

# Caractérisation de la charge en cendres des panaches du volcan Sabancaya (Pérou) par radar à ondes millimétriques

Charlotte GÉLIBERT

(seconde bourse L.A.V.E. – 2019)

*Dans le cadre d'un stage de fin d'étude de six mois au laboratoire Magmas et Volcans à Clermont-Ferrand, j'ai eu l'opportunité de travailler sur les panaches volcaniques du volcan Sabancaya. Plus précisément, mon sujet de stage a porté sur la caractérisation de la charge en cendres de ses panaches grâce à un nouveau radar à ondes millimétriques.*

Les panaches volcaniques sont constitués d'un mélange très chaud de particules solides (pyroclastes) et d'air et représentent parfois un danger pour la santé humaine : les cendres fines peuvent pénétrer profondément dans les poumons et provoquer des problèmes respiratoires, mais également pour l'environnement, l'agriculture et le trafic aérien avec un arrêt des réacteurs.

Pour réduire les risques associés à cet aléa, des modèles de dispersion des cendres volcaniques tentent de prévoir la masse de dépôt et la concentration massique en suspension dans l'air au cours du temps.

Cependant, ces prévisions ne sont pas entièrement fiables car les paramètres d'entrée de ces modèles, tels que la concentration en cendres, le débit massique à l'événement, la distribution des tailles de particules (PSD) qui est le poids relatif de chaque classe granulométrique au sein du panache, ou bien la densité des particules sont encore mal contraints.

Une meilleure compréhension de ces phénomènes permettra, à terme, d'en réduire les risques associés.

## La charge en cendres des panaches

Mon stage avait pour but de caractériser la charge en cendres (concentrations), la dynamique (variations d'épaisseur et altitude des nuages) et la structure interne des panaches volcaniques du volcan Sabancaya, en lien avec la sédimentation (*fingers*, chute collective de cendres).

Ces paramètres sont nécessaires à l'initialisation des modèles de transport et de dépôt des cendres volcaniques ainsi qu'à la fiabilisation de leurs résultats afin de connaître et de réduire les risques associés à l'aléa volcanique.

Le couplage radar–disdromètre est très efficace dans le but de déterminer des concentrations en cendres à la source, à condition que le disdromètre soit déployé à proximité de l'événement afin d'échantillonner toutes les populations de cendres et particulièrement les plus grossières qui ont un impact très fort sur la réflectivité radar.

## Conférence – Bourse L.A.V.E.

Afin de communiquer les premiers résultats de ce stage, j'ai participé à la conférence de l'EGU (European Geosciences Union) qui a eu lieu du 8 au 12 avril 2019 à Vienne en Autriche. Cette participation, effectuée grâce à la bourse L.A.V.E., était sous forme d'un oral de deux minutes suivies d'un échange d'une heure et demie avec d'autres scientifiques.

Le principal objectif était de présenter les premiers résultats acquis au cours de mon stage, mais aussi d'assister à des conférences dans le but de développer mon esprit critique. Ma participation à cette conférence a été très formatrice car, en discutant de mon travail avec des chercheurs aguerris, elle m'a permis de saisir l'importance de mon travail et d'en visualiser de potentielles limites.

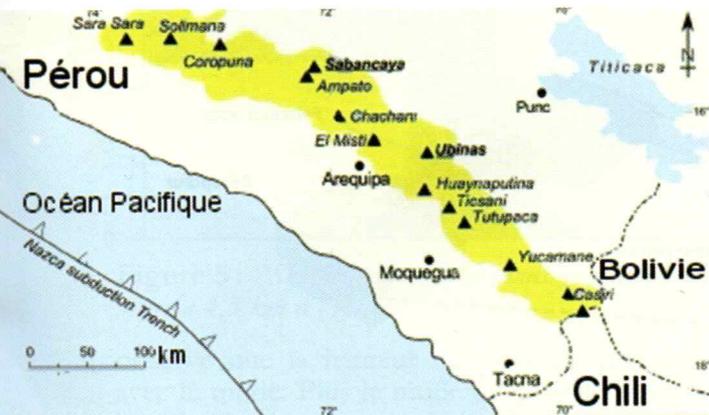
Dans un second temps, une partie de la bourse m'a permis d'effectuer des analyses morphologiques supplémentaires sur des cendres grâce au MorphograinSizer G3, disponible au laboratoire Magmas et Volcans. Une analyse statistique des paramètres de forme des cendres est essentielle pour déterminer leur vitesse de chute, corriger les données du disdromètre et mieux comprendre les phénomènes de sédimentation en masse. Ces analyses supplémentaires ont ainsi pu mieux contraindre la dynamique de sédimentation des panaches de cendres en lien avec les concentrations internes calculées grâce au radar.

## Le Nevado Sabancaya

Le Nevado Sabancaya est un volcan andésitique à dacitique localisé dans la zone volcanique centrale des Andes. Il s'agit du volcan le plus actif du sud du Pérou, l'activité éruptive depuis sa réactivation en 1988 est de type vulcanienne modérée et phréatomagmatique [Chorowicz *et al.*, 1992; Samaniego *et al.*, 2016; Self *et al.*, 1979; Moussalam *et al.*, 2017]. Les éruptions sont régulières à intervalle de 15 à 60 minutes et les panaches peuvent atteindre 5 km de hauteur [Thouret *et al.*, 1994; Gerbe et Thouret, 2004]. Durant la campagne de mai 2018, l'activité fut soutenue avec environ 900 éruptions détectées

dans le mois de mai et des hauteurs de panaches de plus de 4,3 km [Global Volcanism Program, OVI-INGEMMET].

**OVI-INGEMMET**: Observatoire volcanologique et centre de recherche et de surveillance des volcans actifs situés dans le sud du Pérou. Leur objectif est de déterminer la probabilité d'une éruption volcanique et d'évaluer les risques volcaniques grâce à une instrumentation sismique, géochimique, géodésique et visuelle à proximité des volcans.



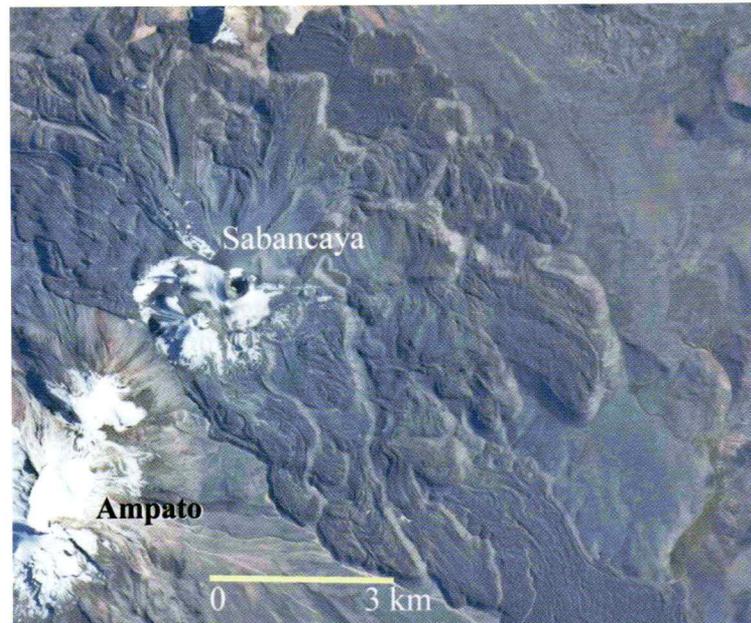
**Figure 1:** Carte de localisation du Nevado Sabancaya dans la zone volcanique centrale des Andes.

### Radar à ondes millimétriques

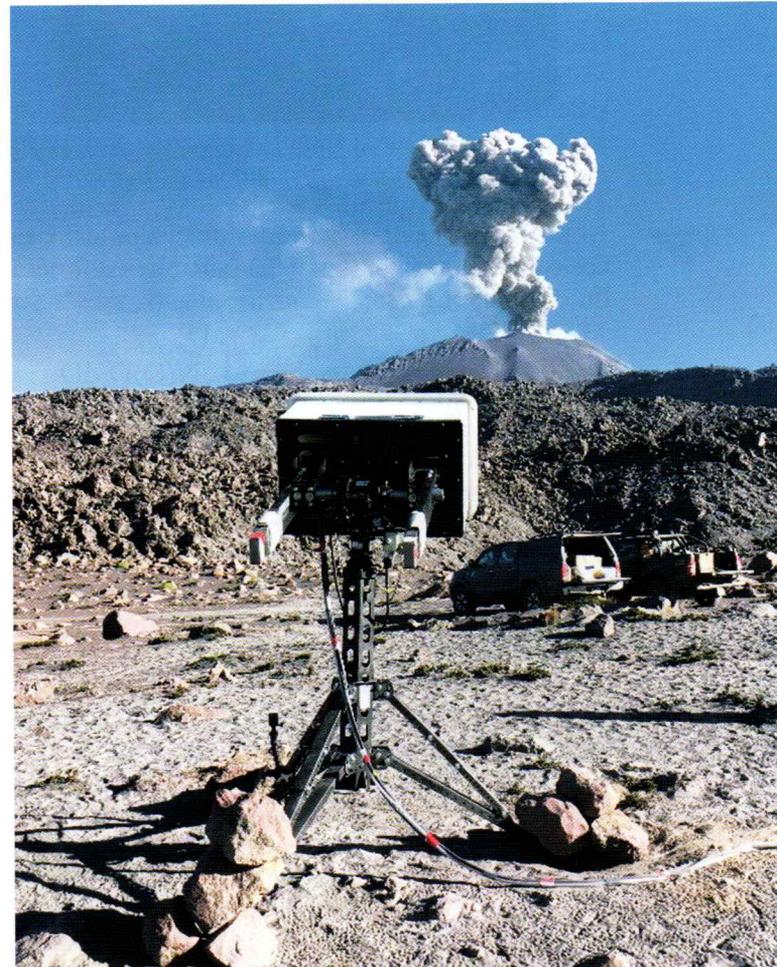
Le radar à ondes millimétriques est un outil de télédétection capable de sonder à distance les panaches. Il émet une onde électromagnétique continue modulée en fréquence qui est ensuite rétrodiffusée par les cibles dans toutes les directions. Le radar mesure des facteurs de réflectivité  $Z$ , c'est-à-dire la part d'énergie rétrodiffusée par les cibles dans sa direction. Ces facteurs sont associés à la quantité de cibles par unité de volume se trouvant dans l'axe du faisceau et leur unité est le dBZ (unité logarithmique). Les facteurs de réflectivité ne nous permettent pas directement de calculer des concentrations et des PSD. C'est pourquoi le radar a été couplé à l'utilisation d'un disdromètre optique.

### Disdromètre optique

Le disdromètre optique OTT Parsivel est d'abord un appareil dédié à la météorologie puisqu'il est utilisé pour mesurer les précipitations. En volcanologie, cet instrument permet de mesurer le nombre, la taille et la vitesse de chute des particules. Il est composé d'un émetteur (diode) émettant un laser vers un récepteur, qui convertit le signal lumineux en tension électrique. Lorsqu'une particule traverse le faisceau, le récepteur mesure une extinction partielle du signal et traite en temps réel l'amplitude ainsi que la durée de l'extinction qui nous donnent respectivement accès à la taille et vitesse de

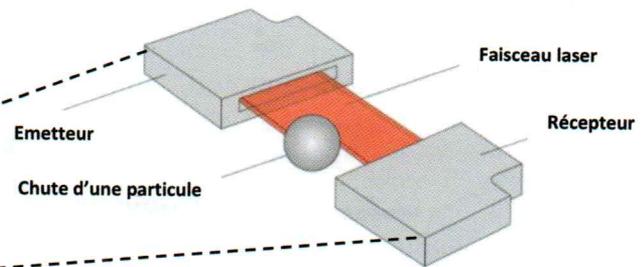


**Figure 2:** Les volcans Nevado Sabancaya et Ampato. Image prise le 15 mai 2010 par la mission 24 de la station spatiale internationale. Image © Earth Science and Remote Sensing Unit, NASA Johnson Space Center.



**Figure 3:** Photo d'un panache volcanique du volcan Sabancaya sondé par le radar à ondes millimétriques (VOLDORAD-3). Image © Franck Donnadiou.

chute des particules. Le disdromètre permet donc d'obtenir la PSD en un point géographique, des concentrations et des facteurs de réflectivité. La loi empirique reliant ces deux derniers est ce qui va nous permettre de calculer des concentrations à l'intérieur des panaches et nuages de cendres. Même si des ajustements doivent encore être réalisés afin de quantifier au mieux les paramètres à la source, le couplage radar-disdromètre est efficace et son déploiement pour de futures campagnes de mesures serait adéquat.



**Figure 4 :** Photo d'un panache volcanique du volcan Sabancaya et disdromètre en premier plan. Principe fonctionnel du disdromètre. Image © Franck Donnadieu.

La formule permettant de calculer des concentrations  $C_{ash}$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) à partir des données du disdromètre est :

$$C_{ash} = \frac{M_{tot}}{v(D)S\Delta t} = \frac{\pi \rho_{ash}}{6} \int_{D_{min}}^{D_{max}} N(D) D^3 dD$$

avec :

$M_{tot}$  la masse totale (kg),  
 $v(D)$  la vitesse de chute des particules (m/s),  
 $S$  l'aire du faisceau laser ( $\text{m}^2$ ),  
 $\Delta t$  la durée d'acquisition (5 s),  
 $\rho_{ash}$  la densité des cendres,  
 $D$  le diamètre (m),  
 $dD$  le milieu de la classe de taille étudiée (m),  
 $N(D)$  la densité numérique de particules par classe de taille ( $\text{m}^{-3} \text{m}^{-1}$ ).

Et celle permettant de calculer des facteurs de réflectivité  $Z$  ( $\text{mm}^{60} \text{m}^{-3}$ ) :

$$Z = \int_{D_{min}}^{D_{max}} N(D) D^6 dD$$

Pour exprimer les facteurs en unité logarithmique, on effectue l'opération  $10 \log_{10}(Z)$ . Ces calculs permettent ainsi d'établir une loi empirique entre les  $Z$  et les concentrations qui prend

la forme suivante (avec  $a$  et  $b$  des constantes) :

$$C_{ash} = a \times Z_{ash}^b$$

Et qui pourra alors être appliquée aux réflectivités radar afin d'estimer des concentrations à l'intérieur des panaches.

Des échantillons ont également été collectés autour du volcan et analysés en laboratoire dans le but de déterminer la PSD et la densité moyennes des produits émis par le Nevado Sabancaya. Ces deux paramètres sont essentiels à l'initiation des modèles de dispersion des cendres.

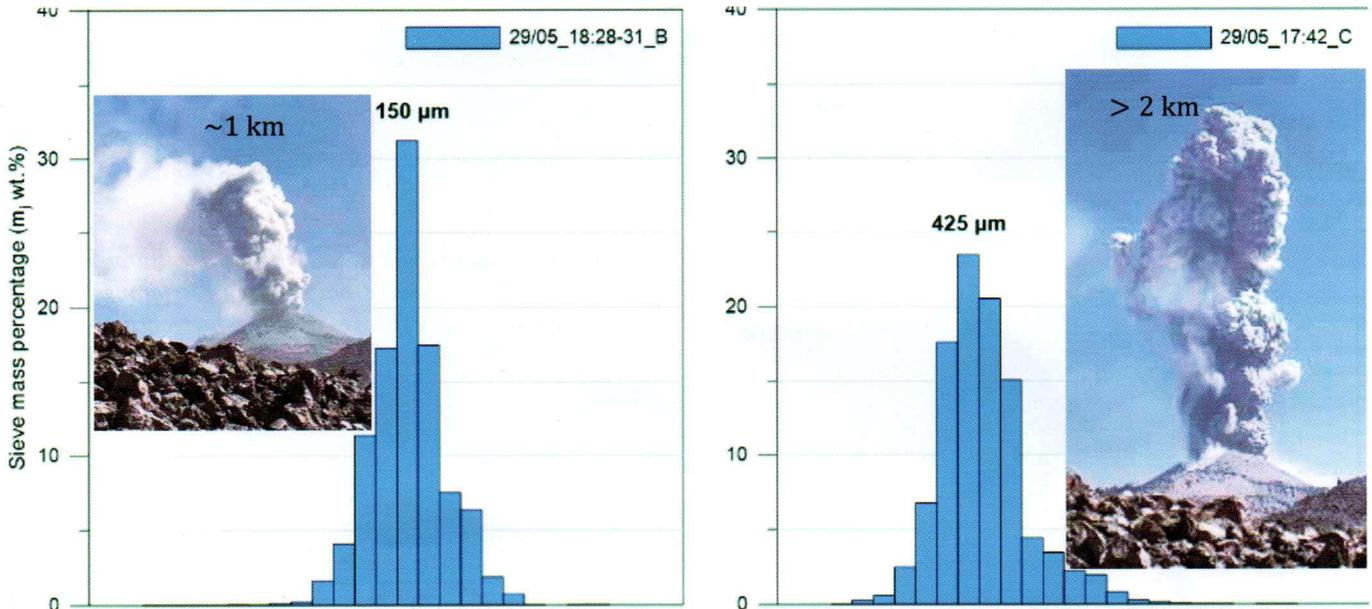
Afin de mieux caractériser la morphologie des cendres collectées et effectuer d'éventuelles corrections sur les données du disdromètre ne mesurant que la dimension horizontale des particules orthogonale à l'axe du faisceau, des analyses morphologiques ont été réalisées sur deux échantillons grâce au MorphologiG3.

Il s'agit d'un analyseur optique utilisé pour l'étude des tailles et des formes des particules en calculant plusieurs paramètres morphologiques tels que la circularité qui est le périmètre circulaire équivalent de la particule divisé par le périmètre de la particule.

### Résultats

Le tamisage des échantillons fournit des PSD qui ont le plus souvent une forme en cloche ce qui signifie qu'une classe granulométrique est prépondérante par rapport aux autres. Cette classe est appelée le mode et il peut nous renseigner sur la dynamique des éruptions du Sabancaya.

Ce volcan émet des panaches plus ou moins chargés en cendres, avec des modes variant entre  $150 \mu\text{m}$  (fin) et  $425 \mu\text{m}$  (gros). La charge des panaches peut être mise en lien avec la hauteur maximale qu'ils atteignent. Il est fréquemment



**Figure 5:** PSD déterminées par tamisage manuel de deux échantillons de retombées collectés à proximité du disdromètre à 4,5 km à l'Est de l'évent.

observé que la hauteur de panache augmente avec le mode. Plus le mode est grossier, plus la hauteur maximale atteinte par le panache est élevée.

Les analyses morphologiques ont révélé que plus de 90 % des cendres du Sabancaya avait une circularité moyenne supérieure à 0,9 (une valeur de 1 étant un cercle parfait). Ensuite, l'étude du diamètre circulaire équivalent (diamètre d'un cercle d'aire équivalente à la particule) moyen en fonction de la longueur moyenne et de la largeur moyenne permet de corriger statistiquement les tailles observées au disdromètre pour des particules non axisymétriques suivant l'axe vertical. C'est le cas des particules volcaniques qui présentent souvent un allongement par rapport aux gouttes de pluie axisymétriques. Par ailleurs, la densité des cendres issues des éruptions du Sabancaya montre des valeurs entre 2,5 et 2,7 avec une moyenne à 2,6. Cette valeur moyenne est cohérente avec la densité attendue pour un magma andésitique à dacitique.

À partir des mesures par disdromètre du nombre, de la taille et des vitesses de chute des particules, il a été possible d'extraire des facteurs de réflectivité et des concentrations en cendres. La figure 6 présente les concentrations en cendres en fonction des facteurs de réflectivité ainsi que les histogrammes des facteurs de réflectivité dérivés des données du disdromètre et du radar. La concentration en cendres, calculée avec les données granulométriques à 4,5 km de l'évent, peut varier de plusieurs ordres de grandeur avec les facteurs de réflectivité.

Un point important concernant les histogrammes est que celui des Z dérivés du disdro-

mètre chevauche celui des Z mesurés dans les retombées, mais peu celui des Z mesurés à la source.

Cette observation indique que les populations de cendres échantillonnées par le disdromètre ne représentent pas entièrement celles présentes dans les volumes sondés par le radar à la source. Enfin, les concentrations en cendres varient de  $1,9 \times 10^{-6}$  à  $2,2 \times 10^{-4}$   $\text{kg m}^{-3}$ . Ainsi, la loi empirique reliant les concentrations aux facteurs de réflectivité dérivée des données du disdromètre s'écrit sous la forme :

$$C_{\text{ash}} = 1,84 \times 10^{-5} \times Z_{\text{ash}}^{0,7561}$$

Étant donné que les populations de cendres échantillonnées par le disdromètre ne sont pas identiques à celles vues par le radar à la source, cette loi ne peut être utilisée directement sur les panaches. En revanche, elle est applicable aux nuages de cendres et retombées localisés à 4,5 km de la source.

Les concentrations en cendres d'un nuage passant à l'aplomb du radar en fonction du temps sont présentées en figures 7 et 8. Il est figuré les concentrations calculées à partir des réflectivités moyennes (vert) et maximales (rouge) et l'épaisseur du nuage (trait gris).

Bien que le début du passage du nuage à l'aplomb du radar ne soit pas capturé, la concentration n'est pas strictement décroissante en fonction du temps. Elle présente des pics.

Dans ce cas-ci, il est même observable que les Z ne sont pas homogènes dans le nuage et sont maximaux en son centre. Le nuage se trouve à environ un kilomètre au-dessus du sommet du Sabancaya et il est possible de corréler l'évolu-

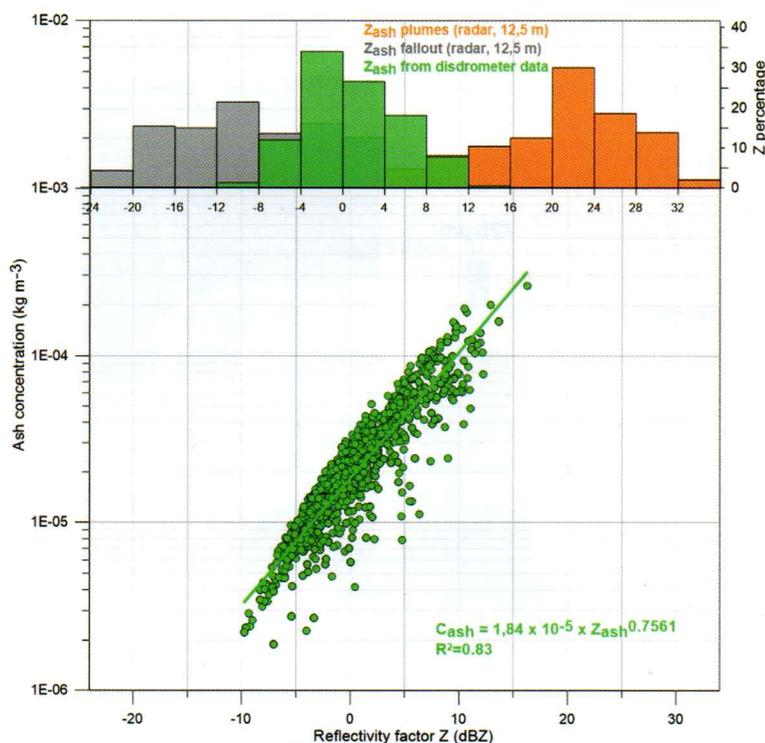
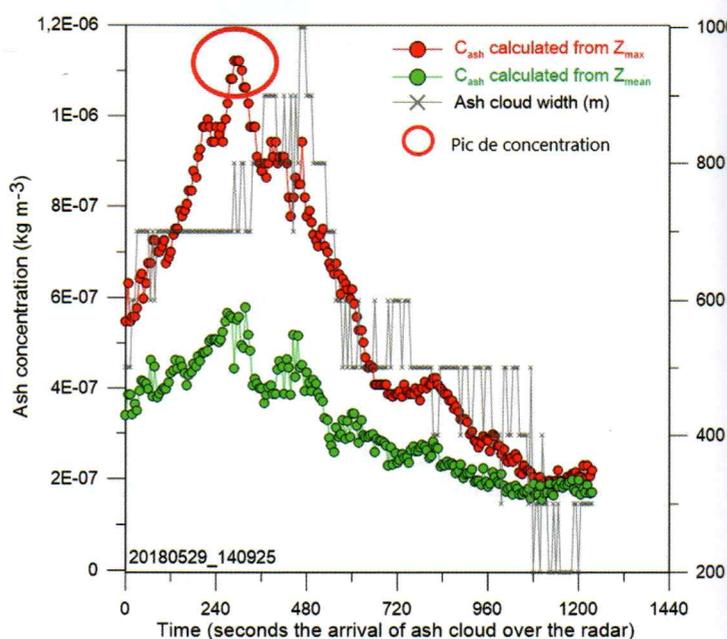


Figure 6: Histogrammes des Z dérivés du disdromètre (vert) et des données radar sur les panaches (orange) et retombées (gris). Concentration en cendres en fonction des Z dérivés du disdromètre et loi empirique reliant ces deux paramètres.

Figure 7: Évolution des concentrations en cendres et de l'épaisseur d'un nuage vu en visée fixe à 90° d'élévation (le radar regarde au-dessus de lui).



tion de l'épaisseur du nuage avec la concentration. Lorsque la concentration est maximale, le nuage atteint son épaisseur maximale quelques secondes après. Lorsque la concentration diminue, l'épaisseur du nuage diminue également.

Les données radar donnent également accès à la structure interne des panaches et nuages de cendres puisqu'il est aisé d'en déduire l'épaisseur et d'observer ses variations puisque la résolution spatiale est de 100 m.

Connaître les variations d'épaisseur est crucial dans le calcul de la perte en masse par sédimentation au cours du temps et dans l'analyse des processus dynamiques régnant au sein du nuage.

Un point intéressant concerne les phénomènes de chute collective de cendres incluant les

*fingers*. Les *fingers* sont des instabilités gravitaires déclenchées par l'accumulation de particules en base de nuage.

Le niveau de particules devient alors plus dense que l'atmosphère environnante, créant une instabilité gravitaire qui se propage en direction du sol avec une vitesse de chute supérieure à celle de particules individuelles [Manzella *et al.*, 2015]. Cela dit, leur origine ainsi que la nature de leur déclenchement restent incertaines. Or, la fiabilisation des résultats des modèles de dispersion et de sédimentation des cendres dépend fortement de notre compréhension de ces phénomènes. Les données radar des nuages de cendres issues d'acquisition scannant à 10-15° de la verticale sont très riches et permettent d'observer des *fingers*. □

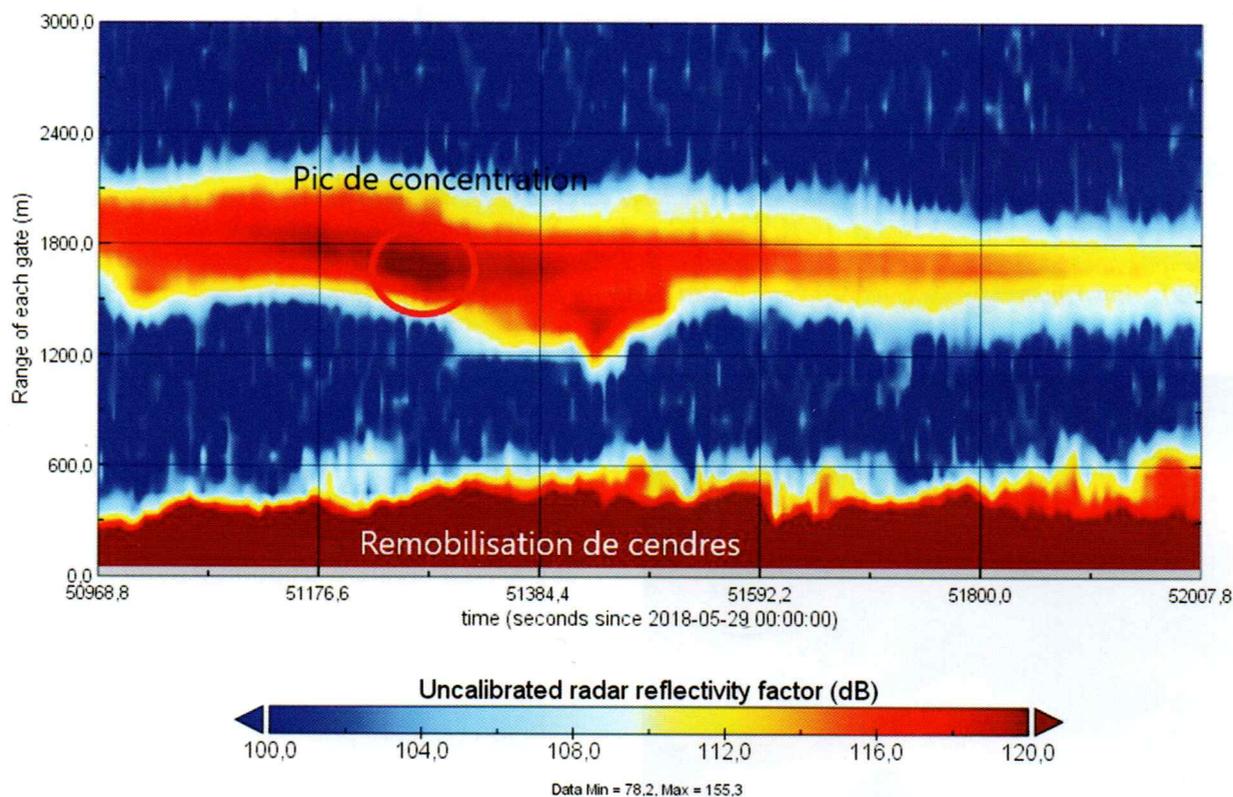


Figure 8 : Facteurs de réflectivité Z non calibrés en fonction du temps (s).

### Orientation bibliographique

- Chorowicz J., B. Deffontaines, D. Huaman-Rodrigo, R. Guillande, F. Leguern & J.-C. Thouret. «SPOT Satellite Monitoring of the Eruption of Nevado Sabancaya Volcano (Southern Peru)». *Remote Sensing of Environment* 42, n° 1 (octobre 1992), pp. 43-49.
- Gerbe Marie-Christine & Jean-Claude Thouret. «Role of Magma Mixing in the Petrogenesis of Tephra Erupted during the 1990–98 Explosive Activity of Nevado Sabancaya, Southern Peru». *Bulletin of Volcanology* 66, n° 6 (août 2004), pp. 541-561.
- Global Volcanism Program, 2013. Sabancaya (354006) in *Volcanoes of the World*, v 4.7.7. Venzke, E (ed.). Smithsonian Institution. Downloaded 11 May 2019 (<http://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=354006>).
- Manzella I., Bonadonna C., Phillips J. C., & Monnard H. (2015). The role of gravitational instabilities in deposition of volcanic ash. *Geology*, 43(3), pp. 211-214.
- Moussallam, Yves, Giancarlo Tamburello, Nial Peters, Fredy Apaza, C. Ian Schipper, Aaron Curtis, Alessandro Aiuppa, et al. «Volcanic Gas Emissions and Degassing Dynamics at Ubinas and Sabancaya Volcanoes; Implications for the Volatile Budget of the Central Volcanic Zone». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 343 (septembre 2017), pp. 181-191.
- Samaniego Pablo, Marco Rivera, Jersy Mariño, Hervé Guillou, Céline Liorzou, Swann Zerathe, Rosmery Delgado, Patricio Valderrama & Vincent Scao. «The Eruptive Chronology of the Ampato–Sabancaya Volcanic Complex (Southern Peru)». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 323 (septembre 2016), pp. 110-128.
- Self Stephen, Lionel Wilson & Ian A. Nairn. «Vulcanian eruption mechanisms». *Nature* 277, n° 5696 (1<sup>er</sup> février 1979), pp. 440-443.
- Thouret Jean-Claude, Guillande Richard, Huaman D, Gourgaud Alan, Salas G., & Chorowicz J. (1994). L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (sud Pérou); reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 165 (1), pp.49-63.