

Analyse du risque volcanique sur l'aviation civile en Asie du Sud-Est: approche territoriale et spatio-temporelle

Noé CARLES

1. Introduction

Le risque volcanique sur l'aviation civile est apparu récemment, suite à l'augmentation exponentielle des flux aériens à proximité des zones potentiellement impactées par un panache de cendre produit lors d'une éruption volcanique.

1.1. Apparition du risque volcanique sur l'aviation civile.

Avant la crise volcanique de l'Eyjafjallajökull (Islande) en 2010, 129 vols ont été perturbés par la présence de cendres volcaniques dans l'atmosphère (Guffanti et al., 2009). L'évaluation des dommages a montré que sur les 129 avions ayant rencontré un panache de cendres, 26 d'entre eux présentaient des dégâts sévères sur le moteur et le cockpit, induisant des coûts de réparation élevés.

Sous l'impulsion de Thomas J. Casadevall de l'United States Geological Survey (USGS: organisme gouvernemental américain dédié à l'étude des Sciences de la Terre), a eu lieu à Seattle, en 1991, le premier congrès scientifique sur les cendres volcaniques et la sécurité aérienne. Plus d'une centaine de travaux scientifiques ont été présentés devant l'ensemble des acteurs du secteur aéronautique, dans le but de mieux com-

prendre la menace volcanique et ses effets potentiels sur l'appareil (Casadevall, 1994). La plupart des travaux de recherche se sont concentrés sur la mise en place de méthodes pour caractériser la composition chimique des cendres volcaniques (Bayhurst et al., 1991; Swanson et Beget, 1991) ainsi que la création de modèles de dispersion applicables en fonction du climat de la zone étudiée (Bursik et al., 1991; Schlatter et al., 1991). En parallèle, les météorologues ont orienté leurs recherches vers la création d'outils permettant de modéliser la dispersion des cendres tout en évaluant les taux de concentration à des échelles plus fines (Heffter et al., 1991; Evans, 1991).



Figure 1: Quelques coupures de presse lors de l'éruption de l'Eyjafjallajökull.



Liste non-exhaustive des secteurs économiques impactés lorsqu'une crise volcanique perturbe l'espace aérien.

Schématisation basée sur le retour d'expérience de la crise volcanique du Eyjafjallajökul (Islande) en avril 2010.

Secteurs économiques impactés		Motif	Exemple	Pertes ou bénéfices associés (Crise 2010)	Référence
Direct	Compagnies aériennes	Remboursement des passagers Annulation des vols	Air france	- 1.7 billions \$	Oxford Economics IATA
	Tour-opérateurs	Frais de rapatriement Changement de réservation	Thomas Cook	- 52.9 millions \$ (Thomas Cook)	Thomas Cook
	Aéroports	Activité ralentie (chomage technique pour les employés).	ACI ¹	- 184 millions \$	ACI
	Transports alternatifs	Augmentation de la demande	Avis	+ 146 millions \$ ² (Avis)	Mazzocchi et al. (2010)
	Visioconférence	Augmentation des réunions en vidéo-conférence (Bussiness)	Regus	+ 2.7 millions \$	IDC ³
Catalytique	Activités liés aux tourisme Hôtel / Restaurant / Taxi	Hausse des activités à proximité des aéroport. Diminution du nombre de client à l'échelle nationale	Ø	Locale : Bénéfices (non estimés) Nationale (France) : - 525 millions \$	OAC
	Pays / ville (part du tourisme dans le PIB)	Baisse du nombre de touristes	New york	-250 millions \$ (New York)	Daily News
	Compagnies de fret aérien	Baisse des activités induites par la fermeture des aéroports	FedEx	Ø	Ø
Indirect	Marché pétrolier	Diminution de la demande entraînant l'explosion des prix	Ø	Le prix du barril de pétrole est passé de 2,27 \$ à 83,24 \$	Goldman Sachs
	Marché des denrées périssables	Pertes des biens périssables destinés à l'exportation	L'industrie de la fleur en Afrique	- 65 millions \$	Banque Mondiale
	Industrie pharmaceutique	Dépendance de l'industrie au trafic de fret aérien	Ø	Ø	Ø
	Industrie électronique	Impossibilité d'honorer les livraisons	Samsung/ LG	- 30 millions \$ (pour 200 000 portables non livrés)	Samsung/ LG
	Industrie automobile	Fermeture des usines faute d'approvisionnement	Nissan	Ø	Ø
	Economie des régions	Conséquences globales du ralentissement des activités et des plans de relance ⁴	Europe	Europe : 2.632 milliards \$ Monde : 4.7 milliards \$	Oxford Economics

1. ACI : Airport Council International, organisation à but non lucratif protégeant les intérêts des structures aéroportuaires.

2. Le chiffre ne correspond pas au bénéfice brut mais à l'augmentation de la valeur de l'entreprise (en millions). Seul Avis, spécialisé dans la location de voiture, a tiré des bénéfices de cette crise. Hertz et Budget, ces principaux concurrents ont vu la valeur de leurs entreprises diminuer respectivement de 306 et 225 millions.

3. IDC : International Data Corporation.

4. Les plans de relance sont surtout destinés aux compagnies aériennes.

Source : Noé Carles

Figure 2: Graphique représentant les différents secteurs et acteurs économiques impactés en cas de fermeture de l'espace aérien. Retour d'expérience de la crise de l'Eyjafjallajökul (Islande), 2010. Source: Noé Carles.

Il en est ressorti que le manque de connaissances scientifiques limite les mesures de prévention et de gestion pour faire face à la perte ou au ralentissement d'un réseau structurant les échanges de marchandises et de personnes dans le monde.

L'exemple de la crise volcanique de l'Eyjafjallajökull (Islande) en avril 2010 est symptomatique du manque de préparation dans la gestion d'une crise volcanique de magnitude et d'intensité pourtant modérée.

1.2. La crise éruptive de l'Eyjafjallajökull (Islande) en avril 2010

Dans la nuit du 20 mars 2010, le volcan islandais *Eyjafjallajökull* situé à 160 km de la capitale Reykjavik, entre en éruption après 187 ans de repos.

L'économie mondiale est extrêmement dépendante du transport aérien qui représente 40% des flux transportés en valeur (Lavigne et al., 2013). L'éruption a donc, durant une semaine, ralenti la productivité mondiale et le flux de passagers en touchant 1,7 millions de personnes soit 1,4% du trafic aérien mondial.

Avec plus de 100 000 vols annulés, les compagnies aériennes et les assurances ont été les plus touchées par la fermeture de l'espace aérien (cf. figure 2). Par ailleurs, au-delà des effets directs sur les compagnies aériennes et le tourisme, il est très difficile de quantifier les pertes économiques indirectes causées par la réduction de la production économique, comme la perte de revenu des employés bloqués par la fermeture de l'espace aérien, engendrant une diminution du pouvoir d'achat (Rivet, 2013).

Cependant, l'éruption a eu un impact bénéfique à court terme pour certains secteurs, notamment ceux offrant une alternative au transport aérien comme les agences de locations de voitures, le réseau ferré, mais aussi les hôtels ou les taxis (Mazzocchi et al., 2010).

Du point de vue des volcanologues, cette éruption n'avait aucun caractère exceptionnel. Seule la combinaison de différents facteurs (vent, composition de la cendre, proximité avec un espace aérien dense) et le manque de préparation face à ce type d'incidents ont engendré des dégâts économiques (Sammonds et al., 2011).

Les pays européens ont, par mesure de précaution, décidé d'appliquer directement les recommandations émises par l'ICAO, sans consultation avec les motoristes qui ont quant à eux estimé que les moteurs ne seraient pas endommagés si la concentration était inférieure à 2 mg/m³. Suite à cette crise, un partenariat entre Rolls-Royce et la NASA a permis l'élabo-

ration d'une étude incorporant l'ensemble des retours d'expérience et des tests réalisés pour comprendre l'endommagement matériel du moteur en fonction du temps d'exposition (y) et de la concentration de cendres (x). Pour autant, les scientifiques et motoristes n'ont pas encore statué sur l'établissement d'un seuil critique malgré les tests menés sur les réacteurs (Test VIPR 3; Lekki et al., 2015).

De ce constat, il semble pertinent et nécessaire de mener une étude se concentrant sur l'élaboration d'une cartographie à visée à la fois méthodologique, en termes de recherches fondamentales, mais aussi préventive pour nourrir les modèles des économistes et apporter des solutions lors de la gestion d'une crise future.

2. Vers une cartographie du risque volcanique sur l'aviation civile

L'approche cartographique s'inscrit dans une démarche prospective et territoriale – au sens du territoire aérien – visant à identifier les flux ou les zones spatiales les plus vulnérables à l'aléa volcanique, compte tenu de l'incertitude.

2.1. Cartographie de zonage de l'aléa volcanique en Asie du Sud-Est

NAME est un modèle météorologique de simulation, fondé sur la mécanique lagrangienne, qui calcule la dispersion des cendres dans l'atmosphère en fonction de la variation de masse et de volume des particules, des vents, de la gravité et intègre également les mouvements aléatoires issus des turbulences atmosphériques.

Le modèle se fonde sur une classification des zones volcaniques en Asie du Sud-Est en fonction de la densité de volcans présent dans chaque zone. Pour réaliser cette classification, une étude en amont, menée par Patrick Whelley et al. (2015), a répertorié tous les volcans actifs en Asie du Sud-Est pour ensuite calculer la fréquence d'occurrence d'une éruption pour chaque zone selon l'indice explosibilité (VEI).

À partir de ces résultats, le modèle simule pour chaque zone, chaque jour et chaque VEI des scénarios d'éruption volcanique dans une grille spatiale comprise entre les latitudes -15° et 30° et les longitudes 90° et 150° avec un espacement de 0,1° entre chaque mesure (cf. figure 3).

La taille des cendres volcaniques a été séparée en trois catégories (0,1–4 microns; 4–125 microns; 125–1 000 microns), variant en fonction de l'intensité volcanique tout comme la hauteur du panache et la durée de dispersion.

À partir des données NAME, nous disposons de cartes sur l'extension spatiale horizontale du panache de cendres dans l'atmosphère entre 8 et 12 km d'altitude, le premier jour de

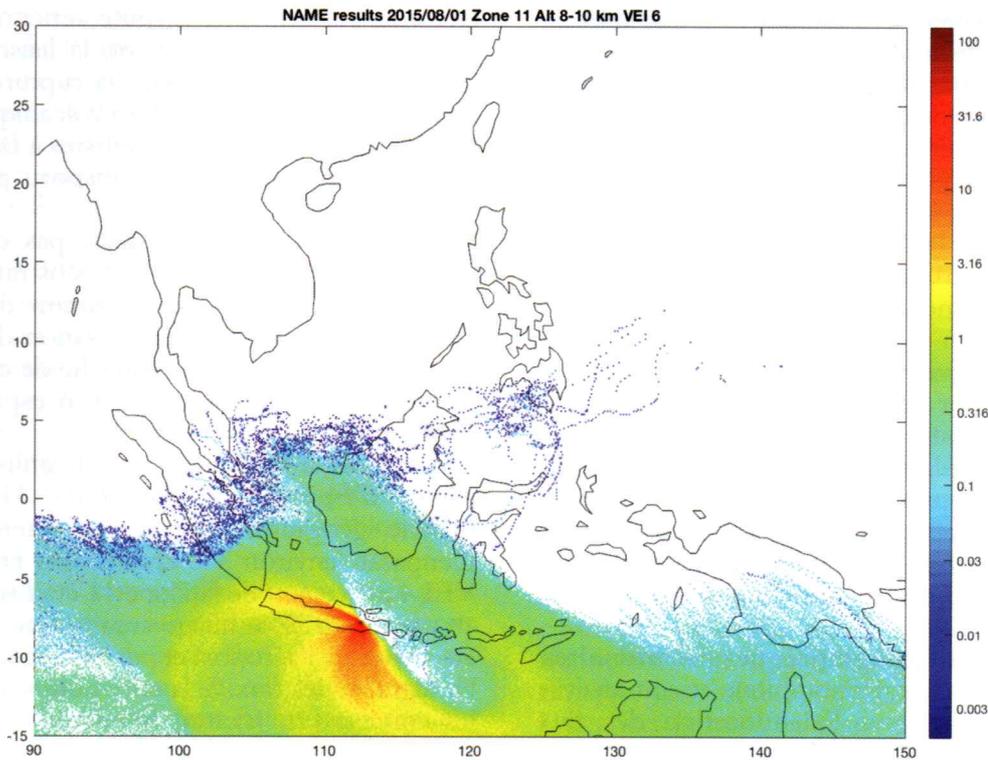


Figure 3 : Résultats des données NAME à partir du logiciel Matlab. Simulation de la dispersion horizontale des cendres volcaniques si une éruption de VEI 6 se produit le 01/08/2015 sur le Semeru. Échelle de concentration en g/m^3 , les concentrations en dessous de $2 mg/m^3$ ne sont pas représentées. Source : Noé Carles.

l'éruption. L'évaluation quantitative de l'intensité (VEI) est incluse dans le modèle à partir des données présentées précédemment.

Pour introduire une approche spatiale au sujet, la cartographie de l'aléa utilise les données brutes journalières produites lors du traitement. Le code a été écrit de sorte à extraire uniquement les concentrations au-dessus de $2 mg/m^3$ à partir d'une échelle logarithmique népérienne. Une conversion en valeur selon une formule de changement de base est appliquée aux valeurs pour améliorer la visibilité de la carte. Des polygones vont être créés pour spatialiser le panache de cendres dont la concentration est supérieure à $2 mg/m^3$ et les zones où la concentration dépasse les $30 mg/m^3$.

2.3. Cartographie des flux aériens proportionnels

Dans un second temps, une cartographie des routes aériennes doit être élaborée grâce aux bases de données fournies par des sites internet tels que FlyRadar24.

Pour simplifier le trafic aérien de passagers, une cartographie des flux est nécessaire. L'émergence de Singapour, comme place financière internationale, s'explique en partie par sa forte connectivité avec les autres places financières influentes en Asie (Hong-Kong, Pékin, Taipei, etc.). L'analyse des fréquences de vols fournit des indices pour évaluer le rapport hié-

rarchique entre chaque flux et déterminer leur ordre d'importance. L'identification des « corridors » de vol les plus importants sera mise en évidence à travers une représentation proportionnelle du nombre de vols par semaine.

À travers cette méthode basée sur la quantification des flux, l'objectif principal est de représenter de façon proportionnelle les flux de passagers des aéroports soumis au risque volcanique. Cela constitue l'étape préliminaire vers une cartographie, certes très incomplète, du risque aérien sur l'aviation civile en Asie du Sud-Est.

2.4. Cartographie du risque aérien en Asie du Sud-Est

L'élaboration d'une cartographie du risque aérien à l'échelle de l'Asie du Sud-Est doit être au centre des études prospectives en raison du caractère informatif et synthétique qu'elle fournit, plus lisible que des articles scientifiques dont le vocabulaire très spécialisé rend l'étude difficilement accessible pour l'ensemble des acteurs. En superposant la cartographie de l'aléa sur les flux aériens, cela nous permet de mettre en valeur les zones où les flux ont le plus de chance d'être impactés, et après analyse, de quantifier les répercussions économiques pour chaque flux.

Pour apporter un maximum d'informations quantifiables et lisibles par les gestionnaires, la visée finale de l'étude est de construire étape par

étape un raisonnement méthodologique applicable pour toutes les zones, toutes les compagnies aériennes et tous les aéroports. La carte synthétisera l'avancée des recherches sur l'évaluation de l'aléa et des vulnérabilités du risque volcanique sur l'aviation civile tout en quantifiant le nombre de liaisons aériennes potentiellement affectées en fonction de la date d'éruption.

L'analyse cartographique peut aussi mettre en évidence la vulnérabilité infra-structurelle en cas de perturbation matérielle ou d'impossibilité de renforcer les moyens de transports alternatifs (paquebot pour le trafic de fret, trains, taxi et locations de voitures pour les passagers).

Par exemple, la cartographie des réseaux structurant l'espace singapourien est utile pour évaluer la capacité maximale d'accueil du territoire et la capacité « tampon » du territoire face à la perte d'un réseau fonctionnel principal.

3. Résultats cartographiques préliminaires

La production cartographique et son analyse vont se focaliser sur l'identification des flux aériens impactés selon l'aéroport étudié et selon le jour étudié.

Singapour polarise les flux et cela se traduit par un réseau éclaté sur l'ensemble de la région. À l'inverse, l'aéroport de Denpasar (Bali) bénéficie de sa proximité avec les grandes métropoles indonésiennes (Jakarta, Surabaya) qui reçoivent les flux touristiques venant de l'étranger pour ensuite les redistribuer sur son territoire. Avec

349 vols par semaine, la route aérienne Jakarta-Denpasar est, très largement, la liaison la plus fréquentée. Par conséquent, la rupture de cette seule liaison en cas d'éruption volcanique va bloquer un grand nombre de touristes à Bali et obliger une réorganisation des transports pour acheminer les voyageurs.

À l'inverse, Singapour n'est pas dépendant d'un flux principal, la position géostratégique de l'aéroport et le nombre important de liaisons aériennes facilitant la réorganisation des flux et des passagers tant que le panache de cendres ne se disperse pas au-dessus de son espace aérien (FIR).

Le Semeru (Est-Java), volcan utilisé comme source d'émission pour la Zone 11, est très proche géographiquement de l'aéroport de Denpasar (environ 300 km). Si une éruption de VEI 4 provenant de la Zone 11 était survenue le 1^{er} janvier 2015, le nuage aurait couvert la zone au-dessus de l'aéroport et par conséquent stoppé l'intégralité des flux. Si la crise dure une semaine, les routes vers Jakarta, Surabaya, Yogyakarta, Bandung, Kuala Lumpur, Singapour et Makassar seront fermées, soit 929 vols hebdomadaires (cf. figure 4). À l'inverse, après avoir vérifié que la colonne d'air au-dessus de l'aéroport n'est pas polluée par les cendres, les routes aériennes en direction de Perth, Lombok et de Labuan Bajo (211 vols hebdomadaires) seront potentiellement hors des zones où la concentration dépasse 2 mg/m³.

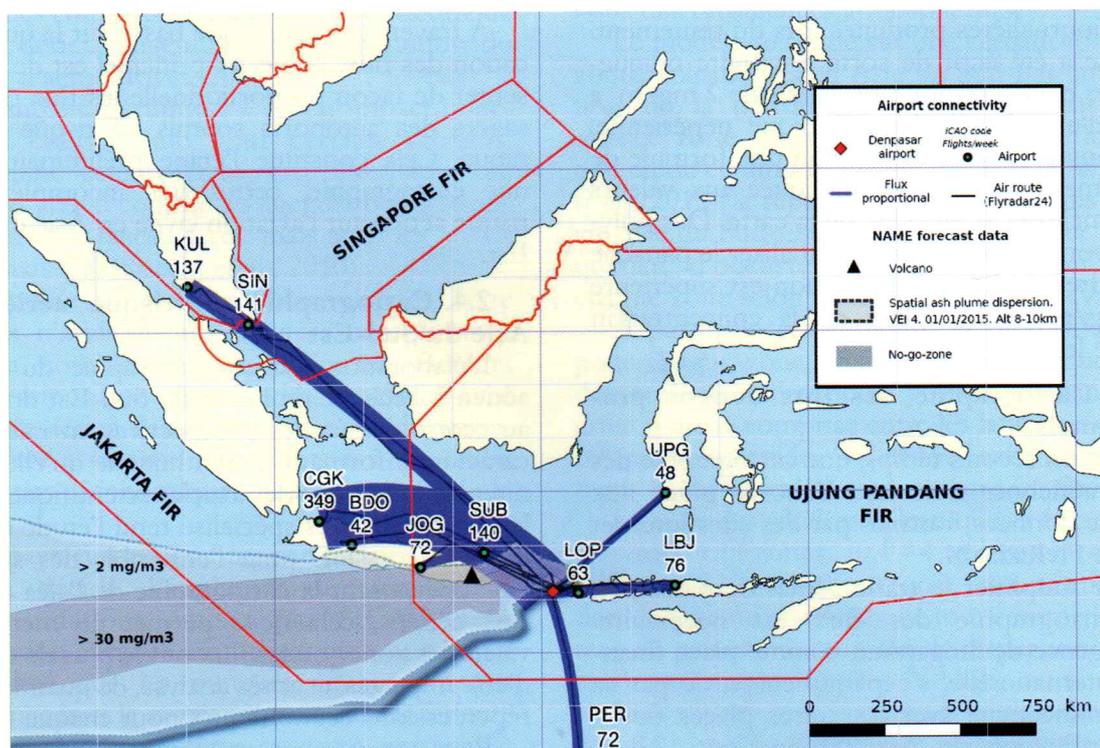


Figure 4: Cartographie de la perturbation des flux aériens principaux de l'aéroport de Denpasar en cas d'éruption volcanique du VEI 4 (Données NAME du 01/01/15). Source: Noé Carles.

Les résultats appliqués aux conditions météorologiques du 1^{er} août 2015 montrent que la dispersion a une amplitude spatiale beaucoup plus importante (cf. figure 5), et cela s'explique par les changements des conditions climatiques entre la saison des moussons et la saison des alizés (pluviométrie faible, vent d'Ouest en Est).

Dans ce contexte, la restructuration des flux va être plus difficile sachant que la superficie de la «no-go zone» augmente de 114% tandis que la superficie du panache de cendres augmente de 224%. De plus, le mois d'août est au milieu de la saison touristique estivale, période durant laquelle une grande partie des touristes proviennent d'Europe ou des États-Unis ce qui implique des pertes économiques plus importantes pour dédommager les touristes bloqués et les rapatrier dans leur pays.

Les résultats cartographiques produits pour l'aéroport de Singapour montrent que le risque de perturbations de ses flux principaux est moins important que pour l'aéroport de Denpasar. 81,5% des flux principaux seraient stoppés si l'éruption était survenue le 1^{er} août 2015 et 75,6% pour le 1^{er} janvier 2015. Singapour se situe à 1500 km du Semeru (Indonésie) et de part cet éloignement géographique, moins de flux aurait été impactés en cas d'éruption.

Pour autant, Singapour reste vulnérable à l'aléa volcanique car la ville s'inscrit dans une logique de hub faisant de son aéroport un pôle où convergent les routes aériennes régionales et internationales. En cas de scénario catastrophe (VEI 6), les concentrations de cendres à l'intérieur du nuage atteindraient des pics très élevés et déstructureraient les axes aériens Nord/Sud de la zone étudiée.

4. Discussion

4.1 La cartographie, un outil indispensable dans la gestion du risque

La cartographie constitue un atout indispensable dans le développement des stratégies de gestion du risque. Elle repose sur l'identification exhaustive de l'ensemble des processus susceptibles d'être au cœur du risque et, dans le cadre de cette étude, elle permet ainsi de se prémunir contre les répercussions économiques et opérationnelles. Son caractère formel et accessible favorise la visibilité de la recherche et peut influencer la mise en place de mesures de prévention et de détection proportionnées aux enjeux. L'élaboration menant à la production de cartes du risque doit faire l'objet d'une méthodologie claire et conforme aux besoins des décideurs pour organiser la gestion de crise.

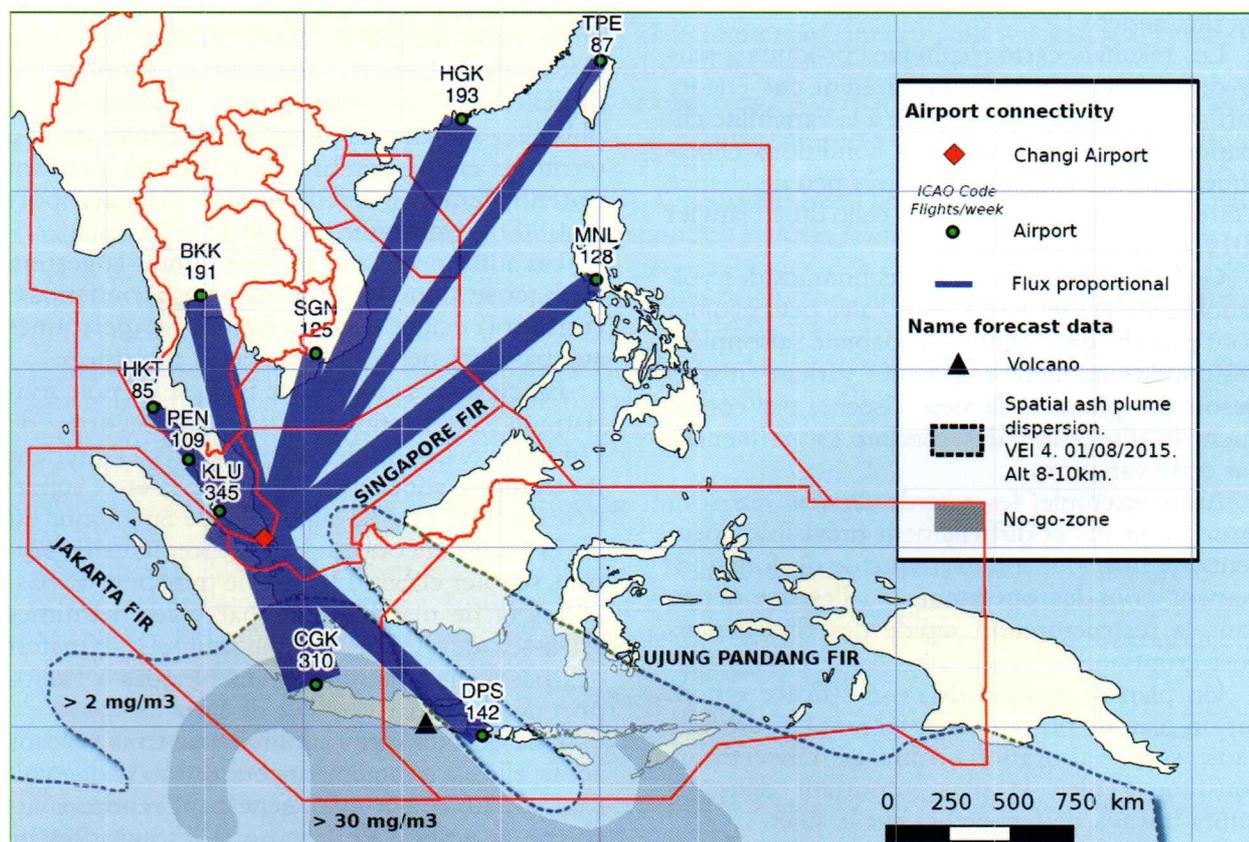


Figure 5: Cartographie de la perturbation des flux aériens principaux de l'aéroport de Singapour en cas d'éruption volcanique du VEI 4 (Données NAME du 01/08/15). Source: Noé Carles.

Pour cela il faut un dialogue régulier entre les autorités responsables de la gestion du risque et les chercheurs à l'origine de la carte. De plus, la cartographie du risque est évolutive.

À chaque fois qu'un élément du système est modifié (densification des certains flux aériens, amélioration du modèle NAME, etc.), il faut l'intégrer à la carte et, dans le cadre du transport aérien, cela demande une réévaluation périodique.

Appliquée au sujet, la réalisation d'une carte des flux associés aux perturbations volcaniques apporte une quantification de l'endommagement fonctionnel et une spatialisation des zones potentiellement impactées. Cela constitue l'un des atouts les plus importants de l'étude.

4.2 Comment limiter l'incertitude du risque à partir d'une analyse cartographique ?

La diversité des acteurs, et leur degré de connaissance du risque, les variations des routes aériennes sont des facteurs limitant les orientations stratégiques à prendre pour la gestion de la crise.

Logiquement, la création d'un modèle donne lieu à une grande part d'incertitude quant à la fiabilité de celui-ci, et ceci est particulièrement vrai pour les études ayant pour but de modéliser les scénarios d'éruptions volcaniques ainsi que les flux aériens.

Les résultats cartographiques produits à partir des données NAME ne limitent pas encore suffisamment l'incertitude due à la variabilité climatique car, par exemple, les conditions climatiques du 1^{er} janvier 2015 ont très peu de chance d'être exactement similaires à celle du 1^{er} janvier 2019.

Grâce aux connaissances techniques des volcanologues, la cartographie de l'aléa peut évoluer pour prendre en compte la variabilité saisonnière (les conditions météorologiques varient entre la saison des pluies et la saison sèche, par conséquent la dispersion des cendres est influencée par cette variation).

Autre exemple, les retards de vol, qui sont assez fréquents et difficilement prévisibles, peuvent être une source importante de dysfonctionnement pour les opérateurs de l'espace aérien dans la restructuration rapide des flux aériens post-éruption.

Un plan de gestion de crise efficace repose sur un plan de prévention intégrant l'incertitude dans son élaboration. Limiter l'incertitude constitue l'enjeu le plus important dans les futurs travaux de recherches sur le sujet.

4.3. Perspective de recherches : la cartographie comme outil pour exposer les critères de vulnérabilité inhérents au risque volcanique sur l'aviation civile

Les infrastructures liées au transport sont aujourd'hui essentielles dans le bon fonctionnement du territoire et des sociétés. Cela se traduit par l'apparition d'un nouveau type de risque lié à la défaillance d'un service de transport critique et la capacité d'une société à prévenir et gérer la crise. Ce constat renvoie à la notion de dépendance et à ses différentes approches pour la caractériser.

On peut exposer la dépendance d'un territoire en étudiant conjointement le degré de criticité et le degré d'exposition direct d'un système (Bouchon, 2006). Si le système territorial est trop dépendant de son sous-système, en l'occurrence le réseau aérien, la vulnérabilité de ce sous-système rend vulnérable l'ensemble du système. La gestion efficace d'une crise provoquée par la rupture d'un réseau de transport est portée par la capacité « tampon » d'une société à compenser rapidement les flux de marchandises ou de passagers impactés.

À Singapour, l'aéroport de Changi se situe à l'Est de l'île. Tous les services de transports seront utilisés pour la gestion de crise, mais cela n'empêchera pas l'encombrement du réseau routier comme ce fut le cas entre Roissy et Paris lors de la crise de 2010. Aussi efficace soit-il, le réseau de transport singapourien supporterait difficilement une crise de cette ampleur durant plusieurs semaines à cause de l'exiguïté de son territoire et du nombre de passagers pouvant potentiellement être bloqués à l'aéroport (160 900 en moyenne par jour).

Un autre problème se pose durant la gestion de la crise pour les autorités singapouriennes : comment éviter l'accumulation de personnes aux passages de frontières vers la Malaisie ?

En comparaison, l'île de Bali est un pôle touristique international situé au centre de l'Indonésie. Les modes de transports à l'intérieur du territoire sont moins développés et sa superficie de 5 637 km² (la superficie de Singapour est de 719 km²) encourage les déplacements en voiture, scooter et bus. De plus, le transport de passagers et de marchandises par voies maritimes est assez développé, ce qui facilite le transfert des passagers potentiellement bloqués à l'aéroport de Denpasar vers l'île de Java.

L'île de Bali étant jalonnée par trois volcans actifs, elle est directement soumise au risque volcanique. Le climat anxigène peut rendre anarchique la gestion de la crise si les autorités ne sont pas suffisamment présentes, préparées et efficaces pour réguler les flux.

5. Conclusion

L'étude donne des pistes à approfondir pour élaborer une cartographie du risque volcanique sur le réseau aérien en Asie du Sud-Est, au vue de l'exposition de la région face à l'aléa volcanique (cf. figure 6) et la place structurante du réseau aérien.

L'approche spatio-temporelle (cartographie dynamique) et territoriale (représentation du «territoire aérien») doivent être au cœur des recherches fondamentales sur le sujet. De plus, l'approche cartographique et prospective amène

des pistes de réflexion sur l'intérêt d'identifier les critères des vulnérabilités induits par le risque tout en montrant que chaque pays et/ou région est exposé inégalement. Standardiser et vulgariser le discours scientifique est utile pour instaurer des discussions transversales où chaque partie prenante se voit représentée. Il semble que le géographe physicien peut, grâce à ses connaissances pluridisciplinaires, jouer un rôle de médiateur et centraliser, dans la mesure du possible, une grande partie des études liées au risque aérien sur l'aviation civile. □

Références bibliographiques

- Revue LAVE n°145, juillet 2010.
- Bayhurst GK., Wohletz KH., Mason AS. 1994. «A method for characterizing volcanic ash from the december 15, 1989, eruption of Redoubt volcano, Alaska», *U.S. Geological Survey Bulletin*, pp. 13-19.
- Bouchon S., 2006. «L'application du concept de vulnérabilité aux infrastructures critiques: quelles implications pour la gestion territoriale des risques?». *Responsabilité et environnement*, 43, pp. 32-45.
- Bursik MI., Carey SN., Sparks RSJ., 1992. «A gravity current model for the May 18, 1980 Mount St. Helens plume». *Geophysical Research Letters*, 19, pp. 1663-1666.
- Campbell E., 1991. «Recommended flight-crew procedure if volcanic ash is encountered». *U.S. Geological Survey Bulletin*, 2047, pp. 151-157.
- Casadevall TJ., 1991. «The First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety». *Program and Abstracts: U.S. Geological Survey Circular*, pp. 1065-58.
- Evans J., 1991. «Development of a Real-Time ATC Volcanic Ash Advisory System Based on the Future Aviation Weather System». *U.S. Geological Survey Bulletin*, 2047, pp. 157-161.
- Guffanti M., Casadevall TJ., Budding K., 2010. «Encounters of aircraft with volcanic ash clouds: a compilation of known incidents, 1953-2009». *U.S. Geological Survey*, DS 545.
- Heffter JL., Stunder B.J., Rolph GD., 1990. «Long-range forecast trajectories of volcanic ash from Redoubt Volcano eruptions». *Bulletin of American Meteorological Society*, 71, pp. 1731-1738.
- Keuppers U., Cimarelli C., Hess KU., Taddeucci J., Wadsworth FB., Dingwell D., 2014. «The thermal stability of Eyjafjallajökull ash versus turbine ingestion test sands». *Journal of applied volcanology*, 3, 4.
- Lavigne F., De Belizal E., 2010. «Les effets géographiques des éruptions volcaniques». *Echo Géo*{En ligne}, Sur le vif, mis en ligne le 6 décembre 2010, consulté le 15 novembre 2016, url: (<http://echogeo.revues.org/12226>).
- Mazzocchi M., Hansstein F., Maddalena R., 2010. «The 2010 Volcanic Ash Cloud and Its Financial Impact on the European Airline Industry». *CESifo*, 11(2), pp. 92-100.
- Oxford-Economics, 2010. «*The Economic Impacts of Air Travel Restrictions Due to Volcanic Ash*», Rapport pour Airbus.
- Rivet F., 2013. «14 au 21 avril 2010: fermeture de l'espace aérien européen». *Outre-Terre*, 35-36, pp. 61-76.
- Sammonds, McGuire, Edwards, 2011. «Volcanic hazard from Iceland – analysis and implications of the Eyjafjallajökull eruption». Institute for Risk and Disaster Management. Operations Group.
- Schlatter TM., Benjamin SG., 1991. «A mesoscale data assimilation system adapted for trajectory calculations over Alaska». *U.S. Geological Survey Bulletin*, 2047, pp. 269-275.
- Song W., Hess KU., Damby DE., Wadsworth FB., Lavallée Y., Cimarelli C., Dingwell DB., 2014. «Fusion characteristics of volcanic ash relevant to aviation hazards». *Geophysical Research Letters*, 41, pp. 2326-2333.
- Swanson SE., Beget JE., 1994. «Melting properties of volcanic ash». *U.S. Geological Survey Bulletin*, 2047, pp. 87-93.
- Whelley P., Newhall CG., Bradley K., 2015. «The frequency of explosive volcanic eruptions in Southeast Asia». *Bulletin of volcanology*, 77(1).

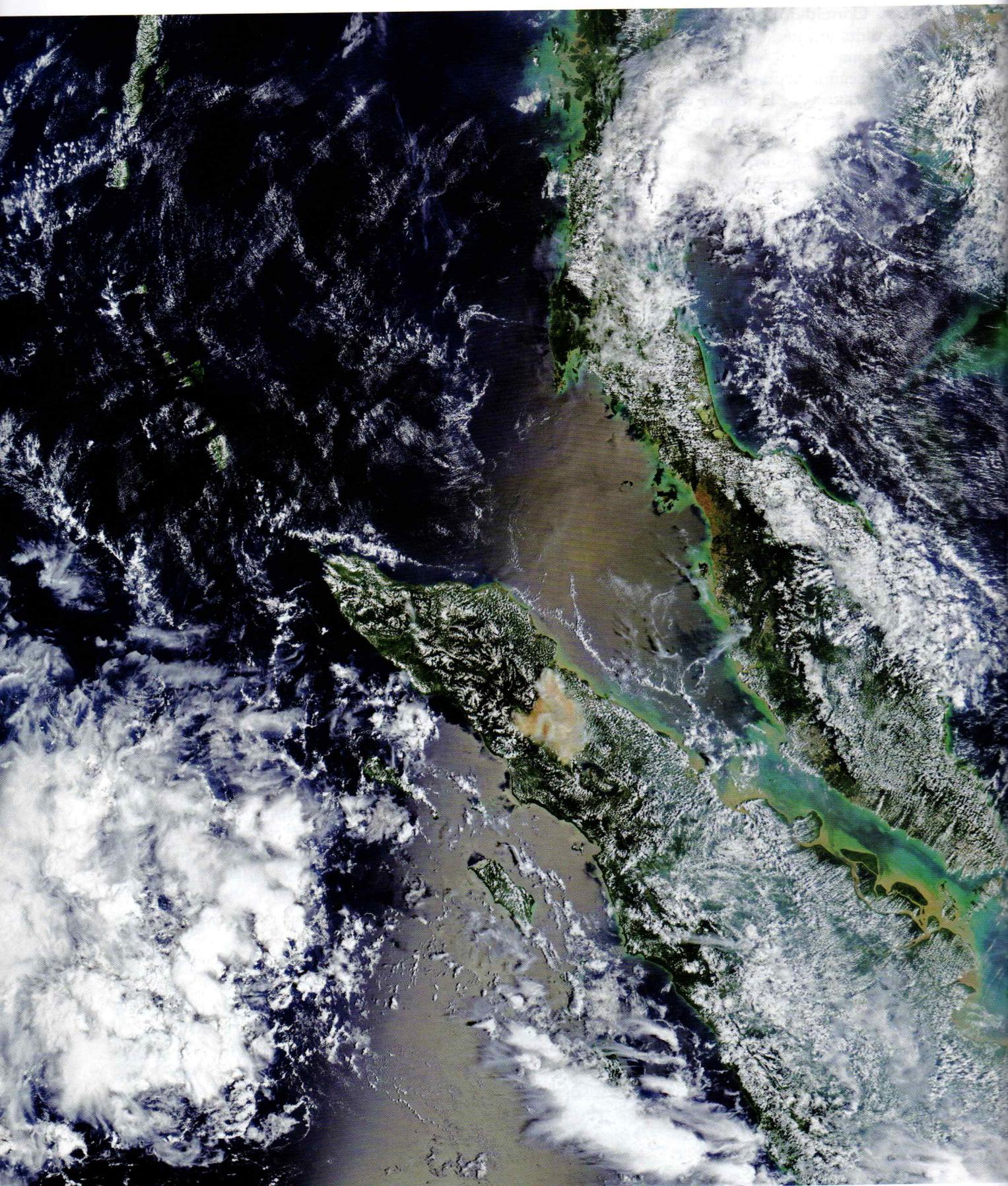


Figure 6 : Photographie satellite lors de l'éruption du Sinabung (Indonésie), le 19 février 2018. Grâce à la direction des vents, l'aéroport de Singapour situé au sud-ouest de la photo n'a pas été perturbé par l'éruption. Source : NASA.