

VOLCANISME

EYJAFJÖLL : le volcan, l'avion et le satellite¹

Robin Champion²

Bien que l'éruption de l'Eyjafjöll se soit passée en début de l'année 2010, il nous paraît intéressant de le publier ici. Cet événement a été la cause d'une fermeture totale de l'espace aérien en Europe du Nord. Cette situation sans précédent a affecté directement ou indirectement l'existence tranquille de millions d'Européens et a brusquement amené les volcans sous le feu des projecteurs. Cet article se propose d'exposer les problèmes que posent les panaches de cendres pour l'aviation, pour les volcanologues et pour la société...

Une éruption en deux phases

Le mécanisme de l'éruption est typique des éruptions islandaises. Un dyke de basalte primitif est remonté depuis le manteau supérieur. Il a atteint la surface le 20 mars 2010 à Fimmvörduháls, engendrant une éruption fissurale de lave fluide qui a duré jusqu'au 12 avril. Cette première phase de l'éruption a généré une manne financière pour les propriétaires de 4x4 et d'hélicoptères qui ont convoyé vers le site de l'éruption des dizaines de milliers de touristes. Poursuivant son ascension dans la cheminée du volcan central Eyjafjöll, le dyke de magma a fini par atteindre une chambre magmatique différenciée, comme on en rencontre sous presque tous les volcans centraux du pays.

La seconde phase de l'éruption peut alors se déclencher. Le mélange entre le basalte et la dacite produit un magma hybride plus visqueux et riche en gaz, conférant à cette seconde phase un caractère intrinsèquement plus explosif. Cette explosivité a été encore accentuée, dans un premier temps, par la présence du glacier Gigjökull dans le cratère du volcan. La détente des gaz magmatiques, le choc thermique et les explosions de vapeur fragmentent le magma en particules très fines : les cendres. Ces cendres sont injectées dans l'atmosphère à une altitude qui dépend de l'énergie cinétique et thermique produite par l'éruption, ainsi que de la vitesse du vent. Les vents transportent et dispersent le panache de cendres. Si les plus grosses particules de cendre retombent lentement vers le sol, en revanche les particules fines sont emportées par les vents. Comme la direction des vents varie selon l'altitude, certaines zones du panache peuvent se retrouver « cisailées » et transportées à différentes altitudes et dans de multiples directions.

Les cendres et les avions

Les panaches de cendres sont une source d'angoisse pour les compagnies aériennes depuis 1982, quand un Boeing de la compagnie KLM traversa un panache émis quelques heures plus tôt par le Galunggung (Java, Indonésie). Les quatre réacteurs arrêtés, les vitres du cockpit rendues opaques, l'avion en perdition descendit de 5.000 m

¹ Cet article a été publié dans la revue LAVE de juillet 2010 et est reproduit ici avec l'autorisation de son auteur.

² A l'époque, Doctorant au Département des Sciences de la Terre et de l'Environnement, ULB. Membre du G.E.S.T. et de LAVE-Belgique. Volcanologue - géochimiste à la Universidad Nacional Autonoma de Mexico depuis août 2012.

en quelques minutes, jusqu'à ce que deux des moteurs redémarrent. Le pilote, grâce à sa maîtrise et son sang-froid, put se poser sans dommage en urgence à Jakarta. Tout le monde était sain et sauf mais l'avion était bon pour la casse... Le même type d'incident se produisit en 1990 au-dessus de l'Alaska, dans le panache du Mont Redoubt. Même cause, mêmes effets, une catastrophe évitée de justesse et un avion inutilisable... Des dizaines d'autres incidents moins sérieux ont été recensés, et l'analyse des dégâts a permis de cerner l'effet de la cendre sur les avions.

Le plus significatif est certainement l'arrêt des moteurs. Quand un moteur à réaction ingère de l'air contenant de la cendre, celle-ci fond au contact des éléments chauds du réacteur, et tapisse les tuyères d'une couche de céramique, qui peut bloquer l'arrivée d'air (fig. 1). En effet, la température régnant dans la chambre de combustion du réacteur (1.400°C) dépasse largement le point de fusion de la cendre volcanique (≈ 900°C).

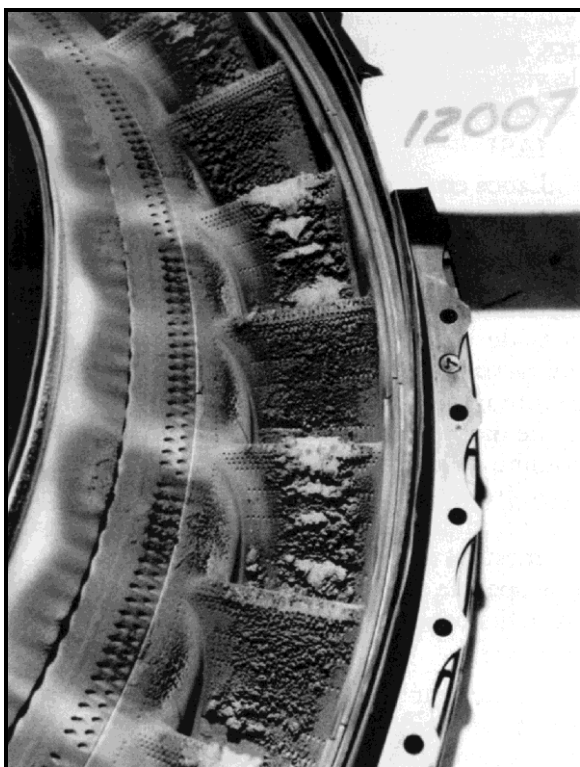


Fig. 1 – Réacteur du Boeing 747 après son passage dans le panache du Redoubt. On note les dépôts de cendres refondus et l'oxydation extrême des parties métalliques

Le second effet est de rendre le pilotage difficile. La cendre dépolit le pare-brise du cockpit et bouche les capteurs de pressions et de vitesse (*tubes Pitot*) sur lequel se base le pilote automatique. La conception des avions modernes les rend plus sensibles à des informations, comme l'a tragiquement rappelé le crash du vol Air France au large du Brésil.

C'est pourquoi les panaches de cendres sont craints par les compagnies aériennes. Plusieurs dizaines de vol sont ainsi annulés ou détournés chaque année, essentiellement au-dessus du Pacifique et, chaque année, des aéroports situés à proximité d'un volcan sont fermés temporairement pour cause d'éruption. Catane, Anchorage, Vancouver et Guatemala City entre autres ont connu ce problème ces dix dernières années. Un réseau de neuf centres a été mis en place dans le monde pour détecter les panaches de cendres et prévoir leur trajectoire : ce sont les VAAC ou *Volcanic Ash Advisory Centers*. Chaque VAAC (Toulouse, Londres, Washington, Montréal, Anchorage, Tokyo, Darwin, Wellington et Buenos-Aires) contrôle une zone du globe terrestre et émet, aussi rapidement que possible, des bulletins d'alerte dès que de la cendre est détectée.

Leur bulletins sont établis à partir de trois sources de données : les observations faites *in situ* par les volcanologues (pour peu que le volcan soit surveillé), les rapports des pilotes et l'analyse d'images satellites. Pour détecter des panaches la nuit, ou pour des panaches situés loin du volcan et déjà dilués, seules les images satellites peuvent être utilisées.

Principe des mesures satellites

La plupart des techniques de détection des panaches de cendres volcaniques se basent sur leur absorption spécifique de la lumière infrarouge. Un certain nombre de satellites (*cf. paragraphe suivant*) ont été conçus pour mesurer et cartographier le rayonnement infrarouge émis sur la Terre. La lumière infrarouge, invisible à nos yeux, est émise par tous les corps proportionnellement à leur température. Elle est également absorbée par la matière atmosphérique (gaz, ou nuage de particules) en fonction de leur

température, de leur composition et de leur concentration. Dans le cas qui nous occupe, la surface terrestre est la source de lumière infrarouge et les nuages, qu'ils soient de cendres, de gouttelettes d'eau, ou de cristaux de glace, absorbent une partie de celle-ci. Cependant, le spectre d'absorption des nuages, c'est-à-dire la variation de leur absorption en fonction de la longueur d'onde de la lumière, dépendra de la composition des particules (cendres, gouttelettes d'eau ou cristaux de glace). C'est cette propriété qui est utilisée pour la détection des nuages de cendres. La **méthode dite de « split windows »** consiste à soustraire les intensités lumineuses mesurées sur deux canaux infrarouges de longueur d'onde voisine (fig. 2). L'une où la cendre absorbe et l'autre où les nuages météorologiques absorbent. La mesure proprement dite se fait en deux étapes. Dans un premier temps, on modélise la propagation du rayonnement infrarouge en fonction de la concentration et de la taille des particules de cendres (au moyen des **lois de Mie et de Beer-Lambert**). Ensuite, on compare les mesures de lumière infrarouge aux modélisations pour inverser ces deux paramètres. Ces mesures par inversion dépendent de façon assez critique de l'altitude du panache, qui ne peut généralement pas être mesurée par cette approche.

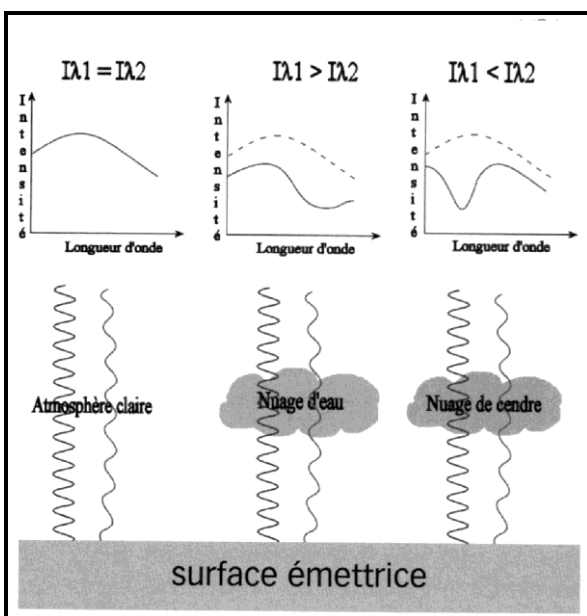


Fig. 2 – Principe schématique de la méthode « split windows »

- la **résolution spectrale**, qui est le nombre et la largeur des bandes spectrales du satellite. Une haute résolution spectrale (beaucoup de canaux à faible largeur de bande) permet une mesure plus précise en éliminant les interférences avec d'autres composants de l'atmosphère (la vapeur d'eau qui absorbe également le rayonnement infrarouge, pose des problèmes à certains satellites, notamment sous les tropiques).

Pour des raisons de rapport signal/bruit et de traitement des signaux, ces trois qualités (haute résolution au sol, haute fréquence d'image et haute résolution spectrale) sont antinomiques, ce qui fait que les satellites actuels n'en possèdent jamais plus que deux, en adéquation à leur usage. En d'autres termes, le satellite idéal n'existe pas...

La première génération : AVHRR et MODIS

La **méthode split windows** a été mise au point par **A.J. PRATA (1989)** pour exploiter les images des **satellites AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)** lancés **depuis 1978** par la NOAA. Ces satellites, dont certains sont toujours en usage, sont de conception assez simple, d'une **résolution d'un kilomètre**, et n'ont que **deux bandes**

spectrales dans le domaine de longueur d'onde où absorbent les cendres. Par conséquent, la limite de détection est assez élevée et les mesures quantitatives de concentrations des cendres sont affectées d'interférences avec la vapeur d'eau et les nuages météo. Le même problème est rencontré pour les mesures avec les **senseurs MODIS**, lancés en 1999 et 2003 par la NASA. De conception un peu plus évoluée (**trente-six bandes spectrales** dont quatre dans les domaines d'absorption de la cendre, **un kilomètre de résolution**), les **senseurs MODIS-Terra et MODIS-Aqua** fournissent à eux deux une couverture journalière de l'ensemble de la surface terrestre. Un exemple de mesure avec MODIS se trouve à la figure 3.

MSG

MSG (Meteosat Second Generation) est un satellite géostationnaire lancé par l'ESA (l'Agence Spatiale Européenne) pour les observations météorologiques. Son champ de vision couvre une zone hémisphérique de la surface du globe centrée sur l'Afrique de l'Ouest et comprenant les volcans des Caraïbes, d'Europe et d'Afrique. La disposition de ses bandes spectrales ressemble à celle de MODIS et les mesures de concentration des cendres sont d'une qualité similaire et affectées des mêmes imprécisions. Le principal atout de MSG est sa **fréquence d'acquisition de quatre images par heure**, qui permet un véritable suivi en temps réel (PRATA et KERKMAN, 2007). En raison de la courbure du globe terrestre, la **résolution au sol de MSG** varie **entre un et dix kilomètres**, selon la position du volcan dans son champ de vision. Un exemple de mesure avec MSG est présenté à la figure 4.

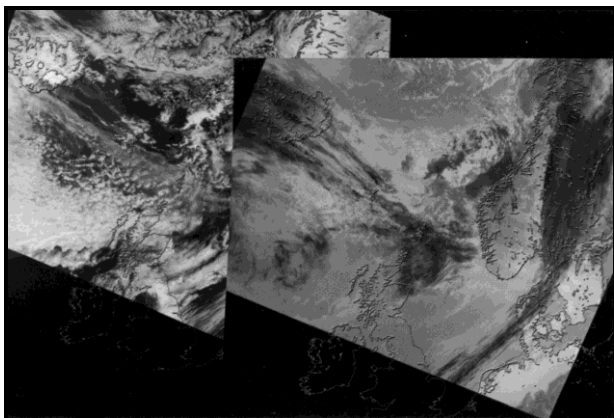


Fig. 3 – Exemple de détection de cendres par MODIS le 15 avril 2010 : l'image infrarouge (droite) fait ressortir la cendre en noir. Processing : Vince Realmuto (Jet Propulsion Laboratory)

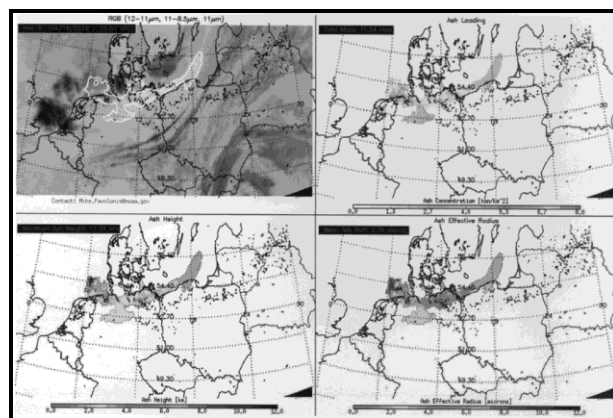


Fig. 4 – Exemple de données obtenues avec le satellite MSG le 1 avril, lorsque le panache était au-dessus de l'Europe :

- portions d'images identifiées comme « panache de cendre » ;
- estimation de la concentration des cendres ;
- estimation de l'altitude du panache ;
- estimation du rayon moyen des particules.
- Processing : Mike Parlonis (NOAA)

IASI

Lancé en 2006 par l'ESA ; IASI est un capteur qui fournit deux images par jour de l'ensemble de la surface terrestre avec une résolution de 25 Km. Il fonctionne sur le principe du spectromètre infrarouge à transformée de Fourier et possède une très haute résolution spectrale, ce qui permet de bien discriminer les nuages de cendre par rapport à des nuages d'eau, de glace ou de dioxyde de soufre (KARAGULIAN et al., 2010), comme l'illustre bien la figure 5. Les interférences avec la vapeur d'eau sont également minimales. IASI est le satellite qui permet les mesures les plus précises, même si sa résolution spatiale assez grossière pose problème pour de petits panaches.

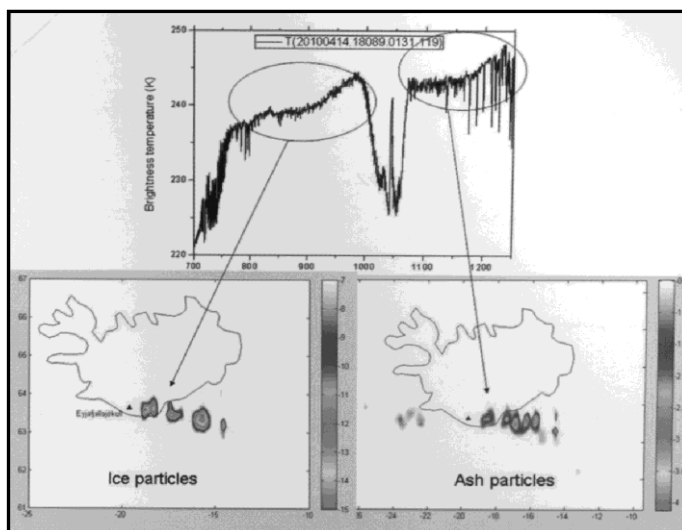


Fig. 5 – Exemple de mesures avec IASI, le 14 avril au premier jour de l'éruption. Le spectre infrarouge à haute résolution (en haut) permet de discriminer et quantifier la cendre (en bas à droite) et la glace.

Processing : Lieven Clarisse (ULB)

OMI

Le capteur OMI (*Ozone Monitoring Instrument*) est un projet commun de la NASA et des instituts d'aéronomie néerlandais et finlandais. Il observe la Terre dans l'ultraviolet avec une très haute résolution spectrale et une résolution spatiale de 13 x 24 Km. Le principe de mesure reste identique mais la source du rayonnement ultraviolet est la lumière solaire réfléchiée par la surface terrestre. Par conséquent, OMI ne peut faire des mesures que pendant la journée diurne. Les données OMI permettent de détecter les panaches de cendres, mais c'est surtout pour mesurer le dioxyde de soufre (SO₂) qu'OMI excelle (fig. 6). Le SO₂ absorbe fortement dans l'ultraviolet, ce qui rend sa détection plus facile et plus fiable que pour la cendre.

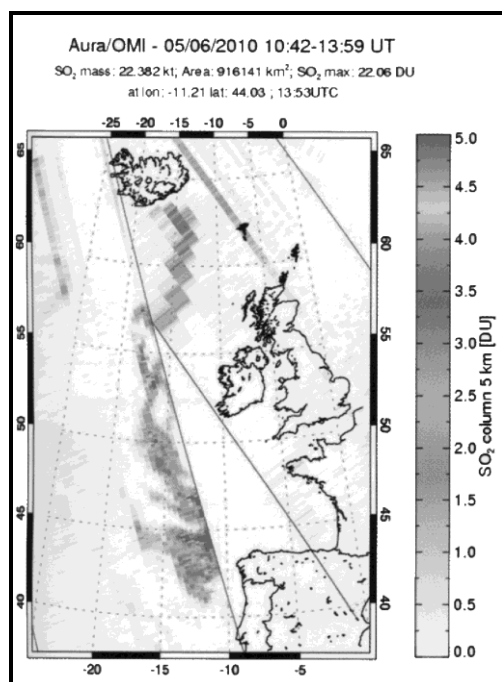


Fig. 6 – Exemple de mesure de dioxyde de soufre par OMI, le 6 mai. Un DU (Dobson Unit) correspond à $2,69 \times 10^{16}$ molécules par cm². Processing : Simon Carn.

CALIPSO

Parmi tous ces satellites, **CALIPSO** occupe une place à part.. C'est un **LIDAR** en orbite. Il envoie un rayon laser vers la Terre et analyse le rayon réfléchi par la surface et la matière particulaire en suspension dans l'atmosphère (aussi appelée aérosol). L'intensité du rayon réfléchi est proportionnelle à la concentration de l'aérosol, et le temps de parcours aller-retour du rayon donne l'altitude à laquelle se trouve l'aérosol. **CALIPSO** est le seul satellite à pouvoir mesurer précisément l'altitude des panaches, un paramètre de la plus haute importance pour la sécurité aérienne, pour l'exactitude des mesures de concentrations et pour la trajectoire suivie par le panache. Les deux inconvénients de **CALIPSO** sont le fait que les mesures sont ponctuelles (pas d'images) et qu'il ne sait pas différencier les nuages de glace (cirrus) des nuages de cendre (fig. 7).

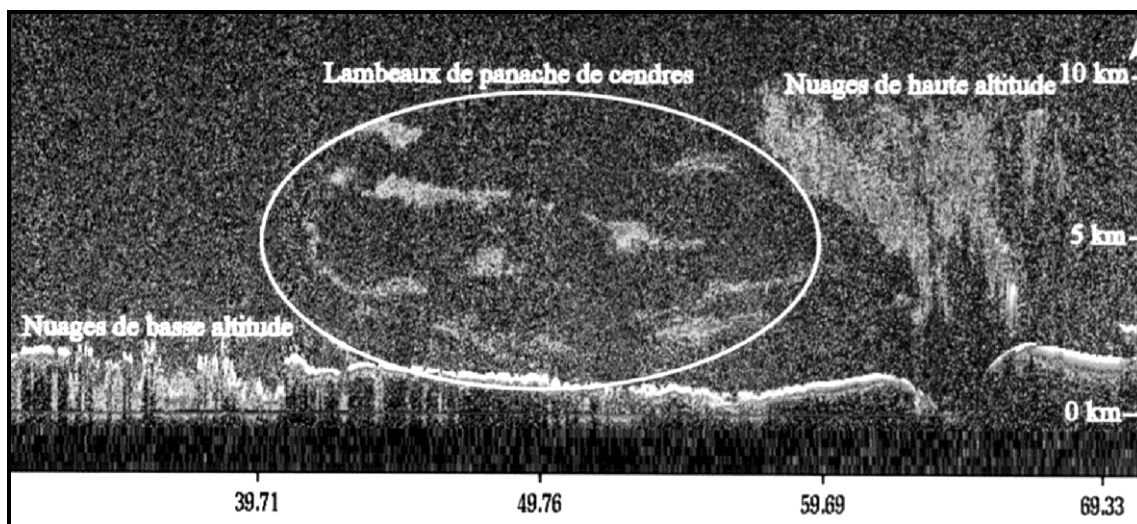


Fig. 7 – Exemple de données CALIPSO au-dessus de l'Atlantique, le 6 mai. Seule la comparaison avec les données d'autres satellites (cf. image OMI, fig. 6) permet de confirmer que les objets entourés sont effectivement des panaches de cendres. Processing : Mike Fromm (U.S. Naval Research Laboratory).

Problèmes dans la détection

Les mesures de concentrations de cendres volcaniques en suspension dans l'atmosphère présentent donc les problèmes suivants (cf. **SIMPSON** et al., 2000) :

Si le panache de cendre se trouve sous une couche épaisse de nuages météorologiques, il sera indétectable. Ainsi les panaches de basse altitude (comme ceux de l'Eyjafjöll) peuvent être masqués, car l'altitude maximale des nuages météo peut atteindre 10 Km.

Toutes les mesures (sauf celles de **CALIPSO**) dépendent de la connaissance précise de l'altitude du panache, qui ne peut être mesurée par le satellite de manière indépendante. Ce paramètre est donc critique aussi bien pour la quantification du contenu du panache, que pour la prévision de son déplacement.

Par ailleurs, tous les senseurs ont une limite de détection, plus ou moins fiable selon les instruments, et cette même limite varie en fonction des conditions atmosphériques (humidité, température, altitude du panache...). Si de la cendre est présente à des concentrations inférieures à cette limite, elle ne sera pas détectée.

Un autre problème (**ROSE** et al., 1994) se pose dans les atmosphères tropicales et les panaches riches en vapeur d'eau. Quand une grande quantité de vapeur d'eau est aspirée dans le panache, elle se retrouve emportée à haute altitude, où elle atteint son point de congélation. Une pellicule de glace se forme alors rapidement sur les noyaux de

condensation que constituent les particules de cendre, dont la signature spectrale se retrouve complètement masquée.

Jusqu'à présent, aucune des techniques de mesure de cendres présentées ici n'a été validée par de l'échantillonnage direct d'un panache volcanique. Cela tient surtout à la difficulté de mobiliser rapidement une équipe compétente et du matériel coûteux, ainsi qu'à la durée souvent brève des éruptions explosives. Se pose également le problème de la disparité des grandeurs que l'on compare. L'échantillonnage direct, par exemple depuis un avion, donne des concentrations par unité de volume (unités g/m^3), tandis que les mesures par satellite donnent des concentrations intégrées sur une colonne (unités g/m^2). Si les mesures de cendres par satellites manquent encore de validation, on peut citer par contre un cas, plutôt inquiétant, de « non-validation ». En 2000, un avion de recherche polaire de la NASA, équipé de détecteurs de gaz et de particules, est passé dans le panache éruptif émis quatre jours plus tôt par l'Hekla. Ses instruments ont détecté des concentrations significatives de cendres silicatées, et ses réacteurs ont subi quelques dégâts, *alors que les satellites ne détectaient plus de cendres dans le panache.*

Cette situation pourrait changer. En effet, grâce à la longue durée de l'éruption de l'Eyjafjöll et à son impact économique et médiatique, plusieurs équipes de recherches ont obtenu le temps et le budget pour faire des campagnes de mesures et d'échantillonnage in situ. Leurs résultats permettront sûrement des avancées significatives dans la validation des techniques satellites.

Simulations

En raison des problèmes rencontrés encore actuellement dans la détection des panaches de cendres volcaniques, le VAAC de Londres a préféré baser sa gestion de la crise sur des modèles informatiques du transport atmosphérique. Ces modèles décrivent la circulation des masses d'air autour des anticyclones et des dépressions. Leurs prévisions se sont considérablement améliorées ces dix dernières années, d'une part grâce aux progrès des ordinateurs sur lesquels les modèles tournent, et d'autre part grâce aux mesures par satellites (principalement IASI) qui les alimentent. Mais les résultats de ces modèles de transport dépendent fortement des paramètres initiaux qu'on leur injecte : la concentration initiale en cendres, la taille des particules et la hauteur d'injection. De plus, ces modèles ont du mal à prendre en compte la sédimentation des cendres et tendent à surestimer la concentration des cendres subsistant dans le panache après son transport.

Seuil de tolérance

Un dernier problème, d'ordre technologique, mérite tout notre intérêt : celui des seuils de tolérance des moteurs. Tous les incidents graves ayant affecté des avions se sont produits près du volcan, dans des panaches relativement jeunes (quelques heures après leur émission) et concentrés. En fait, on sait assez mal jusqu'à quelle concentration les cendres volcaniques présentent un danger pour les réacteurs d'avion. Les motoristes n'ont jamais pu (parce que les tests sont très difficiles et coûteux à mettre en œuvre) ou voulu (par crainte de poursuites légales en cas de crash) fournir des seuils de tolérance. De plus, la définition d'un tel seuil devrait idéalement prendre en compte la durée d'exposition au panache ainsi que le régime du moteur.

Un problème scientifique et sociétal

C'est donc cette combinaison d'incertitude scientifiques et techniques sur les mesures des cendres, les simulations de leur dispersion et les seuils de tolérance qui a ces dernières années dicté la politique d'éviter à tout prix les panaches de cendres quelles que soient leurs concentrations, et qui a débouché sur cette fermeture sans précédent de l'espace européen. Les mesures par satellites indiquaient des concentrations en cendres proches de la limite de détection, tandis que les simulations de transport indiquaient que le nuage stagnerait sur toute l'Europe. Dans l'optique d'éviter le moindre risque, et sur l'avis du VAAC de Londres, les autorités de régulation du trafic aérien ont donc interdit tout décollage ou survol. Répercutée et amplifiée par les médias, cette interdiction s'est transformée en psychose irrationnelle.

Je suis persuadé que si cette situation s'était produite avant l'avènement des satellites de dernière génération, ou en d'autres contrées du globe moins favorisées, une telle fermeture de l'espace aérien n'aurait pas été décidée. C'est une caractéristique des sociétés hyper-développées de ne pas tolérer le moindre risque, quitte à sombrer dans la paranoïa. Au bout de quelques jours d'interdiction de vol, les compagnies aériennes voyant leurs pertes financières se creuser ont entamé une fronde contre cette décision et ont fourni, sans que l'on sache d'où il sortait, un seuil de tolérance de 2mg de cendre par mètre cube d'air, suffisamment élevé pour leur permettre de voler à nouveau. Le business reprenait ses droits sur la peur...

L'éruption de l'Eyjafjöll souligne l'importance d'améliorer les techniques de mesures des cendres, notamment en combinant les mesures des différents satellites et en couplant en temps réel ces mesures avec les modèles de transport. Elle aura aussi permis de mettre en évidence les lacunes, dans notre capacité à quantifier la dangerosité des cendres pour les avions de ligne. Quand ces problèmes seront résolus, on pourra gérer la prochaine crise volcano-aérienne en toute rationalité, sur la base de mesures plus fiables, de modèles plus performants, et de critères d'évitement mieux établis.

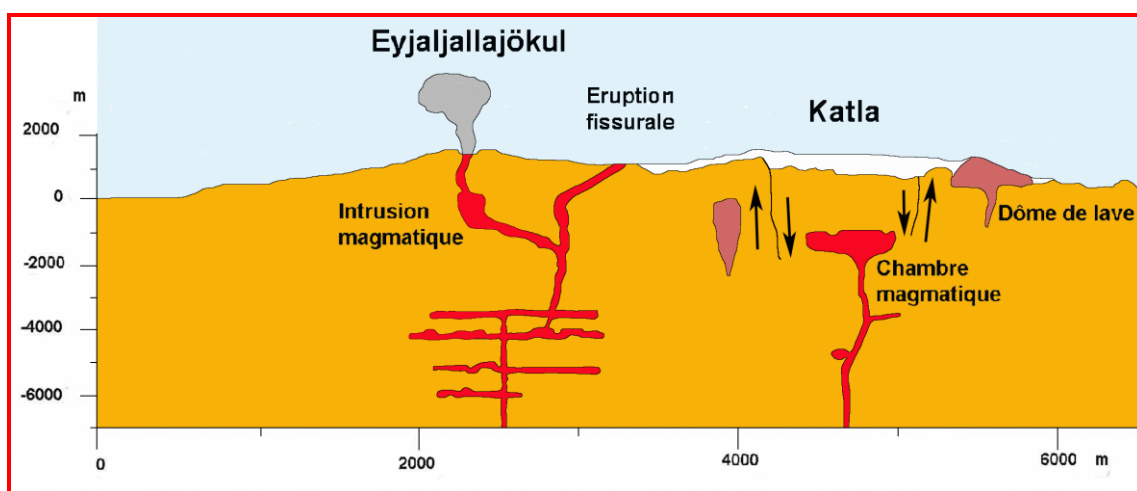


Fig. 8 – Coupe schématique montrant les intrusions magmatiques au niveau de la calotte glaciaire de l'Eyjafjöll