir des années 2000. Cette urbanisation des zones rurales est, semble-t-il, la transcription du phénomène de mitage relevé dans la bibliographie (Plantin, 2011).

La carte de l'évolution des zones bâties, même si elle masque les évolutions de densité, montre que les abords directs des deux volcans sont épargnés par l'étalement urbain. Ces espaces n'ont en effet jamais été attractifs pour l'établissement humain en raison des fortes pentes et des inconvénients dus à l'altitude. De plus, ils font l'objet de protections (forêts départementalo-domaniales). Le fait que dans certains endroits des bâtiments aient été détruits entre 1955 et 2010 rappelle que les espaces reculés ont connu, comme en métropole mais cependant plus tardivement, un exode rural fort. L'urbanisation dense s'est développée à

partir des centres-bourgs majoritairement distribués sur les littoraux. La construction de grands ensembles dans les années 70-80 a participé à cette évolution (Plantin, 2011).

En Martinique, la commune du Morne-Rouge, semble profiter de son emplacement sur un col. Il offre des surfaces planes facilitant la construction et une altitude moyenne de 500 m, attractive pour ses conditions climatiques favorables (températures plus fraîches). Les surfaces bâties dans cette commune ont fortement progressé entre 1985 et 2010 au sud-est du centre historique. Le nord du bourg de Saint-Pierre est dans le même cas. Le Carbet, plus proche de l'agglomération de Fort-de-France (au sud de la carte) est la commune qui a connu la plus grosse augmentation du bâti en Martinique et ce malgré un relief marqué et des vallées encaissées qui compliquent la construction. La proximité de Fort-de-France joue donc un rôle majeur.

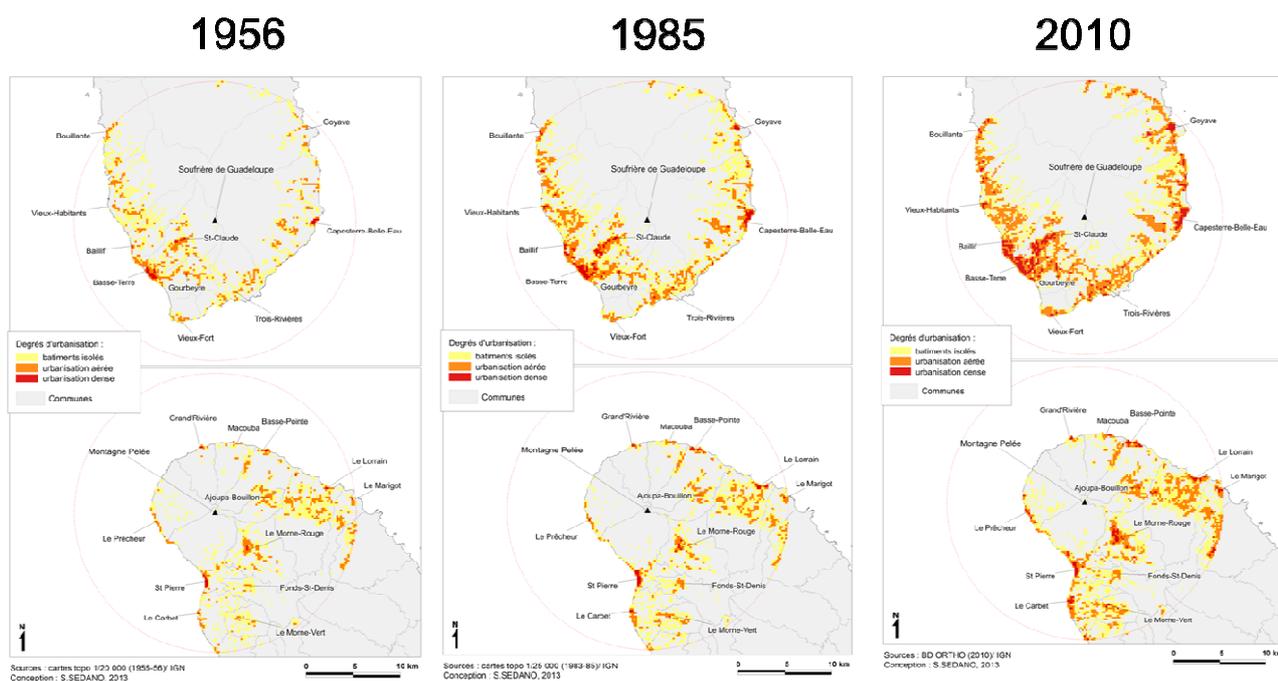


Figure A10 – Densités d'urbanisation en 1956, 1985 et 2010.

En Guadeloupe, l'étalement du bâti est partout plus important qu'il ne l'est en Martinique. C'est également la proximité de la capitale économique, Point-à-Pitre (N-NO de la carte), qui semble déterminer les grandes lignes des différences locales en termes d'évolution du bâti. Ainsi, les communes de Capesterre-Belle-Eau et Goyave, à l'est de la zone d'étude, sont davantage touchées que celles de l'ouest. Cette partie de la zone est également la moins pentue. En 1955, très peu de zones bâties étaient présentes sur ces communes dominées par l'agriculture. On assiste donc dans ces communes à un changement fort d'occupation du sol. L'axe Basse-Terre / Saint-Claude s'est également beaucoup développé, mais davantage en termes de densification des mailles que de nouvelles conquêtes.

On remarque qu'une grande partie de l'intérieur des terres étaient déjà occupée par le bâti en 1955, et ce particulièrement en Martinique. Avec la carte de 1955, on voit en effet une forte occupation du sol par l'habitat diffus à l'est du sommet de la Pelée, d'Ajoupa-Bouillon au Marigot. Si cette zone se densifie par la suite, son étalement, à notre échelle d'analyse, reste limité. Le type d'habitat rural des mornes qui caractérise cet espace au milieu du XXème siècle va se muter en milieu quasi urbain en habitat pavillonnaire.

A.6.2 ETUDE DE CAS : SAINT-PIERRE ET SAINT-CLAUDE

A partir des couches du bâti et en appliquant la méthode de la tache urbaine, nous avons réalisé des cartes de l'évolution de l'urbanisation à l'échelle des agglomérations de Saint-Claude en Guadeloupe et de Saint-Pierre en Martinique (**figure A11**).

En 55 ans, la tache urbaine de l'agglomération de Saint Claude a plus que triplé, passant de 92ha en 1955 à 351 ha en 2010 sur la zone étudiée alors que la population de la commune passe de 9 000 habitants en 1961 à 10 500 en 2010, soit une augmentation bien plus faible que celle de la tache urbaine (+16%, INSEE). L'étalement urbain s'est particulièrement orienté à partir du bourg historique en direction du sud-ouest, le long de la nationale 3 qui relie Saint Claude à Basse-Terre, préfecture de la Guadeloupe. Cet espace en pente douce, proche de Basse-Terre, situé entre 200 et 500 m d'altitude, a été logiquement le lieu d'implantation préférentiel. Les logements individuels occupent une grande majorité des espaces urbanisés. Cette zone était largement dominée par la culture de la banane, et dans une moindre mesure par la culture de la canne à sucre en 1955 (carte IGN). C'est donc au détriment de l'agriculture que s'est développée l'agglomération de Saint-Claude. L'augmentation de la surface urbanisée s'est accélérée dans le temps, elle est passée de 4,3 ha par an en moyenne entre 1955 et 1985 à 5,2 ha par an entre 1985 et 2010.

L'agrandissement de la tache urbaine de Saint-Pierre a été moins rapide que celle de Saint-Claude. Elle a cependant doublé, passant de 58 ha à 125 ha entre 1955 et 2010. La population communale est passée de 5 000 habitants en 1954 à 4 400 en 2010, soit une baisse de 12%. Entre 1983 et 2010, l'urbanisation s'est développée au nord du bourg le long de la côte sur une zone de brousse. Le sud et l'est du centre de Saint-Pierre ont un relief escarpé qui limite l'implantation de bâtiments. Les terres agricoles au nord entre le quartier du Fort et celui de la Montagne ont été épargnées.

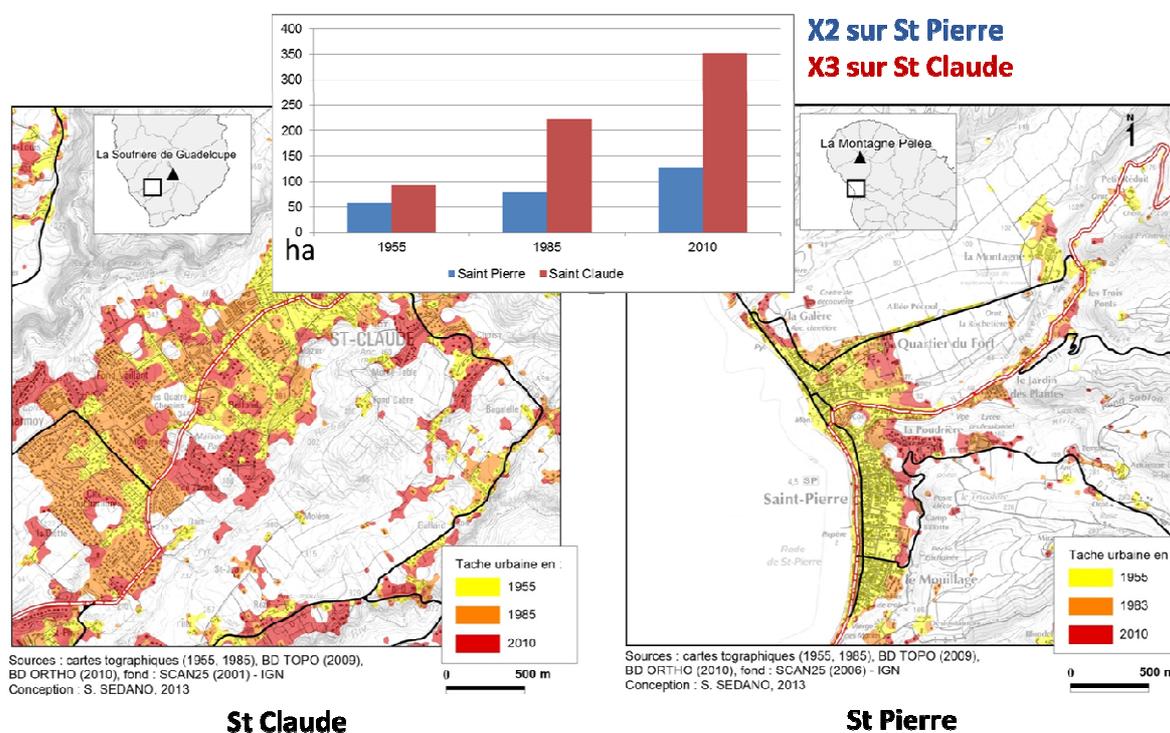


Figure A11 – Reconstitution des taches urbaines de Saint-Pierre et Saint-Claude.

A l'échelle des agglomérations de Saint-Claude et de Saint-Pierre et avec la méthode de la tache urbaine, les tendances dans l'augmentation du patrimoine bâti sont en cohérence avec les résultats à l'échelle des aires de menaces réalisés par carroyage : proche des volcans, l'urbanisation a fortement augmenté. Elle a plus vite augmenté en Guadeloupe qu'en Martinique. Cette différence est due à la démographie, qui est en baisse (-17%) dans le nord de la Martinique alors qu'elle croît dans le sud de la Basse-Terre (+16%). On aurait pu penser que l'accroissement de l'urbanisation est seulement déterminé par un accroissement de population. Cette analyse plus fine à l'échelle des agglomérations a mis en exergue le fait qu'il n'en est pas la cause fondamentale puisque même lorsque la population baisse, l'emprise de l'urbanisation ne cesse de croître.

L'évolution démographique des deux zones autour de la Pelée et de la Soufrière explique leurs différences de vitesse d'accroissement du patrimoine bâti mais n'est pas le principal moteur de l'étalement urbain. Le chapitre suivant donne des clefs de compréhension de ce fort étalement urbain.

A.7 LES FACTEURS DE L'ETALEMENT URBAIN

L'étalement du bâti que l'on peut observer en Martinique et en Guadeloupe s'apparente à l'étalement urbain commun à toutes les sociétés industrialisées. Ce dernier est engendré par l'attrait des villes, concentrant les activités tertiaires, et la mobilité des ménages, permettant l'éloignement entre le domicile et le travail. Le développement de l'urbanisation s'étale donc théoriquement de façon auréolaire autour des centres urbains. Cependant, dans les Antilles Françaises, et particulièrement autour des massifs volcaniques, l'insularité et le relief conditionnent l'occupation humaine. De plus, dans notre étude c'est l'étalement de tous les bâtis qui est ciblé, représentant un accroissement des enjeux. Le terme d'urbain n'est donc pas forcément approprié, car l'augmentation du bâti a lieu également dans des zones rurales. En outre, il nous est apparu difficile de revenir sur tout ce qui fait l'évolution du bâti. Nous ne retiendrons que ce qui nous paraît essentiel et spécifique à ces territoires. En effet, l'augmentation et la répartition du patrimoine bâti aux Antilles Françaises revêt des particularités qu'il semble important de souligner.

A.7.1 LES FACTEURS HISTORIQUES : UNE STRUCTURE HERITEE

La forte augmentation de l'urbanisation des 60 dernières années s'appuie sur une structure préexistante, héritée principalement du système colonial. Il convient de revenir sur l'histoire de ces territoires, ici liée à la fois à la géographie et au contexte commercial et économique de la colonisation. Les français colonisent la Guadeloupe et la Martinique dès 1635. Après une première phase d'implantation difficile, caractérisée par la culture vivrière de survie, succède l'économie de plantation, qui va structurer le paysage antillais. Les deux entités majeures, sur lesquelles va s'appuyer le développement actuel des zones bâties, sont les bourgs et les «habitations».

Les bourgs correspondent aux centres économiques, juridiques et militaires de l'époque coloniale, et leur implantation a suivi des logiques particulières. Tous les premiers bourgs se situent sur le littoral et jouent ainsi un rôle de relais, d'exportation des produits sucriers vers l'Europe par la voie maritime. La présence de cours d'eau pérennes a également conditionné l'implantation humaine, c'est donc à l'embouchure des cours d'eau que vont se développer les premiers centres urbains. Les flancs des volcans, en Martinique comme en Guadeloupe, présentent de nombreuses sources, et ces zones sont particulièrement arrosées en raison de

leurs altitudes élevées (1467 m pour la Soufrière et 1397 m pour la Pelée). Les embouchures des principaux cours d'eau qui dévalent les pentes des volcans sont colonisés en premier. De plus, le caractère encaissé des vallées est apprécié pour des logiques de défense (Goiffon, 2003). La toponymie témoigne encore de l'enjeu stratégique de l'eau, les communes de Capesterre-Belle-Eau (lieu de passage de Christophe Colomb), de Trois-Rivières ou de Grand'Rivière sont des exemples éloquentes. Le bourg, comptoir commercial et port, lieu de contrôle intégré dans le réseau d'exploitation économique des îles au cœur du circuit qui relie les plantations à l'Europe, est donc la première base des zones bâties antillaises. Cependant, jusqu'en 1946, seule une petite fraction de la population va occuper ces centres administratifs et commerciaux.

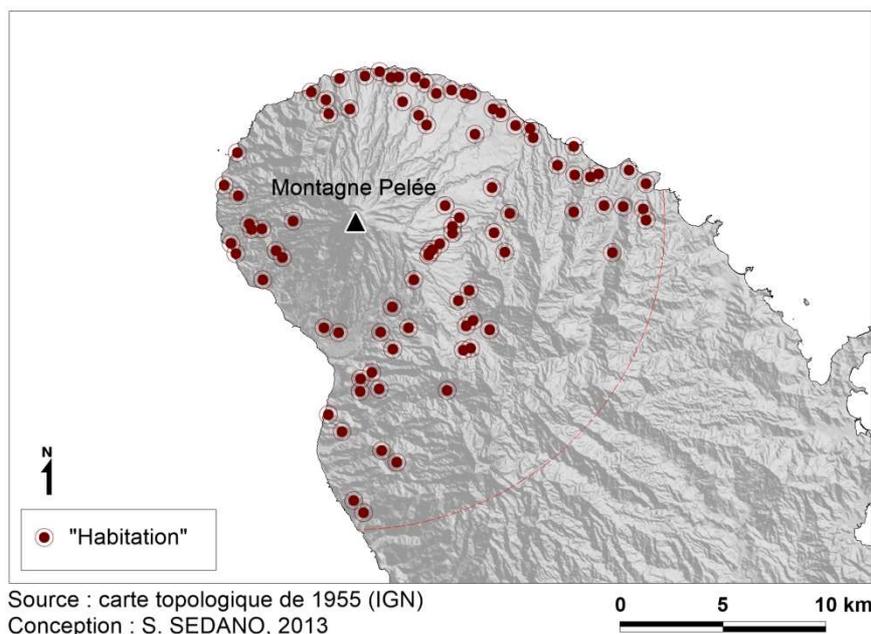


Figure A12 - Le maillage serré des habitations en 1955 (Martinique).

Les « habitations » correspondent à une autre unité structurante de l'occupation humaine aux Antilles. Ce terme vernaculaire désigne une unité sociale autonome dont la fonction est l'exploitation de la canne à sucre et sa transformation en sucre. La maison du maître blanc, entourée par les cases d'esclaves, les plantations de canne à sucre et vivrières, et la sucrerie, appelée « foyer » de l'habitation, en sont les éléments constitutifs. C'est l'entité de base des campagnes de Martinique et de Guadeloupe à l'époque coloniale. Elles se répartissent partout où le relief et les conditions agronomiques permettent l'exploitation agricole et de manière répartie sur le territoire (De Vassoigne, 2000). Ces exploitations agricoles ont fortement participé au déboisement sur les deux îles, qui a eu lieu progressivement du littoral vers les terres, et constituent une matrice du développement des zones bâties. Cette réalité explique en partie le constat du bâti dispersé dès 1955 que notre cartographie a pu mettre en avant. On se rend compte, en analysant les cartes IGN de cette époque, que la majorité des bâtiments en dur qui ne se trouvent ni dans les bourgs ni aux abords directs de voies de communications sont encore appelées « habitations » (en Martinique le terme toponymique « habitation » apparaît 87 fois dans la zone de 15 km autour de la Montagne Pelée sur la carte IGN de 1955) (figure A12). Il y a donc bien une inertie territoriale forte aux Antilles et notre hypothèse est que le fort développement des zones bâties en milieu rural et le mitage de l'espace engendré s'appuient en partie sur cette structure d'occupation du sol, héritée du système colonial.

De la fin du XVIII^{ème} siècle, où les bourgs et les habitations se mettent en place, jusqu'en 1848, ces deux unités constituent les uniques foyers de peuplement. L'abolition de l'esclavage va modifier ce modèle en dissociant les liens sociaux et géographiques entre les esclaves et les maîtres des habitations sucrières. Une part des anciens esclaves, ceux qui étaient attachés sans recours et sans statut aux habitations, ont pu acquérir des terres et devenir propriétaires agricoles, et particulièrement sur les mornes délaissés par les propriétaires blancs. Des milliers de petites exploitations y furent implantées. Si la culture vivrière fut la priorité de ces esclaves libérés, la canne à sucre fut également cultivée. Sur notre cartographie de 1955 en Martinique, à l'est de la Montagne Pelée, on voit que les communes du Marigot et du Lorrain présentent davantage de zones bâties dans les terres que sur le littoral. C'est la transcription de ce type d'habitat dispersé des mornes, qui par inertie des établissements humains, apparaît ici. Ce phénomène de conquête humaine des mornes est à mettre en relation directe avec la dispersion actuelle du bâti. Il a permis à la fois l'occupation et l'appropriation des territoires par leurs occupants.

Le terme de quartier en Martinique et en Guadeloupe désigne tous les groupements de maisons qui ne sont ni dans les bourgs ni dans leurs périphéries directes. Si le caractère agricole a disparu de ce type d'habitat, un grand nombre de ces quartiers correspond à d'anciens « mornes à nègres ».

Enfin rappelons que l'éruption de la Montagne Pelée en 1902, en détruisant la ville de Saint-Pierre, alors centre économique et culturel de la Martinique, va bouleverser le développement de l'île. Toutes les fonctions institutionnelles, économiques et militaires seront alors concentrées sur Fort-de-France. La logique géographique prévalant avant 1902 était en fait une bipolarité Saint-Pierre-Fort-de-France à l'avantage de Saint-Pierre. Cet événement majeur va participer à la « macrocéphalie » actuelle de l'agglomération fayolaise (De Vassoigne, 2000). L'éloignement de ce bassin d'emploi et son accès difficile lié au relief du nord de la Martinique va engendrer, pour l'époque contemporaine, une urbanisation relativement faible autour de la Montagne Pelée. C'est davantage le centre, puis le sud de l'île qui vont se développer. Cette bipolarité caractérise en revanche encore le territoire guadeloupéen. Basse-Terre est encore la préfecture malgré un déplacement du centre économique vers Point-à-Pitre, en raison principalement des meilleurs équipements portuaires et aéroportuaires.

A.7.2 LES FACTEURS SOCIAUX-ECONOMIQUES ET CULTURELS

La première cause de l'étalement du bâti est la construction importante de logements individuels. Notre travail de terrain et l'analyse des cartes IGN anciennes et des photographies aériennes (BD ORTHO) de 2010 nous a permis de constater que les espaces naturels et agricoles de Guadeloupe et de Martinique sont mités par la construction de maisons individuelles. Ce développement s'appuie sur une histoire particulière qui a conduit à un fort sentiment d'appropriation de la terre de la part des Antillais et à une occupation du territoire associant littoralisation et dispersion dans les terres.

Le développement de l'habitat est une problématique particulièrement importante par rapport aux risques naturels : seuls 50 % des ménages martiniquais et 44 % des ménages guadeloupéens souscrivent une assurance habitation pour leur résidence principale – ce taux est de 99% pour la métropole (INSEE, enquête Budget de famille, 2006). La majorité des ménages n'est donc pas couverte en cas de catastrophe naturelle.

Entre 1999 et 2006, la croissance annuelle moyenne de la population était de 0,7 % à la Martinique et 0,8 % à la Guadeloupe (INSEE). Parallèlement, la croissance du nombre de logements a été 2,2 % à la Martinique et de 2,5 % à la Guadeloupe. L'augmentation du nombre de logements est donc trois fois plus rapide que celles de la population sur une période récente. Ces évolutions résultent de la diminution de la taille des ménages. Un phénomène de décohabitation est à l'origine de cette diminution, lié à l'augmentation du niveau de vie des populations et à des changements de comportements.

Concernant la prépondérance de l'habitat individuel, les chiffres viennent soutenir nos observations de terrain. D'après l'INSEE, pour l'année 2009, les trois-quarts des résidences principales en Guadeloupe sont des maisons individuelles, plus des deux-tiers en Martinique, alors qu'en métropole, cette proportion est égale à un peu plus de la moitié.

Comment peut-on expliquer le phénomène de décohabitation et ce fort taux de maisons individuelles qui mitent l'espace de la Guadeloupe et de la Martinique et augmentent fortement les enjeux exposés aux menaces volcaniques en grignotant les espaces naturels et agricoles ?

Le premier élément de réponse est d'ordre économique. Le niveau de vie moyen a fortement augmenté depuis la départementalisation de 1946. Les différentes politiques publiques de « mise à niveau » des DOM ont permis des progrès sociaux indéniables (Audebert, 2011). Les politiques de défiscalisation des investissements, qui consiste à taxer moins les investissements dans des secteurs clés, dont le logement fait partie, ont permis aux ménages d'accéder plus facilement à la propriété. Si le lien positif entre les différentes politiques de défiscalisation et la construction de logements a été mis en évidence (Burac, 1991), il semble avoir des effets pervers au détriment de la construction de logement sociaux (IEDOM, Rapport annuel 2011). De plus, l'augmentation du niveau de vie moyen est également due à la « fonctionnarisation » de l'économie. Ce phénomène, commun à tous les DOM, correspond à une volonté de l'état français de dynamiser les économies des territoires d'Outre-Mer en augmentant la part de fonctionnaires dans l'activité et en gonflant leurs salaires. Cependant le niveau de revenu médian des DOM reste inférieure de 36 % à celui de la métropole. En 2006 il ne représentait que la moitié de celui de la métropole en 1995 – et le taux de chômage est encore élevé, de l'ordre de 25 % en Martinique et 29 % en Guadeloupe.

La décohabitation et l'avènement de l'habitat pavillonnaire en zone rurale sont également des faits culturels, c'est le signe d'un changement des modes de vies. La décohabitation est le fait que des membres d'une même famille qui vivaient dans le même logement décident de s'installer séparément. La conséquence logique est la baisse du nombre moyen de personnes par logement. Ce nombre était proche de 4,4 en Martinique et en Guadeloupe en 1967, il est égal à 2,5 en 2009. A titre de comparaison, le nombre de personnes par logement est égal à 2,3 en moyenne en métropole. La décohabitation est permise par l'augmentation du niveau de vie bien sûr, mais associée au type d'habitat bien particulier que représentent les pavillons individuels. Elle est aussi le signe d'une occidentalisation des modes vies.

« *La machine ainsi lancée, le XXème siècle verra s'accélérer encore plus la logique de l'individualisme et, après la parenthèse des guerres mondiales, la famille nucléaire – papa, maman et les enfants...- érigée en modèle d'équilibre et de normalité part s'isoler dans des pavillons de banlieue où l'automobile fournit la clé de l'existence...* » (Torres, 2000). C'est donc bien ce schéma qui parvient aux Antilles Françaises avec un peu de retard, et qui sera celui qui va restructurer l'espace à partir de 1946 et surtout depuis 1970 avec l'augmentation significative du pouvoir d'achat des ménages. En s'appuyant sur les structures existantes précédemment évoquées, un fort accroissement des maisons individuelles se met en place. C'est le début de l'urbanité en zone rurale. Cet engouement massif pour l'habitat individuel

s'accompagne de l'avènement de la société de consommation, où la majorité des biens de consommation courante est accessible dans les supermarchés, ce qui entraîne l'obligation de la motorisation des déplacements (Goiffon, 2003). L'arrivée tardive de ces changements de modes de vie et de consommation a été fortement assistée par les différents apports de la métropole. Cela explique la rapidité de l'anthropisation des territoires de Guadeloupe et de Martinique et donc la forte augmentation des enjeux structurels en zones volcaniques.

Le développement de la mobilité individuelle est également un facteur du mitage de l'espace antillais. Les politiques volontaristes en termes d'infrastructures des années 70, ainsi que le niveau d'équipement des ménages en automobiles, ont en effet permis le développement des zones pavillonnaires excentrées des centres urbains, synonymes d'emploi. En 2009, 66 % des ménages guadeloupéens et 71 % des ménages martiniquais déclarent posséder au moins une voiture. Si ce taux d'équipement est à mettre en relation avec le mauvais réseau de transport en commun, l'absence de voie ferrée, et la non-utilisation des voies maritimes pour les trajets courts, il est également la traduction de nouveaux comportements.

Il est intéressant de constater que 59 % des ménages en Guadeloupe et 57 % en Martinique sont propriétaires de leur logement, chiffre du même ordre de grandeur que celui de la métropole (56 %). Cette proportion, pour les territoires d'Outre-Mer, est liée au fort taux de maisons individuelles (75,3 % en Guadeloupe et 64,5 % en Martinique). De nombreux ménages construisent leur maison eux-mêmes, et parfois sans permis, ce qui participe de fait à l'étalement anarchique des zones bâties. La « construction spontanée » est en effet encore un phénomène répandu aux Antilles. Il n'existe évidemment pas de statistiques précises concernant ces constructions sans permis. Elles sont estimées à 30 % de la construction de logements individuels en Martinique (DIREN, 2005) et semble être du même ordre en Guadeloupe (Olive V. et Riviere F., 2010). Le fort taux de propriétaires et les constructions sans permis sont également des facteurs explicatifs du faible taux d'assurance des logements (Calvet L. & Grislain-Létrémy C., 2011).

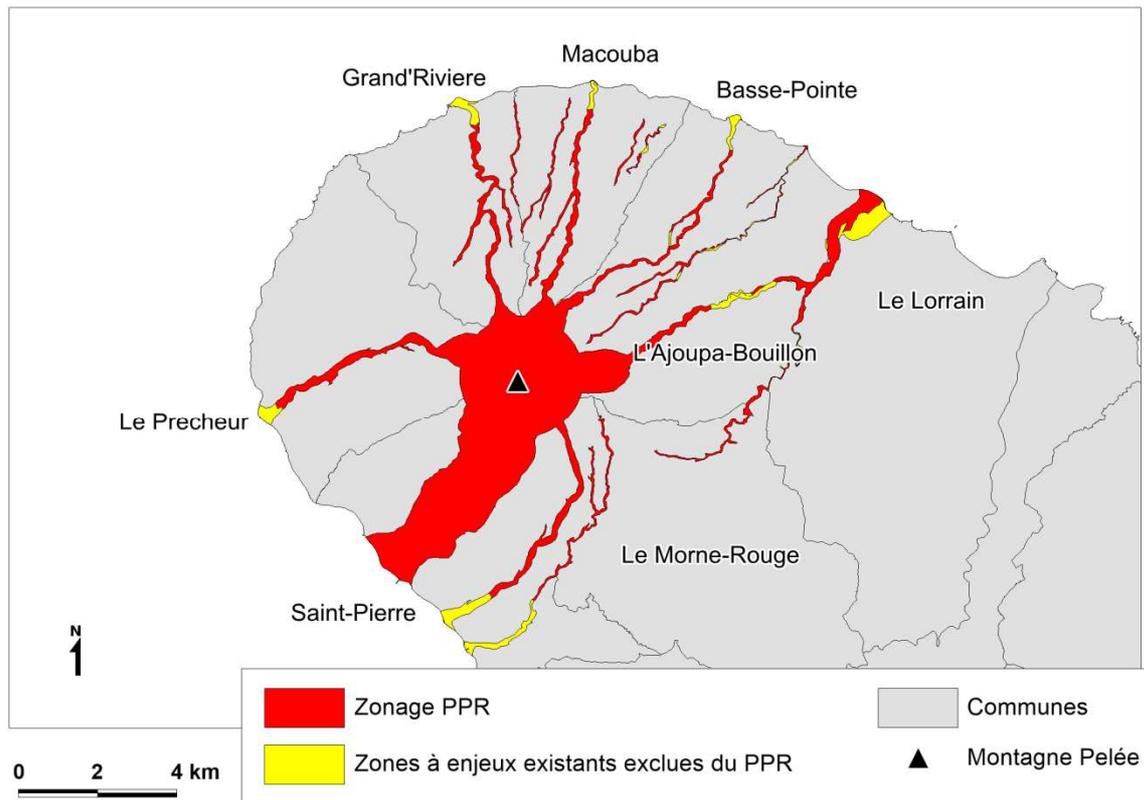
Les mutations sociales et économiques, avec la hausse du niveau de vie et l'occidentalisation des modes de vie, ont donc entraîné une augmentation sans précédent des enjeux structurels en zones volcaniques aux Antilles depuis la fin de la seconde guerre mondiale.

A.8 QUELLE PRISE EN COMPTE DU RISQUE VOLCANIQUE DANS L'AMENAGEMENT ?

La prise en compte du risque volcanique dans le PPR multi-aléa de la Martinique, réalisé à l'échelle départementale et arrêté en novembre 2004 (le premier de ce type à l'échelle nationale), a donné lieu à un zonage (figure A13). Sur la zone retenue, sont interdits :

- Les nouvelles constructions à usages d'habitations.
- L'agrandissement des constructions existantes avec création de nouveaux logements.
- Les constructions à caractères vulnérables (hôpitaux, écoles, établissements recevant du public, centre pour handicapés...).

Les constructions liées aux activités économiques telles que les carrières ou les exploitations agricoles sont autorisées.



Sources : DEAL Martinique ; Conception : S. SEDANO, 2013

Figure A13 - Zonage du PPR volcanique de la Martinique.

Ce zonage est différent de la carte d'aléa puisque n'ont été retenus que les aléas dont l'extension spatiale est connue (lahars, projections balistiques et mouvements de terrain de grande ampleur) et dont la probabilité de survenir est la plus forte. En outre, les zones à enjeux existants ont été exclues de ce zonage pour ne pas trop pénaliser le développement des communes du nord de la Martinique. Au final, la mise en place de ce zonage ne limite pas réellement le développement de l'urbanisation dans le nord de la Martinique puisque les zones rouges du PPR correspondent aux fonds de vallées sans enjeux et à la coulée de la Rivière Blanche (Saint-Pierre), zone traditionnellement réservée à l'extraction de matériaux de construction (carrières), activité qui reste permise. Cependant le principe visant à limiter l'implantation d'infrastructures sensibles et présentant un intérêt majeur pour tout le territoire a été appliqué.

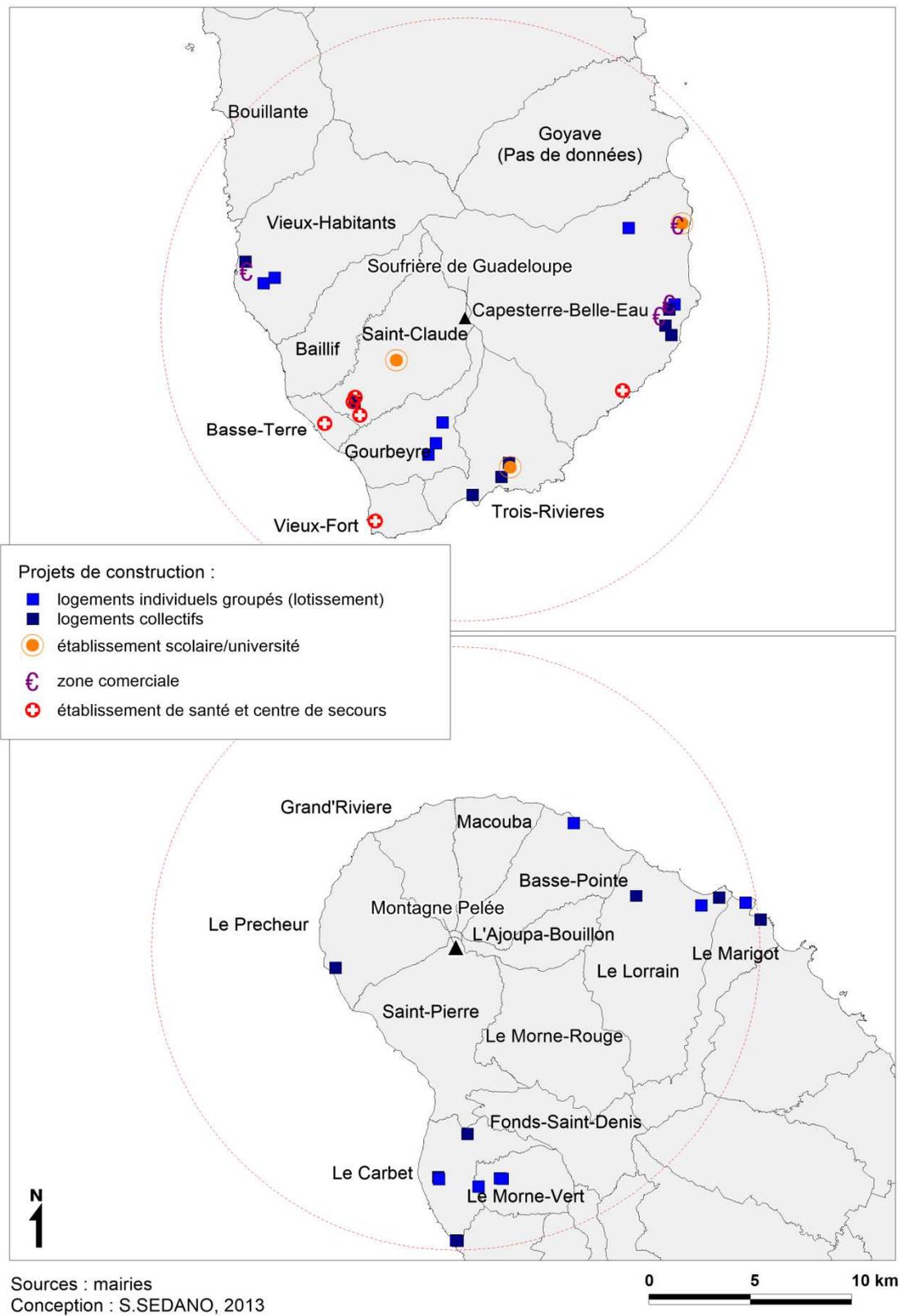


Figure A14 - Projets de construction en zones volcaniques.

Aucun des PPR de Guadeloupe ne contient de zonage réglementaire concernant l'aléa volcanique. La commune de Saint-Claude possède une carte d'aléa volcanique (non réglementaire). Les trois PPR de Saint-Claude, de Gourbeyre et de Basse-Terre imposent des zones inconstructibles sous conditions, mais ces zones se rapportent à la carte d'aléa, qui n'existe que pour Saint-Claude ... En effet dans ces trois communes sont interdits dans les zones soumises au lahars les « bâtiments devant servir à la gestion de crise en cas de catastrophe naturelle sauf s'il n'existe pas d'alternative réaliste pour l'implantation du projet sur un site à moindre risque sur un territoire éventuellement intercommunal » (Extrait du PPR de Saint-Claude).

Les entretiens que nous avons pu avoir avec les services communaux d'urbanisme nous ont permis de constater que les problématiques de risques naturels sont vécues localement comme une contrainte au développement. A partir de ces entretiens nous avons réalisé une carte des projets de construction (figure A14). Elle illustre le fait que les enjeux structurels ne vont cesser de croître à l'avenir autour de la Pelée et de la Soufrière. Cependant cette carte ne reprend que les projets où les communes ont eu un rôle à jouer (lotissement, vente, ou viabilisation d'une parcelle communale, construction d'hôpitaux, d'universités...). Elle exclut donc les constructions de maisons individuelles ne faisant pas l'objet d'un aménagement concerté. Cette carte illustre aussi le manque de dynamisme du nord de la Martinique où aucune installation de zone commerciale ni d'établissement scolaire n'est prévue dans un futur proche.

La prise en compte ou non de l'aléa volcanique dans l'aménagement futur s'apprécie également à travers le Schéma d'Aménagement Régional (SAR) de Guadeloupe et du Schéma de Cohérence Territoriale (SCOT) de la Communauté de Commune du Nord de la Martinique (CCNM). Dans ces documents, qui fixent les grandes orientations du développement local, il est rappelé, comme dans les PPR d'ailleurs, que la surveillance des volcans par l'IPGP permettra l'évacuation en cas de réveil. Les seules lignes consacrées au volcan dans le SAR de Guadeloupe sont les suivantes : « La Soufrière est un volcan contemporain actif. Elle s'est formée il y a environ 200 000 ans et a connu de nombreuses éruptions au cours de son histoire. La plus récente étant celle de 1976 qui a rappelé à la population guadeloupéenne la réalité du risque volcanique. L'important dispositif de veille mis en place par l'Institut de Physique du Globe permet un suivi en continu de l'activité volcanique et par conséquent une mise en alerte éventuelle adaptée à la gravité de la situation. » (SAR de Guadeloupe de décembre 2010, p.70).

De la même manière, le SCOT de la CCNM précise : « Il convient de souligner que la prise en compte de l'aléa volcanique relève davantage des dispositifs de surveillance et d'alerte que de contraintes à l'aménagement. En effet, si l'aléa peut être majeur, heureusement la probabilité d'occurrence des aléas les plus forts est faible et les moyens modernes de surveillance permettent de garantir la sécurité des personnes par des mesures d'évacuation préventive » (SCOT de la CCNM de juin 2012, p. 207).

On voit donc que la priorité est donnée à la surveillance et à l'évacuation plutôt qu'aux contraintes de constructions et d'aménagement sur les deux îles. D'ailleurs, des Plans de Secours Spécialisés (PSS) pour les éruptions volcaniques ont été adoptés sur les deux îles : en 1999 en Guadeloupe et en 2002 en Martinique. Le principal objectif de ces PSS est d'assurer l'évacuation des habitants des communes concernées par l'aléa volcanique. Ils recensent les mesures à mettre en œuvre par les pouvoirs publics pour la sauvegarde de la population.

La difficulté de prise en compte du risque volcanique dans l'aménagement témoigne d'un problème d'échelle temporelle fondamentale. En effet les périodes de retour des éruptions dangereuses, si difficile à établir soient-elles, sont toujours supérieures à la centaine d'années. Rappelons que la crue de référence pour l'élaboration d'un PPR inondation est la crue centennale (ou crue historique si elle est supérieure). C'est-à-dire que les cartes réglementaires sont conçues pour une crue d'une période de retour de cent ans. De la même manière, les normes sismiques de construction sont établies dans l'hypothèse d'une durée de vie des bâtiments inférieure à cent ans. Il y a donc une inadéquation forte entre l'échelle de temps des éruptions volcaniques et l'échelle de développement des sociétés humaines. De fait, la gestion du risque volcanique aux Antilles Françaises passe avant tout par la surveillance de l'activité des volcans et par la préparation à la gestion de crise plutôt que par une réelle limitation de l'augmentation des enjeux.

A.9 CONCLUSION

Ce travail a mis en évidence l'augmentation du patrimoine bâti en zones volcaniques depuis 1955, à deux échelles différentes et en appliquant deux méthodes différentes. Autour de la Soufrière les surfaces bâties ont doublé. Elles ont augmenté de 50% autour de la Montagne Pelée. L'agglomération de Saint-Claude a vu ses surfaces bâties tripler depuis 1955. Celles de l'agglomération de Saint-Pierre ont doublé. Cette augmentation du patrimoine bâti exposé aux aléas volcaniques est le signe de l'augmentation d'un certain niveau de risque. Les dommages potentiels, les éléments bâtis exposés ne cessent de croître. Ces résultats peuvent être un outil de sensibilisation des populations et des décideurs politiques. Nous avons montré que cette augmentation de l'urbanisation est un indicateur de profonds changements économiques, sociaux et culturels. C'est la conséquence du passage d'une société agricole et traditionnelle à une société de consommation individualiste qui amène le pavillon individuel comme idéal d'habitat. Mais les pertes matérielles en cas d'éruption risquent de fortement pénaliser le développement des régions concernées. De plus, rappelons que la majorité des ménages antillais ne souscrit pas d'assurance habitation et n'est donc pas couverte en cas de catastrophe naturelle. Outre les pertes économiques directes par destruction et les pertes économiques indirectes causées par l'arrêt de l'activité économique, une évacuation poserait des problèmes logistiques et sociaux auxquels les PSS ne répondent qu'en partie. La durée des éruptions est une composante importante. Elle peut dépasser la dizaine d'années, à l'image de l'éruption de la Soufrière de Montserrat qui a débuté en 1995 détruisant la ville de Plymouth, et qui dure, avec moins d'intensité cependant, encore aujourd'hui. En Martinique 10 % de la population vivent dans un rayon de 15 km de la Montagne Pelée. En Guadeloupe les 88 000 personnes qui vivent proche de la Soufrière représentent environ 22% de la population de l'île. Les conséquences d'une évacuation sur le long terme seraient donc importantes pour les populations évacuées et pour le reste de ces petits territoires.

Le travail de terrain nous a permis de constater que les préoccupations à l'échelle communale sont éloignées du risque volcanique, jugé lointain et peu probable, particulièrement en Guadeloupe où aucune éruption magmatique n'a eu lieu durant la période historique. En Martinique la mise en place du PPR multi-aléa à l'échelle départementale a donné lieu à des débats entre décideurs locaux et à un zonage, *a minima* certes, mais qui témoigne d'une première prise de conscience de la nécessité d'intégrer l'aléa volcanique dans l'aménagement. La Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL) de Guadeloupe a lancé une évaluation des Plans de Prévention des Risques qui devrait donner lieu à une harmonisation de ceux-ci au niveau départemental et à une meilleure intégration du risque volcanique dans l'aménagement du territoire.

B MATRICES DE DYSFONCTIONNEMENT CRITIQUE

B.1 OBJECTIFS

L'objectif de ce travail a été d'estimer des probabilités de dysfonctionnement critique (PDC) de différents types d'enjeux territoriaux soumis aux principaux aléas volcaniques. Ces PDC ont été définis de manière empirique, au regard de la littérature disponible, de l'expérience des auteurs et parfois du bon sens. Les PDC ont été consignées dans des matrices de dysfonctionnement - une par type d'aléa majeur - selon une approche directement inspirée des travaux de F. Leone (2007). Elles offrent un cadre de structuration des dysfonctionnements critiques potentiels en fonction de la nature de l'enjeu et de l'intensité (magnitude) de l'aléa. On entend par dysfonctionnement critique le seuil de dommage physique à partir duquel une fonction supportée par une infrastructure devient totalement inopérante. Ces seuils sont exprimés par trois probabilités d'atteinte (PDC) : faible, moyenne, forte. Le seuil critique est donc atteint avec le niveau fort. Ces matrices seront appliquées au réseau routier dans une partie ultérieure de ce rapport afin de modéliser les pertes d'accessibilité du territoire pour différents scénarios volcaniques impliquant des coupures de routes. Il conviendra ainsi de définir à partir de quelles intensités des aléas la circulation automobile (fonction) devient impossible (PDC forte).

B.2 ENJEUX RETENUS

Ont été retenus les enjeux susceptibles d'être impactés par un ou plusieurs aléas volcaniques. Ils sont tous présents et localisés (dans la mesure du possible) en Martinique. Pour certains, nous possédons des informations très précises (réseau d'alimentation en eau potable et ouvrages de franchissement). En s'appuyant sur le descriptif du contenu des cartes topographiques de l'IGN de 2011 nous avons retenu 45 enjeux potentiellement vulnérables que l'on a regroupés en cinq grands types :

- Enjeux fonctionnels :
 - Réseau d'adduction d'eau potable
 - Réseau de communication
 - Ouvrages de franchissement
 - Transports énergétiques
 - Engins motorisés
- Enjeux structurels
 - Bâti
- Enjeux environnementaux
 - Faune et flore
 - Réseau hydrographique
- Enjeux socioéconomiques
 - Cultures
 - Elevage
- Enjeux humains
 - Santé

B.3 LES ALEAS, PROCESSUS D'ENDOMMAGEMENT ET CRITERES DE MAGNITUDE

Nous avons retenu 9 aléas volcaniques susceptibles d'impacter ces enjeux. Ces phénomènes peuvent être directs ou indirects (induits par un ou plusieurs autres phénomènes).

- Aléas directs :
 - Retombées de cendres
 - Retombées balistiques
 - Coulées et intrusions de lave
 - Coulées pyroclastiques
 - Emanations de gaz et pluies acides

- Aléas indirects :
 - Lahars (coulée de boue)
 - Avalanches de débris
 - Tsunamis
 - Ondes de choc

Pour chaque aléa volcanique (direct ou indirect) il existe plusieurs types d'effets recensés. Ainsi nous avons des effets mécaniques, hydrauliques, chimiques, thermiques et électriques. A chacun de ces effets correspondent différents modes d'endommagements (ensevelissement, pression latérale, etc.) auxquels nous avons attribué des critères de magnitude exprimés en unités de mesure (épaisseur m, pression kPa etc.). Quand cela a été possible, chaque processus d'endommagement s'est vu attribué un critère de magnitude.

B.4 SEUILS D'INTENSITE

L'objectif a été de définir différents seuils d'intensité afin de représenter au mieux les probabilités de dysfonctionnement (faible, moyen, fort) des enjeux. Le **tableau B1** ci-dessous présente de manière synthétique les différents aléas volcaniques auxquels sont associées des valeurs d'intensité minimale ou moyenne, et maximale.

Aléas	(Épaisseur, Hauteur)		Vitesse de propagation		Température		Pression exercée		Diamètre	
	Min	Max	Moy	Max	Moy	Max	Min	Max	Min	Max
Coulée de lave	100cm	200cm	<1m/s	30m/s	750°C	1150°C	-	-	-	-
Retombées balistiques	-	-	50m/s	100m/s	-	<1000°C	-	-	>64mm	-
Retombées de cendres	<5mm	>600mm	<15m/s	30m/s	-	-	-	> 9 kPa	0,001mm	2mm
Coulée pyroclastique	100m	1000m	20m/s	200m/s	200°C	700°C	< 1 kPa	> 25 kPa	-	-
Onde de choc	-	-	300m/s	500m/s	-	-	?	?	-	-
Avalanche de débris	>10m	-	20m/s	100m/s	-	-	?	?	-	-
Tsunarni	1m	30m	2m/s	<10m/s	-	-	?	?	-	-
Retombée de gaz et pluies acides	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lahar	1m	10m	3m/s	30m/s	-	-	?	?	-	-

Tableau B1 : Seuils d'intensité des principaux aléas volcaniques (modifié d'après Blong, 1996 et Ficher & Schminke, 1984 et USGS.gov).

B.5 EFFETS DES RETOMBEES DE CENDRES

Lors d'une libération brutale de gaz provoquée par une éruption, les volcans vont propulser des fragments de roche (tephras) dans l'atmosphère. La quantité et la taille de ces fragments dépendent directement du type d'éruption. Ici nous nous intéresserons uniquement aux cendres. D'après la classification de Fischer et Schmincke (1984) les cendres sont des tephras d'une taille inférieure à 2 mm.

Les retombées de cendres présentent un risque majeur lors d'une éruption volcanique car cet aléa est capable d'impacter quasiment tous les enjeux par des processus variés. Voici une description des différents processus d'endommagements classés par types d'effets que peuvent générer les chutes de cendres.

B.5.1 ENSEVELISSEMENT, ACCUMULATION

L'ensevelissement et l'accumulation par dépôt de cendres sont les processus d'endommagement qui surviennent systématiquement. Ces modes d'endommagement posent surtout des problèmes pour les réseaux routiers ainsi que pour tous les types de véhicules. «De fines couches de cendres fines peuvent rendre les routes glissantes et conduire à une augmentation des accidents » (Pierce County Department of Emergency Management, 2002). « Le réseau routier est perturbé lors des chutes de cendres. En effet, la visibilité est diminuée pendant l'épisode éruptif, la signalisation au sol est rapidement recouverte et les véhicules peuvent souffrir de l'intrusion des cendres dans le moteur » (Blong, 1984). L'ensevelissement et l'accumulation sont les processus d'endommagements principaux des retombées de cendres car ils induisent ensuite d'autres processus comme la pression verticale, la turbidité, ou les courts circuits.

B.5.2 PRESSION VERTICALE CONTINUE

L'effet de charge du poids des cendres va provoquer le phénomène de pression verticale continue qui s'exprime en kilo Pascal (kPa). Cette pression exercée par le poids des cendres va être amplifiée si les cendres sont humides. Ainsi d'après le graphique de Jonhston (1997), une épaisseur de cendres de 100 mm correspond à une pression exercée qui varie entre 0.5 à 1.5 kPa selon l'humidité et la compacité des cendres. Les bâtiments sont particulièrement vulnérables à ce mode d'endommagement et cela est d'autant plus vrai pour les bâtiments aux toitures planes. Selon les travaux de Blong et Mckee (1995), menés en Papouasie-Nouvelle Guinée, à partir de 600 mm de cendres humides, quasiment aucune toiture ne résiste à la pression exercée. La pression verticale continue exercée sur les toitures présente donc un risque structurel majeur, mais aussi et surtout un risque humain. En 1963 le volcan Agung en Indonésie a fait 163 morts et 201 blessés suite à l'effondrement des toitures (Blong, 1963). Depuis 1600, les effondrements de toitures représentent 4,6% des morts lors d'éruptions volcaniques (Blong, 1984). Les cultures sont également soumises à la pression exercée par le poids des cendres.

L'effet de charge des cendres présente un risque direct pour les forêts. D'après Lacroix (1904), en 1902, les arbres des forêts du Nord de la Martinique ont été dépouillées de leurs feuilles et de leurs branches suite à des chutes de cendres. Toutefois selon Fiard (1994) « il est peu probable que des dépôts d'épaisseur inférieure à 20-30 cm (peut-être même 50), aient pu modifier profondément et à long terme la composition floristique et la structure de la forêt.

Ce sont donc les plus importantes éruptions pliniennes qui ont dû affecter la forêt de la Montagne Pelée ». Enfin, dans leurs chutes, les branches peuvent occasionner des coupures de lignes électriques. D'après Wilson et al. (2011) « au-dessus de 100 mm d'épaisseur de cendres, les infrastructures de transport électriques risquent de s'effondrer ».

B.5.3 ABRASION-CORROSION

Le processus d'abrasion et/ou corrosion provoque d'importants dommages sur les réseaux d'adduction d'eau, sur certains composants des engins motorisés, sur les carlingues des avions et enfin sur certaines cultures comme les bananes. Concernant les réseaux d'adduction d'eau, « les installations de pompage (suppresseurs) ainsi que les conduits de transport risquent d'être endommagés par l'abrasivité et le potentiel corrosif du mélange eau/cendres » (Johnston et al., 1997). Sur les engins motorisés, « les joints des composants hydrauliques peuvent s'user plus vite que d'habitude, les freins et ensembles de freinage sont particulièrement vulnérables à l'abrasion et au colmatage provoqué par les cendres » (USGS). L'abrasivité des cendres combinée au frottement des fruits détériorent les bananes, les rendant « très en dessous des standards de qualité du marché européen » (UGPBAN).

Enfin, les avions en vol sont particulièrement vulnérables au potentiel abrasif des cendres. La carlingue et le moteur peuvent être endommagés de manière critique et provoquer un accident.

B.5.4 EFFETS CHIMIQUES

Asphyxie :

Le phénomène d'asphyxie concerne les végétaux, les animaux et les êtres humains. Lorsque la concentration de cendres dans l'air ou au sol est trop importante pour permettre l'oxygénation de l'être vivant ou du tissu organique, celui-ci peut connaître d'importants dommages, allant jusqu'à la mort par asphyxie pour les animaux et les plantes. Pour les hommes les problèmes seront surtout respiratoires : bronchites, toux, essoufflement. Il apparaît difficile de définir à partir de quand le phénomène d'asphyxie provoque de réels dommages car cela dépend directement du taux de particules nocives dans le nuage de cendres, de l'épaisseur de ces particules, de leur nature, mais également de la résistance de l'être vivant affecté. D'après l'USGS « des dépôts de cendres de 10-15 cm aboutissent généralement à l'enterrement complet des pâturages et des sols. Lorsque le sol est saturé de cendres, il devient stérile parce qu'il est privé d'oxygène ; les espèces fourragères, les cultures et la plupart des micro-organismes du sol vont mourir ». Concernant la végétation, les retombées de cendres provoquent des endommagements d'ordre physiologique avec des phénomènes d'obstruction des stomates et de réduction de l'activité photosynthétique (Fiard, 1994).

Il convient de rajouter que bien souvent les animaux périssent par absorption des cendres contenues dans leurs aliments. La majorité des espèces animales périra donc plutôt par intoxication que par asphyxie. « Suite à l'éruption de 1995 du volcan Ruapehu en Nouvelle Zélande, les retombées de cendres ont contaminé les pâturages de fluorose et plus de deux milles agneaux et brebis sont morts après avoir ingéré ces cendres» (Cronin, 2003). De plus, si la nourriture devient impropre à la consommation, cela peut provoquer une famine alimentaire. Que ça soit par un endommagement direct ou indirect, les espèces vivantes apparaissent donc très vulnérables au phénomène d'asphyxie.

Turbidité :

« La turbidité désigne la teneur d'un liquide en matières qui le troublent. Elle est causée par des particules en suspension » (Glossaire ODE).

Les réseaux d'eaux, naturels ou d'adduction, sont extrêmement vulnérables aux retombées de cendres car cet aléa rend immédiatement l'eau turbide et impropre à la consommation. D'après l'organisation mondiale de la santé (1996) la turbidité peut avoir un effet significatif sur la qualité microbiologique de l'eau potable. De plus l'eau trouble stimule la croissance bactérienne. Selon Blong, (1984) « Tout cours d'eau atteint par les cendres est considéré comme pollué ». Donc d'après Blong (1984) et l'OMS, même en très faible quantité, les chutes de cendres représentent donc un risque majeur pour la qualité des eaux, mais pas seulement. En effet, « les cendres volcaniques en suspension dans l'eau peuvent boucher les filtres et créer des dommages aux usines de traitement, elles peuvent augmenter l'usure des pompes et autres équipements utilisés pour la distribution de l'eau » (USGS). C'est donc à tous les niveaux du réseau d'adduction d'eau que les chutes de cendres provoquent des dommages (figure B1).

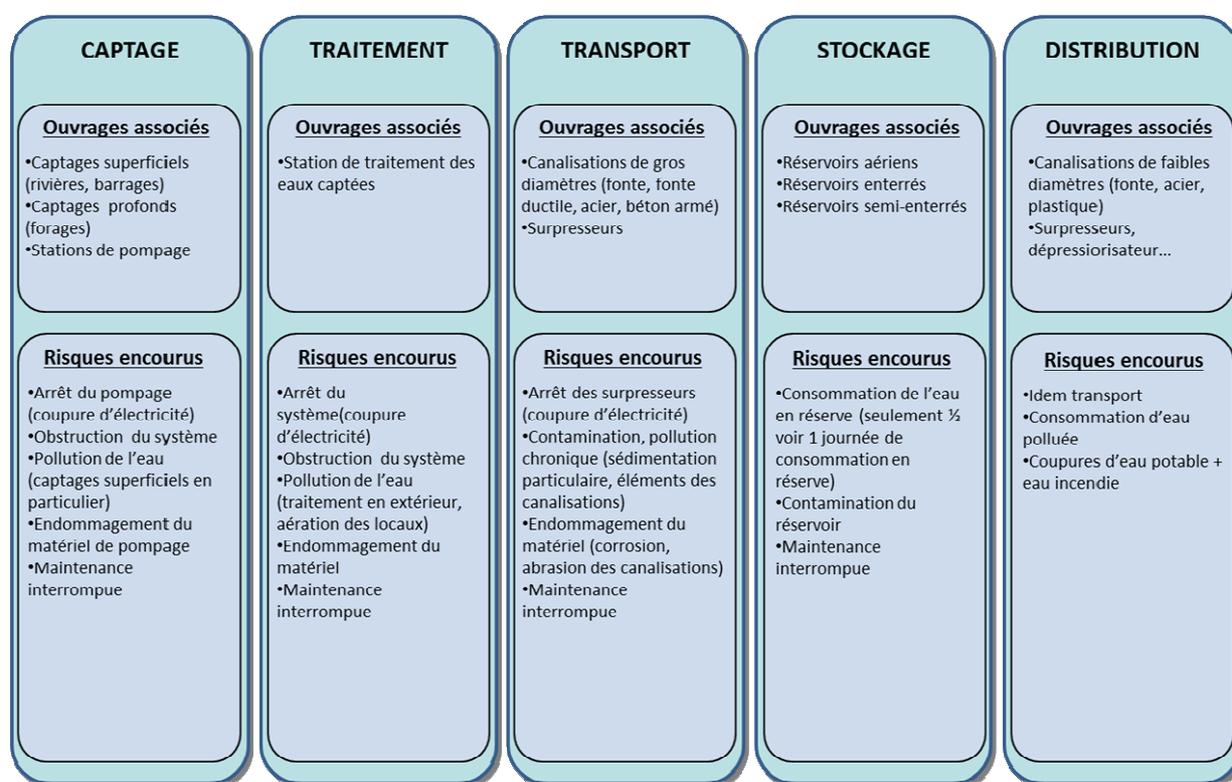


Figure B1 - Composantes du réseau d'adduction d'eau vulnérables en cas de retombées de cendres.

Il convient d'ajouter à ces risques, l'effet néfaste qu'ont les retombées de cendres sur la consommation en eau des populations. Assurément, celle-ci se voit augmentée pour nettoyer les dépôts de cendres dans les rues et les maisons. « Suite à l'éruption du Mont St Helens en 1980, la consommation en eau potable de la ville de Cheney a atteint 1,5 fois la consommation moyenne, dépassant pendant 12 jours la capacité de production du réseau » (Warrick et al., 1981). Cette surconsommation peut entraîner à terme un tarissement des réserves en eau potable.

B.5.5 EFFETS ELECTRIQUES

Magnétisme induit :

Les communications radio, télévision et téléphone sont particulièrement vulnérables aux perturbations lors d'une chute de cendres volcaniques. Les cendres, extrêmement conductibles notamment si elles sont humides, provoquent lors de leurs chutes des perturbations de radiocommunications. Ces dysfonctionnements peuvent s'avérer très dommageables notamment dans le cadre d'un plan de gestion de crise de type ORSEC où l'on sait que le facteur communication est primordial à la réussite des opérations. En vol, un avion privé de communication apparaît également particulièrement démuni.

Court-circuit :

Le réseau électrique est vulnérable aux retombées de cendres. D'après Blong (1984) et Wilson et al. (2009), « le réseau électrique est particulièrement sensible aux cendres humides. Elles sont conductrices d'électricité et provoquent des court-circuits au niveau des isolateurs ». Comme le réseau électrique est un réseau interconnecté, si un court-circuit apparaît en un point de ce réseau c'est le bon fonctionnement de l'intégralité du réseau qui est compromis.

B.6 EFFETS DES RETOMBEES BALISTIQUES

De la même manière que pour les retombées de cendres, les retombées balistiques se produisent lors de la phase de dégazage d'un volcan. La pression libérée va propulser des matériaux arrachés plus ou moins grossiers (blocs) ou des gerbes de lave à l'état visqueux qui se solidifieront au contact de l'air pour former des bombes volcaniques. Ces projectiles seront dispersés à des distances aléatoires en fonction de l'énergie générée par le dégazage et la densité du matériel. Cette énergie dépend directement du type de volcan et du type d'éruption associé. D'après la classification de Fisher et Schminke (1984), le diamètre minimum pour qu'un éjecta soit considéré comme étant un bloc ou une bombe volcanique est de 64 mm. Certains de ces projectiles vont jusqu'à 3 mètres de diamètre et pèsent plus de 100 kg (Pomonis et al., 1999). La plus grosse bombe retrouvée faisait 8,5 m de long et a été retrouvée dans la Sierra de la Primavera au Mexique (Bardintzeff, 2011). Ces projectiles peuvent atteindre une vitesse supérieure à 100 m/s et être chauffés à plus de 1000°C (Blong, 1996). L'aire affectée par cet aléa ne dépasse que rarement les 80 km².

Les processus d'endommagements des retombées balistiques sont d'ordres mécaniques et font appels à des processus d'impact latéral et vertical. De plus, bien souvent les projectiles arrivent incandescents et peuvent générer un incendie. Dans une moindre mesure ces retombées peuvent également provoquer un phénomène d'ensevelissement auquel sont particulièrement vulnérable les réseaux de transports terrestres.

B.6.1 EFFETS MECANIQUES

Impact latéral :

Toute structure verticale est soumise à un risque d'impact latéral. Bien que le degré de vulnérabilité varie en fonction de la résistance du bâti ainsi que de la taille du projectile, les retours d'expérience de diverses retombées balistiques ont montré que la violence de l'impact provoque des dégâts très importants allant jusqu'à la destruction des structures. D'après Pomonis et al. (1999), les maisons en maçonnerie ancienne apparaissent toutefois moins vulnérables aux retombées balistiques que les maisons récentes car les parois sont généralement plus épaisses. Après déstabilisation des cloisons face à des impacts répétés, il y a un risque d'effondrement. Les hommes, les animaux et les végétaux sont également très vulnérables à ce genre d'aléa qui entraîne des blessures graves ou mortelles. En 1993, 6 personnes ont été tuées par des retombées de bombes volcaniques à proximité du volcan Galeras en Colombie (Baxter & Gresham, 1993).

Impact vertical :

De la même manière que pour les impacts latéraux, ce mode d'endommagement concerne les êtres vivants, les engins, et les structures. Ces derniers apparaissent plus ou moins vulnérables en fonction de la résistance que leur offre leur toiture. Le risque d'effondrement des toitures présente un risque indirect mortel pour les hommes.

B.7 EFFETS DES COULEES ET INTRUSION DE LAVES

La lave en fusion atteint des températures allant de 750°C à 1150°C et s'écoule à des vitesses de l'ordre de quelques mètres à l'heure à une dizaine de kilomètres par heure (Blong, 1996). Cet aléa peut s'étendre jusqu'à 100 km sur une largeur de 100 mètres et former des dépôts d'une épaisseur variant entre 1 et 10 mètres (Blong, 1996). Les coulées de lave s'écoulent lentement en suivant la topographie ce qui limite les risques d'exposition des enjeux. Les coulées de lave ont des effets mécaniques (ensevelissement et pression latérale continue) et des effets thermiques (combustion, fusion) qui se cumulent.

B.7.1 EFFETS MECANIQUES

Ensevelissement - accumulation – colmatage :

Les dépôts générés par les coulées ont la capacité d'ensevelir tout type d'enjeu sur leur passage. La probabilité de dysfonctionnement critique des enjeux non-enterrés est donc élevée.

Pression latérale continue :

Capable de transporter des blocs de plus d'un mètre de diamètre, le processus de pression latérale génère une forte probabilité de dysfonctionnement des enjeux structurels.

B.7.2 EFFETS THERMIQUES

Combustion-brûlure :

Le processus de combustion enflamme certains matériaux des infrastructures non-enterrées (bois, plastiques etc.). « Dans presque tous les cas lors de coulées de lave, les bâtiments seront détruits par le feu, l'effondrement ou l'enfouissement » (Blong, 1984).

Les espèces végétales et animales sont également vulnérables aux brûlures provoquées par les coulées. « En 1938 au Nyamuragira (République Démocratique du Congo), des coulées de laves ont piégé des antilopes qui ont été retrouvées complètement carbonisées » (Blong, 1984).

Fusion :

Face à ce processus d'endommagement, les routes sont particulièrement vulnérables car elles sont composées de matériaux capables d'entrer en fusion. « Le 8 avril 1977, des coulées de lave du piton de la fournaise ont coupé une route nationale de la Réunion et détruit un pont » (Blong 1984).

B.8 EFFETS DES COULEES PYROCLASTIQUES

« Les écoulements pyroclastiques correspondent à l'émission brutale et dirigée d'une émulsion de gaz magmatiques, [...] dans laquelle des éléments solides sont transportés en suspension. L'ensemble, à haute température (plusieurs centaines de degrés), se propage à grande vitesse (plusieurs centaines de km/h), sur des distances importantes (plusieurs km voir des dizaines de km, parfois même à contre-pente) et constitue un risque volcanique majeur pour l'homme » (Bardintzeff, 2011). Tristement célèbre, l'éruption de 8 mai 1902 de la Montagne Pelée, fit environ 29 000 morts en quelques secondes. Selon Lacroix (1904), la coulée pyroclastique (ou nuée ardente) aurait atteint une vitesse de 180 km/h et une température comprise entre 200 et 450°C. Elle aurait touché Saint-Pierre en 3 minutes et aurait dévasté un espace de 58 km². Aucun type d'enjeux n'a résisté, les maisons, les arbres et les plantations ont été calcinés. Seulement 2 hommes sur 29 000 ont survécu.

Les matériaux transportés par l'énergie de la coulée pyroclastique vont avoir des effets d'endommagements de type mécanique et vont agir par ensevelissement (accumulation, colmatage), pression latérale continue et impact latéral. La chaleur de la coulée va avoir des effets thermiques et engendrera des processus d'endommagements de type combustion (brûlure) et fusion. Lors d'une nuée ardente, ces processus d'endommagement s'additionnent et « détruiront ou endommageront gravement toute structure ou installation non enterrée ». Les réservoirs d'eau seront contaminés par les dépôts du matériel éruptif de la coulée pyroclastique et les lignes électriques de la zone touchée seront coupées. Seuls les câbles et gazoducs enterrés auront une bonne chance de survie » (Johnston et al., 1997). De plus, « la végétation est souvent complètement détruite. Le couvert forestier est déraciné, les feuilles, branches et les arbres sont décapés. La chaleur endommage irrémédiablement les tissus des plantes » (Johnston et al., 1997).

B.8.1 EFFETS MECANIQUES

Ensevelissements :

En fonction du volume de débris rocheux transporté par le flux, les coulées pyroclastiques peuvent déposer des couches de roche allant de moins d'un mètre à plus de 200 m d'épaisseur (USGS). A partir de 5 mètres d'ensevelissement nous pouvons considérer que l'ensemble des enjeux non-enterrés est vulnérable. Lors de coulée pyroclastique, la probabilité de dysfonctionnement critique par ensevelissement des enjeux est donc élevée.

Impact latéral :

D'un diamètre allant jusqu'à plus de 3 mètres, les éléments solides transportés en suspension sont de véritables projectiles lancés à des vitesses comprises entre 20 et 200 mètres par seconde (Blong, 1996). Pour les enjeux structurels non enterrés, la destruction est donc totale.

Pression latérale continue :

Suite au retour d'expérience sur les coulées pyroclastiques de la Soufrière Hills à Montserrat, les travaux de Baxter et al, (2005) ont permis d'élaborer un classement de vulnérabilité du bâti face à cet aléa. Le tableau de Baxter et al, (2005) (annexe 8), permet d'associer à une pression continue (exprimée en kilo Pascal), un niveau d'endommagement du bâti. D'après ce tableau le seuil de probabilité de dysfonctionnement critique pour les enjeux structurels intervient à partir d'une pression de l'ordre de 8 kPa.

B.8.2 EFFETS THERMIQUES

Combustion – brûlures :

La température extrême des gaz et roches (200 - 700°C) provoque la combustion d'un grand nombre de matériaux (bois, plastiques etc.) dont sont constitués les enjeux structurels. Ainsi comme l'illustre la photographie 7, la probabilité de dysfonctionnement critique des enjeux structurels non enterrés est très élevée.

A de telles températures les espèces animales et végétales sont sujettes à de graves brûlures entraînant la mort.

Fusion :

La chaleur dégagée par les coulées pyroclastiques provoque la fusion d'un grand nombre de matériaux qui sont donc naturellement vulnérables à ce processus d'endommagement. D'après l'institut scientifique de la santé publique, l'asphalte (bitume) se décompose en chauffant au-dessus de 400°C. Les routes et autres infrastructures composées de bitume présentent donc une probabilité de dysfonctionnement critique élevé face à cet aléa.

B.9 EFFETS DES EMANATIONS DE GAZ ET PLUIES ACIDES

Avant, pendant et après une éruption, des composants volatiles du magma sont expulsés, ce sont les gaz. Ces gaz se propagent de trois manières différentes : absorbés par les cendres ou par les particules de sel et sous forme d'aérosol (Thorarinsson, 1979). Ils retombent ensuite à la surface lors de pluies que l'on appelle « pluies acides ». On peut classer les principaux gaz en ordre décroissant de concentration (Faivre-Perret & Le Guern, 1982) :

Vapeur d'eau (H₂O) – Dioxyde de carbone (CO₂) – Dioxyde de soufre (SO₂) – Acide chlorhydrique (HCl) – Hydrogène (H₂) – Sulfure d'hydrogène (H₂S) – Fluorure d'hydrogène (HF) – Monoxyde de carbone (CO) – Azote (N₂) – Sulfure de carbone (COS) – Méthane (CH₄).

Les processus d'endommagements des émanations de gaz et des pluies acides sont essentiellement chimiques et agissent par corrosion, pollution et asphyxie. Ce type d'aléa connaît également des modes d'endommagement thermiques.

B.9.1 EFFETS CHIMIQUES

Corrosion :

D'après M. Mangeot, directeur de l'Office De l'Eau de Martinique, la corrosion provoquée par des eaux acides peut détériorer l'ensemble du réseau d'adduction d'eau. Selon Blong (1984), un pH inférieur à 6 provoque de la corrosion qui endommagerait les structures en béton.

Pollution :

Les pluies acides augmentent l'acidité des eaux qu'elles polluent, les rendant impropres à la consommation. De la même manière les sols peuvent se retrouver pollués. Peterson et Tilling (2000) rapportent que des plantations de café situées sous le vent du volcan Poas au Costa Rica ont été sévèrement endommagées par des pluies acides. « Contrairement à la Soufrière en Guadeloupe, où la toxicité des sols après 1976-1977 était provoquée par un pH très bas et un taux très élevé d'aluminium libre, la toxicité des éléments issus du volcan serait due à un excès de fer » (Sastre, 2002). Ainsi il existe diverses formes de pollution, mais quelles qu'elles soient, les végétaux qui sont dépendants de la qualité du sol apparaissent vulnérables à ce processus d'endommagement.

Asphyxie :

Le principal cas d'asphyxie par émanations de gaz s'est déroulé en 1986 au Cameroun. L'éruption du Lac Nyos a libéré une quantité importante de CO₂. D'après Lefèvre (2010), « ce lourd nuage de gaz aurait parcouru une distance de 25 km pour terminer sa course dans le village de Wum, provoquant la mort par asphyxie de 1746 personnes et de nombreux animaux ». Un cas similaire avait déjà fait 142 victimes par asphyxie lors des éruptions de Dieng à Java (Indonésie) en 1979. Les propriétés du CO₂ (incolore, inodore) rend les êtres vivants particulièrement vulnérables à ce gaz toxique.

B.9.2 EFFETS THERMIQUES

Brûlure :

« En fonction de leur concentration et de la durée d'exposition, certains gaz tels que le dioxyde de soufre ou le dioxyde carbone sont responsables d'inflammations, d'irritations des yeux et du système respiratoire, voire même de corrosions de la peau et des muqueuses de l'organisme » (Leone, 2010). Les brûlures engendrées par les émanations de gaz rendent donc particulièrement vulnérables tous les êtres vivants dotés de système respiratoire et de tissus organiques.

B.10 EFFETS DES LAHARS

Un lahar est un terme indonésien désignant un mélange d'eau et de fragments de roche qui s'écoule le long des pentes d'un volcan. Cet aléa volcanique indirect survient lors de fonte de neige ou la vidange de lac de cratère, ou bien suite à des pluies intenses précédant une éruption. Les lahars peuvent s'assimiler à des coulées de boue capables de transporter des blocs de 10 mètres de diamètre sur plusieurs kilomètres. Les plus importants lahars peuvent faire une centaine de mètres de large pour une dizaine de mètres de profondeur et s'écouler à une vitesse de l'ordre d'une dizaine de mètres par seconde (USGS). « Le 13 novembre 1985, un lahar, issu du volcan Nevado del Ruiz en Colombie a parcouru jusqu'à 80 km et recouvert Armero et d'autres villages faisant 25 000 victimes » (Bardintzeff, 2011).

Les processus d'endommagements des lahars sont mécaniques. Ils agissent par ensevelissement (accumulation, colmatage), par érosion (ablation, affouillement), par pression latérale continue, et par impact latéral.

B.10.1 EFFETS MECANIQUES

Ensevelissement, accumulation, colmatage :

Les sédiments transportés par les lahars ont une capacité à ensevelir qui est proportionnelle à la hauteur et au volume du lahar. Selon l'USGS, depuis le 15 Juin 1991 et l'éruption du Mont Pinatubo aux Philippines, les lahars ont enseveli les maisons de 50 000 personnes et recouvert près 400 km² de riches terres agricoles. Les dépôts de lahars sont susceptibles de combler des talwegs et de modifier ainsi le réseau hydrographique. Tous les enjeux structurels non enterrés sont vulnérables aux processus d'ensevelissement.

Ablation, érosion, affouillement :

Les infrastructures sont sensibles à ce genre de processus, particulièrement les routes et ouvrages de franchissement. « Les lahars sont les aléas volcaniques qui causent le plus de dommages aux réseaux de routes » (Blong, 1984). L'étude menée dans CASAVA a mis en évidence la vulnérabilité des ouvrages de franchissement en Martinique et en Guadeloupe. Ces travaux ont démontré que les ponts avec piles étaient sensiblement plus vulnérables aux lahars que ceux d'une seule portée (sans pile) car le potentiel érosif très élevé des lahars mène à l'affouillement des piles et compromet la stabilité de l'ouvrage.

Pression latérale et impact latéral :

Difficile à estimer, la pression latérale exercée par les lahars est exceptionnelle et est largement capable de déplacer des maisons ou de déstabiliser des ponts. Les blocs charriés par la coulée de boue se transforment en projectiles et ont la capacité d'endommager fortement tout type de structure sur leur passage.

B.11 EFFETS DES AVALANCHES DE DEBRIS

L'avalanche de débris est un aléa volcanique indirect qui se produit lorsqu'il y a une forte poussée du magma qui vient déstabiliser un flanc du volcan. Celui-ci va alors s'effondrer par gravité sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur tandis qu'une gigantesque coulée de débris dévalera la pente à grande vitesse, parfois à plus de 300 km/h. Le 18 mai 1980 un flanc du Mont Saint-Helens (Etats-Unis) a été déstabilisé par l'activité éruptive du volcan et s'est brutalement mis à glisser. Cette avalanche, constituée de blocs rocheux, de neige et de glace s'est écoulée à une vitesse d'environ 200 km/h, sur une distance de 20 km. D'un volume de 2,5 km³, l'épaisseur des dépôts a dépassé 200 m par endroits et a affecté une surface de 500 km² (USGS).

Les avalanches de débris s'expriment par des effets exclusivement mécaniques qui sont : l'ensevelissement (accumulation et colmatage), la pression latérale continue et le déplacement latéral.

B.11.1 EFFETS MECANIQUES

Ensevelissement- accumulation-colmatage :

La quantité de matériaux mobilisés lors d'une avalanche de débris est capable d'ensevelir tous types d'infrastructures et de modifier durablement le paysage. Hormis certains réseaux enterrés profondément et situés en dehors de la zone d'effondrement, la probabilité de dysfonctionnement critique des enjeux est maximale face à ce type d'aléa.

Pression latérale continue et déplacement latéral :

La pression exercée latéralement par les avalanches de débris est si importante qu'aucune infrastructure humaine ou éléments paysagers naturels ne résiste. La poussée va engendrer des déplacements latéraux qui mèneront à la destruction. Le paysage se voit également modifié en profondeur.

B.12 EFFETS DES TSUNAMIS

Les tsunamis volcaniques sont des aléas indirects associés à des entrées en mer de trois phénomènes différents : les avalanches de débris, les coulées pyroclastiques ou les lahars. Dans les trois cas le volume d'eau déplacé va générer un train d'onde d'une ampleur proportionnelle au volume et à la vitesse de la masse glissée. Lors de certaines avalanches de débris, le train d'onde généré peut avoir la capacité de traverser des océans. Ensuite le déferlement sur les côtes est identique au phénomène plus connu de tsunami d'origine

tectonique. A l'approche des côtes, le changement bathymétrique va former des vagues qui peuvent déferler sur plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres. Les tsunamis volcaniques peuvent également se former à la suite d'un effondrement de volcan en mer. On rapporte qu'environ 1600 an av. J.-C. l'effondrement du volcan Santorin (Grèce) aurait généré des vagues de 60 m de haut qui auraient déferlé dans toute la méditerranée orientale. Plus récemment, l'effondrement du volcan Krakatoa (Indonésie) en 1883 a généré des vagues de 37 m de haut faisant plus de 36 000 morts.

Les types d'effets des tsunamis sont mécaniques et hydrauliques. Les processus d'endommagements des effets mécaniques agissent par pression latérale continue, impacts latéral et déplacements latéral. Les effets hydrauliques provoquent des endommagements dus à la submersion statique et dynamique.

B.12.1 EFFETS MECANIQUES

Pression latérale continue, impact latéral et déplacement latéral :

Les trois processus d'endommagement agissent conjointement et lorsqu'ils s'additionnent la capacité destructrice qu'ils génèrent est immense. Lors de la catastrophe du 11 mars 2011 au Japon, les vidéos du déferlement diffusées en boucle sur les chaînes d'information ont montré que la pression verticale exercée était capable de déplacer des voitures, des bateaux, des bâtiments et de les transformer ainsi en projectiles. Le couvert végétal, les cultures et les forêts sont fortement vulnérables à ces processus d'endommagements. En 2004, en Indonésie la végétation de la zone submergée par le tsunami avait été totalement dévastée. Les infrastructures de transport routier apparaissent également vulnérables, selon Blong (1984) «en 1883 un tsunami d'origine volcanique a complètement détruit les routes longeant le littoral de Sunda (Indonésie) ». Face aux effets mécaniques d'un tsunami la grande majorité des enjeux non enterrés présente une probabilité élevée de dysfonctionnement critique face à ces processus d'endommagements.

B.12.2 EFFETS HYDRAULIQUES

Submersion statique et dynamique :

La probabilité de dysfonctionnement critique des enjeux terrestres face aux effets hydrauliques d'un tsunami est forte. L'action de l'eau en mouvement vient déstabiliser les infrastructures jusqu'à leur destruction. Tout appareil électrique ou moteur inondé devient hors service. L'exemple de la centrale nucléaire de Fukushima au Japon en mars 2011 montre combien les processus de submersion peuvent entraîner de lourdes conséquences sur les infrastructures et leur bon fonctionnement. Les êtres vivants ou animaux submergés n'ont que très peu de chance de survivre face aux courants et aux débris flottants. Enfin les sols et les aquifères se retrouvent salinisés rendant la culture difficile et l'eau inconsommable durant plusieurs années.

B.13 EFFETS DES ONDES DE CHOC

L'aléa onde de choc se produit lors d'une importante explosion volcanique. La pression libérée brutalement va créer une onde de choc souvent assimilée à un « coup de fusil », qui se

propagera à 180° et à une vitesse d'environ 1000 km/h. L'onde de choc peut se faire sentir jusqu'à des centaines de kilomètres de distance de la source (Blong, 1996). Par exemple, les ondes de chocs générées pendant l'éruption du Mont Pinatubo (Philippines) en 1991 ont été ressenties jusqu'à Nagoya au Japon. Bien que les effets des ondes de chocs soient mal connus, les processus d'effet de souffle (blast) et d'impact latéral présentent un potentiel destructeur non négligeable.

B.13.1 EFFETS MECANIQUES

Impact latéral et effet de souffle :

Face à ces processus d'endommagements qui agissent de façon latérale, ce sont surtout les arbres et les bâtis qui apparaissent vulnérables. Aucun cas de décès direct par effet de souffle n'a été rapporté (Blong, 1984). Lors de l'éruption du Tambora en 1815, des vitres ont été brisées à 400 km de l'éruption. Quant à l'effet de souffle de l'éruption du Mont St Helens en 1980, ce phénomène a couché des arbres de plus 30 mètres de haut sur un périmètre de plus de 19 km (USGS).

B.14 MATRICES DE DYSFONCTIONNEMENT CRITIQUE (PDC)

Cf. tableau B2 à B10 suivants.

- 3 : Johnston DM. (1997) - The impacts of recent falls of volcanic ash on public utilities in two communities in the United States of America - Institute of Geological & Nuclear Sciences science report, 21p.
- 4 : Johnston DM, Stewart C, Leonard GS, Hoverd J. (2004) - Impacts of volcanic ash on water supplies in Auckland: Part1- Institute of Geological & Nuclear Sciences science report.
- 5 : Le Guern F, Bernard A, Chevrier RM. (1980) - Soufrière of Guadeloupe 1976-1977 Eruption – Mass and Energy Transfer and Volcanic Health Hazards.
- 6 : Leone F, Lesales T. (2002) – Proposition de Plan de Prévention des Risques Volcaniques (Montagne Pelée, Martinique) : présentation, cartographie et règlement – Rapport pour le compte de la Préfecture de la Martinique, Equipe d'Accueil GEODE-Caraïbe, Université des Antilles et de la Guyane, Schoelcher, Martinique, 119 p.
- 7 : Wilcox RE. (1959) - Some effects of recent volcanic ash with special reference to Alaska - United States Geological Survey Bulletin 1028 N: 409 476. Washington, US Government
- 8 : Warrick RA, Anderson J, Downing T, Lyon J, Ressler J, Warrick M, Warrick T. (1981) – Four communities under ash after Mt St Helens - Program on Technology, Institute of Behavioral Science, University of Colorado, p143.
- 9 : Smithsonian Institution. (1997) - Soufrière Hills - Bulletin of the Global Volcanism Network 22(5), 2-4.
- 10 : Weniger BG, Gedrose MB, Lippy EC, Juranek DD. (1983) - An outbreak of waterborne giardiasis associated with heavy water runoff due to warm water and volcanic Health - 73,
- 11 : Nielson L. (1980) - Water quality and municipal water supply. Forum on the effects of the Mount St Helens eruption on water resources - Pacific Northwest River Basins Commission, Vancouver, 25-26p.
- 12 : Wilson T, Daly M, Johnston D. (2009) - Review of Impact of Volcanic Ash on Electricity Distribution Systems, Broadcasting and Communication Network - Auckland Engineering Lifelines Group Projet AELG 19p.
- 13 : Dossier de presse de l'UGPBAN. (2010) - Impact dans les bananeraies de Guadeloupe des chutes de cendres consécutives à l'éruption du volcan « la Soufrière » de Montserrat le 11 février 2010.
- 14 : <http://volcanoes.usgs.gov/ash/index.html>
- 15 : Neild J, O'Flaherty P, Hedley P, Underwood R, Johnston D, Christenson B, and Brown P. (1998) - Agriculture recovery from a volcanic eruption - MAF Technical paper 99/2.
- 16 : 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 M2 – 30p
- 17 : Blong, R. and McKee, C.: The Rabaul eruption 1994: Destruction of a town, Natural Hazards Research Centre, Macquarie University, Australia, 52pp., 1995
- 18 : Johnston, D.M., Nairn, I.A., Thordarson, T., Daly, M. (1997) - Volcanic Impact Assessment for the Auckland Volcanic Field. - Auckland Regional April 1997.Council Technical
- 19 : Témoignage de M.Queneherve président du pôle de recherche Agro-environnementale de la Martinique

Tableau B4 - Matrice de dysfonctionnement critique pour l'aléa « coulée et intrusion de lave ».

				Enjeux																																											
				Enjeux fonctionnels										Enjeux structurels		Enjeux environnementaux			Enjeux socioéconomiques		Enjeux humains																										
				Réseaux d'adduction			Réseaux de communication				Ouvrages de franchissement		Ressources énergétique				Engins motorisés	Bâits	Faune et flore	Réseaux hydrographiques		Cultures	Elevag	Santé																							
				Sites de captage	Stations de	Conduits de transport (sous-terrain)	Sites de stockage	Réseaux de distribution (sous-terrain)	Routes principales	Routes secondaires	Embarcadères	Voies maritimes	Pistes aéroportuaires	Voies aériennes	Transmissions radio	Gûes	Busés	Voies de circulation	Ouvrages à section libre sans	Ouvrages à section libre avec	Centrales électrique	Transformateurs	Lignes électriques (aériennes)	Pylones électriques	Postes électriques	Stations essence	Cuves et dépôts de carburant	Voitures	Avions (en vol)	Bateaux à moteur	Bâits légers (bois, tôle)	Bâits individuels résistants	Bâits collectifs résistants	Forêts	Animaux	Plans d'eau	Eaux sous terraines	Rivières	Cannes à sucre	Bananes	Ananas	Cheptel	Problèmes respiratoires	Brûlures	Blessures	Blessures graves	Décès
Aléa coulées et intrusion de lave	Types d'effets	Processus d'endommagement directs	Critères de magnitude (unités de mesure)	Intensité de l'aléa																																											
					Ensevelissement-accumulation-colmatage	Epaisseur (m)	1 - 10																																								
	Pression latérale continue	[Epaisseur (cm)] et [vitesse (m/s)]	[100 - 200] et [<1 - 30]																																												
				Effets thermiques	Combustion-brûlures	Température (°C)	> 750 - 1150																																								
Fusion	Température (°C)	> 750 - 1150																																													

Probabilité de dysfonctionnement critique (PDC):	Faible (1)	
	Moyen (2)	
	Fort (3)	
	Non concerné (NC)	
	Non renseigné (NR)	

Source pour température lave :

Blong R. J. (1984) - Volcanic Hazards : A Sourcebook on the Effects of Eruptions - Academic Press, Australia, 424 p.

Source pour épaisseur de lave :

Blong RJ (1996) Volcanic hazards risk assessment. In: Scarpa R, Tilling RI (eds) Monitoring and mitigation of volcano hazards. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp 675–698

Source pour vitesse de lave :

Blong RJ (1996) Volcanic hazards risk assessment. In: Scarpa R, Tilling RI (eds) Monitoring and mitigation of volcano hazards. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp 675–698

Code référence des sources pour la matrice coulée et intrusion de lave :

- 1 : Mialhe François, (2005) Les vulnérabilités face au risque volcanique. Recensement et modes d'endommagement des aléas volcaniques. Le cas du Mont Kanalon aux Philippines.
- 2 : Blong, R.J, 1984, Volcanic Hazards : A sourcebook on the effects of eruptions. Academic Press, Australia, 424p.

Code référence des sources pour la matrice coulée pyroclastique :

- 1 : Leone F, Meschinet de Richemont N., Vinet F. (2010) - Aléas naturels et gestion des risques - Collection Licence, Presse Universitaire de France, Paris 288p.
- 2 : Mialhe F, (2005) Les vulnérabilités face au risque volcanique. Recensement et modes d'endommagement des aléas volcaniques. Le cas du Mont Kanalon aux Philippines.
- 3 : Peter J. Baxter · Robin Boyle · Paul Cole · The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufrière Hills volcano, Montserrat, 2005. 22p
- 4 : Leone F. (dir.). & Lesales T. (2002) – Proposition de Plan de Prévention des Risques Volcaniques (Montagne Pelée, Martinique) : présentation, cartographie et règlement – Rapport pour le compte de la Préfecture de la Martinique, Equipe d'Accueil GEODE-Caraïbe, Université des Antilles et de la Guyane, Schoelcher, Martinique, 119 p.
- 5 : <http://volcanoes.usgs.gov/hazards/pyroclasticflow/index.php>
- 6 : Chester, D. 1993- Volcanoes and Society, Edward Arnold, London, 351p
- 7 : Robin J.S. Spence a, Peter J. Baxter b, Giulio Zuccaro. (2003) -Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow: a model and its application to Vesuvius
- 8 : Johnston, D.M., Nairn, I.A., Thordarson, T., Daly, M. (1997) - Volcanic Impact Assessment for the Auckland Volcanic Field. - Auckland Regional April 1997.Council Technical Publication No. 79, 207p
- 9: Lacroix A. (1904) - La Montagne Pelée et ses éruptions. - Paris : Masson. 662p.

Tableau B7 - Matrice de dysfonctionnement critique pour l'aléa « lahar ».

					Enjeux																																										
					Enjeux fonctionnels															Enjeux structurels			Enjeux environnementaux			Enjeux socioéconomiques			Enjeux humains																		
					Réseaux d'adduction					Réseaux de communication					Ouvrages de franchissement					Ressources énergétique					Engins motorisés					Bâti			Faune et flore			Réseaux hydrographiques			Cultures			Elevage			Santé		
					Sites de captage superficiel	Stations de traitement	Conduits de transport	Sites de stockage	Réseaux de distribution	Routes principales	Routes secondaires	Embarcadères	Voies maritimes	Pistes aéroportuaires	Voies aériennes	Transmissions radio	Gués	Rues d'écoulement	Ouvrages à section libre sans	Ouvrages à section libre avec	Canalisations électriques	Transformateurs	Lignes électriques	Lignes de transmission	Lignes de distribution	Lignes de transmission	Stations essence	Cuves et dépôts de stockage	Voitures	Avions (en vol)	Bateaux à moteur	Bâti légers (buis, table)	Bâti individuels résistants	Bâti collectifs résistants	Forêts	Arimaux	Plans d'eau	Eaux sous terraines	Rivières	Cannes à sucre	Bananes	Ananas	Cheptel	Problèmes respiratoires	Blessures	Blessures graves	Décès
Aléa lahars (coulée de boue)	Effets mécaniques	Ensevelissement-accumulation-colmatage	Epaisseur (m)	1 - 10	3,4	3,4	3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4		1,3,4	1,3,4	1,3,4	1,3,4	3,4	3,4									3,4,6	3,4,6	3,4,6	3,4	3,4	3,4		3,4,6	3,4	3,4	3,4	3,4					3,4,5	3,4,5	3,4,5		
		Ablation-érosion-affouillement											1	1	1	1																															
		Pression latérale continue	Vitesse (m/s)	3 - 30		7	7	7	7	7				1	1		1																														
		Impact latéral	Vitesse (m/s)	3 - 30		7	7	7	7	7				1	1		1											6	6	6																	
Probabilité de dysfonctionnement critique (PDC):																									Faible (1)																						
																									Moyen (2)																						
																									Fort (3)																						
																									Non concerné (NC)																						
																									Non renseigné (NR)																						

Code référence des sources pour la matrice lahar :

- 1 : Deymier J. (2011) Elaboration de bases de données pour la compréhension et la modélisation du risque dans la Caraïbe et les Antilles françaises - mémoire de 116p
- 2 : Mialhe F, (2005) Les vulnérabilités face au risque volcanique. Recensement et modes d'endommagement des aléas volcaniques. Le cas du Mont Kanalon aux Philippines.
- 3 : Baxter, PJ (1990). Medical effects of volcanic eruptions; I. Main causes of death and injury. Bulletin of Volcanology . 52 , 532-544.
- 4 : Johnston, D., & Houghton, BF (1995). Living with volcanoes. Tephra. 14 (2), 22-28.
- 5 :Pierce County Department of Emergency Management, 2002. - Region 5 Hazards mitigation plan - 27p, <http://www.co.pierce.wa.us/xml/abtus/ourorg/dem/EMDiv/R5MP/Volcano.pdf>
- 6 : <http://volcanoes.usgs.gov/hazards/lahar/index.php>
- 7 : <http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/Baker/Hazards/OFR95-498/OFR95-498.pdf>

C EVALUATION DE LA VULNERABILITE DES RESEAUX VITAUX : APPROCHE DETERMINISTE

C.1 RECONSTITUTION DES ERUPTIONS HISTORIQUES

Cette phase du travail a consisté à réaliser en premier lieu une frise chronologique et une cartographie détaillée des impacts et des conséquences des crises éruptives historiques de la Montagne Pelée en Martinique et de la Soufrière en Guadeloupe. Cela a permis de recréer, à partir des archives documentaires, la dynamique spatiale et temporelle des crises et de leurs effets, jour après jour, depuis les premiers signes précurseurs jusqu'aux derniers effets induits. La base de données produite se nomme BD BD_{FAVI}, pour *French Antilles Volcanic Impacts*. Elle s'accompagne d'un Atlas des éruptions de la Montagne Pelée et de la Soufrière de Guadeloupe (Lalubie, 2012) (figure C1).

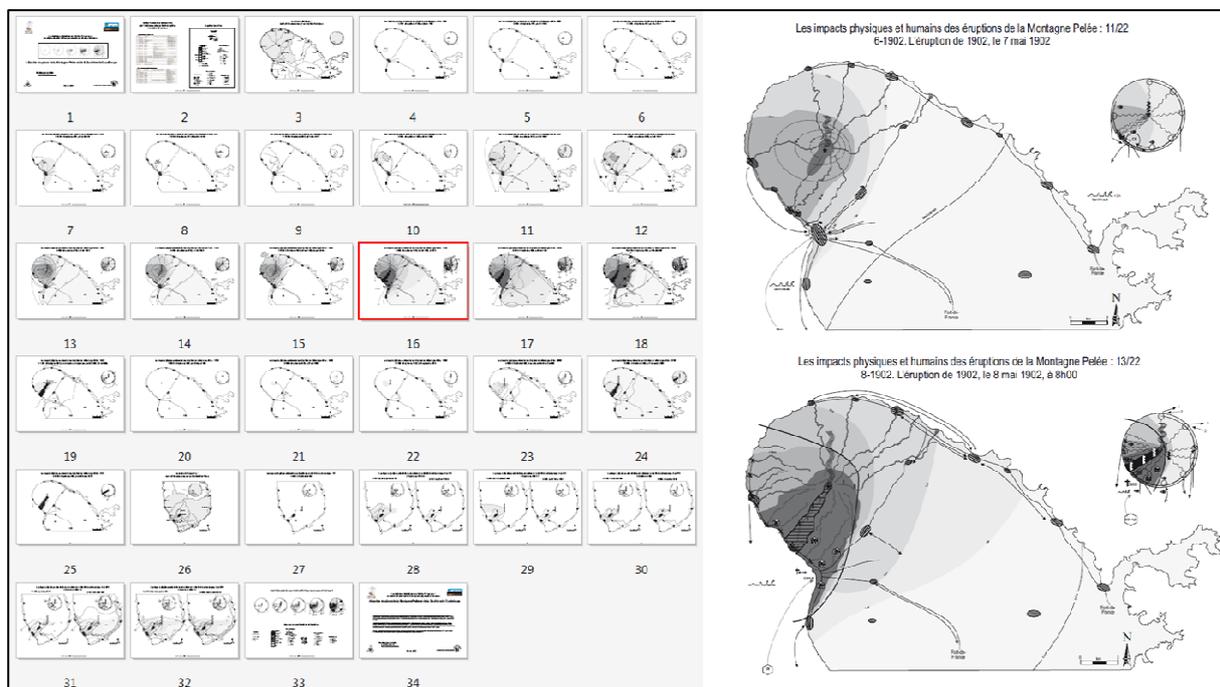
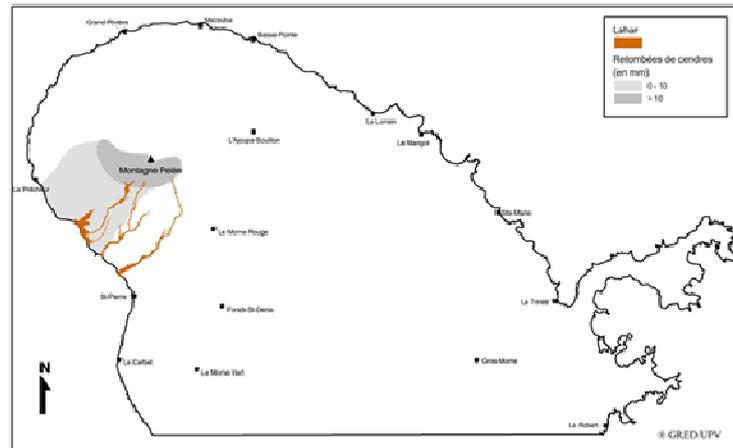


Figure C1 - Extrait de l'atlas des éruptions de la Montagne Pelée et de la Soufrière de Guadeloupe (Lalubie, 2012).

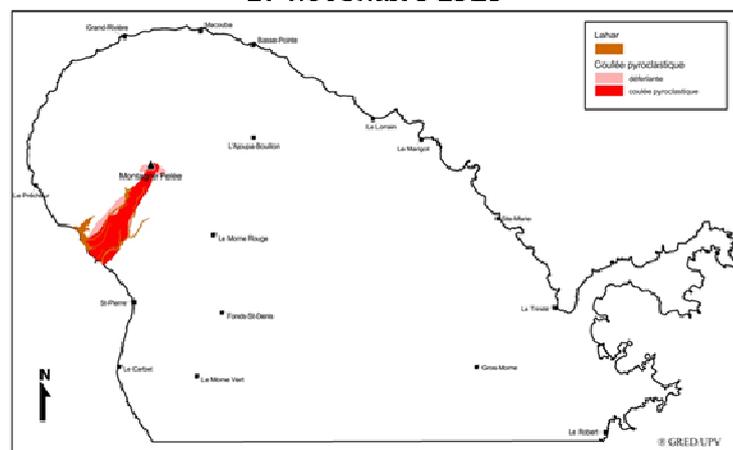
Dans un second temps, chaque enveloppe de phénomène a ensuite été géoréférencée et vectorisée sous SIG afin de produire les cartes d'aléas des différents scénarios déterministes retenus pour l'analyse du risque. Ils correspondent aux éruptions de 1902 et 1929 en Martinique et à celle de 1976 en Guadeloupe. Au total, onze phases éruptives ont été reconstituées pour la Martinique (8 pour la crise de 1902, 3 pour celle de 1929) et quatre pour l'éruption de 1976 en Guadeloupe, ce qui fait un total de 15 scénarios (figures C2 à C4). Il s'agit donc, à travers ce travail, de rejouer en situation actuelle, les impacts potentiels de crises éruptives passées. Pour une meilleure précision, les contours détaillés des « lahars » proviennent, pour la Martinique, du BRGM (Stieltjes & Mirgon, 1998).

Seconde quinzaine d'octobre 1929



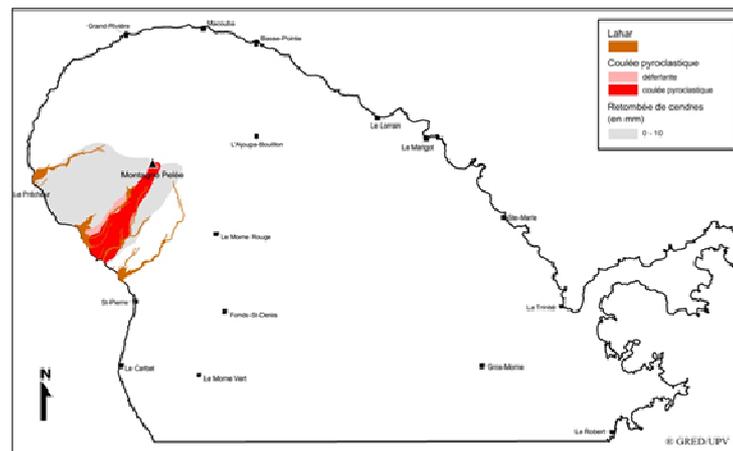
Conception : A. Heymann, F. Leone, G. Lalubie, 2012
Sources: BD TOPO (2008) / IGN, BRGM (1996)

17 novembre 1929



Conception : A. Heymann, F. Leone, G. Lalubie, 2012
Sources: BD TOPO (2008) / IGN, BRGM (1996)

1931



Conception : A. Heymann, F. Leone, G. Lalubie, 2012
Sources: BD TOPO (2008) / IGN, BRGM (1996)

Figure C2 - Reconstitution de la crise éruptive de 1929-1931 en Martinique.

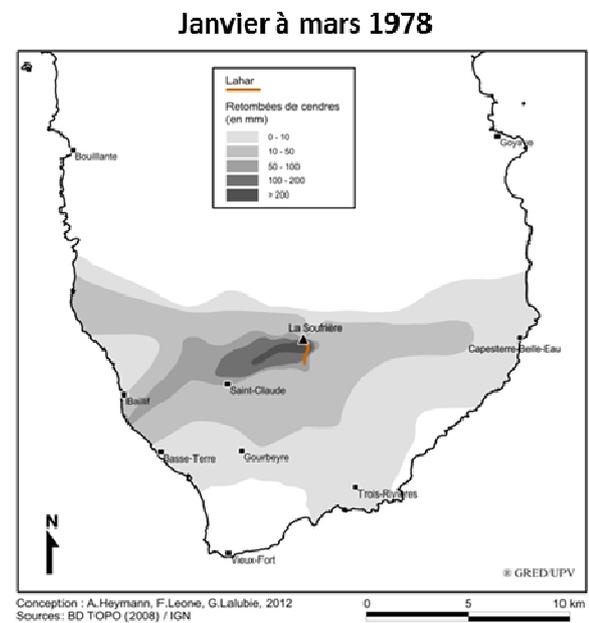
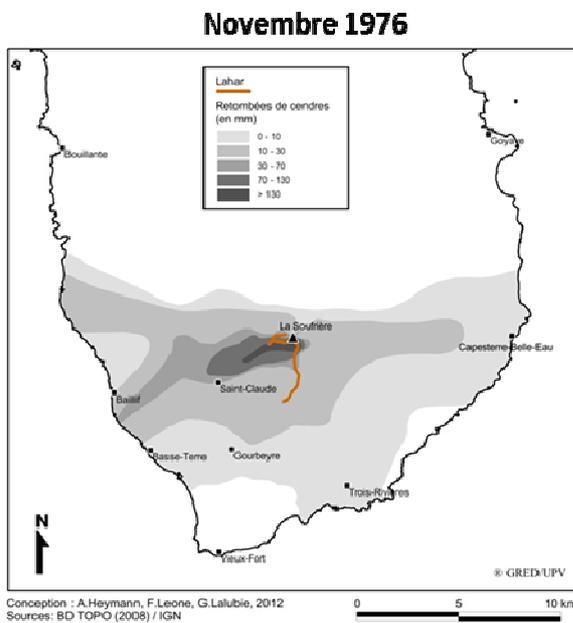
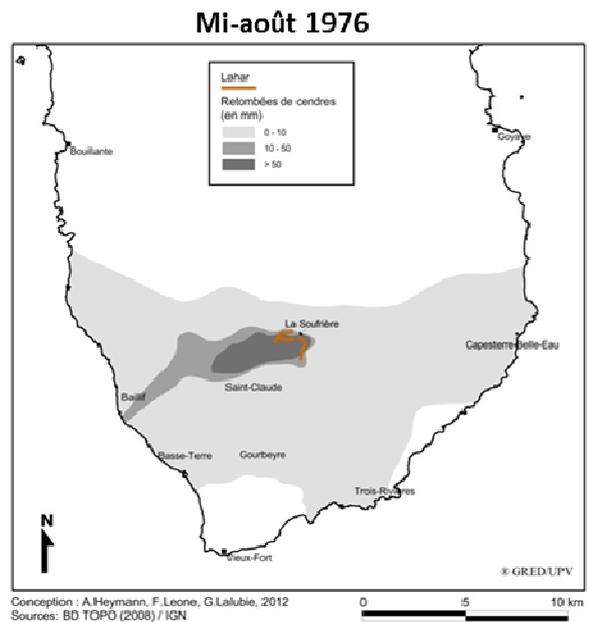
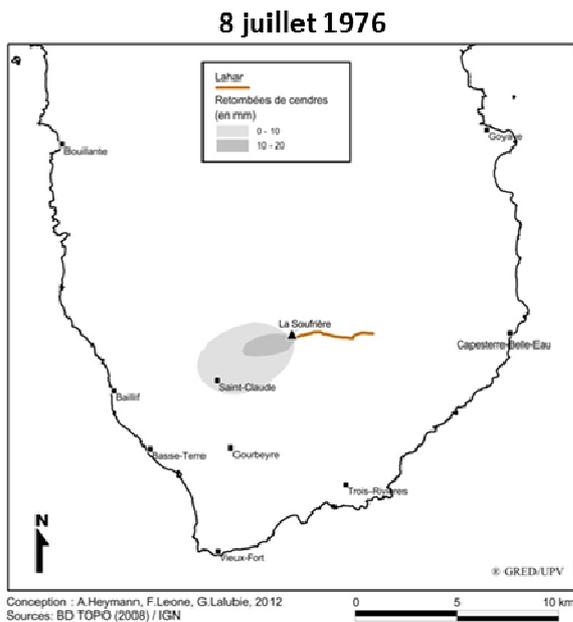


Figure C3 - Reconstitution de la crise éruptive de 1976-1978 en Guadeloupe.

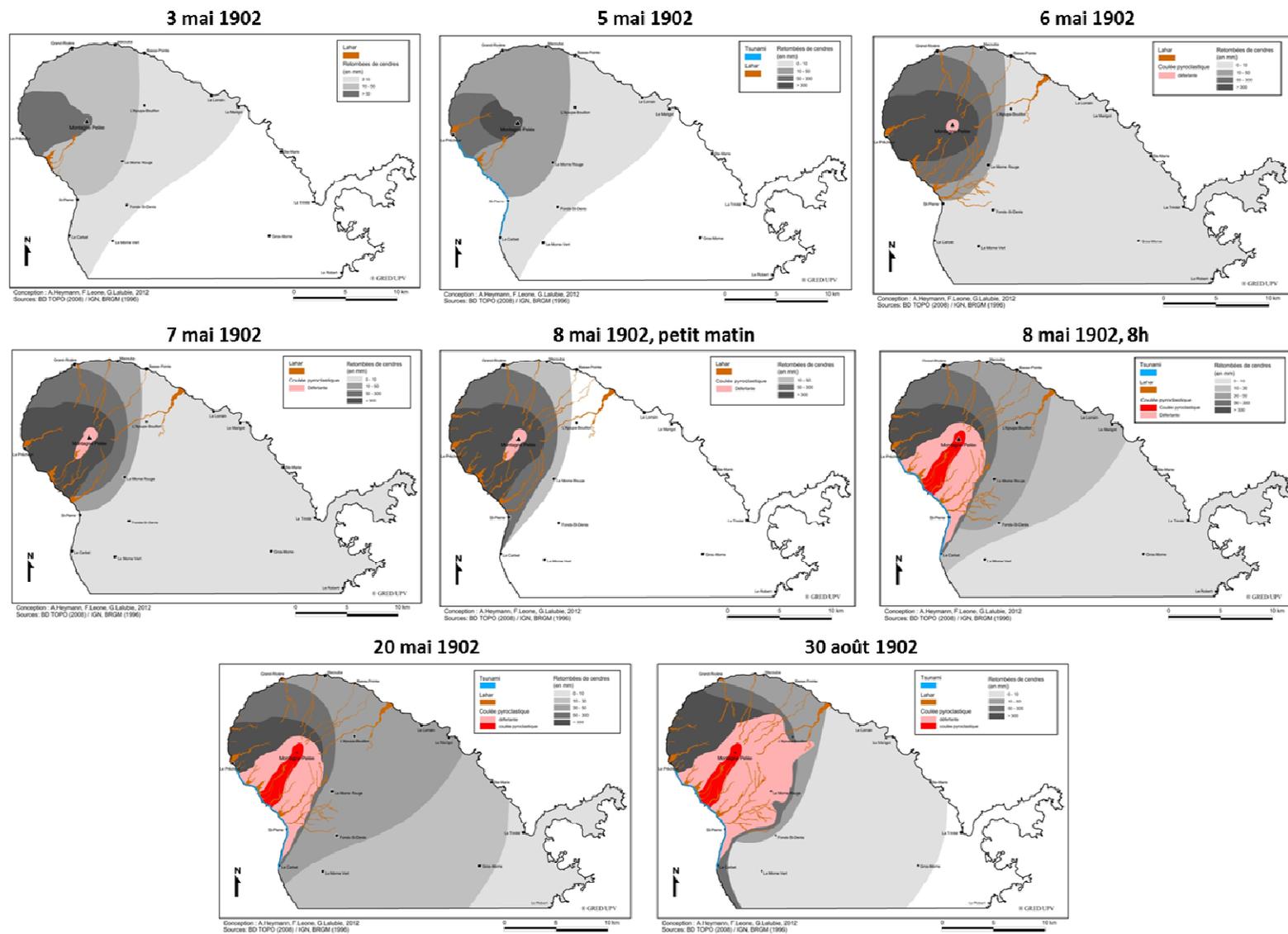


Figure C4 - Reconstitution de la crise éruptive de 1902 en Martinique.