

SOMMAIRE

PARTIE 1. UN VOLCAN A AMENAGEMENT PROGRESSIF	11
CHAPITRE I - LES SPECIFICITES D'UN VOLCAN PARTICULIER	11
CHAPITRE-II - CARACTERES DES ERUPTIONS : PRODUITS PYROCLASTIQUES	15
HAPITRE-III - CONDITIONS CLIMATIQUES TYPE TROPICAL MARITIME.....	22
CHAPITRE-IV - RÉPONSES COUTUMIÈRES ET SOCIALES AUX RISQUES EN RAPPORT AVEC VOLCAN KARTHALA, EN GRAND COMORE.....	24
DEUXIEME PARTIE_ LA DIMENSION DE VULNERABILITE DANS L'ENVIRONNEMENT : FACTEURS DE RISQUE-APPARENTES ET CONTEXTE GEOGRAPHIQUE.....	28
CHAPITRE V - LES RISQUES (ALEAS) VOLCANIQUES LIES ET INDUITS PAR LE VOLCAN KARTHALA.....	28
CHAPITRE VI_ IMPACTS DES ERUPTIONS VOLCANIQUES –UN MILIEU NATUREL FORTEMENT PERTURBE PAR LES ERUPTIONS VOLCANIQUES.....	40
CHAPITRE -VII - DES IMPACTS SEVERES SUR LA VIE DE L'HOMME	45
TROISIEME PARTIE IDENTIFICATION ET CARTOGRAPHIE DES INSTABILITES DE LA ZONE.....	52
CHAPITRE-VII - LES SCÉNARIIS ET ENJEUX_ QUELLE EST LA PROBABILITÉ D'OUVERTURE BRUTALE D'UN NOUVEL ÉVENT EN ZONE HABITÉE ?.....	52
CHAPITRE IX - EVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITÉ AUX INSTABILITÉS DE TERRAIN	56
CHAPITRE X - LES ÉLÉMENTS DE SIMULATION D'UNE ÉRUPTION FUTURE ET DE DIAGNOSTIC DES VULNÉRABILITÉS	63
CHAPITRE XI- NAISSANCE ET EVOLUTION DE LA GESTION DES CRISES VOLCANIQUES EN GRANDE COMORE	70
CONCLUSION	83

Résumé

L'évaluation du degré de susceptibilité des éruptions volcaniques est devenue une préoccupation majeure dans les milieux insulaires, elle oriente les efforts à entreprendre pour prévenir les catastrophes, minimiser les risques et gérer les conséquences. Les techniques d'analyse spatialisée par le système d'information géographique (SIG) et télédétection sont de plus en plus utilisées pour évaluer la susceptibilité des versants aux aléas volcaniques. Dans cette étude, la modélisation numérique de terrain par un modèle simulation et hypothèses des témoins géologiques existants (Events, Scories, cônes éruptives...) a été utilisé pour cartographier les zones susceptibles aux éruptions volcaniques et aux aléas induits dans la région de Bambao (Grande Comore).

Le SIG est également utilisé pour apprécier la relation entre : (i) les risques volcaniques et (ii) la distribution spatiale des facteurs causatifs, l'information relative à ces deux composantes a été dérivée des données de terrain, traitements d'imageries satellitaires et les documents cartographiques disponibles. Ces données ont été intégrées dans une base de données SIG avec d'autres paramètres issus des cartes géologiques, topographiques et des données météorologiques. Les résultats ont montré que la combinaison qui regroupe les facteurs prédictifs : pente, exposition des versants, lithologie et densité de fracturation s'avère être la meilleure combinaison possible. Cette combinaison permet de prédire avec un peu plus de précision des instabilités existantes.

Ce projet de recherche, a pour objectif principal de fournir un soutien au renforcement des capacités de réduction du risque lié aux catastrophes, en Grande Comore.

Les résultats escomptés sont :

- L'élaboration et mise en application des instruments de gestion intégrée des risques ;
- Un engagement accru et participation des autorités locales, du Système de la Société civile ;
- Un renforcement des capacités de l'Observatoire du Volcan Karthala (OVK).

Cette étude vient donc mettre à jour la cartographie existante du risque volcanique en intégrant les nouvelles données liées aux éruptions explosives de 2005.

Mots clés : Karthala, Eruption volcanique, gestion de risques, la région de Bambao, SIG et télédétection

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures

Figure 1. Carte de localisation de la zone d'étude	3
Figure 2. Possible coupe schématique de la caldeira	14
Figure 3. Données mensuelles des précipitations aux Comores	23
Figure 4. Normale Mensuelle de la Température de la région (Source : ANACM)	23
Figure 5. Carte des coulées récentes de la Grande Comore reproduite à partir de la carte volcanotectonique de Bachèlery et Coudray (1993) ;.....	33
Figure 6. Coulées de 1858 (jaune) et celle de 1972 (rouge) issues de la caldeira.	34
Fig.7. Pression exercée en fonction de la densité et de l'épaisseur de la couche.....	38
Figure 8. Carte des Events surfaciques_Karthala_Moroni_Hahaya_par l'auteur.....	54
Figure 9 : Coulée _ Moroni - Hahaya de 1859.....	56
Figure 10. Cartographie aléa coulée de lave	59
Figure 11. « Cartographie aléa « cendre Volcanique »	60
Figure 12. Cartographie aléa sismicité	61
Figure 13. Cartographie aléa « coulée de boue »	62
Figure 14. Simulation 1 d'une éventuelle éruption produite grâce à la carte des données des Events de la Grande Comore	65
Figure 15. Simulation 2	66
Figure 16. Simulation 3	67
Figure 17. Carte du risque volcanique en Grande Comore	67
Figure 18. Villes et villages exposés au risque	68
Figure 19. Les champs exposés au risque volcanique	69
Figure 20. Schéma de la circulation de l'information et de l'alerte volcanique_ source : Proposition de Stratégie Nationale de Réduction de Risques de catastrophes aux Comores	81

Liste des photographies

Photo 1. Identification du cratère « Shungu Shahale et Shungu Sha nyumeni ».....	12
Photo 2. Délimitation du Caldeira	13
Photo 3. Mosquées sous les cendres volcanique lors des évènements éruptive en Avril 2005	17
Photo 3. La coulée de 1977	35
Photo 4. Torrent de lahars à Vuvuni-Bambao.....	36
Photo 5. Image satellite SPOT4 montrant le centre de la Grande Comore (cratère du Karthala après et avant l'évènement d'avril 2005)	40
Photo.6. Fond du cratère principal. Observation des fumerolles. Prise en 2013.....	40
Photo 7. Avalanche de cailloux à l'Est de l'île Grande Comore.....	38
Photo 8. Modification de la Topographie par l'impact de blocs volcaniques.....	40
Photo 9. Ensevelissement des cultures par les cendres.	43
Photo 10. Panache de cendre volcanique	44
Photo aérienne 11. Montrant le remaniement des cendres volcaniques sur les flancs du volcan Karthala.....	46
Photo 12. Exemple d'exploitation des lahars _ photo archive du CNDRS.....	48
Photo 13. Coulée de basalte constituant le lit de la ravine. (Pont Nyumadzaha-Hambu).....	63

Liste des tableaux

Table 1. Contraintes sociales et économiques des Comores.....	25
Tableau 2. Exemples de génération de la vulnérabilité en Grande Comore.....	27
Tableau 3. Séismes liés au volcan ressentis par la population depuis les événements de 2005...	31
Tableau 4. Relations pression et densité des couches de cendres saturées en eau.....	41
Tableau 5. Interaction entre les différents aléas.....	39
Tableau 6. Matrice d'identification des Impactes.....	51

ACRONYMES

DIPC : Depuis la déclaration de la décennie internationale de la prévention de catastrophes

ISDR : Internationale de Prévention des Catastrophes

GRC : Gestion des risques de catastrophes

CNDRS : Centre National de Documentation et de la Recherche Scientifique

DGSC : Direction Générale de la Sécurité Civile ;

ANACM : Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie

OVK : Observatoire volcanologique du Karthala

IGN : institut de la géographie nationale

VEI : Volcanic Explosivity Index,

MODIS : Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer :

NASA : National Aeronautics and Space

L'IAVCEI : International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior

MNT : Model Numérique de Terrain

DGSC : Direction Générale de la Sécurité Civile

RSMC, Pretoria : Regional Specialised Meteorological Center_ Pretoria

CMRS, La Réunion – Météo France : Centre Météorologique Régional Spécialisé

MEN : Ministère de l'Education National_ Ministère de l'enseignement supérieur, de l'Education de base et de la recherche

DGEF : Direction Générale de l'Environnement et de la Forêt

DGS : Direction Générale de la Santé

DNATHU : Direction Nationale de l'Aménagement du Territoire, de l'Habitat et Urbanisme

CRCO : Croissant Rouge Comorien

GC : Garde-côte Comorienne

AND : Armée Nationale de Développement

CAH : Cadre d’Action d’Hyōgo

COI : Comité de l’Océan Indien

INTRODUCTION

Depuis la déclaration de la décennie internationale de la prévention de catastrophes (DIPC) par la 42^{ème} Assemblée Générale de Nations Unies, des efforts se sont intensifiés dans le monde pour réduire la vulnérabilité des populations exposées aux risques naturels. La Stratégie Internationale de Prévention des Catastrophes (ISDR) créée en 1990, vise à conscientiser toutes les couches de la société aux catastrophes environnementales. Elle insiste sur la prévention des risques et la réduction de la vulnérabilité des populations.

En dépit de tout, les catastrophes naturelles sont de plus en plus nombreuses, elles ont des effets dévastateurs sur les populations et entraînent la destruction des biens Socioéconomiques et Physico-écologique.

A la suite de la dégradation environnementale et les vulnérabilités évidentes, les menaces induites sur les vies humaines, les infrastructures socio-économiques et l'environnement mondial sans cesse croissantes, constituent un enjeu majeur. Les pays en développement ont du mal à promouvoir la gestion des risques climatiques alors que leurs populations sont les plus vulnérables par rapport aux impacts potentiels des éruptions volcaniques. On compte environ 1 500 volcans terrestres actifs dont une soixantaine en éruption par an. Les éruptions les plus violentes ont tendance à se produire le long des zones de subduction. Les deux plus grandes éruptions volcaniques de la période historique, celle du Krakatau et celle du mont Tambora se produisirent à la jonction des plaques indienne et philippine. Le Tambora, sur la côte septentrionale de l'île de Sumbawa, fit éruption en 1815, détruisant la moitié de son cône et tuant probablement 50 000 insulaires (Wikipédia).

L'Union des Comores située à l'entrée Nord du Canal de Mozambique, au Sud –Ouest de l'océan Indien et à égale distance entre la côte Est de l'Afrique et Madagascar, subit, de par son volcanisme (Grande Comore) encore actif, des risques volcaniques de plus en plus fréquentes et intenses. Lors des éruptions comme celles de 2005 et 2007, les retombées de cendres peuvent affecter très largement les villes et villages de la Grande Comore.

Soixante-quinze villages, soit plus de 175.000 personnes, sont touchés, à des degrés divers, par ces retombées ou par les coulées de boue qui les accompagnent, en particulier sur les côtes ouest et est. En ce sens, les autorités Comoriennes doivent intégrer les mesures d'adaptation aux aléas volcaniques présents et attendus pour y faire face. Cela représente un défi majeur pour les Comores si l'on tient compte de sa vulnérabilité élevée. La probabilité d'occurrence des

risques volcaniques est certaine avec une intensité très forte. La pauvreté, le nombre élevé des cônes éruptives aux alentours des zones habitées, les fréquences éruptives changeantes et imprévisibles du volcan Karthala, la non-application des normes d'urgences et gestion de crises volcaniques aggravent l'impact d'une éruption volcanique en Grande Comore.

Enfin, malgré la récurrence des éruptions volcaniques, les activités résilientes restent très modestes dans le pays. Ainsi, face à la récurrence des catastrophes naturelles survenues aux Comores, il importe de faire le point sur les conséquences, les actions menées et en fin rechercher s'il existe des liens entre la récurrence des risques volcaniques d'un volcan à aménagement progressif et à fréquences éruptives variante et l'instabilité de la zone « Région de Bambao » surtout. Le présent mémoire intitulé « **Contribution à la gestion des risques de catastrophes naturelles** » : cas des éruptions volcaniques de 2005 et 2007 en Grande Comore, vise à mettre à la disposition des acteurs locaux, nationaux et régionaux des informations fiables sur les risques volcaniques qui affectent et dégradent les activités socio-économiques et l'environnement du pays. Les résultats obtenus permettront d'orienter la démarche à suivre dans le cadre d'un plan stratégique d'action et de réaction.

DELIMITATION ET CONTEXTE

Le développement de la volcanologie a franchi un palier spectaculaire depuis des décennies, avec en particulier le répertoire systématique des volcans mondiaux sur le continents et leur activité, La maîtrise de la nature et l'origine des magmas, l'approfondissement des connaissances des mécanismes éruptifs et de leurs paramètres, un essor remarquable de la modélisation des processus éruptifs des écoulement lavique ou pyroclastique, de la dynamique des gaz, ainsi que de la stabilité des édifices.

L'île Grande Comore est un site volcanique remarquablement exceptionnel. Elle possède deux volcans La Grille et le Karthala. Le premier est en dormance, alors que le second est actif. Ce dernier connaît principalement des éruptions magmatiques avec des émissions de coulées de lave, parfois longues pouvant traverser les zones habitées et atteindre la mer. Le Karthala recèle aussi un système hydrothermal actif qui joue un rôle important lors des phases explosives au cours desquelles des cendres sont répandues sur l'ensemble de l'île.

En Grande Comore les habitants occupent de façon décroissante avec l'augmentation de l'altitude les flancs, notamment ouest et les rift zones et ce, jusque 800 m d'altitude. Le nombre important d'évents¹ en zone habitée et l'éruption du mois d'avril 1977, nous rappellent que

¹ Events : orifice servant à évacuer les Gaz

l'ouverture de fissures éruptives est un phénomène commun pour le volcan Karthala. D'autre part, l'étude des séismes enregistrés lors de l'éruption de 1991 et ceux enregistrés actuellement a mis en évidence la migration d'un corps magmatique depuis la partie Sud-Ouest de l'île vers le sommet du volcan. Il apparaît donc que la zone « Ouest » du volcan est actuellement, selon Nassor (2001), une zone préférentielle de transfert de magma.

A partir de ces constats, on estime que la probabilité d'ouverture d'un événement (Orifice servant à évacuer les gaz) en zone habitée est de ~75% (pourcentage obtenu à partir de calcul des événements présents sur le massif) soit ~63% dans la région comprenant le Nord, l'Ouest et le Sud. Dans le cas où un tel événement vienne à se produire, le temps de réaction des habitants sera d'autant plus réduit que le point de sortie de magma sera proche des maisons.

La région de Bambao, se situe sur versant occidental De Ngazidja (Grande Comores) entre les latitudes $11^{\circ}45'0$ et le longitude $43^{\circ}17'0$ Est.

La préfecture de Moroni-Bambao (chef-lieu : Moroni) est une subdivision de la Grande Comore. Elle se compose de quatre communes : Moroni, Bambao ya Djuwu, Bambao ya Hari, Bambao ya Mbwani. Cette région est reconnue comme étant l'une des parties les plus instables géologiquement depuis l'éruption volcanique d'avril 2005, en raison de sa situation de proximité trop évidente à l'Est du cratère du Volcan Karthala

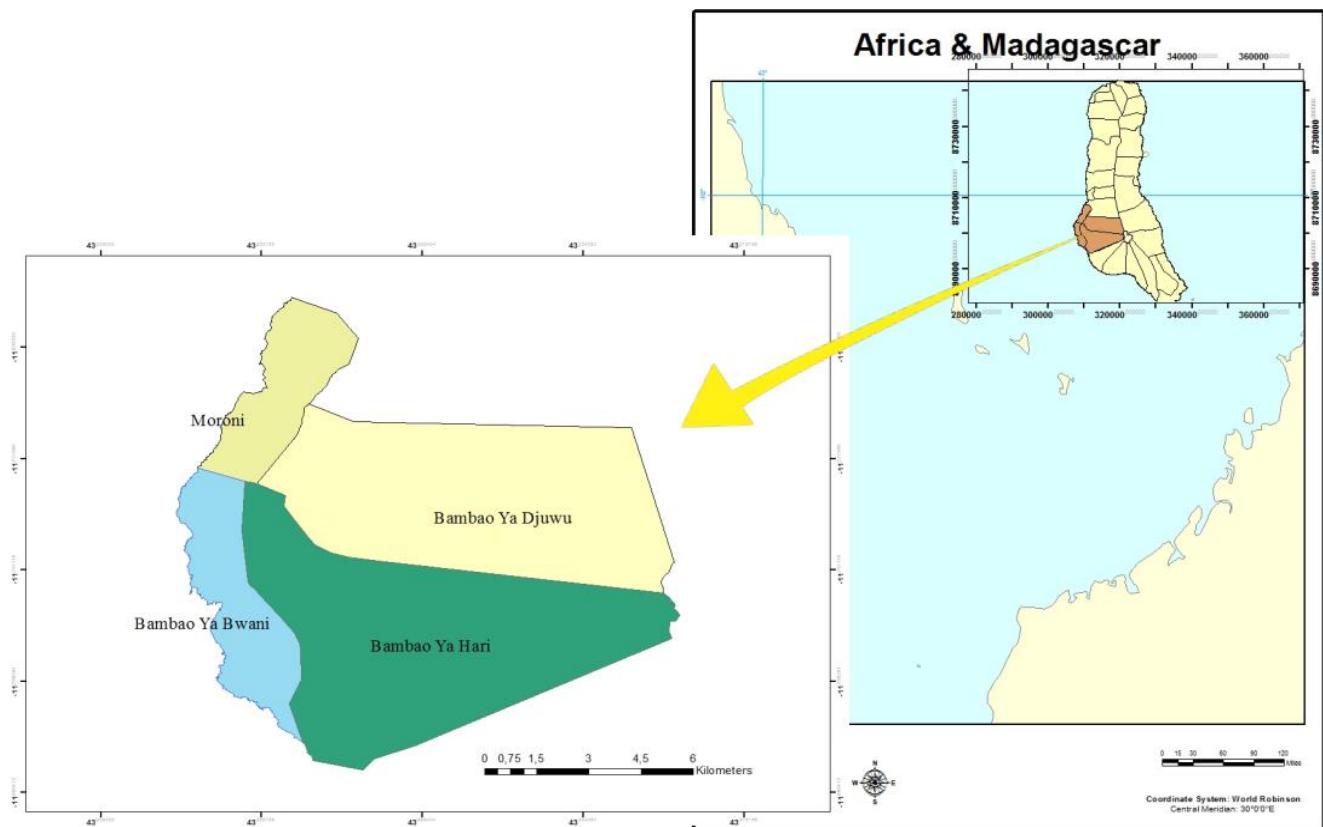


Figure 1. Carte de localisation de la zone d'étude. Par l'auteur

Au cours des deux derniers siècles, le Karthala est entré en éruption tous les onze ans en moyenne. 1977 : une éruption latérale à 700 m d'altitude dévaste le village littoral de Singani (pas de victimes). 1991 : éruption phréatique (mettant en jeu des nappes d'eau présentes dans le sous-sol) dans le cratère central, avec projection de blocs ; un lac se forme dans le fond du cratère. Le rythme s'accélère ensuite. En Avril 2005 : éruption phréato-magmatique dans le cratère central avec retombées de cendres sur les trois quarts de l'île (le lac, vaporisé, disparaît après 14 ans de présence. Un « lac de lave » est observé au fond du cratère. Novembre 2005 : même scénario. Mai 2006 : éruption magmatique au fond du cratère principal. Janvier 2007 : très brève éruption magmatique dans la caldeira sommitale.

Mais Depuis l'année 2005, quatre éruptions sont intervenues, modifiant ainsi cette fréquence définie lors du siècle précédent, et marquant un changement au niveau du comportement du volcan. Deux de ces éruptions sont explosives de type phréato-magmatique (16 avril et 25 novembre 2005) et se sont manifestés par des retombées de cendres et de poussières affectant près des trois quarts de l'île, avec des impacts significatifs au niveau des populations et sur le milieu naturel. Outre les manifestations syn-éruptives, après le déroulement des éruptions, des phénomènes très récents post-éruptifs, telles que la forte sismicité et les coulées de cendres boueuses, ont été observés de manière chronique, étalés dans le temps et affectant de nombreuse régions autour du massif du Karthala. Contrairement au sommet du volcan, le risque en zone habitée est maximum, même si dans certaines zones du littoral, l'aléa n'est pas très élevé. Les catastrophes naturelles ne cessent de se produire et de modeler les environnements dont nos sociétés dépendent, mais les connaissances scientifiques et des politiques publiques appropriées peuvent faire beaucoup pour prévenir les catastrophes humaines qui en résultent.

Les impacts des éruptions du Karthala sur l'environnement naturel sont aussi importants ; ils doivent être prise en compte dans ce projet de recherche, en vue d'une meilleure connaissance d'une maîtrise des effets des éruptions et d'une meilleure gestion et de prévention, il devient clair que ni les autorités gouvernementales, ni non plus les collectivités locales ne peuvent à elles seules continuer à assurer le coût très élevé des indemnités à verser aux victimes pour les pertes subies. La solution abordable consiste à prendre des mesures d'atténuation et de prévention. La prévention commence par l'échange des informations, et le partenariat est d'une importance vitale pour une pratique réussie de la prévention des catastrophes, d'où l'initiative de ce projet de recherche :

L’élaboration de la carte des risques constitue une base pour la réduction du risque de catastrophes liées aux éruptions du Karthala et dans la prévention par la perspective de la mise en place d’une politique d’aménagement. Elle doit être prise en compte dans la préparation pour les opérations de secours.

Les applications de la télédétection et du SIG dans le domaine des risques naturels plus particulièrement, servent surtout à la gestion de tous types de risques : inondations, séismes, mouvements de terrain, feux de forêts, cyclones, risques environnementaux, éruptions volcaniques. Les techniques de télédétection utilisées sont de deux types : **imagerie optique** (exemple : imagerie aérienne et imagerie satellite) et **imagerie radar** (exemple : interférométrie radar (inSAR), altimétrie laser (LiDAR)). Ce travail s’inscrit dans **la cartographie de l’aléa par des méthodes de télédétection optiques**.

L’analyse des images d’archive Landsat permet de confirmer l’existence du phénomène apparente de principaux facteurs de risque et d’extraire des informations essentielles concernant l’extension des principales menaces.

Cette nouvelle de génération de connaissances constitue une plateforme de données significatifs, permettant d’envisager une approche : maitrisé les risques volcanique travers deux composantes fondamentales : l’aléa volcanique et les vulnérabilités des enjeux exposées aux éruptions ou leur produit étudier sur un angle méthodologique.

Les SIG et de la télédétection dans cet étude constitue une base pour la réduction du risque de catastrophes liées aux éruptions du Karthala et dans la prévention par la perspective de la mise en place d’une politique d’aménagement. Elle doit être prise en compte dans la préparation pour les opérations de secours.

PROBLEMATIQUE

Lors de cette éruption il y a eu une apparition de produits liés à l’activité magmatique et hydro magmatique, plus particulièrement des retombées à dominante cendreuse dans cette région, laissant un épais dépôt de couche de cendre entraînant des modifications thermiques, gravimétriques, du niveau piézométrique, des modifications de la structure et de la topographie...

Ainsi la question fondamentale qui se pose et qui constitue la problématique de recherche est : « **Dans quelle mesure les produits pyroclastiques issus du volcan Karthala ont-ils eu**

des impacts sur le milieu naturel et sur les activités anthropiques de la zone et quelle serait la stratégie de gestion à adoptée dans un tel cas ? »

A cette question principale sont liés trois problèmes :

- Comment se présentent les modifications environnementales occasionnées par l'éruption de janvier 2005 dans la région de Bambao ?
- Pourquoi identifier et cartographier les instabilités de la zone ?
- Quels sont les perspectives pour l'avenir en cas de nouvelle manifestation volcanique de ce genre ?

DEMARCHE DE RECHERCHE ET OUTILS

Les méthodes s'identifiant à une démarche déductive, suivis durant cette étude sont à la fois pluridisciplinaires et transversales pour obtenir le maximum des informations sur Le volcanisme (Vulnérabilité, Risques, outils de gestion ...) aux Comores :

- Une méthode d'étude rétrospective est suivie pour identifier les grands événements survenus durant ces dix dernières années afin de les documenter et comprendre comment l'ampleur de ces différentes crises est liée aux récents activités éruptives du Volcan Karthala et comment procéder à une gestion cadrer et structurer.
- Des interviews (par voix de messages électroniques) ont été effectuées avec les structures de gestion des risques de catastrophes et l'Observatoire Volcanologique du Karthala, pour identifier les outils qu'elles disposent et les défaillances afin pour la rédaction de ce présent dossier.
- Les outils informatiques et de géolocalisation sont utilisés dans la présente étude pour l'analyse des données collectées.

Déroulement Du terrain

Le terrain prévu dans le cursus permet de donner aux étudiants l'occasion de mettre en application dans un domaine donné la formation théorique acquise et de tirer profit des expériences pour le développement. Les travaux ainsi réalisés sont l'objet du présent mémoire.

Le thème de l'analyse entre dans la contribution de la réduction des risques de catastrophes volcaniques en Union des Comores. Il s'agit entre autres de collecter les données sur les catastrophes naturelles des dix dernières années, de cartographier les zones vulnérables aux éruptions volcaniques et d'améliorer la base des données sur la gestion des risques de catastrophes (GRC) en intégrant les différents travaux réalisés et les acteurs intervenants en cas de catastrophes.

La recherche bibliographique

Une recherche bibliographique a été réalisée dans la structure d'accueil, les structures de gestion de risques de catastrophes, au ministère de l'environnement, à la bibliothèque de l'université des Comores et au Centre National de Documentation et de la Recherche Scientifique (CNDRS). Cette recherche consistait à recenser les risques et catastrophes (surtout volcaniques) qui sont survenus aux Comores et de voir quelle était leur probabilité d'occurrence, les impacts associés, leur localisation et étendue. Ce travail a permis de faire une classification des risques en fonction de leur origine.

Consultation des structures opérationnelles

Des visites dans les structures opérationnelles impliquées dans la gestion des catastrophes et crises sont effectués pour faire des interviews il s'agit de :

- ❖ La Direction Générale de la Sécurité Civile (DGSC) ;
- ❖ L'agence nationale de l'aviation civile et de la météorologie (ANACM)
- ❖ L'Observatoire volcanologique du Karthala (OVK) ;
- ❖ Les Directions régionales de la sécurité civile ;
- ❖ Le centre national de documentation et de recherches scientifiques (CNDRC)

Traitements des Données cartographiques

Les données cartographiques on étaient traiter sur Envi 4.5, Google Earth Pro et MapInfo 10.3.1. Les répondants ont indiqué les espaces perçus menacés par les différents types aléas volcaniques (coulées de de lave, coulées de boue (lahars), cendres, et gaz).

Les différents résultats on était sorti à partir des diverses données a formats Numériques (Shipfiles, Models Numeriques de Terrain, d'Images Satellites SPOT5 ou télécharger sur Google Earth Pro et des (Images aériennes).

Le traitement a permis de distinguer des répondants pour comparer la perception spéciale des aléas, des vulnérabilités et des impacts induits de l'ensemble de la grande Comore pour identifier la susceptibilité de la zone afin de produire des cartes des aléas. Ainsi une cartographie de chaque modalité de perception du risque volcaniques a été défini.

Dans un dernier temps utilisé la carte Volcano-tectonique de Bachèlery et Coudray et celui de Nassor (2001) était nécessaire pour vérifier que les espaces perçus comme menacés correspondent à ceux qui le sont Réellement. Cette méthode permet dans l'absolu de cibler des zones sensibles où des actions de sensibilisations doivent être menées prioritairement.

Les difficultés rencontrées

La difficulté essentielle rencontrée pendant tout le travail était de réussir à avoir les informations essentielles pour l'élaborations du document de recherche à travers les institutions. On relève donc deux contraintes majeures : l'absence de spécialistes et le manque de données fiables.

- l'absence de spécialistes en gestion des risques naturels aux Comores :

La gestion des risques de catastrophes est une discipline de synthèse pour laquelle il n'y a pas de spécialistes dans les structures chargées de la gestion des risques dans le pays.

- le manque de données fiables dans les différentes structures rencontrées

Les documents disponibles sur le sujet sont très rares d'autant plus qu'il n'existe pas des recherches scientifiques sur ces questions aux Comores. Ces documents manquent de précisions. La collecte de données a pris beaucoup plus de temps que prévu. Les données moins fiables concernent celles collectées après 2000. Les données collectées sur les risques et catastrophes avant 2000, manquent de précisions sur la localisation, la date, le mois et les dégâts provoqués à part les événements les plus dévastateurs.

Les cartes de l'institut de la géographie nationale (IGN) datent et depuis, elles n'ont jamais été actualisées. Ainsi, les cartes de zones vulnérables aux éruptions volcaniques élaborées manquent de précisions en raison d'une variation de la géographie actuelle des Comores qui n'est actualisée ni documentée.

Les résultats présentés dans cette étude ont pour but d'aider à mieux comprendre les impacts potentiels, les zones vulnérables aux risques volcaniques à l'échelle locale, régionale et nationale et ainsi faciliter la prise de décisions plus judicieuses en termes de gestion et de prévention des crises volcaniques. Ces résultats ne peuvent donc être considérés comme

absolus. Ils reflètent la limite et la fiabilité des données et des connaissances disponibles dans les institutions concernées. En plus, les connaissances actuelles sur le plan scientifique et technique ne permettent pas de faire de corrélations directes entre les inondations observées ces trente dernières années et l'état du climat car il manque beaucoup de données.

Cette étude est organisée en trois parties et finit par une recommandation et conclusion générale :

La première partie expose une vue d'ensemble des caractères du volcan Karthala : « **un volcan a aménagement progressif** » de la Grande Comore.

La deuxième, un état des lieux des risques volcaniques aux Comores (Grande Comore), présente les menaces induites : « **la dimension de vulnérabilité dans l'environnement : facteurs de risque-apparentes et contexte géographique** ».

La troisième présente l'**identification et cartographie des instabilités de la zone** la méthode et trace la récurrence des éruptions volcaniques et les grands axes stratégiques proposés pour mettre en place un plan de gestion des aléas en Grande Comore.

Contexte général du travail

L'archipel des Comores est constitué des 4 îles volcaniques. Ces îles volcaniques, ainsi que certains massifs du nord de Madagascar se sont formées au tertiaire et au quaternaire. L'île de Mayotte est la plus ancienne actuellement émergée et aurait subi trois phases de volcanisme entre 15 et 0,5 Ma. Les âges sont progressivement décroissants vers l'ouest. L'île la plus récente est l'île de la Grande Comore, et son volcan, le Karthala, y est toujours actif. Ce volcan possède l'un des plus grands cratères du monde

Types de volcanisme

Chacune des îles témoigne d'un phénomène d'activité volcanique différent qui sont une activité de type hawaïen à longues coulées basaltiques fluides, puis une autre de type strombolien à cônes et projections de lapilli comme dans le massif de la Grille en Grande Comore et enfin, une activité explosive avec lacs de cratères, dite ultra vulcanienne ou phréatomagmatique.

Origine du volcanisme

Bien que contestée, l'hypothèse d'un point chaud au-dessus duquel aurait « défilé » selon une trajectoire sud-est, nord-ouest puis nord-est, sud-ouest, la plaque somalienne pourrait rendre compte des âges progressivement décroissants vers l'ouest de ces massifs volcaniques.

Le volcanisme aux Comores : Histoire et état des lieux

La première éruption répertoriée du Karthala date de 1050 avec une incertitude de 150 ans, la suivante s'étant déroulée en 1808. Les éruptions suivantes se déroulent principalement sur les flancs de la montagne dans un premier temps puis plutôt dans les cratères qui forment la caldeira au sommet du volcan à partir du début du XXe siècle (Voir la Chronologie des éruptions du volcan Karthala dans l'annexe). Ces éruptions sont majoritairement d'indice d'explosivité volcanique (L'indice d'explosivité volcanique, ou échelle VEI de l'anglais Volcanic Explosivity Index, fut inventée pour établir une mesure relative de l'explosivité des éruptions volcaniques, allant de 0, pour les éruptions non-explosives, à généralement 8, pour les éruptions explosives mégacolossale _ Voir annexes) de 0 à 2 hormis du 11 au 26 août 1918 et du 24 novembre au 8 décembre 2005 où cet indice était de 3. Elles émettent généralement des coulées de lave et parfois d'importants panaches volcaniques de cendres et de téphras au cours d'explosions qui peuvent entraîner des dégâts matériels ainsi que des morts dans certains des cas comme en 1884, 1904, 1977 et à la fin 2005. Sa première ascension a été faite par le docteur Kresten en 1863. Le 12 novembre 2006, le Karthala est reconnu site Ramsar en raison de la diversité des zones humides qui entourent le volcan.

PREMIERE PARTIE

UN VOLCAN TRES CHANGEANT

C'est un volcan de type hawaiien, avec essentiellement des éruptions fissurales, émettant peu de projections mais de longues coulées de lave, au sommet (2006-2007) ou sur les flancs (1977 au-dessus de Singani). Cela dit, comme pour tous les volcans hawaiiens, tout cela n'exclut pas des éruptions explosives telles que celles de 2005. Son relief est marqué par des pentes assez fortes de 10 à 15 ° de moyenne sur le flanc ouest et de 24° à 30° sur le flanc Est. Sa topographie est hérissée de nombreux cônes égueulés de 20 à 50 mètres de haut et dont la concavité est tournée vers la mer ; ces cônes sont issus d'éruptions stromboliennes le long d'un axe subméridien. La morphologie est également marquée de nombreuses fissures dont certaines sont radiales autour du massif et d'autres, la plupart sont d'orientation Nord/Sud à partir du sommet. A cela s'ajoutent les grandes coulées de laves historiques et actuelles qui dévalent une grande partie du massif.

CHAPITRE I. LES SPECIFICITES D'UN VOLCAN PARTICULIER.

Le volcanisme de Grande Comore rappelle par maints aspects celui des îles Hawaii ou de La Réunion. Deux massifs volcaniques très peu érodés constituent l'île de Grande Comore. Au Nord, La Grille (1087 m) est un volcan largement recouvert d'un nappage de projections et coulées de basaltes et basanites. De très nombreux cônes stromboliens, principalement alignés selon une orientation nord – sud typique du volcanisme Grand Comorien, occupent son sommet et ses flancs. Sur les côtes nord, plusieurs anneaux de hyaloclastites marquent des éruptions violentes, fruit de l'interaction du magma et de l'eau de mer.



Photo 1. Identification du cratère « Shungu Shahale et Shungu Sha nyumeni »

Source. Google Earth pro 2017

Le massif du Karthala constitue à lui seul environ les deux tiers de l'île de Grande Comore. Ce volcan-bouclier basaltique, haut de 2361 m, est caractérisé par l'existence de deux importantes rift zones, diamétralement opposées, s'étendant de part et d'autre d'une caldeira sommitale résultant de la coalescence de plusieurs unités d'effondrement et siège des principaux cratères. Sur les flancs sud et est du volcan, des zones présentant une morphologie concave et de fortes pentes sont interprétées comme de vastes amphithéâtres en tête de larges glissements de flancs. A l'extrême sud-est, le M'badjini est un massif plus ancien. Densément fracturé et altéré, il est considéré comme appartenant au Karthala ancien. La majeure partie de la surface du Karthala est recouverte de récentes coulées de basaltes [chimiquement, les laves

du Karthala sont des basaltes alcalins et sub-alcalins, picrobasaltes et trachy-basaltes (hawaiites et trachybasaltes potassiques). Elles sont saturées ou faiblement sous-saturées en silice]. Les cônes stromboliens, moins fréquents au Karthala qu'à la Grille, et les fissures éruptives sont principalement disposés le long des rifts zones sur les pentes septentrionales et méridionales du Karthala.

I.1 - Une caldeira instable

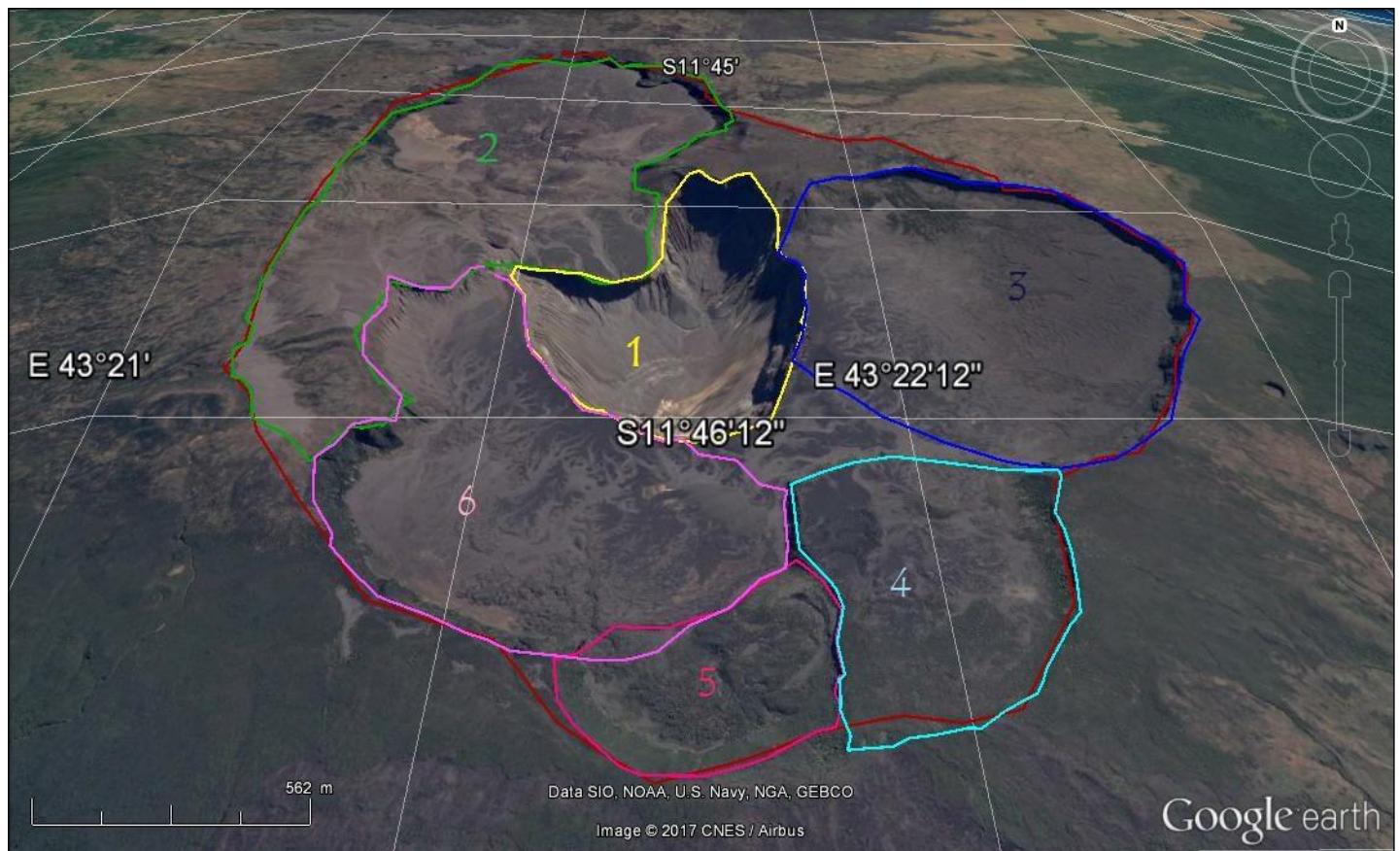


Photo 2. Délimitation du Caldeira_ Par l'auteur. Source Google Earth pro.2017

N.B : les chiffres représentent les différents effondrements du cratère durant divers évènements.

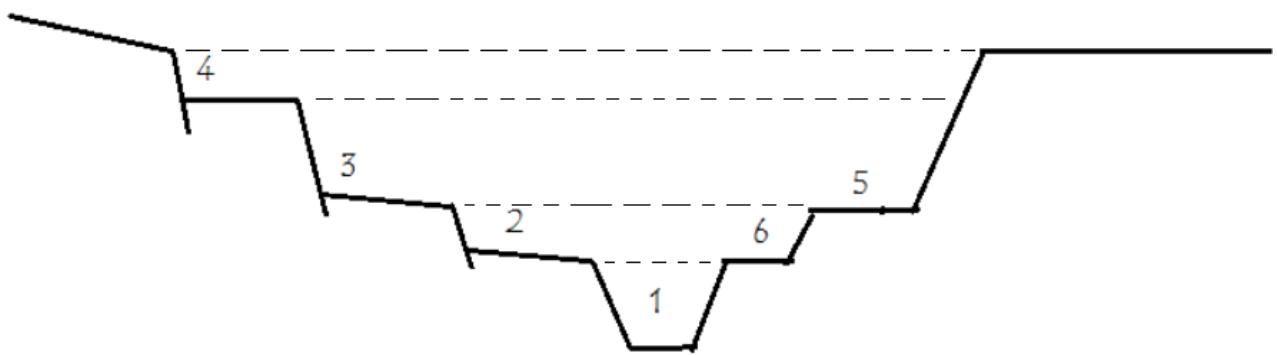


Figure 2. Possible coupe schématique de la caldeira. Par l'auteur

A travers les altitudes il est possible de poser l'hypothèse suivant :
 Les effondrements 2 et 6 sont les restes d'une seule et même caldeira. Dans les mêmes ordres théoriques ce sera la même chose pour 3 et 5. 4 sera le plus Ancien, et 1 le plus récent.

A l'image de nombreuses caldeiras des volcans boucliers basaltiques, la caldeira récente du Karthala est polylobée, de forme globalement elliptique et d'allongement nord-sud (3,5 km sur 2,8 km). Elle est formée de la coalescence de plusieurs unités d'effondrement subcirculaires dont les diamètres varient de 1300 à 1800 mètres environ. La hauteur des remparts est au maximum d'une centaine de mètres, alors qu'à l'extrémité nord, le rempart disparaît sous les coulées récentes (Porte d'Itsandra).

Dans le lobe nord de la caldeira, on peut encore observer un “pit-crater²” dont la formation semble associée à l'éruption de 1918, le Shungu-Sha nyumeni (*cratère nouveau, en comorien*). D'une profondeur de 150 m environ en 1936, il s'est progressivement comblé. 50 à 60 m en 1952, environ. 30 m en 1965, guère plus de 10 m après l'éruption de 1972, le cratère fut le théâtre de l'éruption de janvier 2007 dont les laves ont débordé légèrement de sa bordure ouest. Le centre de la caldeira est occupé par le cratère principal du Karthala appelé Shungu-Shahale (cratère ancien - dimensions : 1,4 km sur 0,8 km pour environ 300 m de profondeur). Le “Shahale” est lui-même formé de la coalescence de plusieurs unités, combinaisons d'effondrements et d'explosions violentes. Dans la paroi nord, juste à l'aplomb du sommet du

² Pit Carter (Anglais) : « trou du cratère »

volcan, le cratère ouvert par les éruptions phréatiques de 1918 est encore aisément reconnaissable. Au sud du “Shahale”, une plateforme à mi profondeur représente le seul vestige du fond du cratère tel qu'il existait antérieurement à cette éruption de 1918. La partie centrale du “Shungu Shahale”, la plus profonde, a connu de nombreux bouleversements au cours de ces dernières années. L'explosion phréatique de 1991 avait ouvert en son sein un cratère de 280 m de diamètre pour environ 40 m de profondeur. Ce cratère fut longtemps occupé par un lac d'eau vert bleuté marqué par de fréquentes et importantes variations de niveau et l'apparition périodique de fumerolles à sa surface. Par le passé, la présence de lacs verdâtres avait déjà été notée dans les années 1947 -1948, et en avril 1952. Les éruptions de 2005 et 2006 ont complètement transformé le fond du “Shungu shahale” faisant disparaître le lac et comblant le cratère de plus de 100 m de laves. Lors de ces éruptions, à deux reprises, le “Shahale” a abrité un lac de lave éphémère. L'observation des parois du Shungu Shahale ou de la caldeira elle-même fait apparaître de nombreux niveaux de coulées épaisses, signes du remplissage de structures d'effondrement antérieures, révélant l'importance des mécanismes de subsidence en zone sommitale du Karthala au cours de la période récente.

CHAPITRE-II - CARACTERES DES ERUPTIONS : PRODUITS PYROCLASTIQUES

II.1 - Une activité volcanique toujours importante

Le Karthala fut régulièrement en éruption au cours du dernier siècle, seule période pour laquelle son activité est assez bien connue. Treize éruptions sont répertoriées de 1904 à aujourd’hui, soit en moyenne une tous les huit ans mais avec une relative variabilité dans le temps (quatorze ans d’inactivité avant et après l’éruption phréatique de 1991). Le taux de production des laves pour le Karthala est de l’ordre de 1,5 millions de mètres cube par an, soit près de 10 fois moins que son voisin de La Réunion, le Piton de la Fournaise.

L’activité éruptive du Karthala est à l’image de celle des autres grands volcans boucliers basaltiques. Des éruptions à laves fluides, avec des coulées rapides, souvent à fort débit, émises à partir de fissures pouvant s’ouvrir sur plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres, ou d’évents plus ponctuels, lieux de construction de cônes de projections. Le dégazage est généralement modéré engendrant des fontaines de lave ou des explosions rythmiques. Les phases d’activité violemment explosive, d’origine phréatique et phréatomagmatique, constituent également une composante importante de l’activité éruptive du Karthala. Liées à l’interaction entre le système magmatique et le système phréatique, elles déterminent l’essentiel du risque éruptif.

II.1.1 - Les éruptions magmatiques

Durant la période historique, une large majorité des éruptions eut lieu le long des deux rift zones ou dans la caldeira sommitale selon des fractures d’orientation concordante avec celles des rift zones. Seule l’éruption d’avril 1977 fut localisée hors des axes principaux de fracturation, sur le flanc sud sud-ouest du volcan. Ce type d’éruption “excentrique”, s’il est moins commun que les éruptions latérales selon les rift zones, il n’est toutefois pas un cas isolé. Bon nombre d’anciens événements semblables à celui d’avril 1977 apparaissent sur les flancs ouest et sud du volcan dans des zones aujourd’hui habitées.

L’ouverture des fissures éruptives s’accompagne fréquemment d’une sismicité forte, ressentie par la population et à l’origine de paniques conduisant à un déplacement spontané des populations concernées. Les coulées émises sont constituées d’une lave très fluide dont l’écoulement est rapide. Pour bon nombre d’éruptions de la période historique, elles ont atteint les zones habitées (une personne aurait été tuée par les coulées de 1904).

II.1.2 - Les éruptions phréatiques en zone sommitale

Une éruption phréatique est un type d'éruption volcanique caractérisé par l'expulsion violente

d'une importante masse d'eau du sol sous la forme d'explosions qui vont former un panache volcanique contenant exclusivement de la vapeur d'eau, de fines gouttelettes d'eau condensée et éventuellement des gaz volcaniques. L'eau vaporisée peut provenir soit d'une masse d'eau liquide (nappe phréatique, lac, cours d'eau, etc), soit solide (glacier, etc). Ce type d'éruption se produit lorsque la remontée d'un magma dans un volcan réchauffe suffisamment une grande masse d'eau au point que celle-ci est rapidement vaporisée dans de grandes proportions. Une éruption phréatique est généralement le précurseur d'une éruption phréato-magmatique, puis éventuellement purement magmatique. Une éruption phréatique devient phréato-magmatique à partir du moment où le panache volcanique contient des matières minérales solides (cendres, téphras, etc).

Les explosions phréatiques ou phréatomagmatique générées dans le "Shahale" sont à l'origine d'importantes retombées de cendres et blocs sur la caldeira et ses abords. En zone sommitale, plusieurs niveaux de retombées pyroclastiques résultant de ce type d'éruption sont présents. Durant la période historique, les principaux épisodes sont ceux de 1918 et de 1991.

Ces deux éruptions, de type purement phréatique, sont relativement semblables quant à leurs effets et à l'énergie mise en jeu mais leurs causes sont différentes. Si l'éruption de 1918 peut être associée à une chute soudaine du niveau magmatique au sein de la zone centrale du volcan, à la suite de la vidange d'un important volume de magma lors d'une intrusion et d'une éruption latérale, celle de 1991 est interprétée comme le résultat d'une remontée des isothermes sous l'effet d'un accroissement du flux de chaleur dans la zone centrale du volcan, à la suite d'un apport de magma ou de fluides chauds.

II.1.3 - Les éruptions paroxysmales

L'existence d'éruptions paroxysmales dans le passé du Karthala avait pu être déduite de l'étude de niveaux pyroclastiques épais de plusieurs mètres et couvrant une grande partie du volcan.

L'un de ces niveaux résulte d'une explosion paroxysmale dont l'âge est estimé à 4000 ans BP. Le volume d'éjectas est grossièrement estimé entre 40 et 90 millions de mètres cube (épaisseur de plus de cinq mètres sur le rebord sud-ouest de la caldeira). Ces dépôts résultent d'une phase d'activité d'abord typiquement magmatique et phréatomagmatique qui, progressivement,

devient phréatique. L'éruption à l'origine de cette formation pyroclastique est certainement assez proche des éruptions de l'année 2005.

Une ascension rapide du magma, une grande richesse en gaz, une interaction avec les eaux superficielles, engendrent un dynamisme violemment explosif conduisant à la dispersion de grandes quantités de téphras.

II.2 - Les éruptions de 2005 à 2007

Inactif depuis 1991, le Karthala a connu un réveil dont on pourra dire qu'il aura marqué l'histoire de ce volcan et les mémoires des habitants de la Grande Comore. Deux éruptions, remarquables par leur violence et leurs conséquences, se sont succédé au cours de l'année 2005 (en avril et novembre), suivies d'une nouvelle phase en mai 2006 et d'une autre en janvier 2007. Cette séquence de quatre éruptions, avec des dynamismes variés, n'a pas d'équivalent dans l'histoire, certes courte, du Karthala. Dès le milieu de l'année 2003, une forte augmentation de l'activité sismique est enregistrée par l'Observatoire Volcanologique du Karthala (OVK). Cette activité se poursuit à un rythme variable durant l'année 2004 avec, en particulier, l'enregistrement d'une crise de 24 minutes au mois d'avril. Il en va de même pour le début d'année 2005. En mars 2005, ce sont en moyenne plus de 40 séismes journaliers qui sont enregistrés. L'OVK publie, entre le 8 mars et le 4 avril 2005, sept bulletins d'alerte prévenant de la possibilité d'une éruption à court terme.



Photo 3 : Mosquées à Moroni sous les cendres volcanique lors des évènements éruptive en Avril 2005. Archive du CNDRS (Centre National de Documentation et de Recherches Scientifiques).2005

L'éruption débute le 16 avril aux alentours de 11 h après une crise sismique longue de trois heures. Dans l'après-midi du 16 avril et le lendemain, des panaches gris et d'importantes chutes de cendres sont observés, en particulier dans l'Est de l'île. Le 17 avril en début d'après-midi, un survol des autorités compétentes a permis d'observer la colonne de gaz et cendres sortant du "Shahale", mais également d'apercevoir les émissions de lave dans le cratère. Alors que les chutes de cendres se poursuivent, provoquant la panique parmi les habitants des villages de l'Est de l'île (éclairs et grondements accompagnant les panaches lourdement chargés de cendres contribueront fortement à inspirer la crainte), sont également signalées les premières coulées de boue dans les villages côtiers de la région du Bambao dans l'ouest de l'île. Dans l'après-midi du 17, les chutes de cendres affectent largement le nord et l'ouest de l'île, y compris Moroni, la capitale, et l'aéroport de Hahaya. L'activité explosive fluctuera avant de décliner dans la nuit et en tout début du 18 avril. Un nouveau survol permis d'observer un lac de lave actif au fond du « Shahale » mais, dans la journée du 19 avril, celui-ci cesse de fonctionner. Le 20, le lac de lave est complètement figé, n'émettant plus que quelques fumerolles. L'eau réapparaît au fond du "Shahale" autour du 8 mai pour constituer un nouveau lac verdâtre.

Cette première éruption n'a duré que trois jours, mais les retombées de cendres et coulées de boue qui l'ont accompagnée ont marqué les Comoriens. Si seulement quelques millimètres de cendres sont tombés sur les zones côtières, le paysage dans la caldeira est complètement transformé.

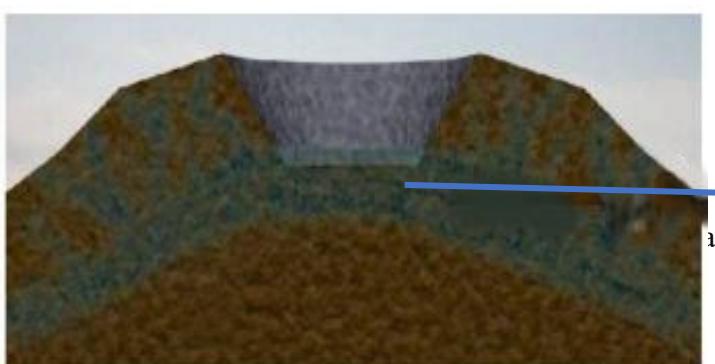
Plus de deux mètres de retombées, cendres, lapilli, bombes et blocs, sont présents sur les bords du « Shahale ». Une large partie des zones hautes des flancs du Karthala est couverte de plusieurs dizaines de centimètres de dépôts de cendres fines. Ces dépôts, repris par les pluies, alimenteront des coulées de boues pendant plusieurs mois. Après une période assez calme sismiquement de mai à août, une nouvelle crise est enregistrée les 25 et 26 août avec 190 séismes. Après cette crise, la sismicité reprend modérément puis plus franchement à la fin du mois d'octobre et début novembre. De nouveau l'OVK publie plusieurs bulletins d'activité signalant ce regain d'activité et recommande de ne pas entreprendre l'ascension du Karthala. Après environ 1h20 de crise sismique, une nouvelle éruption débute le 24 novembre à 17h20. Comme pour l'éruption d'avril, un panache chargé de cendres s'étend au-dessus du Karthala. Les images MODIS de la NASA permettront d'estimer son altitude à 11,6 km avec une extension latérale Est - ouest jusqu'à 280 km. Dès son début, l'éruption est observable de Moroni. Un grand panache sombre s'étale au-dessus du volcan. Grondements et éclairs

parcourent ce panache alors que d'importantes retombées de cendres affectent l'île, d'abord à l'est et au sud-est puis, à partir du 25 novembre à 5h00, sur le sud-ouest ainsi que sur Moroni et sa région. Les retombées de cendres sont très intenses, masquant largement la lumière solaire et obligeant les habitants à rester chez eux ou à porter des masques anti-poussières. Bien que les évacuations soient rendues difficiles, environ 2000 personnes ont quitté les villages de la région de Bambao pour se réfugier vers le nord de l'île. Cette phase paroxysmique cesse dans la journée du vendredi 25 novembre et le lendemain un lac de lave actif est observé dans le « Shungu Shahale ». Le 30 novembre, 80% de sa surface est figée, et le 5 décembre seuls deux petits cônes émettent des projections. L'éruption s'arrête le 8 décembre. Lors de cette éruption, les retombées de cendres ont affecté très largement les villes et villages de la Grande Comore.

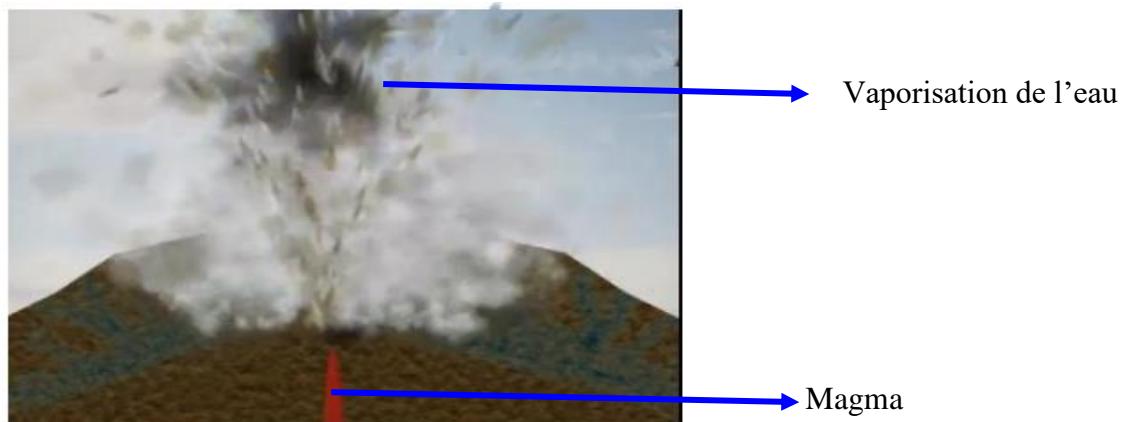
Les problèmes rencontrés dans les zones habitées ont été plus importants que lors de l'éruption du mois d'avril. Une personne, un bébé, est décédée par asphyxie. Soixante-quinze villages, soit plus de 175.000 personnes, sont touchés, à des degrés divers, par ces retombées ou par les coulées de boue qui les accompagnent, en particulier sur les côtes ouest et est. A la suite de cette éruption, l'activité sismique reste non négligeable sous le volcan. Une petite crise sismique (350 événements) est enregistrée le 16 mars 2006 durant 1h15. Après un mois d'activité sismique régulière et supérieure à la normale, le dimanche 28 mai à 15h54, une nouvelle crise sismique débute à faible profondeur sous la caldeira. Comme c'est généralement le cas au Karthala, les signaux dominés par les hautes fréquences sont progressivement accompagnés de signaux de plus longues périodes avant de laisser place à un trémor continu, à partir de 21h07 qui marque le début de l'éruption. Aussitôt, des lueurs rouges sont observées sur le sommet du Karthala et un panache s'étale en direction du Nord-Est sur environ 60 km (données du Volcanic Ash Advisory Center de Toulouse à partir d'images du satellite Météosat).

II.2.1. Reconstitution de l'éruption d'avril 2005

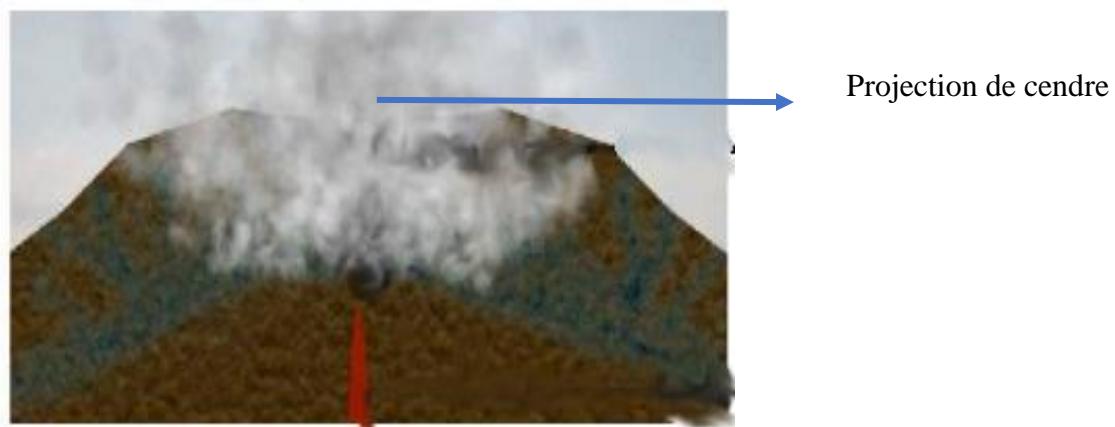
1) Présence d'eau souterraine et d'un lac au fond du cratère du Shungu Shahale



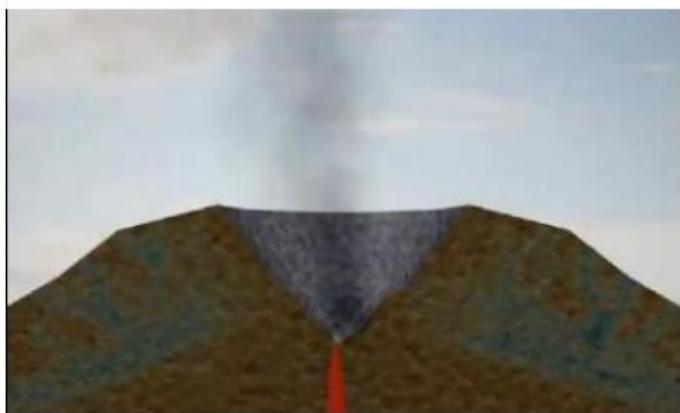
Nappe d'eau souterraine et lac à la surface



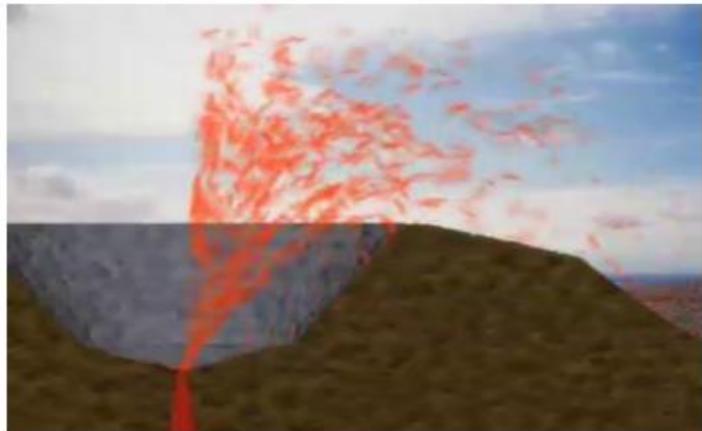
3) Montée du magma et vaporisation de l'eau.



4) Fin de la projection des cendres



5) Fontaine de lave avec projection de lapillis



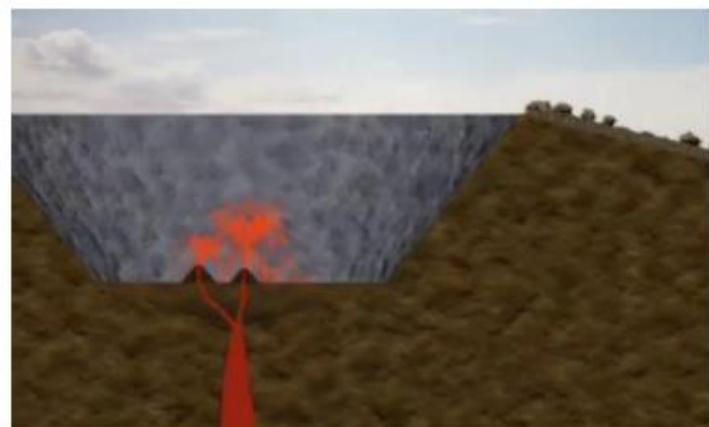
6) Reprise d'une activité explosive avec projection de blocs venant recouvrir les cendres.



7) Formation d'un lac de lave



8) Refroidissement du lac de lave et formation de deux petits cônes volcaniques.



CHAPITRE-III - CONDITIONS CLIMATIQUES TYPE TROPICAL MARITIME

Situé à mi-distance de l'Équateur et du Tropique du Capricorne, l'Archipel des Comores baigne dans un climat tropical maritime, chaud et humide, tempéré, à la fois, par la brise océanique et l'altitude.

Le climat est de type tropical maritime caractérisé par deux grandes saisons : une saison chaude et humide (été austral) et une saison sèche et fraîche (hiver austral). De Novembre à Mars-Avril, la saison est chaude et humide avec une pluviométrie importante maximale de Décembre à Mars et des Températures moyennes variant entre 24 et 27,8°C. Des vents de mousson de secteur Nord à Nord-Ouest nommés « *kashkazi* » soufflent de façon variable et faible mais plus fort en Janvier et Février (mois les plus chauds).

Pendant l'hiver austral, d'Avril-Mai à Octobre, la saison est sèche et plus fraîche avec des températures variantes entre 23,2°C et 27°C, minimale entre 14 et 15°C sur les hauteurs. Des vents (alizés), nommés « *kusi* », soufflent du Sud-Est vers Nord-Ouest et sont renforcés de Mai à Août (mois les plus frais) par des courants locaux qui viennent du Canal de Mozambique.

C'est ainsi qu'à Ngazidja où le niveau des précipitations est essentiel pour l'alimentation en eau de la population, le versant situé sous le vent et peu arrosé (1 398 mm à Foumbouni) contraste avec le versant au vent où la pluviométrie, très importante sur la côte (2 695 mm à Moroni), augmente considérablement avec l'altitude (5 888 mm à Boboni). Mitsamiouli, à l'extrême nord-ouest de l'île, ne reçoit que 1 884 mm par an. Il pleut davantage partout durant l'été austral. La saison sèche n'est vraiment cruciale que pour le versant sous le vent (cinq mois secs à Foumbouni et trois mois secs à Mitsamiouli).

III.1 - La pluviométrie

La pluviométrie étant la mesure de pluie en fonction de la hauteur enregistrée et de la durée, est l'un des principaux facteurs qui varie suite aux précipitations enregistrées ces dernières années aux Comores. La hauteur moyenne mensuelle des pluies la plus élevée est enregistrée au mois de janvier avec de hauteurs d'eau variable dans chaque île (341.0 mm à celle de Moroni) depuis 1961 à 2012. Le long des côtes, la température moyenne mensuelle ne varie guère que de 5°C, de 23°C à 28°C. Les hautes terres sont nettement plus humides et plus fraîches que la côte. En fait, les variations de climat dues à l'altitude sont plus importantes que les variations d'une saison à l'autre. La pluviométrie moyenne annuelle dépasse largement les 2

m et reste marquée par les microclimats observés généralement sur les îles montagneuses. Cet outil de prévention et de prévision n'a été effectif au niveau national avant 2009.

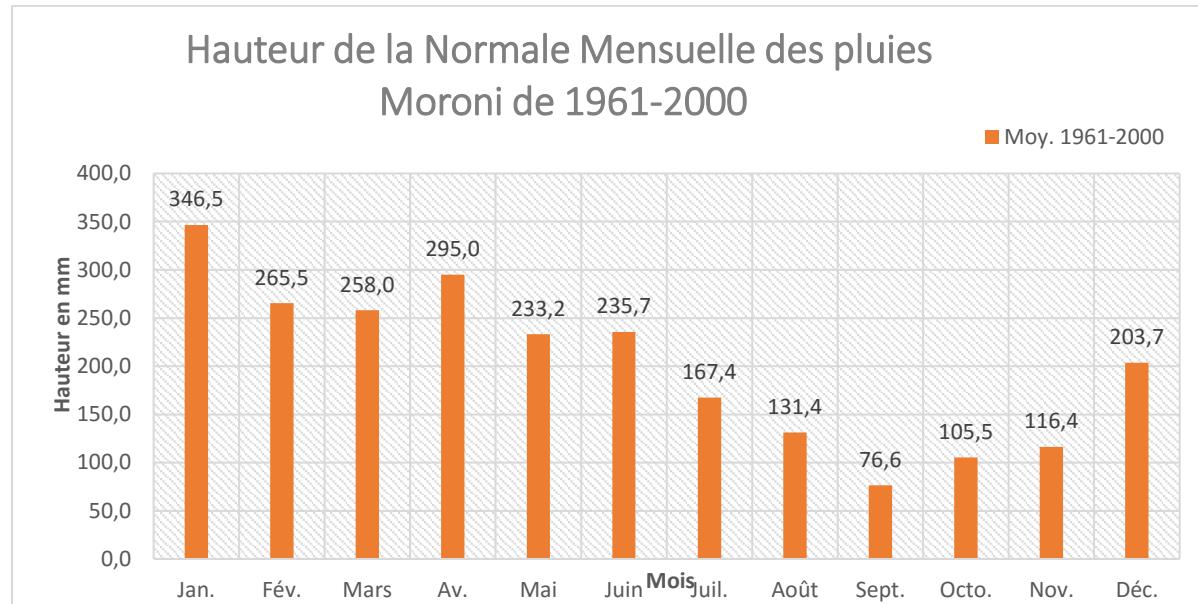


Figure 3 : données mensuelles des précipitations aux Comores

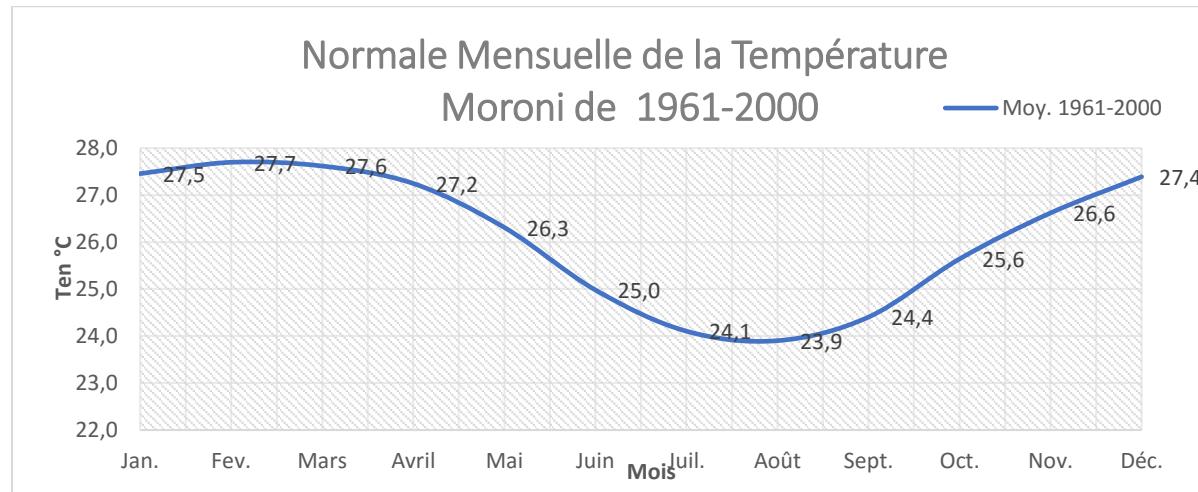


Figure 4 : Normale Mensuelle de la Température de la région (Source : ANACM)

Ces données sont encore globales car elles proviennent d'une seule station pour chaque île. Elles donnent donc un indicatif à des situations normales et non des estimations dans chaque bassin versant.

CHAPITRE-IV - REPONSES COUTUMIERES ET SOCIALES AUX RISQUES EN RAPPORT AVEC VOLCAN KARTHALA, EN GRAND COMORE.

Bien que le volcan Karthala dans l'île de la Grande Comore ait encore entré en activité quatre fois depuis 2005, le gouvernement et la population locale restent non préparé pour une crise éruptive majeure. Les raisons causant ce manque de préparation restent dans un enchevêtrement profond de facteurs politiques, socio-économiques, culturels et de l'environnement. Par conséquent, la population accepte la menace volcanique dans des chemins différents et de niveaux différents. Les voies dans lesquelles les Comoriens traitent se confrontent aux menaces et aux changements importants dans leur société sont quelques peu paradoxales (ex : liens avec l'évolution social, l'habitude à l'exposition aux risques volcaniques ...). Sur une échelle nationale, des ajustements structurels profonds sont exigés pour réduire la vulnérabilité.

IV.1. Contraintes sociales et économiques comme facteurs de vulnérabilité

(Les information fournies dans cette section dérivent d'un rapport PNUD [2007] et Le Groupe de la Banque du Monde [2007] bases de données sur l'Union Comores [2005],.)

Table 1. Contraintes sociales et économiques des Comores. Source . PNUD [2007] et Le Groupe de la Banque du Monde [2007] bases de données sur l'Union Comores [2005],.)

Index du développement humain	
Index de développement humain (HDI) :	0.561 (rang 134/177 mondial)
Espérance de vie à naissance (années) :	64.1
Mortalité infantile :	70.7.
Seuil de pauvreté :	42.7%
Combiné des secteurs fondamentaux, secondaire et tertiaire ratio :	46.4%
Taux de l'alphabétisation adulte (plus de 15 années) :	56.2%
Index de développement économique	
Produit intérieur brut (PIB en Dollars) par personne :	1993 (rang 142/174 mondial)
Agriculture, la valeur a ajouté (% de PIB) :	45.2%
Industrie (% de PIB) :	11.8%
Services (% de PIB) :	43%

Exportations de marchandises et services (% de PIB) :	11.7%
Importations (% de PIB) :	35.5%
Dette (dans 2005) :	189 million
Salaire Moyenne annuel par ménage :	1420

L'Union de Comores est parmi les pays les plus pauvres du monde comme montré par les indices du développement (Table ci-dessus). L'agriculture représente 45.2% du Produit intérieur brut (et en emploie deux tiers de la main-d'œuvre), le service 43% et l'industrie 11.8%. L'économie compte sur l'argent de la production et de la récolte de la vanille, les girofles et les ylang-ylang (*odorata Cananga*), représentant 98% des exportations du pays. La dépendance sur la nourriture d'outre-mer (riz, légumes, viande) et sur les importations du produit secondaires (pétrole, ciment) est exponentielle.

IV.2. La dimension culturelle de vulnérabilité

Le « Grand Mariage » dont la cérémonie est au cœur de la culture comorienne. Il consiste en un échange de cadeaux chers entre les familles du couple, y compris fêtes pour un village entier, et donne l'accès à un standing supérieur. Cette cérémonie peut coûter 20,000 € ; elle contraint des hommes à émigrer pour obtenir aussi rapidement que possible le montant requis d'argent. C'est une question centrale dans l'analyse de la vulnérabilité économique. Certaines gens le considèrent comme une motivation pour une consommation croissante dans le marché domestique. Inversement, d'autres pensent qu'il met un frein sur l'économie comorienne, en absorbant tous les fonds sans retourne de placement dans l'économie nationale. Les dépenses sont faites et constituent un cadre fastueux (gaspillage), plutôt qu'un investissement dans des mesures préventives pour la vulnérabilité décroissante (vies acceptables, réservoir de l'eau potable, amélioration des infrastructures, accès aux sources de l'énergie alternatives, etc.). Quelques Comoriens adhèrent à l'abolition de cette coutume. Par contraste, la religion qui est aussi un élément important dans la culture comorienne manifeste un soutien unanime sur le fait de devoir employer toutes les ressources pour la protection contre les diverses vulnérabilités. Seulement quelques auteurs se sont consacrés dans leur écrit à l'influence de la religion sur la perception du risque et le comportement des gens face aux risques volcaniques (Bankoff, 2004 ; Schlehe, 2005 ; Chester, 2005 ; Chester et al 2008 ; Gregg et al 2008). Chester et al (2008)

montrent que c'est un facteur important de comprendre comment les gens répondent aux risques volcaniques.

Aux Comores, souvent les mentalités, lors des évènements comme les éruptions volcaniques, prennent une nature complètement moralisée : négativement (punition divine) ou positivement (cadeau divin).

L'Union des Comores est une République islamique où 99% de la population est musulman (des de l'Union Comores 2004). Les difficultés doivent être vaincues par les prières. Ce qui explique pourquoi la population s'est retranchée dans les mosquées lors des récentes éruptions. Dans certaines circonstances, ces gestes, peuvent augmenter la vulnérabilité et compliquer le processus d'évacuation officiel. L'Islam peut expliquer aussi pourquoi les Comoriens ne sentent pas le besoin de développer des mesures de résilience contre les risques volcaniques. Ils pensent que leur protection est dans les mains d'Allah.

Tableau 2. Exemples de génération de la vulnérabilité en Grande Comore. Arranger Par l'auteur

Culturel	
Coutumes Aucun investissement dans l'économie nationale ou dans les vies soutenables parce que les gens investissent leur argent dans les us et coutumes, tel que Grand Mariage qui donne l'accès à un standing supérieur.	Pas de confiance au gouvernement (un élément essentiel) ☞ Risque majeur de pollution de la provision de l'eau par les retombées cendrées volcaniques
Religion - Attitude de foi et d'attente	☞ Potentiel pour expansion de la maladie de déplacement de la population massif et rapide
Environnemental	
Facteurs risque-apparentés (ex : le volcan, le temps)	Infrastructure :
Contexte des dimensions géographique des îles	Les routes, port et aéroport inadaptées pour une évacuation massive et ordonnée

<p>Le pays est divisé géographiquement en plusieurs îles, qui rehaussent les intérêts en l'autonomie</p>	<p>Zone d'accueil et de refuge insuffisante en cas de déplacement de la population</p>
<p>Inaccessibilité relative</p>	<p>Questions insulaires :</p>
<p>Difficultés de maintenir l'économie indépendante</p>	<p>Le territoire entier est menacé par les risques volcaniques</p>
<p>Difficultés dans sur les ressources l'adduction en eau : inadéquates</p>	<p>Aucune région de refuge en cas d'un événement majeur</p>
<p>Limité la terre arable</p>	<p>Pertes, insuffisance de matériels de base, ajouter un coefficient de pertes monétaires et richesse nationale élevée.</p>
<p>Littoral restreint, une mer aux caractères orageux : activités de la pêche réduites</p>	
<p>Difficultés d'avoir une aide extérieure</p>	

Le type d'activité volcanique, aussi bien que l'intensité, retour et emplacement des connes éruptives, joue un rôle important dans l'amplification de la crise et le comportement de la population. L'augmentation de l'activité volcanique de Karthala pendant les années passées a conduit à beau nombre de problèmes. Pendant que les pertes potentielles des éruptions ne sont pas conséquentes, le coût relatif des dégâts est considérable pour un pays pauvre comme les Comores. Inversement, la répétition des événements est un facteur identifié pour une meilleure conscience de risque volcanique et pour l'intérêt renouvelé, l'information et l'éducation face aux vulnérabilités.

DEUXIEME PARTIE

LA DIMENSION DE VULNERABILITE DANS L'ENVIRONNEMENT : FACTEURS DE RISQUE-APPARENTES

La vulnérabilité est la sensibilité des populations et des biens, face à un phénomène ; c'est la capacité d'une communauté à résister à un désastre et à se remettre des conséquences de ce désastre. La vulnérabilité aux aléas géologiques et climatologiques est liée à la combinaison de plusieurs facteurs, géomorphologiques (physique), socio-économique et écologiques (environnementaux). Cela veut dire que nous tiendrons compte du relief, de la topographie, du réseau hydrographique ou l'influence des cours d'eau, de l'état de la couverture végétale du sol, de la densité des populations sensibles, des infrastructures économiques, des écosystèmes fragiles et des biens publics et privés. Nous identifierons tous les facteurs où les caractéristiques intrinsèques de l'environnement sont susceptibles de favoriser l'aléa. La carte présentera trois zones dont la vulnérabilité varie du faible au très fort.

CHAPITRE V. LES RISQUES (ALEAS) VOLCANIQUES LIES ET INDUITS PAR LE VOLCAN KARTHALA

Aléa est un événement ou phénomène naturel qui se définit par deux paramètres : *sa nature* c'est à dire son ampleur, sa durée... et *sa probabilité d'occurrence* (*Evènement fortuit*). Quelle est la probabilité qu'une coulée de lave traverse la « région de Bambao », d'ici cinq ans, par exemple ? Combien de jour cet événement durera-t-il et quelle sera la superficie recouverte par les laves ?

Selon l'IAVCEI³, les aléas volcaniques majeurs se segmentent en deux groupes (**Les aléas majeurs directs et Les aléas majeurs indirects**) :

- **Les aléas majeurs directs**, liés à l'impact direct des produits d'une éruption :
 - ☞ Les coulées de lave, Les coulées pyroclastiques (nuées de ponce, nuées ardentes, déferlantes basales, ignimbrite...), Les retombées aériennes (cendres, lapilli, blocs, cheveux de Pelé), Les gaz.
- **Les aléas majeurs indirects**, liés aux conséquences secondaires d'une éruption :
 - ☞ Les coulées de boue (coulée de boue et coulée de débris), Les mouvements de terrain (glissements, effondrements, chute de blocs, avalanche de débris), Les raz de marée (Tsunami).

V.1. Aléa sismique

Un tremblement de terre peut être généré par la fracturation du sol suite à une épisode tectonique (déplacement de plaques, glissement de flancs, effondrement d'unité structurale...) pouvant être destructeur. La sismicité induite qui se traduit par une propagation d'ondes est généralement ressentie par la population et les alentours.

L'Echelle d'un tremblement est exprimée par sa magnitude qui est une mesure de la dimension relative de l'onde enregistrée sur le sismographe (instrument servant à mesurer les tremblements de terre). Un séisme de magnitude M~3 est généralement ressenti par les gens proches de la source, ceux de M>5 sont potentiellement préjudiciables, les tremblements de M≈7 qui se produisent dans les zones habitées, créent des dégâts considérables.

³ IAVCEI : International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior

La plupart des séismes en Grande Comore sont directement liés au mouvement du magma et au fonctionnement du système hydrothermal du Karthala. Ces séismes précèdent et accompagnent une éruption. Ils sont abondants (plusieurs centaines/éruption) et produisent des ondes qui provoquent assez rarement de dégâts. Pour de nombreuses éruptions, de tels séismes sont perceptibles par la population. Les éruptions magmatiques de 1972, 1977 et 2007 et les éruptions explosives de type phréatique de 1991 ou phréatomagmatique de 2005, ont été précédées de tremblements de terre provoquant le déplacement des habitants près de la source.

Peu de tremblements d'origine non volcanique (tectonique) sont enregistrés actuellement en Grande Comore. Ils sont qualifiés de « séismes régionaux ». Leur origine et leur localisation exactes sont inconnues.

Certains de ces séismes peuvent présenter des magnitudes élevées. Des tremblements de terre de magnitude $M>4$ ont été enregistrés en Grande Comore depuis 1950. On note à plusieurs reprises, la fracturation des murs de citernes d'eau (faites à base de ciment et sable corallien), d'effondrement de toit d'ancienne maison. Plus récemment, dans la nuit du 20 au 21 mai 2000, un fort séisme de $M=5$ a été ressenti au sud de l'île Grande Comore (On en ignore les dégâts). Depuis 2007, la mise en place fréquente de corps magmatique dans les niveaux superficiels, génère des séismes ressentis par la population. Tous ces séismes sont localisés à la verticalité du volcan soit entre – 3 et + 1km sous le volcan.

Ces séismes liés directement au déplacement de fluides ou de magmas en fracturant le sol, engendrent des tremblements de terre ressentis par la population de la région Bambao - Hambou.

Tableau 3. Séismes liés au volcan ressentis par la population depuis les événements de 2005. Source : bulletin d'activité de l'OVK (Observatoire Volcanologique du Karthala) année 2012. Arranger par l'auteur

Date/heure	Magnitude	Dégâts	Localisation	Commentaires
16/03/08 à 22h03	3	Non	Bambao-Hambou	Mise en place d'injection
21/01/08 à 18h30	4,6	Non	Bambao-Hambou	Mise en place d'injection
21/01/08 à 5h49	4,7	Non	Bambao-Hambou	Mise en place d'injection

17 au 19/01/2007		Oui	2/3 de l'île autour du volcan	Sismicité induite par le mouvement du magma
---------------------	--	-----	-------------------------------------	--

V.2. Aléa des coulées

* Coulée de lave

- La nature

En Grande Comore, les coulées de lave constituent l'aléa volcanique le plus direct. Rarement, elles mettent en danger la vie des personnes (des ossements d'un vieillard ont été découverts récemment sous une coulée ; il semblerait que cet homme ait été surpris par la coulée en train de dormir) mais n'épargnent pas leurs biens, moyens d'existence et propriétés. De plus, elles perturbent considérablement le système économique d'une région, voire, à l'échelle des Comores, d'un pays. Elles peuvent conduire à un déplacement de population maîtrisé (évacuation) ou non maîtrisé (faisant suite à des comportements de panique). En général, les coulées de lave se déplacent lentement (quelque km/h) bien que, dans certaines conditions particulières (laves plus fluides, fortes pentes, forts débits, tubes et tunnels...), elles peuvent se déplacer à grande vitesse (>30km/h).

La vitesse de progression des laves dépend aussi de la viscosité et donc de la composition chimique de la lave. La surface couverte dépend du débit de l'éruption et de sa durée. Les laves de la Grande Comore sont toutes des basaltes (composition chimique basique) au sein desquels nous distinguerons plusieurs catégories selon leur vitesse de progression. Les éruptions de 1972 et 1977 peuvent être prises en exemple. La seconde (Kraft, 1982) donna une coulée fluide qui s'épancha sur une pente peu forte. Elle produisit un volume de 10.8×10^6 . m³ en moins de 24 heures. Cette éruption localisée à basse altitude, à l'ouest du Karthala, précisément dans le village de Singani, détruisit 280 maisons et recouvrit 566 m de route.

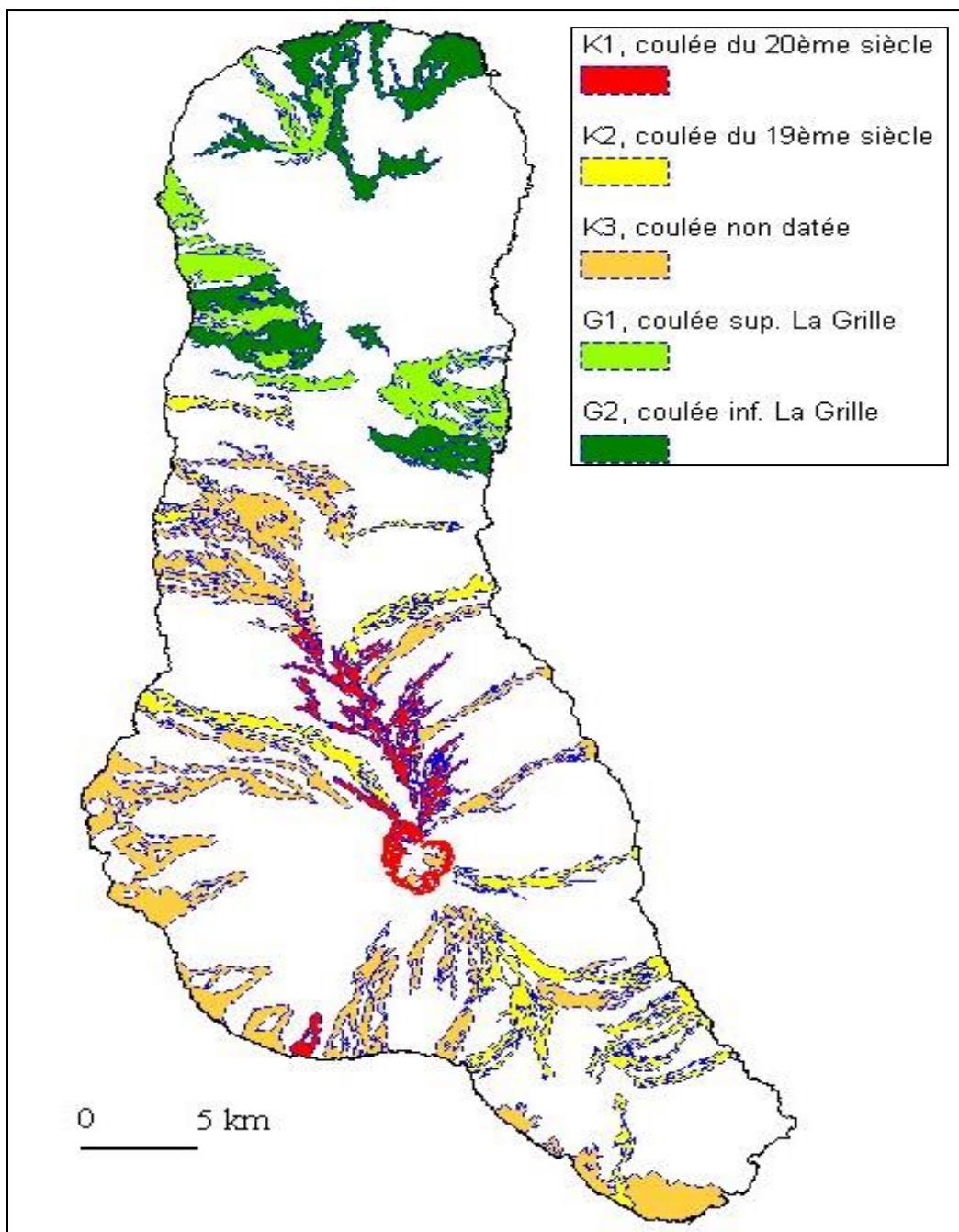


Figure 5. Carte des volcano-tectonique de Bachèlery et Coudray (1993) ; source compilation réalisée par Demange (2000).

L'éruption de 1972, qui eut lieu dans la caldeira, produisit $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ de lave. Elle dura à peu près un mois. La coulée aphyrique (sans minéral visible à l'œil nu) déversée, d'une épaisseur de 5 m, ne parcourut pas plus de 2 km par rapport à l'évent. Quelques jours plus tard, l'éruption (hawaïenne, à fontaines de lave) reprit avec recrudescence. Une coulée de 2m d'épaisseur fut émise. Elle dépassa celle des premiers jours et progressa sur plus de 5 km. Lors de cette deuxième phase, la coulée fut principalement alimentée depuis un tunnel. Les **tunnels**

de lave sont un mode particulièrement efficace de conservation de chaleur interne d'une coulée, favorisant ainsi considérablement la constitution d'écoulement de grande longueur. Cet élément est d'une grande importance vis-à-vis du risque volcanique car des régions éloignées des centres potentiels d'émission de laves, peuvent être menacées par l'aléa « coulée de lave ».

Au Karthala, comme à La Grille, les tunnels sont fréquents, souvent de grande section et de grande longueur. L'exemple de la coulée aphyrique de 1858 (...) peut être pris. La coulée issue du sommet du Karthala parcourt 12.5 km pour descendre vers la capitale Moroni, menaçant ses habitants avant de finir en mer. De même, plus au Nord, la coulée de 1859 (basalte à olivine) parcourt 27 km avant d'atteindre le littoral à l'emplacement actuel de l'aéroport de Hahaya. Incontestablement, ces distances exceptionnellement longues sont le fruit d'une circulation en tunnel de ces laves.

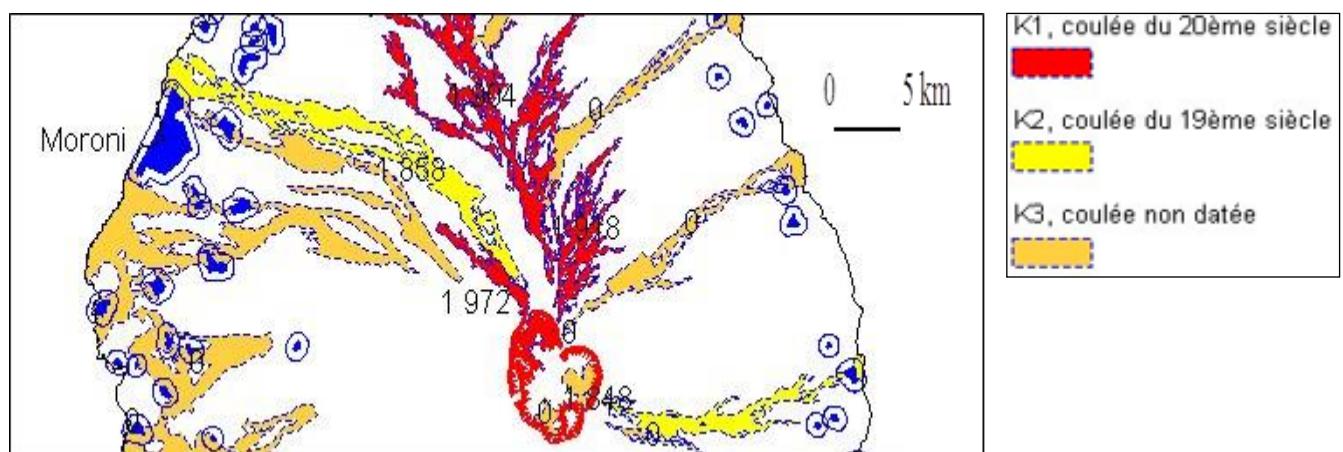


Figure 6. Coulées de 1858 (jaune) et celle de 1972 (rouge) issues de la caldeira. Les tampons bleus représentent les villes/villages avec leurs extensions (ronds) actuelles supposées_ de la carte volcano-tectonique de Bachèlery et Coudray (1993).

○ Les effets induits

Une coulée de lave déversée suit la loi de l'écoulement selon la ligne de la plus grande pente. Toute chose se trouvant sur son passage va être renversée, emportée, enfouie ou bien brûlée par la lave. La coulée de 1977, en Grande Comore, a non seulement brûlé plusieurs maisons, mais également forcé tous les habitants des villages de Singani et Hetsa à fuir. En général, les coulées ne sont la cause ni de mort d'homme, ni de blessure car il est aisément de fuir

devant l'écoulement du fait de sa faible vitesse de progression. Les blessures sont le plus souvent occasionnées par des imprudences lorsque les gens s'avancent trop près de la coulée, ou bien lorsqu'elle traverse une étendue d'eau, la réchauffe et produit des explosions.



Photo 3. La coulée de 1977. Au premier plan (coulée d'océanite, point de sortie 350 m alt.). Au deuxième plan, le village de Singani reconstruit après l'éruption. En arrière-plan, la mer. Cliché archives CNDRS

Les morts sont rares, généralement associés à des écoulements exceptionnels par leur rapidité et leur débit issus par exemple de la vidange de lac de lave.

D'autre part, la progression d'une coulée dans une zone fortement végétalisée peut conduire à des *explosions de gaz méthane* issu de la combustion de la végétation enfouie.

Il est donc clair que les coulées de lave constituent avant toute chose une menace pour les biens (propriétés, habitations, ...) et équipements. La terre recouverte est une terre perdue pour de longues années. Pour les habitants, il s'agit là non seulement de la perte de leurs habitats mais aussi de la perte de leurs moyens d'existence. L'activité économique d'une région s'en trouve donc durablement perturbée.

* Coulée de boue

Les coulées de boue résultent de la transformation rapide des dépôts en place avec l'arrivée d'une forte pluie sous forme de torrent. Dès lors, les dépôts sont mobilisés à la manière d'une coulée.

En Grande Comore, les coulées de boue ou lahars n'étaient pas visibles avant les événements de 2005. Cependant, des coulées cendreuses de type déferlantes basales « base surge », étaient visibles au sommet accompagnant les événements explosifs anté-2005 (communication personnelle de Nassor). Ce n'est qu'après les pluies qui ont suivi les événements explosifs d'avril 2005, qu'apparaissent les premières coulées de boue cendreuse arriver jusqu'aux villages.



Photo 4. Torrent de lahars à Vuvuni-Bambao. Source-Photos archives de la CNDRS

V.3. Aléa des cendres

Lors des éruptions hydro-magmatiques, qui intéressent le domaine littoral ou le sommet du volcan, la vaporisation rapide des eaux de surface ou souterraines engendre des dynamismes très explosifs entraînant la constitution de panaches pouvant atteindre plusieurs kilomètres de haut. Ces panaches sont chargés en gaz, cendres, lapilli, blocs et bombes qui commencent à chuter lorsque la vitesse ascensionnelle des particules s'annule. Globalement, les dépôts pyroclastiques issus de ces éruptions « hydro-explosives » montrent une forte prépondérance des éléments de granulométrie cendreuse. Ces retombées de cendres forment des couches dont les épaisseurs maximales sont observables à proximité de l'évent (point de sortie des Gaz). Ces retombées sont bien visibles au sommet du Karthala, sur le pourtour de la caldeira formant des épaisseurs pouvant atteindre, localement, 14 mètres. Elles résultent d'éruptions phréatiques ou phréatomagmatiques paroxysmales (du plus haut degré). Ces éruptions sont fréquentes au Karthala, nous en dénombrons quinze, au moins, datées. La dernière remonte à novembre 2005. Outre le sommet, ces dépôts à dominante cendreuse sont encore observables sur le littoral, sur le flanc ouest du Karthala ou encore, au nord de La Grille. Elles dérivent d'éruptions explosives

de type « *surtseyen*⁴ ». A l’Est du volcan Karthala, des dépôts à dominante cendreuse, de couleur grise affleurent.

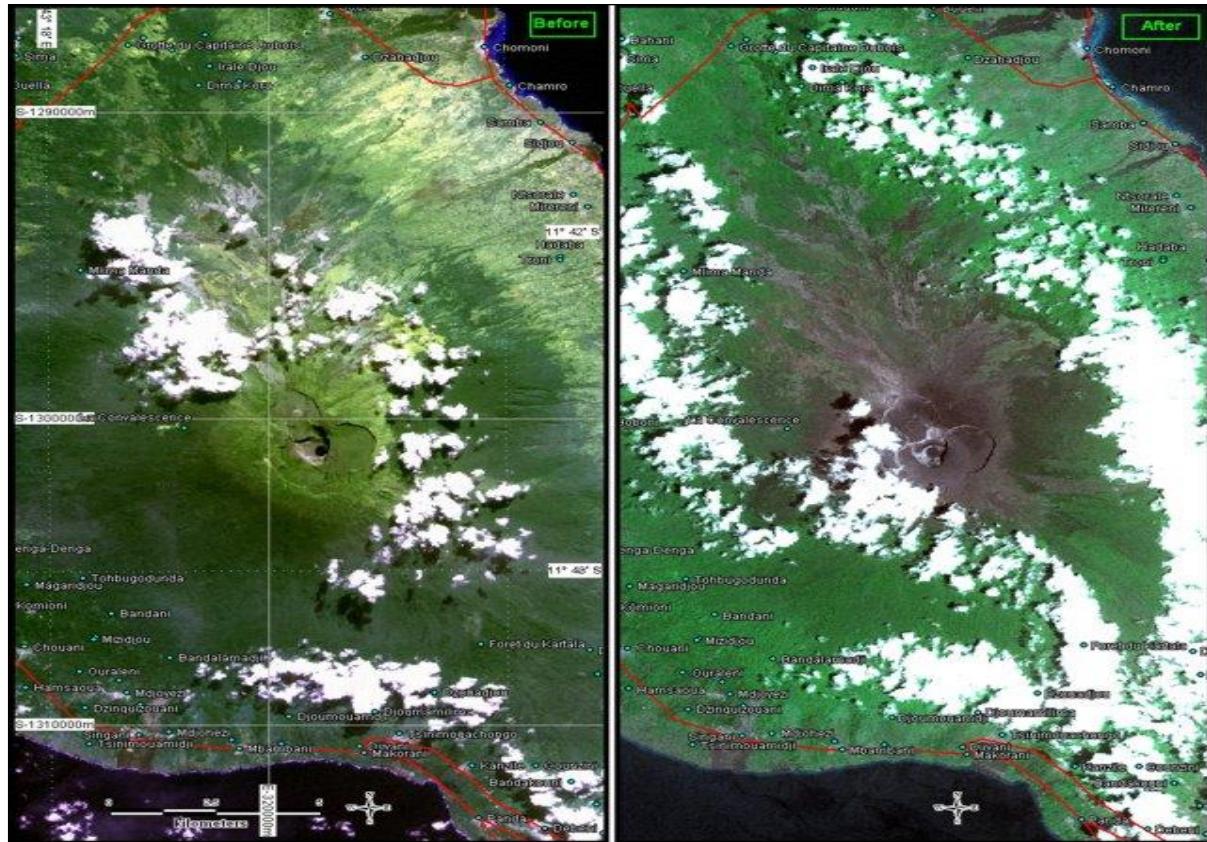


Photo 5. Image satellite SPOT4 montrant le centre de la Grande Comore (cratère du Karthala après et avant l’évènement d’avril 2005). Source UNOSAT

Remarques : sur la deuxième image on remarque un changement fulgurant du paysage sur le sommet du Karthala, le dépôt de cendre de l’éruption volcanique d’avril 2005.

Généralement, la répartition concentrique des cendres peut, toutefois être perturbée par les vents dominants, les alizés à basse altitude, contre-alizés à plus de 4000 m. **Le rôle des alizés est en particulier très marqué, favorisant l’extension des retombées en direction du Nord-Ouest.**

⁴ *Surtseyen* : tirant son nom du Surtsey, est un type d’éruption volcanique caractérisé par l’émission d’une lave à fleur d’eau lorsque le volcan est une île maritime ou lacustre de faible altitude.

La richesse en eau de l'atmosphère associée à ces contextes éruptifs, la formation fréquente de pluies, se traduit par le fait que les dépôts cendreux ainsi formés sont généralement fortement imbibés, voire saturés, en eau, augmentant sensiblement leur densité.

La charge constituée par une couche de 10 cm d'épaisseur de téphras (dépôts cendreux) imbibés d'eau est de 1.2 kN/m² (Pomoni et al., 1999). Cela signifie qu'un toit de dimension 8 m * 8 m recouvert d'une telle retombée cendreuse doit supporter 7,7 tonnes de charge avec une densité supposée de 1200 kg/m³. En Grande Comore, une telle charge ferait plier indiscutablement les toits de maisons à base de la paille ou de feuilles de cocotier. Certains témoins de l'éruption phréatique de 1918 (in Kraft, 1983) rapportent que des « pirogues venant des villages de Vanambwani à Ntsaweni » à 20 km du sommet du volcan, « étaient couvertes de cendres, et avec l'eau de mer, on aurait dit du goudron ». Cela suppose que certains toits à moins de 10 km par rapport au sommet aient pu avoir à supporter une charge évaluée à 1,54 tonne si l'on considère seulement 2 cm d'épaisseur de dépôts saturés en eau avec la même densité 1200 kg/m³.

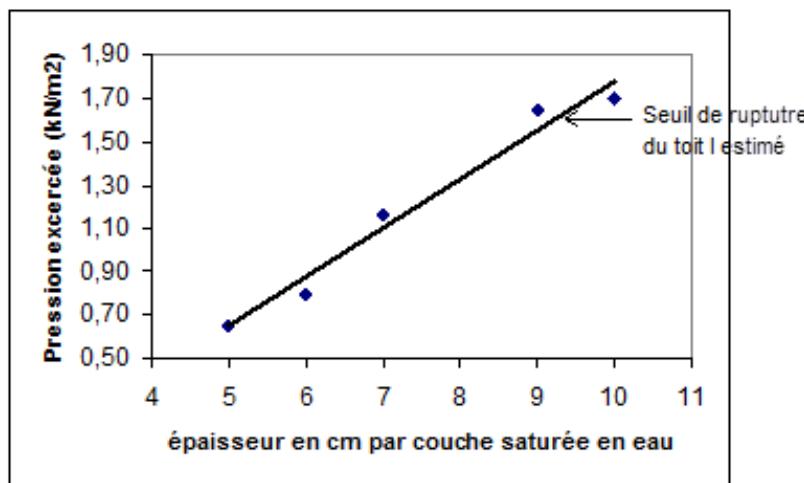


Figure 7. Pression exercée en fonction de la densité et de l'épaisseur de la couche.

Source. Volcanic Risk and Crisis Management on Grande Comore Island

Cette figure démontre qu'à partir de 9 cm de couche de cendres imbibées d'eau, le toit de dimension 36 m² devrait se plier sous la charge de 5.9 tonnes, avec une densité de 1824 kg/m³.

Les valeurs de charges sont calculées en supposant que le toit de maison en paille ou à base de feuille de cocotier est horizontal et non incliné (Nassor, 2001).

Tableau 4. Relations pression et densité des couches de cendres saturées en eau.

Source. Seismic signature of a phreatic explosion: hydrofracturing damage at Karthala volcano, Grande Comore Island, Indian Ocean.

ech	ép (m)	d (kg/m3)	P (kN/m2)	charge (T)
1	0,05	1314	0,7	2,4
2	0,06	1329	0,8	2,9
3	0,07	1665	1,2	4,2
4	0,09	1824	1,6	5,9
5	0,1	1699	1,7	6,1

Enfin, un autre effet : les pluies de cendres peuvent aussi réduire la visibilité et perturber les trafics aérien et terrestre. Notons que la pluie de cendres qui s'est déversée en 2005 en Grande Comore, en est un parfait exemple.

V.4. Aléa des scories

En Grande Comore, que ce soit au Karthala ou à La Grille, les constructions issues d'une activité purement magmatique sont identifiables au sommet, sur les flancs des volcans, jusqu'au sein des zones habitées. Les phases éruptives associées à la projection de scories sont caractéristiques du volcanisme comorien et ce à tout niveau altimétrique comme en témoigne les grands cônes de scories que l'on trouve depuis la proximité du cratère actuel « Shahale » jusqu'aux villages du bord de mer tels que Singani ou Hahaya par exemple. Ces produits retombent au sol à proximité de l'évent. Les épaisseurs de ces retombées peuvent être fortes à la périphérie de la bouche éruptive, diminuant très rapidement avec la distance.

V.5. Aléa des gaz

Les gaz font partie intégrante du magma. Ces gaz (H_2O , CO_2 , SO_2 , H_2S , H , CO , HS , HF , HCl , He ...) peuvent être dégagés en période d'activité volcanique ou en dehors, par les fumerolles ou le solfatare. Les premiers dégagés lors d'une éruption sont le dioxyde de carbone (CO_2), le dioxyde de soufre (SO_2) et le dihydrogène de sulfure (H_2S).

Au Karthala, deux bouches principales émettaient, en permanence, des fumerolles : le cratère « Shanyumeni » et la « Soufrière ». Dès l'événement de 2006, le cratère principal, « shahale » s'est mis aussi à en émettre jusque actuellement.



Photo.6 : Fond du cratère principal. Observation des fumerolles. Source Auteur - 2013

V.6. Aléa des avalanches (Glissement de terrain)

Les avalanches de cailloux sont rares en Grande Comore. Cependant, depuis les événements de 2005, des éboulements en masse notamment à l'Est de l'île et dans le fond du cratère principal, Shungu Shahale.



Photo 7. Avalanche de cailloux à l'Est de l'île Grande Comore. Cette avalanche a traversé la route et détruit un pont. Cliché ARCHIVES (Centre de Recherches et de Documentations Ngazidja d'avril 2012)

V.7. Interaction entre les différents aléas

Il est important de signaler qu'un aléa agit rarement seul, lorsqu'il survient. Il peut souvent induire un ou plusieurs aléas, qui agissent en concert. Il existe en effet une interaction très complexe entre les différents aléas qui contribue à accroître l'effet dévastateur de différentes catastrophes. Ces interactions peuvent se résumer dans le tableau ci-dessous (Tableau 5)

		Aléas géologiques						Aléas hydrométéorologique			
		séisme	cendres	Lahars	Coulée de lave	érosion	éboulement	Vent violent	Forte pluie	tsunami	inondation
Aléas géologiques	Séisme										
	cendres										
	Lahars										
	Coulée de lave										
	érosion										
	éboulement										
Aléas hydrométéorologiques	Vents violents										
	Fortes pluies										
	Tsunami										
	Inondation										
	Remontées océaniques										

Tableau 5 : Interaction entre les différents aléas. Source évaluation de vulnérabilité aux risques d'inondation en union des Comores

CHAPITRES VI_ IMPACTS DES ERUPTIONS VOLCANIQUES –UN MILIEU NATUREL FORTEMENT PERTURBE PAR LES ERUPTIONS VOLCANIQUES

VI.1. Des sols détruits par les coulées laviques

Une grande partie des terrains agricoles situés sur les flancs du Karthala, sont susceptibles d'être affectés par les coulées de lave à venir. Le sol occupé par la coulée est une terre perdue pour de longues années, avant la genèse d'un sol cultivable dans les zones affectées. En effet, les coulées de lave provoquent une calcination totale de la fraction organique du sol. Cette destruction du sol conduira à une perte considérable pour les potentialités agricoles de l'île.

En Grande Comore, les sols colonisés par les coulées les plus récentes sont encore incultivables. On peut constater la présence d'une végétation pionnière sur ces sols, signe d'un processus de pédogenèse en cours. Cependant, il faut rappeler que les sols formés sur les laves les plus anciennes offrent une bonne fertilité, grâce aux apports et enrichissement en éléments minéraux.

VI.2. Une topographie et une structure modifiées par les éruptions volcaniques

Lors des éruptions très explosives, des blocs de roches de plusieurs tonnes sont projetés à une vitesse importante sur de grande distance (3.5 km). A leur chute, ils créent des cratères d'impact, qui entraînent une modification de l'aspect physique et de la Topographie du sol. Ce phénomène n'intéresse cependant que la zone proche du cratère d'explosion.



Photo 8. Modification de la Topographie par l'impact de blocs volcaniques. Cliché de l'auteur 2013

VI.3. Des Structures moléculaires du sol perturbées par les cendres volcaniques

Les nuages cendreux, entraînés par les vents, sont susceptibles d'atteindre les terres situées sur les flancs à haute altitude. En se déposant, ils constituent des couches plus ou moins épaisses pouvant conduire à une modification physique du sol, et une pollution du sol par les substances chimiques qu'ils contiennent. Dans certains cas, ces dépôts peuvent conduire également à des dommages au niveau de la végétation.

En aval, certains sols, plus particulièrement ceux situés sur les zones inondables au voisinage des cours d'eau, sont ensevelis par les dépôts de cendres. Ces sols, pour la plupart, à vocation agricole, peuvent devenir inutilisables pendant de longues périodes.



Photo 9. Ensevelissement des cultures par les cendres. Plus de 2m d'épaisseur de cendre à Vuvuni-Bambao. Cliché archive CNDRS

VI.4. Morphologie des aquifères spécifique des îles volcaniques modifiée par les produits pyroclastiques

Dans les îles volcaniques telle que la Grande Comore, les ressources en eau utilisées proviennent de deux types d'aquifères : les nappes de base et les nappes d'altitude ou perchées. Les modifications thermiques, gravimétriques ou encore géométriques accompagnant une éruption du volcan Karthala, peuvent conduire à une modification de la géométrie de la nappe. Cette modification peut se manifester de deux manières :

- Soit par des fissurations supplémentaires entraînant une baisse du niveau piézométrique de la nappe.

- Soit par la montée d'un substratum imperméable qui va entraîner une modification de l'écoulement ou du débit de la nappe.

Dans les deux cas, on peut assister respectivement, soit à une réduction des ressources en eau disponibles ou à une modification de l'écoulement au niveau de certaines sources.

VI.5. Perturbation du système atmosphérique par les cendres volcaniques

☞ Des aérosols dans l'atmosphère lors des éruptions magmatiques

Les éruptions volcaniques sont toujours accompagnées d'émanations de gaz dans l'atmosphère. Le plus important est le gaz carbonique (CO₂). Ces gaz toxiques pour la plupart, sont susceptibles d'entraîner des nuisances ou des gênes au niveau des populations proches des points de sortie.

Au cours d'une éruption magmatique, le CO₂ est produit en quantité importante au niveau des fissures éruptives. Lorsque l'épanchement de coulée se fait sous tunnel, il est vraisemblable qu'elle en garde une quantité suffisante susceptible de provoquer des suffocations pour certaines personnes. Dans le cas d'une éruption explosive, plus particulièrement phréatique, il y a émission de CO₂ accompagné du dioxyde de soufre (SO₂) et du sulfure d'Hydrogène (H₂S) dilué dans le panache. Bien que ce type d'éruption soit localisé au sommet du Karthala, les gaz émis entraînés par les vents, sont ressentis par la population située dans les zones côtières, à environ 15 km.



Photo 10. Panache de cendre volcanique. En vert, l'expansion des gaz. Eruption du 16 avril 2005 du Volcan Karthala. Cliché ARCHIVES (Centre de Recherches et de Documentations Ngazidja)

☞ *Les nuages cendreux typiques des éruptions explosives*

Ils sont développés lors des éruptions très explosives. Ces nuages sont chargés en gaz toxiques, cendres... Les fumées, résultant de l'interaction des gaz émis avec l'oxygène de l'air, entraînent une pollution importante de l'air. Cette pollution peut s'étendre sur plusieurs kilomètres, conduisant par ailleurs, à une diminution de la visibilité.

Particulièrement, ces nuages peuvent provoquer une perturbation de la circulation aérienne lorsqu'ils sont très denses. Autre conséquence qui peut être notée, l'importance du nuage réduit la lumière solaire, entraînant ainsi une réduction de l'activité photosynthétique des végétaux.

VI.6. Des pyroclastiques créant une réaction en chaîne : inondations d'avril 2012

Le 5 juin 2006, après avoir assisté en direct à une éruption, nous sommes de nouveau témoins d'une manifestation indirecte du Karthala. Il pleut fort sur le volcan dont le sommet est couvert d'énormes nuages noirs. Le bruit circule dans Moroni que l'eau commence à envahir les villages du sud-ouest. Nous nous y rendons sans attendre. A Vuvuni, environ 40 cm de boue envahissent en quelques minutes l'intérieur des maisons tandis qu'à l'extérieur l'épaisseur atteint par endroits 1,5 mètre. Des valeurs loin d'être exceptionnelles : plusieurs dizaines d'événements similaires ont eu lieu depuis 2005, avec une tendance à la décroissance dans l'ampleur des dégâts occasionnés. Lors des premiers événements, la boue atteignait entre 2 et 2,5 mètres. Trois maisons, ensevelies jusqu'au toit, sont totalement détruites ; quelques dizaines d'autres ont été abandonnées en raison de la récurrence des dégâts occasionnés (effets personnels détruits, potagers dévastés, eau des citernes souillée, poussière omniprésente lorsque la boue sèche...).

A quelques kilomètres de là, à Salimani, route principale, cimetière et digue littorale sont totalement détruits. La place du village est submergée sous un mètre d'eau et de boue. Les dégâts occasionnés sont considérables, mais cette fois-ci heureusement aucune victime n'est à déplorer. Pas plus que les semaines précédentes au cours desquelles des habitants s'étaient retrouvés piégés par la boue dans les maisons. Mais début 2006, des agriculteurs étaient emportés par des coulées de boue sur les pentes du volcan. L'un deux, transporté jusqu'à la côte, ne survivra pas. Si l'atteinte directe des personnes reste rare au cours de tels événements, ce nouveau risque est à prendre très sérieusement en considération. Les cendres des éruptions de 2005 ont imperméabilisé les sols, rendant l'infiltration d'eau de pluie impossible.

L'écoulement se fait désormais en surface, se chargeant en chemin des produits pyroclastiques accumulés sur les flancs du volcan. Or, la pluviosité est très importante sur le versant au vent (jusqu'à 3 mètres d'eau par an à Moroni, 9 mètres en haut du Karthala), et les pentes, en moyenne de 20%, peuvent y atteindre 30%.

Dès qu'un événement pluvieux important survient, des écoulements hyper-concentrés, aussi appelés lahars, sont ainsi générés sur toute la côte sud-ouest. Au sommet, la vitesse à laquelle les coulées de boue prennent forme est impressionnante. Il suffit de quelques minutes pour que les micro-ravines débordent de toutes parts avant de se rejoindre quelques centaines de mètres plus bas dans des chenaux d'un mètre cinquante de profondeur pour trois mètres de large en moyenne. Ces derniers ne sont toutefois pas suffisants pour contraindre parfaitement les lahars à leur arrivée en zone littorale. L'absence d'écoulement pérenne, caractéristique du système hydrologique grand-comorien, est synonyme d'absence de lignes de drainage. Les lahars.

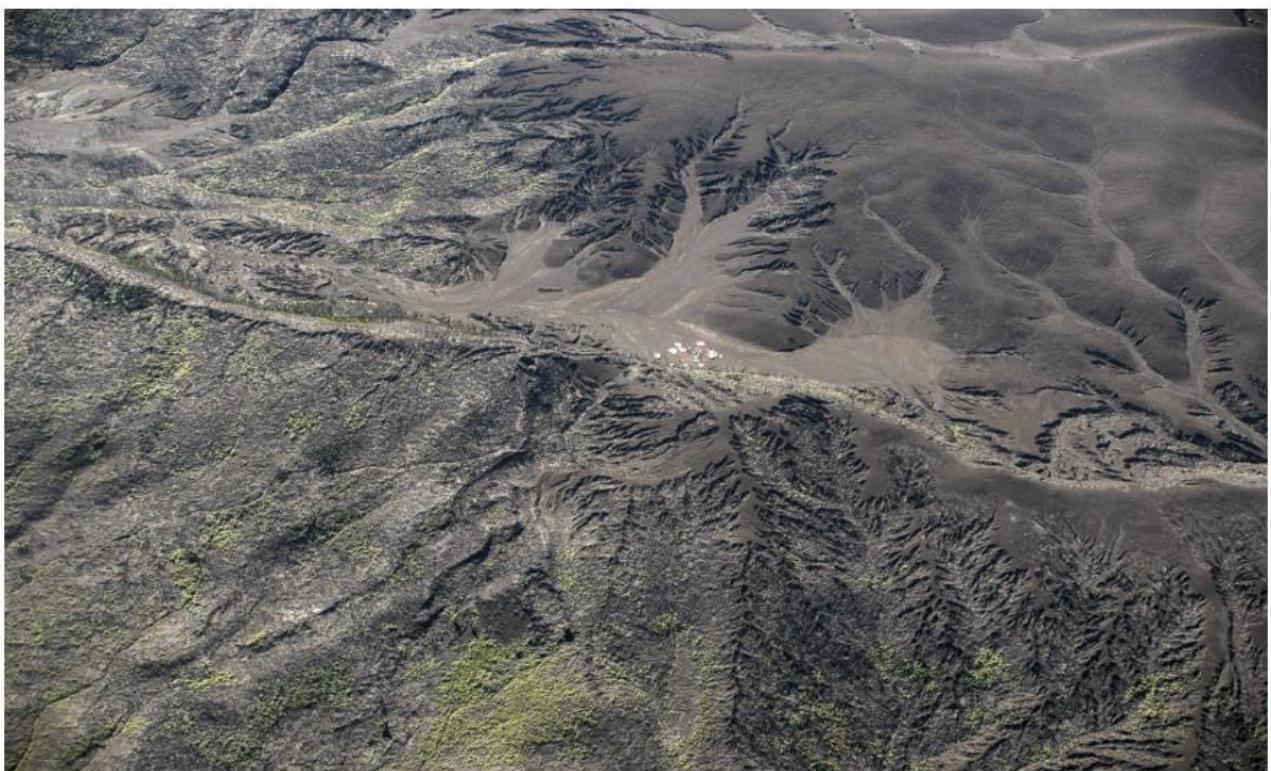


Photo aérienne 11. Montrant le remaniement des cendres volcaniques sur les flancs du volcan Karthala. Source Google Earth Pro

CHAPITRE. VII. DES IMPACTS SEVERES SUR LA VIE DE L'HOMME

VII.1 - Des pyroclastes causant des dégâts sur l'habitat

Deux types d'aléas volcaniques sont susceptibles d'endommager ou de détruire complètement les habitations des villes et villages en Grande Comore :

- Les coulées de lave détruisent tout sur leur passage. Aucun type d'habitat situé sur le trajet des coulées ne peut résister à leur avancée. A titre d'exemple, au cours de l'éruption de 1977, 280 maisons furent détruites à Singani (village situé à l'Ouest de l'île) dont 50 furent incendiées alors qu'elles se situaient en bordure de l'épanchement. Du côté de Hetsa, 13 autres furent englouties.
- Les produits liés à l'activité magmatique et hydro-magmatique, plus particulièrement les retombées à dominante cendreuse, lorsqu'elles sont imbibées d'eau, se traduisent par la formation de dépôts de couches cendreuses pouvant être très denses. Une charge constituée d'une couche de cendres imbibées d'eau de quelques centimètres d'épaisseur, ferait certainement plier les toits des maisons non en dur en Grande Comore.

Au cours des éruptions phréatiques, des blocs sont projetés du point de sortie, à une vitesse importante, avec une énergie pouvant atteindre plusieurs milliers de joules, suivant leur taille. L'impact dû à la chute de tels blocs peut endommager voire même détruire certaines habitations. Il est à noter cependant, que cet aléa se limite généralement aux zones proches du sommet du volcan ou à proximité des événements d'origine explosive tel que le Ngu d'Iconi ou Mwandzaza (Région de Bambao).

Les coulées de cendres boueuses, consécutives aux dépôts massifs de cendres issues des éruptions explosives, sont à l'origine d'inondation dans certaines régions, notamment les villages situés à basses altitudes ou sur la zone côtière. Les sables et les cendres ainsi drainés sont susceptibles d'ensevelir des maisons, au cours de périodes pluvieuses, causant des dégâts considérables à leurs habitants. C'est ainsi que deux maisons ont dû être abandonnées dans le village de Vuvuni, par suite d'apport massif de cendres et de sable par les eaux de ruissellement. La destruction des habitations entraînera forcément comme conséquence des mouvements des populations privées de leurs biens.

VII.2. Ruée vers l'or noir dans les villages sinistrés



Photo 12. exemple d'exploitation des lahars. photo archive du CNDRS

Cependant, les Produits pyroclastiques sont aussi de grande utilité pour les humains. Les roches relâchées lors de ces explosions sont utilisées dans plusieurs aspects de la vie moderne. Les pierres volcaniques possèdent des propriétés uniques qui sont des grandes alliées dans la construction, la médecine et l'esthétique par exemple : La pierre ponce, le marbre, l'obsidienne entre des milliers d'autres sont essentiels à la civilisation humaine.

Ainsi, depuis avril 2005, à chaque forte pluie, le même rituel se répète tout le long de la côte sud-ouest. Les gens se postent sur le bord des routes et attendent la fin des écoulements pour ramasser le sable volcanique charrié et déposé par les coulées (Exploitation des lahars). Des petites montagnes « d'or noir » poussent alors un peu partout dans le paysage, bientôt ramassées par un défilé de camions ou simplement à dos d'homme. Si beaucoup de Comoriens se réjouissent de la survenue de ces événements, c'est que ce "sable" précieux est utilisé pour la construction des maisons. L'industrie du concassage des coulées, qui avait jusqu'alors le monopole de la production de matériaux de construction sur l'île, maintenait des prix élevés inaccessibles pour la grande majorité des habitants. Cinq mètres cube de sable coûtaient 100.000 francs comoriens soit environ 200 euros (soit environ 700.000Ariary). La logique de cette ruée vers l'or noir semblait donc imparable. Tout autant que les dérives qui en découlent sont regrettables. Les propriétaires des terrains touchés ont rapidement limité le libre accès à ce

qui était de facto devenu « leur sable », pour en faire le commerce. L’appât du gain aurait alors incité certains villageois à tenter de détourner les écoulements vers leurs propriétés en creusant des canaux de drainage depuis les zones déjà sinistrées. Les objectifs sont atteints : tout le monde dispose de matériaux de construction à la moindre pluie... Efficace contribution à l’extension des lahars dans des quartiers jusque-là épargnés. On entrevoit ici toutes les difficultés de la gestion du risque volcanique dans un pays où les représentations et les intérêts ne se prêtent pas nécessairement à la mise en place de mesures de mitigation.

VII.3. pyroclastique contamination de l’eau potable par les produits pyroclastique :

Dans la plupart des villages de la Grande Comore, l’eau utilisée couramment est l’eau de pluie recueillie dans les citernes. Chaque habitation dispose d’une citerne au moins, certaines n’étant pas couvertes. L’enquête réalisée sur le terrain, dans trois villages de l’île, a révélé que la plupart des citernes (74 %) proches du sommet, n’étaient pas couvertes avant les éruptions explosives de 2005. Ces eaux ont été polluées par les cendres volcaniques, entraînées par les vents à la suite des éruptions explosives d’avril et de novembre 2005.

VII.4. Une économie au cœur du feu : structure en péril

Une éruption volcanique entraîne généralement des perturbations majeures de l’économie au niveau local, voire national, à cause des paniques provoquées au sein de la population ou par les destructions éventuelles.

Outre les perturbations temporaires, l’économie pourrait être sérieusement affectée par la destruction des infrastructures de bases telles que le port, l’aéroport, les routes ou les moyens de télécommunications... En effet, l’économie comorienne est tributaire du commerce, basé essentiellement sur les importations des produits de première nécessité.

Le *port de Moroni*, seul port opérationnel sur l’île Grande Comore, constitue le point névralgique de l’économie du pays. Cet établissement est situé sur une zone à aléa élevé, et il est donc également sous la menace des coulées. Sa destruction entraînerait non seulement une paralysie totale de l’économie du pays, mais aussi une pénurie en denrées de première nécessité, étant donné que la plupart, sinon la totalité de ces produits importés se font par voie maritime.

L’*Aéroport International Moroni Prince Saïd Ibrahim (AIMPSI)*, unique aéroport fonctionnel sur l’île, implanté sur la coulée de 1859 (voir Enjeux), est sous la menace d’une éventuelle coulée de lave, qui pourrait être issue de la rift zone Nord du Karthala (Voir Les

Enjeux dans la Troisième partie). Son atteinte compliquerait encore l'organisation des opérations de secours et l'approvisionnement en vivres venant de l'extérieur en cas de catastrophe.

Le site de stockage des *hydrocarbures*, situé à proximité du port, est le principal réservoir en hydrocarbures de l'île de la Grande Comore. Outre la pénurie en carburant qu'entraînerait sa destruction, l'explosion qui serait engendrée mettrait en danger toute la région de Bambao et sa population voire l'île entière et provoquer des problèmes de santé.

VII.5 - Retombée de cendres et enjeux sanitaires

Les phénomènes volcaniques s'accompagnent d'un dégagement de gaz toxiques qui ont des effets néfastes sur la santé de l'Homme. En Grande Comore, les atteintes à la santé humaine seront perceptibles, surtout lorsque les gaz dégagés au cours des éruptions sont transportés par les vents vers les zones habitées (forte odeur).

Les plus dangereux sont le dioxyde de soufre (SO₂) et le dioxyde de carbone (CO₂). On peut néanmoins, souligner les émissions en quantité variable de sulfure d'hydrogène (H₂S), d'hydrogène (H₂), de monoxyde de carbone (CO), d'acide chlorhydrique (HCl), de fluorure d'hydrogène (HF) et d'hélium (He).

L'effet sur la santé humaine de ces gaz dépend de leur concentration, de la proximité par rapport à la source et de la durée d'exposition. Les vents jouent un rôle essentiel car, ils constituent le facteur de propagation, mais aussi de dilution des concentrations. Notons qu'au cours des éruptions explosives enregistrées sur le Karthala, ces gaz sont, fort heureusement, dilués dans la haute atmosphère grâce à la présence d'eau de la nappe impliquée dans ces éruptions.

- Le SO₂ est un gaz avec une odeur forte et piquante ; il provoque une irritation de la peau, des tissus, de la muqueuse des yeux, du nez et de la gorge. Il peut affecter les fonctions respiratoires et les bronchioles. Des teneurs de 6 à 12 ppm peuvent causer une irritation immédiate du nez et de la gorge ; à 20 ppm une irritation des yeux et à 10.000 ppm une irritation de la peau au bout de quelques minutes d'exposition.

- Le H₂S est un gaz inflammable avec une forte odeur nauséabonde, rappelant les œufs pourris. De faibles concentrations irritent les yeux et la gorge. Les fortes concentrations, entraînent une irritation des œdèmes pulmonaires.

- Le CO₂ est un gaz incolore et inodore, de densité supérieure à celle de l'air. De ce fait, il peut s'accumuler dans les dépressions. Il peut causer une augmentation perceptible du rythme

respiratoire à des teneurs de 5 %. Dans certaines conditions, les teneurs en CO₂ peuvent atteindre jusqu'à 30 %, et peuvent entraîner la mort.

- Le HCl entraîne une irritation des muqueuses des yeux et une atteinte aux fonctions respiratoires pour des concentrations faibles de l'ordre de 35 ppm. Il peut entraîner des œdèmes pulmonaires et des spasmes, pour des concentrations supérieures à 100 ppm.

Tableau 6. Matrice d'identification des Impacts. Source évaluation de vulnérabilité aux risques géodynamiques et hydrométéorologique en union des Comores. Arranger par l'auteur

MATRICE D'IDENTIFICATION DES IMPACTS

			Eruption explosive						Eruption magmatique					
			Retombées aériennes			Séisme	Glissement de terrain	Éruption de Gaz	Coulée de boue	Coulée de lave	Feu	Émanation de gaz	Cheveux de pelée	Séisme
			Bloc	Pousse	Cendre		Glissement de terrain	Éruption de Gaz	Coulée de boue					
Milieu Physique	Soil	Fertilité	1	2		1			2	3	2			
		Perméabilité	2	3		1			2	2	1			
	Eau	Qualité des eaux de surface		3		1			3	2	1			
		Ruissellement infiltration		3		2			2	2	1			1
		Eau souterraine (Nappe)		1		1			1	2	1			1
	Air					1	3			1	2	3	1	
	Topographie		2			3			2					2

	Climat	2	2	1	2	2	1	2		
--	--------	---	---	---	---	---	---	---	--	--

Milieu humain	Economie	2	1	1	1	2	3	1	2	2
	Santé	1			3	1	1	1	3	1
	Habitat	2	2	1		3	3	3		2
	Infrastructure			1		1	2	1		2
	Tourisme		1	1	2		2	1	2	2
	Qualité de vie	1	2		2	1	1	2	2	3
	Usages et coutumes						1		1	1

Echelle d'évaluation des impacts

1 – Impact faible

2 – Impact moyen

3 – Impact fort

TROISIEME PARTIE

IDENTIFICATION ET CARTOGRAPHIE DES INSTABILITES DE LA ZONE

La démarche méthodologique adoptée dans le cadre de l'identification de la susceptibilité aux instabilités de terrain sur la base de la théorie de l'évidence s'articule essentiellement autour de trois axes : (i) inventaire et identification des instabilités de terrain ; (ii) la caractérisation et la détermination des facteurs conditionnant (paramètres de prédisposition) lithologie, fracturation, pente, exposition...; (iii) évaluation de l'indépendance conditionnelle des variables prédictive (Simulations et Hypothèses).

CHAPITRE. VIII. LES SCENARIIS ET ENJEUX_ QUELLE EST LA PROBABILITE D'OUVERTURE BRUTALE D'UN NOUVEL EVENT EN ZONE HABITEE ?

Pour essayer de répondre à une telle question, il faudra tout d'abord se demander où se situent (i) les zones préférentielles d'injection de magma et (ii) les zones habitées.

En Grande Comore les habitants occupent de façon décroissante avec l'augmentation de l'altitude les flancs, notamment ouest et les rift zones et ce, jusque 800 m d'altitude. Le nombre important d'évents en zone habitée et l'éruption du mois d'avril 1977, nous rappellent que l'ouverture de fissures éruptives est un phénomène commun pour le volcan Karthala. D'autre part, l'étude des séismes enregistrés lors de l'éruption de 1991 et ceux enregistrés actuellement (communication de Nassor), a mis en évidence **la migration d'un corps magmatique depuis la partie Sud-Ouest de l'île vers le sommet du volcan**. Il apparaît donc que la zone « Ouest » du volcan est actuellement, selon Nassor (2001), une zone préférentielle de transfert de magma.

A partir de ces constats, on estime que la probabilité d'ouverture d'un événement en zone habitée est de ~75% (pourcentage obtenu à partir de calcul des événements présents sur le massif) soit ~63% dans la région comprenant le Nord, l'Ouest et le Sud. Dans le cas où un tel événement vienne à se produire, le temps de réaction des habitants sera d'autant plus réduit que le point de sortie de magma sera proche des maisons.

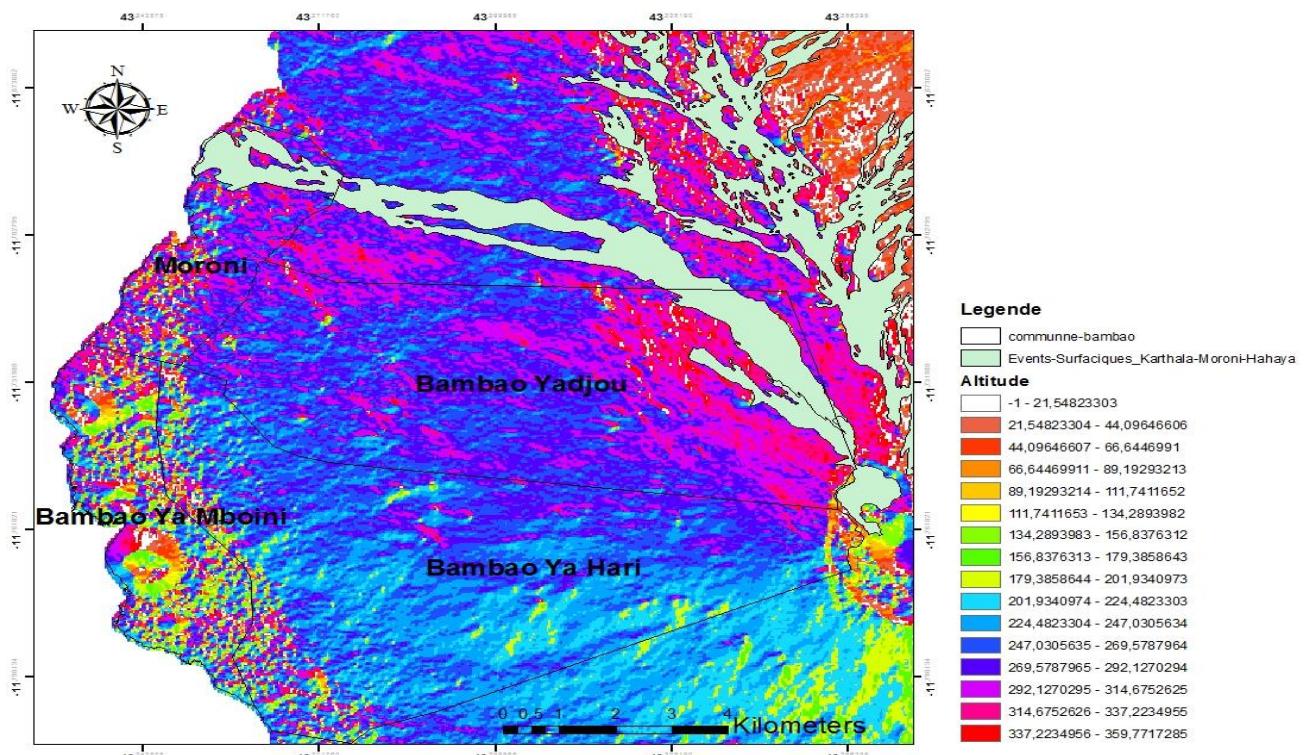


Figure 8. Carte des Events surfaciques_Karthala_Moroni_Hahaya. Produit par l'auteur

VIII.1- L'équation des enjeux et risques

Le risque est le produit de l'aléa avec l'enjeu (risque = aléa x enjeu).

Les enjeux englobent toute chose que l'on risque (biens de l'Homme) une situation vis-à-vis d'un aléa. Aussi, il faut considérer toutes les infrastructures routières et autres, les champs de cultures, points névralgiques ayant un intérêt économique (industrie), le positionnement des habitats. Une grande partie des terrains agricoles situés sur les flancs du Karthala, sont susceptibles d'être affectés par les coulées de lave à venir. Le sol occupé par la coulée est une terre perdue pour des longues années, avant la genèse d'un sol cultivable dans les zones affectées. En effet, les coulées de lave provoquent une calcination totale de la fraction organique du sol. Cette destruction du sol conduira à une perte considérable pour les potentialités agricoles de l'île.

L'hypothèse qui inquiète le plus les autorités comoriennes reste celle d'une coulée atteignant Moroni ou Hahaya, les deux zones d'enjeu majeur de la Grande Comore. Bien qu'éloignées du sommet et des rift zones, elles sont potentiellement exposées aussi bien à l'ouverture d'évents excentriques proches qu'à des coulées de lave pouvant parcourir de grandes distances, entretenues notamment dans des systèmes de tunnels, tels que ceux, nombreux, qui existent déjà sur l'île. Un des exemples les plus significatifs est celui de la coulée de Hahaya en 1858. Le dyke⁵ d'alimentation parcourut 27 km selon la rift zone nord avant d'alimenter une fissure éruptive de plus d'1,5 km de long en amont de l'emplacement de l'actuel aéroport. La coulée émise, longue de 5 km et au sein de laquelle trente-deux tunnels ont été détectés, a rapidement atteint la zone littorale. De nos jours, une telle coulée endommagerait gravement les structures de l'aéroport. Il y a 159 ans de cela, une coulée, longue de 13 km et émise depuis la zone sommitale du Karthala, menaçait Moroni avant de finir en mer.

⁵Le dyke : veine de roche magmatique, formant une arête ou une dépression à la suite de l'érosion.

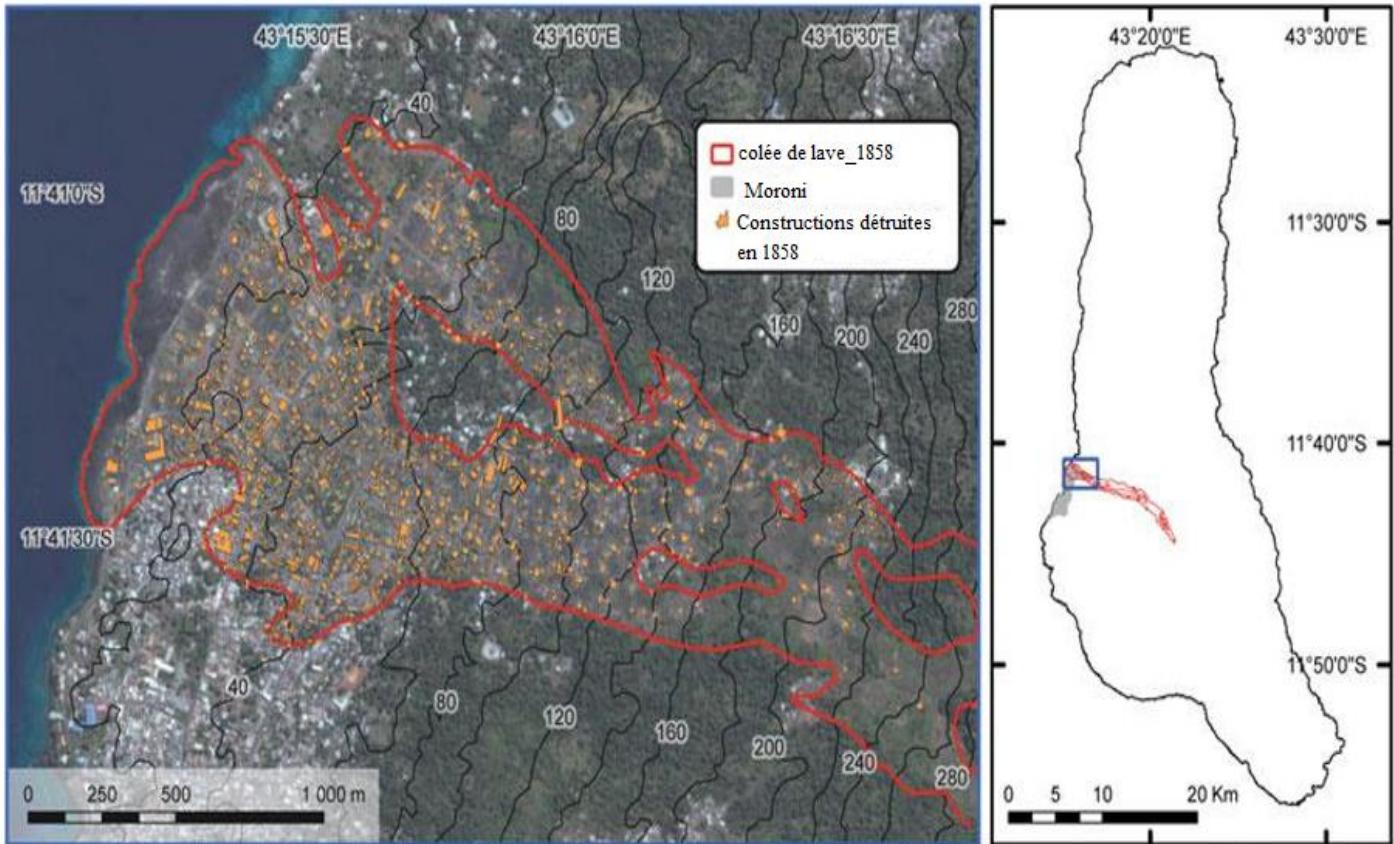


Figure 9. Coulée _ Moroni - Hahaya de 1859. Reprduit par l'auteur

Remarques : en rouge, une coulée, longue de 13 km et émise il y'159 ans de cela, émise depuis la zone sommitale du Karthala, menaçait Moroni (Ici en couleur blanchâtre, étant la Capital des Comores , donc un enjeux essentiel) avant de finir en mer.

Elle est bien connue de tous les habitants de la capitale car elle a donné son nom au quartier envahi par les laves et aujourd’hui fortement peuplé : « Koule ».

Moroni, littéralement ville “au cœur du feu”, abrite aujourd’hui l’essentiel des enjeux recensés en Grande Comore : commerces, bâtiments administratifs, centrales électriques, réserves d’hydrocarbures, port, réseau d’adduction d’eau... Le Plan de Préparation et de Réponse à l’Urgence de l’Union des Comores, adopté en 2004, a été très largement axé sur le risque volcanique. Il se focalise notamment sur le scénario d’une coulée de lave atteignant Moroni, dont la probabilité est évaluée à 50%. Selon le Plan, elle toucherait 75.000 personnes, engendrerait des déplacements rapides et massifs de population, la destruction des infrastructures publiques et des réserves alimentaires, ainsi que des pertes en vies humaines : le chaos socio-économique. La priorité serait de pouvoir fournir aux personnes affectées une assistance dans les trois heures qui suivent le début de l’éruption et pour deux semaines de façon autonome, tout en mobilisant l’assistance internationale afin d’assurer une continuité dans

l'aide d'urgence et d'établir des conditions adéquates pour la réinstallation des populations sinistrées. Le document prévoit les modalités de relogement et le stockage d'aliments et de produits de première nécessité. Tout est parfaitement planifié. Si ce n'est qu'il n'existe, à l'heure actuelle, aucun de ces hypothétiques stocks dans le pays et qu'il est fort probable que de nombreuses difficultés organisationnelles seraient rencontrées.

Reste l'hypothèse d'une coulée sur Hahaya, qui abrite l'aéroport international de l'Union.

CHAPITRE IX- EVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITE AUX INSTABILITES DE TERRAIN

L’élaboration de la carte du risque volcanique est basée sur les critères suivants :

- Les aléas de cendre et de coulée de lave ;
- Les aléas de coulée de boue ;
- La fréquence éruptive ;
- Les émanations de gaz ;
- La direction des vents, la topographie (pente), la végétation ;
- Les enjeux (biens, infrastructures, habitats, propriétés, position des villages par rapport aux aléas).

Caractérisation et détermination des facteurs de prédictions par la Cartographie des aléas :

IX.1 - Cartographie de l’aléa « coulée de lave »

1- risque maximum ; 2- risque élevé ; 3- risque moyen ; 4- risque faible ; 5- risque nul.

L’aléa « coulée de lave » est cartographié en prenant en compte les fissures éruptives et leur positionnement, les cônes de scories (évents), la fréquence des éruptions, les rifts zones, la végétation et la pente.

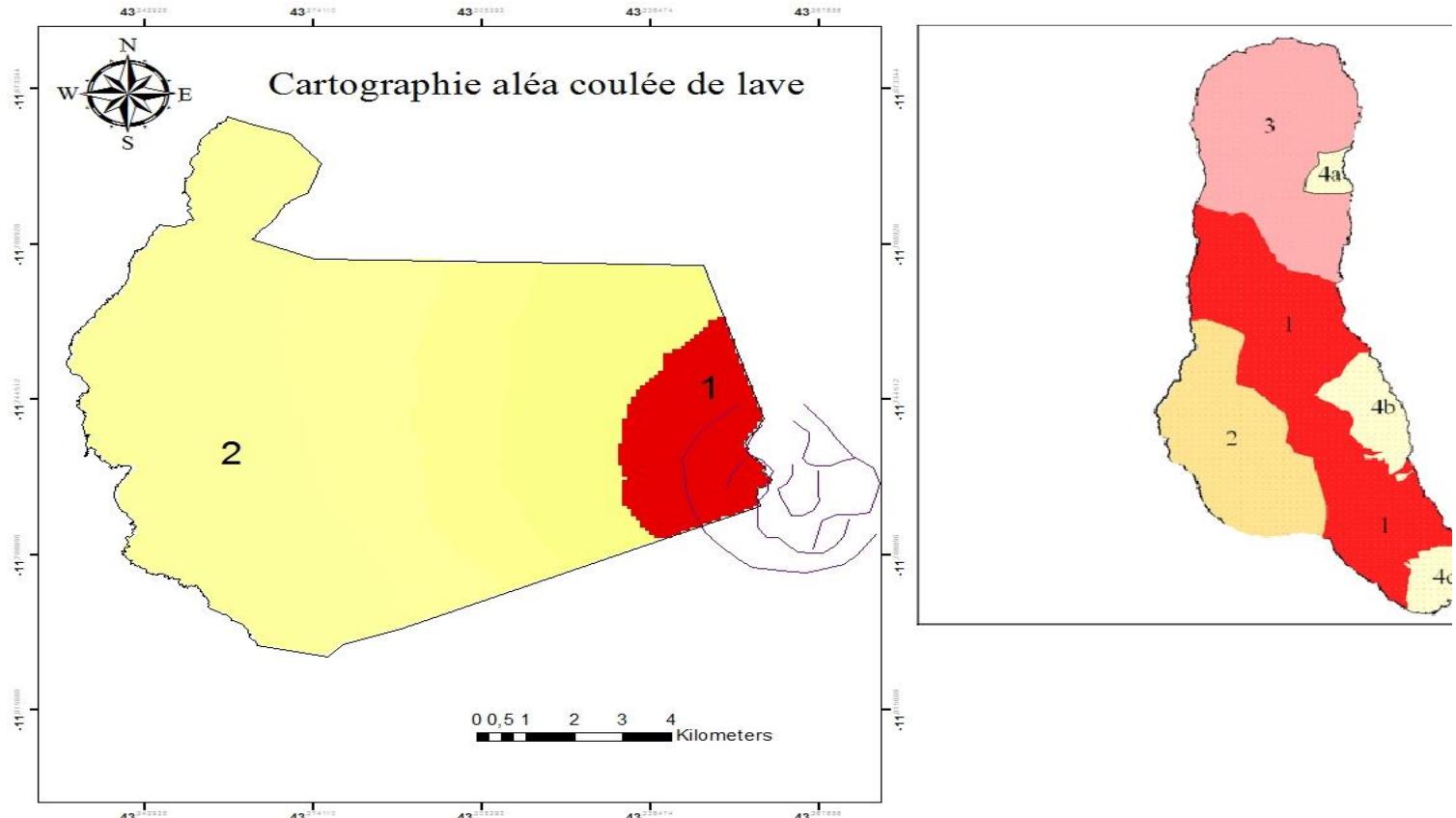


Figure 10. Cartographie aléa coulée de lave. Par l'auteur

1 : aléa très élevé. 2 : aléa élevé. 3 : aléa moyen. 4 : aléa faible

Le niveau d'aléa est gradué de la manière suivante :

1 : aléa très élevé comprend la zone sommitale et les rifts zone où la fréquence d'éruption est très élevée

2 : aléa élevé comprend la zone ouest où les éruptions latérales (comme Singani) sont récentes. Cette zone est sollicitée par une sismicité importante traduisant une migration de magma vers la zone centrale.

3 : aléa moyen concerne le massif de La Grille. Bien que cette zone n'ait pas enregistré une éruption pendant des millénaires, mais les études récentes (Bachèlery et Coudray, 1995) ont montré que des éruptions nouvelles ont eu lieu sur ce volcan. Ce volcan est riche en cônes de scories de taille importante.

4 : aléa faible concerne les zones Sud de Mbadjini (4a), Dimani (4b) et Mbéni (4c). Ces zones sont protégées par les remparts contre un envahissement de coulée de lave et les éruptions sont rares. Toutefois, si une grande éruption se produit au sommet et suffisamment nourrie, la coulée peut ennoyer la zone 4b.

IX.2. Cartographie de l'aléa cendre volcanique

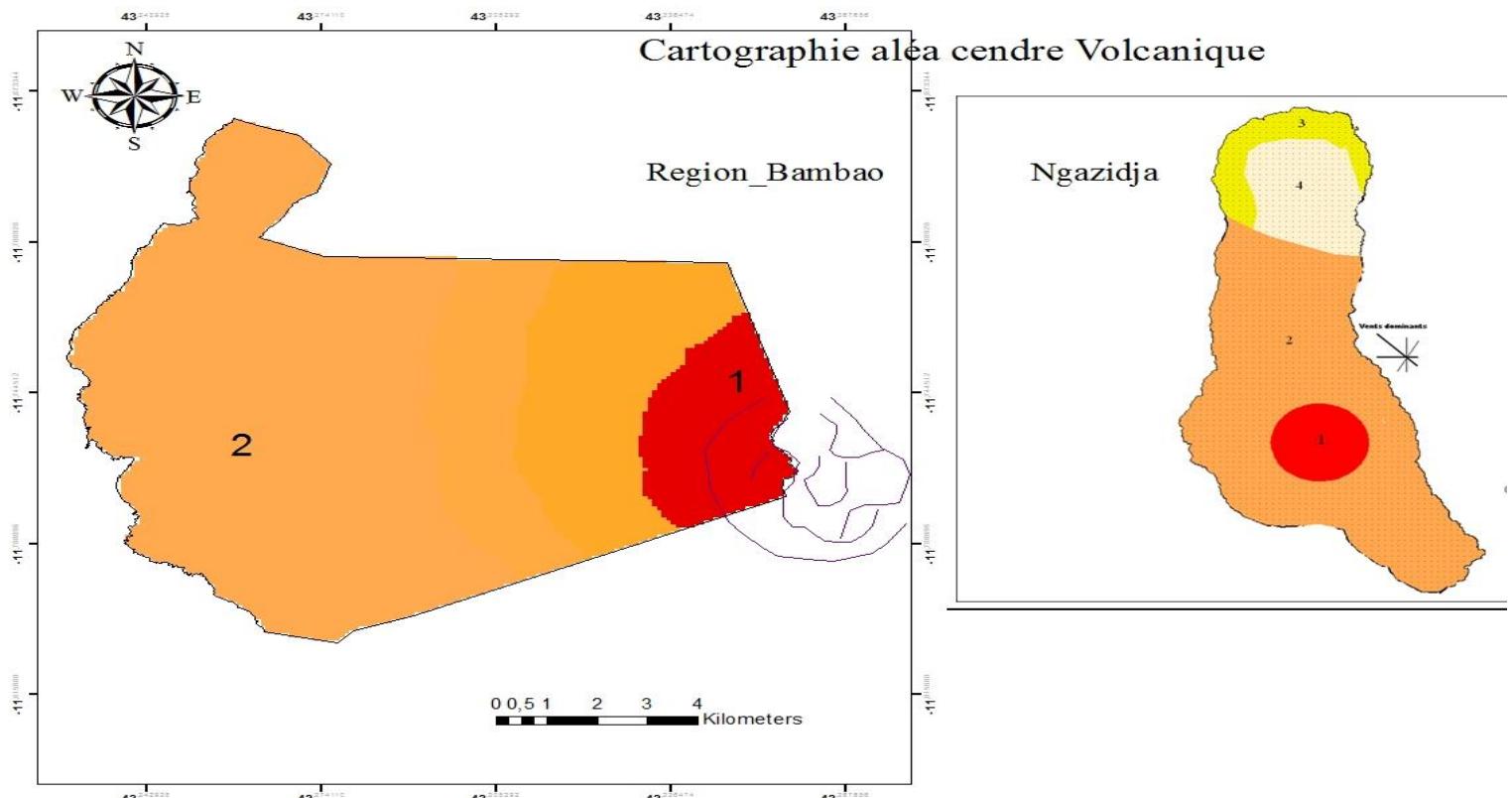


Figure 11. « Cartographie aléa « cendre Volcanique ». Produite par l'auteur

1 : aléa très élevé. 2 : aléa élevé. 3 : aléa moyen. 4 : aléa faible

La cartographie de l'aléa « cendre volcanique » a pris en compte les paramètres direction des vents, les zones arrosées par la cendre lors des éruptions, le positionnement des appareils susceptibles de produire des éruptions à caractères explosifs et la fréquence de ce type d'éruptions.

La graduation de l'aléa cendre volcanique se fait comme suite :

1 : aléa très élevé. La zone 1 englobe le sommet du volcan qui est par excellence le siège des éruptions explosives depuis l'arrivée, au moins, de l'Homme.

2 : aléa élevé. Quelques soit l'éruption explosive qui se produit au sommet, cette zone reçoit les émanations de gaz et/ou la retombée de cendres. De plus, la côte ouest est entourée de deux appareils volcaniques (Mwandzaza et Ikon) susceptibles d'entrer en éruption.

3 : aléa moyen. Cette zone regroupe les appareils de type « maar » (Lac salé et appareil adventif et les cônes de Uwellah et de Ipvwani) qui ont jadis projeté des cendres dans les environs.

4 : aléa faible. La zone 4 reçoit les cendres issues du sommet et transportées par les vents.

IX. 3 - Cartographie de l'aléa « sismicité »

Celle-ci concerne les zones dans lesquelles la population ressent les tremblements de terre. Ainsi, la zone 1 est la zone sommitale qui est le siège d'un grand nombre de séismes et des éruptions. La zone 2 est classée comme zone préférentielle de passage du magma vers le sommet. Dans ce secteur, la population a, à plusieurs reprises, ressenti des secousses, même en dehors des crises sismiques.

Alors que dans la zone 3, la population ne les ressent que lorsqu'il y a une activité éruptive ou une grande crise.

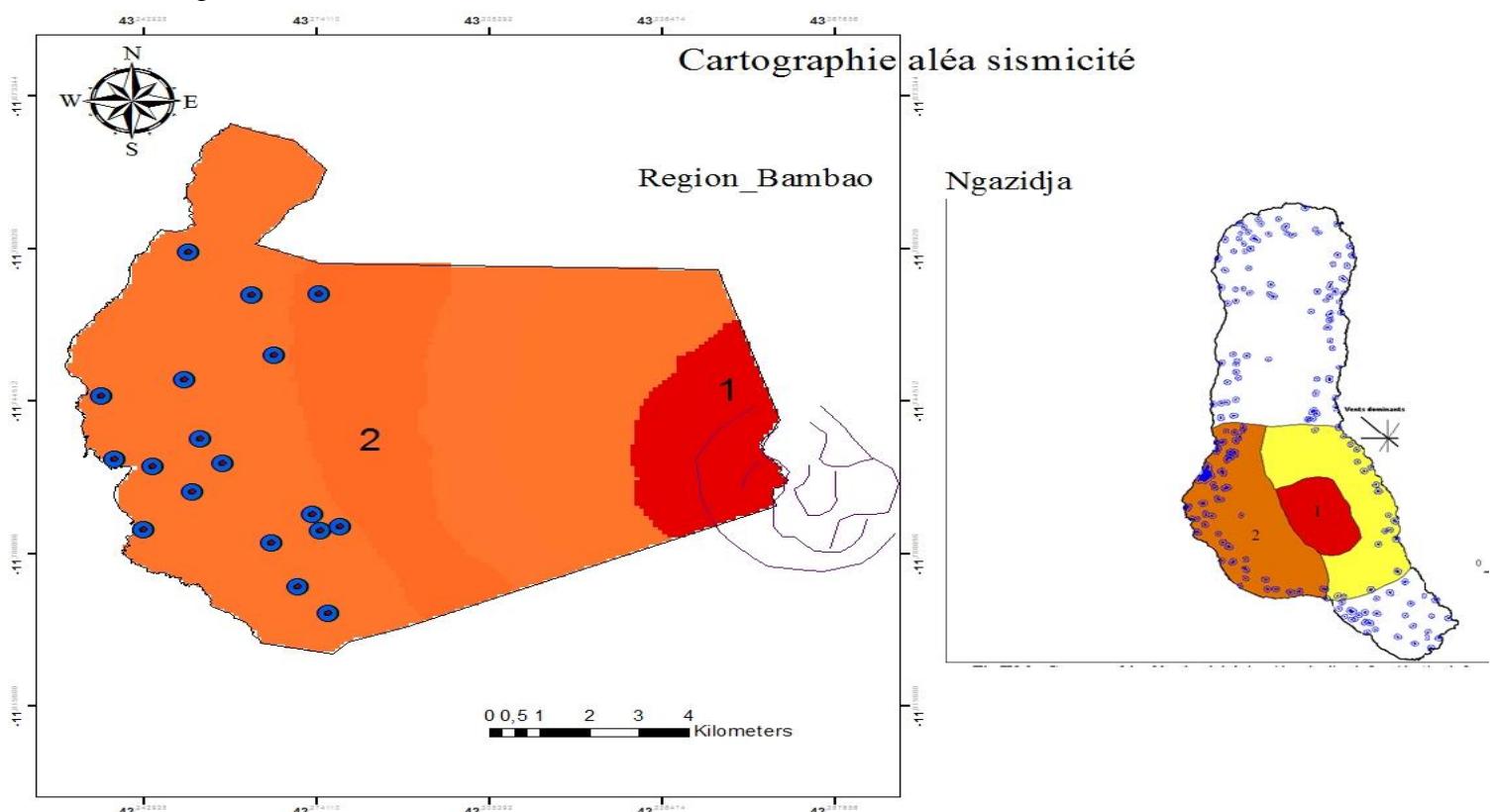


Figure 12. Cartographie aléa sismicité. Produite par l'Auteur.

1 : aléa très élevé. 2 : aléa élevé. 3 : aléa faible. Les ronds bleus représentent les villes et villages et leurs extensions éventuelles.

IX.4. Cartographie de l'aléa « coulée de boue »

Cette cartographie de l'aléa « coulée de boue » consistait tout d'abord, à passer en période de pluie, dans les ravines et vérifier laquelle d'entre elles est pérenne ou temporaire ; suivre l'extension des ravines pour en évaluer les effets. Il est à noter que les cours d'eau de l'île Grande Comore ne sont pas tous pérennes ; certains sont temporaires comme ceux rencontrés au Sud et à l'Est de l'île.

Les ravines tracées sur la carte sont formées essentiellement de coulée de basalte servant de substratum. Les autres éléments rencontrés dans ces cours d'eau sont, pour l'essentiel, formés de cendres volcaniques remobilisées depuis le sommet du volcan Karthala jusqu'à la mer.

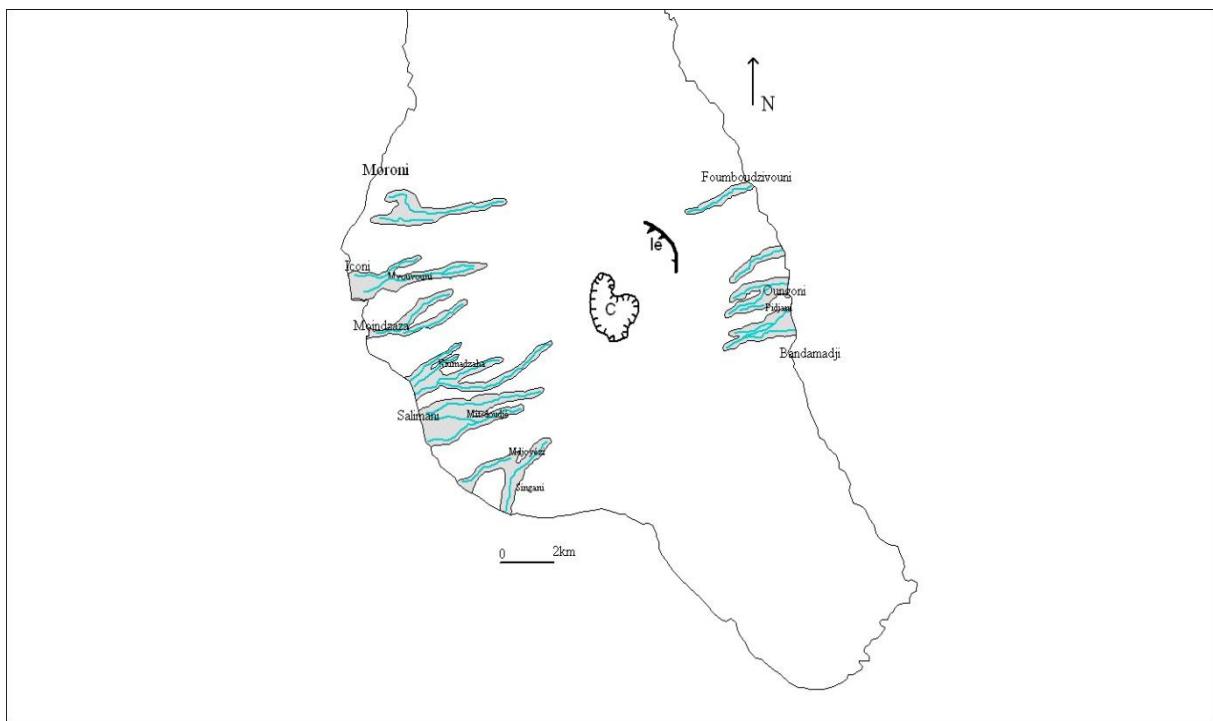


Figure 13. Cartographie aléa « coulée de boue ». Produite par l'auteur.

Les traits bleus représentent les ravines. C : zone de la caldera. Le : zone d'effondrement. Moroni : Ville.



Photo 13. Coulée de basalte constituant le lit de la ravine. (Pont Nyumadzaha-Hambu).

Cliché archive CNDRS

En Grande Comore, ces sont les régions de Dimani, Hambu, Bambao, qui sont les plus touchées. Il s'agit là d'un phénomène récent, dû essentiellement aux lahars, liés aux éruptions explosives du Karthala. Le contexte volcanique s'est traduit dès la fin des éruptions, et durant plusieurs années, par des écoulements importants. Ils ont mobilisé les dépôts et engendré des lahars importants transportant les cendres, via les ravines sur les flancs du volcan, vers la zone basse. Ceci a contribué à imperméabiliser le fond des ravines et à limiter, là encore, les infiltrations, conduisant à des débordements.

Les constats faits le long des ravins, illustrent des dégâts occasionnés par d'importants transports solides dans celui-ci lors des pluies d'avril 2012. Ces roches et sédiments se sont déposés sur des épaisseurs parfois importantes, jusqu'à près de deux mètres. Le contexte volcanique particulier à donc un impact sur les écoulements à plusieurs titres :

- les dépôts consécutifs aux éruptions volcaniques imperméabilisent les sols. Lors de fortes pluies le ruissellement est donc bien plus important, occasionnant des dégâts plus conséquents.

- les dépôts s'accumulent également en fond de ravines, réduisant ainsi les capacités d'évacuation en réduisant notamment la section du lit.
- les dépôts sont eux-mêmes charriés par les écoulements, formant des lahars. Ce transport solide augmente d'autant les dégâts.

CHAPITRE X - LES ELEMENTS DE SIMULATION D'UNE ERUPTION FUTURE ET DE DIAGNOSTIC DES VULNERABILITES

La vulnérabilité aux aléas volcaniques concerne directement l'île de la Grande Comore, sur laquelle le volcan est encore actif ; ce dernier s'est manifesté sur le dernier siècle avec une fréquence éruptive de 11 ans en moyenne.

X.1. La fréquence d'éruption du Karthala

Les rifts zones et la caldeira sont les structures les plus productives (89.47% des éruptions de 1833 à 1977) du Karthala. La côte Ouest est pourvue d'un nombre important de cônes et de coulées dont la morphologie indique un volcanisme actuel. Le plus récent d'entre eux est celui érigé lors de l'éruption magmatique de 1977. La fracturation liée à cette zone pourrait être assimilée à des rifts zone secondaires.

X.2. Simulation et Hypothèse

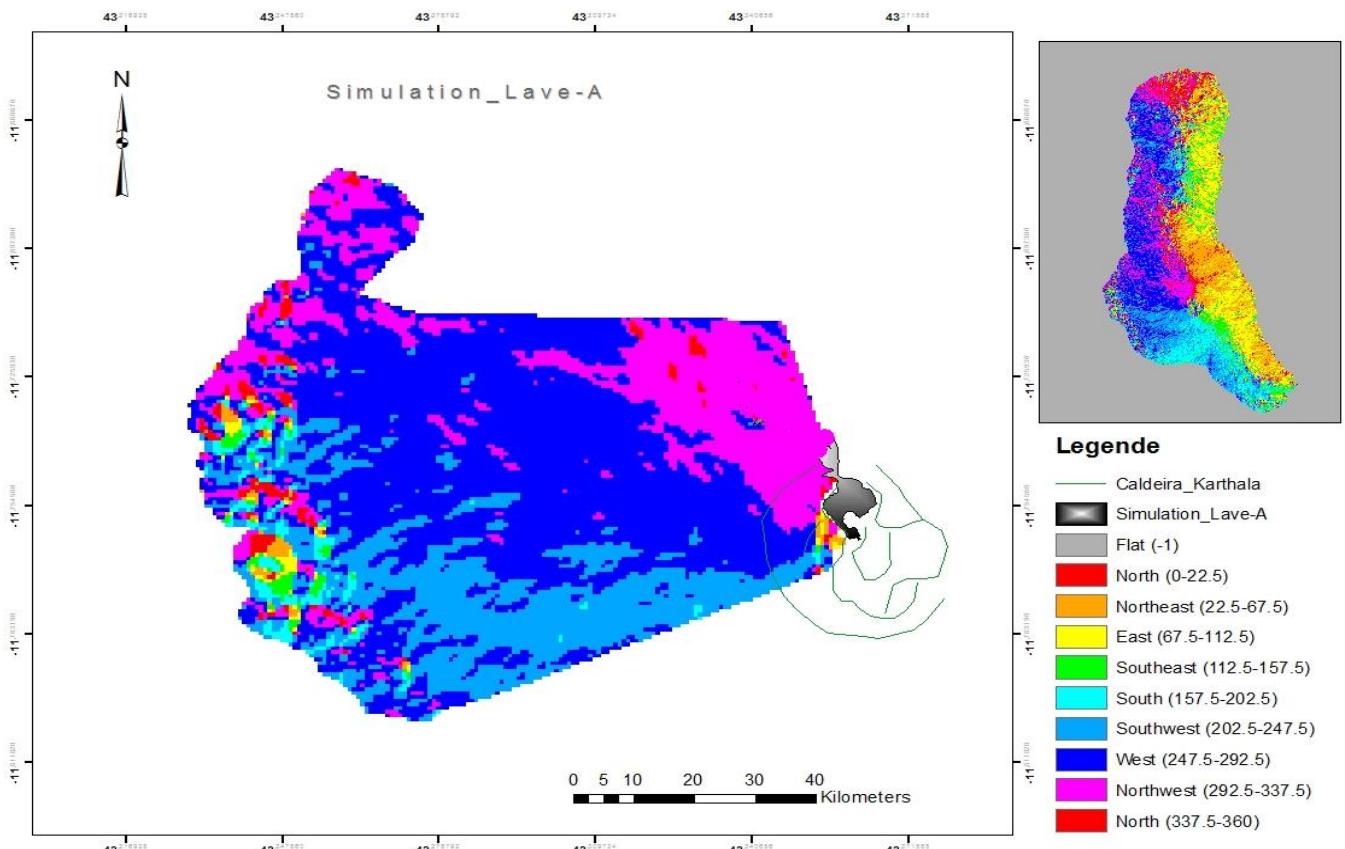


Figure 14. Simulation d'une éventuelle éruption produite grâce à la carte des données des Events de la Grande Comore. Carte produite par l'auteur

Simulation A : la coulée est déversée au Sud de la caldeira. D'après les données des Events et des données existantes (Nassor, 2001) Quel que soit le débit, la lave tombera dans le fond du cratère « Shugu Shahale ».

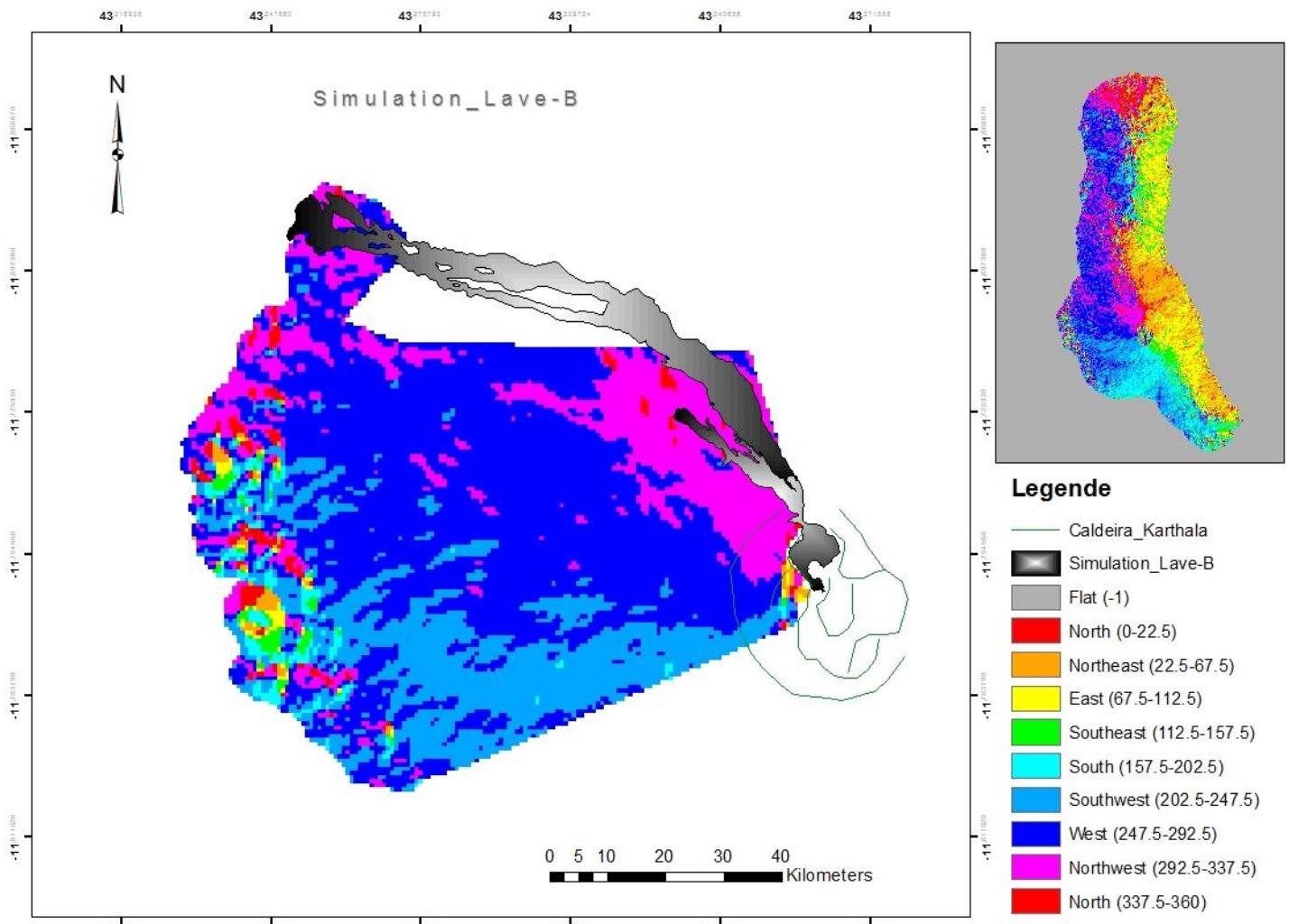


Figure 15. Simulation d'une éventuelle éruption _ produit grâce à la carte des données des Events de la Grande Comore. Par l'auteur

B : la coulée déversée dans la caldeira suit la porte d'Itsandra en direction de Moroni.

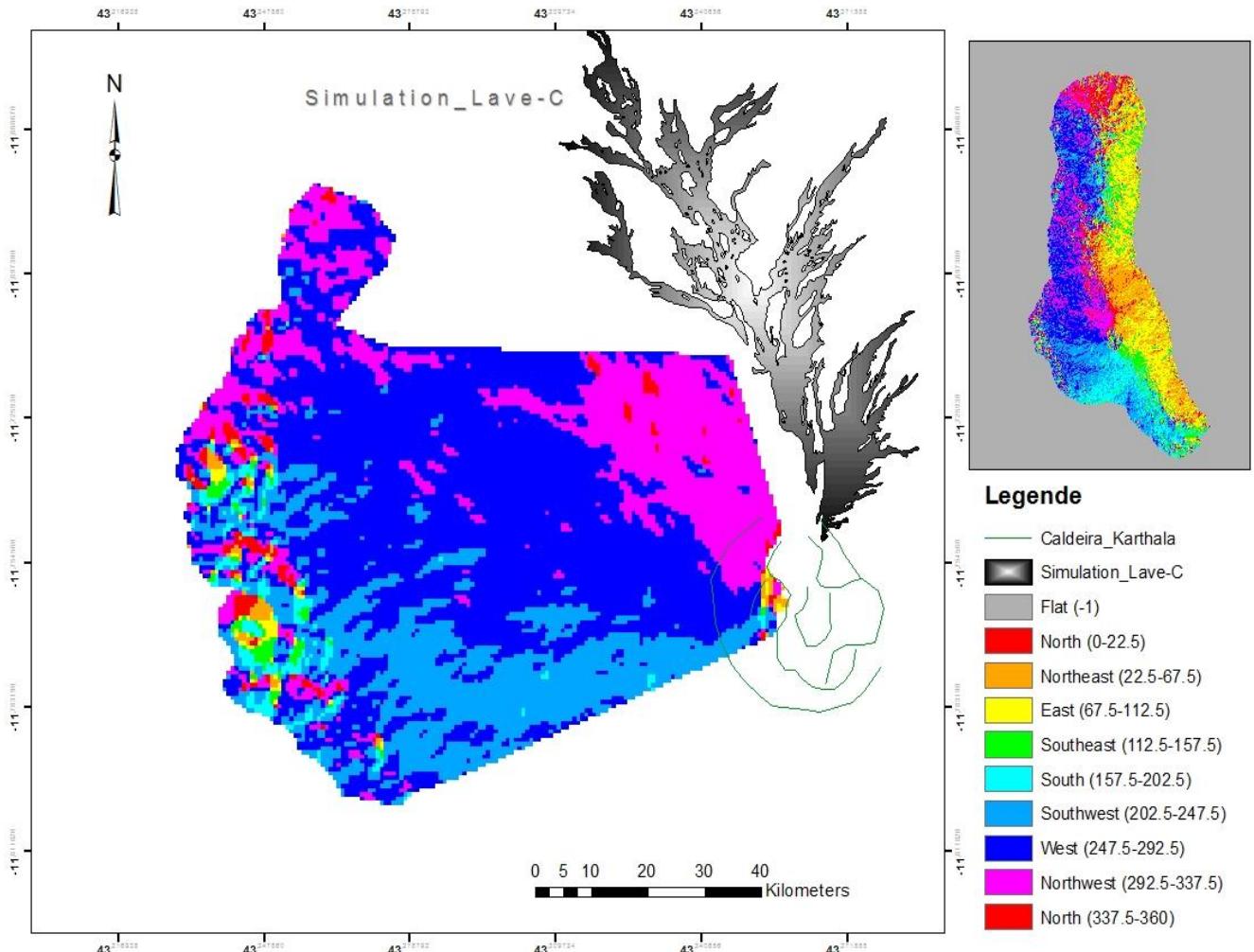


Figure 16. Simulation d'une éventuelle éruption produit grâce à la carte des données des Events de la Grande Comore. Par l'auteur

C : la coulée sera déversée en dehors de la caldeira, et suivra la ligne de plus grande pente vers la mer.

La simulation des trajectoires probables de coulée a été réalisée uniquement sur le massif du Karthala. La simulation de prédition ou de probabiliste, sur une topographie modélisée par le MNT (Model Numérique de terrain) du massif du Karthala, a permis de délimiter plus précisément les zones 1 et 2 qui vont être proposées au sur le point Ces cas sont observés au Karthala à l'Ouest de la rift zone Nord et à l'Est de la caldeira (Nassor, 2001).

Ainsi les schémas d'éruption qui peuvent intéresser un volcan bouclier tel que le Karthala, constituent un préambule à la définition du risque volcanique. Ceux-ci ne prédit pas que l'éruption se déroulera d'une telle sorte car, vraiment, peu de données existent ; mais à partir

des observations de terrain, des éruptions décrites récemment on peut dégager les caractéristiques du déroulement des activités phréatiques et phréatomagmatiques et l'activité magmatique fissurelle comme c'est dit dans la première partie.

Le choix fait sur l'évaluation du risque se rapporte sur la présence ou non dans la nature, de l'Homme et de ses biens.

La situation des villages par rapport au massif du Karthala, leur altitude et leur proximité par rapport à des appareils volcaniques (cônes de scories), des événements éruptifs ou des anciennes coulées sont des facteurs à prendre en compte sur l'évaluation de la vulnérabilité aux aléas. En considérant les différents aléas volcaniques séparément, on peut arriver à une vulnérabilité variable d'une région à une autre.

X.3. Cartes des Risques dans l'ensemble de la Grande Comore

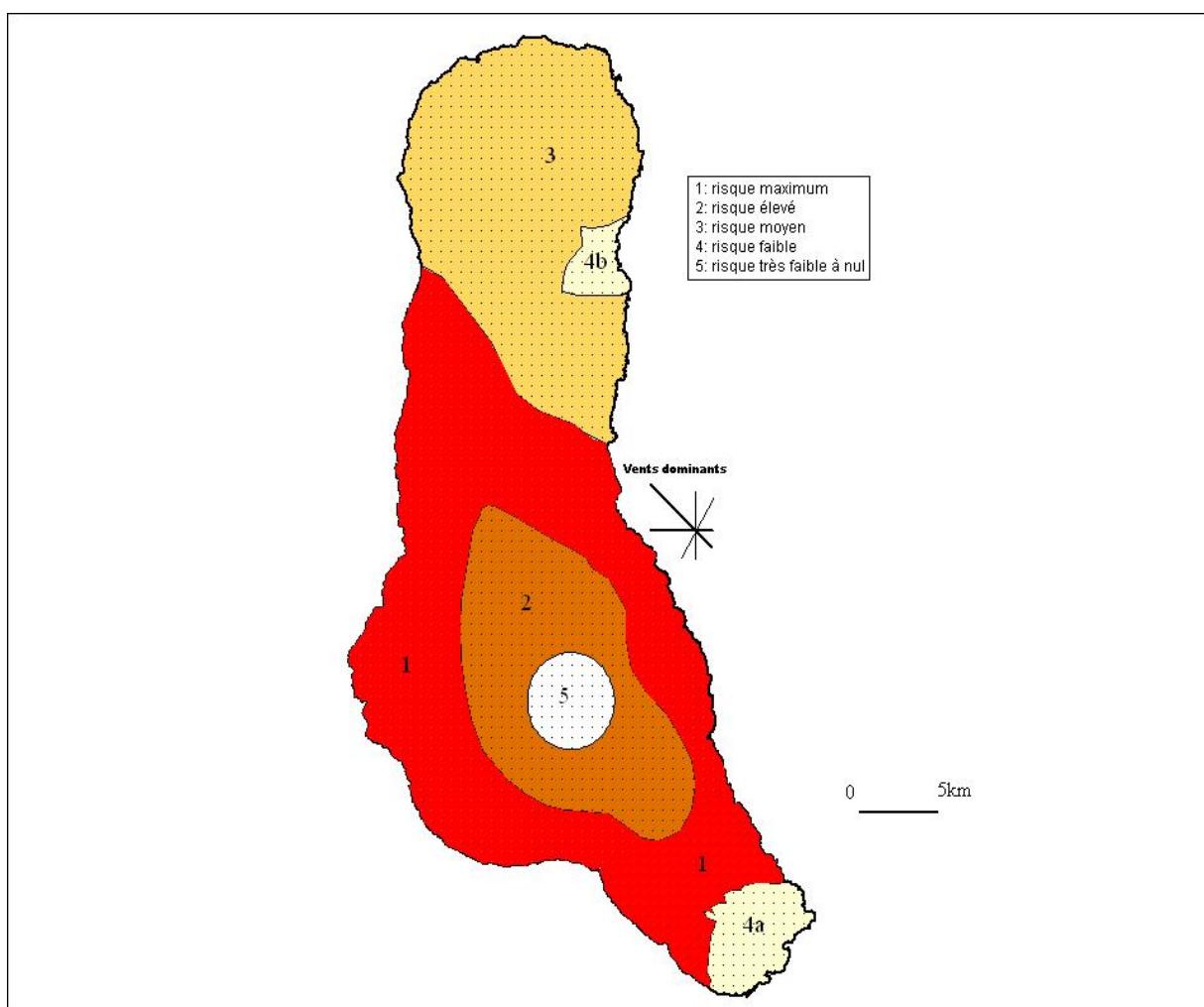


Figure 17. Carte du risque volcanique en Grande Comore. Reproduit par l'auteur

1- risque maximum ; 2- risque élevé ; 3- risque moyen ; 4- risque faible ; 5- risque nul.

Par exemple, au sommet du Karthala (niveau 5) où les aléas Coulées de lave et cendre volcanique sont très élevés, le risque est évalué très faible même à nul, dans le sens où ni l'Homme ni son bien n'y est présent. Cependant, du point de vue environnement, le risque est élevé avec des conséquences directes et visibles (un changement climatique et une modification du paysage importants).

Une éruption paroxysmale dans une zone désertique a moins d'incidence pour l'Homme qu'une petite éruption dans une zone habitée.

Par contre la **zone 1** abrite l'Homme, tous ses biens, et ces deux facteurs font que les aléas y sont élevés, quelques soit leur degré. C'est ainsi que la carte des risques volcaniques a proposé que cette zone est exposée à un risque maximum.

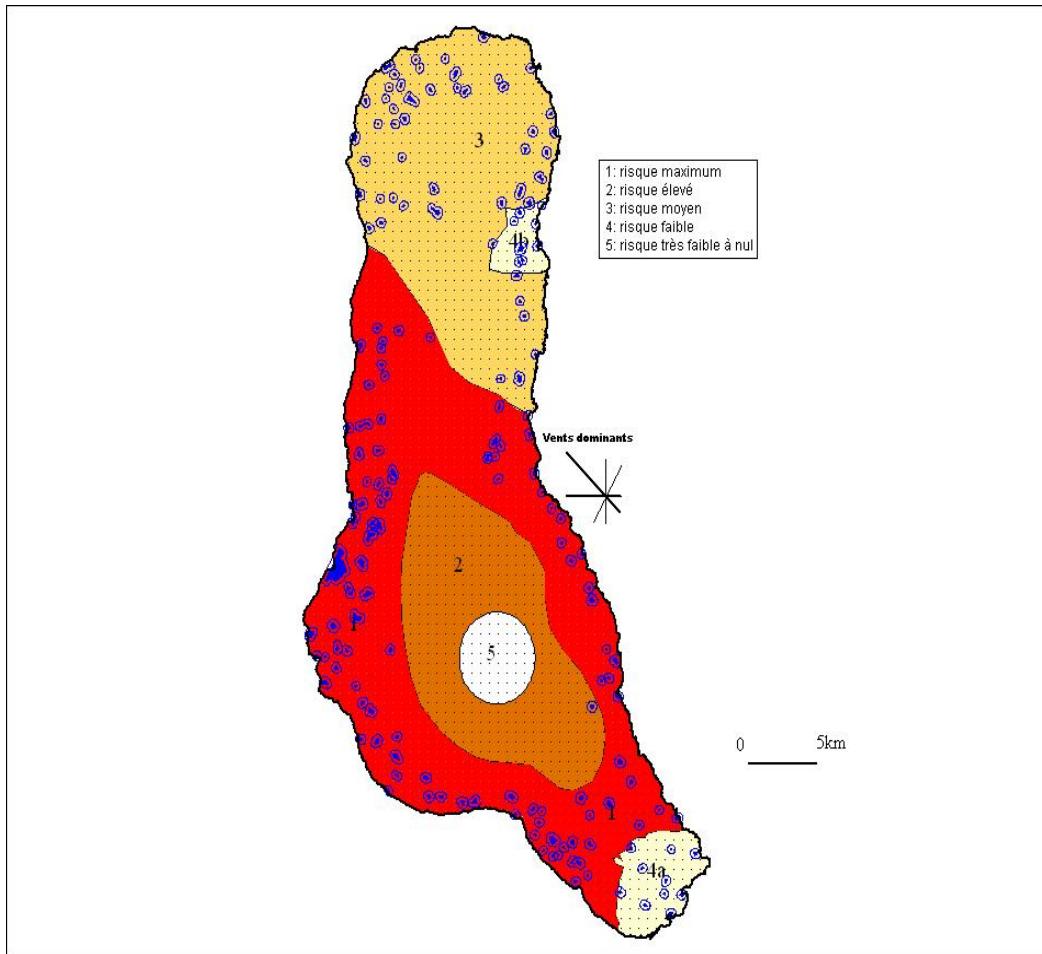


Figure 18. Villes et villages exposés au risque. Reproduit par l'auteur

La zone 2, à aléa élevé regroupe la forêt tropicale, les champs et l'élevage bovin.

La zone 3 est une zone peuplée, représentant beaucoup de potentialités agricoles et d'élevage. Les aléas de cendres et de coulée de lave sont moyens à faibles.

La zone 4, bien que peuplée et représentant une potentialité agricole, elle est à l'abri des coulées de lave, de la sismicité et des retombées de cendres en grande quantité.

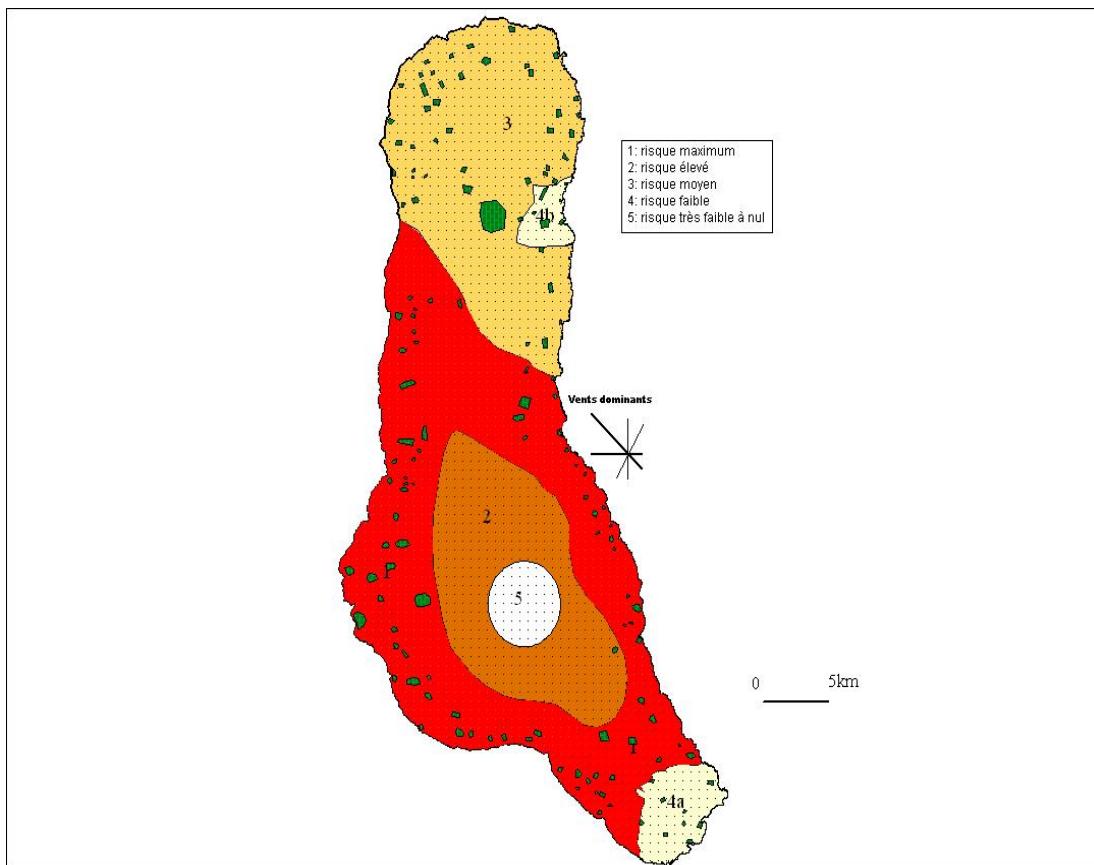


Figure 19. Les champs exposés au risque volcanique. Reproduit par l'auteur

L'évaluation du risque volcanique en Grande Comore, prend en compte tous les paramètres allant de l'aléa volcanique aux enjeux. Il apparaît que la zone sommitale où l'aléa est très élevé, présente un risque très faible à nul. Dans cette zone la vie n'y est pas implantée. Néanmoins, la présence de matériel de surveillance de l'OVK (qui constitue un investissement important, donc un enjeu majeur et a coûté beaucoup de millions de francs), indique que le risque n'est pas tout à fait nul. Contrairement au sommet du volcan, le risque en zone habitée est maximum, même si dans certaines zones du littoral, l'aléa n'est pas très élevé.

Par ailleurs, l'île dispose de ressources naturelles aussi bien au niveau de la faune qu'au niveau de la flore, en milieu terrestre comme en milieu océanique. Les impacts des éruptions du Karthala sur l'environnement naturel sont aussi importants ; ils doivent être prise en compte dans ces travaux de recherche, en vue d'une meilleure connaissance et une maîtrise des effets des éruptions.

Enfin, l'élaboration de la carte des risques constitue une base pour la réduction du risque de catastrophes liées aux éruptions du Karthala et dans la prévention par la perspective de la mise

en place d'une politique d'aménagement. Elle doit être prise en compte dans la préparation pour les opérations de secours

CHAPITRE XI- NAISSANCE ET EVOLUTION DE LA GESTION DES CRISES VOLCANIQUES EN GRANDE COMORE

XI.1. Structures Institutionnelles Pour la réduction des Risques de Catastrophes aux Comores

Aux Comores, les structures existantes qui interviennent directement dans la gestion des risques de catastrophes sont au nombre de huit. Il s'agit de : la Direction Générale de la Sécurité Civil, l'Agence National de l'Aviation Civile et de la Météorologie, l'Observatoire de Volcanologie du Karthala, la Direction Générale de l'Environnement et de Foret, la Direction Nationale de l'Aménagement du Territoire, de l'Habitat et de l'Urbanisme, le Ministère de l'Enseignement supérieur, de l'Education de base et de la recherche et le Croissant Rouge Comorien. Ces structures ont connu dans cette dernière décennie quelques ajustements recommandés par les différents organismes nationaux et internationaux d'une part, et des différentes orientations dues aux changements de régime politique d'autre part. En effet, la fréquence des catastrophes dans les différentes îles a fait que le pays s'investit de plus en plus dans la gestion de risques de catastrophes.

Dans le cadre structurel de GRC actuel, il est remarqué que la majorité de ces institutions et organismes interviennent surtout pendant les crises. Les activités de phase prévention, préparation et post-crise ne sont pas très exprimés.

Ainsi, les principales structures nationales intervenant dans la réduction des risques de catastrophes sont :

- La Direction Générale de la Sécurité Civil (DGSC)
- L'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACM)
- L'Observatoire Volcanologique du Karthala (OVK)
- La Direction Générale de l'Environnement et de la Forêt (DGEF)
- La Direction GENERALE DE la Santé (DGS)
- La Direction Nationale de l'Aménagement du Territoire, de l'Habitat et Urbanisme (DNATHU)
- Le Ministère de l'enseignement supérieur, de l'éducation de base et de la Recherche (MEN)
- La Croissant Rouge Comorien (CRC)
- Garde-côte Comorienne (GC)

XI.2. Les leçons tirées de l'activité éruptive du Karthala de 1977 à 2005

Quelques évènements éruptifs récents ont constitué une expérience en matière de gestion des crises volcaniques et contribué à façonner les politiques actuelles de gestions des risques et crises aux Comores.

1991, 2003 et 2005 étaient les dates de la familiarisation des comoriens avec les crises sismiques et le volcanisme explosif. L'éruption de 1991 est importante en termes de protection civile car c'est la première à être instrumentée par l'OVK grâce aux réseaux de déformations et sismiques mis en place respectivement en 1986 et 1988. Elle ouvre la voie à une meilleure compréhension du fonctionnement du Karthala alors qu'aucun système d'alerte ou d'intervention n'existe encore.

En 1992, un rapport sur la sécurité régionale dans l'océan indien (COI 1992) souligne la nécessité qu'il y a à mettre en place une réglementation, une planification, une dotation en matériel et en personnelle une protection civile, et le renforcement de la surveillance du Karthala.

Adopté en novembre 2004 dans l'union des Comores, le plan national pour la Préparation et la réponse aux avis d'Urgences, vise à « assurer une préparation et une réponse face aux urgences qui soient coordonnées et efficaces, et qui mettent tous les moyens disponibles au sein des acteurs étatiques et non étatiques, en respect des principes humanitaires ». Ce plan comprend un axe de 37 pages, dédié spécifiquement à la gestion de crises volcaniques. Les autorités nationales mettent par ailleurs en place une Direction Nationale de la Protection Civile (DNPC), chargée de l'évacuation, de l'évaluation des besoins et de la gestion de crises en cas d'évènement grave sous la direction du préfet de la zone concernée, et sous tutelle du Ministère de la défense de l'Union.

La gestion des éruptions de 2005 à suscité de vives critiques de la presse et de la population ; exprimant un sentiment d'abandon par l'Etat autant que l'impuissance face aux éruptions.

Les responsables des institutions en charge de la gestion des crises pointent eux-mêmes les difficultés rencontrées ; contestent pour certains l'inefficacité du PNPRU jugé trop théorique.

La DNPC n'ayant montré aucune capacité de réaction en novembre 2005, la création d'un Centre des Opérations de Secours et de Protections Civile (COSEP) est entérinée le 6 mai 2006 (Décret 06-051/PR). Le centre est placé sous le contrôle du Chef d'Etat-major de l'armée nationale de développement des Comores.

En 2006, ce centre reste virtuel : il sera physiquement implanté en janvier 2007 à l'ancien aéroport de Moroni.

XI.3. Système d'Information et d'Alerte Volcanique en Grande Comore

La surveillance des activités volcaniques, notamment celle du volcan Karthala à la Grande Comore est assurée par L'Observatoire Volcanologique du Karthala (OVK). Le réseau actuel de surveillance se base sur huit stations sismiques, dont seulement six sont fonctionnelles. Les stations de surveillance fournissent de l'information sur les mouvements magmatiques au sein du volcan et indiquent les périodes d'activité accrue. L'information collectées et traitées par OVK qui déclenche l'alerte en cas d'activités menaçantes, selon le schéma suivant.

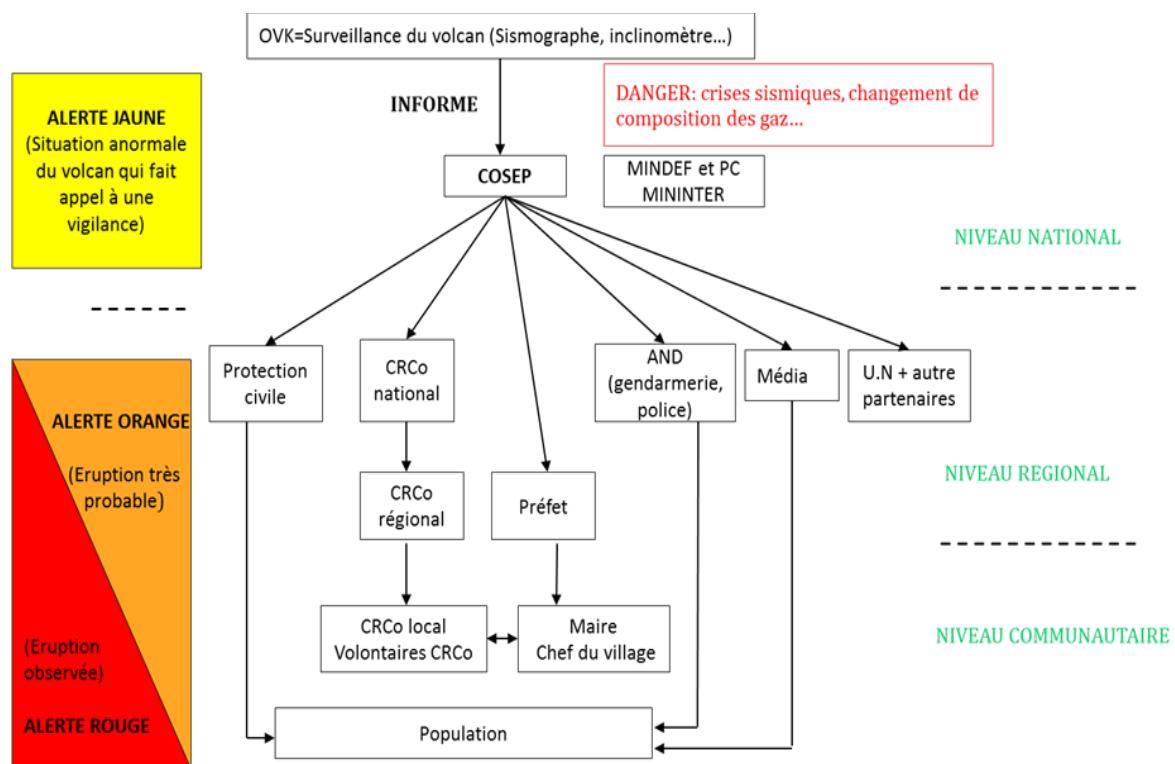


Figure 20 : Schéma de la circulation de l'information et de l'alerte volcanique. Source : Proposition de Stratégie Nationale de Réduction de Risques de catastrophes aux Comores – SNRRC_ version définitive – Mai, 2015

Les principales contraintes qui menacent le bon fonctionnement de ce réseau de surveillances sont :

- *Manques de ressources financières pour la maintenance et l'entretien des stations* : Les stations sismiques sont sujettes à des pannes (dues à la foudre, par exemple) mais aussi à des vols ou à des dégâts. Six est le minimum absolu pour fournir des informations clés sur les activités volcaniques.
- *Lacune technique* : il est difficile de prévoir exactement comment ces activités pourront évoluer. L'heure et le lieu d'une éruption ne pourront pas toujours être prévus et un certain jugement est nécessaire afin de prendre les décisions qui s'imposent sur l'émission des alertes.
- *Manque des ressources humaines* : L'OVK a actuellement trois employés – le responsable de l'Observatoire, un électronicien et un géophysicien contractuels – le minimum pour assurer le bon fonctionnement du système de veille.
- *Réseau d'échange d'expertise régionale et internationale très limités* : L'OVK a des contacts fréquents avec l'Observatoire Volcanique du Piton de la Fournaise (La Réunion) et l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris) mais pas avec d'autres Observatoires.

CONCLUSION

L'étude sur la contribution à la gestion des risques de catastrophes naturelles : cas de l'éruption volcanique d'Avril 2005 en Grande Comore, a permis de faire l'inventaire des risques naturels aux Comores. Cette étude ne prétend pas être ni parfaite ni complète. Elle ne prend pas en compte les détails de la phase de la reconstruction et du retour à la vie normale. Les réponses aux questions qu'elle pose la ramènent plutôt à la phase d'Analyse, de la prévention et de la préparation. Elle ressort qu'il existe une insuffisance des outils de prévention et de préparation et un énorme déficit au niveau recherches scientifique sur le domaine des risques naturels aux Comores. Cela se traduit par l'incapacité d'appliquer les plans qui existent, de mettre en place des systèmes d'alerte précoce efficace, d'informer les populations des situations de l'évolution des évènements et de maintenir les infrastructures opérationnelles pendant les crises. Cette étude a permis de passer en revue les structures de gestion des risques de catastrophes aux Comores et des communautés vulnérables. Elle a permis de faire ressortir la recrudescence continue des activités éruptives en Grande Comore et les risques associés dans les versants qu'elles affèrent. Les dommages et les pertes matériels et immatériels causés pendant les éruptions résultent de la vulnérabilité liée à l'insularité, la forte exposition aux aléas volcaniques et d'une économie vulnérable. Les risques d'isolement des communautés touchées en cas de catastrophes volcaniques sont élevés. Pourtant, les populations n'ont pas de connaissances adéquates sur le sujet, ce qui entraîne des comportements inappropriés lors de leur occurrence. Un fort pourcentage des ménages dépendant d'une agriculture de subsistance, le manque de stocks aggravent les situations pendant les crises. Les infrastructures routières sont très vulnérables, souvent coupées, elles renforcent l'isolement des communautés touchées par les aléas.

Les écosystèmes naturels exposés aux éruptions répétitives, se dégradent à chaque épisode. Ils risquent de ne plus avoir le temps suffisant de se restituer. Les sols perdent la fertilité, ce qui compromet une gestion durable des terres comoriennes en plus des mauvaises pratiques agricoles. Les lahars conduisent à la sédimentation des rivières et à la dégradation des nappes phréatiques dans tout le pays.

La cartographie du contexte volcanique des Comores, a permis de mettre en exergue la récurrence des mésaventures volcaniques intenses et catastrophiques, ressenties dans les localités côtières, et de plus en plus renforcés en Est et au Sud – Est de l'île.

Pour parvenir à une gestion efficace des aléas volcaniques aux Comores, il paraît urgent pour le pays d'adopter une stratégie de renforcer les outils nécessaires et la coordination des structures nationales et régionales de prévention et de gestion de catastrophes ainsi que de formation et de recyclage du personnel.

Malgré les résultats des recherches sur les éruptions volcaniques en Grande Comore, à notre niveau il est improbable d'être précis sur les conditions prévisionnelles et géotectoniques qui expliquent avec exactitude la variabilité volcanique en Grande Comore et à quel rythme évolueront les évènements dans le futur. Les approches scientifiques et opérationnelles de la gestion des crises étant difficilement dissociables, nos travaux ouvrent des perspectives dans ces deux champs. En dehors des recommandations déjà suggérées, il semble nécessaire de rappeler quatre points fondamentaux.

- Tenir compte du contexte culturel local et des représentations.
- Intégrer systématiquement les populations locales dans la gestion des risques.
- Incrire la préparation aux crises dans une optique de développement durable
- La nécessité de ne pas opposer les paradigmes établis dans le domaine de la gestion des risques.

BIBLIOGRAPHIE

1. **FRANCK L.** et **DE BELIZAL E.** Les effets géographiques des éruptions volcaniques. III Chapitres. Pôle de recherche pour l'organisation et la diffusion de l'information géographique (CNRS UMR 8586).<http://echogeo.revues.org> <http://www.revues.org> . 14 pages. **Date de consultation : lundi 11 mai 2015, 20:14:13**
2. **ABDELLATIF M.** et al., *Les catastrophes naturelles et anthropiques. Apport de la Télédétection dans la gestion de l'environnement urbain _ Recherches sur le bassin versant d'Essijoumi (Tunisie)*. 48pages. Source : <http://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00738447>
3. Catalogue_ rapport, 19-21 septembre 2008, 55 pages. Date de consultation : lundi 11 mai 2015, 14:57:58
4. **BLANCHY S.**, Cité-État et statut politique de la ville en Afrique et ailleurs, Cités, citoyenneté et territorialité dans l'île de Ngazidja (Comores). Journal des africanistes 74-1/2 (2004). 29 pages
5. **MORIN J.**, *Dzaha Karthala le Volcan Canibal*. 9 Pages
6. **MORIN J.**, *Dzaha Karthala et les Comoriens*. 4 Pages
7. Appert_1969_ *Problème entomologique des cultures dans l'archipel des Comores*
8. **Bachèlery & Coudray**., 1993. *Notes Geological Map Grande Comore*
9. **Bachelery et al.**, *L'eruption du Karthala en 1991, Résumé L'éruption phréatique du Karthala survenue le 11 juillet 1991*. Université De Sciences delaTerre de La Réunion, 15, avenue R.-Cassin, BP n°7151, 97715 Saint-Denis, La Réunion ; F.D.:C
10. **NASSOR H**, *Contribution à l'étude du risque volcanique sur les grands volcans*, 31395-0_24_19 pages.
11. **CORNELIA Class** , and al., *Grand Comore Island: A well-constrained blow He/HeQ mantle plume*. Earth and Planetary Science Letters 233 (2005) 391–409.16 pages.
12. **MORIN J** et al., *Responses to Hazards, Karthala (Comoros) Analysis of the May 2006*. Shima : The International Journal of Research into Island Cultures Volume 3 Number 1 2009
13. Mars 2011. *Étude de vulnérabilité aux changements climatiques évaluation qualitative aux Comores*.93 pages.
14. **DAMIEN R.**, 23 Septembre 2011. *Analyse de la situation de la réduction des risques de catastrophes aux Comores*. Rapport.57 Pages.

15. « *Seconde communication nationale sur les changements climatiques* ». Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). 132 Pages.
16. **ABDOULKARIM A et SOULE H.**, Janvier 2011. *Étude de vulnérabilité aux aléas climatiques et géologique en union des Comores. « Développement des Capacités de Gestion des Risques de Catastrophes naturelles et Climatiques, en Union des Comores ».* Projet COSEP/ PNUD N° 00069668.
17. « *Intégration de la Réduction des Risques de Catastrophes dans les politiques en vue de réduire la pauvreté en Union des Comores* ». SNRRC commanditée par le PNUD pour le compte de la Direction Générale de la Sécurité Civile. 115 Pages.

SITOGRAPHIE

1. **CORNELIA C**, and al., *Osmium isotopes in Grande Comore lavas : A new extreme among a spectrum of EM-type mantle endmembers*. Earth and Planetary Science Letters. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/epsl. 8 PAGES
2. **Vargas D.M. and Bracamontes J.W.** *Interaction between regional and magma-induced stresses and their impact on volcano-tectonic seismicity*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. Neuberg School of Earth and Environment, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, United Kingdom. 4 Pages
Journal homepage : www.elsevier.com/locate/jvolgeores.
3. SIVOUZI Y., Surveillance sismique : L'Ovk dispose de moyens en deçà de ses missions. Al-Watwan, quotidien comorien 13/04/15 17 : 13 2pages.
http://www.alwatwan.net/index.php/index.php?home=actu.php&tit...-Ovk-dispose-de-moyens-en-deA-A-de-ses-missions&actu_id=6387
4. THOURET J.-C., et al. Formes de relief volcaniques, processus et risques. Groupe français de géomorphologie, Géomorphologie. 45 Pages
Document accessible en ligne sur : <http://geomorphologie.revues.org/3682>, Date de consultation : lundi 11 mai 2015, 15 :55:57
5. DEBEUF D., 2004, Etude de l'évolution volcano-structurale et magmatique de Mayotte (Archipel des Comores, Océan indien) Université de la Réunion, Doctorat, , 273 Pages Date de consultation : jeudi 26 mars 2015, 13:56:15
6. **DEBEUF D.**, 2004, *Etude de l'évolution volcano-structurale et magmatique de Mayotte (Archipel des Comores, Océan indien)* Université de la Réunion, Doctorat, , 273 Pages
Date de consultation : jeudi 26 mars 2015, 13:56:15

FILMOGRAPHIE

1. Home : Le Monde de Jamy - Des volcans et des hommes

Date de sortie : 01/12/2014 Acteur(s) : **JAMY** Gourmaud , Produit par : Philippe

Moulins, Une production de : mfp avec la participation de : France télévision

Public : Tout public, Langue : Français, Rayon : Documentaire

Durée : 01 :54 : 27

Site de téléchargement : <https://youtu.be/7psg6wlg1Cs>

2. Terre, le compte à rebours a commencé

Réalisateur : **STEFAN** Schneider, Auteur : **STEFAN** Schneider,

Durée : 00 :51 :12.

Site de téléchargement : <https://youtu.be/7psg6wlg1Cs>

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1_Indice d'explosivité volcanique

VEI	Classification	Description	Hauteur du nuage De cendres	Volume éjecté	Fréquence d'éruptions	Exemple	Nombre d'éruptions historiques
0	Hawaïen	Non explosif	< 100 m	> 1 000 m ³	Quotidien	Kīlauea	-
1	Hawaïen / Strombolien	Modéré	100- 1 000 m	> 10 000 m ³	Quotidien	Stromboli	-
2	Strombolien / Vulcanien	Explosif	1-5 km	> 1 000 000 m ³	Hebdomadaire	Galeras 1992	3631
3	Vulcanien	Catastrophique	3-20 km	> 10 000 000 m ³	Annuel	Nevado del Ruiz, 1985 ; Vulcano, 1888-1890	924
4	Vulcanien Plinien	Cataclysmique	15-25 km	> 0,1 km ³	≥10 ans	Galunggung, 1982 ; Láscar, 1993	307
5	Plinien	Paroxysmique	> 25 km	> 1 km ³	≥50 ans	Vésuve, 79 ; Mont Saint Helens, 1980	106
6	Plinien / Ultra-plinien	Colossal 100 ans	> 30 km	>10 km ³	≥100 ans	Krakatoa, 1883 ; Pinatubo, 1991 ; Novarupta, 1912	46
7	Ultra-plinien	Mégacolossal	> 35 km	>100 km ³	≥1 000 ans	Samalas, 1257 ; Tambora, 1815 ; éruption Minoenne (Santorin), 1600 av. J.-C.	4
8	Ultra-plinien (supervolcan)	Apocalyptique	> 40 km	> 1 000 km ³	≥ 10 000 ans	Lac Taupo, 26 500 ans ; Toba, 74 000 ans ; Yellowstone, 600 000 ans	0

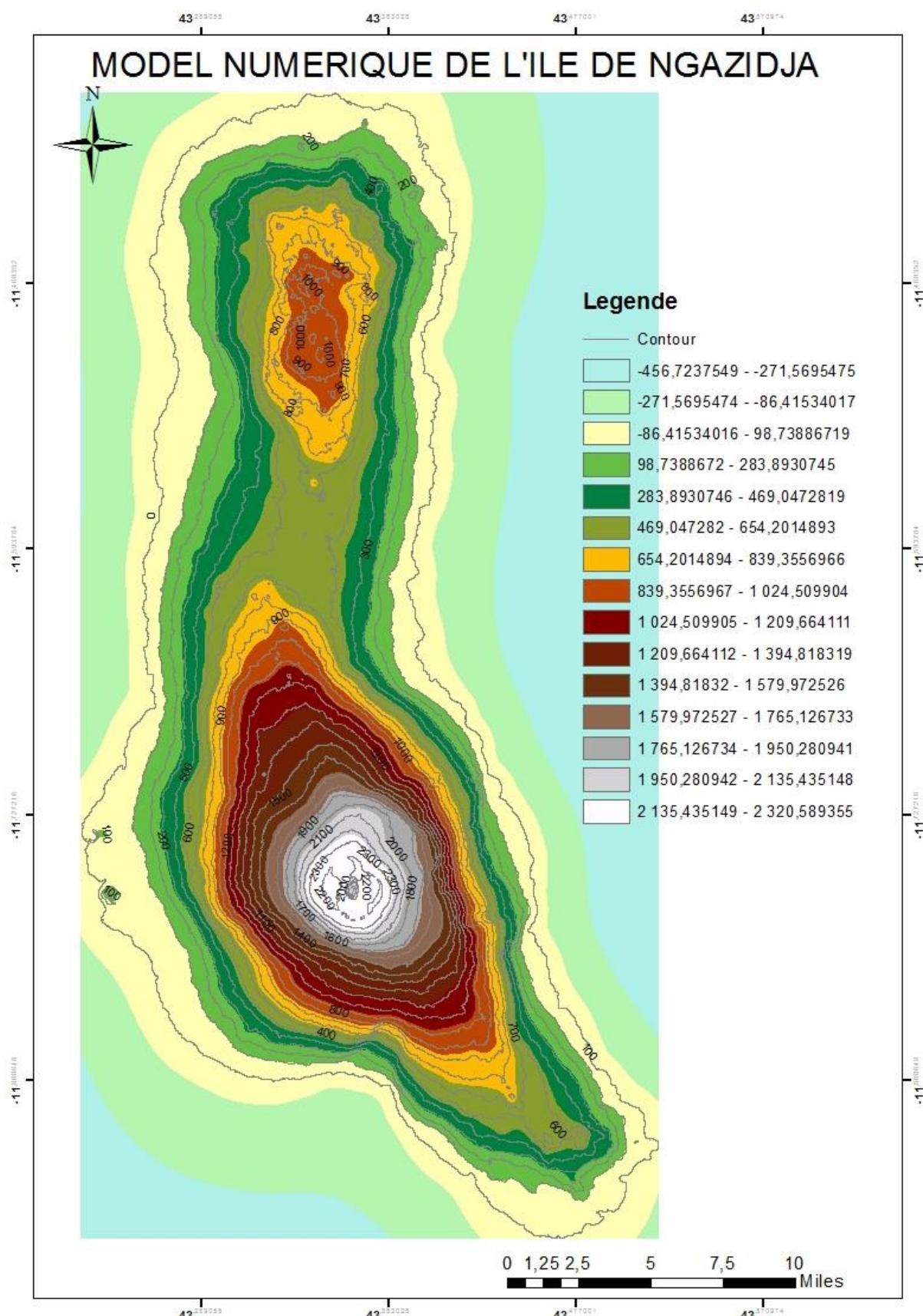
Annexe 2. Chronologie des éruptions

Année	Localisation	Type d'éruption	Surface couverte (100 m ²)	Sismicité ressentie	Dégâts
2007 (12-15 janvier)	Cratère Shanyumeni	Magmatique	Oui	Oui	0 morts
2006 (28 mai-3 juin)	Cratère principal	Magmatique	Oui		
2005 (24 novembre-8 décembre)	Cratère principal	Phréatomagmatique	Oui		
2005 (16-18 avril)	Cratère principal	Phréatomagmatique	Oui		
1991 (11 juillet)	Cratère principal	Phréatique	Oui	Oui	
1977 (5-10 avril)	Flanc sud-ouest	Magmatique excentrique	1,8	Oui	Oui
1972 (8 sept-5 oct)	Caldeira	Magmatique sommitale	2,5	-	-
1965 (12 juillet)	Caldeira et cratère libre	Magmatique sommitale	0,05	-	-
1952 (10 fév)	Cratère principal	Magmatique sommitale	-	-	-
1948 (22 avril-16 juin)	Cratère libre	Magmatique sommitale			
1948 (10 au 14 février)	Cratère principal	Magmatique sommitale et phréatomagmatique	16	Oui	
1918 (13 au 16 juin)	Cratère principal	Phréatique	25	Oui	Oui
1918 (22 avr. au 4 mai)	Rift zone nord	Magmatique latérale	2,7	Oui	-
1904 (11 au 13 août)	Rift zone nord	Magmatique latérale	11	Oui	Oui (1 mort)
1903 (25 au 26 août)	Rift zone sud-est	Émissions gazeuses	-		Oui (17 morts)
1880 (25 février à... avril)	Rift zone sud-est	Magmatique latérale	2,4	Oui	Oui
1876	Rift zone sud-est	Magmatique latérale	4	-	-
1872	Rift zone nord	Magmatique latérale	1,6	-	-

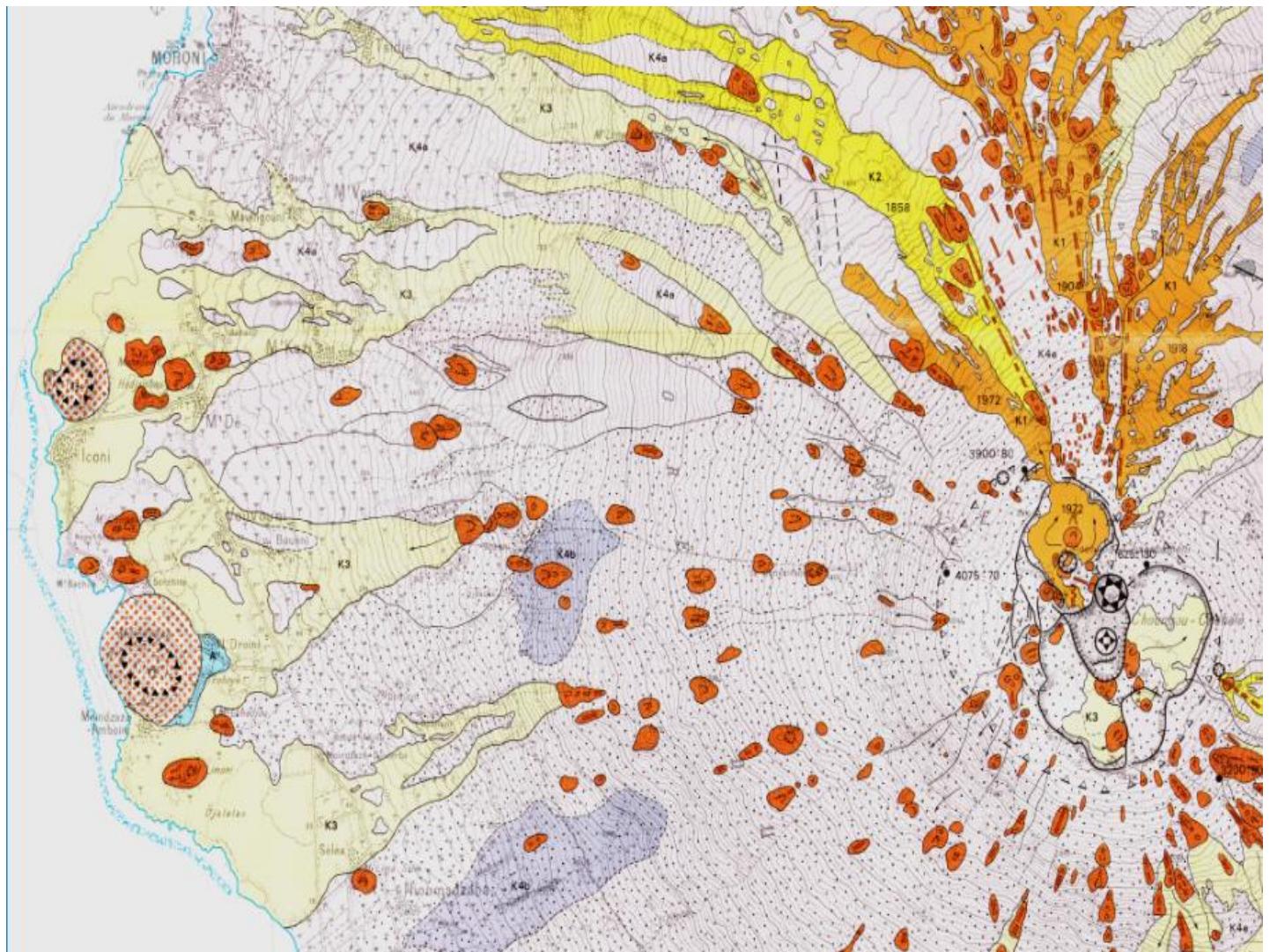
Année	Localisation	Type d'éruption	Surface couverte (100 m ²)	Sismicité ressentie	Dégâts
1860	Rift zone sud-est	Magmatique latérale	5,5	-	-
1859	Rift	Magmatique latérale	3,9	-	-
1858 (décembre)	Caldeira et rift	Magmatique latérale	12,5	-	-
1857	Caldeira et rift zone sud-est	Magmatique latérale	10	-	-
1848	Flanc sud-est	Magmatique excentrique	3	-	-
1830	-	Magmatique	-	-	-
1828	-	Magmatique	-	-	-
1821	-	Magmatique	-	-	-
1814	-	Magmatique	-	-	-
1808	-	Magmatique	-	-	-

Source : [Al-watwan](#) du jeudi 20 novembre 2008 (numéro 1199).

Annexe 3. Carte MNT de l'ile de Ngazidja Par l'auteur



**Annexe 4_Extrait de la carte Volcano-tectonique de la Grande Comore_ zone
« Karthala _ Région de Bambao ».**



Annexe 5_Questionnaire

Connaissances et perceptions des éruptive du volcan Karthala :

1. Quelle éruption du Karthala connaissez-vous ?
2. Comment réagissez-vous en cas d'éruption volcanique ?
3. Que trouvez-vous de plus problématique en cas une éruption volcanique ?
4. Comment êtes-vous alerté en cas d'éruption volcanique ?
5. Avez - vous confiance aux médias pour vous fournir des information objective ? Considérez-vous que la gestion de risque volcanique par les autorités soit efficace.
6. l'efficacité d'assistance en cas d'une éruption, et les mesures prises pour protéger la population en cas de risque volcanique sont suffisantes ?
7. Quelle meilleure façon de se protéger en cas d'éruptions volcanique connaissez-vous ?
8. 16. Après l'éléments d'avril 2005 Comment avez-vous fait pour vous adapter

Perceptions des effets des éruptions volcanique dans l'environnement

Avez-vous remarqué des changements environnementaux dans la région de Bambao, dus à la manifestation volcanique d'Avril 2005 ou dans les dix dernières années ? 1. Oui ___ 2. Non ___ Si oui, précisez.....

Avez-vous remarqué des changements dans les aspects suivants :

Description	Oui 1.	Non 2	Expliquez
Les sols ?			
La végétation ?			
L'eau en surface ?			
L'eau des puits/forages ?			
La production agricole ?			
Autre (spécifier)			
Autre (spécifier)			

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	
RESUME.....	
LISTE DESILLUSTRATIONS	
ACRONYMES	
INTRODUCTION GENERALE	1
DELIMITATION ET CONTEXTE	3
PROBLEMATIQUE	5
DEMARCHE DE RECHERCHE ET OUTILS	6
CONTEXTE GENERAL DU TRAVAIL	9
PARTIE 1. UN VOLCAN A AMENAGEMENT PROGRESSIF	11
CHAPITRE I - LES SPECIFICITES D'UN VOLCAN PARTICULIER.....	13
I.1 - UNE CALDEIRA CHANGEANTE	13
CHAPITRE-II - CARACTERES DES ERUPTIONS : PRODUITS PYROCLASTIQUES	16
II.1 - UNE ACTIVITE VOLCANIQUE TOUJOURS IMPORTANTE.....	16
II.1.1 - LES ÉRUPTIONS MAGMATIQUES	16
II.1.2 - LES ÉRUPTIONS PHRÉATIQUES EN ZONE SOMMITALE	17
II.1.3 - LES ERUPTIONS PAROXYSMALES	17
II.2 - LES ERUPTIONS DE 2005 A 2007	18
II.2.1 - RECONSTITUTION DE L'ERUPTION D'AVRIL 2005	20
CHAPITRE-III - CONDITIONS CLIMATIQUES TYPE TROPICAL MARITIME	23
III.1 - LA PLUVIOMÉTRIE	23
CHAPITRE-IV - RÉPONSES COUTUMIÈRES ET SOCIALES AUX RISQUES EN RAPPORT AVEC VOLCAN KARTHALA, EN GRAND COMORE.....	25
IV CONTRAINTES SOCIALES ET ÉCONOMIQUES COMME FACTEURS DE VULNÉRABILITÉ	25
IV.2 - LA DIMENSION CULTURELLE DE VULNÉRABILITÉ	26
DEUXIEME PARTIE_ LA DIMENSION DE VULNERABILITE DANS L'ENVIRONNEMENT : FACTEURS DE RISQUE-APPARENTES ET CONTEXTE GEOGRAPHIQUE	29
CHAPITRE V - LES RISQUES (ALEAS) VOLCANIQUES LIES ET INDUITS PAR LE VOLCAN KARTHALA.....	30
V.1 - ALEA SISMIQUE	30
V.2 - ALEA DES COULEES	32
V.3 - ALEA DES CENDRES	36
V.4 - ALEA DES SCORIES.....	39
V.5 - ALEA DES GAZ.....	39
V.6 - ALEA DES AVALANCHES (GLISSEMENT DE TERRAIN)	40

V.7 - INTERACTION ENTRE LES DIFFERENTS ALEAS	41
CHAPITRE VI_ IMPACTS DES ERUPTIONS VOLCANIQUES –UN MILIEU NATUREL FORTEMENT PERTURBE PAR LES ERUPTIONS VOLCANIQUES	42
VI.1- DES SOLS DETRUITS PAR LES COULEES LAVIQUES	42
VI.1.1 - UNE TOPOGRAPHIE ET UNE STRUCTURE MODIFIEES PAR LES ERUPTIONS VOLCANIQUES.....	42
VI.2 - DES STRUCTURES MOLECULAIRES DU SOL PERTURBES PAR LES CENDRES VOLCANIQUES.....	43
VI.3 –MORPHOLOGIE DES AQUIFERES SPECIFIQUE DES ILES VOLCANIQUES MODIFIEE PAR LES PRODUITS PYROCLASTIQUES	43
VI.4 – PERTURBATION DU SYSTEME ATMOSPHERIQUE PAR LES CENDRES VOLCANIQUES	43
VI.5 - DES PYROCLASTIQUES CREANT UNE REACTION EN CHAINE : INONDATIONS D'AVRIL 2012.....	44
VI.6 - DES PYROCLASTIQUES CRÉANT UNE RÉACTION EN CHAINE : INONDATIONS D'AVRIL 2012	45
CHAPITRE -VII - DES IMPACTS SEVERES SUR LA VIE DE L'HOMME.....	47
VII.1 - DES PYROCLASTES CAUSANT DES DEGATS SUR L'HABITAT.....	47
VII.2 - RUEE VERS L'OR NOIR DANS LES VILLAGES SINISTRES	48
VII.3 - LE PRODUIT PYROCLASTIQUE CONTAMINE L'EAU POTABLE :.....	49
VII.4 - UNE ECONOMIE AU CŒUR DU FEU : STRUCTURE EN PERIL.....	49
VII.5 - RETOMBEE DE CENDRES ET ENJEUX SANITAIRE	50
 TROISIEME PARTIE IDENTIFICATION ET CARTOGRAPHIE DES INSTABILITES DE LA ZONE	53
CHAPITRE-VIII - LES SCÉNARIIS ET ENJEUX_ QUELLE EST LA PROBABILITÉ D'OUVERTURE BRUTALE D'UN NOUVEL ÉVENT EN ZONE HABITÉE ?.....	54
VIII.1- L'ÉQUATION DES ENJEUX ET RISQUES	55
CHAPITRE IX - EVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITÉ AUX INSTABILITÉS DE TERRAIN ...	58
IX.1 - CARTOGRAPHIE DE L'ALEA « COULEE DE LAVE »	58
IX.2 - CARTOGRAPHIE DE L'ALEA CENDRE VOLCANIQUE.....	60
IX. 3 - CARTOGRAPHIE DE L'ALEA « SISMICITE »	61
IX.4 - CARTOGRAPHIE DE L'ALEA « COULEE DE BOUE »	62
CHAPITRE X - LES ÉLÉMENTS DE SIMULATION D'UNE ÉRUPTION FUTURE ET DE DIAGNOSTIC DES VULNÉRABILITÉS	65
X.1 - LA FRÉQUENCE D'ÉRUPTION DU KARTHALA	65
X.2 – SIMULATION ET HYPOTHESE	65
X.3 - CARTES DES RISQUES DANS L'ENSEMBLE DE LA GRANDE COMORE.....	68

CHAPITRE XI- NAISSANCE ET EVOLUTION DE LA GESTION DES CRISES VOLCANIQUES EN GRANDE COMORE	73
XI.1 - STRUCTURES INSTITUTIONNELLES POUR LA RÉDUCTION DES RISQUES DE CATASTROPHES AUX COMORES.....	73
XI.2 .LES LEÇONS TIREES DE L'ACTIVITE ERUPTIVE DU KARTHALA DE 1977 A 2005	74
XI.3.SYSTEUME D'INFORMATION ET D'ALERTE VOLCANIQUE EN GRANDE COMORE.....	75
CONCLUSION.....	77
BIBLIOGRAPHIE ET FILMOGRAPHIE	79
LISTE DES ANNEXESS	82
ANNEXE 1_INDICE D'EXPLOSIVITÉ VOLCANIQUE.....	82
ANNEXE 2_ CHRONOLOGIE DES ÉRUPTIONS.....	83
ANNEXE 3_ CARTE MNT DE L'ILE DE NGAZIDJA_ PAR L'AUTEUR:	85
ANNEXE 4_EXTRAIT DE LA CARTE VOLCANO-TECTONIQUE DE LA GRANDE COMORE_ ZONE « KARTHALA _ RÉGION DE BAMBAO ».....	86
ANNEXE 5_QUESTIONNAIRE	87
TABLE DES MATIERES	88