



## Evaluation de la susceptibilité des coulées de lave dans la partie ouest de l'île de Sao Miguel (Açores, Portugal)

### Evaluation of the lava flows susceptibility of the West part of São Miguel Island (Azores, Portugal)

Ana GOMES & Anabela RAMOS (\*)

**Abstract :** Volcanic eruptions are not the most common dangers, but are those that generally generate economic, social, cultural and environmental significant impacts.

The Azores archipelago, located in the North Atlantic Ocean, consists of nine islands, and São Miguel Island is the largest in area (approximately 746 km<sup>2</sup>) and population (137,699 people, or 57% of the archipelago's inhabitants). São Miguel was the scene of six historic eruptions since its discovery in the fifteenth century. The location in the Volcanic System Fissural Picos (SVFP) of the largest towns of São Miguel Island, the most important infrastructure in terms of security, economy, social protection, regional service administration, the only hospital and the island's airport, between others, influenced the choice of the western part of the island as the study area for the analysis of susceptibility to lava flows.

To perform this analysis, we used the VORIS program, which requires the following input parameters: a digital elevation model (DEM), the source areas, the length of lava drained, height correction and the number of iterations. It was used one DEM of 50 meters, a length of disposed of 12 km, a height correction of 10 meters and 4000 iterations. For the source areas, it was considered a distance of 500 meters from the center of each eruptive center, and for each tectonic structure a distance of 50 meters to each side of the fault. After the simulation of lava flows originating in SVFP, it was found that 36% (or 269 km<sup>2</sup>) of the island is under the influence of lava flows generated in SVFP 2% has a low susceptibility and only 0, 02% high susceptibility.

Key-words : Azores, lava flows, susceptibility, modelling

**Résumé :** Bien que les éruptions volcaniques ne soient pas les dangers les plus fréquents, ce sont ceux qui, en général, engendrent d'importants impacts économiques, sociaux, culturels et environnementaux.

L'archipel des Açores, situé dans l'océan Atlantique nord est composé de neuf îles. L'île de Sao Miguel est à la fois la plus grande en superficie (environ 746 km<sup>2</sup>) et en population (137 699 personnes, soit 57% de la population de l'archipel). Cette île a subi six éruptions historiques depuis sa découverte au XV<sup>e</sup> siècle.

La localisation sur le SVFP (Système Volcanique Fissural des Picos) de la majeure partie des plus grandes villes de l'île de São Miguel, d'importantes infrastructures au niveau de la sécurité, de l'économie et de la protection sociale, de certains services régionaux de l'administration, de l'unique hôpital et de l'aéroport de l'île, entre autres, a influencé le choix de la partie occidentale de l'île de Sao Miguel comme zone d'étude pour l'analyse de la susceptibilité aux coulées de lave.

Pour mener cette analyse, nous avons utilisé le programme VORIS qui nécessite les paramètres d'entrée suivants: un modèle numérique de terrain (MNT), les zones de source, la longueur de la coulée de lave, la correction de la hauteur et le nombre d'itérations. Nous avons utilisé un DEM de 50 mètres, une longueur de 12 km de coulée, une correction de hauteur de 10 mètres et 4 000 itérations. Pour les zones de départ, nous avons considéré une distance de 500 mètres du centroïde de chaque centre éruptif et, pour chaque structure tectonique, une distance de 50 mètres de chaque côté de la faille. Après la simulation des coulées de lave issues du SVFP, il a été constaté que 36% (soit 269 km<sup>2</sup>) de l'île se trouve sous l'influence des coulées de lave générées sur le SVFP, 2% a une faible susceptibilité et seulement 0,02% a une très haute susceptibilité.

Mots-clés : Açores, coulées de lave, susceptibilité, modélisation

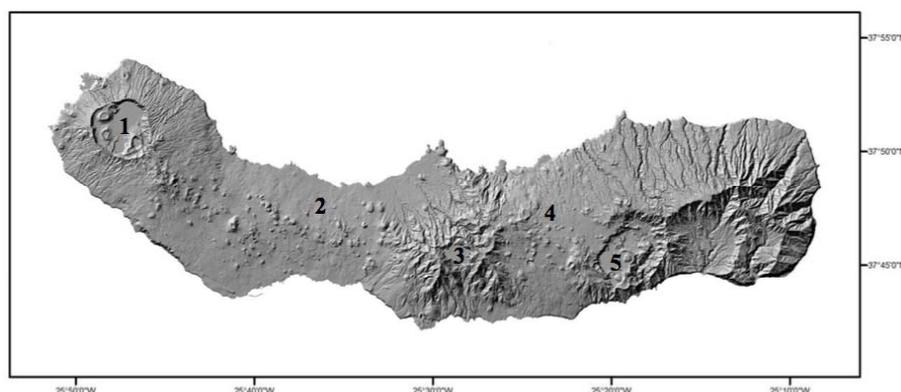
(\*)Gomes, A., ana.im.gomes78@gmail.com

Ramos, A.M., ana-baia@sapo.pt

Centre d'Investigation de la Terre et de l'Espace de l'Université de Coimbra, Observatoire Géophysique et Astronomique de l'Université de Coimbra, Almas de Freire, 3040-004 Santa Clara, Coimbra, Portugal  
e-mail de l'auteur correspondant: ana.im.gomes78@gmail.com

## INTRODUCTION

L'archipel des Açores se situe dans l'océan Atlantique nord, dans une zone géotectonique bien particulière et se compose de neuf îles, regroupées en trois groupes. L'île de São Miguel située entre les latitudes 37° 42' N et 37° 54' N et les longitudes 25° 51' W et 25° 08' W, est la plus grande en terme de superficie (environ 746 km<sup>2</sup>) et en population (environ 57% (137 699 personnes) des habitants de l'archipel). Cette île compte cinq systèmes volcaniques actifs dont trois sont composés de volcans centraux avec caldeira (Volcan des Sete Cidades, Volcan du Fogo et Volcan des Furnas) et deux autres de cônes de scories et de coulées de lave (le Système Volcanique Fissural des Picos et le Système Volcanique Achada das Furnas) (Fig. 1). Depuis son peuplement au XV<sup>ème</sup> siècle, São Miguel a subi six éruptions, dont cinq de nature manifestement explosive et une davantage effusive (e.g. AGOSTINHO, 1960; WESTON, 1964; QUEIROZ *et al.*, 1995; FERREIRA, 2000).



**Figure 1** – Systèmes volcaniques de l'île de São Miguel.

Le Système Volcanique Fissural des Picos (SVFP), situé sur les latitudes 37° 42' N et 37° 51' N et les longitudes 25° 32' W et 25° 46' W, est limité à l'ouest par le Volcan des Sete Cidades et à l'est par le Volcan du Fogo. Il s'étend sur une zone d'environ 200 km<sup>2</sup> (FERREIRA, 2000) et a subi deux des éruptions historiques de l'île de S. Miguel, en 1563 et 1652. L'éruption du Pico Queimado, en 1563, a généré des coulées de lave basaltique (*s.l.*) qui ont atteint la ville de Ribeira Seca, édifiée sur la côte nord de l'île (e.g. WALLENSTEIN, 1999; FERREIRA, 2000). Dans le cas de l'évènement éruptif de 1652, dont le centre est situé dans la zone de João Ramos, au nord de la ville de Lagoa, il a intégré l'extrusion de magma la plus évoluée et a été davantage explosif. C'est sur ce système volcanique que se trouvent les deux plus grandes villes de l'île (Ponta Delgada et Ribeira Grandes), ainsi qu'une grande partie des services de l'administration régionale, le plus grand port, le seul hôpital et l'aéroport de l'île.

Plusieurs auteurs se sont penchés sur l'étude de la dynamique des coulées de lave (e.g. CRANDELL *et al.*, 1984; KILBURN, 1996; SELF *et al.*, 1998; HARRIS *et al.*, 2009), dans le but d'essayer de comprendre tous les mécanismes impliqués dans le développement et l'évolution des corps de lave. D'autres (e.g. BLAKE & CAMPBELL, 1986; QUENTAL, 1999; TALLARICO & DRAGONI, 1999; FELPETO, 2002; FELPETO *et al.*, 2007; FAVALLI *et al.*, 2009; WICHURA *et al.*, 2010), se sont concentrés sur l'élaboration de modèles physiques pour essayer de simuler l'écoulement des coulées de lave et connaître ainsi ses conséquences dans l'analyse du danger.

La tentative de modélisation d'une éruption volcanique avec la formation et le développement de coulées de lave basaltique (*s.l.*) implique la tentative de reproduire d'innombrables facteurs qui influencent la propagation de ce type de danger, à commencer par des facteurs inhérents au propre magma et à la dynamique de l'éruption, mais également des facteurs qui sont exogènes (e.g. YOUNG & WADGE, 1990; FELPETO, 2002; COSTA & MACEDONIO, 2005). Il faut souligner que jusqu'à présent, à cause de la grande complexité des variables impliquées dans le processus de formation et de progression des coulées de lave, il n'existe aucun modèle physique de simulation qui intègre tous les aspects à prendre en compte. En ce qui concerne les modèles de simulation, il en existe de trois types : les modèles déterministes, les modèles de probabilité (ou stochastiques), et les modèles d'approche mixte.

En résumé, les modèles déterministes (*e.g.* CRISCI *et al.*, 1986; BARCA *et al.*, 1993; FELPETO, 2002; CRISCI *et al.*, 2004) ont besoin d'employer des simplifications significatives et se basent sur la résolution d'équations: du transport, de l'état et des constitutives. Ils adoptent normalement des modèles simplifiés qui intègrent la méthode d'automates cellulaires et de modèles bidimensionnels.

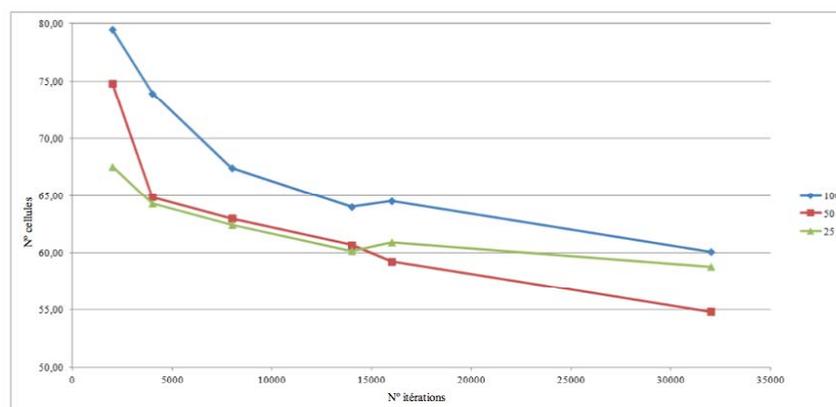
Les méthodes de probabilité qui considèrent la topographie comme le principal facteur déterminant le parcours d'une coulée, peuvent être regroupées en deux groupes : les modèles basés sur l'algorithme de Monte Carlo (*e.g.* WADGE *et al.*, 1994; FELPETO *et al.*, 2001; FELPETO *et al.*, 2007) ; et ceux qui utilisent le modèle des automates cellulaires (*e.g.* QUENTAL & SOARES, 1996; QUENTAL, 1999). Il existe certains programmes (modèles mixtes) qui procèdent à une approche intermédiaire entre les modèles déterministes et de probabilité (*e.g.* YOUNG & WADGE, 1990; WADGE *et al.*, 1994).

## METHODOLOGIE

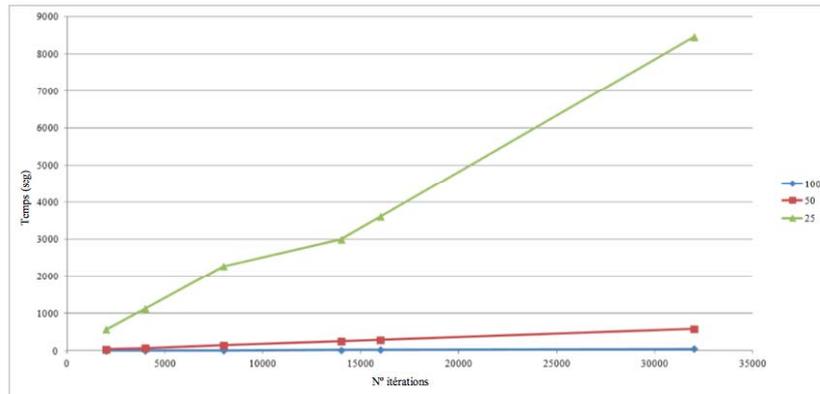
Pour évaluer la susceptibilité aux coulées de lave issues du SVFP, nous avons choisi, face aux variables disponibles et aux objectifs visés d'appliquer un modèle de probabilité élaboré par FELPETO *et al.* (2007), disponible gratuitement (<http://www.gvb-csic.es/GVB/VORIS/VORIS.htm>) et simple d'utilisation, appelé VORIS (Volcanic Risk Information System). Ce programme utilise les éléments d'entrée suivants: modèle digital de terrain (DEM), zone de départ, longueur de la coulée de lave, correction de la hauteur, nombre d'itérations et probabilités des cellules de la zone de départ.

GOMES (2013) a réalisé une évaluation détaillée de chaque paramètre dans le but de déterminer les valeurs à utiliser pour chacun. Dans le cas du DEM, afin de vérifier la taille de la cellule qui devait être traitée, GOMES (2013) a tenu compte du fait que, pour l'archipel des Açores, il n'existe que la base cartographique 1:25000 disponible pour toutes les îles, et a donc procédé à des simulations en utilisant des DEM's avec des cellules de 100, 50 et 25 mètres. Pour chaque DEM, elle a sélectionné la formation de coulées de lave dans une zone de départ de 10000 m<sup>2</sup>, une correction de hauteur de 10 mètres, des coulées de 10 mètres d'épaisseur et d'une longueur maximale de 12 km. De façon à vérifier la qualité des données, chaque simulation a été répétée dans les mêmes conditions et une comparaison des cartes d'inondation par coulées de lave obtenues a été réalisée pour chaque DEM's.

Un nombre différent d'itérations a été utilisé et le temps total de simulation nécessaire a été enregistré. Lors de la comparaison des deux cartes obtenues, en fonction du nombre d'itérations (Fig. 2), des différences ont été observées sur les simulations basées sur le DEM avec une cellule de 100 mètres (D100). En ce qui concerne le temps nécessaire à la réalisation des simulations, Gomes (2013) a constaté que l'utilisation du DEM avec une cellule de 25 mètres (D25) exigeait considérablement plus de temps que le D100 ou le DEM avec une cellule de 50 mètres (D50) (Fig. 3)

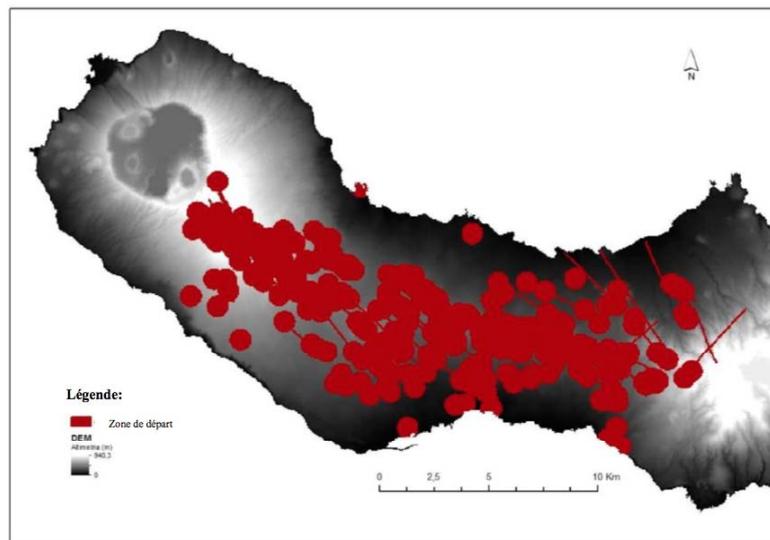


**Figure 2** – Pourcentage de cellules avec des différences de probabilité supérieures à 5% pour chaque DEM en fonction du nombre d'itérations (adapté de GOMES, 2013).



**Figure 3** – Temps nécessaire à deux simulations identiques pour chaque DEM en fonction du nombre d’itérations (adapté de GOMES, 2013).

Pour définir les zones de départ des coulées de lave à analyser pour le SVFP, elle a défini deux paramètres: d’une part, les centres éruptifs observés à la surface, et d’autre part les structures tectoniques observées et/ou déduites (GOMES, 2013). De cette manière, elle a sélectionné 272 cônes de scories et 346 cratères. Une fois leur centroïde calculé et identifié avec l’ArcGIS<sup>®</sup>, un cercle d’un rayon de 500 mètres a été délimité et à l’intérieur duquel toutes les cellules contenues ont été envisagées comme zones de départ de coulées de lave ayant la même probabilité de générer ce type de produit volcanique. Quant aux structures tectoniques, 96 ont été considérées et il a été défini pour chacun de ses côtés un polygone de 50 mètres à partir du centre de la faille. Toutes les cellules présentes dans ces polygones ont été considérées comme zone de départ. Sur la figure 4, on observe toutes les zones de départ utilisées pour la simulation finale de coulées de lave, sachant que toutes ont été considérées comme ayant la même probabilité de générer ce type de produit.



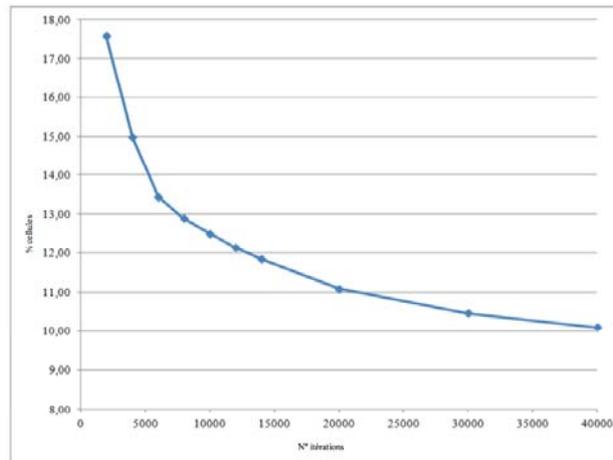
**Figure 4** – Toutes les zones de départ considérées pour la simulation (adapté de GOMES, 2013).

La longueur de la coulée est un autre des paramètres d’entrée requis pour la simulation et, dans ce cas, 12 km ont été déterminés afin de garantir que tous les flux de lave générés par les cellules de départ de la zone centrale du SVFP puissent atteindre la mer, comme ce fut le cas lors de l’éruption de 1563, dont le centre éruptif était situé sur le Pico Queimado.

En ce qui concerne la correction de la hauteur, la valeur à utiliser pour ce paramètre est étroitement liée à l’épaisseur des corps de lave. En observant les épaisseurs moyennes de coulées de lave basaltique (*s.l.*) enregistrées dans d’autres endroits du monde, une épaisseur de 10 mètres a été choisie comme valeur à utiliser dans la correction de la hauteur.

Un autre des paramètres nécessaires pour la simulation de coulées de lave avec VORIS est le

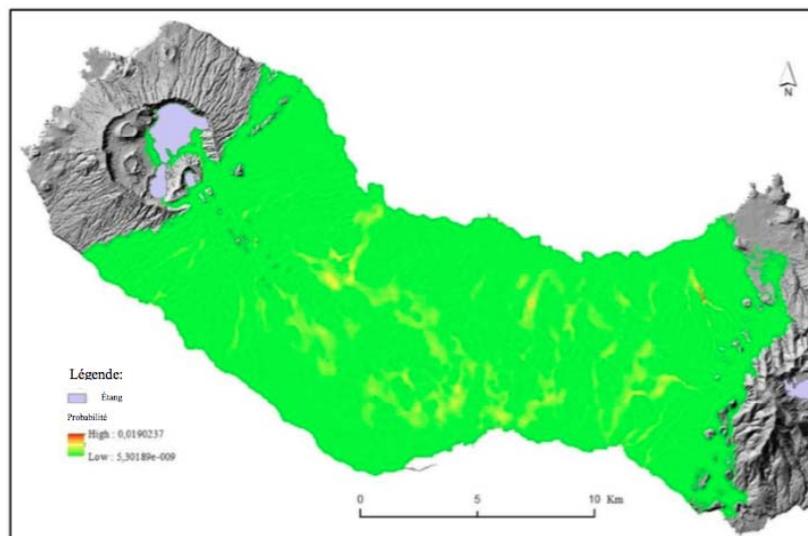
nombre d'itérations, *i.e.*, le nombre de coulées qui seront générées par chaque cellule de départ. Afin de déterminer la valeur à utiliser dans ce paramètre, le D50 a été utilisé ainsi que les zones de départ correspondantes aux structures tectoniques, une longueur de 12 km et aussi une correction de la hauteur de 10 mètres. La même simulation a été réalisée deux fois et les deux cartes obtenues ont été comparées. Cette comparaison a révélé le pourcentage de cellules avec des différences de probabilités supérieures à 5% et mis en évidence que la plus grande différence se produisait lors du passage de 2000 à 4000 (Fig. 5). C'est pourquoi, il a été décidé d'utiliser 4000 itérations dans la simulation à réaliser sur le SVFP.



**Figure 5** – Pourcentage de cellules avec des différences de probabilité supérieures à 5% en fonction du nombre d'itérations (adapté de GOMES, 2013).

## RESULTATS

Pour évaluer la susceptibilité aux coulées de lave générées sur le SVFP, la simulation a été réalisée à l'aide du programme VORIS avec les paramètres d'entrée suivants: DEM de 50 mètres, 4000 itérations, 12 km de longueur, 10 mètres pour la correction de la hauteur et toutes les cellules de départ ont été considérées comme ayant la même probabilité de générer des flux de lave. Sur la figure 6, on trouve la carte de probabilités d'inondation par coulées de lave générées sur le SVFP. Dans le but de mieux visualiser les différences de probabilités d'inondation, les valeurs de probabilité obtenues ont été regroupées en cinq classes à l'aide de la méthode manuelle de l'ArcGIS®, avec des intervalles de  $10^{-2i}$ .

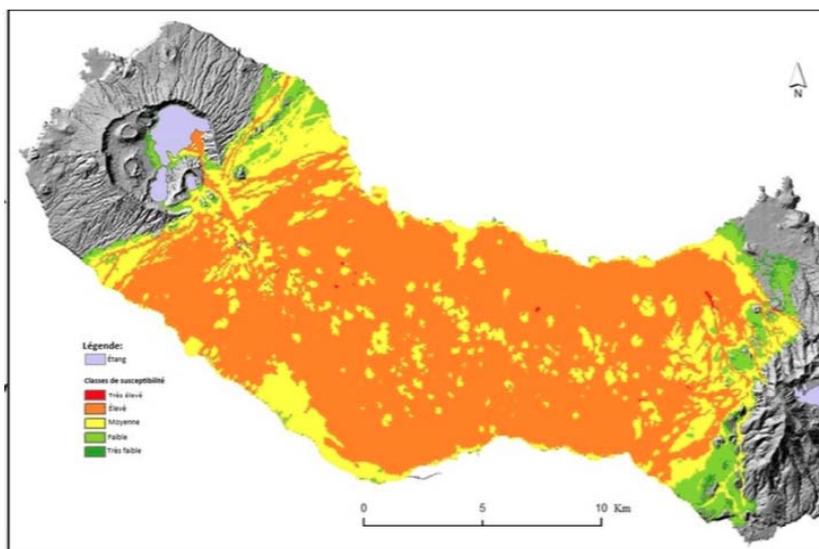


**Figure 6** – Carte de probabilités issue de la simulation de développement de coulées de lave sur le SVFP (adapté de GOMES, 2013).

Cinq classes de susceptibilité à l'inondation par coulées de lave générées sur le SVFP ont donc été considérées et les limites de chacune sont représentées dans le tableau 1. Sur la figure 7 on observe la carte de susceptibilité à l'inondation par coulées de lave, ayant pour base les cinq classes définies.

**Tableau 1** – Limites des classes de susceptibilité à l'inondation par coulées de lave générées sur le SVFP (adapté de GOMES, 2013).

Classe de susceptibilité	Intervalle de probabilité
Très faible	$\leq 10^{-8}$
Faible	$]10^{-8};10^{-6}]$
Moyenne	$]10^{-6};10^{-4}]$
Élevé	$]10^{-4};10^{-2}]$
Très élevé	$> 10^{-2}$

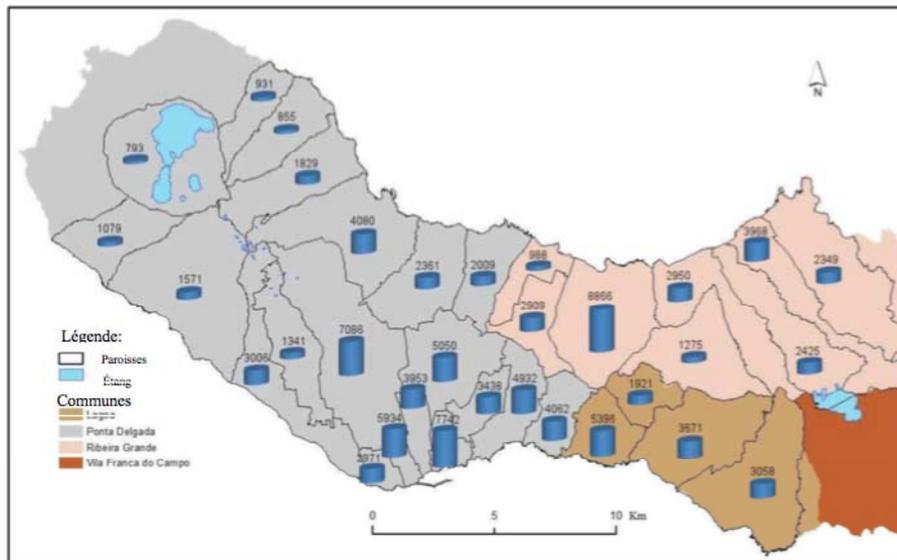


**Figure 7** – Carte de susceptibilité à l'inondation par coulées de lave générées sur le SVFP (adapté de GOMES, 2013).

## DISCUSSION

Un des principaux produits volcaniques générés par des éruptions dont le centre se situe dans le Système Volcanique Fissural des Picos (SVFP) correspond aux coulées de lave basaltique (*s.l.*). En observant la carte de susceptibilité à l'inondation par ce type de produit volcanique (Fig. 7), on constate que 32 communes des trois municipalités de l'île de São Miguel, dont font partie les plus grandes villes de l'île (Ponta Delgada et Ribeira Grande), se trouvent dans la zone d'influence de coulées de lave générées sur le SVFP (Fig. 8). D'après les données des recensements de 2011 pour la Région Autonome des Açores, publiées par l'Institut National de Statistique, on constate que dans la zone d'étude habitent 104799 personnes, soit environ 76% de la population de l'île de São Miguel, et que dans le périmètre urbain de la ville de Ponta Delgada habitent 20600 personnes, soit 15% de la population totale de l'île. C'est également dans cette région que se situent le plus grand port, l'hôpital et l'aéroport, ainsi que les principales infrastructures critiques. Dans la zone susceptible d'être touchée par les coulées de lave générées sur le SVFP, il y a 29 km<sup>2</sup> de zones urbaines, 438 km de voies de communication terrestre (voies rapides, routes régionales de 1<sup>ère</sup> classe, routes régionales de 2<sup>ème</sup> classe et routes municipales), 9 zones portuaires, 75 sources d'eau, 11 stations élévatoires des eaux, 73 réservoirs d'eau, 3,8 km<sup>2</sup> de zones industrielles, environ 221 km<sup>2</sup> de zones agricole et d'élevage, 73 km<sup>2</sup> de zones forestières et de végétation naturelle, environ 5,5 km<sup>2</sup> de zones découvertes et environ 35

km<sup>2</sup> de zones classées protégées.



**Figure 8** – Population habitant dans les communes susceptibles d’être touchées par des coulées de lave générées sur le SVFP (adapté de GOMES, 2013).

L’analyse de la carte de susceptibilité à l’inondation par coulées de lave générées sur le SVFP (Fig. 7) a permis de vérifier qu’environ 36% (269 km<sup>2</sup>) de l’île de São Miguel peut être touchée par ce type de produit volcanique. Cependant, on souligne que 0,3% (2 km<sup>2</sup>) de l’île présente une susceptibilité très faible, 2% (15 km<sup>2</sup>) une susceptibilité faible, 8% (59 km<sup>2</sup>) une susceptibilité modérée, 26% (193 km<sup>2</sup>) une susceptibilité élevée et 0,02% (0,2 km<sup>2</sup>) susceptibilité très élevée.

En faisant le croisement de la carte de susceptibilité à l’inondation par coulées de lave générées sur le SVFP (Fig. 7) et l’occupation du sol, on vérifie qu’environ 82% des zones urbaines et de voies de communication terrestre se trouvent sur des zones à susceptibilité élevée. Tout comme la plupart des infrastructures critiques présentes dans les communes en étude se trouvent sur des zones à susceptibilité élevée à l’inondation par coulées de lave générées sur le SVFP. En ce qui concerne les infrastructures d’approvisionnement en eau, toutes les stations élévatoires des eaux et la plupart des réservoirs d’eau se trouvent sur des zones à susceptibilité modérée à élevée. On observe que 87,5% des zones industrielles, 74% des zones agricoles et d’élevage, 57% des zones forestières et de végétation naturelle ainsi que 57% des zones classées comme découvertes se situent sur des zones à susceptibilité élevée à l’inondation par coulées de lave générées sur le Système Volcanique Fissural des Picos. Il faut également souligner que 20% des zones agricoles et d’élevage, 35% des zones forestières et à végétation naturelle, et enfin 35% des zones classées comme découvertes se situent sur des zones qui présentent une susceptibilité modérée à l’inondation par coulées de lave générées sur le SVFP.

## CONCLUSION

L’île de São Miguel étant la plus grande de l’archipel, et où vivent 57% des habitants de la région, c’est aussi là que se situent les principales infrastructures critiques et d’administration régionale, et plus concrètement le Système Volcanique Fissural des Picos (SVFP), un des cinq systèmes volcaniques actifs de l’île. Le SVFP se caractérise par un volcan à prédominance effusive et modérément explosive, de nature basaltique (*s.l.*) et se constitue de cônes de scories et de coulées de lave. C’est précisément ce système volcanique qui a été choisi pour évaluer la susceptibilité à l’inondation de coulées de lave de l’île de São Miguel. Pour procéder à cette simulation de coulées de lave de façon à déterminer les zones susceptibles d’être inondées par ce type de produit volcanique, on a utilisé le modèle de probabilité VORIS (FELPETO *et al.*, 2007). Pour les paramètres requis par ce modèle, on a utilisé un modèle digital de terrain (DEM) avec une cellule de 50 mètres, 4000 itérations, une longueur de coulée de 12 km, une correction de la hauteur de 10 mètres, comme cellules de départ

la jonction des zones définies autour des centres éruptifs et des structures tectoniques et toutes les cellules de départ avaient la même probabilité de générer des coulées de lave. Cela a permis de vérifier que 36% de l'île de São Miguel présente une susceptibilité à l'inondation par coulées de lave générée sur le Système Fissural des Picos, sachant dans cette zone habite environ 76% de la population de l'île. Il est important de signaler que la principale source de revenus de la région, et par conséquent de l'île, est l'agriculture. Par l'analyse de la carte de susceptibilité à l'inondation par coulées de lave générées sur le SVFP, 74% des zones agricoles et d'élevage se trouvent sur des zones à susceptibilité élevée, et 20% sur des zones à susceptibilité modérée. En prenant en compte le type de danger volcanique en étude, tout ce qui est inondé par des coulées de lave est inutilisable pendant des années voir même des décennies.

L'organisation du territoire, le contrôle, l'adéquation de mesures préventives, et la formation adaptée des agents de la protection civile et de la société elle-même sont fondamentales pour faire face à une possible éruption volcanique avec formation de coulées de lave sur le Système Volcanique Fissural des Picos, de façon à renforcer la résistance face à ce danger géologique sur l'île.

### REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par le Protocole entre la Direction Régionale des Sciences et la Technologie et l'Université des Açores pour l'attribution de Bourse de Doctorat, inclut dans l'Axe 3.1 – “Bourses d'Investigation Scientifique et Technologique” du “Programme de Soutien à la Formation Avancée (FORMAC)” du Plan Intégré pour la Science et la Technologie (PICT) crée par le biais de la Résolution no100/2005 du 16 juin. Il a été en partie financé par le CITEUC, Fonds du Gouvernement portugais par le biais de la FCT – Fondation pour la Science et la Technologie, FEDER et COMPETE 2020.

### BIBLIOGRAPHIE

- AGOSTINHO, J. (1960). Actividade Vulcanica nos Acores. *Separata de Acoreana*, V (5) : 1-104.
- BARCA, D., CRISCI, G.M., DI GREGORIO, S. & NICOLETTA, F. (1993). Cellular automata methods for modelling lava flows: simulation of the 1986-1987 eruption, Mount Etna, Sicily. In: *Active lavas*. UCL Press Limited, London. 291-309.
- BLAKE, S. & CAMPBELL, I.H. (1986). The dynamics of magma-mixing during flow in volcanic conduits. *Contribution to Mineralogy and Petrology*. Springer. 94 : 72-81
- \*CENSOS 2011\*. Publicação do Instituto Nacional de Estatística. 2012.
- COSTA, A. & MACEDONIO, A. (2005). Computational modeling of lava flows: A review. *Geological Society of America*. Special Paper 396 : 209-217.
- CRANDELL, D.R., BOOTH, B., KUSUMADINATA, K., SHIMOZURU, D., WALKER, G.P.L. & WESTERCAMP, D. (1984). Source-book for volcanic-hazards zonation. France: UNESCO, 97 p. ISBN 92-3-102111-7.
- CRISCI, G.M., DI GREGORIO, S., PINDARO, O. & RANIERI, G. (1986). Lava flow simulation by a discrete cellular model: first implementation. *International Journal of Modelling and Simulation*. 6 : 137-140.
- CRISCI, G.M., RONGO, R., DI GREGORIO, S. & SPATARO, W. (2004). The simulation model SCIARA: the 1991 and 2001 lava flows at Mount Etna. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 132 : 253-267.
- FAVALLI, M., CHIRICO, G.D., PAPALE, P., PARESCHI, M.T. & BOSHI, E. (2009). Lava flow hazard at Nyiragongo Volcano, DRC. 1. Model calibration and hazard mapping. *Bulletin of Volcanology*. 71, 363-374.
- FELPETO, A.R. (2002). Modelización física y simulación numérica de procesos eruptivos para la generación de mapas de peligrosidad volcánica. Madrid, Spain. Tese de doutoramento apresentada a Universidad Complutense de Madrid : 250 p.
- FELPETO, A., ARAÑA, V., ORTIZ, R., ASTIZ, M. & GARCIA, A. (2001). Assessment and modelling of lava flow hazard on Lanzarote (Canary Islands). *Natural Hazards*. 23 : 247-257.
- FELPETO, A., MARTÍ, J. & ORTIZ, R. (2007). Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 166 : 106-116.
- FERREIRA, T. (2000). Caracterização da actividade vulcânica da ilha de S. Miguel (Açores): vulcanismo basáltico recente e zonas de desgaseificação. Avaliação de riscos. \*Tese de doutoramento apresentada a Universidade dos Açores\*. Ponta Delgada, Portugal. 248 p.
- GOMES, A. (2013). História eruptiva do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos e avaliação da susceptibilidade a escoadas lávicas (Ilha de São Miguel, Açores). Tese de doutoramento apresentada a Universidade dos Açores. Ponta Delgada, Portugal. 352 p.

- HARRIS, A.J.L., FAVALLI, M., MAZZARINI, F. & HAMILTON, C.W. (2009). Construction dynamics of a lava channel. *Bulletin of Volcanology*. Springer. 71 : 459-474.
- KILBURN, C.R.J. (1996). Patterns and predictability in the emplacement of subaerial lava flows and flow fields. \*In: *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards\**. Springer. 491-537.
- QUEIROZ, G., GASPAR, J.L., COLE, P.D., GUEST, J.E., WALLENSTEIN, N., DUNCAN, A.M. & PACHECO, J. (1995). Erupcoes vulcanicas no vale das Furnas (île de S. Miguel, Açores) na primeira metade de seculo XV. *Acoreana*, 8 (1) : 159-165.
- QUENTAL, L. (1999). Modelo para a avaliacao do hazard e risco vulcanico na île do Fogo, Cabo Verde. Lisboa: [s.n.]. Tese de mestrado apresentada ao Instituto Superior Tecnico. 83 p.
- QUENTAL, L. & SOARES, A.(1996). Implementacao de um modelo de simulacao de fluxo de lava num Sistema de Informacao Geografica. Aplicacao a erupcao de 1995 da île do Fogo, Cabo Verde. In: A erupcao de Abril de 1995 na île do Fogo, Cabo Verde. *Instituto de Investigacao Cientifica e Tropical*. Lisboa, 247-256.
- SELF, S., KESZTHELYI, L. & THORDARSON, T.H. (1998). The importance of pahoehoe. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 26 : 81-110.
- TALLARICO, A. & DRAGONI, M. (1999). Viscous Newtonian laminar flow in a rectangular channel: application to Etna lava flows. *Bulletin of Volcanology*. Springer. 61 : 40-47.
- WADGE, G., YOUNG, P. & MCKENDRICK, I. (1994). Mapping lava flow hazards using computer simulation. *Journal Geophysical Research* 99 (B1): 489-504.
- WALLENSTEIN, N. (1999). Estudo da história recente do comportamento eruptivo do Vulcão do Fogo (S. Miguel, Açores). Avaliação preliminar do hazard. Tese de doutoramento apresentada a Universidade dos Açores. Ponta Delgada, Portugal. 226 p.
- WESTON, F.S. (1964). List of the recorded volcanic eruptions in the Azores with brief reports. *Boletim do Museu e Laboratorio Mineralogico e Geologico da Faculdade de Ciencias de Lisboa*, Coimbra Editora, Lda. 10 (3) : 3-18.
- Research*. 198 : 325-338.
- YOUNG, P. & WADGE, G. (1990). FLOWFRONT: simulation of a lava flow. *Computers & Geosciences*. 16
- WICHURA, H., BOUSQUET, R. & OBERHANSLI, R. (2010). Emplacement of the mid-Miocene Yatta lava flow, Kenya: Implications for modelling long channelled lava flows. *Journal of Volcanology and Geothermal* (8), : 1171-1191.

