

Département de géomatique appliquée  
Faculté des lettres et sciences humaines  
Université de Sherbrooke

Activité pédagogique GAE724 - Essai en géomatique appliquée

**Cartographie des aléas et des risques volcaniques du volcan Kilauea à  
Hawaii selon une méthode d'analyse multicritère**

Laurie Rivet

Dans le cadre d'une maîtrise en sciences géographiques avec cheminement de type cours  
en géodéveloppement durable (M.Sc.)

Mai 2020

© Laurie Rivet, 2020

Superviseure d'essai : Myriam Lemelin

Membres du jury d'évaluation de l'essai :

- Myriam Lemelin (directrice de l'essai), professeure au Département de géomatique appliquée de l'Université de Sherbrooke
- Mickaël Germain, professeur au Département de géomatique appliquée de l'Université de Sherbrooke

## Résumé

Les risques volcaniques sont constamment présents dans la vie des Hawaïens vivant près du volcan Kilauea, l'un des volcans les plus actifs au monde, sur l'île d'Hawaï. Depuis 1912, le United States Geological Survey (USGS) et le Hawaiian Volcano Observatory (HVO) sont responsables du suivi, de l'étude et de l'évaluation des risques des volcans actifs sur l'île d'Hawaï, incluant le volcan Kilauea. Depuis les débuts du suivi du Kilauea, le HVO a publié trois versions de la carte d'aléa pour l'île d'Hawaï, soit en 1974, dans les années 1980, puis en 1992. La plus récente carte d'aléa présente, en ordre de priorité, les neuf régions les plus susceptibles de recevoir de nouvelles coulées de lave sur l'île d'Hawaï. Ces régions ont été définies en fonction du nombre de coulées de lave passées ainsi que du relief local. Bien que plusieurs éruptions aient eu lieu depuis 1992, la carte d'aléa n'a pas été mise à jour depuis ce temps. De plus, une carte de risque n'a pas été développée. Une carte de risque inclut l'aspect humain (e.g. : densité d'habitants, bâtiments). De telles cartes ont été développées dans d'autres contextes tels que les inondations et les feux de forêt. Développer une carte de risque dans le contexte du volcan Kilauea serait souhaitable, car elle permettrait de mieux cibler le risque local pour les habitants des environs du volcan. L'objectif principal du projet est de faire l'amélioration des connaissances spatiales des risques liés au volcan Kilauea. Les objectifs spécifiques sont dans un premier temps de mettre à jour la carte d'aléa actuellement disponible, en utilisant une résolution spatiale plus fine. Dans un deuxième temps, il s'agit de réaliser la toute première carte de risque de la région du volcan Kilauea à Hawaï. Dans un troisième temps, il s'agit de faire la comparaison entre la carte d'aléa du USGS et la carte créée. La carte d'aléa créée montre des zones de ressemblance avec la carte d'aléa du USGS créée en 1992, principalement dans les zones de rift. La carte créée représente seulement la région du volcan Kilauea contrairement à la carte du USGS de 1992 qui présente la carte d'aléa de l'ensemble des cinq volcans de l'île. Les zones de la carte d'aléa de 1992 sont approximatives et faites à grande échelle. L'échelle spatiale de 10 mètres par pixel de la nouvelle carte d'aléa créée montre une finesse supérieure sur les zones à risque du Kilauea. La carte de risque, elle, permet de voir que certains quartiers à proximité du volcan sont en danger lors d'éruptions volcaniques, comme le quartier Nanawale Estates, Pahoa et Ainaloa. La carte de risque permet une meilleure surveillance de sa population et permet également de voir l'impact des dégâts lors d'une éruption volcanique. La fine échelle spatiale de la carte de risque permet une analyse locale des endroits à risque.

Mots-clés : Risque volcanique, cartographie des risques, cartographie des aléas, analyse multicritère, Kilauea

## Table des matières

<b>Table des matières</b> .....	<b>v</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>vii</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>ix</b>
<b>Glossaire</b> .....	<b>x</b>
<b>Remerciements</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Mise en contexte</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Problématique</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3. Objectifs</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Cadre théorique</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1. Le mécanisme des volcans-boucliers</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2. Étapes de formation d'un volcan-bouclier</b> .....	<b>7</b>
<b>2.3. Types de laves</b> .....	<b>10</b>
<b>2.4. Historique des éruptions du Kilauea</b> .....	<b>11</b>
<b>2.5. Vulnérabilité face au volcan Kilauea</b> .....	<b>16</b>
<b>2.6. Technologies de surveillances volcaniques</b> .....	<b>18</b>
<b>2.7. Les analyses multicritères</b> .....	<b>23</b>
<b>3. Matériel et méthodes</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1. Site d'étude</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2. Données</b> .....	<b>28</b>
<b>3.3. Analyse multicritère</b> .....	<b>31</b>
<b>3.4. Méthodologie</b> .....	<b>32</b>
<b>3.4.1 Production de la carte d'aléa</b> .....	<b>34</b>
<b>3.4.1.1. Analyse des coulées de lave</b> .....	<b>34</b>
<b>3.4.1.2. Analyse de la topographie</b> .....	<b>35</b>
<b>3.4.2. Production de la carte de risque</b> .....	<b>36</b>
<b>3.4.2.1. L'analyse de l'aléa</b> .....	<b>37</b>
<b>3.4.2.2. L'analyse de la population</b> .....	<b>38</b>
<b>3.4.2.3. L'analyse des infrastructures</b> .....	<b>38</b>
<b>4. Résultats et interprétations</b> .....	<b>40</b>

<b>4.1. Carte d'aléa.....</b>	<b>40</b>
<b>4.1.1. L'analyse des coulées de lave.....</b>	<b>42</b>
<b>4.1.2. L'analyse de la topographie .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2. Carte de risque .....</b>	<b>46</b>
<b>4.2.1. L'analyse de la densité de population .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2.2. L'analyse des infrastructures .....</b>	<b>51</b>
<b>5. Discussion.....</b>	<b>53</b>
<b>5.1. Comparaison des cartes d'aléa.....</b>	<b>54</b>
<b>5.2. Absence de carte de risque volcanique .....</b>	<b>55</b>
<b>5.3. Limitations et améliorations.....</b>	<b>56</b>
<b>6. Conclusion.....</b>	<b>58</b>
<b>7. Références .....</b>	<b>59</b>

## Liste des figures

Figure 1 : La dynamique d'un point chaud. Ici celui d'Hawaii qui illustre le mouvement de la plaque tectonique du Pacifique et la chaîne de l'empereur

Figure 2 : Étape d'évolution des volcans-boucliers hawaïens établie par Peterson et Moore (1987). Schéma modifié et adapté de Bachèlery (1999) (Chaput, 2014).

Figure 3 : Représentation des compositions du volcan Kilauea du USGS.

Figure 4 : Delta volcanique créé par les laves issues du Kilauea en 2005 (à gauche) et 2007 (à droite) (Tilling et al., 2010).

Figure 5 : Un spectromètre de type infrarouge installé en bordure du cratère utilisé pour mesurer les quantités de gaz émis par le Kilauea près d'un événement (Tilling et al., 2010).

Figure 6 : Carte d'aléa des volcans de l'île d'Hawaii du gouvernement d'Hawaii.

Figure 7 : Classification des méthodes d'analyse d'aide à la décision selon Belton et Stewart, 2002

Figure 8 : Site d'étude du volcan Kilauea et ses environs.

Figure 9 : Diagramme méthodologique des étapes de réalisation de l'analyse

Figure 10 : Carte d'aléa du volcan Kilauea

Figure 11 : Cartographie des coulées de lave de 1790 à 2018 du volcan Kilauea à Hawaii

Figure 12 : Cartographie de la topographie du volcan Kilauea à Hawaii

Figure 13 : Carte de risque du volcan Kilauea

Figure 14 : Cartographie de la densité de population dans la limite du volcan Kilauea

Figure 15 : Cartographie des infrastructures essentielles dans la limite du volcan Kilauea

Figure 16 : Carte d'aléa du USGS 1992 section Kilauea

Figure 17 : Carte d'aléa 2020



## Liste des tableaux

Tableau 1 : Résolution spatiale et temporelle des différents satellites.

Tableau 2 : Sources des données humaines utilisées pour la carte de risque

Tableau 3 : Sources des données physiques utilisées pour la carte d'aléa

Tableau 4 : Données shapefile disponibles sur les coulées de lave sur 230 années.

Tableau 5 : Synthèse des catégories et des critères utilisés pour la carte d'aléa et de risques

## **Glossaire**

HVO: Hawaiian Volcano Observatory

MADM : méthodes d'aide à la décision multi-attributs

MCDM : méthodes d'aide à la décision multicritères

MNA: modèle numérique d'altitude

MNT : modèle numérique de terrain

SIG : Système d'information géographique

USCB : United States Census Bureau

USGS : Institut d'études géologiques des États-Unis ou United States Geological Survey

## **Remerciements**

Je tiens en premier lieu à remercier le département de géomatique de l'Université de Sherbrooke pour son implication dans la vie des étudiants(es) et de l'aide qui est apportée à tous. Les professeurs sont toujours disponibles pour aider les étudiants en toutes circonstances.

Un remerciement à Mickaël Germain pour m'avoir permis de connaître ma directrice d'essai, ainsi qu'à Geneviève Crevier pour ses judicieux conseils dans la réalisation de ma méthodologie.

Je voudrais remercier ma mère Maryse, mon père Richard et ma sœur Sabrina pour m'avoir poussée à fond dans mes études depuis le début et qui m'ont permis de me rendre à la maîtrise. Aussi, un grand merci à mon conjoint pour m'avoir aidé du début à la fin de cette réalisation.

Un merci également à mes amis(es) d'avoir compris que c'était une grande charge de travail et que je ne pouvais pas sortir tous les soirs!

Finalement, un grand merci à ma directrice d'essai, Myriam Lemelin, pour son aide tout au long ce processus et de ses corrections bien appréciées. Tes commentaires m'ont permis de me surpasser et d'améliorer ce projet. Merci de m'avoir fait découvrir le monde des volcans que je connaissais à peine en commençant ce projet!

# 1. Introduction

## 1.1. Mise en contexte

Les risques volcaniques sont un des phénomènes géologiques que l'on peut retrouver sur l'ensemble du globe. Il existe à la surface de la planète deux grands types d'éruptions liés à cette activité volcanique : les éruptions explosives et les éruptions effusives. On peut expliquer les types d'éruptions par la teneur en silice des laves. En effet, plus une lave est riche en silice plus celle-ci est visqueuse, il en résulte donc un comportement plus explosif. Les laves riches en silice retiennent plus de gaz et augmenteront par le fait même la nature explosive d'un volcan (Peterson et al., 1980). On peut trouver une grande partie des volcans explosifs dans la ceinture de feu située sur la côte ouest des États-Unis, l'Asie et l'Océanie. La délimitation de celle-ci est en fait la limite de la plaque tectonique du pacifique. Le mouvement de la plaque tectonique entraîne des zones de subduction sur l'ensemble de la plaque lorsque celle-ci interagit avec les plaques continentales plus légères. Cette ceinture regroupe plus de 400 volcans (Tilling et al., 2010). Des noms connus, comme le mont Rainier aux États-Unis et le mont Fuji au Japon font partie de cette zone de subduction des plaques tectoniques et des plaques continentales qui constitue l'une des zones les plus dangereuses du monde en termes de zone volcanique (Tilling et al., 2010). Les volcans situés en zone de subduction sont tous de type explosif et auront des comportements imprévisibles (Mulineaux et al., 1974). De plus, les éruptions explosives produisent des laves que l'on appelle des coulées pyroclastiques et des nuages ardents qui sont en eux-mêmes également dangereux (USGS, 2019c). Les volcans de type effusif sont quant à eux issus de points chauds. Leurs éruptions sont, dans une certaine mesure, moins violentes que les éruptions explosives. Les volcans de points chauds sont majoritairement situés en plein cœur des plaques tectoniques et les édifices volcaniques qui en résultent sont appelés des volcans-boucliers (Mulineaux et al., 1974). Les laves produites par des volcans-boucliers sont appelées les « pahoehoe » et les « a'a ». Les exemples les plus connus de ces volcans sont l'Islande, les Galápagos et même le parc national de Yellowstone qui est un gigantesque point chaud.

Un autre bon exemple de point chaud et de volcans effusifs se trouve dans l'archipel des îles d'Hawaïi. En effet, ces îles volcaniques ont été créées à la suite de l'éruption d'un point chaud situé au centre de la plaque tectonique du Pacifique, conjugué au mouvement de cette plaque tectonique vers le nord-ouest. Divers volcans liés à ce point chaud se trouvent sur les îles d'Hawaïi. C'est sur l'île la plus au sud de l'archipel, soit l'île de Big Island, que l'on retrouve présentement les volcans actifs, reliés au point chaud. Des volcans-boucliers, peu explosifs, comme le Mauna Loa et le Kilauea font partie du paysage des habitants de cette île. Les volcans-boucliers sont des volcans particuliers : leurs coulées de lave sont lentes et ne produisent que de petites explosions dans de rares cas. Malgré tout, ces laves posent de sérieux dangers pour les infrastructures autour du volcan Kilauea. Ces laves de type pahoehoe et a'a sont extrêmement visqueuses à cause de leur composition qui contient notamment du silice. (Orr et al., 2013). Les deux types de laves ont toutefois certaines caractéristiques différentes. À titre d'exemple, une lave pahoehoe est plus pauvre en silice alors qu'une lave a'a est riche en silice. La teneur élevée en silice crée donc une différence de viscosité. Les pahoehoe sont donc des laves fluides et lisses et les a'a plus rugueuses et visqueuses. (Peterson et al., 1980). Elles progressent également de façons différentes. En effet, les laves pahoehoe circulent plus rapidement que les laves a'a et ce entre autres parce que les a'a sont plus visqueuses que les pahoehoe et donc sont plus influencés par la friction avec le sol ce qui les ralentit considérablement (Peterson et al., 1980). De plus, les laves progressent en fonction de la pente et des éléments topographiques sur leur passage. Elles vont par ailleurs circuler dans ce que l'on appelle des tubes de laves ou à travers des chenaux créés par la coulée elle-même (Orr et al., 2013). L'un des meilleurs exemples de la menace qu'elles posent est les coulées de lave de mai 1990 qui ont enseveli en grande partie la ville de Kalapana. Cette ville située dans la partie sud-est de l'île sera reconstruite en partie par certains habitants, mais ceux-ci ont fait face à une nouvelle coulée en 2010 qui emprunta relativement le même chemin et qui toucha de nouveau les résidents du secteur. Maintenant, le secteur de Kalapana est un secteur touristique qu'il est possible de visiter afin d'observer des coulées de lave passées. Des bâtiments à vocation touristique se sont donc construits dans un secteur fortement susceptible de voir passer une nouvelle coulée (Orr et al., 2013). Le potentiel de morts ou de blessés est plutôt faible étant donné

la vitesse lente de déplacement des laves qui permettent aux gens d'évacuer et de se mettre en lieu sûr. Cependant, le risque est présent.

Le risque est un terme qui englobe deux concepts bien précis, soit l'aléa et la vulnérabilité. L'aléa est la possibilité que se produise en un endroit donné, un phénomène ou un évènement pouvant causer une atteinte ou des dommages, tel qu'une inondation, un séisme, un accident industriel, une éruption volcanique et bien plus encore (Sécurité Publique, 2020). L'aléa doit être obligatoirement jumelé avec la vulnérabilité pour parler d'un risque réel. La vulnérabilité est le fait de trouver dans ce milieu des éléments tels que des populations, des bâtiments ou des activités exposés à la manifestation de cet aléa (Sécurité Publique, 2020). Ces manifestations de la nature sont présentes dans l'entièreté du territoire hawaïen. La population de l'île d'Hawaïi est très susceptible de faire face aux risques volcaniques, par exemple avec le volcan Kilauea qui est en éruption constante depuis 1983 (Orr, 2013).

Pour une meilleure compréhension de ces phénomènes, les cartes de risques sont des outils primordiaux. En effet, les cartes de risques permettent de représenter les secteurs les plus dangereux ou susceptibles de faire face à un aléa. Ainsi, en évitant de construire ou de développer certains secteurs jugés trop dangereux, on diminue grandement la vulnérabilité de la population. De plus, lors de catastrophes, les autorités connaissent les endroits à évacuer en premier lieu grâce à la carte de risque. Ceci permet une meilleure sécurité de la population. Cependant, cette carte doit être mise à jour le plus souvent possible pour permettre une efficacité et une fiabilité. Généralement, la méthode qu'on utilise pour construire ce genre de carte consiste à utiliser les évènements passés pour prévoir les éruptions futures. En effet, en compilant les éruptions passées on arrive à déterminer une trajectoire possible pour les coulées futures (USGS, 2019d).

## 1.2. Problématique

Le volcan Kilauea possède une carte d'aléa depuis 1974. Une mise à jour a été réalisée en 1992 (Hawaïen Volcano Observatory (HVO), 2019). Par la suite, des cartes d'aléa avec l'ajout de coulées de lave importante ont été effectuées pour démontrer dans quelle zone

de risque les coulées de lave étaient situées. Cependant, aucune mise à jour n'a été effectuée pour l'ensemble de la carte d'aléa du volcan. Compte tenu du fait que le volcan a connu plusieurs éruptions majeures depuis 1992, comme celle de 2018 par exemple, la mise à jour de cette carte d'aléa permettrait de dresser le portrait actuel des éruptions passées. Par ailleurs, la carte d'aléa actuelle tient compte de trois aspects physiques du volcan : (1) les coulées de lave historiques enregistrées et perçues (2) le lieu des éruptions passées, et (3) la topographie du volcan (U.S. Department of the Interior / Geological Survey, 1991).

Il est important de noter que la carte d'aléa actuelle n'inclut aucune notion de vulnérabilité de la population. En plus de mettre à jour la carte d'aléa, il apparaît donc pertinent de créer une carte de risque qui tiendrait compte à la fois de l'aléa et de la vulnérabilité de la population. Cela permettrait une meilleure prévention et préparation face au risque volcanique.

### 1.3. Objectifs

Dans le cadre de ce travail, l'objectif principal est de faire l'amélioration de la connaissance spatiale des risques liés au volcan Kilauea à Hawaii. Le premier objectif spécifique est de mettre à jour la carte d'aléa actuellement disponible (USGS, 1992), et ce, en utilisant une résolution spatiale plus fine. La carte d'aléa tient compte des lieux des éruptions passées, des coulées de lave et de la topographie. Ceci permettra de voir s'il y a eu une modification des zones d'aléa avec les nouvelles coulées de lave depuis 1992 et de constater si l'inclusion des événements plus récents peut changer ou non la nature de la carte d'aléa. La carte d'aléa actuelle est faite pour l'ensemble de l'île d'Hawaii. Dans le cadre de cette étude, seulement la portion du volcan Kilauea sera réalisée. Pour le deuxième objectif spécifique, il est question de la création de la toute première carte de risque du volcan Kilauea. Celle-ci tiendrait compte des infrastructures, de la population ainsi que des zones d'aléa. Pour le dernier objectif spécifique, il s'agit de faire une analyse comparative entre la carte d'aléa initiale du USGS avec la nouvelle carte d'aléa créé avec une nouvelle méthodologie.

## 2. Cadre théorique

### 2.1. Le mécanisme des volcans-boucliers

Les volcans-boucliers sont des édifices au profil surbaissé, comprenant des pentes très faibles. Ils sont les volcans les plus volumineux de la Terre. Les volcans-boucliers se situent sur les intraplaques océaniques, dont l'île de La Réunion, Hawaï, les Comores ou même les îles Canaries (Chaput, 2014).

Le volcanisme à Hawaï est issu d'une situation bien particulière. En effet, on retrouve sous la croûte terrestre ce que l'on appelle un point chaud. Un point chaud est en fait une remontée magmatique qui provient des mouvements du manteau de la Terre (Mulineaux et al., 1974). La plupart des remontées magmatiques sur le globe sont issues de la friction entre deux plaques tectoniques souvent par subduction. À Hawaï, ce n'est pas la même situation. La Terre expulse sa chaleur grâce au magma qui s'infiltré dans des fissures dans la croûte. Le magma perce ensuite la croûte terrestre jusqu'à la surface pour former un volcan (Mulineaux et al., 1974). Le point chaud, lui, reste sur place, mais les plaques tectoniques bougent. Ce phénomène lent de mouvement aura comme effet de créer une chaîne de volcans au fur et à mesure du déplacement de la plaque. On peut d'ailleurs observer ce phénomène à travers les îles d'Hawaï. Le Mauna Loa et le Kilauea sont les deux volcans les plus récents de cette chaîne volcanique, mais il existe plusieurs îles hors de l'archipel d'Hawaï qui ont été créées par la remontée magmatique située actuellement sous l'île d'Hawaï. On appelle d'ailleurs cette chaîne d'îles la chaîne volcanique de l'empereur (Mulineaux et al., 1974). La plaque tectonique sur laquelle sont situées les îles d'Hawaï se nomme la plaque du Pacifique. Elle est l'une des plus grandes plaques tectoniques du monde en termes de superficie. Si on fait bien attention à l'orientation des îles de la chaîne de l'empereur, on remarque que la plaque du pacifique effectue un mouvement vers le Nord-Ouest (Mulineaux et al., 1974) (Figure 1).



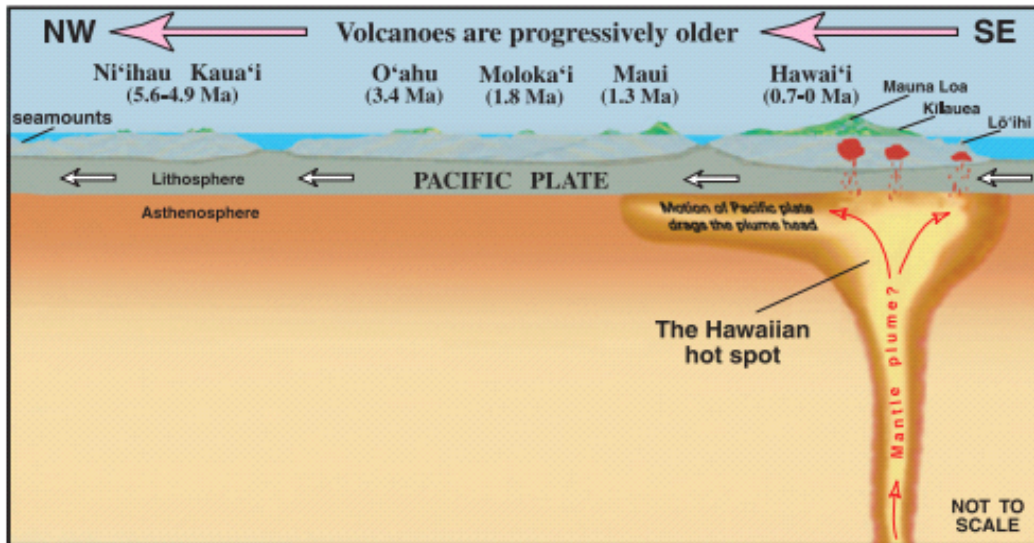


Figure 1 : La dynamique d'un point chaud. Ici celui d'Hawaii qui illustre le mouvement de la plaque tectonique du Pacifique et la chaîne de l'empereur. Source : Tilling, R.I et al., 2010.

Les premières caractéristiques des volcans-boucliers hawaïiens sont ces zones de rifts où se situent la grande majorité des éruptions de type fissural. Dans le paysage des îles d'Hawaii, il est facile de distinguer ces rifts à la surface de la Terre. Les zones de rifts sont très actives, étroites et linéaires qui peuvent s'étendre sur une centaine de kilomètres depuis la caldéra du volcan (Chaput, 2014). La caldéra est en fait une large dépression circulaire située au sommet de large édifice volcanique dans laquelle on retrouve la remontée magmatique. Elle est le résultat de large éruption (Rossi, 1996). Dans le cas du volcan Kilauea, les zones de rifts s'étendent sur plus de 50 km en terre ferme et se poursuivent sur plus de 90 km en mer (Chaput, 2014). Dans le cas de ces rifts, de nombreuses fissures et de nombreux cônes y sont associés. En effet, ces intrusions subparallèles se propagent depuis le réservoir magmatique sous le sommet de l'édifice et nourrissent les éruptions latérales du volcan (Chaput, 2014). Les cônes, pour leur part, sont issus de l'accumulation de cendres et des roches habituellement basaltiques formant une colline en forme de cône (Decker et al., 1987). Les volcans-boucliers hawaïiens possèdent aussi une caldéra de plusieurs kilomètres de diamètre. La grandeur de cette caldéra est le résultat de plusieurs effondrements qui augmentent graduellement le diamètre de la caldéra. Dans le creux de la caldéra, on peut parfois observer un lac de lave. Cependant, il arrive que la lave soit trop profonde pour être observée.

## 2.2. Étapes de formation d'un volcan-bouclier

Les édifices volcaniques sont le siège d'instabilités de flancs qui ponctuent de manière récurrente leur évolution et affectent en tout point la morphologie de ceux-ci et leur activité future (Chaput, 2014). La forme la plus connue des volcans est le stratovolcan. Ce type de volcan habituellement en forme de grand cône, avec des pentes abruptes, a un comportement imprévisible et fortement explosif. Ce dernier est le type de volcan qui est à l'origine des éruptions que l'on connaît bien comme celui du mont Saint Helens. Sur les volcans-boucliers, les édifices ont des pentes faibles, ainsi qu'une activité effusive dominante. Ce sont ces volcans qui transportent les plus grands volumes de matériaux sur les plus grandes distances (Rossi, 1996). Dans le cas des volcans d'Hawaii, l'origine de la déstabilisation de flancs semble associée à l'existence combinée d'une grande activité magmatique dans les zones de rifts ainsi qu'une faible teneur en basalte entre le massif volcanique et la lithosphère océanique (Chaput, 2014).

Un volcan de type bouclier vit en plusieurs phases. En fait on compte 8 phases : la phase initiale, la phase sous-marine, la phase de construction subaérienne, la phase de post caldéra, la phase d'érosion, de reprise volcanique et finalement le stade d'atoll et de guyot (Decker et al., 1987) (Figure 2).

La toute première phase est celle dans laquelle le volcan sera submergé aussi appelé la phase initiale. Il sera submergé, car la majorité des volcans-boucliers sur le globe sont situés sur les plaques tectoniques océaniques. Ainsi, tout le magma qu'il expulse est automatiquement refroidi et s'accumule sur les flancs de celui-ci. Au fur et à mesure des éruptions, le sommet se rapproche de la surface jusqu'à atteindre celle-ci. Dans les cas des îles d'Hawaii, on peut constater la présence d'un volcan à ce stade. Il s'agit du mont Loihi (Decker et al., 1987).

Le moment où le sommet du volcan sort de l'eau est appelé la phase sous-marine peu profonde. Le volcan aura à ce moment un comportement un peu plus explosif étant donné sa proximité avec l'eau. On appellera ses explosions des hydro-explosions (Decker et al., 1987).

La troisième phase sera celle de la formation du bouclier en lui-même, soit le stade du bouclier émergé. Elle s'appelle d'ailleurs aussi la phase de construction subaérienne du bouclier. À ce moment, le volcan est bel et bien sorti de l'eau. À cette étape, le volcan s'accroît grâce à l'accumulation des coulées de lave sur les pentes du volcan et de l'intrusion de corps magmatiques sous la forme de réservoirs (Rossi, 1996). Le nombre de coulées de lave dans cette phase est très nombreux et il en résulte la croissance du volcan-bouclier.

La phase suivante est celle qu'on appelle la post caldéra. Dans cette phase, il se forme des cônes de cendres et l'activité volcanique est grandement diminuée puisque le point chaud n'est plus directement sous le volcan. La quatrième phase est aussi celle dans laquelle on retrouve le Kilauea actuellement (Decker et al., 1987). Cette phase se développe lorsque la quantité de lave sous le volcan n'est plus suffisante pour soutenir la construction du bouclier. Il est important de préciser que le Kilauea en est au tout début de cette phase. En comparaison, le Mauna Loa est en fin de cette phase. C'est donc dire que les phases peuvent durer plusieurs centaines voire milliers d'années. À titre d'exemple, le Kilauea aurait débuté la première phase il y a 210 000 à 280 000 ans. Le Mauna Loa pour sa part aurait débuté la première phase il y a 0,6 à 1 million d'années (USGS, 2019b). Malgré tout, il faut bien comprendre que cette phase ne signifie pas moins d'éruptions et c'est ce que l'on constate d'ailleurs actuellement avec les récentes coulées du Kilauea en 2018 qui ont affecté un grand nombre d'infrastructures et la dernière éruption du Mauna Loa qui date de 1984 (Decker et al., 1987). Au cours de ce stade, les volcans sont enclins à de nombreux phénomènes d'instabilité. Des effondrements verticaux sont à l'origine des déformations des caldéras et ceci est dû au vidage rapide des réservoirs magmatiques (Chaput, 2014) (Figure 2).

Les phases suivantes vont marquer le déclin du volcan. L'érosion graduelle des flancs du volcan par l'eau et les conditions météorologiques vont se rendre jusqu'à l'étape de l'atoll (Clague et al., 2014). Tenons compte que durant la phase d'érosion du volcan, il est possible d'avoir une reprise éventuelle d'une activité volcanique. On appellera cette phase la phase de rajeunissement ou le stade de reprise. (Clague et al., 2014). Ceci a été vu dans le cas du volcan de l'île Maurice, ainsi que dans les îles d'Hawaii (Chaput, 2014).

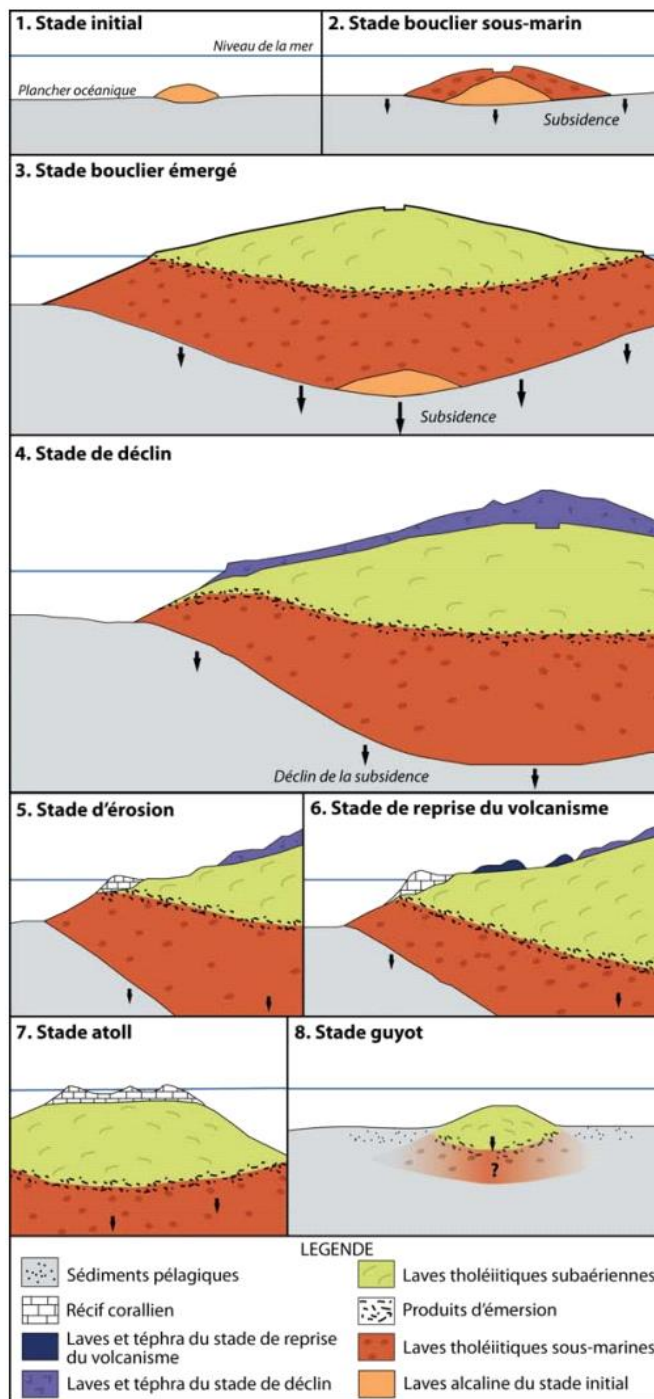


Figure 2 : Étape d'évolution des volcans-boucliers hawaiiens établie par Peterson et Moore (1987). Schéma modifié et adapté de Bachèlery (1999) (Chaput, 2014).

### 2.3. Types de laves

Les volcans issus de points chauds produisent deux types de laves. Premièrement, les laves Pahoehoe et deuxièmement les laves de type a'a. Les flancs du Kilauea sont principalement composés de lave pahoehoe (81%) bien que l'on retrouve un peu de lave a'a. (Peterson et al., 1980). Même si elles sont produites par le même volcan, les deux laves ont des caractéristiques différentes. Les laves pahoehoe sont des laves à la surface plus visqueuse et auront souvent une épaisseur faible si on les compare aux laves a'a qui elles peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur (Peterson et al., 1980). Les pahoehoe auront une vitesse de déplacement très lente et visuellement elles ressemblent à des petites vagues. Ce type de lave coulera normalement dans une trajectoire mince et allongée. (Peterson et al., 1980). Les pahoehoe sont également responsables de la formation de ce que l'on appelle les tubes de laves. Ces tubes de lave se transformeront en véritable rivière de lave advenant une éruption de grande ampleur (Byrnes et al., 2001). Les a'a pour leur part sont des laves beaucoup moins visqueuses à la surface et beaucoup plus épaisses. Elles se déplaceront également plus rapidement parfois même plusieurs mètres par minute. En termes d'apparence, les laves a'a sont rugueuses dentelées et elles se morcellent en gros morceaux qui peuvent ressembler à des bulles épineuses (Peterson et al., 1980). Les deux types de laves sont cependant extrêmement liés. En effet, les a'a sont souvent issus d'une lave qui était une pahoehoe au départ. Plus précisément, si la viscosité est faible, il est nécessaire d'avoir une grande contrainte de cisaillement afin de faire passer une lave de pahoehoe vers une lave de type a'a. À l'inverse si la viscosité est élevée, la contrainte de cisaillement peut être faible pour débiter la transition vers les laves a'a' (Byrnes et al., 2001). La contrainte de cisaillement est la friction qui existe entre un liquide et le sol. Cette friction qui s'exerce avec la partie basse d'un liquide aura comme effet de ralentir la base du liquide. Ainsi, la base se déplace plus lentement que la partie qui est la surface et qui n'est en friction avec aucune matière solide (Byrnes et al., 2001).

## 2.4. Historique des éruptions du Kilauea

### *1780-1924*

Le volcan est né il y a environ 300 000 ans (Clague et al., 2014). La première période d'éruption du Kilauea enregistré dans l'histoire est celle débutant en 1780. À cette période, les outils pour mesurer, enregistrer et surveiller les volcans n'étaient pas les mêmes qu'aujourd'hui, mais on peut tout de même affirmer que le volcan était en période constante d'éruption jusqu'en 1924. Il s'agit d'ailleurs encore aujourd'hui de la plus longue période d'activité continue connue (Tilling et al., 2010).

### *1924-1955*

La fin de la période active continue du Kilauea sera marquée par une éruption explosive (David et al., 2014). Bien que la plupart des éruptions soient de type effusif et laissent seulement échapper de la lave, il arrive dans certaines circonstances que le volcan ait un comportement explosif. En effet, lorsque le magma est expulsé par les zones de rifts, le magma situé au sommet du volcan a tendance à être évacué ou encore le niveau de celui-ci diminue dans la caldéra. Il se créera donc un effet de vide dans la caldéra et lorsque survient des séismes, de nombreuses roches se retrouvent à tomber dans le cratère (USGS, 2019f). Ces séismes sont d'ailleurs occasionnés par le mouvement du magma dans les tubes de lave situé long des zones de rifts. Si une quantité suffisante de roches chute de cette manière, la caldéra se retrouvera bouchée. La plupart des roches tomberont lorsque la caldéra n'arrivera plus à supporter son propre poids. Elle s'écroulera alors sur elle-même (USGS, 2019h). Les roches créent donc un énorme barrage à la pression. Si le magma descend suffisamment dans le cratère, les roches qui sont tombées entreront en contact avec les nappes d'eau dans le sol créant ainsi de la vapeur. Cette vapeur s'accumulera graduellement jusqu'à créer une pression suffisante pour expulser les roches parfois jusqu'à des kilomètres de distance (Swanson et al., 2011). C'est exactement ce qui surviendra en 1924. Une explosion d'une grande ampleur surviendra projetant des tonnes de cendres dans l'atmosphère et plusieurs tonnes de roches sur de grandes distances. Cette

éruption durera près d'un mois (Tilling et al., 2010). Par la suite, le Kilauea entrera en période d'accalmie jusqu'en 1955.

### *1955-1960*

De 1955 à 1960, une série de trois plus petites éruptions a lieu. Tout d'abord, en 1955 une éruption survient le long de la zone de rift de l'est. L'éruption durera pendant près de 88 jours et nécessitera l'évacuation de deux villes soit Kapoho et Kalapana. En termes de dommage, on dénombre 21 maisons détruites dans les deux villes évacuées (USGS, 2019d).

En 1959, débute l'éruption aujourd'hui appelée Kilauea Iki (figure 3). Aujourd'hui, le Kilauea Iki est un lieu situé dans le parc national des volcans d'Hawaïi qui est fortement visité par les touristes. C'est en effet un énorme cratère tout près de la caldéra où s'était accumulée, à l'époque, une énorme quantité de lave formant un véritable lac. Bien qu'elle n'ait pas menacé d'infrastructures humaines, cette éruption aura tout de même permis de récolter beaucoup de données sur le comportement du volcan (Tilling et al., 2010). Cette éruption sera également de courte durée, puis le volcan tombera en dormance pour à peine un mois. En effet, dès 1960, une nouvelle éruption se produira le long de la zone de rift de l'est. La fissure se produira d'ailleurs tout près de la ville de Kapoho. Pendant plusieurs semaines, des efforts incommensurables seront effectués afin de faire dévier la lave qui se dirige alors directement sur les infrastructures. On construira de nombreuses barrières dans l'espoir de faire dévier les coulées vers l'océan. La puissance destructrice de la coulée de lave a'a détruira toutes ces protections avant de frayer son chemin vers les infrastructures. Presque la totalité de la ville de Kapoho sera détruite. On ne dénombrera aucun mort à la suite de l'évènement (USGS, 2019b).

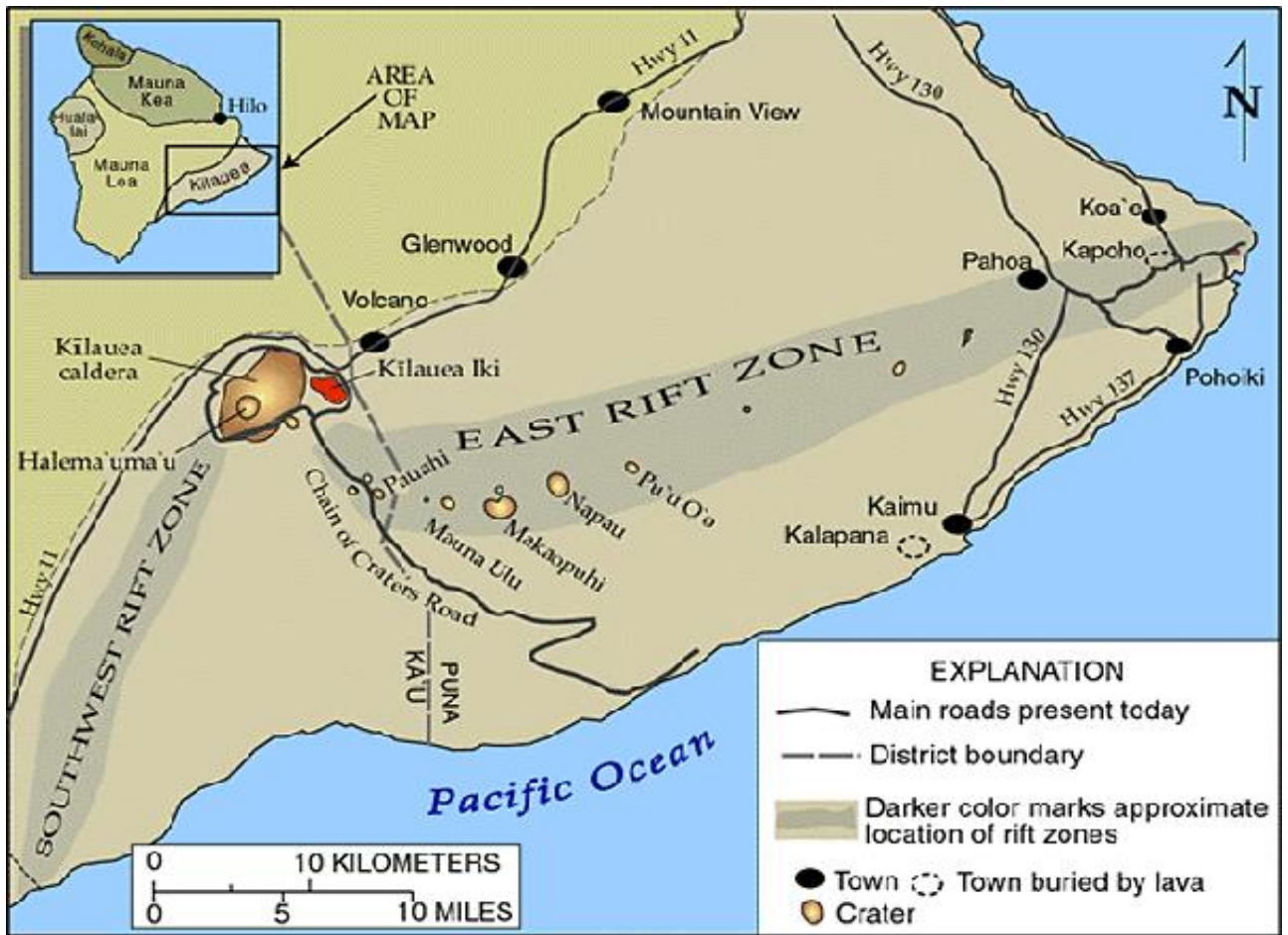


Figure 3 : Représentation des compositions du volcan Kilauea du USGS. (U.S. Geological Survey, 2019)

### 1969-1974, l'éruption Mauna Ulu

La deuxième plus longue éruption enregistrée fut celle de 1969. Elle durera 5 ans et le volcan rejettera des milliers de mètres cubes de lave (USGS, 2020). Elle marquera d'ailleurs fortement le territoire. En effet, on peut encore observer sur des images satellitaires les traces de cette éruption tout juste au sud de la suite de cratères nommé Mauna Ulu. Effectivement, la quantité de lave expulsée lors de cet évènement suffit à faire grandir le bouclier, mais créer aussi plusieurs petits cratères qui seront remplis par de la lave en fusion qui contribuera elle aussi à élever le terrain dans le secteur (USGS, 2020). Ce qu'il est intéressant de noter lors de cet évènement, c'est que la ligne de côte au sud du volcan avancera de quelques mètres à cause de lave qui refroidit au contact de l'océan et qui finit par s'accumuler. (USGS, 2020).



### *1983 à aujourd'hui, l'éruption Pu'u 'Ö'ö-Kūpaianaha*

La plus récente période d'éruption est nommée l'éruption *Pu'u 'Ö'ö-Kūpaianaha*. Le nom de la période d'éruption est tiré de la fissure par laquelle la majorité des coulées de lave s'échappent (Orr et al., 2013). Cette période débute tôt dans les années 80, plus exactement en 1983 et elle est encore active aujourd'hui. Dès les premières semaines d'éruption, la quantité de lave expulsée par le volcan est considérable. En effet, celui-ci tombe en éruption plus active toutes les trois à quatre semaines, et ce pendant les 3 premières années de la période. Les éruptions auront lieu le long d'un secteur de rift situé à l'est à environ 19 kilomètres de la caldéra (Orr et al., 2013). Il est important de préciser que l'éruption *Pu'u 'Ö'ö-Kūpaianaha* est une éruption qui survient majoritairement le long d'une zone de rift. En effet, il existe des événements s'étant déroulés au sommet du volcan à sa caldéra. Or, le sommet du volcan restera en dormance après 1983 et ne donnera aucun signe de vie jusqu'en 2007-2008 (Patrick et al., 2013). Afin de démontrer l'ampleur de l'éruption, on peut se référer à la quantité de terres rajoutée par les laves du Kilauea qui est de l'ordre de 540 hectares depuis 1983 (Tilling et al., 2010). À ce sujet, la figure 4 nous montre l'avancement d'un delta volcanique entre 2005 et 2007. Remarquer la quantité énorme de lave refroidie s'ajoutant à la superficie totale de l'île. Cette énorme quantité de nouvelle roche créée par le volcan est un parfait exemple de la dynamique d'un volcan-bouclier issu d'un point chaud.



Figure 4 : Delta volcanique créé par les laves issues du Kilauea en 2005 (à gauche) et 2007 (à droite).  
(Tilling et al., 2010)

### *2008-2018 l'histoire récente*

Bien que l'on considère ces années dans les années de l'éruption *Pu'u 'Ö'ö-Kūpaianaha* puisqu'il s'agit de la même période de remontée magmatique, ces années sont bien différentes. En effet, l'éruption qui débute en 2008 en est une qui provient du sommet du volcan. La période marque donc le réveil et le retour du magma dans la caldéra (Patrick et al., 2013). Cet évènement est toutefois particulier puisque l'on recense à la fois des éruptions au sommet et dans la zone de rift de l'est. Le magma est habituellement, soit au sommet ou dans les zones de rifts puisqu'il arrive que la caldéra se vide au profit de ses zones de rifts à l'est et/ou à l'ouest. De plus, les éruptions qui débutent en 2008 sont une série d'éruptions explosives de petite et moyenne ampleur. Or, les éruptions explosives sont des évènements plutôt rares puisque la dernière remonte à 1924 (Patrick et al., 2013).

En mai 2018 survient une éruption majeure. Le secteur principal d'éruption est la zone de rift de l'est, plus précisément dans la zone habitée de Puna. L'activité volcanique est tout d'abord observée par une grande quantité de sulfure dans l'air ce qui est typique d'une future éruption (USGS, 2019e). Au même moment, la lave dans la caldéra est en chute. La lave est donc en mouvement vers la zone de rift de l'Est. Au total, près de 24 fissures seront observées lors de cet évènement (USGS, 2019f). L'éruption effusive forcera l'évacuation

de 2 000 personnes en plus de causer la destruction de près de 700 résidences et infrastructures critiques telles que l'usine *Puna géothermale venture* qui fournit un tiers de l'électricité à l'île. Au même moment, l'évacuation de lave du sommet vers la zone de rift de l'est occasionnera des éruptions explosives qui envoient des panaches de cendre parfois jusqu'à 10 000 pieds d'altitude (USGS, 2019e). Au total, la lave couvrira 35 km<sup>2</sup> de terre et créa 845 Ha de nouvelles terres au sud-est (USGS, 2019e). Il s'agit de l'éruption volcanique la plus ravageuse de l'histoire américaine depuis l'éruption de Mont-Saint Helens en 1980 en termes de territoire touché.

## 2.5. Vulnérabilité face au volcan Kilauea

Les nombreuses éruptions dans l'histoire récente ont eu un impact important sur les infrastructures humaines. Aujourd'hui, qu'en est-il du risque face au Kilauea ? Lorsqu'on parle du volcan comme aléa, on ne parle pas seulement des coulées de lave. Plusieurs éléments peuvent mettre en danger les populations locales, comme les gaz volcaniques qui diminuent la qualité de l'air ou encore des tremblements de terre et même des tsunamis (James et al., 2014). Cependant, l'élément relié au volcanisme qui cause le plus de perte humaine est les blocs de roches qui sont expulsés lors d'éruptions explosives. En effet, la trajectoire de ces blocs est extrêmement imprévisible. En fait, dans les derniers 200 ans, la majorité des décès reliés au volcanisme à Hawaii ont été par des roches expulsées lors de ce type d'éruption (Tilling et al., 2010). Ce genre d'évènement est ce que l'on pourrait appeler un évènement à récurrence faible, mais à conséquences élevées dans la mesure où ils touchent des vies humaines. L'évènement explosif de 1924 est d'ailleurs l'un des plus meurtriers en matière d'aléa volcanique dans l'histoire des États-Unis (James et al., 2014). Toutefois, l'impact sur les humains reste important puisque les coulées magmatiques détruisent plusieurs secteurs habités et forcent donc les populations à se relocaliser ailleurs. Un autre impact est celui relié à la pollution de l'air. La contamination par sulfure de dioxyde est un irritant respiratoire sérieux. Il peut donner les symptômes suivants : mal de gorge, irritation des yeux, maux de tête, de la toux et des difficultés respiratoires (Orr et al., 2013).

Si les pertes humaines restent faibles, il en est autrement des pertes matérielles. Même s'il est relativement facile de prévenir les pertes humaines puisque le mouvement de la lave est lent, les laves des volcans-bouclier restent une menace pour les infrastructures (Chang, 1992). La vitesse moyenne de lave pahoehoe est de quelques centaines de mètres par heure voir parfois par jour alors que les a'a se déplacent en moyenne à 9,3 km par heure. Donc, les infrastructures sont extrêmement vulnérables face aux laves qui bien qu'elles se déplacent relativement lentement ont une force de destruction extrêmement élevée (Tilling et al., 2010). Quant au Kilauea, il est fort probable que d'autres infrastructures humaines se retrouvent sur son passage. En effet, certains secteurs habités se retrouvent encore actuellement dans des régions étant noté comme risque 2 ou 3 ce qui est tout près de l'échelle maximale de risque qui est de 1. À titre d'exemple, les éruptions actuelles du Kilauea ont détruit près de 800 bâtiments principalement dans la région du village de Kalapana (Tilling et al., 2010). La région de Kalapana est d'ailleurs située dans un secteur de risque 2 (USGS, 2019b).

Au niveau écologique, il existe deux réalités. Évidemment, la végétation est fortement vulnérable aux laves qui brûlent littéralement sur leur passage. Donc, à court terme, une éruption est dommageable pour l'environnement puisqu'elle détruit une grande quantité de végétation en plus de relâcher des gaz toxiques (James et al., 2014). Depuis le milieu des années 80, les scientifiques se sont d'ailleurs aperçus de la pollution créée par le volcan notamment grâce à l'observation de gaz comme le dioxyde de soufre. De plus, lorsqu'il y a des précipitations, les gaz se combinent à l'eau, l'oxygène et aux particules dans l'air (Orr et al., 2013). Il en résulte des pluies acides. Ces pluies sont fortement dommageables pour les récoltes en plus d'augmenter la corrosion des métaux et parfois même contaminer les sources d'eau potable (Tilling et al., 2010). Toutefois, il n'existe pas que des côtés négatifs. En effet, sur le long terme, les coulées de lave sont plutôt positives. Elles créent des terres extrêmement fertiles, favorisent la vie marine en plus de rajouter des terres à l'île (James et al., 2014).

## 2.6. Technologies de surveillances volcaniques

L'une des manières les plus efficaces de prévenir la perte de vie humaine est la surveillance de l'activité volcanique. En effet, en monitorant de manière continue le Kilauea, on arrive à prédire si une éruption explosive est probable ou bien encore si une éruption effusive arrivera bientôt. Il existe plusieurs indicateurs qui peuvent indiquer si le volcan sera actif dans les jours, semaines ou mois à venir.

L'une des méthodes les plus efficaces pour prévoir une éruption est d'observer la déformation du sol sur le volcan. Bien qu'il soit encore impossible de prédire l'éruption plusieurs mois à l'avance, l'observation de la déformation du sol combinée à l'activité sismique permet de prédire une éruption quelques heures ou jours à l'avance. Dans le contexte hawaïen, ce délai laisse une grande marge de manœuvre à la population locale afin de prendre des mesures pour veiller à sa sécurité (Tilling et al., 2010). Cette déformation au niveau du sol survient au fait que le magma qui se déplace sous la Terre dans des canaux le long des zones de rifts ou bien à la remontée magmatique vers la caldéra. L'activité sismique quant à elle provient évidemment du mouvement de la Terre et également au déplacement du magma qui peut parfois laisser un vide dans certains endroits comme la caldéra notamment. Dans le cas des surveillances des déformations par le biais de l'interférométrie, les satellites Envisat, ERS ALOS, TerraSAR-X et JERS sont les plus utilisés. Une résolution spatiale de 1 m à 50 m est nécessaire et la résolution temporelle est du temps réel à plusieurs mois (ESA, 2020).

Une autre méthode moins populaire, et jusqu'à ce jour moins efficace, est celle de surveiller la composition des gaz émise par le volcan. Une simple variation dans la composition des gaz comme le dioxyde de soufre peut en dire beaucoup sur la possibilité d'une éruption. Ainsi, les scientifiques installent des spectromètres infrarouges (Figure 5) afin de mesurer la composition des gaz. Ces outils sont d'ailleurs extrêmement précis puisqu'ils peuvent

détecter des variations de l'ordre de seulement quelques parties par millions (ppm) (Tilling et al., 2010).

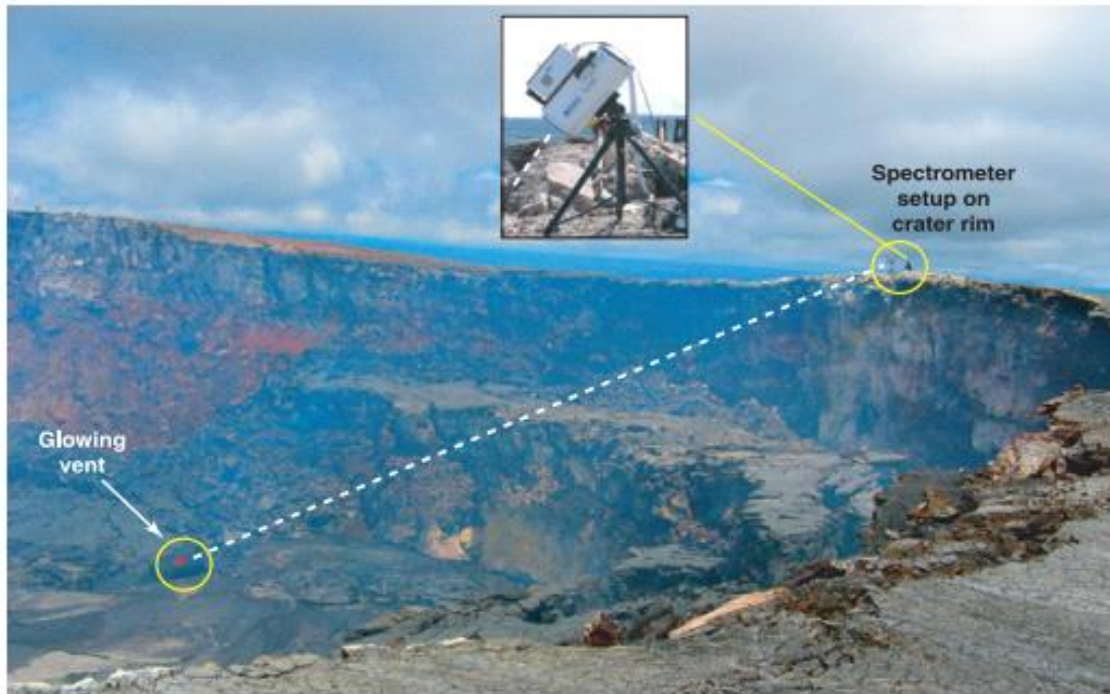


Figure 5 : Un spectromètre de type infrarouge installé en bordure du cratère utilisé pour mesurer les quantités de gaz émis par le Kilauea près d'un événement (Tilling et al., 2010).

On peut déterminer grâce à des analyses de température de lave si une éruption risque de s'intensifier ou bien s'il s'agit d'un épisode de courte durée. En récoltant des échantillons de laves, des scientifiques ont remarqué que la température de lave dépendait fortement de sa composition, mais également du temps qu'elle avait passé dans le sol en tant que magma. (USGS, 2019a). Plus précisément, une lave qui serait restée longtemps sous la croûte terrestre aurait une température plus froide et aurait une composition fortement cristalline. À l'inverse, une lave qui provient tout juste du manteau ou qui est restée moins longtemps sous la terre aurait une température plus élevée et serait moins cristalline. En termes d'observation, cette découverte permet de déterminer d'où la lave provient et par conséquent d'en apprendre plus sur la nature de l'éruption (USGS, 2019a). De plus, il arrive régulièrement que l'on prenne des images thermiques notamment au niveau de la caldéra afin de pouvoir observer le niveau de lave qui est autrement souvent caché par de la fumée ce qui limite la visibilité.

Dans un autre ordre d'idées, les SIG (système d'information géographique) restent un outil extrêmement important dans la prévention des risques volcaniques, mais également dans l'étude de ceux-ci. En effet, les nombreuses cartes que l'on peut retrouver sur des sites tels que le U.S. geological survey (USGS) sont toutes issues de SIG. Évidemment, la capture d'images par satellite reste cruciale dans la prévision des coulées de lave. Pensons notamment à l'observation des anciennes coulées de lave qui a un rôle majeur dans une carte d'aléa volcanique puisqu'elles permettent de déterminer à quel endroit la lave est susceptible de passer. Les images satellitaires permettent également de délimiter clairement les positions des points de fissure (Pareschi et al., 2000). Les SIG permettent aussi de prendre en considération des éléments qui auraient pu être plus complexes de considérer autrement comme la topographie qui se cache parfois sous une couche de végétation. Cette couche de végétation complique parfois la lecture d'images aériennes par exemple. On peut également générer des modèles numériques de terrain (MNT) qui peuvent permettre de prédire le comportement de la lave si elle part d'un point donné. L'équipe responsable de la surveillance de chaque volcan utilise des technologies différentes et selon leurs moyens économiques. Les satellites sont devenus des outils de prédilection dans la surveillance des volcans. Dans le cas de la surveillance des anomalies thermiques, comme la détection de points chauds, la surveillance de coulées de lave ou l'étude du refroidissement des coulées de lave, les satellites MODIS, NOAA AVHRR, ASTER et LANDSAT sont utilisés. D'une résolution spatiale variant entre 1 km à 1 mètre et d'une résolution temporelle variant entre le temps réel et plusieurs semaines, ces satellites sont très efficaces dans la détection des points chauds (ESA, 2020). Le tableau suivant montre la résolution spatiale et temporelle des différents satellites. Dans le cas de LANDSAT et ASTER, les deux ont une résolution temporelle de 16 jours pour compléter le tour de la terre. La résolution spatiale la plus haute est dans les deux cas de 15 mètres et s'étend jusqu'à 30 mètres pour LANDSAT et de 90 mètres pour ASTER (Wilson, 2016). Pour MODIS, la résolution spatiale est entre 250 mètres à 1 kilomètre. La résolution spatiale est donc plus basse que les deux précédents. Par contre, la résolution temporelle est grandement supérieure avec une résolution de 1 à 2 jours pour compléter le tour de la terre (Wolfe, 2020). Dans un dernier temps, il y a NOAA-AVHRR qui a une résolution spatiale de 1 kilomètre. Il s'agit donc du satellite avec la moins grande résolution spatiale. Par contre, il peut passer jusqu'à 4 fois par jour, ce qui

fait qu'il s'agit d'un satellite intéressant pour toute sorte de catastrophes naturelles qui doivent être suivies de très près (Lagouarde et al., 1986).

Tableau 1 : Résolution spatiale et temporelle des différents satellites.

	<b>MODIS</b>	<b>NOAA-AVHRR</b>	<b>ASTER</b>	<b>LANDSAT</b>
Résolution spatiale	250 m à 1 km	1 km	15 à 90 m	15 à 30 m
Résolution temporelle	1-2 jours	4 fois par jour	16 jours	16 jours

Par la suite, pour ce qui est de la topographie et les changements de couverture des sols, on observe la lave qui modifie la surface, ainsi que des changements dans le mouvement du sol. De même, on observe le rétablissement d'une région et la succession écologique après une éruption. Le LIDAR est la technologie utilisée dans ce genre d'analyse. D'une résolution spatiale de 1 m et d'une résolution temporelle sur plusieurs heures et années, ceci permet la conception d'un modèle numérique d'altitude (MNA) (ESA, 2020). Dans le cas de l'île d'Hawaii, le LIDAR est majoritairement disponible sur les régions côtières. Les terres intérieures ne sont pas desservies par le LIDAR. Ceci peut donc créer une perte d'information dans le cas du volcan Kilauea. Cependant, le site du Pacific Islands Ocean Observing System propose les données d'un Digital Elevation Model ou modèle numérique de terrain en français de l'ensemble de l'île.

L'une des dernières observations est la télédétection des panaches volcaniques. Ceci permet de faire une analyse de l'impact de l'éruption sur le climat, l'observation de l'activité éruption, ainsi que de gérer la sécurité aérienne. Les satellites les plus utilisés dans ces cas-ci sont le Meteosat MODIS, ASTER et LANDSAT. Dans ce cas-ci, la plupart des satellites peuvent faire le travail. La résolution spatiale doit être plus grande que 1 km et la résolution temporelle est du temps réel à plusieurs jours (ESA, 2020). En résumé, les



SIG sont utilisées souvent dans la mitigation des risques naturels comme les risques volcaniques (Pareschi et al., 2000). Bien que les principaux outils d'observation et d'analyse aient été nommés, il existe beaucoup d'autres méthodes qui sont utilisées dans la surveillance des volcans et l'analyse des éruptions volcaniques.

Une autre technique utilisée afin de diminuer la vulnérabilité face aux volcans et qui dans le cadre de cette étude est importante est la production de la carte d'aléa. La plupart des volcans du monde possèdent une carte d'aléa. Les cartes d'aléa sont basées en majorité sur les éruptions passées du volcan ainsi que sur la topographie. Ceci permet d'identifier les zones les plus dangereuses et les plus susceptibles de voir de nouvelles éruptions se diriger vers ces lieux. Il vise principalement à faire diminuer la vulnérabilité des citoyens et des habitations (James et al., 2014). En effet, en évitant de construire dans des zones à risque, on retire l'une des variables du risque soit la vulnérabilité. Dans le cas de l'île d'Hawaii, la carte délimite 9 différentes zones de risque. La zone 1 étant la plus dangereuse et la 9 la moins dangereuse. Les zones 1 sont en fait les secteurs de rift ainsi que les environs de la caldéra. Dans ces secteurs, 25% du territoire ou plus est recouvert de lave récente. Par récente, on entend des laves qui datent au maximum du 19e siècle. Les zones 2 sont plutôt des secteurs adjacents aux rifts zones. Ils sont également identifiés comme les endroits situés en aval des zones de rifts c'est-à-dire au bas des pentes. Les zones 3 sont des secteurs autour du Kilauea et du Mauna Loa où le risque qu'une coulée s'y rende est plus faible que dans la zone 2. Dans ces secteurs en moyenne 5% du territoire a été touché par une lave récente. La dernière zone située près du Kilauea est la zone 5. Cette zone est un peu spéciale puisqu'elle n'a pas été touchée dans une période récente. En effet, la caldéra elle-même protège ce secteur grâce à l'escarpement du sol faisant face au sud dans la caldéra qui créer une barrière naturelle pour la lave qui emprunte alors un autre chemin. (USGS, 2019e) (Mulineaux et al., 1987) (Figure 6). Les zones 1, 2, 3 et 5 sont les zones prioritaires de l'étude puisqu'il s'agit des limites touchées par le volcan Kilauea.

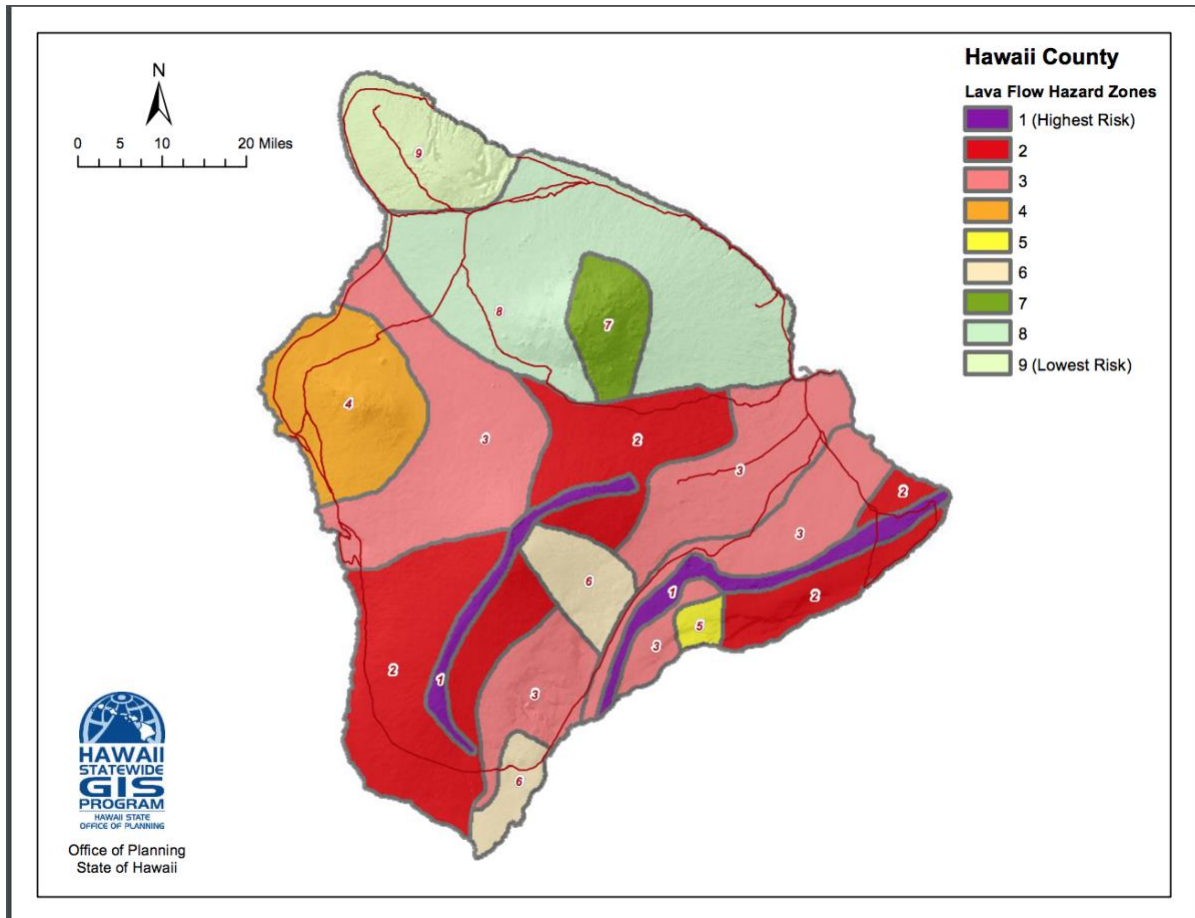


Figure 6 : Carte d'aléa des volcans de l'île d'Hawaii du gouvernement d'Hawaii (Office of planning, État d'Hawaii, 2019).

## 2.7. Les analyses multicritères

Les analyses multicritères ou méthodes d'aide à la décision multicritères (MCDM) sont introduites dans les années 70 pour répondre à un besoin de prise de décision complexe (Yan, 2018). Il existe deux groupes : (1) les méthodes d'aide à la décision multi-objectifs (MODM) et (2) les méthodes d'aide à la décision multi-attributs (MADM) (Pohekar et al., 2004). Dans ce texte, les méthodes d'aide à la décision multi-attribut vont être priorisées. Dans le cas des différentes méthodes, il comporte chacun des avantages et des inconvénients en fonction du domaine d'application. Cependant, les points communs sont semblables. Elles présentent des critères conflictuels et des unités incomparables.

Dans la littérature, on retrouve principalement trois groupes d'instinct de MADM : (1) mesure de la valeur; (2) modèle de but, d'aspiration ou de niveau de référence; (3) les méthodes de surclassement (Yan, 2018) (Figure 7).

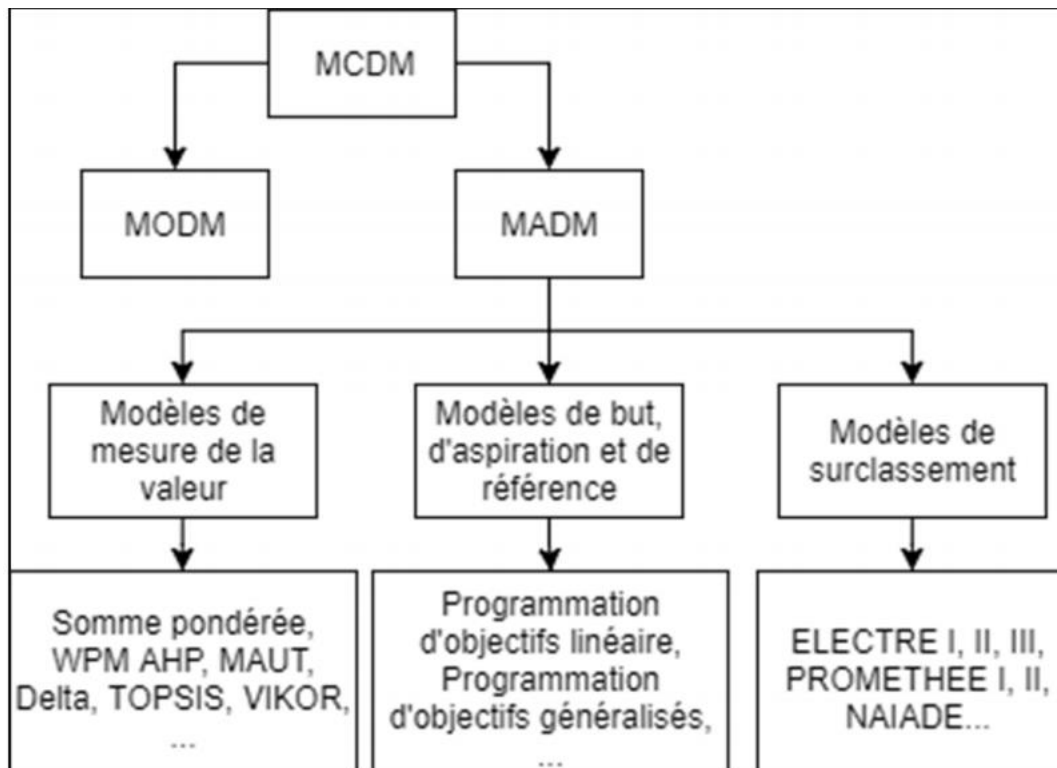


Figure 7 : Classification des méthodes d'analyse d'aide à la décision selon Belton et Stewart, 2002

Dans le cas des modèles de mesure de la valeur, il s'agit des méthodes les plus utilisées. Ces méthodes sont simples d'utilisation puisqu'il s'agit de faire la sommation des différents critères. La méthode de la somme pondérée est celle qui sera utilisée dans ce projet pour la réalisation de la carte d'aléa et celle de risque du volcan Kilauea. Dans la littérature, il y a très peu ou même aucune carte d'aléa ou de risque volcanique qui a été réalisé à l'aide d'une analyse multicritère dans le domaine volcanique. Puisqu'il s'agit des méthodes les plus simples d'utilisation, il était plus facile de créer un projet avec ce type d'analyse multicritère et mettre davantage d'énergie dans la réalisation des cartes et la compréhension. Par la suite, les modèles de but, d'aspiration et de référence ou méthode

hiérarchiques sont des méthodes de décision principalement basées sur la comparaison des critères et des actions par paires (Greene et al., 2011). La méthode la plus connue est la analytical hierarchy process dans ce groupe.

Pour terminer, les méthodes par surclassement sont des méthodes de décision principalement basées sur la comparaison des actions par paires et qui permet de déterminer les actions à privilégier (Greene et al., 2011). On retrouve les méthodes ELECTRE I, II, III et PROMETHEE. Les deux dernières méthodes sont plus complexes que les premières méthodes d'analyse multicritère.

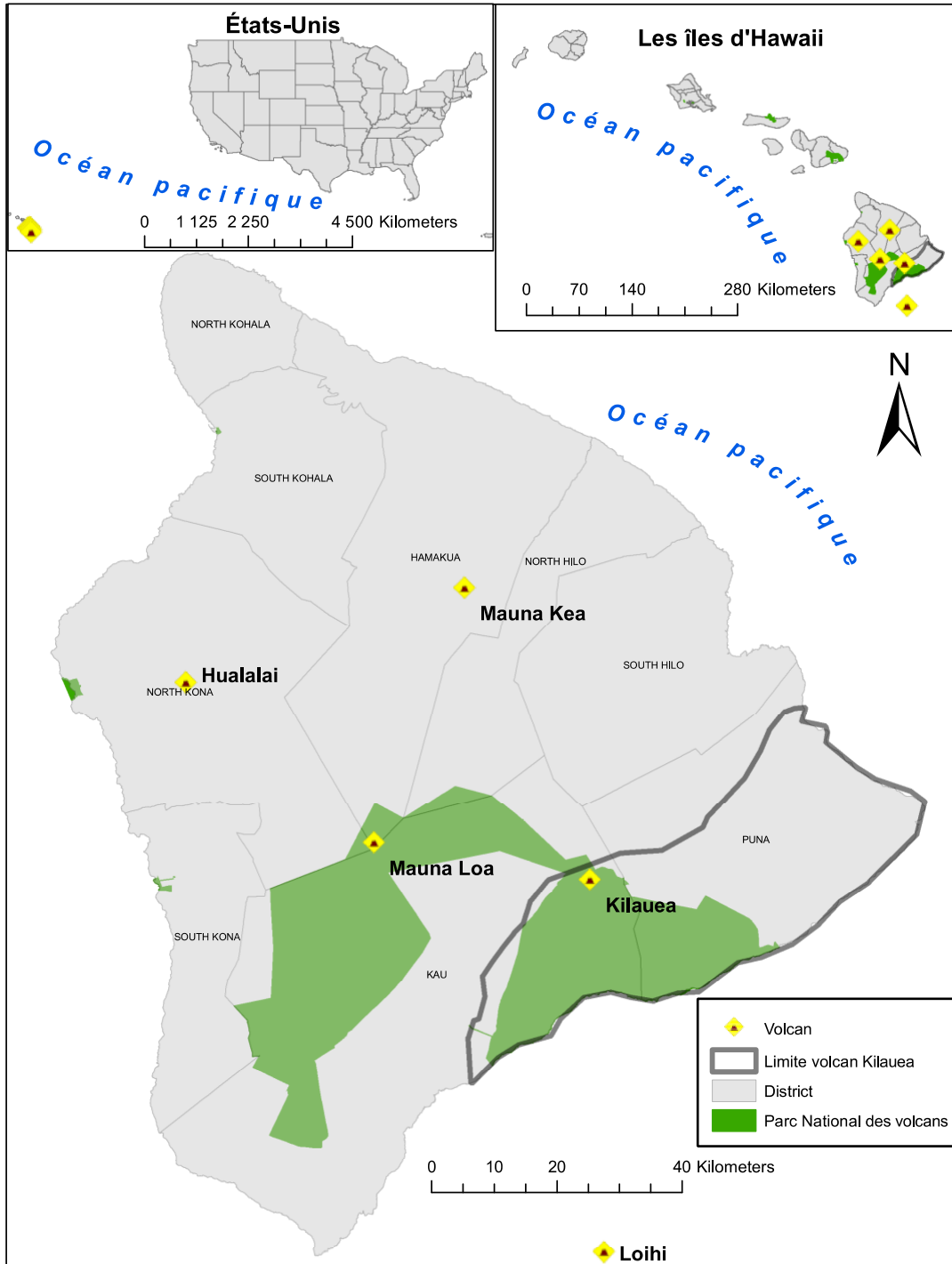
### 3. Matériel et méthodes

#### 3.1. Site d'étude

La zone d'étude choisie est l'un des 51 états des États-Unis. Il s'agit de l'état d'Hawaii. Les îles d'Hawaii se situent dans l'océan pacifique. Cet état est constitué de 7 îles principales, soit Kauai, Molokai, Lanai, Kahoolawe, Maui, l'île d'Hawaii et Oahu. La recherche s'est concentrée principalement sur l'île d'Hawaii, dans le parc national des volcans sur le volcan Kilauea. Ce volcan est situé à  $19^{\circ} 24' 24.8148''$  N et  $155^{\circ} 17' 0.1896''$  W (USGS, 2019), au sud-est de l'île. Le volcan Kilauea sera la zone d'étude. Une limitation des actions du volcan a été établie par le USGS dans sa carte d'aléa et sera utilisée pour délimiter le territoire de l'étude (Figure 8).

Le volcan Kilauea se situe dans le parc national des volcans. On retrouve deux volcans actifs dans ce parc, soit le Kilauea et le Mauna Loa. Le parc compte plus de 523 miles carrés du sommet du Mauna Loa jusqu'à la mer (Parc national du volcan, 2020). Ce parc national est l'un des plus grands du monde à proximité des volcans avec plus de 150 miles de sentiers de randonnées à travers des cratères volcaniques et deux volcans encore actifs. Ce parc a été nommé site mondial de la biosphère par l'UNESCO en 1980 et puis en 1987, un site du patrimoine mondial.

Dans le parc des volcans, on retrouve également le *Hawaiian Volcano Observatory* (HVO). Celui-ci fait partie du programme du *Volcano hazards* du USGS. La mission du HVO est de surveiller, d'étudier et d'évaluer les dangers des volcans actifs et des tremblements de terre à Hawaii. Il communique les résultats de leur recherche avec le public, aux responsables des urgences et à la communauté scientifique (Kawena Pukui, 2020). Le HVO est perché au bord de la caldéra du volcan Kilauea. En 1912, on retrouvait qu'un seul géologue, puis aujourd'hui, une équipe de plus de 25 personnes, dont des scientifiques spécialisées en géologie, géophysique, sismologie, gaz volcaniques et bien d'autres. Le site comprend plus de 100 stations sur le terrain avec plusieurs instruments enregistrant des données 24 heures sur 24 afin de suivre les activités et de soutenir les recherches volcaniques et sismiques (Kawena Pukui, 2020).



Auteur : Laurie Rivet  
 Source : U.S. Geological Survey et Office of Planning Hawaii

WGS 1984 UTM Zone 5N

Figure 8 : Site d'étude du volcan Kilauea.

### 3.2. Données

Dans le cadre de cette étude, deux catégories de données ont été utilisées. On retrouve une catégorie humaine et une catégorie physique. Trois tableaux distincts ont été réalisés pour la présentation des données. Dans un premier temps, on peut retrouver les données humaines, avec les domaines de l'éducation, la sécurité et la santé (tableau 1). Dans le domaine de l'éducation, on retrouve principalement les écoles de niveau garderie à secondaire. Dans le domaine de la sécurité, les données sont les postes de police et casernes de pompier. Puis dans le domaine de la santé, les établissements de la santé et les hôpitaux sont les données utilisées. Dans un deuxième temps, le tableau représente les aspects physiques du projet avec les coulées de lave et la topographie (tableau 2). Pour terminer, puisque les données de coulées de lave étaient nombreuses, il était préférable de les mettre dans un tableau différent pour davantage de clarté (tableau 3). Les différentes données de coulées de lave étaient disponibles en format shapefile. Les différentes données ont été sélectionnées avec soin et précision pour la réalisation de la méthodologie. Les différentes couches de données proviennent en majorité du gouvernement d'Hawaii. Les autres couches proviennent de différentes divisions du gouvernement fédéral américain comme le « United States Census Bureau » (USCB) ainsi que le « United States Geological Survey » (USGS). Le site de données du gouvernement d'Hawaii et le site du USGS ont été référés par un membre du USGS.

Tableau 2 : Sources des données humaines

Domaine	Source	Nom des données	Mise à jour	Format	Description
Éducation	US Census Bureau	2010 Census Block Groups	18-mai-19	Vectorel	Recensement de 2010
Éducation	Gouvernement d'Hawaii	Private Schools	05-avr-19	Vectorel	École privée de l'île d'Hawaii
Éducation	Gouvernement d'Hawaii	Public Schools	04-avr-19	Vectorel	École publique de l'île d'Hawaii
Éducation	Gouvernement d'Hawaii	PostSecondary Institution	27-févr-18	Vectorel	École pré secondaire de l'île d'Hawaii
Éducation	Gouvernement d'Hawaii	Preschools	04-avr-19	Vectorel	Garderie de l'île d'Hawaii
Sécurité	Gouvernement d'Hawaii	Police Stations	21-sept-17	Vectorel	Station de police de l'île d'Hawaii
Sécurité	Gouvernement d'Hawaii	Fire Stations	21-sept-17	Vectorel	Caserne de pompier de l'île d'Hawaii
Santé	Gouvernement d'Hawaii	DOH building	04-avr-19	Vectorel	Établissement de la santé sur l'île d'Hawaii
Santé	Gouvernement d'Hawaii	Hospitals in Hawaii	26-août-12	CSV	Hôpitaux des îles d'Hawaii
Santé	Gouvernement d'Hawaii	Wastewater Treatment Plants	20-déc-19	Vectorel	Usine de traitement des eaux de l'île d'Hawaii

Tableau 3 : Sources des données physiques

Source	Nom des données	Années de mise à jour	Format	Description
Pacific Islands Ocean Observing System	USGS 10-m Digital Elevation Model	11 mai 2015	Vectorel	Modèle numérique de terrain
USGS	Coulées de lave	2018	Vectorel	Tableau suivant



Tableau 4 : Données shapefile disponibles sur les coulées de lave.

ID	Années coulées de lave	Mois/nom	ID	Années coulées de lave	Mois/nom
1	1790	Non disponible	27	1961	Septembre
2	1790-1815	K9	28	1962	Décembre
3	1790-1815	Kealaalea	29	1963	Août
4	1790-1823	K5	30	1963	Octobre
5	1790-1823	K6	31	1965	Mars
6	1790-1823	K7	32	1965	Décembre
7	1790-1823	K8	33	1967-1968	Non disponible
8	1790-1823	Cône	34	1968	Août
9	1815-1823	Kamakaia	35	1968	Octobre-Novembre
10	1823	Juillet	36	1969	Février
11	1832	Janvier	37	1969-1974	Mauna Ulu
12	1840	Mai-juin	38	1971	Août
13	1868	Avril	39	1971	Septembre
14	1877	Mai	40	1973	Mai
15	1919-1920	Maunaiki	41	1973	Novembre-Décembre
16	1921	Mars	42	1974	Juillet
17	1922	Mai	43	1974	Septembre
18	1923	Août	44	1974	Decembre
19	1952	Juin-Novembre	45	1975	Novembre
20	1954	Mai-juin	46	1977	Septembre-Octobre
21	1955	Fevrier-Mai	47	1979	Novembre
22	1959	Novembre-Décembre	48	1980	Mars
23	1960	Janvier-Février	49	1982	Avril-Mai
24	1961	Février	50	1982	Septembre
25	1961	Mars	51	2014-2016	Juin à juin
26	1961	Juillet	52	2018	Mai

### 3.3. Analyse multicritère

Dans le cadre de cette étude, la technique utilisée est l'analyse multicritère à somme pondérée. Ce type d'analyse multicritère est simple à utiliser et permet d'analyser adéquatement les données sans recourir à des procédures complexes (Largy-Nadeau, 2017). La méthode consiste à choisir des critères déterminants, à leur attribuer un poids et à assigner un score à des risques selon leur conformité aux critères sélectionnés (Largy-Nadeau, 2017). Le résultat final est une carte qui illustre les scores obtenus ce qui permet de constater les endroits les plus à risque dans le cas de cette analyse. L'analyse multicritère à somme pondérée convient à cette étude puisqu'il permet de faire ressortir les endroits les plus problématiques des coulées de lave du volcan Kilauea, mais également de faire ressortir les zones à risques pour la population grâce aux différents critères (Figure 9). Dans cette étude, il est nécessaire de donner des pondérations plus élevées à certains critères d'analyse ce qui fait qu'il s'agit de l'analyse multicritères la plus pertinente.

Après plusieurs tentatives de communication avec le HVO et le USGS, une scientifique nommée Christina Neal a répondu. Mme Neal est en fait la scientifique responsable du HVO. Cependant, la carte des risques est peu développée dans le domaine volcanique et ne pouvait répondre aux questions puisqu'ils sont eux aussi en plein développement. En effet, le fait d'intégrer un point de vue humain à leur carte (transformant ainsi la carte d'aléa en carte de risque) faisait partie de leurs préoccupations futures. Donc, dans le cas de cette étude, la littérature a permis d'établir les différents critères des aléas et des risques. Cependant, encore une fois, la littérature ne développe pas les cartes de risque dans le milieu des volcans. Les différents critères de l'aléa, soit la topographie et les anciennes coulées de lave, ont été inspirés du USGS qui utilise ces critères pour réaliser leur carte d'aléa. Dans le cadre des critères de vulnérabilité, soit la population et les infrastructures, une étude sur la vulnérabilité face au volcan a été réalisée au Mexique et détaillée dans la section des critères humains. Les différents critères ont été analysés avec l'expertise et connaissance acquise et combinés à la littérature. Il s'agit d'une des seules études qui analyse la vulnérabilité de la population face au risque volcanique.

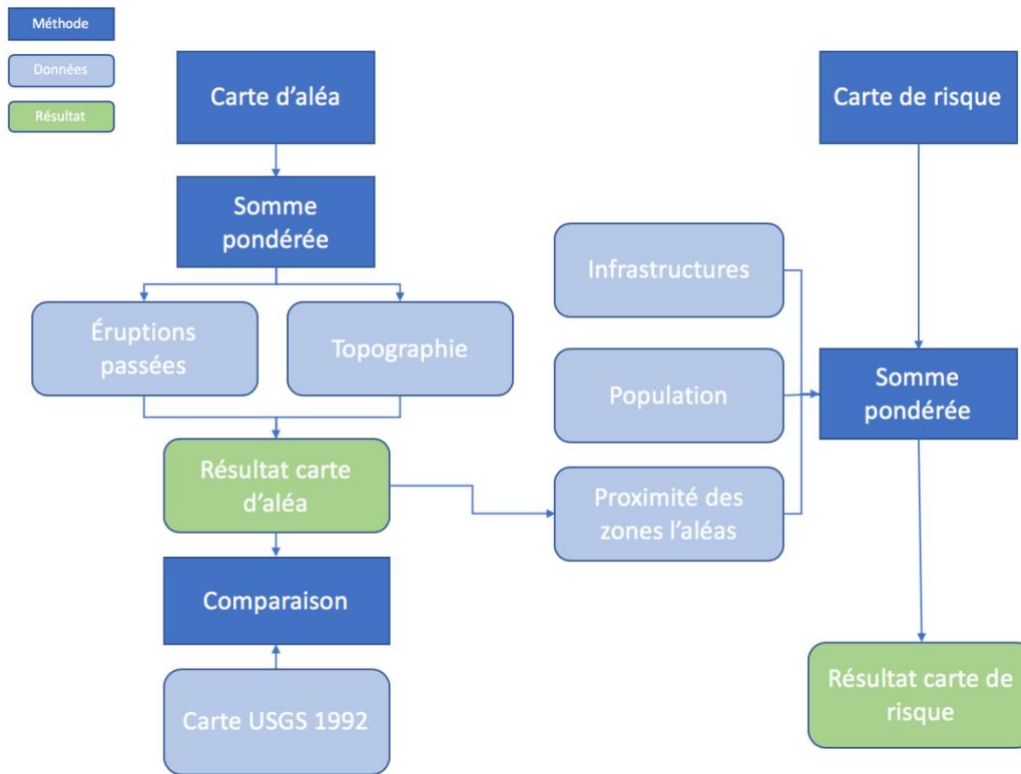


Figure 9 : Diagramme méthodologique des étapes de réalisation de l'analyse

### 3.4. Méthodologie

Dans le cadre de cette étude, deux cartes sont créées avec la superposition des différentes couches. Dans un premier temps, la carte d'aléa tient compte des coulées de lave et de la topographie. Dans un deuxième temps, la carte de risque prendra en compte la proximité de l'aléa, la population et les infrastructures (Tableau 4). La carte d'aléa sera établie sur un résultat final entre 0 à 4. Un résultat final entre 2 à 4 sera considéré comme des endroits très dangereux. Un résultat entre 1,50 à 2 sera des endroits dangereux. Un résultat entre 1 à 1,50 sera considéré moyennement dangereux. Un résultat entre 0,50 à 1 sera considéré faible. Un résultat en dessous de 0,50 aura un danger très faible. Dans le cadre de la carte de risque, le résultat final sera entre 0 à 4. Un résultat final entre 2 à 4 sera des endroits très dangereux. Un résultat entre 1,50 à 2 sera les endroits dangereux. Un résultat entre 1 à 1,50 sera considéré moyennement dangereux. Un résultat entre 0,50 à 1 sera considéré faible. Un résultat en dessous de 0,50 sera considéré très faible. Les différents critères et

pourcentages établis sont en majorité construits avec la littérature et la connaissance générale du sujet. Dû au fait que la littérature n'est pas encore avancée dans le domaine volcanique pour les cartes de risques, plusieurs aspects ont été discutés avec la directrice de l'essai pour réaliser ce projet.

Tableau 5 : Synthèse des catégories et des critères utilisés

Catégories	Critères	Classes	Score	Pondération
Physique Carte aléa	Éruptions passées	]25 % et plus]	4	75%
		]10 à 25%]	3	
		]5% à 10%]	2	
		]0% à 5%]	1	
		0%	0	
	Topographie (Pente)	]50% et plus]	4	25%
		]25% à 50%]	3	
		]15% à 25%]	2	
		]5% à 15%]	1	
		]0% à 5%]	0	
Humain Carte risque	Proximité de l'aléa	Zone 1	4	45%
		Zone 2	3	
		Zone 3	2	
		Zone 4	1	
		Zone 5	0	
	Population (Personnes par miles carrés)	]500 et plus]	4	15%
		]200-500]	3	
		]100-200]	2	
		]50-100]	1	
		]0-50]	0	
	Infrastructures	5 et plus	4	40%
		4	3	
		3	2	
		1 à 2	1	
		0	0	

### 3.4.1 Production de la carte d'aléa

La carte d'aléa est composée des critères des éruptions passées et de la topographie. L'agrégation des deux résultats par le biais de l'analyse multicritère à somme pondérée représente la carte d'aléa. Cette carte d'aléa permettra de déterminer les endroits les plus touchés dans les derniers 230 ans par les coulées de lave ainsi que l'impact de la topographie. Cette carte d'aléa sera comparée avec celle de 1992 du USGS.

#### 3.4.1.1. Analyse des coulées de lave

Les coulées de lave sont l'aspect le plus important de ce projet. Dans le cadre de la classification de celles-ci, les différents pourcentages attribués sont en fait semblables aux classifications que le USGS utilise dans leur carte d'aléa de 1992 (Mullineaux et al., 1987). Enfin, les différentes classifications du USGS sont faites sur des données volcaniques de plus de 750 ans pour certaines classes. Dans notre cas, les données les plus lointaines sont des données de 1790. Donc, les différentes classes ont été modelées et construites à partir des mêmes pourcentages, mais sur une durée de 230 ans. Les coulées de lave qui auront passé au même endroit plus de 25% du temps ont tendance à être des coulées plus dangereuses. En effet, les populations et les infrastructures ont davantage de chance d'être affectées par ces coulées de lave par son étalement sur le territoire. Ces coulées avec le pourcentage le plus élevé, soit 25% et plus se verront assigner un score de 4. Pour les autres coulées de lave, les scores se déclinèrent comme suit de 3 à 0 de score (Mullineaux et al., 1987). Les scores de 4 seront les aspects les plus dangereux et 0 les scores avec peu de dangerosité. Pour la pondération finale des coulées de lave par rapport à la topographie, le pourcentage sera de 75%. Il s'agit de l'élément le plus important d'une carte d'aléa puisqu'il s'agit de l'aléa concerné.

Les manipulations principales des coulées de lave se feront par pixel. En effet, pour obtenir les différents pourcentages des coulées de lave qui ont passé au même endroit, il est nécessaire de mettre l'ensemble des données en format matriciel. À partir de là, l'ensemble des couches de coulées de lave est reclassifié pour permettre de mettre l'ensemble du

territoire sur 0, tandis que les pixels des coulées de lave sont à 1. Ceci permet de distinguer le territoire affecté par les différentes coulées de lave. Par la suite, en additionnant l'ensemble des pixels, les données permettent de faire ressortir le nombre de fois que les coulées de lave ont passé au même endroit sur le territoire. Il suffit par la suite de reclassifier ces données en fonction des pourcentages du USGS.

Évidemment, les coulées de lave sont importantes dans ce type de projet. Tout d'abord, il est important de connaître les territoires les plus affectés sur 230 ans. Ceci permet la protection des infrastructures et de la population. Les zones avec plus de 25% de coulées de lave sont des endroits avec une dangerosité très élevée et permettent aux citoyens d'éviter les constructions sur ces différentes zones, d'où l'importance de ce type de carte d'aléa pour la prévention envers la population.

#### 3.4.1.2. Analyse de la topographie

La topographie de l'île d'Hawaii dans la région du volcan Kilauea est de nature très peu prononcée. La majorité de ce territoire se trouve en moyenne entre 0 et 3% de pente surtout dans les villes comme Hilo. Les endroits les plus escarpés se trouvent sur les falaises sur le bord du pacifique ainsi qu'au sommet du Volcan Kilauea.

Dans le cadre de la topographie, la couche du Digital Elevation Model a été utilisée pour la réalisation de la pente de la région du Kilauea (USGS, 2015). En français, il s'agit d'un modèle numérique de terrain (MNT). Le MNT permet de voir les pentes, mais aussi les différentes fissures du sol. Avec le MNT, il est possible, dans un logiciel de SIG, dans ce cas-ci ArcGIS, d'utiliser l'outil *slope* pour faire la création de la pente. Les pentes avec une plus grande inclinaison peuvent engendrer une rapidité supérieure à la coulée de lave qu'une surface plane (USGS, 1998). La pente la plus élevée et la plus faible dans la région du Kilauea ont été les baromètres pour la création des différentes classes. Les pentes de plus de 50% se voient attribuer le score de 4 dû à leur grande inclinaison et à la grande dangerosité face à son aléa d'augmenter la vitesse (USGS, 1998). Les pentes les plus faibles, soit de 0% à 5 %, se voient attribuer le score de 0 (USGS, 1998). Ceci change très

peu la dynamique de la coulée de lave. L'entre deux sera composé, pour un score de 1, des pourcentages de pentes entre 5% à 15%, suivi d'une autre classe entre 15% à 25% avec un score de 2 (USGS, 1998). Pour terminer, la dernière classe intermédiaire sera de 25% à 50% pour un score de 3 (USGS, 1998). Dans le cas de la pondération finale qu'aura la topographie dans la carte d'aléa, son pourcentage final sera de 25% (USGS, 1998). La source du USGS explique que la topographie influe sur le comportement des différentes coulées de lave. Cependant, le risque le plus grand reste sans aucun doute les coulées de lave. Aux endroits où la pente est d'une grande inclinaison, ceci affecte grandement la vitesse de l'avancement de la lave. Par contre, dans notre terrain actuel, les pentes d'Hawaii sont de nature très faible ce qui en principe ne modifiera pas grandement la carte d'aléa. Également, on pourrait croire que les laves empruntent nécessairement le chemin le plus efficace et le plus court pour se rendre à l'océan tout comme le ferait une rivière, mais ce n'est pas toujours le cas. Bien que les pentes affectent la vitesse et la trajectoire, les laves sont extrêmement dynamiques. En effet, celles-ci peuvent se refroidir rapidement ou devenir plus visqueuses et bloquer ce qui était auparavant le chemin le plus efficace. Les laves peuvent donc, dans certains cas, traverser des petites pentes ou se déplacer de manière diagonale plutôt qu'en ligne droite vers l'océan (Mulineaux et al., 1987). C'est dans cette optique que le pourcentage accordé est de 25%, car bien que la topographie soit un facteur important elle peut varier grandement dû à des facteurs dynamiques. Cette réalité exposée par Mulineaux et al. (1987) justifie également le fait que le poids accordé aux coulées lui-même est plus important, car les laves peuvent affecter leur propre trajectoire.

#### 3.4.2. Production de la carte de risque

La carte de risque est créée avec la superposition de trois critères, soit l'aléa, la population et les infrastructures avec l'analyse multicritère de type pondérée. La carte d'aléa réalisée dans les étapes précédentes serait superposée à la population et aux infrastructures ce qui permet la création d'une carte de risque. Pour permettre l'uniformité du territoire du volcan Kilauea, la carte d'aléa a été gardée telle quelle pour pouvoir créer la carte de risque. Ceci permet encore une fois de déterminer à l'ensemble du territoire les endroits à risque. Les endroits avec beaucoup de population et de bâtiments seront des endroits à risque, comme

des endroits qui ont connu de nombreuses coulées de lave dans les dernières décennies. Cette carte permettra de constater les endroits avec un risque plus élevé et les endroits les plus surs sur l'île d'Hawaii. Ayant peu de littérature sur le sujet des cartes de risque en milieu volcanique, cette carte sera une avancée en la matière et pourra être reprise et modifiée pour amélioration par la part d'experts.

#### 3.4.2.1. L'analyse de l'aléa

L'aléa aura un lien avec la carte d'aléa qui aura été fait précédemment. Les différentes zones qui vont être établies lors de la création de la carte d'aléa vont être réutilisées pour la carte de risque. Ceci permettra de voir les zones affectées par les coulées de lave en lien avec la population et les infrastructures. Les pixels des coulées de lave ayant une dangerosité très élevée donc, une zone 4 aura un score de 4 qui représente une grande dangerosité pour la population ainsi que pour les infrastructures. La zone 0 qui sera les coulées de lave les moins grandes dans leur répétition auront un score de 0 puisqu'il ne pose pas un problème pour la sécurité de l'île. La gradation se fera entre les deux scores de 4 à 0 en 5 classes. Ceci est dû aux discussions avec ma directrice de l'essai. Dans une carte de risque, l'aléa est un enjeu important puisqu'il s'agit de l'aspect qui affecte les populations et qui est la raison même de la création des cartes de risque. En effet, la carte d'aléa à une importance capitale dans la gestion du risque puisque celle-ci a comme première fonction de fournir de l'information aux autorités ou planificateurs territoriaux afin que les futures infrastructures critiques ne soit pas dans des secteurs à risque (USGS, 2019f). Ce critère aura donc une pondération de 45% soit près de la moitié du poids total du a sa grande importance. L'aléa est important à connaître sur l'ensemble du territoire de façon équitable. Il est nécessaire de connaître les endroits les plus à risques non seulement pour la construction ou l'installation des populations, mais aussi pour les gens qui se déplacent sur le territoire, sur les routes et même à proximité du volcan dans le cas de nombreux touristes et résidents.



### 3.4.2.2. L'analyse de la population

La population d'Hawaii est à risque lorsqu'il y a des coulées de lave sur son territoire. La population est calculée en miles carrés pour permettre une meilleure compréhension pour les Américains qui utilisent cette unité de mesure, mais également parce que les données recueillies auprès de l'état d'Hawaii sont toutes calculées en miles. Les limites de recensement regroupées contiennent la densité de population. La densité permet de localiser les endroits les plus densément peuplés dans la limite de recensement. Par la suite, il est possible de donner un score de 4 à l'endroit ayant une population de 2000 personnes et plus par miles carrés. Ceci représente une zone à risque élevé soit très dangereux. Par la suite, un score de 3 sera donné à une densité de population entre 1000 à 2000 qui représente une dangerosité élevée. Ensuite, un score de 2 représente une densité de population entre 500 à 1000 qui montre un niveau de dangerosité moyenne. La prochaine classe sera entre 100 à 500 qui représente un score de 1 qui démontre une dangerosité faible. Pour finir, la classe 100 et moins, avec un score de 0 aura peut impact sur la population. Les différentes classes ont été créées en utilisant la densité la plus faible et la plus élevée du territoire. Pour la pondération de la population dans la carte de risque, son pourcentage sera faible. Ceci est dû au fait qu'il y a très peu de morts lorsqu'il se produit des coulées de lave sur l'île d'Hawaii. Dû à la lenteur des coulées de lave, les populations ont en majorité assez de temps pour évacuer les lieux et trouver refuge (Mulineaux et al.,1987). Alors, le risque pour la population est principalement faible pour ce type de volcan. Une pondération de 15% sera attribuée à ce critère.

### 3.4.2.3. L'analyse des infrastructures

Dans le cas des infrastructures, plusieurs infrastructures précises ont été sélectionnées pour permettre de faire la représentation de la population. Un article mexicain sur une analyse multicritère sur un volcan a permis la sélection des infrastructures (Aceves-Quesada, 2006). Cet article tient en compte seulement la vulnérabilité de la population et des infrastructures sans tenir compte de l'aléa volcanique qui les entoure. Donc, cette étude volcanique montre une carte de vulnérabilité et ne met pas encore en lien l'aléa et la

vulnérabilité pour créer une carte de risque. Dans cet article, les infrastructures sélectionnées sont, les casernes de pompier, les postes de police, les centres médicaux (hôpitaux et clinique) ainsi que les écoles du primaire au secondaire. Dans notre étude actuelle, les mêmes infrastructures ont été sélectionnées. Ceci permet de localiser où la majorité des infrastructures d'habitation se situe puisqu'il se regroupe principalement à l'alentour des écoles, ainsi que près des institutions de santé et sécurité soit là où il y a des services (Aceves-Quesada, 2006).

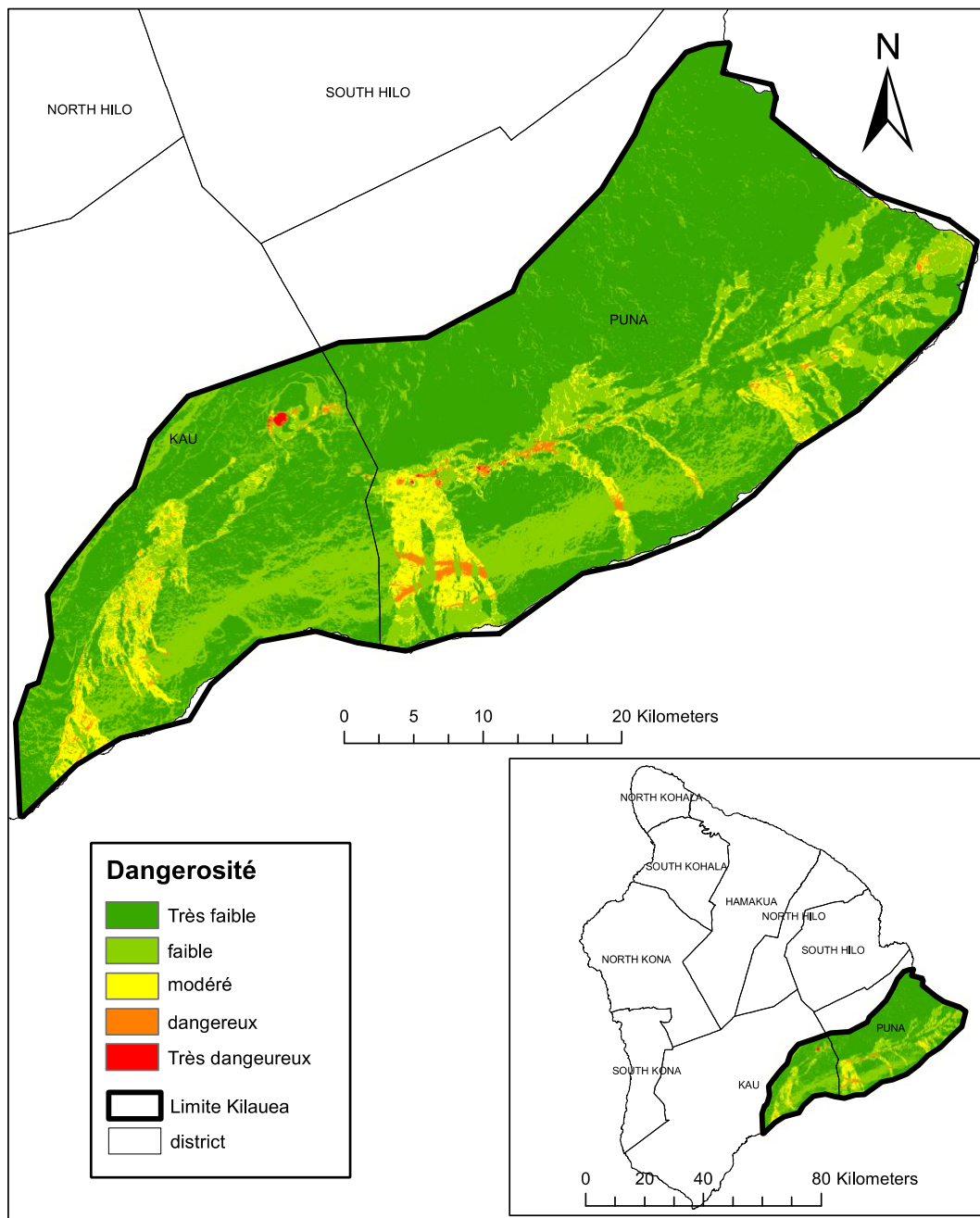
L'analyse sera faite à partir des blocs de recensement. Le calcul sera de voir combien il y a d'infrastructure dans chacun des blocs. Les blocs avec plus de 5 infrastructures nommées précédemment se verront octroyer le score de 4 qui correspond à un danger élevé. Les scores déclineront jusqu'à 0 ou on retrouve zéro infrastructure de ces types et donc un danger faible. L'aspect le plus dangereux dans les coulées de lave à Hawaii est les infrastructures. Parfois construites sur d'anciennes coulées de lave, les infrastructures sont l'aspect du risque qui est le plus important dans ce type de volcan. La pondération sera donc de 40%. Le grand poids accordé aux infrastructures dans l'analyse est justifiable par le fait que la gestion du risque volcanique est souvent faite en fonction des dommages et conséquences que l'aléa peut causer. Dans le cas du Kilauea, nous avons expliqué que les personnes peuvent facilement être évacuées, car elles se déplacent bien souvent plus rapidement que la lave elle-même. Or, le bâtiment lui reste sur la trajectoire de la coulée. Les dommages économiques et physiques possibles sont donc ici bien plus grands (Molist, 2017). S'il n'est plus possible d'éviter le problème alors il faut le dévier. Cependant, les mesures qui peuvent être prises sont souvent temporaires, car la lave a tendance à surmonter les barrières ou les protections mises en place (Mulineaux et al., 2017). De plus, il est important de compter dans l'analyse le fait que les infrastructures critiques telles que les écoles, poste de police, hôpitaux, etc. lorsqu'elles sont endommagées peuvent avoir un impact considérable sur la vie normale de la communauté affectée (Jenkins et al., 2014).

## 4. Résultats et interprétations

### 4.1. Carte d'aléa

La figure 10 montre la carte d'aléa du volcan Kilauea. Il s'agit de la superposition des couches de la pente et des anciennes coulées de lave. Les endroits les plus dangereux sur la carte représentent la caldéra et quelques emplacements sur la zone de rift est. Tous les endroits qui ont été marqués par une coulée de lave dans les derniers 230 ans sont mis dans la catégorie modérée puisqu'il s'agit d'un risque important. Lorsque ces coulées de lave sont jumelées avec une forte pente, comme on peut l'observer sur le bord des côtes, la catégorie se transforme en dangereux. Cependant, la grande majorité du territoire n'a pas connu de coulée de lave dans les derniers 230 ans et ne possède pas de pente abrupte. Il est intéressant d'observer certains secteurs à l'est de la carte qui sont habités, ce qui laisse croire qu'une possible vulnérabilité et donc risque pourra être observé lors de la formation de la carte de risque.

# Carte d'aléa du Volcan Kilauea à Hawaii



Auteur : Laurie Rivet  
 Source : U.S. Geological Survey et Office of Planning Hawaii

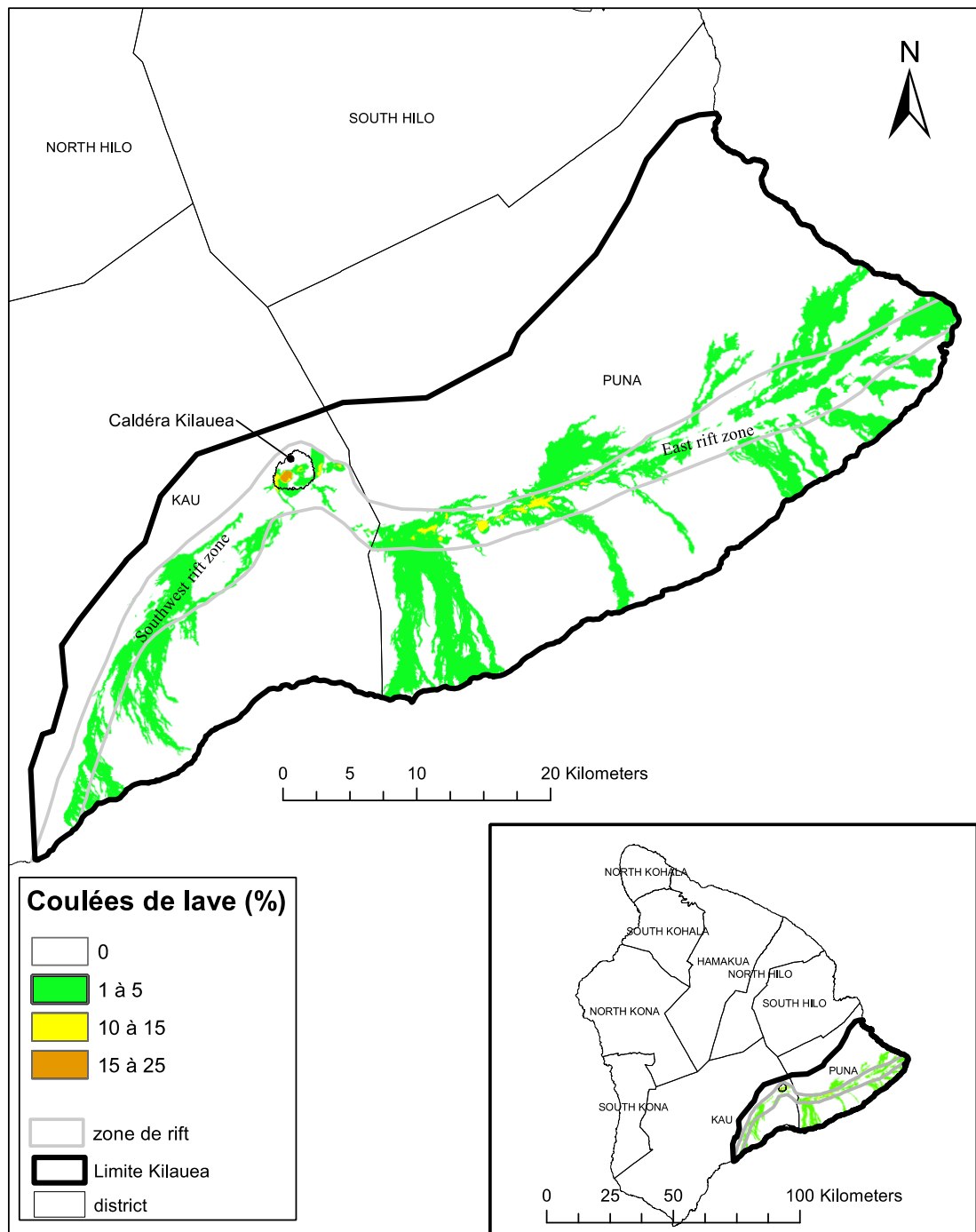
WGS 1984 UTM Zone 5N

Figure 10 : Carte d'aléa du volcan Kilauea

#### 4.1.1. L'analyse des coulées de lave

La figure 11 montre les résultats du traitement des coulées de lave de 1790 à 2018. Dans la zone en blanc, il s'agit des endroits qui n'ont pas eu de coulée de lave depuis 1790 (score 0) ce qui représente une dangerosité très faible. Les endroits en vert montrent les coulées de lave qui ont passé au même emplacement entre 1 à 3 reprises. C'est donc entre 1 à 5 % du nombre total de laves qui ont passé à ces endroits (score 1). Ces secteurs représentent une dangerosité faible. Les lieux en jaune montrent qu'il y a eu 5 à 15% (score 2) des coulées de lave qui ont coulé à ces endroits, soit entre 4 à 8 coulées de lave au même emplacement depuis 1790 qui montre une dangerosité modérée. Pour finir, les emplacements en orange représentent 15 à 25% (score 3) des coulées de lave. Il s'agit de plus de 8 à 13 coulées de lave qui ont passé au même endroit depuis 1790 ce qui consiste à un danger élevé. Dans le tableau synthèse des catégories, on retrouvait une cinquième classe qui était 25 % et plus des coulées de lave qui ont passé au même endroit depuis 1790. Dans la figure 9, il n'y a pas de zone 25 % et plus. On peut donc constater qu'il n'y a pas plus 25 % des coulées qui ont passé au même endroit. Si on tient bien compte des coulées de lave, la plupart sont en lien avec les zones de rift est et sud. De plus, le seul endroit qui est orangé sur la figure est en fait la caldeira du volcan Kilauea. Donc, il y a peu de coulées de lave qui ont emprunté le même chemin depuis 1790. Ces zones de laves sont des aspects importants pour la construction de la carte d'aléa ainsi que la carte de risque. La grande quantité de secteurs verts nous montrent également le grand dynamisme du magma. En effet bien que l'on retrouve une tendance générale le long du rift zone de l'est ainsi qu'à la caldeira, les coulées sont rarement dans un même secteur.

Superposition des coulées de lave de 1790 à 2018 du volcan Kilauea à Hawaii



Auteur : Laurie Rivet  
Source: U.S. Geological Survey

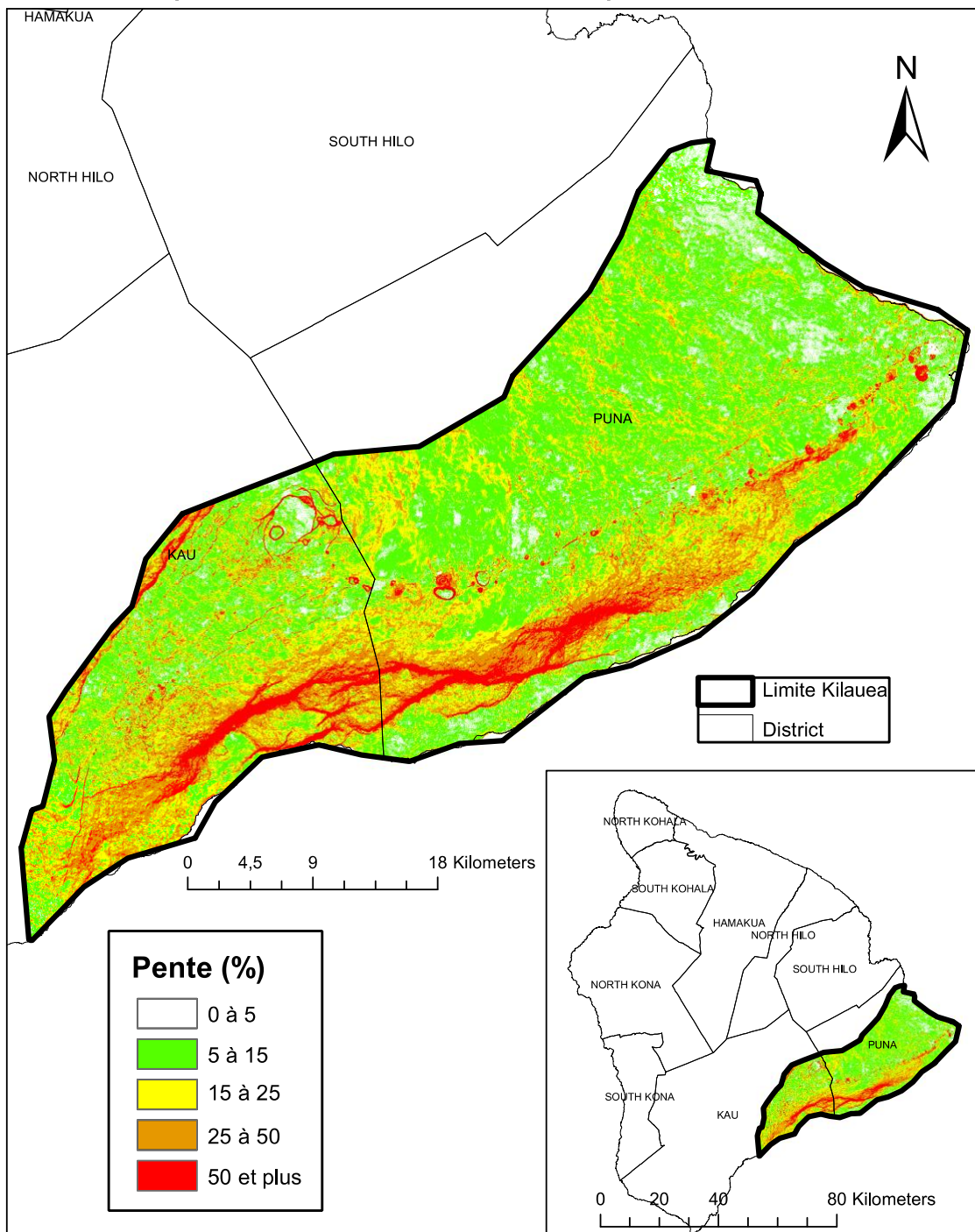
WGS 1984 UTM Zone 5N

Figure 11 : Cartographie des coulées de lave de 1790 à 2018 du volcan Kilauea à Hawaii

#### 4.1.2. L'analyse de la topographie

Pour la topographie, la figure 12 montre le pourcentage de pente du territoire à l'étude. Dans les zones en blanc, on retrouve les zones où les pentes se situent entre 0 et 5 % (score 0) qui constituent une dangerosité très faible. En vert, on retrouve les pentes qui se situent entre 5 et 15 % (score 1) de pente qui consiste à un niveau de danger faible dans le cas des coulées de lave. En jaune, les pentes de 15 à 25% (score 2) sont de niveau de danger modéré. En orange, les pentes de 25 à 50% (score 3) sont de niveau dangereux. Puis pour finir, les pentes 50 % (score 4) et plus sont en rouge avec une dangerosité très élevée. On remarque que dans son ensemble, la majorité du territoire se situe sous la barre des 15 % de pentes. Le niveau de dangerosité reste donc faible à modéré en ce qui a trait au niveau de pentes. On remarque cependant certains secteurs qui méritent d'être soulignés. En effet, deux secteurs en particulier retiennent l'attention, le premier est situé en bordure de la caldéra. Le secteur rouge à la limite nord-ouest du volcan Kilauea est particulièrement à pic. Le niveau de pente dans ce secteur s'explique par la fragilisation du sol par l'ancien lac de lave dans la caldéra qui fait maintenant en sorte de causer des effondrements de terrain. De plus, l'activité sismique encourage d'autant plus le détachement de certains bouts de sol. Deuxième secteur retenant l'attention, la bordure de côte au sud de l'île. Une longue bande rouge semble suivre la ligne de côte. Ces grandes pentes peuvent être expliquées par l'action de la lave en elle-même. En effet, au contact de l'eau, la lave se refroidit et finit par créer ce que l'on appelle delta de lave. Avec l'action répétée des vagues qui créent de l'érosion ces deltas finissent par s'effondrer et créent par le fait des sortes de falaises en bordure de mer (Tilling et al., 2010).

## Pourcentage des pentes du volcan Kilauea à Hawaii à partir d'un modèle numérique de terrain



Auteur : Laurie Rivet  
Source : Office of planning Hawaii

Figure 12 : Cartographie de la topographie du volcan Kilauea à Hawaii



## 4.2. Carte de risque

La figure 13 représente la carte de risque du volcan Kilauea. Cinq zones les plus à risque du territoire vont être analysées. Sur la figure 14, on retrouve une numérotation de 1 à 5 qui représente les zones étudiées dans la carte de risque.

La carte de risque nous permet de déterminer et d'observer les endroits les plus à risque de la région de Kilauea pour l'ensemble des populations et des cadres bâtis. On peut observer que dans la majorité du territoire, le risque est relativement faible pour la population et les infrastructures. Cependant dans l'est de la carte, on remarque des zones très chaudes qui ont des impacts sur les populations ainsi que les infrastructures. On retrouve dans ces endroits des concentrations de populations et d'infrastructures qui ont connu des coulées de lave dans les derniers 230 ans.

La zone 1 est une zone dangereuse pour la population. Il s'agit en fait de la caldéra du volcan. Il est donc très dangereux d'être dans les parages de la caldéra. Il est important de comprendre qu'une carte de risque expose les endroits à risque pour la population. Il ne s'agit pas nécessairement des endroits habités. Il s'agit seulement de montrer qu'une région comme la caldéra est dangereuse en tout temps pour les touristes et les habitants qui s'y promènent. Évidemment, personne ne va installer sa maison à côté de la caldéra. Cependant, les nombreux touristes par année qui s'y promènent doivent être au courant des conséquences et le site doit veiller à la sécurité de ces personnes.

La zone 2 représente la zone de rift est du volcan. Cette zone a subi de nombreuses coulées de lave au cours des années et est une zone très dangereuse pour s'installer. L'endroit est en majorité de pente faible, entre 5 à 15%, mais la concentration des coulées de lave le catégorise d'endroit très dangereux pour la population et les infrastructures.

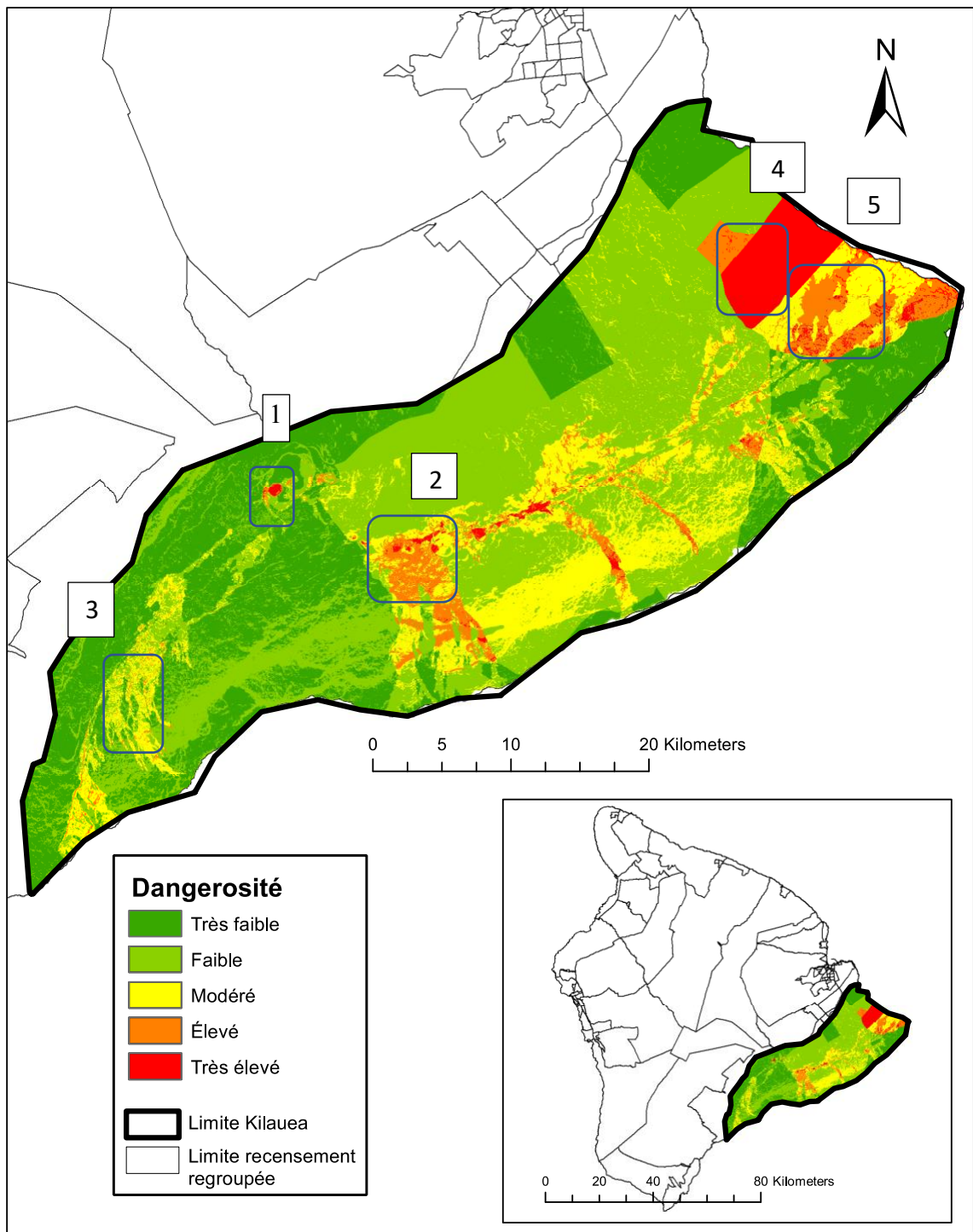
La zone 3 représente la zone de rift sud du volcan. Comme l'explication précédente, cette zone connaît de nombreuses coulées de lave à travers les années. Sa zone de pente abrupte et la forte présence de coulée de lave rendent cet endroit très dangereux pour la population.

La zone 4 est la partie la plus habitée de cette partie du territoire. Le territoire est en majorité plat avec aucune coulée de lave à son actif en 230 ans. Par contre, la densité de population est très grande et la quantité de bâtiments est également de grande ampleur. Donc, cette partie du territoire est très à risque si une coulée de lave venait à toucher cette localité. Le quartier possède plus de 11 404 habitants et se nomme Hawaiian Paradise Park (U.S. Census Bureau, 2010). De plus, organiser l'évacuation de ces 11 404 personnes en cas de laves demanderait un effort considérable et une bonne organisation. Il s'agit donc d'un secteur qui, malgré le fait qu'il n'a pas été touché encore, est à surveiller puisqu'il est tout de même à proximité d'endroit où des coulées ont déjà passé. Ce n'est donc pas impossible que l'aléa y survienne. À l'égard de l'observation sur la carte de risque, cette localité devrait avoir un plan d'urgence en sa possession pour toute éventuelle coulée de lave.

La zone 5, dans les cartes de la densité de population, se situait dans la catégorie de dangerosité modérée ainsi que la carte des infrastructures. Cependant, ce territoire a déjà eu une coulée de lave dans les derniers 230 ans. Ceci fait en sorte que ce territoire est très dangereux pour la population. Les quartiers de Hawaïien Beaches et Nanawale se situent dans la zone. Donc, plusieurs facteurs sont en lien pour qu'ils s'agissent de quartiers à risque. La population et les infrastructures sont présentes et des coulées de lave ont déjà déferlé sur la zone. S'il y avait un secteur plus important à retenir de cette carte, c'est celui-ci. En effet, la combinaison de plusieurs des facteurs énoncés dans l'étude montre que ce secteur possède plusieurs caractéristiques qui le mettent à risque. Bien que les pentes y soient faibles, la présence d'ancienne coulée de lave le rend exposé à l'aléa et sa vulnérabilité en termes d'habitant et d'infrastructures critiques est de modéré à élevé. Un secteur comme celui-ci doit posséder des mesures préventives, de préparations et d'intervention efficace puisque la possibilité d'y voir une nouvelle coulée de lave est importante.

Ces 5 zones démontrent les zones chaudes de dangerosité du volcan par rapport aux 3 critères, soit la population, les infrastructures et l'aléa. Les populations et infrastructures côtières sont les endroits les plus à risque du territoire dû à sa concentration dans ces lieux.

## Carte de risque du volcan Kilauea à Hawaii



Auteur : Laurie Rivet  
Source: U.S. Geological Survey et Office of Planning Hawaii

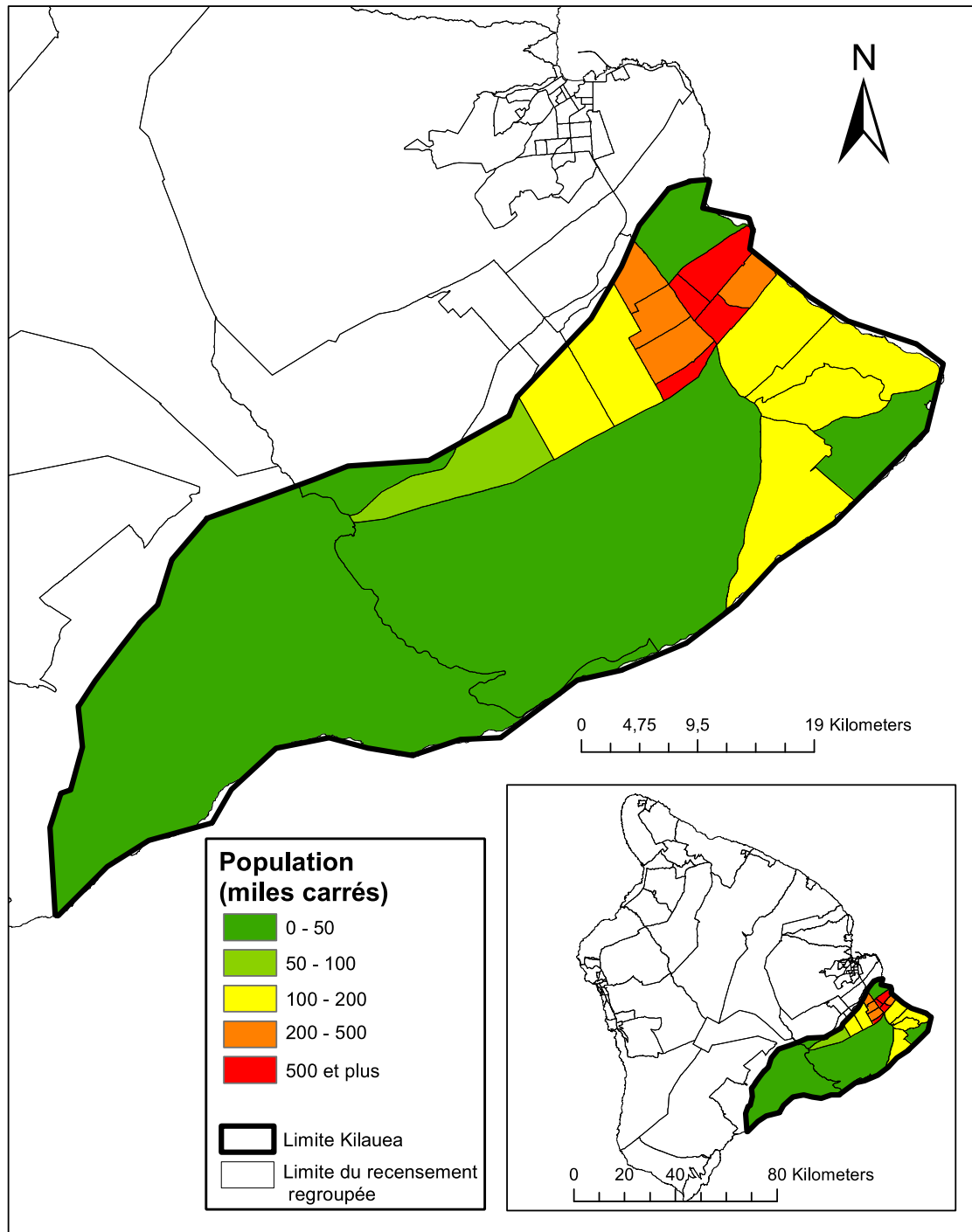
WGS 1984 UTM Zone 5N

Figure 13 : Carte de risque du volcan Kilauea

#### 4.2.1. L'analyse de la densité de population

La figure 14 présente la densité de population dans les alentours du volcan Kilauea. Les deux grands territoires vert foncé près du volcan sont en fait le parc national des volcans, donc ne possède aucune population. Plus on descend vers la côte est, plus la densité de population devient importante. Dû au fait que le milieu de l'île d'Hawaii est plus escarpé, les gens sur l'île se situent en grande majorité à proximité du bord de la mer. On retrouve principalement dans les secteurs jaunes les quartiers Nanawale, Pahoia, Hawaiien Beaches et Leilani Estates. Dans les secteurs orangés, il s'agit principalement des quartiers Orchidlands Estates et Kurtistown. Pour finir, les secteurs rouges sont les secteurs Hawaiian Paradise Park et Ainaloa. Hawaiian Paradise Park compte 11,404 habitants dans son quartier (U.S. Census, 2010). Du aux fortes densités de population, il s'agit des quartiers importants à surveiller lors d'une éruption volcanique.

## Densité de population de la limite du volcan Kilauea à Hawaii



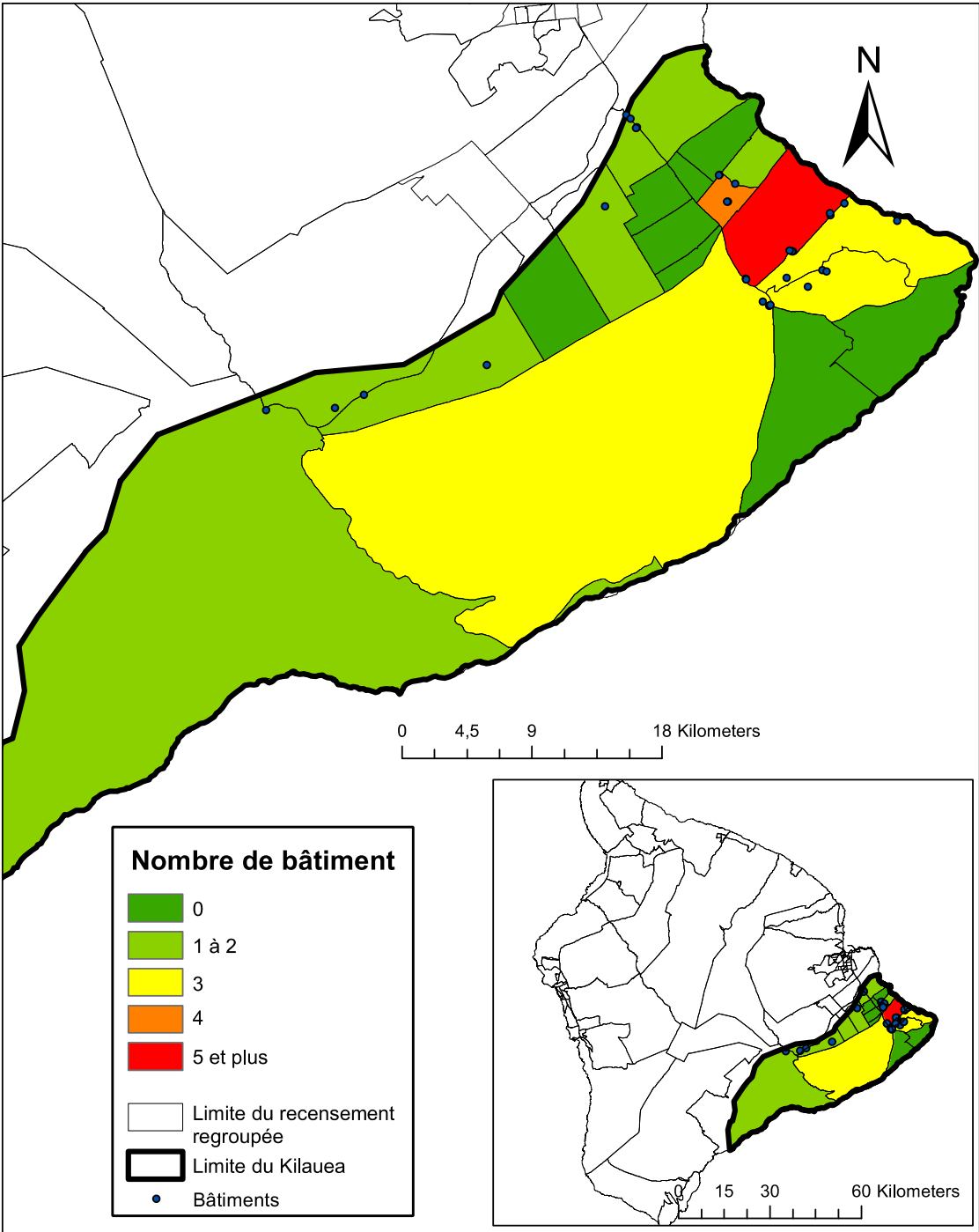
Auteur: Laurie Rivet  
Source : Office of Planning Hawaii

Figure 14 : Cartographie de la densité de population dans la limite du volcan Kilauea

#### 4.2.2. L'analyse des infrastructures

La figure 15 expose la localisation des bâtiments essentiels du secteur volcanique du Kilauea. Les bâtiments sont principalement à proximité des côtes et surtout de la grande densité de population. Si on se réfère à la carte précédemment, on remarque que les bâtiments sont dans les quartiers où la densité de population est la plus grande. Encore une fois, très peu de bâtiments se situent dans le parc des volcans. Les endroits qui possèdent le plus de bâtiments essentiels sont évidemment à risque lorsqu'il y a des éruptions. Ces établissements accueillent des malades, ont besoin d'intervenir sur le terrain ou sont des refuges pour les personnes évacuées. On pense entre autres à des écoles qui peuvent servir de lieu d'hébergement temporaire, aux postes de police et les casernes de pompiers qui abritent les services d'urgences. Un secteur ayant une forte densité d'infrastructures essentielles s'il est touché aura un fort impact sur la société. Donc, il est primordial de connaître leur localisation afin d'évaluer la vulnérabilité.

# Les infrastructures essentielles situées dans la zone du volcan Kilauea à Hawaii



Auteur : Laurie Rivet  
 Source: Office of Planning Hawaii

WGS 1984 UTM Zone 5N

Figure 15 : Cartographie des infrastructures essentielles dans la limite du volcan Kilauea

## 5. Discussion

En prenant en compte les objectifs qui ont été fixés au début de l'essai, l'objectif principal était de faire l'amélioration de la connaissance spatiale des risques liés au volcan Kilauea d'Hawaii. Dans un premier temps, l'objectif spécifique était de faire la réalisation de la carte d'aléa avec les critères des anciennes coulées de lave ainsi que la topologie. La carte d'aléa a été réalisée et a permis de déceler les endroits les plus à risque sur le territoire hawaïen. Les zones de rift sont les endroits qui affectent le plus le paysage du territoire ainsi que la caldéra du volcan. Ensuite, le deuxième objectif spécifique était de faire la carte de risque du volcan Kilauea. Ceci était une première dans le monde du volcan. Plusieurs autres aléas possèdent des cartes de risque, comme les inondations et les glissements de terrain, mais absentes dans la littérature volcanique. La carte de risque a permis de déceler les endroits les plus dangereux pour les populations et les infrastructures. En combinant l'aléa et la vulnérabilité, on observe que la réalité entre la carte d'aléa et la carte de risque n'est pas les mêmes. Dans la carte d'aléa, on observe des secteurs qui ne sont que de faible danger. Par contre, cet endroit possède une grande communauté qui pourrait engendrer une catastrophe si les laves se rendaient sur le territoire. Donc, dans la carte de risque, ce type de secteur est dans les plus hauts risques. Une carte de risque peut être regardée dans plusieurs secteurs d'activité. Les projets immobiliers ou la construction d'entreprise peuvent se référer à ce genre de carte pour établir la localisation de leur bâtiment et ainsi diminuer le risque pour les habitants ou les travailleurs. Les installations d'urgence lors d'une éruption peuvent regarder cette carte pour bâtir leurs camps d'aide pour éviter d'être dans un endroit à risque. La carte de risque est donc utilisée dans plusieurs domaines et sauve la vie des gens et aussi les habitations. Le dernier objectif spécifique était de faire la comparaison entre la carte d'aléa du USGS de 1992 et celle créée en 2020. La section se retrouve ici-bas.



## 5.1. Comparaison des cartes d'aléa

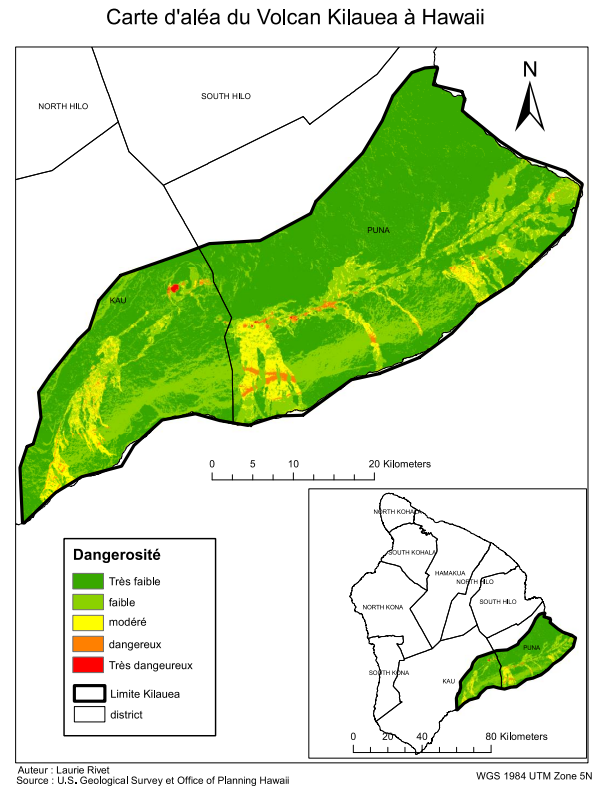
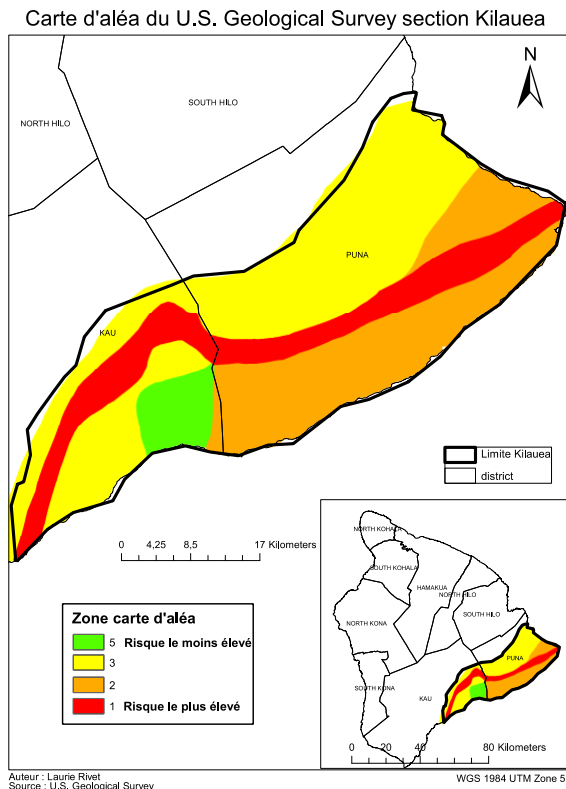


Figure 16 : Carte d'aléa du USGS 1992 section Kilauea

Figure 17 : Carte d'aléa 2020

Dans la comparaison de la carte d'aléa du USGS (Figure 16) et de la carte d'aléa qui vient d'être créée (Figure 17), il y a plusieurs choses auxquelles il faut porter attention. Dans le cas du USGS, leurs banques de données sont beaucoup plus grandes que celle disponible pour le public. Les coulées de lave sur leur carte sont des analyses d'il y a plus de 1000 ans. Les données qui étaient à ma disposition étaient seulement à partir de 1790 jusqu'à 2018. Donc, la variabilité entre une carte avec des données d'il y a plus de 1000 ans et 230 ans est considérable. Par contre, cette nouvelle carte d'aléa permet une résolution spatiale et un niveau de détail beaucoup plus fin que la carte actuelle du USGS. Donc, dans ce cas-ci, l'augmentation de la résolution a permis un résultat plus précis. La carte d'aléa était nécessaire afin de réaliser la carte de risque. Malgré le manque de donnée, l'objectif de l'essai était principalement de concevoir une méthodologie optimale pour la création de cartes de risque dans le milieu volcanique et permettre de faire une carte d'aléa plus précise.

Il serait particulièrement intéressant d'effectuer le même cheminement sur l'ensemble de l'île ainsi qu'avec les données disponibles au USGS.

En comparant les deux cartes d'aléa, on peut constater que malgré le fait que je disposais de moins de données, le résultat est comparable. La caldéra est dans les deux cartes la zone avec le plus grand risque. Il est suivi des zones de rift dans le cas de la carte d'aléa du USGS. Dans la nouvelle carte, les zones de rift se situent entre dangereux à modéré tout dépendant les endroits sur la carte. Toutefois, ce qui frappe en termes de différence est la précision sur la nouvelle carte d'aléa. Les secteurs où l'aléa peut causer le plus de dommages sont clairement visibles plutôt que d'être identifié comme un secteur entier tel que représenté dans la carte du USGS. De plus, une autre différence se situe au sud de la caldéra. On constate que sur la carte du USGS, la zone est catégorisée comme une zone de faible risque. Cependant, dans la conception de la nouvelle carte, cette zone est présentée comme modérée à dangereux pour son risque. Ceci s'explique par la présence de coulées de lave récente et une pente très accentuée.

## 5.2. Absence de carte de risque volcanique

Dans le domaine volcanique, après de longues recherches, aucun volcan ne possède de carte de risque. On retrouve en majorité des cartes d'aléas qui montrent l'étendue des coulées de lave et les zones à risque. Ou dans d'autres cas, comme l'article présenté plus haut, une carte de vulnérabilité, mais avec aucune analyse des aléas. Cette étude de carte de risque est une première dans le monde volcanique. La méthodologie a été inspirée par plusieurs articles différents du USGS. La carte d'aléa a utilisé les mêmes critères que le USGS préconisait, soit la topographie et les anciennes coulées de lave (USGS, 1991). Les différents pourcentages attribués aux coulées de lave ont aussi été inspirés du USGS (Mulineaux et al., 1987). De plus, les études faites sur la vulnérabilité de la population ont permis de choisir les critères idéals pour cette étude, soit la population et les infrastructures (Aceves-Quesada et al., 2006). Avec l'aide de ces différents articles, il a été possible de créer la carte de risque en combinant les aspects les plus importants d'une carte de risque, soit la vulnérabilité et l'aléa. Cette première méthodologie n'est évidemment pas parfaite

et pourrait être reprise par des experts pour l'amélioration de la méthode. Cette méthodologie aura toutefois permis de faire ressortir l'importance de prévoir le risque et non pas seulement l'aléa. En effet, le secteur habité dans l'est de l'île n'était pas identifié comme un secteur pouvant poser problème dans la carte d'aléa actuellement utilisé à Hawaii. De plus, elle permet de combiner les facteurs les plus pertinents dans la gestion du risque soit l'aléa, l'exposition et la vulnérabilité. Il est ainsi plus facile de mettre en place des mesures adéquates de prévention, de préparation et d'intervention dans des secteurs critiques au cas où un sinistre devait survenir.

### 5.3. Limitations et améliorations

Dans cette étude, il y avait plusieurs limitations. Dans un premier temps, la disponibilité des coulées de lave. Puisqu'il n'y avait que 52 couches de coulées de lave réparties sur 230 ans, la carte d'aléa et de risque n'a pas pu être optimale. Cependant, le Kilauea est entré dans sa phase post-caldera il y a environ 150 000 ans selon le USGS ce qui fait penser que les coulées les plus récentes sont effectivement les plus représentatives. De plus, la finesse des résultats ne vient pas nécessairement nuire à la qualité du produit. Dans sa base de données, le USGS possède des données d'il y a plus de 1000 ans. Donc, il serait intéressant de pouvoir appliquer cette méthodologie en ayant l'ensemble des couches du USGS. Aussi, dans la partie de la pente pour la création de la carte d'aléa, la vitesse des coulées de lave pourrait être un critère important puisque la pente influe sur la vitesse des coulées de lave. Ceci pourrait amener une réalité importante à la carte d'aléa.

Par la suite, pour faire la portion des infrastructures, la donnée qui aurait été nécessaire pour encore mieux représenter le territoire est une couche de données de toutes les habitations. Par contre, cette donnée n'est pas disponible pour le public. En représentant seulement les bâtiments essentiels, certains quartiers de grande envergure ne sont pas apparents sur la carte des infrastructures. Ceci peut donc fausser les données et ne représente pas à 100% les quartiers à risque. Aussi, il aurait été pertinent d'utiliser les images satellitaires à haute résolution spatiale ou les photographies aériennes pour pouvoir cartographier les sections résidentielles et les endroits plus densément peuplés pour

vraiment avoir une réalité précise de l'occupation du territoire. Ceci aurait amené une précision supérieure à l'étude.

Aussi, la majorité des critères et pourcentages attribués ont été trouvés dans les revues de littérature. Il aurait été intéressant de pouvoir travailler avec des experts dans le domaine volcanique qui auraient pu amener leur expertise et analyser les différents pourcentages choisis. De plus, la carte de risque aurait pu avoir d'autres aspects intéressants dans sa carte, comme les routes et les espaces verts qui sont des données disponibles sur le site du gouvernement d'Hawaii. Les routes sont des infrastructures de grandes envergures qui sont empruntées par la population quotidiennement pour la plupart. Donc, il serait judicieux après réflexion d'ajouter ce type d'infrastructure à la carte de risque pour la protection de la population. Aussi, les espaces verts sont des lieux souvent très fréquentés par les populations. Ceci pourrait être intéressant de les inclure dans une carte de risque. Les endroits très fréquentés sont pertinents à mettre dans une carte de risque. Ceci permet de reproduire fidèlement les endroits à risque pour la population lors d'une éruption.

## 6. Conclusion

L'objectif principal était d'améliorer la connaissance spatiale des risques liés au volcan Kilauea à Hawaii. La carte d'aléa possédait les critères des anciennes coulées de lave ainsi que de la pente. La carte de risque, elle, avait les critères des infrastructures, de la population ainsi que de l'aléa. Ces critères ont été trouvés grâce à la littérature.

La carte d'aléa a permis de représenter les endroits les plus à risque des coulées de lave par rapport à la pente à l'aide de l'analyse multicritère. L'étude a montré que la carte d'aléa réalisée ressemble à la carte d'aléa du USGS. Cependant, l'information qu'elle contient correspond à une échelle spatiale plus fine que la carte de 1992 du USGS ce qui pourrait permettre des interventions plus ciblées sur le terrain.

La carte de risque a permis d'observer, pour la première fois, les endroits les plus à risque pour la population et les infrastructures. Les endroits sur le bord de la côte sont des endroits très à risque puisque la majorité de la population et des infrastructures sont concentrées à cet endroit. En réalisant ce projet, la carte de risque a permis d'affiner la qualité de suivi du risque du volcan Kilauea. Il serait intéressant que les scientifiques du USGS et du HVO réutilisent la méthodologie ici appliquée et l'améliorent afin de retravailler leur carte d'aléa et plutôt reproduire une carte de risque. Lors de mes discussions avec le HVO, il semblait d'ailleurs faire part de leur intention à cet égard.

## 7. Références

Aceves-Quesada, J, F., Lopez-blanco, J., del Pozzo, A, L, M. (2006). Determination of volcanic hazards applying Multicriteria Evaluation and SIG techniques in the Nevado de Toluca area, central Mexico, *Revista Mexicana de ciencias geologicas*. 23-2, p.113-124.

Aceves-Quesada, J, F. Diaz-Salgado, J., Lopez-Blanco, J. (2007). Vulnerability assessment in a volcanic risk evaluation in Central Mexico through a multi-criteria-GIS approach, *Natural Hazards*. 40-2, p.339-356.

Belton, V. et Stewart, T. (2002). Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach, *Kluwer Academic Publishers*, Springer Science & Business Media, 408 p.

Byrnes, J, M., Crown, D, A. (2001). Relationships between pahoehoe surface units, topography, and lava tubes at Mauna Ulu, Kilauea Volcano, Hawaii, *Journal of geophysical research: solid earth*. 106, p.2139-2152.

Chang, M. (1992). Human decisions and natural hazards: A case of the east rift zone of Kilauea volcano on the Island of Hawaii, *Natural and technological disasters: Causes, effects and preventive measures*. 6, p.469-483.

Chaput, M. (2014). Déformation et activité intrusive des volcans boucliers - Du terrain à la modélisation numérique (Piton des Neiges, La Réunion), *thèse doctorat*, Université de La Réunion.

Clague, D, A. Sherrod, D, R. (2014). Growth and Degradation of Hawaiian Volcanoes, *U.S. Geological Survey Professional Paper 1801*, 146 p.

Decker, R, W. Wright, T, L. Stauffer, P, H. (1987). Volcanism in Hawaii, *U.S. Geological Survey Professional paper 1350*, 1667 p.

European Space Agency (ESA). (2014). Surveillance des volcans, surveillance terrestre, *European Space Agency*.

Greene, R., Devillers, R., Luther, J.E., Eddy, B.G. (2011). GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis, *Geography Compass*, 5-6, p.412-432.

Hawaiian Volcano Observatory. (2019). Who prepared the Lava-Flow Hazard Zone Map for Hawai'i Island, *Hawaiian Volcano Observatory*. [En ligne]. ([https://volcanoes.usgs.gov/observatories/hvo/faq\\_lava.html](https://volcanoes.usgs.gov/observatories/hvo/faq_lava.html)). Page consultée le 20 janvier 2020.

James, P. Tilling, R. I. (2014). Natural Hazards and Risk Reduction in Hawai'i, *U.S. Geological Survey Professional Paper 1801*, p.397-427.

Jenkins, S, F., Spence, R, J, S., Fonseca, J, F, B, D., Solidum, R, U. Wilson, T.M. (2014). Volcanic risk assessment: quantifying physical, Vulnerability in the built environment, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 906 p.

Kawena Pukui, M. (2020). About the Hawaiian Volcano Observatory, *U.S. Geological Survey*.

Lagouarde, J-P., Seguin, B., Clinet, S., Gandia, S., Kerr, Y. (1986). Intérêt de l'indice de végétation des satellites NOAA-AVHRR pour le suivi des cultures (résultats d'une étude dans la basse vallée du Rhône), *EDP Sciences*, 6-10, p.949-954.

Largy-Nadeau, D. (2017). Le choix du lieu de résidence des jeunes familles : analyse multicritère appliquée au cas de la Ville de Sherbrooke, *essai maîtrise*, Université de Sherbrooke.

Molist, J. (2017). Assessing Volcanic Hazard: A Review, *Oxford University Press*, 73 p.

Mulineaux, D. R., Peterson, D. W., Crandell, D. R. (1974). Volcanic hazards in the hawaiian islands, *Hawaiian Volcano Observatory*.

Mulineaux, D. R., Peterson, D. W., Crandell, D. R. (1987). Volcanic hazards in the hawaiian islands, *Hawaiian Volcano Observatory*.

Wilson, C. (2016). A satellite data primer, *NOAA ocean satellite*.

Orr, T-R., Heliker, C., Patrick, M, R. (2013). The Ongoing Pu‘u ‘Ö‘ö Eruption of Kīlauea, *U.S. geological survey and national park service*.

Pareschi, M., T., Cavarra, L., Favalli, M., Giannini, F., Meriggi, A. (2000). GIS and Volcanic Risk Management, *Natural Hazards*. 21-2-3, p. 361-379.

Patrick, M. Orr, T., Sutton, A-J., Elias, T., Swanson, D. (2013). The First Five Years of Kīlauea’s Summit Eruption in Halema‘uma‘u Crater, 2008–2013, *U.S. Geological Survey*.

Peterson, D. W., Tilling, R. I. (1980). Transition of basaltic lava from pahoehoe to aa, Kilauea Volcano, Hawaii: Field observations and key factors, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 7-3-4, p.271-293.

Pohekar, S. D. et Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 8, no 4, p. 365- 381.

Rossi, M. J. (1996). Morphology and mechanism of eruption of postglacial shield volcanoes in Iceland, *Bulletin of Volcanology*,57, p.530-540.

Sécurité publique du Québec. (2020). Concepts de base en sécurité civile, [En ligne]. ([https://www.securitepublique.gouv.qc.ca/fileadmin/Documents/securite\\_civile/publications/concepts\\_base/concepts\\_base\\_partie\\_2.pdf](https://www.securitepublique.gouv.qc.ca/fileadmin/Documents/securite_civile/publications/concepts_base/concepts_base_partie_2.pdf)). Page consultée le 19 janvier 2020.



Swanson, D., Fiske, D., Rose, T., Houghton, B., Mastin, L. (2011). Kīlauea—an Explosive Volcano in Hawai‘I, *U.S. Geological Survey*.

Tilling, R. I., Heliker, C., Swanson, D. A. (2010). Eruptions of Hawaiian Volcanoes—Past, Present, and Future, *U.S. Department of the interior and U.S. Geological Survey*.

U.S. Department of the Interior / Geological Survey. (1991). Lava Flow Hazard Zones, métadonnées, *U.S. Department of the Interior / Geological Survey*.

U.S. Census Bureau. (2010). Hawaiian Paradise Park CDP, Hawaii, *U.S. Census Bureau*.

U.S. Geological Survey. (2015). USGS 10-m Digital Elevation Model (DEM): Hawaii: Big Island, *U.S. Geological Survey*.

U.S. Geological Survey. (2019a). Geochemical detective work helps answer questions about Kīlauea’s ongoing eruption, *U.S. Geological Survey*.

U.S. Geological Survey. (2019b). 1960 Kapoho Eruption provided lesson in Kīlauea behavior, *U.S. Geological Survey*.

U.S. Geological Survey. (2019c). Kīlauea Volcano Erupts in Explosive and Effusive Cycles, *U.S. Geological Survey*.

U.S. Geological Survey. (2019d). Kīlauea 1955 Lower East Rift Zone Eruption in Lower Puna

U.S. Geological Survey. (2019e). 2018 Lower East Rift Zone Eruption and Summit Collapse, *U.S. Geological Survey*.

U.S. geological survey. (2019f). New insights gained from Kīlauea Volcano's 2018 summit collapses, *U.S. Geological Survey*.

U.S. geological survey. (2019g). The May 1924 Explosive Eruption of Kīlauea, *U.S. Geological Survey*.

U.S. Geological Survey. (2019h). What causes the collapse/explosion events at Kīlauea's summit? *U.S. Geological Survey*.

U.S. Geological Survey. (2020). 1969-1974 Mauna Ulu Eruption. *U.S. Geological Survey*.

Wolfe, R. (2020). Terra & Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*.

Yan, C. (2018). Analyse multicritère pour évaluer les options de chauffage des communautés isolées du Nunavik, *mémoire maîtrise*, école de technologie supérieure université du Québec.