

Laboratoire Magmas et Volcans, Université Blaise-Pascal Clermont II, PRES Clermont

Rapport destiné à la Fondation MAIF

« Risques urbains : méthode d'évaluation des impacts de lahars potentiels autour du volcan La Soufrière de Guadeloupe »

Jean-Claude Thouret¹

Jean-François Oehler² et Susanne Ettinger¹

¹ *PRES Clermont, Université Blaise Pascal, Laboratoire Magmas et Volcans UMR 6524 et
IRD UR163, 5 rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand Cedex*

² *Altran Ouest, Technopôle Brest Iroise, Site du Vernis – CS 23866, F-29238 Brest Cedex 03*



© Photo F. Beauducel, IPGP, 2005.

Complément au contrat « Risques urbains » Fondation MAIF – LMV 2008-2011

*Le contrat comprend la Thèse de doctorat de Kim Martelli, soutenue le 15 septembre 2011
(LMV-UBP) et un rapport de valorisation bilingue livré par J.-C. Thouret (LMV) le 29
octobre 2011.*

Plan du rapport

I. Contexte de l'étude

II. Objectifs et outils employés

III. Résultats

III.1. Nouvel MNT réalisé par stéréo-photogrammétrie

III.2. Simulations des écoulements de lahar avec le code LAHARZ

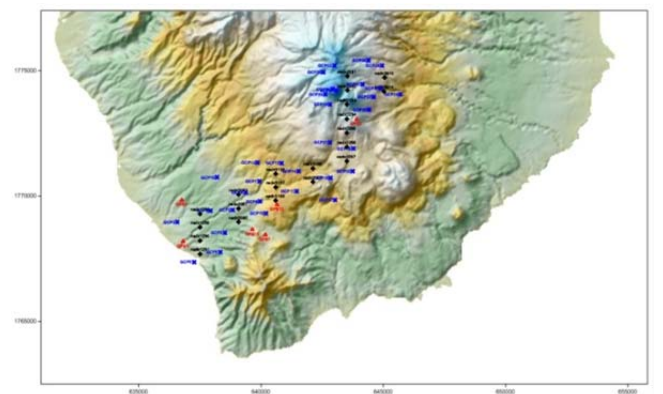
III.3. Cartographie et évaluation de la vulnérabilité du bâti

III.4. Cartographie du bâti le long du Galion

IV. Conclusion

V. Recommandations

1.



I. CONTEXTE DE L'ETUDE

Le contrat entre la Fondation MAIF et le LMV signé en 2007 était consacré à l'étude de la vulnérabilité physique en milieu urbain menacé par des éruptions volcaniques, notamment les lahars (coulées de débris volcaniques), et par des crues éclair. Il s'agissait de la ville d'Arequipa au Pérou, comptant un million d'habitants environ et qui est menacée par l'activité du volcan El Misti et par des « crues éclair » ou écoulements « hyperconcentrés », qui peuvent se produire sans éruption durant la saison des pluies. Kim MARTELLI a soutenu une Thèse de doctorat au LMV consacrée à ce thème et acceptée par un jury international, le 15 septembre 2011. En revanche, le volet prévu dans ce contrat au sujet de la vulnérabilité physique et des risques encourus en cas de lahars autour de la Soufrière de Guadeloupe (Basse Terre, Guadeloupe, Antilles françaises) n'a pas été accompli par Kim Martelli durant son contrat de 3 ans. Par conséquent cette étude nous incombait, et voici le rapport technique et scientifique qui lui est consacré. M. J.-F. Oehler (Altran Ouest, Brest) a largement participé et Mlle S. Ettinger (post-doc au LMV) a collaboré à cette étude. Nous avons également utilisé un Travail d'Etude et Recherche mené par Thomas Prévot en 2009, que nous avons encadré dans le cadre d'un Master 1. Nous concentrerons ce travail sur le flanc ouest, plus densément peuplé et aux enjeux économiques plus importants : les villes de Saint-Claude, Basse Terre, Préfecture de région et Baillif, et les activités économiques, notamment le tourisme.

Les *lahars* sont des écoulements de débris saturés en eau qui se propagent à grande vitesse dans les vallées radiales drainant un volcan (Vallance, 2005 ; Lavigne et Thouret, 2000). Ils peuvent être déclenchés durant, après ou même en dehors des éruptions, notamment par des pluies intenses ou par débordement d'un lac de cratère. Ces écoulements sont complexes car le mélange de débris et d'eau leur confère une dynamique originale et un comportement particulier, qui ne sont pas ceux d'une rivière. On distingue les *coulées de débris* et les écoulements *hyperconcentrés* sur la base de leur contenu en solide (ou concentration sédimentaire, excédant 40 % en solide ou 60 % en volume pour les coulées de débris). Ce contenu est variable entre les écoulements et y compris durant la propagation d'un écoulement. D'autres auteurs (Pierson, 2005) ont insisté sur le fait que des caractéristiques granulométriques et rhéologiques permettent aussi de mieux distinguer les divers types de lahar. Quoiqu'il en soit, leurs effets sont destructeurs et ce sont, avec les écoulements pyroclastiques, les phénomènes les plus meurtriers sur les volcans. Les lahars restent des phénomènes relativement peu étudiés et pourtant, ils peuvent survenir pendant plusieurs années après une éruption ou en l'absence d'activité éruptive, et ils se propagent sur des distances beaucoup plus longues que les écoulements pyroclastiques (Pierson *et al.*, 1990).

Contexte géologique, hydrologique et urbain de Basse Terre, Guadeloupe

Contexte géologique

La Guadeloupe est un département d'Outre-mer (DOM) constitué de plusieurs îles comme Saint-Martin, Marie Galante et l'île de la Guadeloupe elle-même. En forme de papillon, cette dernière peut être séparée en deux parties reliées par un étroit bras de mer : 1) l'île de Grande-Terre au nord-est, d'origine sédimentaire, est relativement plate et aride ; 2)

au sud-ouest l'île de Basse-Terre est volcanique et recouverte d'une végétation luxuriante. Celle-ci possède plusieurs appareils éteints datant pour certains d'avant le Miocène notamment dans la partie nord. Actuellement et depuis le Pléistocène, l'activité volcanique est localisée au sud de l'île.

Ce volcanisme est issu de la subduction de la plaque océanique de l'Amérique du Nord sous la plaque des Caraïbes et le volcanisme d'arc insulaire associé forme un chapelet d'îles dans la mer des Caraïbes. La Soufrière de Guadeloupe au sud de Basse Terre est un dôme actif (fumerolien) construit sur un strato-volcan (Figure 1). Il y a 200 000 ans s'est déroulée la phase dite de « Grande Découverte » dont la seule partie de l'édifice encore visible est le rempart nord de la caldera. Ensuite de 42 000 à 11 000 ans, l'activité intra-caldérique a construit un édifice appelé « Carmichaël », qui s'effondra il y a 3000 ans environ. Enfin, l'édifice actuel de la Soufrière débuta il y a 8500 ans environ (IPGP, Observatoires volcanologiques français, site web).

Le dôme, qui culmine à 1467 mètres, est le siège de fumerolles ainsi que de sources d'eau chaude. Son activité d'origine magmatique est peu importante depuis 500 ans environ car sa dernière éruption magmatique remonte au XV^e siècle. Toutefois, la dernière "éruption" de 1976 est mieux documentée bien qu'il ne s'agisse que d'une activité d'origine phréatique, c'est-à-dire sans apport de magma juvénile. Cette activité a provoqué des séismes, des projections de vapeur d'eau et de blocs pulvérisés mais aussi des glissements et des lahars qui se sont écoulés dans l'amont de deux bassins versants : 1,5 km dans la rivière du Galion au sud-ouest du volcan et surtout dans la rivière du Carbet sur le flanc est, où un important lahar, de 30 à 50 m de large et de 15 à 20 m de haut s'est propagé sur 3,5 km de distance (Westercamp et Tazieff, 1980 ; Feuillard et al., 1983). Une polémique surgit à l'époque autour de la dangerosité de l'explosion et du risque d'une augmentation de l'activité. Un ouvrage résume avec objectivité cette crise (Fiske, 1984). Deux groupes de scientifiques français ont âprement débattu afin de déterminer s'il fallait ou non évacuer la population qui, au final, le sera le 15 août 1976. Mais l'éruption se poursuivit puis cessa en mars 1977 sans la moindre activité magmatique. Les dommages ne furent alors que matériels. Même si la récurrence des lahars n'a pas été clairement étudiée, celle de différents types d'éruptions a été énoncée ainsi : 20 à 50 ans pour les éruptions phréatiques ; 500 à 1000 ans pour les éruptions avec édification d'un dôme de lave ; 1500 à 5000 ans pour les effondrements de flanc ; 5000 à 10 000 ans pour une éruption explosive édifiant un cône de scories ; 10 000 à 20 000 ans pour les éruptions effusives produisant des coulées de lave et enfin 10 000 à 100 000 ans pour les éruptions pliniennes (site web de l'IPGP La Soufrière Volcano).



Photo prise par M. Feuillard en 1976 (site web IPGP, Soufrière de Guadeloupe, photos de l'éruption phréatique) : dépôt et effets du lahar à la seconde chute du Carbet. La chute mesure environ 50 m. Le chenal large de 20 m environ contient des dépôts épais de quelques mètres. On note l'effet de la vitesse de l'écoulement dans les courbes du chenal de la rivière en haut de la chute (sur-élévation en rive gauche).

En raison de sa position à proximité d'une zone de subduction océanique, l'île est fréquemment frappée par des séismes comme celui de novembre 2004 (magnitude 6.3) entre la Guadeloupe et la Dominique, ou bien encore le séisme du 29 novembre 2007 à une vingtaine de kilomètres au nord de la Martinique. Le foyer de ce séisme de magnitude 7.3 était situé à 150 km de profondeur et le mécanisme de rupture associé était lié à la distension.

La fréquence des éruptions, même de faible magnitude comme les sont les événements phréatiques, nous autorise à penser que les lahars seront l'un des événements les plus probables lors de la future crise de la Soufrière de la Guadeloupe. En 1976, ces lahars ont déposé au total 300 000 à 1 200 000 m³ de sédiments dans les deux rivières indiquées ; ce volume reste approximatif car aucune étude détaillée ne leur a été consacrée à ce jour. Ce rapport n'analyse pas les matériaux et la trajectoire des lahars de 1976 dont les dépôts sont mal conservés, mais il est consacré à l'impact potentiel de lahars similaires lors d'un événement phréatique, d'un écroulement partiel du dôme de la Soufrière ou d'une crue de la rivière du Galion. Le rapport examine aussi l'emprise, la trajectoire et les impacts de lahars beaucoup plus volumineux mais hypothétiques, qui pourraient survenir lors d'une éruption majeure, d'une déstabilisation majeure de La Soufrière ou de pluies exceptionnelles dues à des dépressions stationnaires, des ouragans ou des cyclones.

Contexte hydrologique

Dans le cadre de cette étude, l'attention est portée sur l'aléa et le risque lié à la formation de lahars dans trois des principaux bassins versants (Figure 2). Vers l'WSW en direction de l'aéroport de Baillif s'écoule la rivière des Pères. Vers le SW s'écoule le Galion qui se jette dans la mer des Caraïbes coincé entre le fort et la marina de Basse-Terre. Enfin sur

le versant oriental s'écoule la rivière du Carbet se jetant dans l'Atlantique au sud de Capesterre-Belle-Eau. Ces cours d'eau sont caractérisés par des vallées très encaissées (>100 m) en forme de gorges ou de ravins de 10 km de longueur et à fort gradient (1150 m de dénivellation sur 10 km pour le Galion). Dans le cas du Carbet, trois chutes d'eau pluri-décamétriques à hectométrique s'étagent entre 1300 m et 500 m d'altitude sur <3 km de distance. Les lahars de 1976 n'ont pas atteint la falaise de la troisième chute d'eau vers 500 m d'altitude.

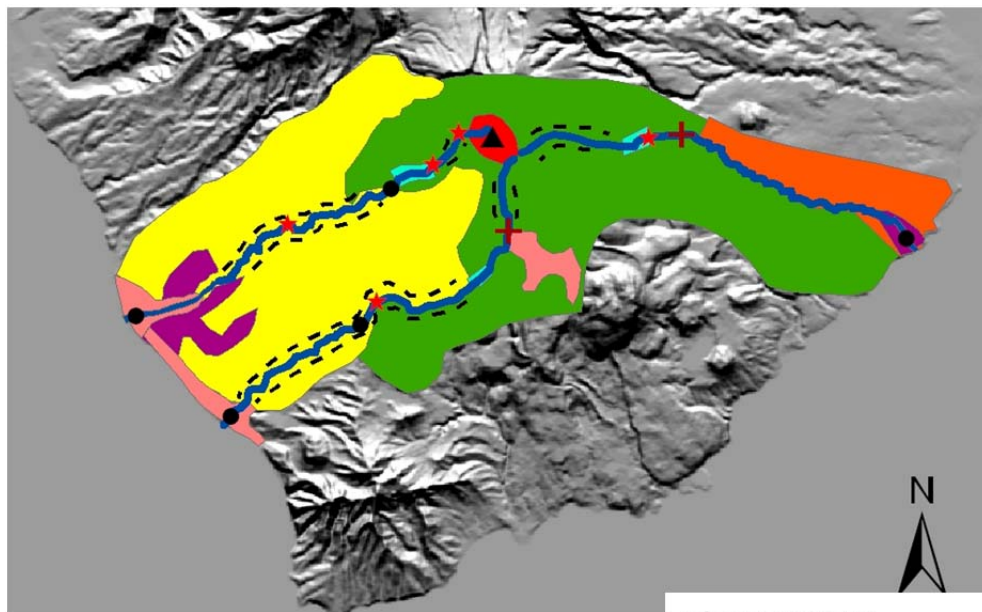


Figure 1. Géologie et géomorphologie simplifiées de la Soufrière et de ses flancs (Prévoit, 2009).

La légende ci-contre montre les différents ensembles géomorphologiques et géologiques (chronologie d'après l'IPGP). Trois bassins versants sont indiqués ainsi que leur géométrie (défilé, chenal élargi ou cône de déjection avec les alluvions) Cette figure est drapée sur le MNT « DB Alti » de l'IGN datant de 2004 (50 m).

Géomorphologie

- ✚ Extension maximale des fronts des lahars en 1976-1977
- Pont
- ★ Confluence
- ▲ Sommet
- Réseau hydrographique
- Chenal élargi
- - - Défilé

Géologie (âge en années)

- Alluvions
- Retombées de cendres (650 BP)
- Avalanche de débris (3500 BP)
- Couléées de laves (14000 BP)
- Couléées de blocs et de cendres (15000 BP)
- Couléées de ponces (50000 BP)

En raison de la localisation de Basse Terre sous les Tropiques (16°00-05' Nord), la pluviométrie, importante (6000 à 7000 mm par an sur les sommets), mais irrégulière selon les deux saisons et surtout dissymétrique entre le versant sous le vent et celui au vent, peut

engendrer des événements torrentiels et des inondations comme dans la vallée du Carbet, qui a été temporairement fermé au public en 2005. De plus, l'île est située sur la trajectoire des cyclones et est donc régulièrement balayée par des vents violents et des pluies diluviennes (par exemple les cyclones David en 1979 et Hugo en septembre 1989 sur la Guadeloupe).

En Basse-Terre, le régime hydrologique est essentiellement déterminé par l'abondance de la pluviosité, toujours supérieure à l'évapotranspiration. Les rivières ont un écoulement permanent alimenté par le ruissellement des précipitations et soutenu par les résurgences de petites nappes d'eau souterraines d'altitude. Les cours d'eau de la Basse-Terre se caractérisent par des bassins versants de petite taille (10 à 30 km²) sauf celui de la Grande Rivière à Goyaves qui atteint 158 km². Le régime hydrologique y est de type torrentiel directement influencé par les pluies journalières. A la suite de fortes précipitations, les débits peuvent passer de 1 m³/s à 300 ou 400 m³/s. En période de sécheresse, les ressources en eau de surfaces sont limitées à des écoulements relativement faibles de l'ordre du quart des modules.

Les trois rivières drainant la Soufrière (Figure 2) ont des modules spécifiques relativement faibles (30-40 l/s//km²) malgré la pente, car les bassins versants sont peu étendus, les terrains volcaniques sont perméables et les pluies irrégulières. La sécheresse peut frapper Basse Terre durant 4 à 5 mois. Les débits sont faibles en moyenne (1,5 à 3 m³/s). Pourtant, les pluies saisonnières, les tempêtes et les ouragans peuvent déclencher des crues importantes avec des débits compris entre 100 et 190 m³. Le maximum a été de 190 m³ au Grand Carbet (cote 410 m) le 9 août 1981 (Morell, 1088), mais des débits deux fois plus élevés ne sont pas inconnus en Guadeloupe sur des plus petits bassins.

Le Galion est particulièrement étudié ici. La rivière longue de 10 km prend sa source à 1150 m environ au pied est du dôme, se dirige vers le sud avec une pente très forte (30%) et des chutes, puis vers le sud-ouest après la cascade de la Parabole. A partir du plateau du Palmiste, il s'agit d'une gorge en pente moins forte (9%) sur 5 à 6 km en direction de la mer, avec un profil transversal caréné et des méandres, notamment dans la zone de confluence de la rivière Dugommier. Les caractéristiques importantes en cas de lahar sont : 1) la pente longitudinale 2) le profil transversal 3) l'existence de confluences et les affluents 4) les secteurs favorisant le débordement en cas d'écoulement profond 5) les dépôts mobilisables dans le chenal et les terrasses alluviales.

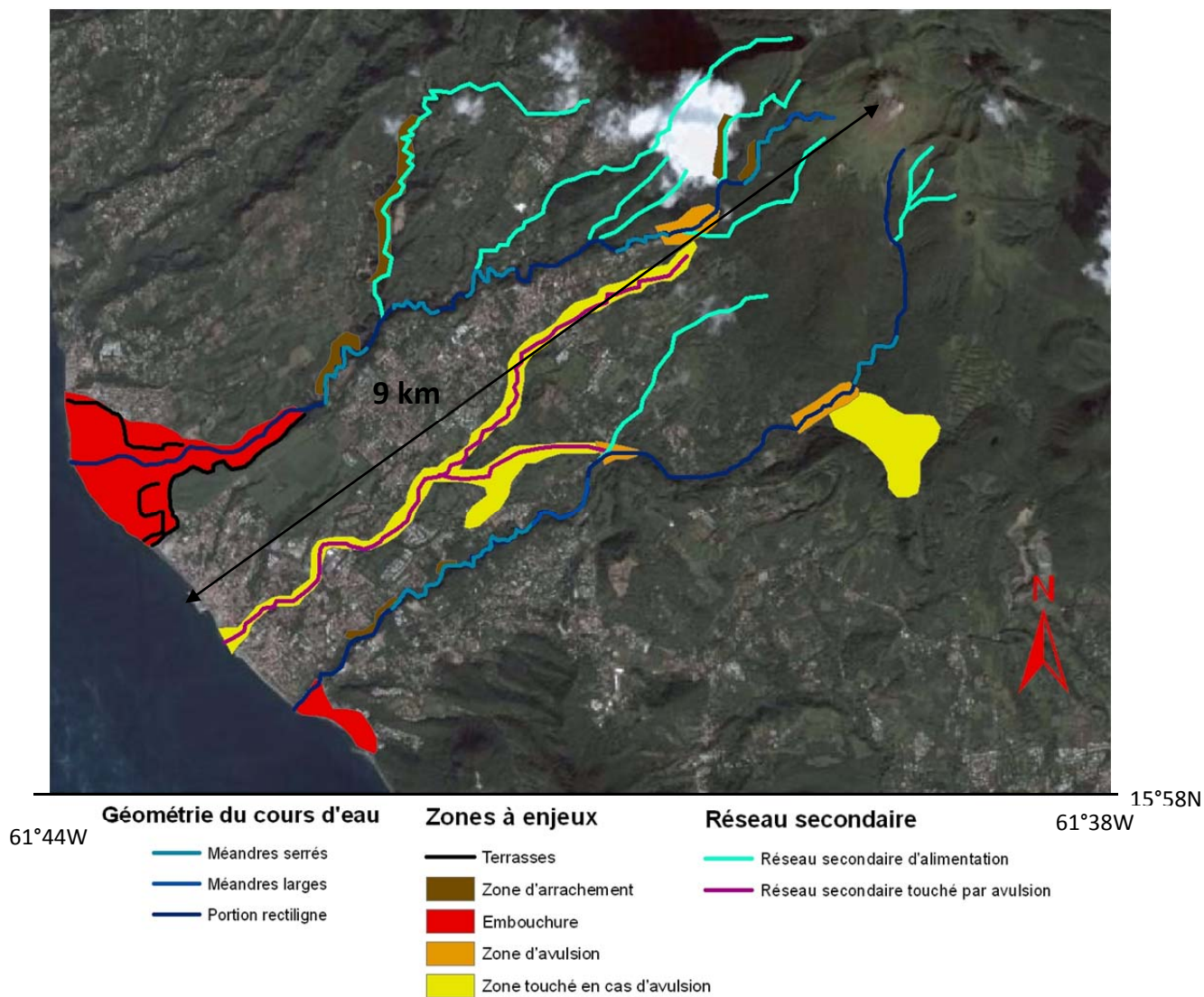


Figure 2. Réseau hydrographique du versant ouest de la Soufrière (image Google Earth).

Contexte urbain

La population du sud de Basse Terre est dense et surtout localisée sur le flanc SW et sur le rivage sud. Saint-Claude (10 600 habitants), Basse Terre (13 000), Baillif (6000) et Gourbeyre (8100), ainsi que leurs dépendances, représentent plus de 37 600 personnes vivant dans un rayon de 9 km autour de la Soufrière (en 1997) sans compter la population vivant sur le rivage sud (presque 11 000 personnes entre Vieux Fort et Trois Rivières) ni les très nombreux touristes surtout en hiver. Capesterre-Belle Eau (19 600) est située sur le rivage oriental à une distance un peu supérieure et à l'écart de la vallée du Carbet mais à proximité de celle du Pérou. Deux caractéristiques sont essentielles en cas de crise : la densité de la population et la répartition de l'habitat. Le flanc ouest et SW de Basse Terre montre à la fois une densité élevée (>300 habitants/km²) à Saint-Claude et un habitat relativement dispersé autour des centres historiques et dans un cadre montagneux et coupé. Ces caractéristiques constituent indéniablement un frein en cas de crise, éruptive ou cyclonique.

Si des lahars survenaient, trois des quatre villes pourraient être plus ou moins touchées par ces écoulements, mentionnées ici selon l'impact potentiel : Basse-Terre (12 834 habitants), la principale ville en raison de sa taille et de sa densité, coincée entre le Galion et la rivière des Pères, Baillif (6086 habitants) à l'embouchure de la rivière des Pères, et Saint-Claude (10 600 habitants), la seule qui ne soit pas située en bordure de mer, risque de subir des affouillements en bordure de la rivière. La ville de Capesterre-Belle-Eau (19 610 habitants) ne serait pas affectée mais certaines habitations ou bananeraies proches seraient menacées en cas de débordement (rivière du Carbet, voire du Pérou). Au cours de cette étude on a remarqué que les bâtiments étaient très diversifiés voire hétérogènes sur cette île. Bien que l'on trouve des bâtiments divers, la tendance qui ressort est celle d'une urbanisation à l'américaine, c'est-à-dire constituée de nombreux quartiers résidentiels avec des habitations de taille modérées.

La côte ouest présente deux zones d'intérêt. L'embouchure de la rivière des Pères et de sa périphérie et celle du Galion. La seconde zone d'intérêt est représentée par les villages situés à l'aplomb des gorges : Gourbeyre/Saint-Charles, Matouba et surtout Saint-Claude. La troisième zone la moins peuplée et aux faibles enjeux est l'embouchure du Carbet. La quatrième zone sera la partie restante de Basse-Terre. Nous avons étudié les vallées du Galion et du Carbet car elles ont été affectées en 1976 mais, pour des raisons financières et de délai, nous n'avons pas traité la vallée des Pères ici. Notre méthode d'évaluation de la vulnérabilité en cas de lahar a surtout porté sur le cas du Galion, objet principal de ce rapport.

II. OBJECTIFS ET OUTILS EMPLOYES

Nous avons mis en œuvre une série de méthodes destinées à montrer l'impact potentiel des lahars et crues associées autour de la Soufrière de Guadeloupe et notamment dans deux vallées, le Carbet vers l'ENE et le Galion vers le SE. Ces deux vallées ont été, en effet, empruntées par des lahars lors de l'éruption phréatique de 1976-77. Ce sont, avec la rivière des Pères (non étudiée ici), les trois principaux axes de drainage qui peuvent, dans le futur, guider voire canaliser des écoulements pyroclastiques ou de lahar vers la mer. Le flanc sud-ouest de La Soufrière, beaucoup plus urbanisé (St Claude, Basse Terre, Baillif) est davantage exposé que le flanc est (Capesterre). Pour cette raison, nous avons surtout étudié la zone de la rivière du Galion à travers le flanc sud-ouest.

Quatre objectifs ont été poursuivis :

1. Calculer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) le plus précis et le mieux résolu possible des Rivières du Galion (sud-ouest de Basse-Terre) et du Carbet (est-sud-est) par stéréophotogrammétrie, à partir de photographies aériennes et de points de contrôle au sol. Un MNT de qualité et précis est en effet indispensable afin de pouvoir reproduire la trajectoire et l'emprise spatiale des lahars potentiels dans les vallées avec un code de simulation.

2. Cartographier le bâti, le long de la Rivière du Galion, sous SIG (« shapefile » de type Polygone), à partir des orthophotographies générées. Cette cartographie s'inscrit dans une évaluation du bâti plus vaste à Basse Terre et appliquée aux embouchures des vallées des Pères et du Galion.
3. Reproduire ou simuler la trajectoire et l'extension de lahars de différents volumes avec le code LAHARZ, afin d'observer leur emprise et leurs effets le long de la vallée du Galion.
4. Réunir les informations obtenues afin de livrer une première évaluation des aléas et des risques attendus dans ce secteur. Ceci passe par l'élaboration de scénarios qui restent préliminaires dans ce rapport en l'absence de travaux sur place et de catalogues de lahars anciens.

III. RESULTATS

Trois résultats majeurs constituent une méthode d'évaluation des aléas et du risque engendrés par les lahars déclenchés sur un volcan actif et se propageant vers une zone urbanisée.

III.1. Réalisation d'un nouveau Modèle Numérique de Terrain (MNT) beaucoup plus précis que celui de l'IGN.

III. 2. Cartographie sous SIG et évaluation qualitative de la vulnérabilité physique du bâti au moyen d'une reconnaissance architecturale fondée sur la photo-interprétation.

III.3. Simulation des lahars avec le code semi-empirique LAHARZ et expression graphique de différentes trajectoires et d'une gamme de volumes, probables et exceptionnels.

III.1. Un nouveau modèle numérique de terrain de la vallée du Galion, du dôme et de l'amont de la vallée du Carbet

Un MNT a été réalisé par stéréo-photogrammétrie (J.-F. Oehler) à partir de photographies aériennes de l'IGN, avec des points de contrôle GPS et à l'aide la suite logicielle LPS d'Intergraph (LPS Ate), grâce à la collaboration de F. Vautier (Plate-forme géomatique de la MSH de Clermont).

III.1.1. Photos aériennes de l'IGN

Les prises de vue aériennes ont été acquises entre le 11 février et le 2 avril 2010, lors de la mission IGN 2010_FD 971_C_30 (Figure 2). Les images sont archivées au format TIFF. Les fichiers XML de métadonnées relatives à l'acquisition sont également disponibles. Plusieurs informations importantes sont extraites de ces fichiers, certaines étant néanmoins

absentes ou mal décrites (cf. Annexe 1). Les points de contrôle sol sont issus de fiches GPS IGN et/ou de points cotés géoréférencés extraits de la BDORTHO IGN et de Géoportail. Six des 72 fiches GPS de l'IGN (acquises au LMV) ont été retenues à des fins d'exploitation, les 66 restantes étant localisées à l'extérieur de la zone d'étude. Les coordonnées recensées et référencées dans le système de projection local UTM20N/Ste-Anne ont été converties à l'aide de GDAL en UTM20N/WGS84. La liste et la localisation des 6 points GPS exploités sont présentées dans le tableau 1 de l'Annexe et sur la figure 3 :

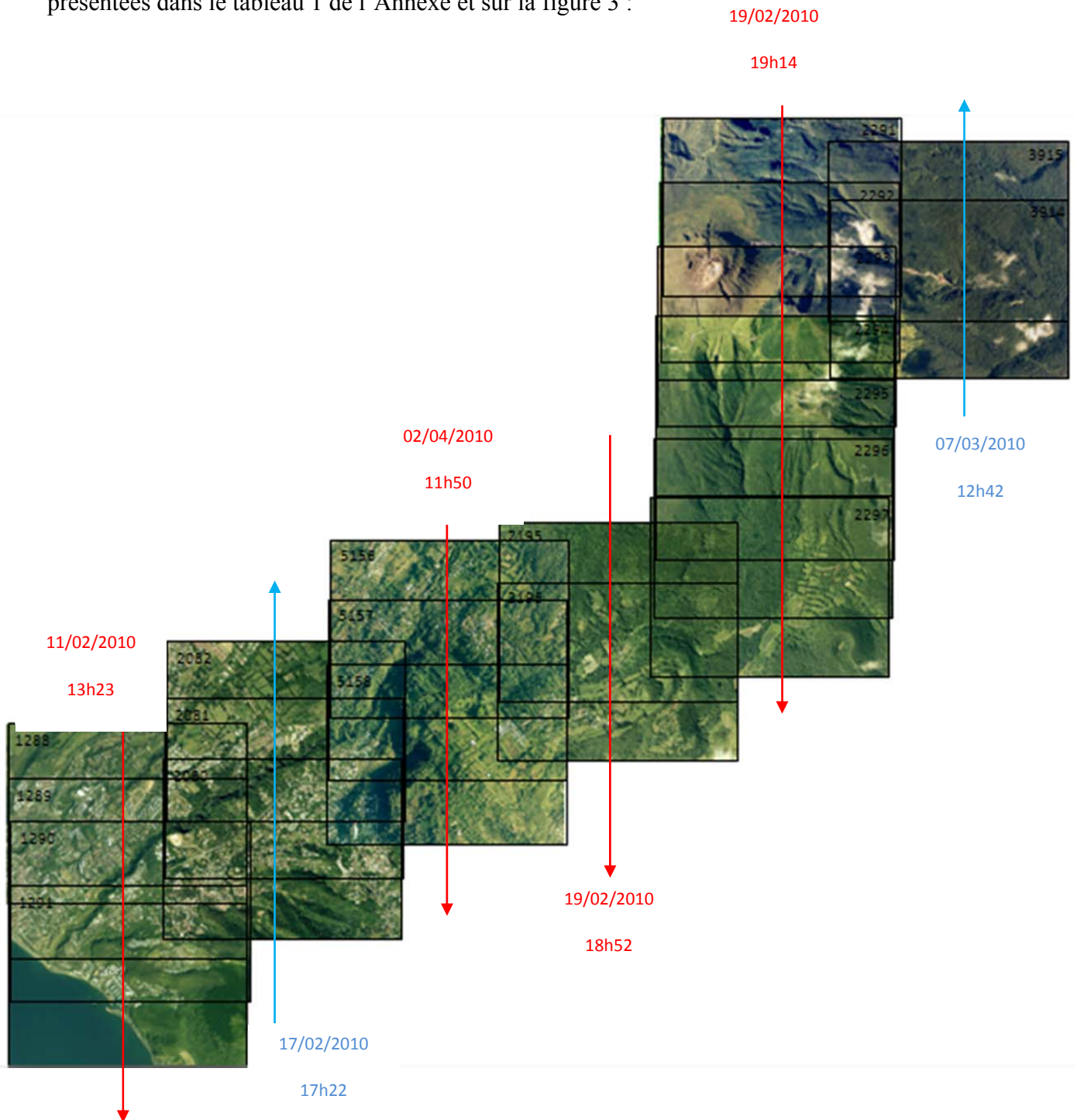


Figure 3. Panorama réalisé par superposition simple des photographies aériennes disponibles pour l'étude des Rivières du Galion et du Carbet (sud de Basse-Terre, Guadeloupe). Les flèches indiquent la direction et le cap de l'avion lors de la prise de vue.

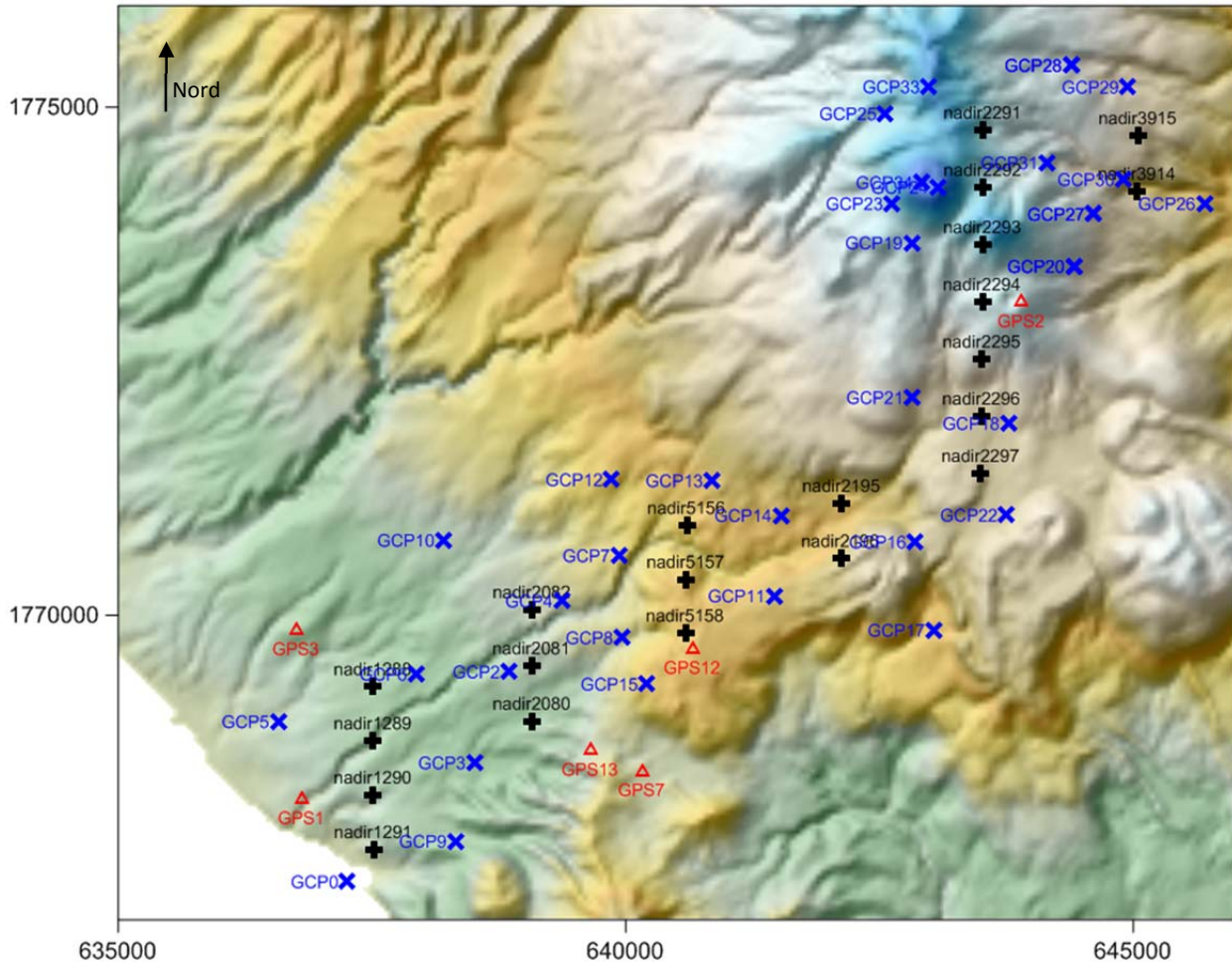


Figure 4. Localisation des points de contrôle sol utilisés sur le MNT BDALTI IGN à 50 m [DR4]: GPS*: Points GPS IGN ; GCP*: Points côtés BDORTHO IGN/Géoportail ; nadir*: coordonnées géoréférencées du centre des photographies aériennes extraites des métadonnées. Coordonnées en mètres selon la projection UTM20N/WGS84.

BDORTHO IGN / Géoportail.

Les coordonnées de 36 points côtés (précision de l'ordre du mètre en Z) ont été extraites à partir d'une exploitation combinée de la BDORTHO de l'IGN et de Géoportail. La liste et la localisation des 36 points GCP (pour « Ground Control Point ») exploités sont présentées dans le tableau 1 (Annexe 1) et sur la figure 4.

Les coordonnées (en UTM20N/WGS84) du nadir pour chaque photographie aérienne sont renseignées dans les fichiers de métadonnées. La liste et la localisation des 21 points « nadir » exploités sont présentées dans un tableau (sur demande aux auteurs) et sur la figure 4.

III.1.2. Traitement des données

La mise en œuvre de la chaîne de traitement inclut le traitement photogrammétrique, réalisé par J.-F. Oehler à l'aide de la suite logicielle LPS d'Intergraph, grâce à la collaboration de F. Vautier (MSH, Université Blaise Pascal). La chaîne de traitement est constituée de cinq grandes étapes (cf. Annexe 2) :

(1) Identification des points de contrôle sol sur les images. Au moins 3 points de contrôle par image, régulièrement distribués, sont nécessaires ; (2) Identification automatique (algorithme de reconnaissance de formes) ou ajout manuel de points d'attache supplémentaires ; (3) Aérotriangulation (géoréférencement) et contrôle qualité. Les étapes 1 à 3 sont réalisées de façon itérative en réajustant et/ou en ajoutant des points de contrôle et/ou d'attache supplémentaires afin de minimiser l'erreur (RMSE). (4) Extraction du Modèle Numérique de Terrain (module ATE). (5) Calcul des orthophotographies.

III.1.3. Application aux données de la Guadeloupe

Cette partie a pour objectif de documenter les paramétrages optimaux de LPS obtenus et utilisés pour le traitement des photographies aériennes des Rivières du Galion et du Carbet et la génération des MNT. Le paramétrage comprend la calibration du capteur, les points d'attache, l'aérotriangulation, l'algorithme d'extraction du MNT, puis le calcul des orthophotographies. Ceci est décrit dans le rapport rédigé par J.-F. Oehler (Altran).

La mise en œuvre de la chaîne de traitement a rencontré un certain nombre de difficultés : les unes sont liées aux métadonnées, aux photos aériennes, aux points de contrôle sol et GPS, les autres sont liées aux caractéristiques topographiques et météorologiques (nuages) de la Guadeloupe (cf. Annexe 2).

Par conséquent les MNT extraits de façon globale présentent un très grand nombre d'artefacts notamment dans les zones de recouvrement entre images et entre profils (Figure 3 de l'Annexe 1), Ces artefacts de traitement sont principalement dus à l'imprécision des données d'entrée et peuvent être difficilement corrigés sur la base des seules informations disponibles.

Afin de contourner ces difficultés, il a été décidé de : 1) scinder le traitement selon deux secteurs, celui du Galion + Dôme, c'est-à-dire la Rivière du Galion jusqu'au sommet de la Soufrière ; et celui du Carbet entre la Première Chute et le parking du site du Carbet ; 2) calculer les MNT par paire de photographies aériennes (dans la zone de recouvrement) pour limiter les pertes de cohérence dues à l'imprécision des points de contrôle.

III.1.4. Résultats

Les données d'entrée sont rassemblées dans le tableau 1 A (Annexe 1) et les points d'attache dans le tableau 1 B (Annexe 1).

Le résultat de l'aérotriangulation pour les deux secteurs d'étude est illustré sur la figure 2, Annexe 2. Les erreurs totales de triangulation (Total RMSE) atteignent 6.48 m sur le secteur Galion+Dôme et 4.23 m sur le secteur Carbet. Sur le secteur Galion+Dôme, les erreurs sur les 54 points de contrôle sont de 2.22 m en X, 3.42 m en Y et 6.53 m. Sur le secteur Carbet, les erreurs sur les 9 points de contrôle sont de 2.07 m en X, 1.25 m en Y et 2.42 m en Z. Les erreurs sont relativement importantes mais acceptables si on considère l'imprécision de la majorité des points de contrôle sol utilisés.

MNT et orthophotographies produits

Les MNT par paire de photographies aériennes à 1 m générés par stéréophotogrammétrie sont de qualité relativement satisfaisante (Figures 3 et 4, annexe 2). La figure 3 (annexe 2) illustre la bonne géolocalisation des MNT générés et la concordance de la rivière du Galion entre le MNT photogrammétrique et le MNT de la BDALTI IGN à 50 m. Le filtrage de type « Forest » semble être adapté et suffisant pour faire ressortir la topographie dans les zones fortement végétalisées. Les pertes de corrélation sont dues à l'imprécision des données d'entrée (métadonnées et points de contrôle sol) et à la présence de nuages localement (Figure 4, Annexe 2).

La figure 5 ci-dessous illustre la cohérence des MNT produits et des orthophotographies générées.

A



B



Figure 5. Mosaique conservée par superposition simple des MNT photogrammétriques calculés par paires à 1 m (A) et mosaique photogrammétrique (B).

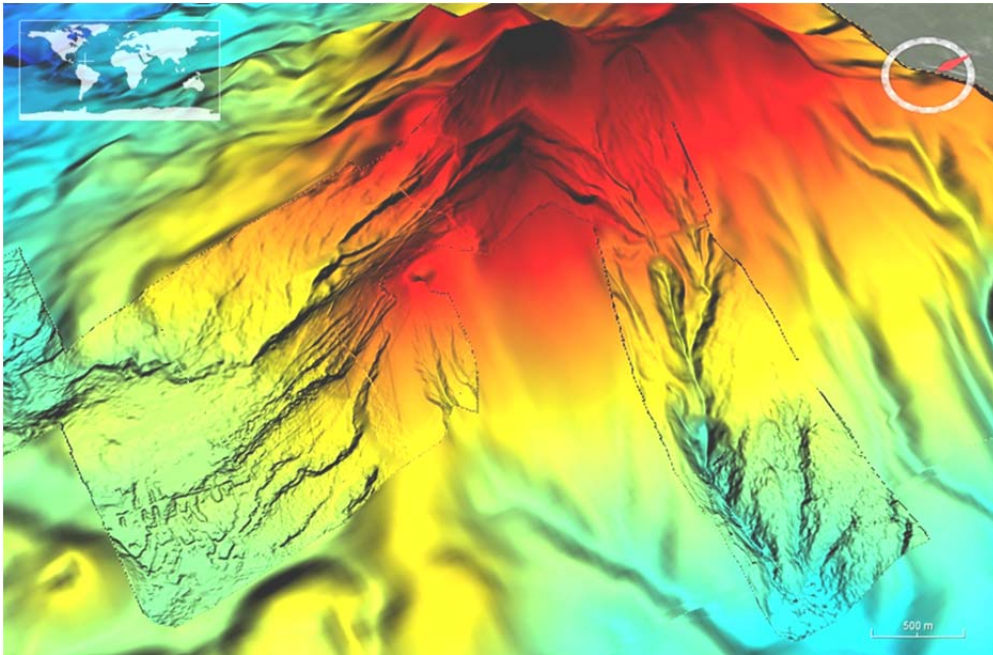
III.1.5. Post-traitement des données

Production du MNTU (Modèle Numérique de Terrain Unifié) par fusion des MNT par paire.

L'objectif du post-traitement est de générer un MNTU à 5 m par fusion des MNT calculés par paire au pas de 1 m. Le choix d'une maille finale du MNTU à 5 m permet d'atténuer les artefacts dans les zones de recouvrement et de lisser les jonctions entre les MNT produits à 1 m. La méthodologie de production du MNTU a compris quatre étapes (cf. rapport J.-F. Oehler, Altran et Annexe 2) : Etape 1, calcul des MNT par paire au pas de 1 m. Etape 2, préparation des MNT. Etape 3, génération du jeu de données à 1 m. Etape 4, calcul du MNTU à 5 m.

Le MNTU final, intégrant les secteurs Galion + Dôme et Carbet, au pas de 5 m est présenté sur les figures 6 A et B. La figure 7 expose les orthophotographies superposées sur le MNTU final à 5 m et sur le MNT BDAlti IGN à 50 m. Le MNTU est de qualité relativement satisfaisante compte tenu de l'incertitude et de l'imprécision des données d'entrée. Des artefacts résiduels d'interpolation et de fusion des MNT par paire persistent (Annexe 2) mais ceux-ci ne devraient gêner les modélisations des lahars que de façon limitée.

A



B

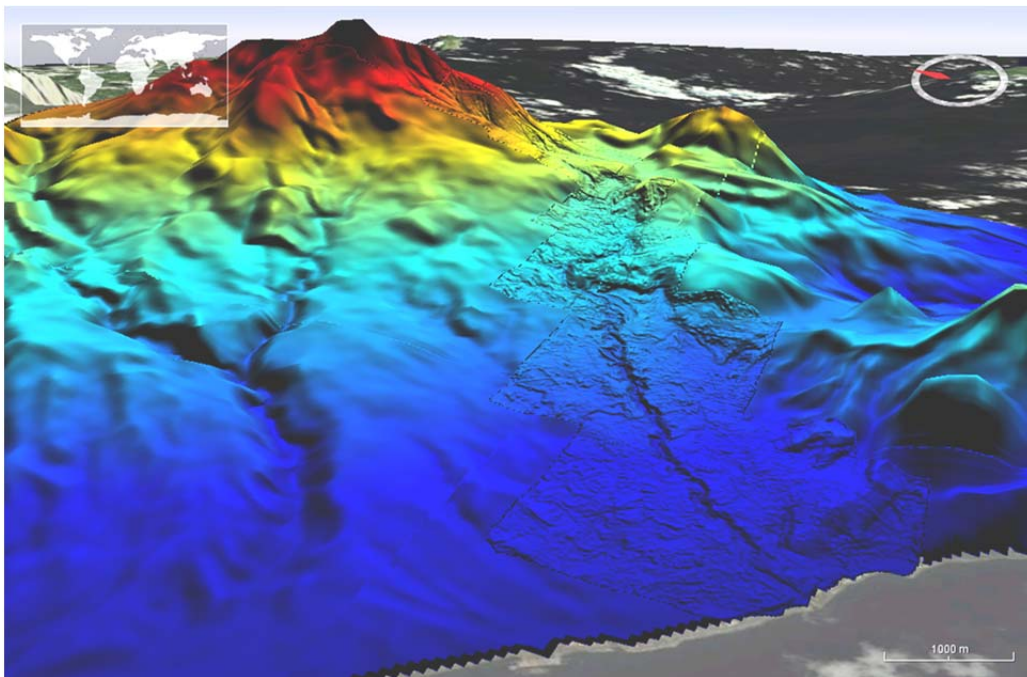


Figure 6 A et B. MNTU final à 5 m superposé au MNT BDALTI IGN à 50 m. Images générées à l'aide de 3DViewer (© Ifremer) par J.-F. Oehler.

Les écarts aux points de contrôle sol d'une part et à la BD Alti d'autre part ont été calculés (annexe 2). Les écarts sont relativement satisfaisants dans les secteurs à plus faibles gradients. Cependant, ils augmentent progressivement vers les plus hautes altitudes.

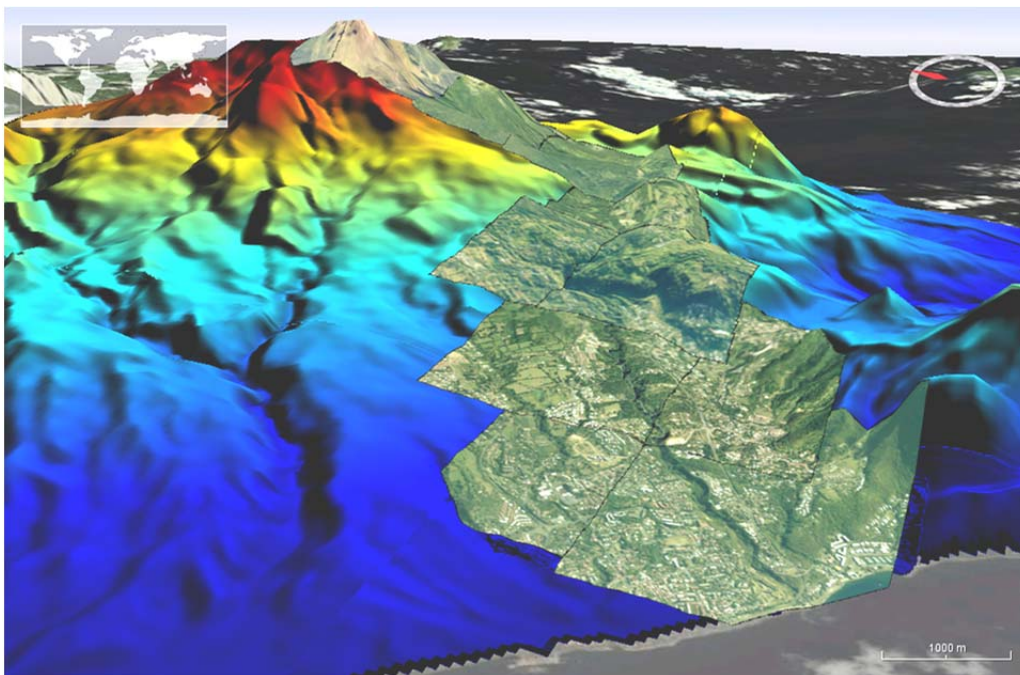
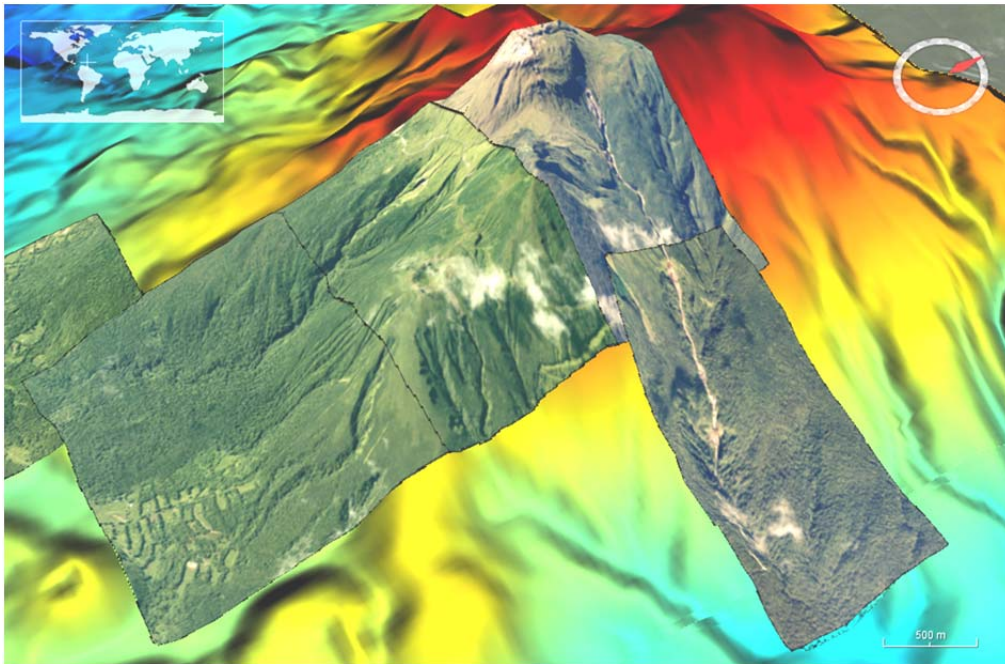


Figure 7. Orthophotographies superposées sur les MNTU final à 5 m et MNT BDALTI IGN à 50 m. Images générées à l'aide de 3DViewer (© Ifremer).

Au final, la précision du MNTU a été améliorée environ 10 fois par rapport au MNT existant.

III.2. Cartographie du bâti face aux impacts des lahars potentiels

Nous avons approché l'étude du bâti de deux façons et à deux échelles. D'une part, le bâti avait fait l'objet d'une cartographie préliminaire sur le versant ouest de la Basse Terre en 2009 dans le cadre d'un TER (travail d'étude et de recherche) de Master1 en géologie, effectué par Thomas Prévot et encadré par le premier auteur de ce rapport. D'autre part, le bâti de la zone proche de la rivière du Galion a été cartographié en détail pour ce rapport, à partir des photos aériennes de 2010 utilisées ci-dessus et de Google Earth.

L'évaluation du bâti repose sur les photos aériennes et des articles, mais sans enquête sur le terrain. Cette description du bâti n'est pas structurale mais architecturale, car elle n'a pas été contrôlée sur le terrain faute de financement. Il faut tenir compte de cette limitation.

III.2.1. Recensement des matériaux employés

D'après les photos aériennes et les rapports disponibles, les bâtiments observés en Guadeloupe peuvent être séparés en deux classes : les bâtiments anciens (avant les deux guerres mondiales) comme des vieilles maisons de maître ou les églises, et les bâtiments plus récents avec le début de l'utilisation du béton sur l'île. Les observations des bâtiments et leur classification reposent sur une étude de photographie sur Internet ou dans des articles. Toutefois, en raison de l'impossibilité de se rendre sur place et du manque de données, les matériaux employés à l'intérieur sont très peu décrits. Parmi les matériaux employés pour les murs nous avons classé, du plus fragile au moins fragile : la tôle, le bois brut, le bois enduit, le mélange chaux et andésite, les briques, le béton peu armé et le béton armé. Sur les toits, nous observons de la tôle, du bois, des tuiles et du béton.

III.2.2. Identification et typologie architecturale des bâtiments

La classification suivante repose sur plusieurs caractéristiques classées dans l'ordre suivant : nombres d'étages, matériaux du mur, caractéristiques du toit, quantité de fenêtres ainsi que leur taille, présence ou non de persiennes et/ou de balcons, âge du bâtiment, l'entretien et l'apparence, l'utilisation par la population, et enfin des caractères annexes. De plus certains bâtiments sont des photographies issues de la Martinique mais nous y retrouvons des types similaires à ceux de la Guadeloupe. 14 types, ont été distingués (Prévot, 2009) dans le tableau 1 suivant, de A à N :

A : HLM type métropolitain *Immeuble à Point-à-Pitre (Photo site micimmo.com)*



Plus de 3 étages ; Maçonnerie constituée de voile de bétons (béton banché) ou béton armé ; Toit plat en béton ; Nombreuses fenêtres de taille moyenne en proportions modérées ; Rares balcons en béton ; Bâtiment construit après 1980 en assez bon état ; Utilisé pour le domaine résidentiel, touristique, hospitalier.

B : HLM délabré Immeuble à Basse-Terre (Photo site kamizole.blog.lemonde.fr)



Plus de 3 étages ; Mur en béton faiblement armé (rare) à armé ; Toit plat en béton ; Nombreuses fenêtres de taille moyenne à petite en proportions modérées ; Rares balcons en béton ; Bâtiment construit entre 1960 et 1985 en mauvais état ; Logement social pauvre ; Niveau transparent au rez-de-chaussée.

C : immeuble rénové/récant de taille moyenne Immeuble à Point-à-Pitre (Photo micimmo.com)



2-3 étages voire 4 ; Mur en béton ou en briques (rare) ; Toit en pente moyenne à plat et en tôle (5 à 25°) ; Fenêtres assez nombreuses, grandes baies vitrées ; Balcons en béton de bonne qualité ; Construit au milieu à fin du XX^e siècle et bien entretenu : Résidentiel collectif récent ; Rez-de-chaussée parfois transformé en commerce ; Employé aussi comme siège d'entreprise ou clinique ; Méthode de construction appelée maçonnerie chaînée ou structure poteau-poutre avec remplissage.

D : immeuble assez délabré de taille moyenne Immeuble à Point-à-Pitre (photo site explorimmo)



2-3 étages voire 4 ; Murs en briques, bois (enduit ou non) ou en béton peu ou pas armé ; Toit en pente moyenne à plat en tôle (5 à 25°) ; Fenêtres assez nombreuses, grandes baies vitrées ; Balcons en bois ou béton mauvaise qualité ; Construit au début et au milieu du XX^e siècle ; Résidentiel collectif ancien ; Rez-de-chaussée parfois transformé en commerce.

E : Bâtiments de taille modérée en béton récent Conseil général de Guadeloupe (site officiel)



2 à 3 étages ; Murs en béton armé en excellent état ; Toit plat en béton ; Nombreuses fenêtres de grande taille ; Pas ou peu de balcons ; Récent (moins de 20 ans) en excellent état ; Employés par les entreprises, les autorités (préfecture, pompiers...) l'enseignement ; Bois rare (mais présent à l'intérieur ?).

F : Bâtiments de taille modérée en béton ancien *Ancienne mairie de Goyave (Photo ac-guadeloupe.fr)*



2 à 3 étages ; Murs en béton armé ou non ; Toit plat en béton ; Un peu moins de fenêtres que dans la classe précédente ; Pas ou peu de balcons ; Plus ancien (+ de 20 ans) en assez bon état ; Employés par les entreprises, les autorités (préfecture, pompiers...), l'enseignement.

G : Hacienda *Habitation Bois Debout à Capesterre-belle-Eau (Photo site guadeloupe-voyage)*



2 étages le plus souvent (parfois 3) ; Mur en béton armé et en bois avec enduit ; Toit moyennement incliné à plat en tôle (5 à 25°) ; Très nombreuses fenêtres ; Balcons en béton et piliers de soutien en bois ; Récent, en excellent état ; Utilisation touristique ou résidentielle (individuelle/collective), clinique récente ou entreprises.

H : Maison de maître rénovée *Habitation acajou au François (Martinique) (Image C. Charlery)*



2 étages ; Mur en briques ; Toit en tuiles raide (environ 30°) ; Fenêtres nombreuses et de grandes tailles ; Rares balcons ; Maison ancienne (XIX-XX^e) ; Excellent état car maison rénovée et entretenue ; Résidentiel individuel ou collectif de petite taille et riche.

I : Maison de maître partiellement rénovée *Habitation à La Sucrierie aux Anses-d'Arlets (Martinique) (image C. Charlery)*



Deux étages ; Maison hybride avec des étages en béton de mauvaise qualité ou en mélange andésite/chaux, ou des étages en bois brut (rarement enduit) ; Toit en vieille tôle en pente moyenne à plat (5 à 25°) ; Nombreuses fenêtres et ouvertures ; Présences de piliers en bois et de

persiennes ; Maison ancienne rénovée en état moyen à médiocre ; Beaucoup de matériaux récupérés employés.

J : Commerce et entrepôts *Les Abymes (Guadeloupe)(Photo tirée de karukera-vrd.com)*



1 à 2 "étages" ; Mur en tôle et très rarement en béton ; Toit plat en tôle ; Rares fenêtres, quelques ouvertures en proportions modérées ; Très récent et en bon état ; Utilisation comme commerce, entrepôts ou par les entreprises.

K : Lieux de culte *Eglise du Mont-Carmel (Basse-Terre)(Photo tirée de Google Earth)*



1 à 2 "étages" ; Mur en mélange andésite et chaux, parfois rénové avec du béton ; Toit en tôle très raide (plus de 30°) ; Rares fenêtres (vitraux souvent grillagés) ; Âge variable mais en majorité ancien ; Assez bon état ; Lieu de culte.

L : Résidentiel individuel moyen à riche *Issu de Spence et al. 2005*



Un étage (voire deux avec combles aménagées) ; Toit plutôt plat en tôle (5 à 20°) ; Fenêtres nombreuses de taille moyenne et des baies vitrées ; Parfois des piliers en béton ; Apparition au cours des années 1960, en bon état ; Utilisation résidentielle individuelle ; Maçonnerie du plancher et chaînage en béton armé, rarement en bois.

M : Maison de type créole *Parc national de Guadeloupe (Photo tirée de chasta971.free.fr)*



1 à 2 étages ; Mur en bois enduit ; Toit en bois ou en tôle moyennement pentu (environ 20°) ; Nombreuses fenêtres et baies vitrées ; Balcons et piliers de soutien en bois ; Très récent ; Excellent état ; Résidentiel ou touristique (habitation, musée comme dans le cas de la photographie).

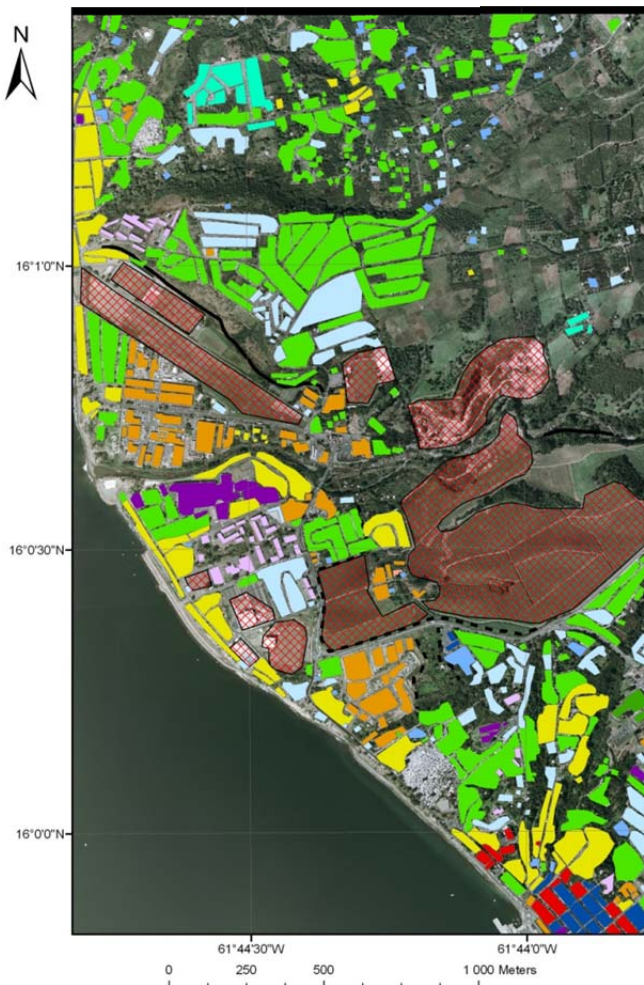
N : Habitat de fortune Ruine du centre-ville de Basse-Terre (image Google Earth)



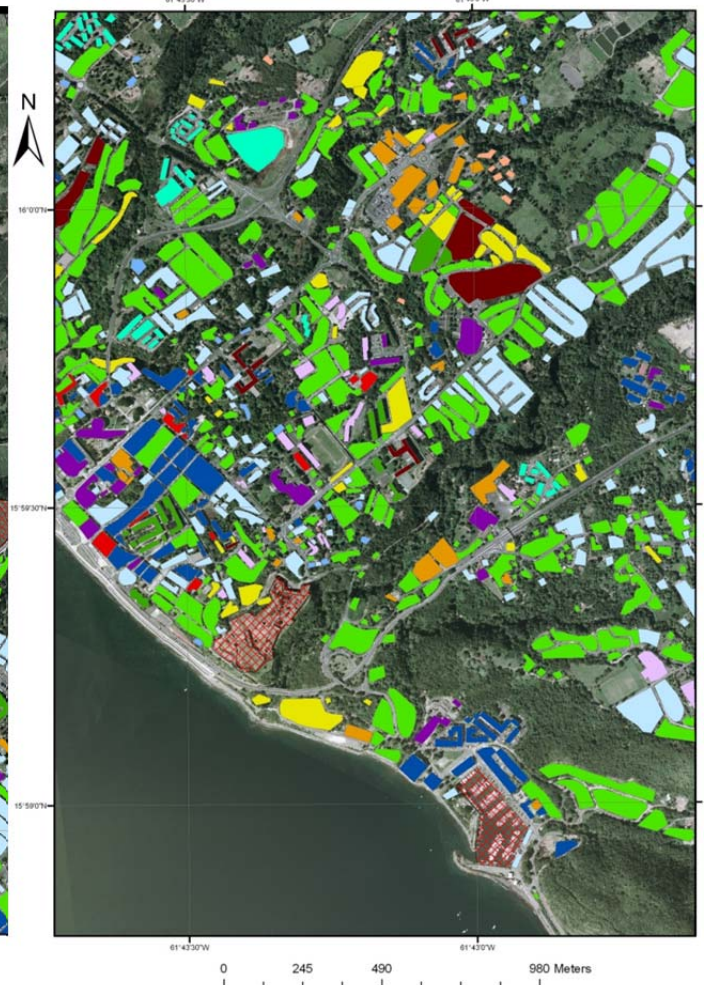
Un étage voire deux mais rare ; Mur en bois et/ou en tôle ; Toit en bois ou en tôle peu incliné (5 à 25°) ; Fenêtres en nombre modéré de taille petite à moyenne ; Ancien et dans un état très délabré ; Utilisé par pauvres ou garage ou simple débarras ; Ancienne maison de maître, cabane de pêcheur ; Rare, tend à se résorber.

Les deux embouchures de la Rivière des Pères et de celle du Galion ont été cartographiées sous SIG en suivant cette classification (Figure 8). Ce sont deux zones exposées à la fois aux crues, aux lahars et potentiellement aux effets des tsunamis, non étudiés ici.

Carte SIG de la rivière des Pères



Carte SIG de la rivière du Galion



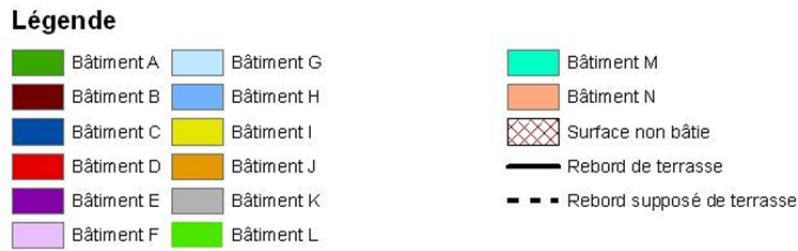


Figure 8. Cartes SIG des 14 types de bâti dans la zone des embouchures de la rivière des Pères et du Galion (cf. Prévot, 2009).

III.2.3. Impacts des lahars : mécanismes, processus et effets

Le tableau 2 ci-dessous (en anglais, Martelli, thèse 2011, modifié), qui résume un tableau en français plus détaillé en annexe 3, présente les mécanismes, les processus (directs et indirects) et les effets potentiels que les lahars et écoulement associés induisent sur les éléments : bâti, infrastructures et réseaux. Ce tableau est issu de nos travaux antérieurs dans le cadre du projet Laharisk de l'ANR RiskNat, de la thèse de K. Martelli et de mémoires de Master1 au LMV. Ce tableau n'est pas issu directement du travail conduit à Basse Terre mais d'une réflexion menée sur les impacts des lahars au Pérou (Palhol, 2007), en Indonésie et d'après la littérature existante (Nigro et Faella, 2008 ; Marti *et al.*, 2008).

On distingue trois grands types d'actions induites par les lahars (1^è colonne) : pression hydrodynamique, pression hydrostatique et impact des débris. Les paramètres sont quantifiés (3^è colonne) pour chaque grande action d'un lahar. Les processus induits, directs et indirects, sont décrits dans les 4 et 5^è colonnes, et enfin la dernière colonne consigne les effets des lahars sur le bâtiment.

| Action | | Description | Parameters | Direct Processes | Indirect Processes | Effects |
|-----------------------|---|--|---|--|--|--|
| Hydrodynamic Pressure | Lateral component | The action of the lahar flowing and moving around a building. As the flow velocity and depth increases then these forces will also increase. | $p_s = 1/2 C_d \rho v^2$ $F_s = p_s d$ In which: ρ = density of lahar g = acceleration of gravity d = depth of flow (m) C_d = drag-coefficient (between 0 and 2, in this case 0.8) v = velocity (m/s) | - Ductile deformation | - Fragile deformation - Rupture - Fissuration | - Fragile deformation and breaking if ductile threshold exceeded. - Wall deformation |
| | Vertical component | | | - Fragile deformation (cracks) | - Disaggregation, - Transport of material. - Lateral displacement, - Collapse | - Following building deformation, material is removed; and transported by lahar. - Wall and roof frame displacement via crack formation. |
| | | | | - Ductile deformation | - Fragile deformation - Disaggregation | - Roof subsidence absorbing deformation up to a 'plastic' threshold. Blocking of doors and windows – hindering evacuation. |
| | | | | - Fragile deformation - Crack formation | - Vertical displacement - Collapse | - Cracks in roofs leading to disaggregation. - Downward displacement of roof and floor. - Displacement and cracks leading to roof collapse. |
| Hydrostatic Pressure | Lateral | The effects on a building of lateral and uplift pressure forces due to the hydrostatic pressure of surrounding lahar and saturated ground. Lateral pressures concentrated at bottom of wall, and also drawn up into porous material by capillary rise. | The hydrostatic force, F_s , due to a lahar acting on a wall are determined from: $F_s = \int \rho g h dA$ where: ρ = mass density of flow; g = gravitational acceleration; h = depth of flow; and A = surface area of the wall in contact with flow | - Ductile deformation | - Fragile deformation | - Deformation of load bearing walls and deformation propagation to other edifice elements. - Crack propagation through load bearing walls may lead to collapse. |
| | Capillary rise | | | - Fragile deformation | - Disaggregation | - Material water content may exceed plasticity threshold. |
| Debris impact | Static (accumulation of lahar material) | Static debris actions occur due to sediment accumulating externally or internally to a residence. - Case of deposits on roof: Pressure $P = F/S$ depends on force and surface on which it is exerted $F = m \cdot g$ mass of elements deposited on roof - Case of deposits on edges of edifices: these exert an oblique force (due to wall-buttesing) dependent on lahar deposit thickness. | - Burial | - Flat roofs are more likely to be affected, corrosion | - Burial, blocking doors preventing evacuation. - Infiltration of material makes structure more resistant but may corrode metal making it less stable. | |
| | | | | - Change in topography - Water soaking. | - May avulse stream and rainfall water towards edifice; can remove deposits surrounding edifice. - Slow protracted supply of water to edifice leading to rot. | |

Table 2: The actions and effects of lahar on buildings and infrastructure (modified from Palhol, 2007, Prévot, 2009, and adapted from K. Martelli, 2011).

III.2.4. Classification du bâti face aux processus

Nous prenons en compte les données ayant trait aux caractéristiques (matériaux des murs, du toit...), que nous classons et auxquelles nous affectons une valeur indiquant sa fragilité (une note de 1 rend le bâtiment plus résistant que s'il obtient 2). Ensuite nous additionnons ces nombres par processus et nous en faisons la somme. Certaines caractéristiques du bâtiment sont plus déterminantes pour leur fragilité que d'autres. Il en est de même pour les processus liés aux écoulements de lahar. Afin de vérifier leur importance respective, une qualification du poids de chaque caractéristique a été analysée (Figures 9 A et B).

Analyse en composante principale ou ACP

Cette technique est clairement explicitée dans l'ouvrage *Numerical Petrology and Developments in Petrology* (Le Maitre, 1982). A l'aide de nuages de points, nous pouvons en déduire « l'hyperplane » qui sépare le mieux deux nuages de points et donc sa perpendiculaire qui indique la fonction discriminante. Cette méthode peut s'avérer utile si l'on veut valider

une classification. Voici deux exemples, le premier avec la proportion de fenêtres et l'inclinaison du toit, le second avec l'inclinaison du toit et le nombre d'étages (Prévot, 2009).

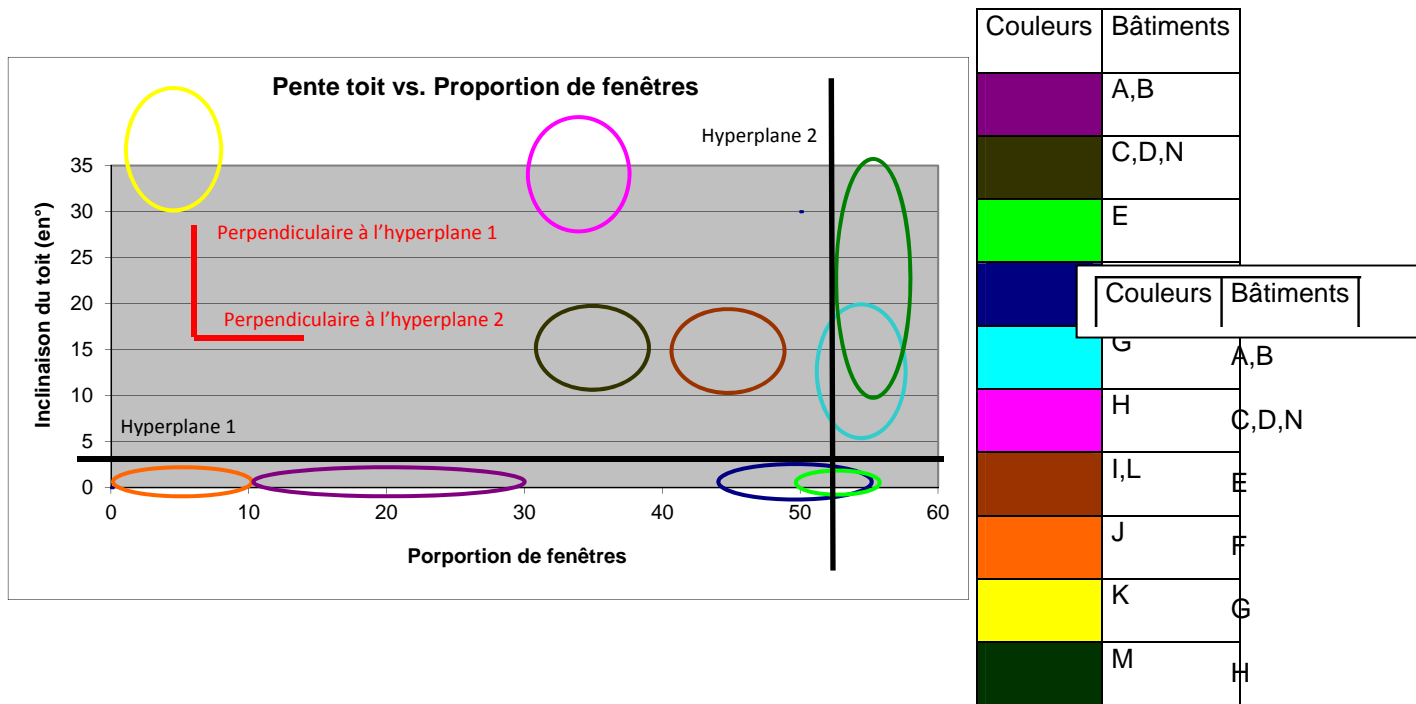


Figure 9A. ACP avec comme critères la proportion de fenêtres et l'inclinaison du toit.

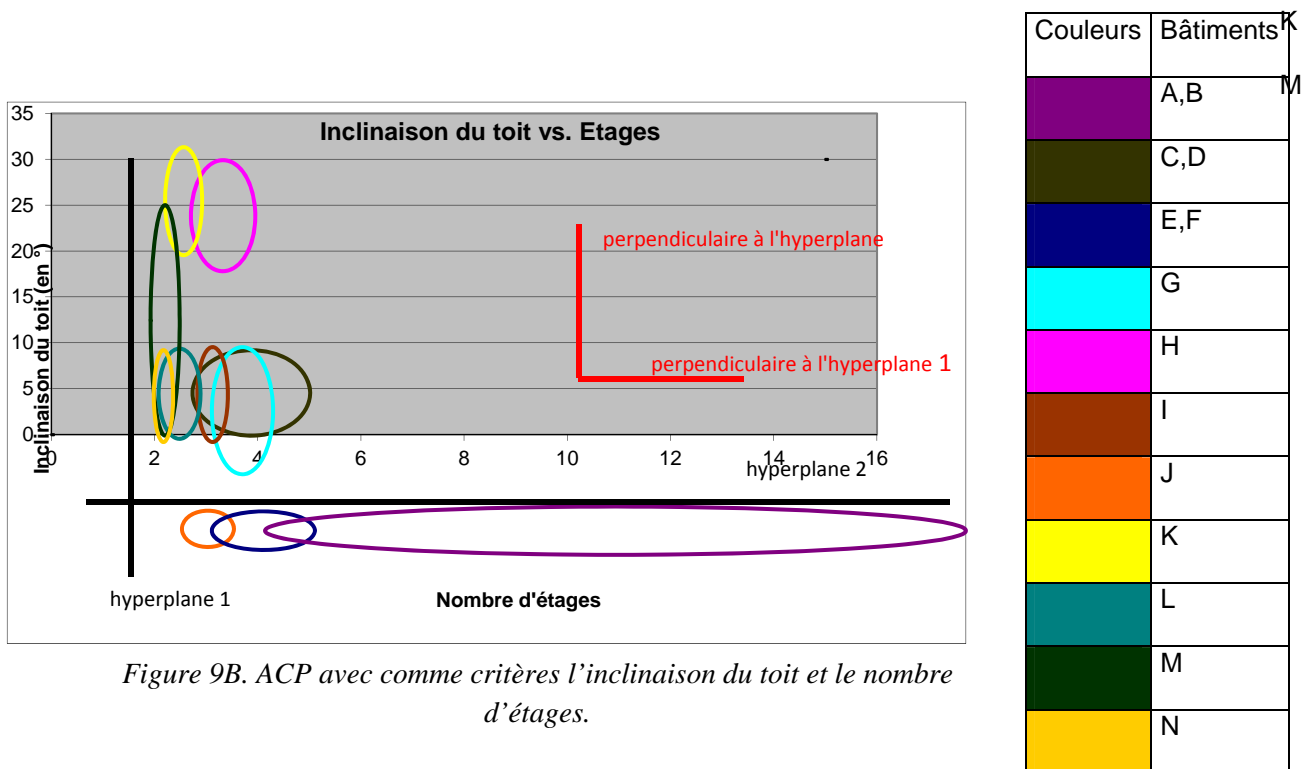


Figure 9B. ACP avec comme critères l'inclinaison du toit et le nombre d'étages.

Une fois l'ACP réalisée, l'impact des lahars potentiels peut être apprécié par un classement des paramètres qui influencent la résistance des bâtiments classés ci-dessus, sachant que leurs structures et l'intérieur n'ont pas pu être inventoriés. Le tableau 2 de l'annexe 3 consigne tous les critères de chacun des 11 paramètres pour chacune des 14 classes de bâtiments. Ces paramètres sont les matériaux du mur (7 catégories), l'inclinaison du toit (3 angles), les 4 types de toit ainsi que les 2 cas vis-à-vis de la température, le nombre d'étages (3 classes), la proportion de fenêtre (6 classes), les 3 types de fenêtres, le nombre de jointure par m² de surface, les matériaux (3) sensibles à la corrosion, l'existence de balcons (2 cas), les 2 types de piliers apparents et les 4 types de matériaux sensibles à la chaleur (en cas de lahar chaud). Un coefficient de 1 à 7 est attribué à chaque critère (Tableau 3, Annexe 3).

Synthèse des vulnérabilités du bâti

Le premier processus étudié (tableau 3 ci-dessus et tableau 2, annexe 3) est la *pression hydrodynamique horizontale*. Les paramètres considérés sont l'inclinaison du toit, le nombre de jointures au m², le nombre d'étages, les matériaux des murs, les matériaux du toit, la proportion des fenêtres. Le second processus est la *pression hydrodynamique verticale*. Les paramètres pris en considération sont les matériaux du toit, son inclinaison, le nombre d'étages, le nombre de jointure au m². Le troisième processus est *l'ablation*. Les paramètres considérés sont les matériaux des murs, le nombre de jointures, le nombre d'étages, les balcons et les piliers apparents. Le quatrième processus est *l'impact de blocs*. Les paramètres considérés sont les matériaux des murs, l'inclinaison du toit, le type de toit, le nombre d'étages, la proportion des fenêtres, les matériaux constituant les fenêtres. Le cinquième processus est celui de *la température des lahars chauds*. Les paramètres influençant la résistance sont les matériaux du toit (partie spéciale), le nombre d'étages, et le type de matériaux sensibles à la chaleur. Le sixième et dernier processus est *l'accumulation*. Les paramètres entrant en considération sont les matériaux des murs, l'inclinaison du toit, le nombre de jointures au m², le nombre d'étages, les matériaux du toit, la proportion des fenêtres et les matériaux sensibles à la corrosion. Au final en additionnant tout, nous obtenons le tableau suivant.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|----|------|------|------|------|------|------|
| Pression hydro-dynamique horizontale | 8,5 | 8,5 | 16,5 | 19,5 | 13,5 | 13,5 | 20,5 | 19 | 20 | 16,5 | 16,5 | 17,5 | 25 | 24 |
| Pression hydro-dynamique verticale | 6 | 6 | 10 | 11 | 6,5 | 6,5 | 10,5 | 10 | 12 | 11,5 | 10,5 | 11,5 | 13 | 13,5 |
| Ablation | 7 | 7 | 9,5 | 12 | 6,5 | 7 | 12 | 10 | 11 | 9,5 | 7,5 | 5,5 | 13 | 14,5 |
| Impacts de bloc | 8 | 8,5 | 14 | 17,5 | 11,5 | 12 | 17,5 | 16 | 19,5 | 15,5 | 17,5 | 18 | 21,5 | 22 |
| Chaleur | 2 | 2 | 4 | 8 | 2,5 | 2,5 | 5,5 | 3 | 7 | 8,5 | 4,5 | 6 | 6,5 | 11,5 |
| Accumulation | 10,5 | 10,5 | 16,5 | 21,5 | 15,5 | 15,5 | 21,5 | 17 | 22 | 21,5 | 14,5 | 20,5 | 28 | 29 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|--------------|
| Total | 42 | 42,5 | 70,5 | 89,5 | 56 | 57 | 87,5 | 75 | 91,5 | 83 | 71 | 79 | 107 | 114,5 |
| Classement | 1 | 2 | 5 | 11 | 3 | 4 | 10 | 7 | 12 | 9 | 6 | 8 | 13 | 14 |

Tableau 3. Synthèse de la vulnérabilité des classes de bâtiments face au processus, sans poids donné à un processus ou à une caractéristique du bâtiment.

Ce tableau a été créé sans que tel processus ou telle caractéristique du bâtiment ne soit incrémenté par un poids défini par son influence sur la résistance du bâtiment. Le classement peut sembler cohérent excepté la classe J qui semble trop résistante, compte tenu des murs en tôle. Pour cette raison, on peut ajouter un coefficient de 2 à chaque fois que les matériaux des murs interviennent : si la classe avec un mur en tôle valait 7 points, maintenant elle en vaut 14. Nous obtenons donc le tableau suivant.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N |
|--------------------------------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| Pression hydro-dynamique horizontale | 9,5 | 9,5 | 18,5 | 22,5 | 14,5 | 15 | 23,5 | 22,5 | 24 | 23,5 | 20,5 | 19,5 | 30 | 31 |
| Pression hydro-dynamique verticale | 6 | 6 | 10 | 11 | 6,5 | 6,5 | 10,5 | 10 | 12 | 11,5 | 10,5 | 11,5 | 13 | 13,5 |
| Ablation | 8 | 8 | 12 | 16 | 7,5 | 8,5 | 15 | 14 | 15 | 17 | 12 | 7,5 | 18 | 21 |
| Impacts de bloc | 9 | 9,5 | 16 | 21,5 | 12,5 | 13,5 | 20,5 | 19,5 | 23,5 | 22,5 | 21,5 | 20 | 26,5 | 28,5 |
| Chaleur | 2 | 2 | 4 | 8 | 2,5 | 2,5 | 5,5 | 3 | 7 | 8,5 | 4,5 | 6 | 6,5 | 11,5 |
| Accumulation | 11,5 | 11,5 | 18,5 | 25,5 | 16,5 | 17 | 24,5 | 20,5 | 26 | 28,5 | 18,5 | 22,5 | 33 | 35,5 |
| Total | 46 | 46,5 | 79 | 104,5 | 60 | 63 | 99,5 | 89,5 | 107,5 | 111,5 | 87,5 | 87 | 127 | 141 |
| Classement | 1 | 2 | 5 | 10 | 3 | 4 | 9 | 8 | 11 | 12 | 7 | 6 | 13 | 14 |

Tableau 4. Synthèse de la vulnérabilité des classes de bâtiments avec prise en compte du poids des caractéristiques du bâtiment.

Ce tableau 4 donne des résultats très cohérents mais il faut aussi tenir compte des processus et leur assigner un poids. Si les processus de pression prédominent, celui de la température est mineur. Donc, l'intérêt est d'assigner un poids de 3 à la pression (horizontale et verticale) et un poids de 2 aux autres processus sauf celui de la température qui reste à 1. Nous obtenons alors le tableau 5 suivant.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|------|------|------|----|------|
| Pression hydro. horizontale | 28,5 | 28,5 | 55,5 | 67,5 | 43,5 | 45 | 70,5 | 67,5 | 72 | 70,5 | 61,5 | 58,5 | 90 | 93 |
| Pression hydro. | 18 | 18 | 30 | 33 | 19,5 | 19,5 | 31,5 | 30 | 36 | 34,5 | 31,5 | 34,5 | 39 | 40,5 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|------|--|
| verticale | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ablation | 16 | 16 | 24 | 32 | 15 | 17 | 30 | 28 | 30 | 34 | 24 | 15 | 36 | 42 | |
| Impacts de bloc | 18 | 19 | 32 | 43 | 25 | 27 | 41 | 39 | 47 | 45 | 43 | 40 | 53 | 57 | |
| Chaleur | 2 | 2 | 4 | 8 | 2,5 | 2,5 | 5,5 | 3 | 7 | 8,5 | 4,5 | 6 | 6,5 | 11,5 | |
| Accumulation | 23 | 23 | 37 | 51 | 33 | 34 | 49 | 41 | 52 | 57 | 37 | 45 | 66 | 71 | |
| Total | 105,5 | 106,5 | 182,5 | 234,5 | 138,5 | 145 | 227,5 | 208,5 | 244 | 249,5 | 201,5 | 199 | 290,5 | 315 | |
| Classement | 1 | 2 | 5 | 10 | 3 | 4 | 9 | 8 | 11 | 12 | 7 | 6 | 13 | 14 | |

Tableau 5. Synthèse de la vulnérabilité des classes de bâtiments avec prise en compte du poids des caractéristiques du bâtiment et des processus inhérents au lahar.

Nous retrouvons une classification identique à la précédente mais qui, cette fois, tient compte de tous les poids liés aux processus et aux caractéristiques des bâtiments. Nous pouvons dès lors dresser une première estimation des proportions des classes de bâtiments présents par zone d'intérêt : Tableau 6.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | Total |
|--------|---|---|----|---|---|---|----|---|----|----|---|----|---|---|-------|
| Zone 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 8 | 8 | 17 | 2 | 17 | 17 | 0 | 25 | 2 | 2 | 100 |
| Zone 2 | 4 | 1 | 15 | 5 | 8 | 6 | 17 | 5 | 6 | 4 | 1 | 25 | 2 | 1 | 100 |
| Zone 3 | 3 | 4 | 8 | 3 | 8 | 5 | 20 | 2 | 8 | 5 | 1 | 29 | 3 | 1 | 100 |
| Zone 4 | 1 | 1 | 3 | 0 | 5 | 3 | 25 | 4 | 10 | 7 | 1 | 34 | 5 | 1 | 100 |
| Zone 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 95 | 0 | 3 | 100 |

Tableau 6. Pourcentage de chaque classe de bâtiments par zone de risque dans les deux embouchures des rivières des Pères et du Galion (cartographiés à la figure 6).

III. 3. Simulation des lahars potentiels avec LAHARZ

Des simulations de lahars potentiels (plus de 12) ont été réalisées au LMV par S. Ettinger avec le logiciel LAHARZ version 2.7. Le code semi-empirique LAHARZ (Schilling *et al.*, 1998) est un code AML (*ArcInfo Macro Language*) de modélisation numérique des lahars. Il calcule la surface potentiellement inondée par des lahars à l'aide du module GRID du système géographique d'information ArcInfo. Ce modèle est semi-empirique car il est fondé sur trois paramètres qui ne sont pas physiques mais statistiques (cf. Figure 7, Annexe 4) :

- 1) une grille planimétrique issue d'un MNT (ici le MNTU à 5 m) ;
- 2) Deux équations simples permettent d'estimer les surfaces transversales et planimétriques inondées le long d'un cours d'eau, avec un volume du lahar donné par l'utilisateur, à savoir la

section transversale d'une rivière $A = 0.05 V^{2/3}$ et l'aire planimétrique $B = 200 V^{2/3}$ où V est le volume du lahar ;

3) une gamme de volumes tirée de l'étude de 27 lahars sur 9 volcans dans le monde.

Dans un premier temps, LAHARZ permet le lissage des artefacts possibles présents dans le modèle numérique de terrain utilisé pour les simulations. Ensuite, la direction de l'écoulement de chaque cellule est calculé ainsi que le nombre de cellules s'écoulant vers elle. Enfin la grille de talwegs est créée en fonction d'un seuil indiqué par l'utilisateur. Une rupture de pente principale est choisie par l'utilisateur (cf. Figure 10 ci-dessous). Afin de délimiter les surfaces potentiellement inondées, LAHARZ procède par comparaison entre les altitudes des cellules, à partir des cellules constituant le talweg sélectionné, et par 'construction' de sections transversales de remplissage à partir de la surface du MNT (cf. Figure 7, annexe 3).

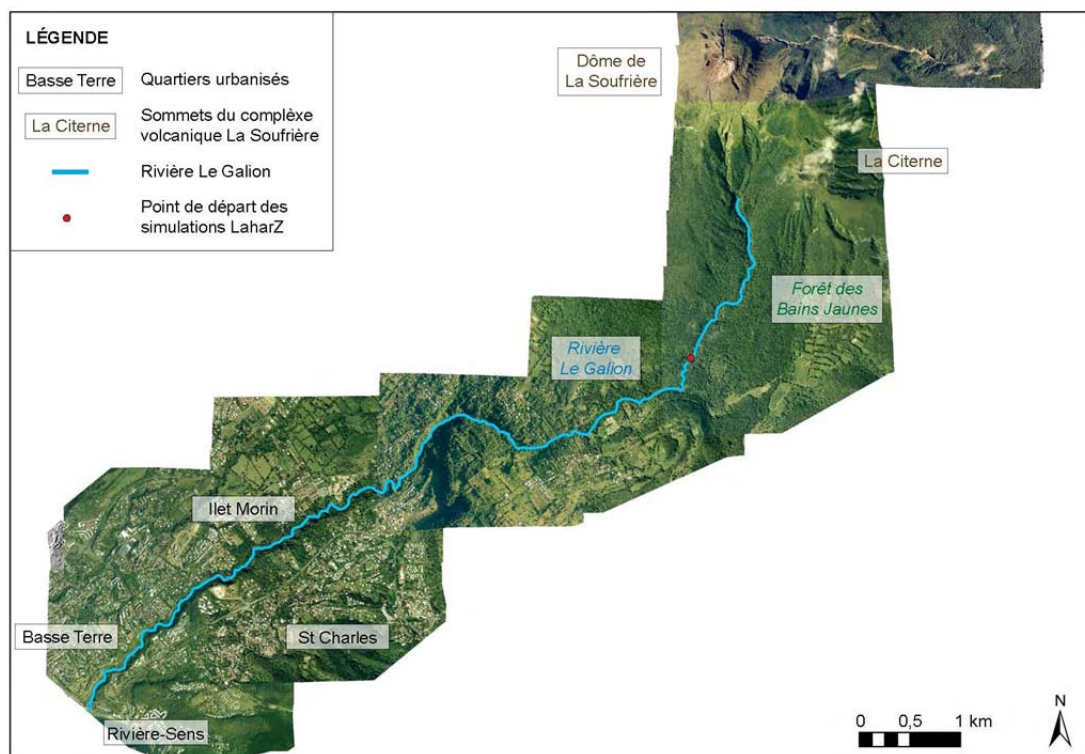


Figure 10. Carte générale (photographies aériennes géoréférencées) servant à montrer le point de départ des simulations de lahar (rupture de pente principale, point rouge à environ 750 m d'altitude), les principaux quartiers urbanisés et la Rivière du Galion.

III.3.1. Lahars simulés, extension et trajectoires

Grâce à LAHARZ, neuf catégories de volumes de lahar ont été simulées sur le MNTU à 5 m. Les résultats sont regroupés en 4 gammes de volumes exposées dans les figures 11 à 18.

Dans le premier cas, des lahars de 0,1 à 0,3 millions de m³ sont simulés ; cette gamme de petits lahars serait similaire aux plus petits de l'éruption phréatique de juillet 1976-mars 1977. Les lahars de 1976 n'ont atteint que 1,5 à 3 km de longueur depuis la base du dôme (Westercamp et Tazieff, 1980), mais leur volume total aurait été compris entre 0,3 et 1,2 million de m³.

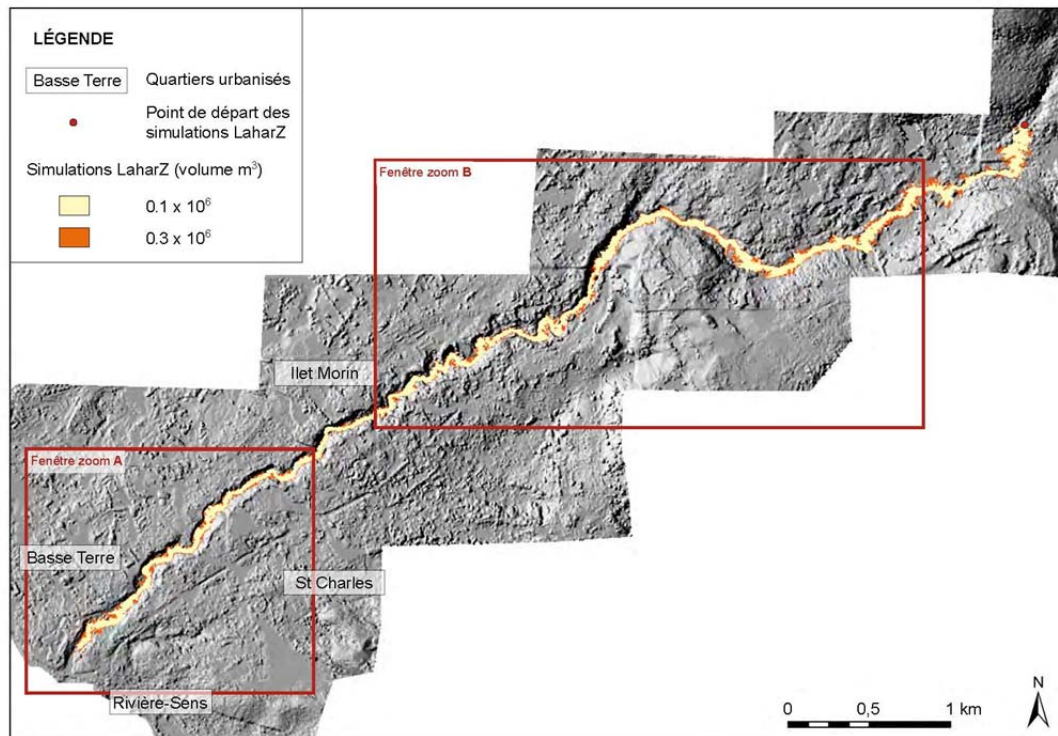


Figure 11. MNT de la vallée du Galion. Lahars simulés avec un volume de 0,1 – 0,3 million m³ similaire ou peu inférieur au cas de 1976.

Les rectangles encadrés en rouge sur le MNT de la figure 11 représentent les deux secteurs des lahars simulés ci-dessous, dans la zone distale proche de Basse Terre à la Figure 12A et la zone proximale du Palmiste à la Figure 12B.

On notera que l'emprise des lahars de petit volume est limitée au fond de la vallée et qu'aucune zone urbanisée ne serait atteinte. Les lahars ne parviennent pas à l'embouchure et en principe ne pourraient pas affecter les installations situées sur le rivage. Le lahar de 0.3 million de m³ simulé peut affecter les basses terrasses au-delà du chenal mais aucune habitation n'est observée sur les photos aériennes.

Dans les figures qui suivent, chacune des catégories de lahars simulés sera donc représentée sur le MNT et les rectangles délimiteront les secteurs sélectionnés pour l'étude. L'emprise des lahars simulés sera drapée sur les orthophotographies choisies.

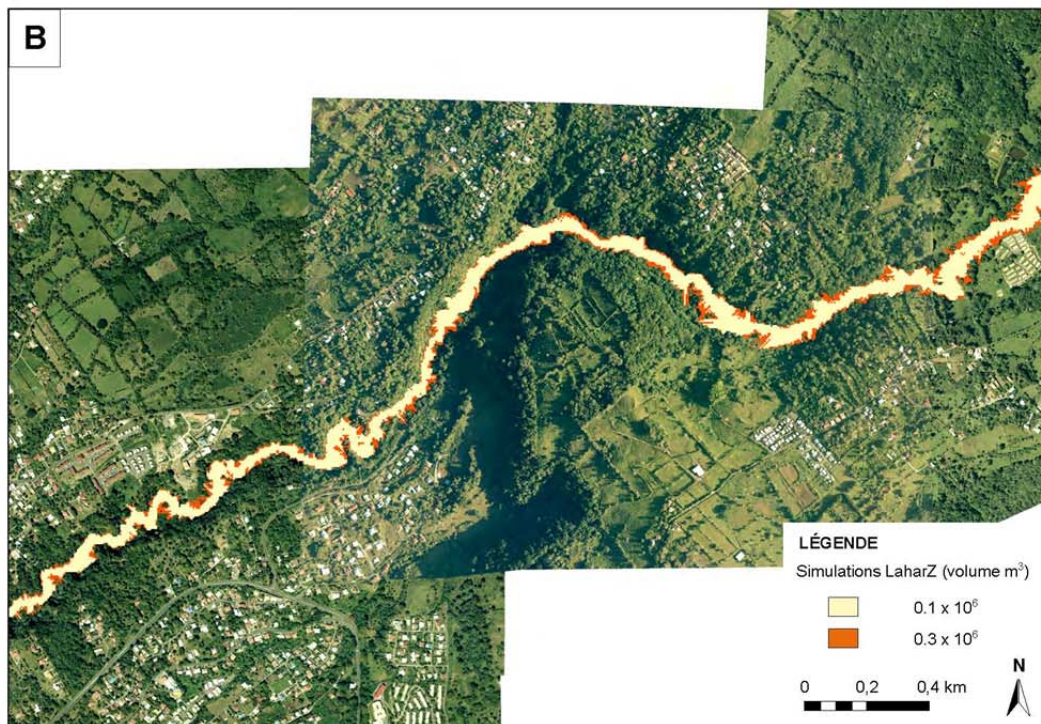
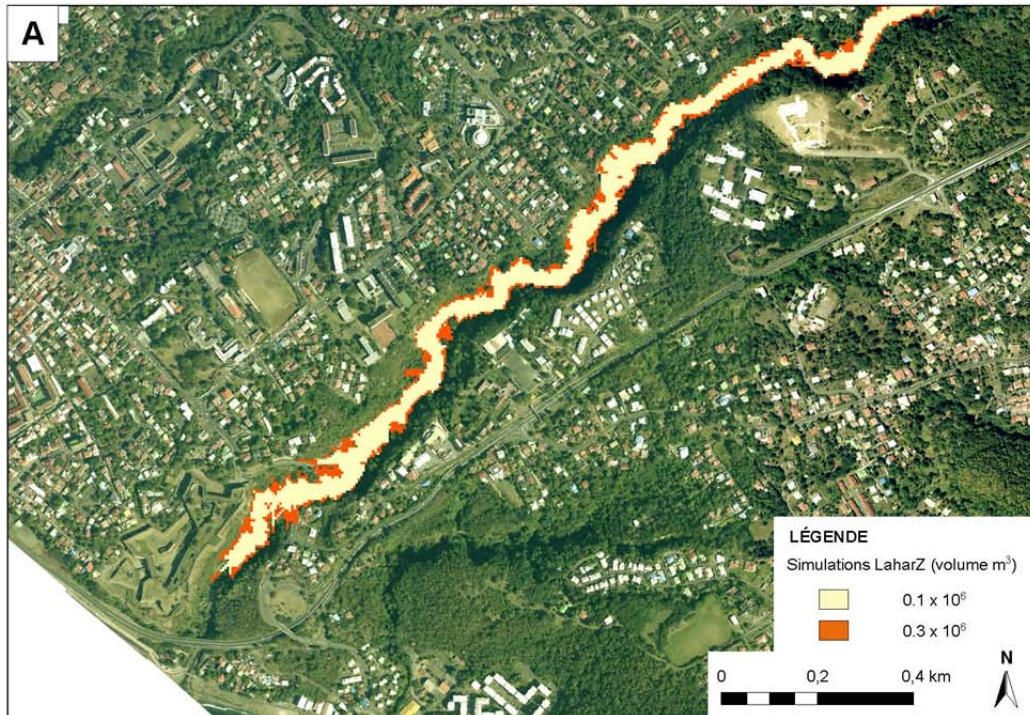


Figure 12. Simulation de lahars avec un volume de 0,1-0,3 million de m³ : A zone aval ; B, zone médiale – proximale (par rapport à la rupture de pente).

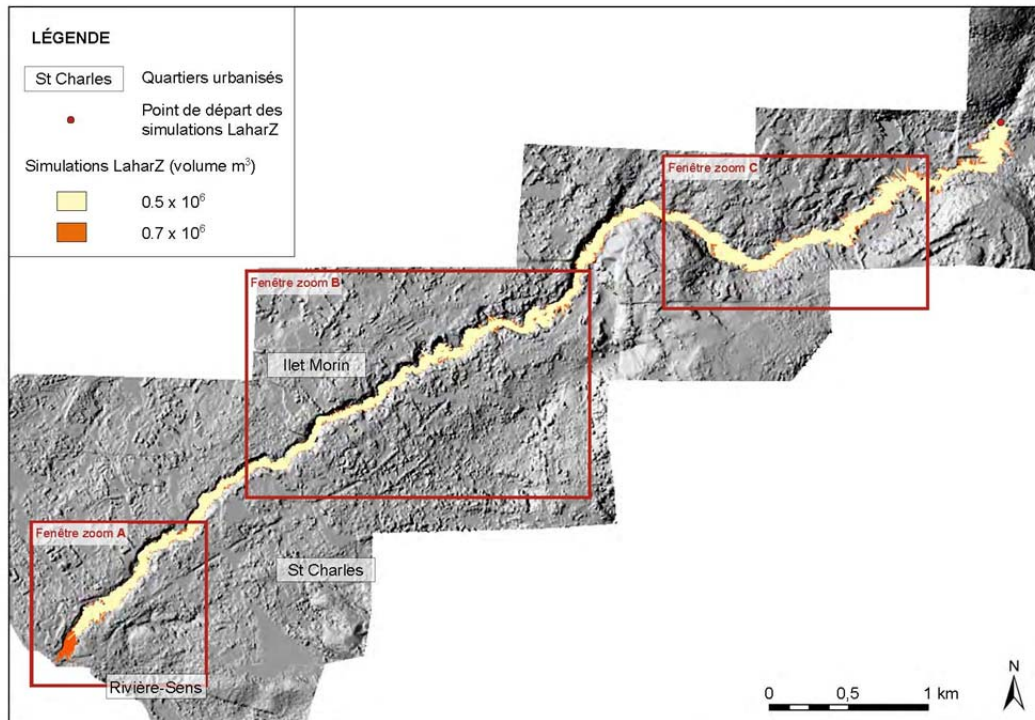


Figure 13. MNT de la vallée du Galion. Lahars simulés avec un volume de 0,5 – 0,7 million de m³. Cette gamme est similaire à celle de l'estimation du volume des lahars de 1976.

Seconde catégorie de lahars simulés. Deux secteurs (parmi les 3 encadrés) sont montrés ci-dessous. La figure 14 A de la zone distale suggère que tout le fond de la vallée est occupée par le lahar y compris le système de terrasses. En outre, le front du lahar de 0,7 million de m³ atteindrait probablement le rivage et endommagerait les ouvrages et la voirie situés entre Basse Terre et la Marina. Ceci ne s'est pas produit en 1976-77 cependant. Le volume de 0,7 million de m³ peut être retenu comme un seuil (pour notre étude) à partir duquel des dommages seraient attendus dans la vallée.

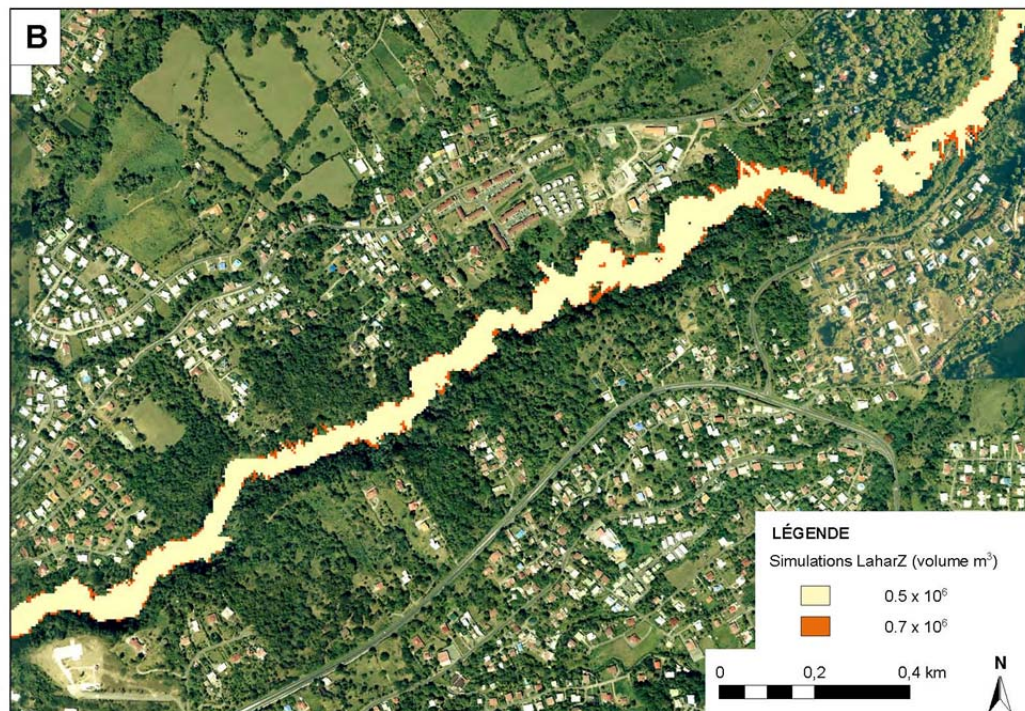
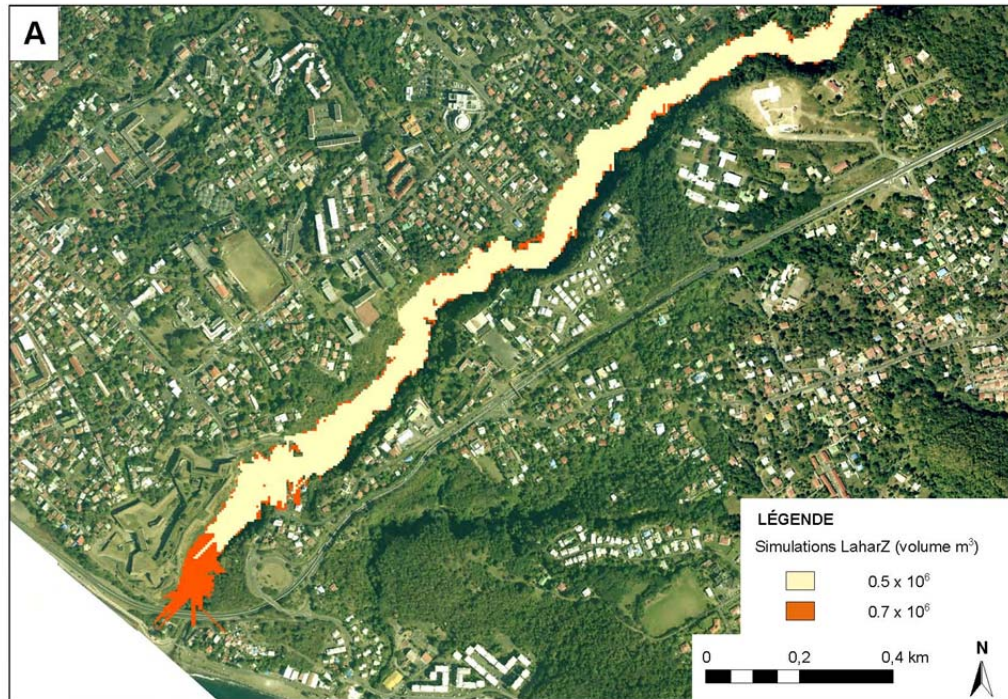
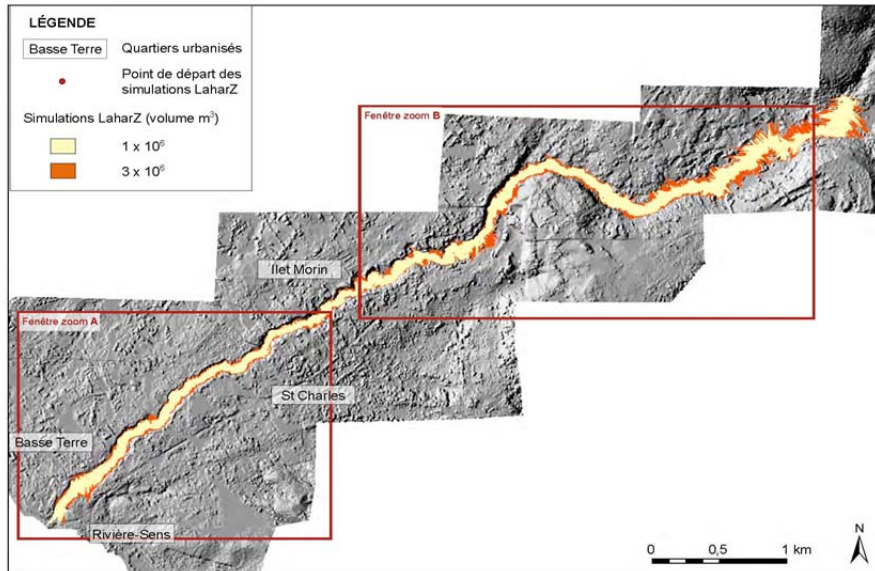


Figure 14 B. Simulation de lahars avec un volume de 0,5-0,7 million m³ : A zone aval ; B, zone médiale – proximale (par rapport à la rupture de pente). Cette figure suggère que les lahars ayant cette gamme de volumes pourraient menacer les maisons les plus proches de la vallée à l’amont de l’Ilet Morin.

La troisième catégorie de lahars, dont le volume serait conséquent (1 à 3 millions de m³, soit une à trois fois le volume des lahars de l'éruption de 1976-77), est représentée par la figure 15 où les surfaces occupées et les trajectoires des écoulements s'avèrent plus conséquentes que les précédentes.



*Figure 15.
MNT de la
vallée du
Galion.
Lahars
simulés
avec un
volume de
1 – 3 x
10⁶m³*

La troisième catégorie de lahars, dont le volume est conséquent (1 à 3 millions de m³), non seulement occuperait toute la vallée mais en atteindrait les rebords dans les zones urbanisées de l'aval (Figure 16 A). Le débordement en cas de volume de 3 million de m³ pourrait survenir en rive droite à l'aval du plateau du Palmiste et surtout à l'amont notamment près des cités en rive gauche (Figure 16A).

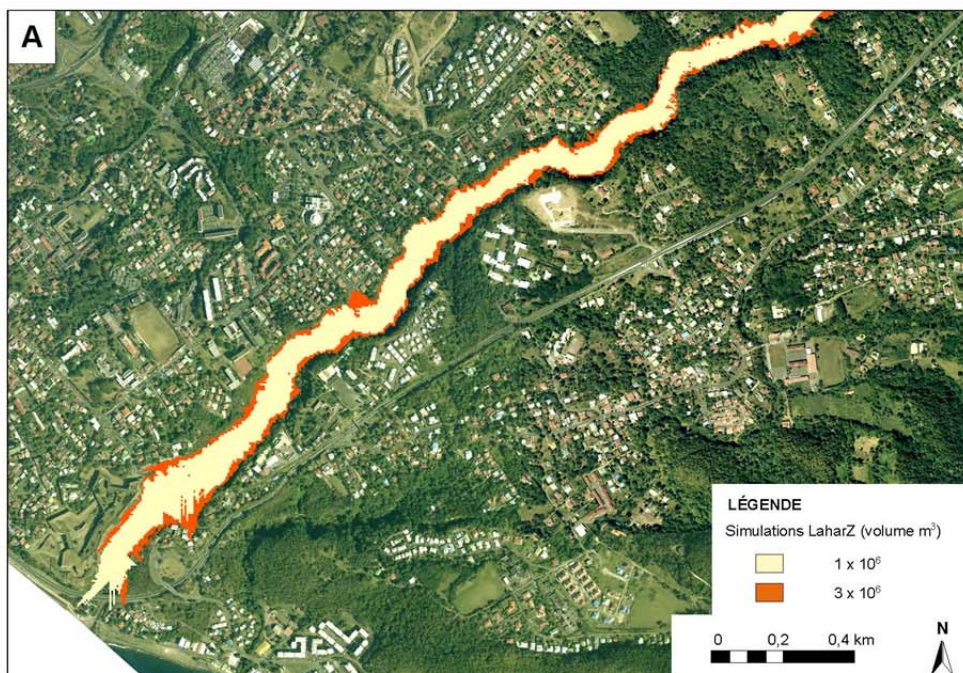
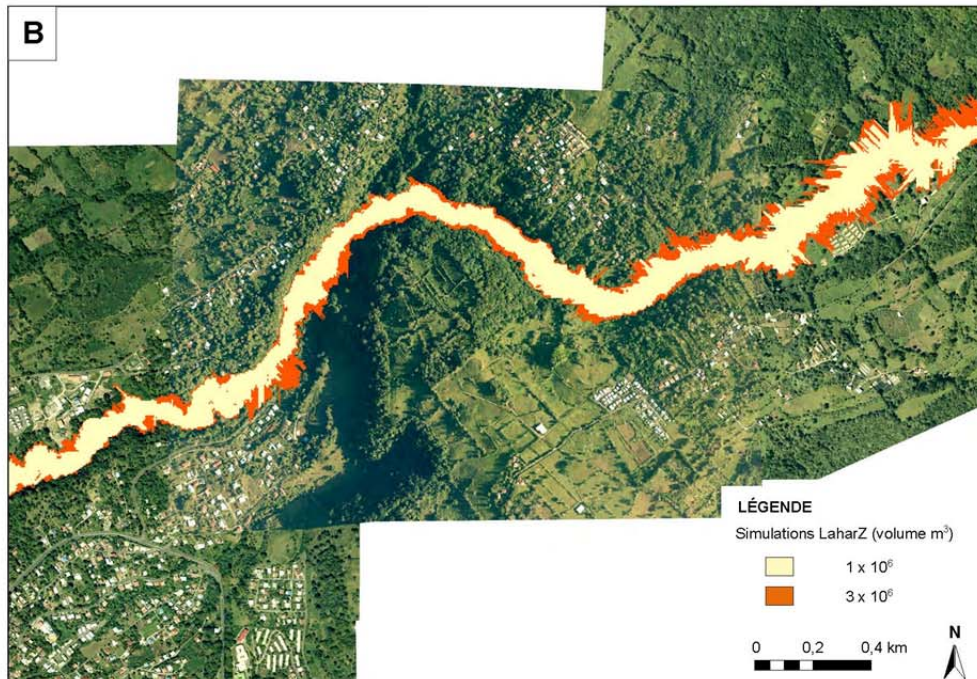


Figure 16. Troisième catégorie de lahars simulés A et B avec un volume de $1 \text{ à } 3 \times 10^6 \text{ m}^3$.

La quatrième catégorie de lahars simulés serait exceptionnelle (Figure 17). La gamme de volumes de 5, 7 et 10 million de m^3 , qui est hypothétique, peut être envisagée si une combinaison rare de processus survenait : une déstabilisation majeure du dôme ou éruption magmatique, une dépression stationnaire et des pluies très intenses, qui remobiliseraient rapidement un gros volume de dépôts d'avalanche de débris ou de produits pyroclastiques.

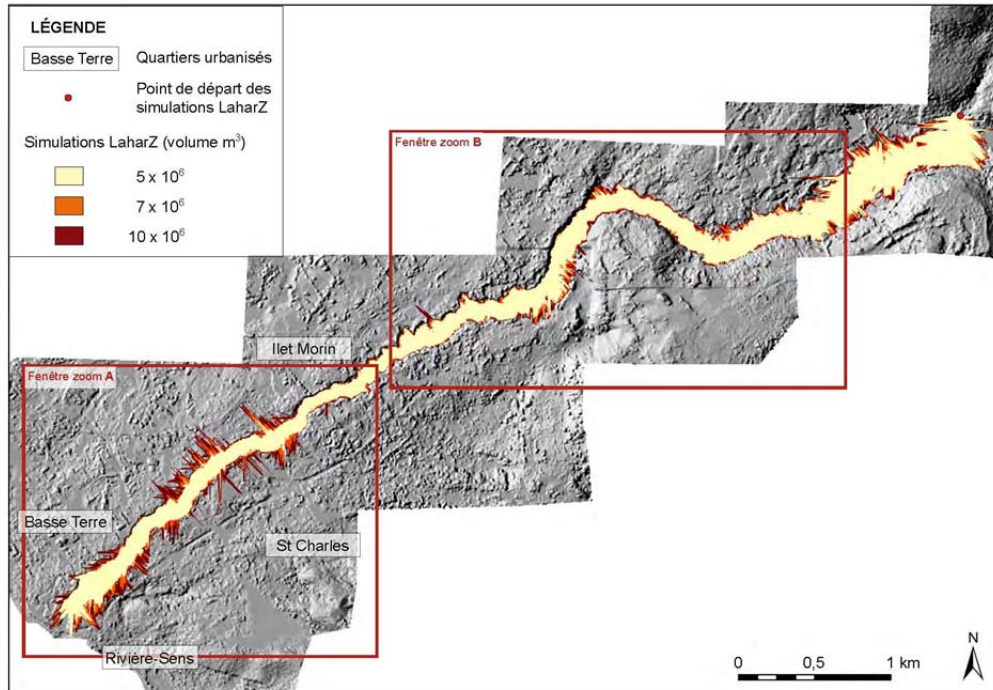
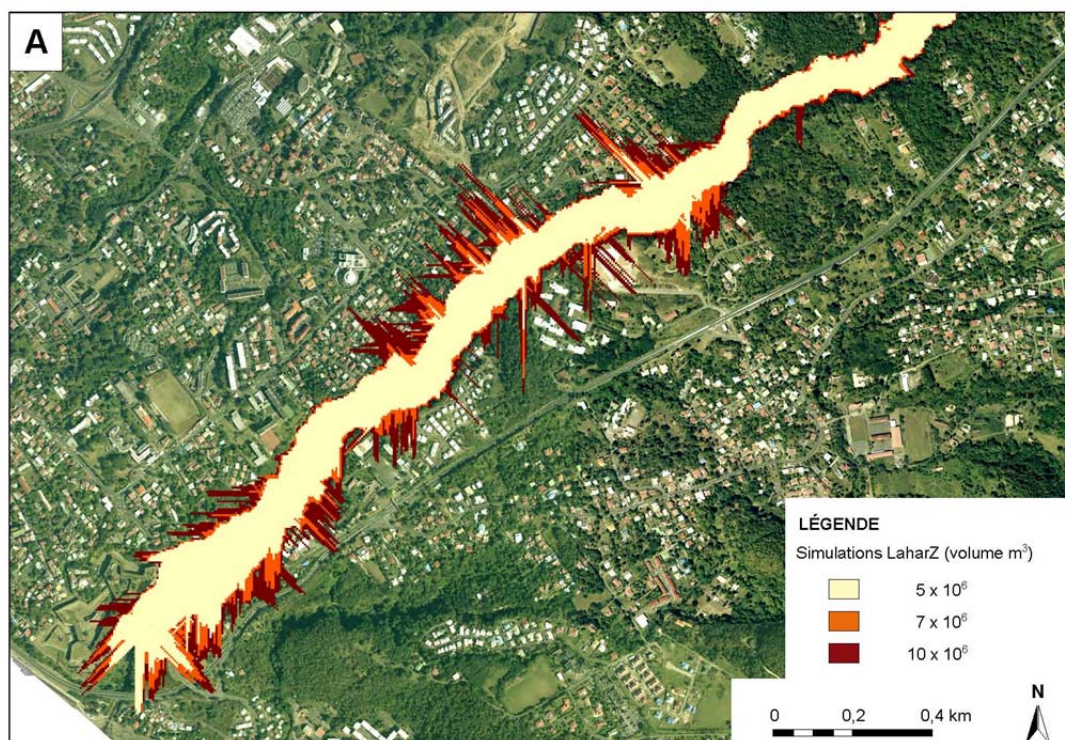


Figure 17. MNT et lahars exceptionnels simulés avec un volume de 5 à 10 million de m³.



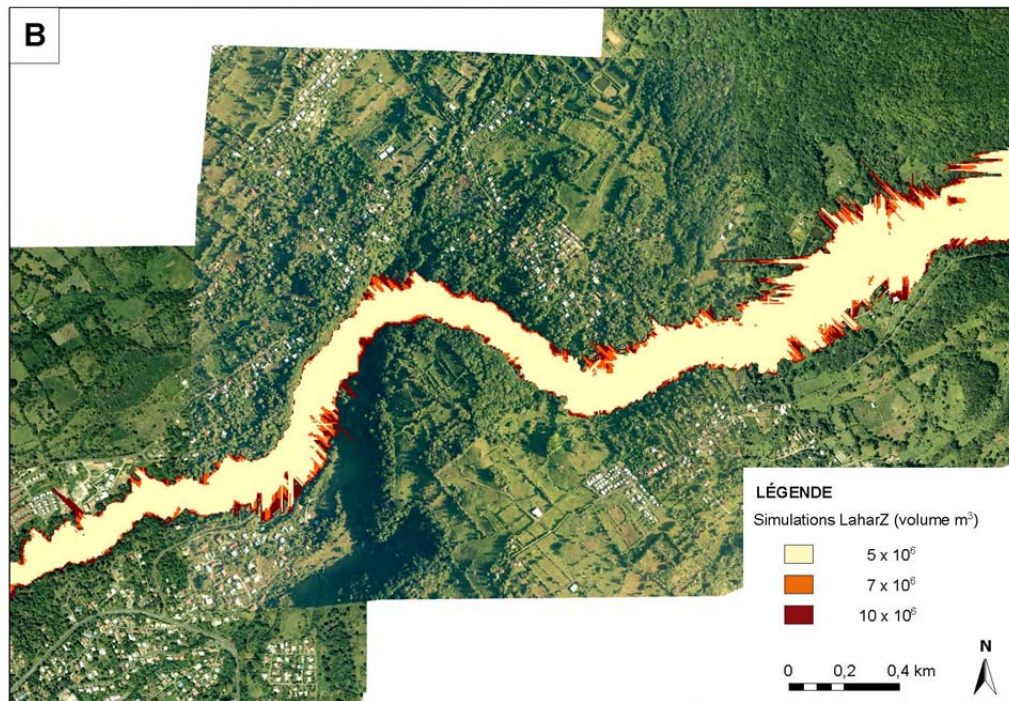


Figure 18. Lahars simulés exceptionnels de 5 à 10 millions m^3 .

Dans ce quatrième cas, toute la vallée serait remplie et les rebords seraient affectés y compris dans les zones urbanisées, à partir d'un volume exceptionnel de 7 millions de m^3 . L'amont du plateau du Palmiste serait le siège de débordement et les lahars pourraient rejoindre des drains secondaires, un phénomène qu'on qualifie d'avulsion. La zone la plus affectée serait l'aval de la vallée (Figure 18A), ou des débordements majeurs affecteraient les deux rives notamment l'îlet Morin et en direction de Desmarais (rive droite) et Saint Charles (rive gauche).

Deux cartes 3D (Figure 19 A et B ci-dessous) utilisant le logiciel 3D Viewer (©Ifremer) et les orthophotographies permettent de mieux visualiser l'emprise des lahars dont le volume de 10 millions de m^3 serait exceptionnel (cf. les scénarios possibles en conclusion).

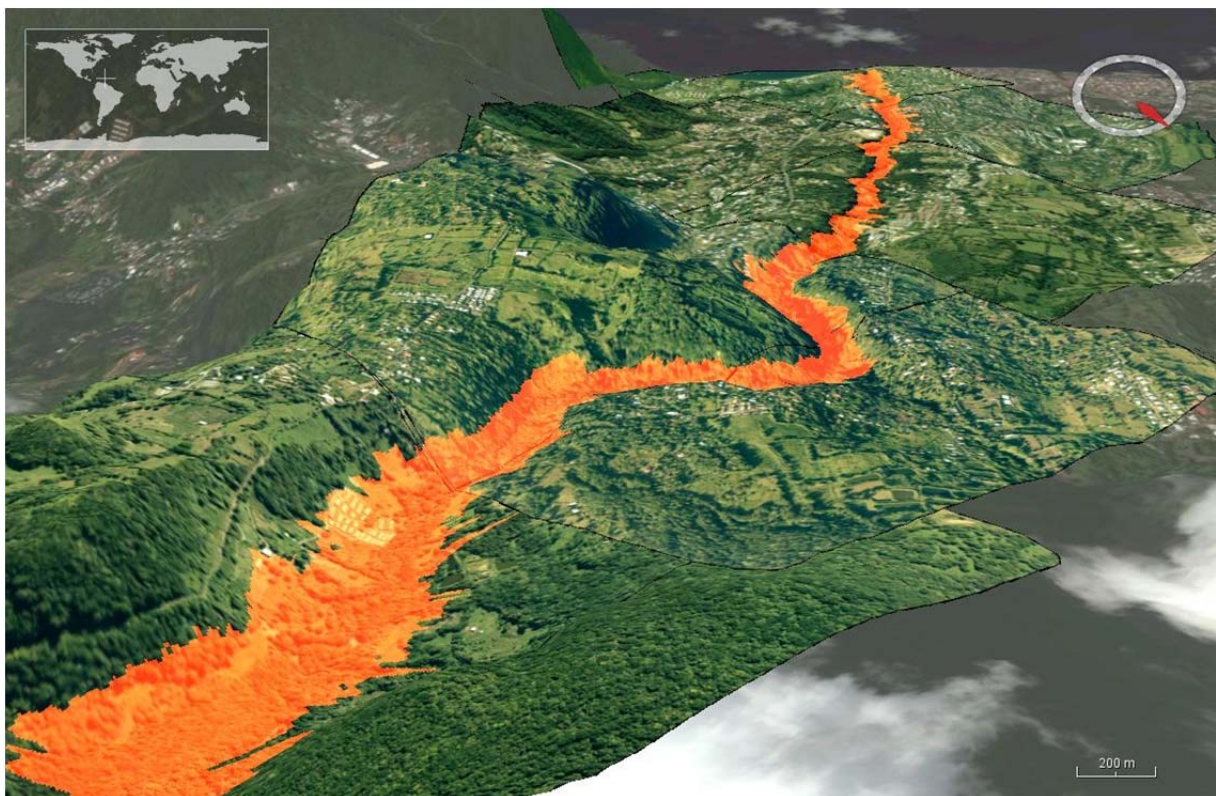
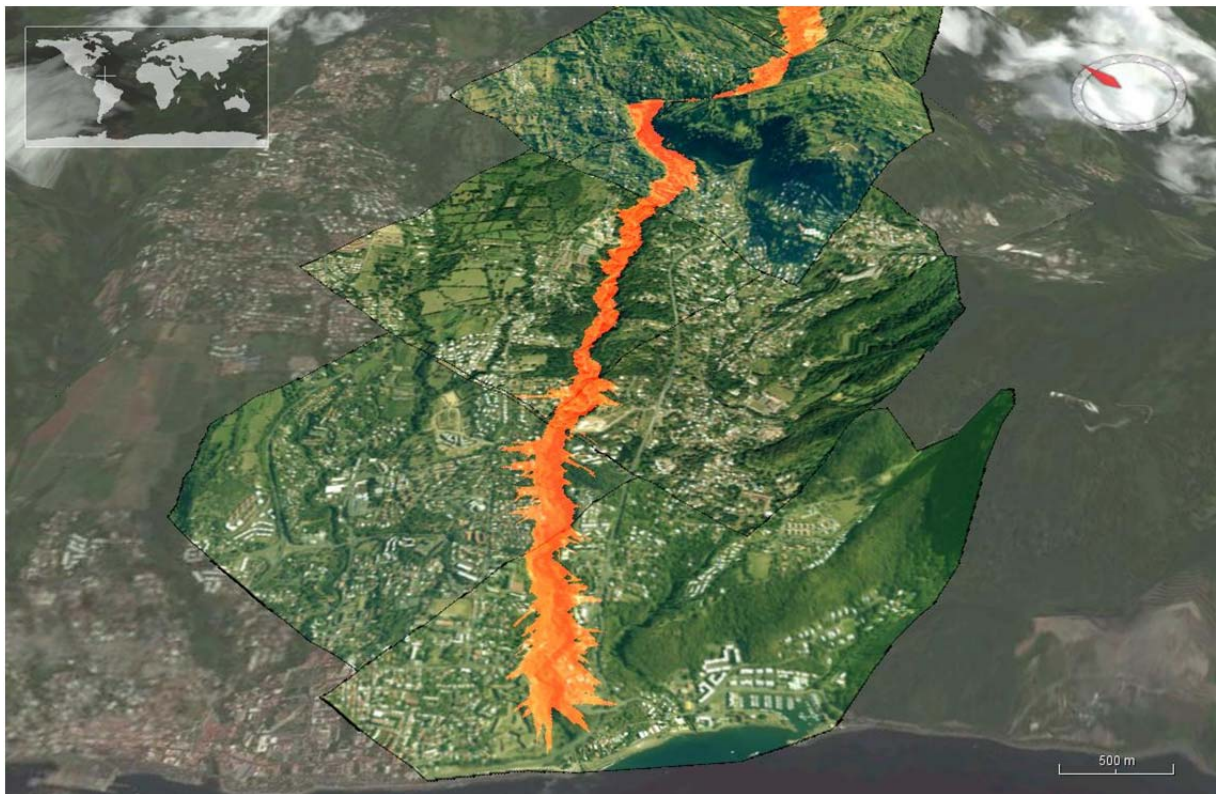


Figure 19. Cartographie 3D (J-F Oehler) de l'amont et de l'aval du Galion montrant l'emprise des lahars de 10 million de m^3 et leur débordement, superposée aux orthophotographies. Simulation réalisée sous LAHARZ. Images générées à l'aide de 3DViewer (© Ifremer).

On notera l’emprise des lahars exceptionnels sur les installations à l’amont et en rive gauche, mais surtout les débordements dans les deux derniers kilomètres à l’aval et en direction de Desmarais (rive droite) et de Blanchet (rive gauche).

L’emprise des lahars simulés peut être à présent comparée à celle du bâti sur les deux rives du Galion et sur les interfluves adjacents à une distance de la vallée comprise entre 750 et 1100 mètres.

III.3.4. Cartographie du bâti le long du Galion par photo-interprétation

L’objectif de cette tâche est de cartographier le plus fidèlement possible le bâti le long de la Rivière du Galion dans la zone potentiellement impactée par les lahars. Les simulations d’écoulement (réalisées sous LAHARZ au LMV, S. Ettinger) montre que les lahars restent généralement canalisés au sein du chenal et que cette zone ne s’étend pas à plus de 500 m du chenal en aval et 750 m en amont, même pour les écoulements les plus importants (10 millions de m³ sur la figure 18). La cartographie à partir des orthophotographies a été réalisée sous ArcGIS 10.

Nous avons proposé neuf catégories de critères de classification ---utilisés par ailleurs dans le cas d’étude de la ville d’Arequipa au Pérou (Martelli, 2011, modifié par M. Guitton et J.-C. Thouret pour l’ensemble de la ville en 2012).

| | | |
|---|--|--|
| Fondé sur la photo- interprétation | Type de quartier ou de pâté de maison | Hauteur du bâti et nombre d’étages |
| | | Matériel de construction |
| | | Etat ou maintenance |
| | | Type de toit |
| | Hétérogénéité | Taille et type d’utilisation du bâtiment |
| | Densité des misons dans l’unité | Densité et édifices adjacents |
| | Format et compacité de l’unité | Forme et régularité |
| | Densité du réseau de rues | À l’intérieur et autour du quartier |
| | Type de terrasse alluviale | altitude au-dessus du lit de la rivière |
| Angle d’impact | situation et angle | |
| Fondé sur le nouveau MNT plus précis | Pente moyenne du quartier | pente et localisation sur le système de terrasses |
| Fondé sur les informations géologiques | Substrat et sols géotechniques | <i>Indisponible dans ce cas</i> |

Tableau 7. Critères employés en photo-interprétation et SIG afin de caractériser le bâti vis-à-vis des effets des lahars, d’après le cas d’étude d’Arequipa au Pérou.

Dans le cas du Galion, les attributs de la classification ont été en partie empruntés au tableau précédent puis adaptés au cas spécifique de Basse Terre et des photos aériennes disponibles. La résolution et l'absence de travail sur place empêchent d'exploiter tous les critères qui seraient nécessaires pour une cartographie détaillée et une évaluation structuraliste du construit. Les critères utilisés ici sont au nombre de six (Tableau 3, Annexe 4 et figures 20 à 23 ci-dessous) : quatre pour le bâti (le type lié à l'utilisation, le nombre d'étages, l'état, et le type de toit) et deux critères appartenant au contexte de la vallée étudiée : distance et altitude par rapport au chenal de la rivière.

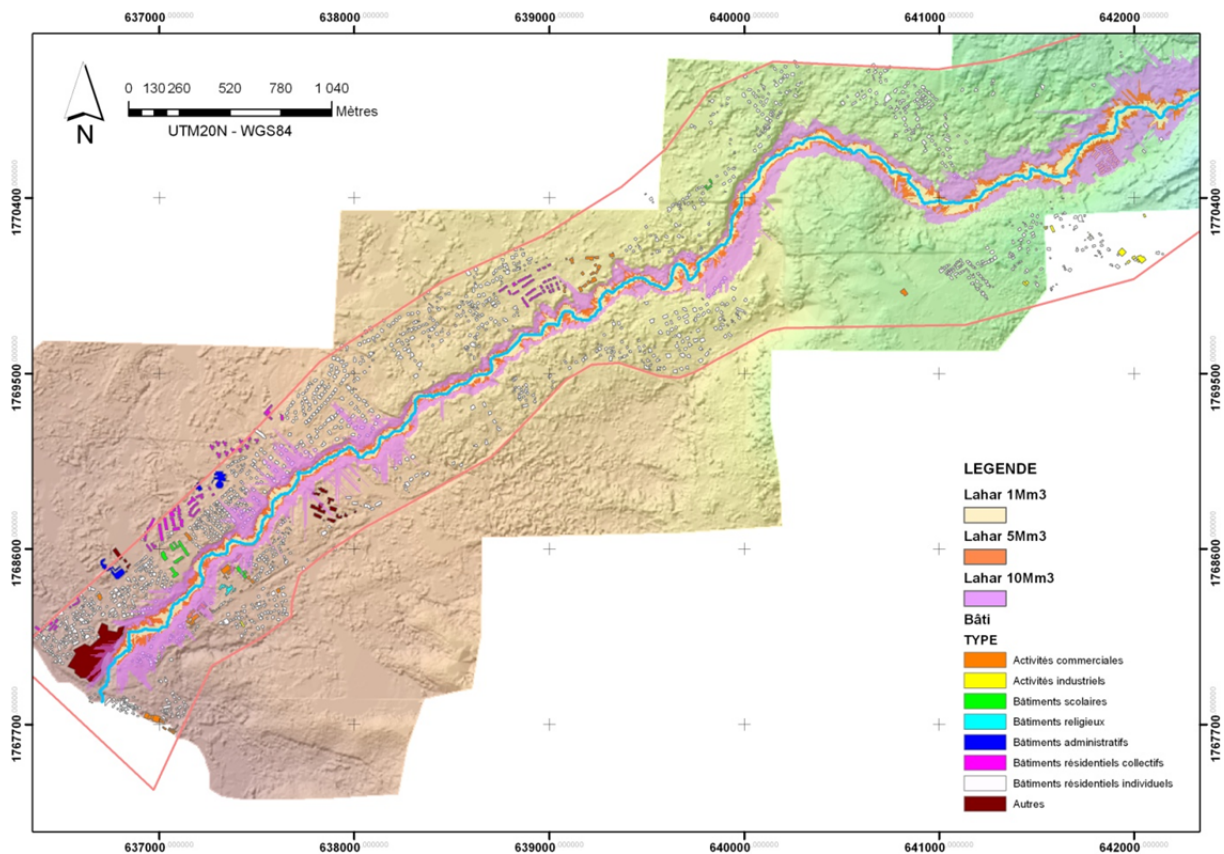
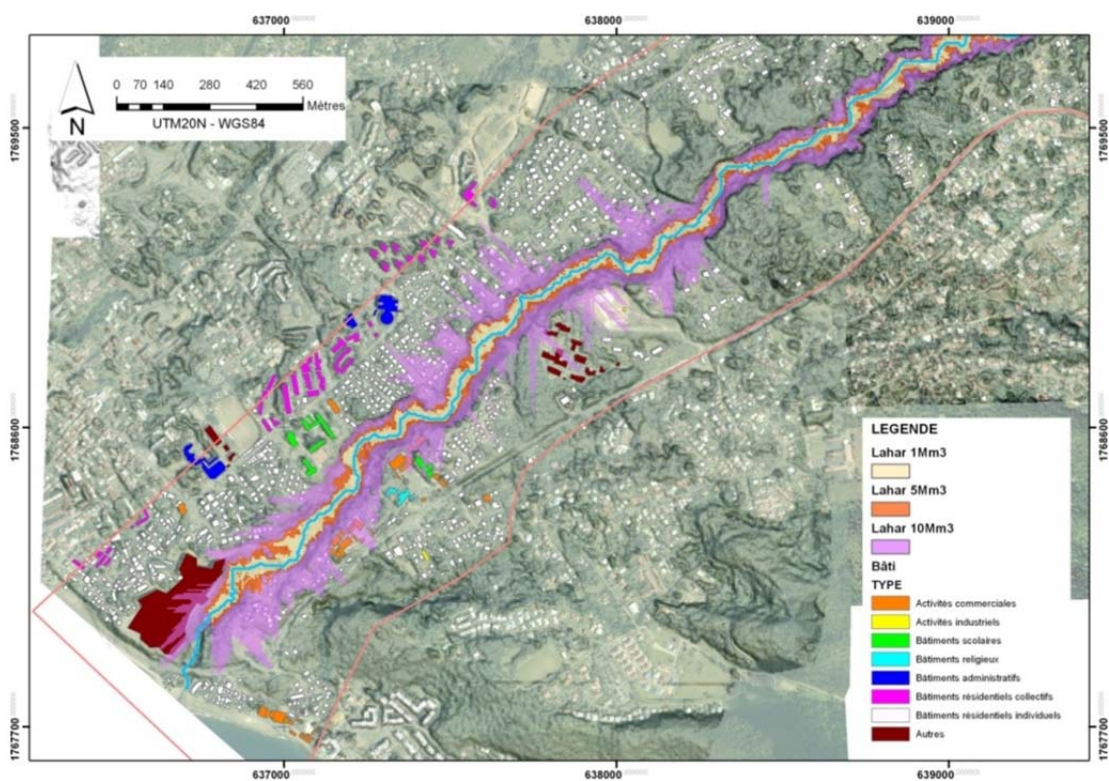


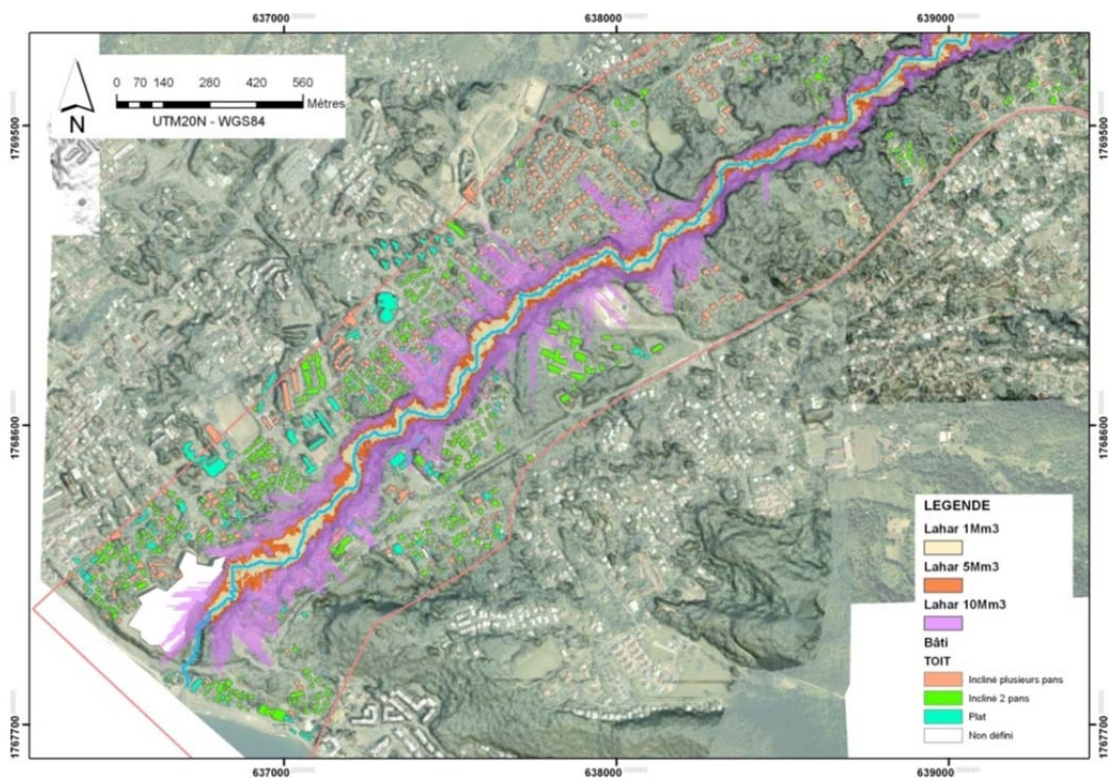
Figure 20. Types de bâti et les catégories 3 et 4 des lahars avec un volume de 1 million, 5 et 10 millions de m^3 .

Cette figure délimite sur le MNT à 5 m la zone qui a été cartographiée entre 500 et 1100 m de distance de la vallée du Galion par rapport aux lahars simulés dans les deux dernières catégories ci-dessus (Figures 16 et 18). Les figures qui suivent indiquent la répartition spatiale du bâti selon six critères choisis par l'expert muni de la seule photo-interprétation : types d'utilisation des édifices, types de toits, état du bâti, nombre d'étages, distance au chenal et altitude relative au-dessus du lit de la rivière.

Les six figures suivantes, 21AB, 22AB et 23AB, sont créées à partir des photos aériennes géoréférencées dans le SIG ArcGis 10 et montrent l'emprise des lahars simulés avec une gamme de volumes d'1, 5 et 10 millions de m^3 .

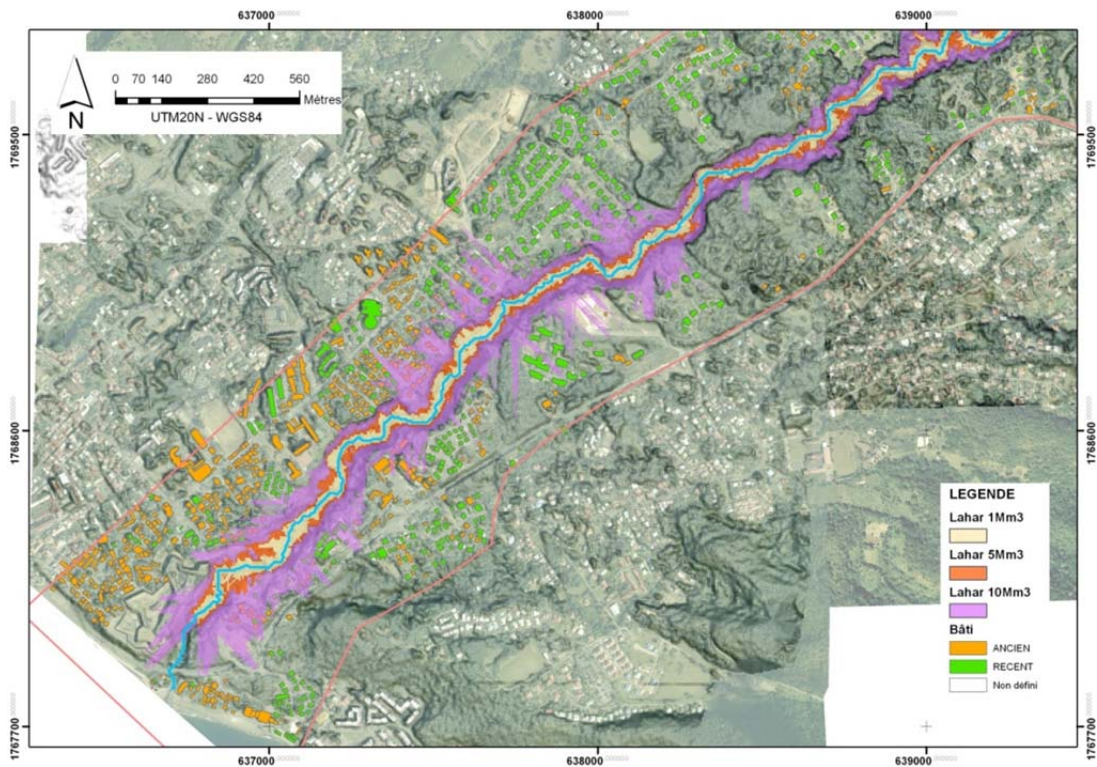


21 A. Typologie des édifices en 8 catégories fondées sur l'utilisation : commerciale, industrielle, scolaire, religieuse, administrative, résidentielle collective et individuelle, autre.

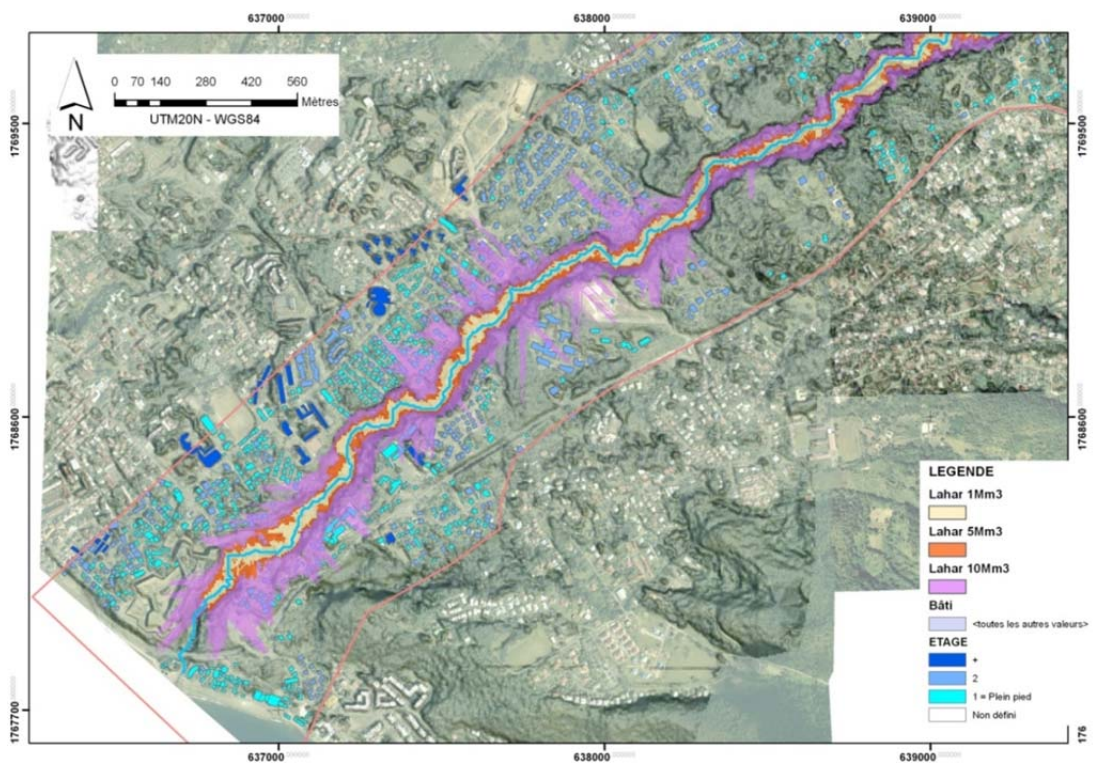


21 B. Typologie des toits apparents avec 4 catégories : inclinés à plusieurs pans, à 2 pans et plats, et une dernière non définie.

Figure 21. Cartographie du bâti (attributs A utilisation du bâtiment, B type de toits apparent) le long de la Rivière du Galion dans le secteur aval et des zones potentiellement impactées par des lahars.

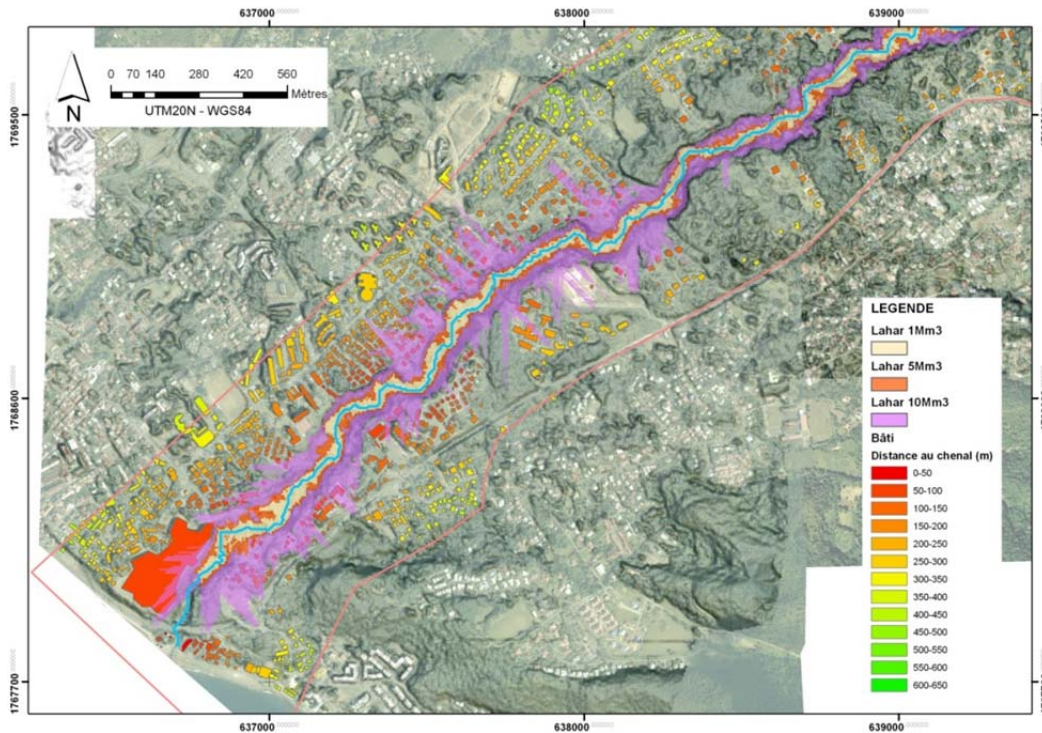


22A. Etat du bâti : ancien, récent, non défini.

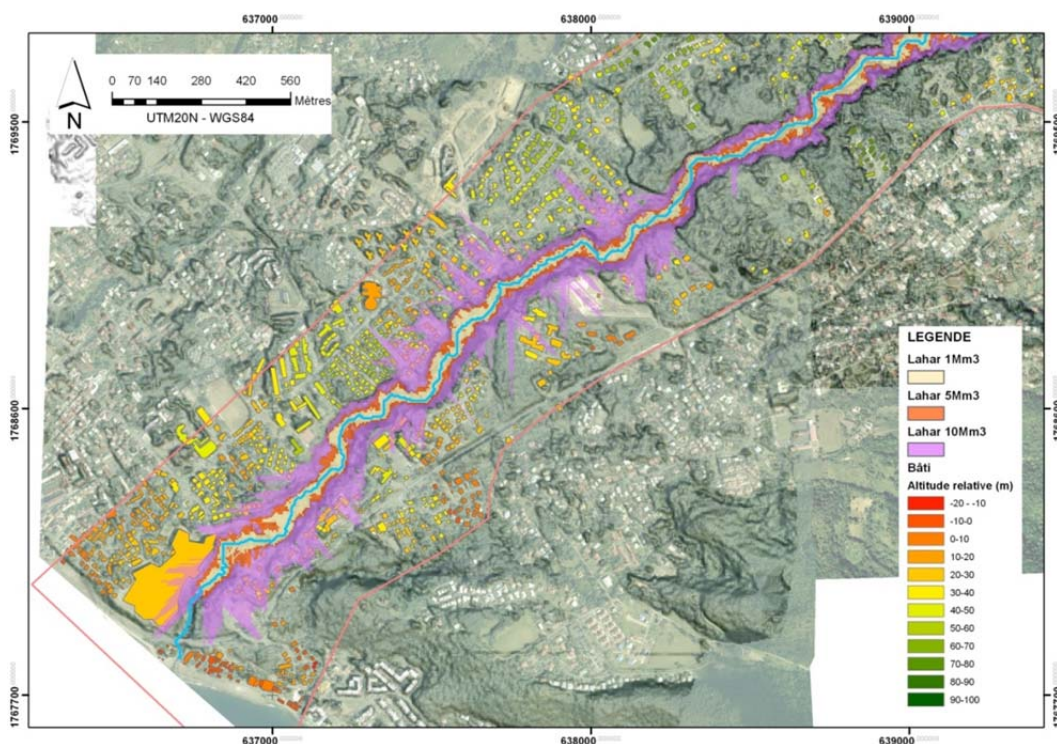


22B. Nombre d'étages : 1, 2, 3 et + , non défini.

Figure 22. Cartographie du bâti (attributs A Etat apparent, B nombre d'étages) le long de la Rivière du Galion dans le secteur aval et des zones potentiellement impactées par des lahars.



23 A. Premier critère hors bâti : distance au chenal en mètres.



23 B. Second critère hors bâti : altitude par rapport au chenal en mètres.

Figure 23. Cartographie du bâti (attributs A/ Distance au chenal, B/ Altitude relative) le long de la Rivière du Galion dans le secteur aval et des zones potentiellement impactées par des lahars.

Les figures 21 à 23 révèlent une combinaison de facteurs qui accentuent la vulnérabilité du bâti dans le secteur aval de la vallée sur 3,5 km, notamment en rive droite à l'îlet Morin et

près de l'embouchure, en rive gauche près de St Charles et le long du rivage en direction de la marina de Basse Terre.

D'autres critères issus du tableau 7 ci-dessus, comme l'angle d'impact ou la densité du réseau et l'hétérogénéité du pâté de maisons, seront utiles lorsque l'analyse pourra être effectuée sur place et la plus grande échelle possible, le pâté de maison et/ou l'édifice individuel.

IV. CONCLUSION

Cette étude des lahars potentiels autour de La Soufrière de la Guadeloupe et de leurs impacts sur le bâti a apporté trois résultats majeurs : (1) un nouveau MNT à 5 m de la vallée du Galion, du dôme sommital et d'une partie du Carbet, beaucoup plus précis que les précédents ; (2) des orthophotographies utilisées pour la cartographie du bâti, qui a été évalué à deux échelles et avec deux approches ; (3) des simulations de l'emprise des lahars dans la rivière du Galion grâce au code LAHARZ, avec une large gamme de volumes, les uns faibles et similaires à la dernière éruption phréatique survenue en 1976-77 et les autres très importants mais hypothétiques.

Il en découle une exposition à l'aléa lahar et au risque induit par la vulnérabilité du bâti essentiellement à l'aval de la vallée du Galion et dans l'embouchure de la Rivière des Pères. Le seuil volumétrique, à partir duquel des dommages sont attendus tout en restant limités au fond et à l'embouchure de la vallée, est de 0.7 million de m³. Cependant il convient de situer le risque selon le facteur de déclenchement et selon trois « scénarios » de magnitude et fréquence, qui restent encore hypothétiques à ce stade de l'étude.

Nous considérons donc deux situations de déclenchement : (1) le cas d'une éruption magmatique ou phréatique, avec des lahars déclenchés directement par l'intervention du système hydrothermal et/ou la remobilisation immédiate d'une avalanche de débris ; (2) des lahars secondaires en l'absence d'éruption, déclenchés par des pluies intenses. Le terme lahar utilisé ici désigne tous les écoulements hyperconcentrés et coulées de débris, sans distinction.

Nous distinguons aussi trois scénarios fondés sur l'expérience acquise dans les zones volcaniques productrices de lahars (Indonésie et Andes) et sur les rares informations obtenues au sujet de l'éruption phréatique de juillet 1976-mars 1977 (site web de l'IPGP, Observatoires volcanologiques français). Deux types de lahar ont été observés sur les flancs du volcan en 1976 : le premier, limité, est issu d'un glissement des flancs du dôme, favorisé par la liquéfaction des argiles d'altération (thixotropie) au moment des vibrations du dôme (trémors) lors des explosions ; le second un peu plus important (1,5 à 3 km de longueur dans les deux vallées du Carbet et du Galion), est issu de la mobilisation par la pluie des dépôts cendreaux projetés sur les flancs du dôme. Le volume total a été estimé entre 0.3 et 1,2 millions de m³ par Westercamp et Tazieff (1980).

1) Un **lahar de petit volume** ($<0.7 \times 10^6 \text{ m}^3$) est relativement fréquent (par ex. crise de 1976). Il est probable en cas d'éruption, même de faible magnitude, mais avec une récurrence relativement faible, moins d'une fois par siècle (éruption phréatique <50 ans, éruption magmatique ≥ 500 ans, avalanche de débris ≥ 1500 ans). Il est davantage probable en cas de pluies intenses (orages localisés, tempêtes, cyclones) avec une récurrence décennale à 50 ans. Les crues et les lahars seraient provoqués par des orages ou des dépressions stationnaires localisées que par des cyclones, qui se produisent tous les 10,5 à 13 ans en moyenne depuis 1915 (Morell, 1988). A noter que les lahars ne se produiront pas dans toutes les rivières en même temps, car les pluies intenses sont localisées et la réponse des bassins versants est diverse, mais plus rapide si la superficie est plus petite, car le délai de concentration du ruissellement concentré sera court.

2) Un **lahar de volume moyen** ($0.7 - 3 \times 10^6 \text{ m}^3$) est assez rare, au moins une fois par siècle à plusieurs fois par millénaire : la probabilité est faible en cas d'éruption sauf si celle-ci est magmatique (>5000 ans) ou si une déstabilisation majeure du dôme intervenait (rare). La probabilité est moins faible en cas de pluies très intenses (>200 mm/jour) dues à une tempête exceptionnelle (Helena, octobre 1963) ou à un phénomène météorologique généralisé au sud de Basse Terre (5 à 6 fois au 20^e siècle, par exemple en 1986, Morell, 1988).

3) Un **lahar de gros volume** ($3-10 \times 10^6 \text{ m}^3$) est exceptionnel. Il est rare et limité aux grandes éruptions magmatiques qui produiraient des écoulements pyroclastiques dans les rivières radiales et à une déstabilisation importante du dôme ou des flancs du massif volcanique. La récurrence est pluri-millénaire. Des lahars secondaires seraient rares mais possibles en cas de remobilisation des matériaux pyroclastiques et d'avalanches de débris par un épisode pluviométrique concomitant et/ou un cyclone de magnitude 4-5 passant sur le sud de Basse Terre. La récurrence de ce phénomène combiné n'est pas connue mais extrêmement faible.

V. RECOMMANDATIONS ET LIMITES DE L'ETUDE

Une crise future est probable à la Soufrière de Guadeloupe étant donnée la récurrence relativement élevée des éruptions phréatiques et phréato-magmatiques, mais de faible magnitude. Cependant les phénomènes majeurs (déstabilisations de flanc et crues exceptionnelles) sont assez rares et par conséquent les lahars de gros volume qui pourraient résulter de leur combinaison resteront exceptionnels.

Les sites les plus exposés sont mentionnés ci-dessus selon trois « scénarios » incluant un volume moyen (pour les trois vallées principales) et une récurrence grossièrement estimée. Les risques spécifiques le long de la rivière du Galion inclut une zone de 750 m de chaque côté de la vallée à l'amont et de 500 m à l'aval de la plaine des Palmistes. Les secteurs à surveiller sont les suivants : les 3 à 4 derniers km à l'aval et surtout la rive droite à Basse Terre et Desmarais, puis l'îlet Morin et enfin le secteur de St Charles proche de la vallée.

Nous recommandons les attitudes suivantes : éviter impérativement tout accès aux rivières mentionnées : Galion, Carbet et Rivière des Pères et si la crise phréatique perdure. Eviter

d'emprunter les ponts enjambant ces rivières et prévoir une solution de remplacement de la voirie. Dans le cas de la vallée du Galion éviter toute installation même temporaire à moins de 750 m à l'amont de la plaine du Palmiste et à moins de 500 m à l'aval de celle-ci. Protéger les zones comprises dans l'embouchure et sur les terrasses basses (au moins jusqu'à 10 m de hauteur au-dessus du chenal) en rive gauche de la Rivière des Pères et en rive droite du Galion. Ces deux embouchures sont exposées à plusieurs types de risques dont les crues, les lahars et les tsunamis.

Notre étude est limitée par l'absence de travaux détaillés sur place comme la reconnaissance de l'état structural des bâtiments, par l'absence d'un recensement des lahars historique, par le recours à un code semi-empirique qui ne prend pas en compte le comportement dynamique des écoulements de lahar, et enfin par la résolution des photographies employées. En outre, l'absence de financement spécifique a empêché tout travail sur place. Nous pourrions développer cette étude en incluant la rivière des Pères et en utilisant le code numérique TITAN2D si la Fondation MAIF finance ce projet.

Références citées dans le texte

Feuillard M., Allègre C.J., Brandéis G., Gaulon R., Le Mouel J.L., Mercier J.C., Pozzi J.P., Semet M.P., 1983. The 1975-77 crisis of La Soufrière de Guadeloupe (F.W.I.): a still-born magmatic eruption. *J. Volcanology Geothermal Research*, 16, 317-334.

Fiske R. S., 1984. Volcanologists, Journalists, and the Concerned Local Public: A Tale of Two Crises in the Eastern Caribbean. In: *Explosive Volcanism: Inception, Evolution, and Hazards*, 170-176.

IPGP site web La Soufrière Volcano : www.ipgp.fr/~beaudu/soufriere.html

Iverson R., Schilling S.P., Vallance J.W., 1998. Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 110, 8, 972-984.

Lavigne F. et Thouret J.-C., 2000. Les lahars, dépôts, occurrence et dynamique : une revue des écoulements volcano-hydrologiques. *Bulletin Société géologique de France*, 171, 5, 545-558.

Le Maitre R.W., 1982. *Numerical petrology: statistical interpretation of geochemical data*. Hammer Mountain Book Halls, ABAA, New York.

Martelli K., 2011. *The physical vulnerability of urban areas facing the threat of inundation from lahars and flash floods : application to the case study of Arequipa, Peru*. Université Blaise Pascal, Clermont 2, LMV, 320 p (in English) + 3 appendices (financement Fondation MAIF et ANR Laharisk).

Marti J., Spence R., Calogero E., Ordoñez A., Felpeto A., Baxter P. (2008) Estimating building exposure and impact to volcanic hazards in Icod de los Vinos, Tenerife (Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 178, 553-561.

Morell M., 1988. *L'eau en Guadeloupe : ressource limitée et risque naturel*. Fonds documentaire ORSTOM hydrologie, Bx18819, Pointe-à-Pitre, Guadeloupe, 9 p.

Morell M., 1990. Ouragans, crues, et inondations en Guadeloupe. *Colloque international des 22-24-25 et 26 mai 1990, Les risques naturels et technologiques dans le bassin caribéen*. Centre ORSTOM Guadeloupe, 27 p.

Rapport « Lahars Soufrière de la Guadeloupe par JC Thouret et al. Contrat Fondation MAIF 2012

Nigro E., Faella C., 2008. Effects of debris flow on buildings. Urban habitat constructions under catastrophic events. *COST 26 European Union*, University of Malta, 420-429.

Palhol, H. 2008. *Méthodes d'étude de l'endommagement induit par les effets des lahars au bâti ; le cas de la ville d'Arequipa, Pérou*. TER Travail d'Etude et de Recherche, Master 1, Laboratoire Magmas et Volcans, Université Blaise Pascal, 24 p.

Pierson T.C., 2005. Hyperconcentrated flow – transitional process between water flow and debris flow. In: *Debris flow hazards and related phenomena*, Jakob M. and Hunger O. (eds), Springer: 159-202.

Pierson T., Janda R., Thouret J.-C., and Borrero C., 1990. Initiation, flow behavior and deposition of debris flows on 13 November 1985 at Nevado del Ruiz, Colombia. *J. of Volcanology Geothermal Research*, Nevado del Ruiz volcano, 1990, 41, 1-4, 17-66.

Prévoth Th., 2009. Lahars de la Soufrière (Basse-Terre, Guadeloupe) : étude des impacts potentiels sur le bâti. TER Travail d'étude et de recherche, Master 1, LMV et Université Blaise Pascal, 28 p.

Schilling, 1998. LAHARZ: GIS programs for automated delineation of lahar hazard zones. *U.S. Geological Survey Open-file Report*.

Spence R., Kelman I., Calogero E., Toyos G., Baxter P., Komorowski J.-C. (2005) Modelling expected physical impacts and human casualties from explosive volcanic eruptions. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5, 1003-1015

Vallance J.W., 2005. Volcanic debris flows. In: Jakob M. and Hungr O. (eds.), *Debris-flows hazards and related phenomena*, Springer: 247-272.

Westercamp D., Tazieff H (1980). *Guide géologique de Guadeloupe et de Martinique*, édition Masson, 95 p.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Typologie de A à N du bâti inventoriée à Basse Terre (plusieurs sources).

Tableau 2. Mécanismes, processus et effets des lahars sur le bâti et les infrastructures.

Tableau 3. Synthèse de la vulnérabilité des classes de bâtiments face au processus, sans poids donné à un processus ou à une caractéristique du bâtiment.

Tableau 4. Synthèse de la vulnérabilité des classes de bâtiments avec prise en compte du poids des caractéristiques du bâtiment.

Tableau 5. Synthèse de la vulnérabilité des classes de bâtiments avec prise en compte du poids des caractéristiques du bâtiment et des processus inhérents au lahar.

Tableau 6. Pourcentage de chaque classe de bâtiments par zone de risque dans les deux embouchures des rivières des Pères et du Galion (cartographiés à la figure 8).

Tableau 7. Critères employés en photo-interprétation et SIG pour caractériser le bâti vis-à-vis des effets des lahars, d'après le cas d'étude d'Arequipa au Pérou.

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Géologie et géomorphologie de la Soufrière et de ses flancs (Prévot, 2009).

Figure 2. Réseau hydrographique du versant ouest de la Soufrière (image Google Earth).

Figure 3. Panorama réalisé par superposition simple des photographies aériennes disponibles pour l'étude des Rivières du Galion et du Carbet (sud de Basse-Terre, Guadeloupe). Les flèches indiquent la direction et le cap de l'avion lors de la prise de vue.

Figure 4. Localisation des points de contrôle sol utilisés sur le MNT BDALTI IGN à 50 m : GPS* : Points GPS IGN ; GCP* : Points cotés BDORTHO IGN/Géoportail ; nadir* : coordonnées géoréférencées du centre des photographies aériennes extraites des métadonnées. Coordonnées en mètres selon la projection UTM20N/WGS84.

Figure 5. Mosaïque conservée par superposition simple des MNT photogrammétriques calculés par paires à 1 m (A) et mosaïque photogrammétrique (B).

Figure 6 A et B. MNTU final à 5 m superposé au MNT BDALTI IGN à 50 m. Images générées à l'aide de 3DViewer (© Ifremer) par J.-F. Oehler.

Figure 7. Orthophotographies superposées sur les MNTU final à 5 m et MNT BDALTI IGN à 50 m. Images générées à l'aide de 3DViewer (© Ifremer).

Figure 8. Cartes SIG des 14 types de bâti dans la zone des deux embouchures de la rivière des Pères et du Galion (cf. Prévot, 2009).

Figure 9A. ACP avec comme critères la proportion de fenêtres et l'inclinaison du toit.

Figure 9B. ACP avec comme critères l'inclinaison du toit et le nombre d'étages.

Figure 10. Carte générale (photographies aériennes géoréférencées) servant à montrer le point de départ des simulations de lahar (rupture de pente principale, point rouge à environ 750 m d'altitude), les quartiers urbanisés et la Rivière du Galion.

Figure 11. MNT de la vallée du Galion. Lahars simulés avec un volume de 0,1 – 0,3 million m^3 similaire ou peu inférieur au cas de 1976.

Figure 12. Simulation de lahars avec un volume de 0,1-0,3 million de m^3 : A zone aval ; B, zone médiale – proximale (par rapport à la rupture de pente).

Figure 13. MNT de la vallée du Galion. Lahars simulés avec un volume de 0,5 – 0,7 million de m^3 .

Figure 14 B. Simulation de lahars avec un volume de 0,5-0,7 million m^3 : A zone aval ; B, zone médiale – proximale (par rapport à la rupture de pente).

Figure 15. MNT de la vallée du Galion. Lahars simulés avec un volume de $1 - 3 \times 10^6 m^3$.

Figure 16. Troisième catégorie de lahars simulés A et B avec un volume de $1 \text{ à } 3 \times 10^6 m^3$.

Figure 17. MNT et lahars exceptionnels simulés avec un volume de 5 à 10 million de m^3 .

Figure 18. Lahars simulés exceptionnels de 5 à 10 millions m^3 .

Figure 19. Cartographie 3D (J-F Oehler) de l'amont et de l'aval du Galion montrant l'emprise des lahars de 10 million de m³ et leur débordement, superposée aux orthophotographies. Simulation réalisée sous LAHARZ. Images générées à l'aide de 3DViewer (© Ifremer).

Figure 20. Types de bâti et les catégories 3 et 4 des lahars avec un volume de 1 million, 5 et 10 millions de m³.

Figure 21 : Cartographie du bâti (attributs A utilisation du bâtiment, B type de toits apparent) le long de la Rivière du Galion dans le secteur aval et des zones potentiellement impactées par des lahars.

Figure 22 : Cartographie du bâti (attributs A Etat apparent, B nombre d'étages) le long de la Rivière du Galion dans le secteur aval et des zones potentiellement impactées par des lahars.

Figure 23. Cartographie du bâti (attributs A/ Distance au chenal, B/ Altitude relative) le long de la Rivière du Galion dans le secteur aval et des zones potentiellement impactées par des lahars.

ANNEXES

Annexe 1. Photos aériennes.

Annexe 2. Chaîne du traitement pour le calcul du MNT.

Annexe 3. Classification du bâti et évaluation des impacts des lahars.

Annexe 4. LAHARZ, schéma et paramètres.