

Sujet de thèse de doctorat

Titre : Étude du rayonnement acoustique de jets émis par des éruptions volcaniques pliniennes

Encadrement : Roberto Sabatini (Prof. Junior à l'École Centrale de Lyon, roberto.sabatini@ec-lyon.fr)
Christophe Bogey (Directeur de recherche au CNRS, christophe.bogey@ec-lyon.fr)

Lieu : Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA),
École Centrale de Lyon, 69134 Écully Cedex, France

Contexte

Les éruptions pliniennes sont des éruptions volcaniques explosives qui se manifestent par l'éjection continue à haute vitesse ($150 - 600 \text{ m.s}^{-1}$) et haute température ($\sim 1000^\circ\text{C}$) de fragments de roche solides, connus sous le nom de pyroclastes, ainsi que de gaz tels que la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et le dioxyde de soufre [1]. La partie inférieure de la colonne éruptive ressemble à un jet issu d'un moteur d'avion (cf. figure 1) et génère un bruit d'origine aérodynamique [2–5]. En raison de leur large diamètre ($\sim 100 \text{ m}$), ces jets volcaniques émettent des ondes acoustiques avec des fréquences typiquement inférieures au seuil auditif humain ($< 20 \text{ Hz}$). Ces ondes, désignées sous le nom d'infrasons, peuvent parcourir des centaines de kilomètres dans l'atmosphère en transportant d'importantes informations sur leur source [6–10]. Par conséquent, l'un des principaux objectifs de la recherche en acoustique des volcans est d'établir la corrélation entre certaines caractéristiques des éruptions volcaniques, telles que la vitesse d'éjection ou le débit massique, et le spectre des signaux de pression mesurés à grande distance [2–5]. Ainsi, la compréhension des phénomènes d'émission acoustique par les jets volcaniques est essentielle pour améliorer notre capacité à interpréter ces enregistrements infrasonores [5].

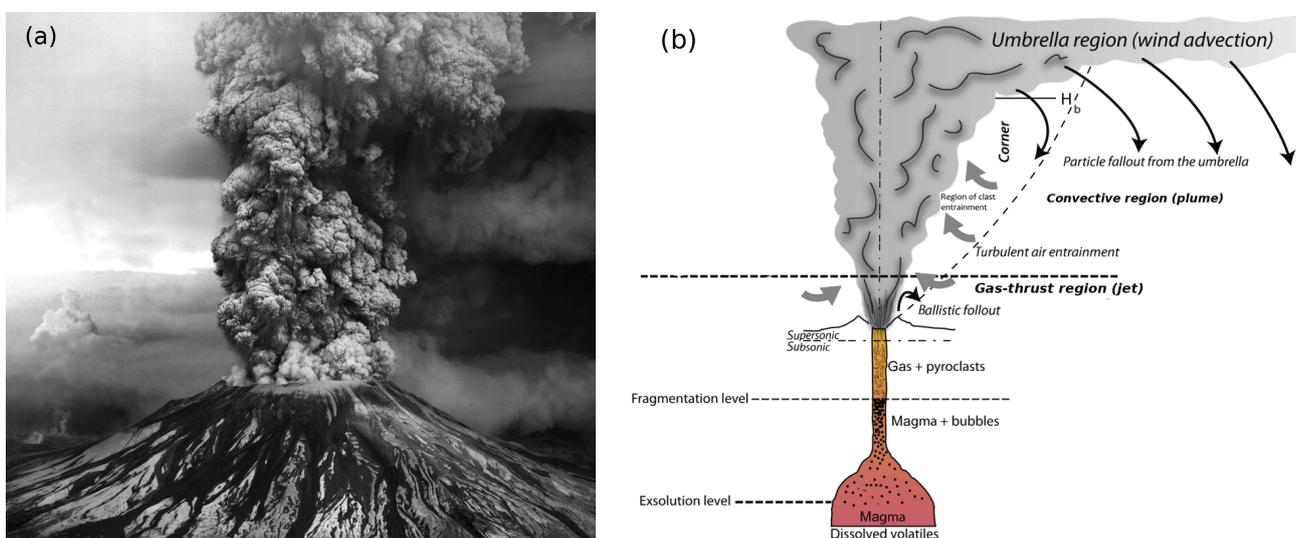


FIGURE 1 – (a) Éruption du Mont Saint Helens (États-Unis) en 1980. (b) Schéma d'une éruption plinienne.

Étude proposée

Un jet volcanique est un écoulement multiphasique, généralement constitué d'une phase gazeuse (composée d'un mélange de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone et de dioxyde de soufre) et d'une phase solide (les pyroclastes). Ces deux phases ne sont pas nécessairement en équilibre mécanique et thermique entre elles [11]. Cependant, dans de nombreuses études sur les jets volcaniques, on suppose que les gaz et les pyroclastes ont la même vitesse et la même température [12–14]. Cette hypothèse est justifiée pour les éruptions pliniennes typiques. Dans ce cas, le jet volcanique peut être vu comme un *pseudo-gaz*, possédant des propriétés thermodynamiques intermédiaires entre les deux phases, qui débouche dans l'air [12–14]. La dynamique du jet et la

génération du bruit peuvent alors être décrites par les équations de Navier-Stokes pour un mélange de deux gaz, à savoir le pseudo-gaz mentionné ci-dessus et l'atmosphère.

L'objectif de la thèse proposée est d'étudier le rayonnement acoustique de jets issus d'éruptions volcaniques de type plinien. Pour ce faire, des simulations des grandes échelles tridimensionnelles seront réalisées en résolvant les équations de Navier-Stokes à l'aide de schémas aux différences finies d'ordre élevé [15]. Ces simulations seront menées sur des maillages contenant plusieurs centaines de millions de points, ce qui permettra d'obtenir simultanément l'évolution de l'écoulement et son rayonnement acoustique. Cette approche directe de calcul du bruit d'origine aérodynamique a été développée au Centre Acoustique du LMFA et a déjà été appliquée avec succès à des jets d'air subsoniques et supersoniques [16-20]. Une illustration des résultats obtenus est présentée sur la figure 2, et des exemples supplémentaires sont disponibles sur le site web de l'équipe de recherche du Centre Acoustique à l'adresse <https://acoustique.ec-lyon.fr/caaweb.php>. Par ailleurs, les simulations des grandes échelles seront effectuées sur des clusters de CPU et de GPU (Graphics Processing Units) par un code écrit en langage C/C++/CUDA.

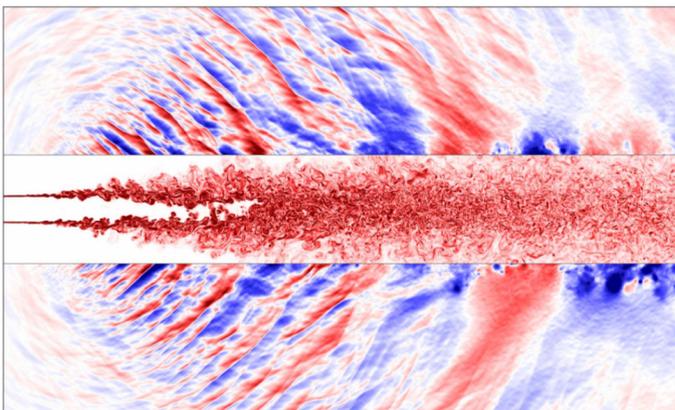


Figure 2 : Simulation d'un jet d'air à Mach 2 : champ de vorticité dans le jet et fluctuations de pression à l'extérieur (thèse de P. Pineau, LMFA, 2018).

Dans le cadre de la thèse, il s'agira tout d'abord de valider l'approche numérique à l'aide de cas test monodimensionnels et bidimensionnels [21]. Le rayonnement acoustique des jets volcaniques sera ensuite étudié pour différentes conditions d'éjection en termes de vitesse, pression, température et composition du gaz éjecté. Des comparaisons seront enfin réalisées entre résultats numériques et données enregistrées lors de récentes éruptions explosives [2,4].

Références

- [1] R. Cioni, M. Pistolesi, & M. Rosi, "Chapter 29 : Plinian and Subplinian Eruptions," dans *The Encyclopedia of Volcanoes*, Academic Press, 2015.
- [2] R. S. Matoza, D. Fee, M. A. Garcés, J. M. Seiner, P. A. Ramón & M. A. H. Hedlin, "Infrasonic jet noise from volcanic eruptions," *Geophysical Research Letters*, **36**, L08303, 2009.
- [3] R. S. Matoza, D. Fee, T. B. Neilsen, K. L. Gee & D. E. Ogden, "Aeroacoustics of volcanic jets : Acoustic power estimation and jet velocity dependence," *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, **118**, 6269-6284, 2013.
- [4] D. Fee, R. S. Matoza, K. L. Gee, T. B. Neilsen, & D. E. Ogden,, "Infrasonic crackle and supersonic jet noise from the eruption of Nabro Volcano, Eritrea," *Geophysical Research Letters*, **40**, 4199-4203, 2013.
- [5] L. M. Watson, E. M. Dunham, D. Mohaddes, J. Labahn, T. Jaravel & M. Ihme, "Infrasound Radiation from Impulsive Volcanic Eruptions : Nonlinear Aeroacoustic 2D Simulations," *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, **126** (9), 1-28, 2021.
- [6] R. Sabatini, O. Marsden, C. Bailly & C. Bogey, "A numerical study of nonlinear infrasound propagation in a windy atmosphere," *The Journal of the Acoustic Society of America*, **140**(1), 641-656, 2016.

- [7] R. Sabatini, C. Bailly, O. Marsden & O. Gainville, "Characterization of absorption and nonlinear effects in infrasound propagation using an augmented Burgers' equation," *Geophysical Journal International*, **207**, 1432-1445, 2016.
- [8] R. Sabatini, O. Marsden, C. Bailly & O. Gainville, "Three-dimensional direct numerical simulation of infrasound propagation in the Earth's atmosphere," *Journal of Fluid Mechanics*, **859**, 754-789, 2019.
- [9] R. Sabatini, J. B. Snively, C. Bailly, M. P. Hickey & J. L. Garrison, "Numerical modeling of the propagation of infrasonic acoustic waves through the turbulent field generated by the breaking of mountain gravity waves," *Geophysical Research Letters*, **46**, 5526-5534, 2019.
- [10] R. Sabatini, J. B. Snively, M. P. Hickey & J. L. Garrison, "An analysis of the atmospheric propagation of underground-explosion-generated infrasonic waves based on the equations of fluid dynamics : ground recordings," *The Journal of the Acoustic Society of America*, **146**, 4576-4591, 2019.
- [11] M. Cerminara, T. E. Ongaro & L. C. Berselli, "ASHEE-1.0 : a compressible, equilibrium-Eulerian model for volcanic ash plumes," *Geoscientific Model Development*, **9**, 697-730, 2016.
- [12] Y. J. Suzuki, T. Koyaguchi, M. Ogawa & I. Hachisu, "A numerical study of turbulent mixing in eruption clouds using a three-dimensional fluid dynamics model," *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, **110**, B08201, 2005.
- [13] Y. J. Suzuki & T. Koyaguchi, "A three-dimensional numerical simulation of spreading umbrella clouds," *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, **114**, B03209, 1-18, 2009.
- [14] Y. J. Suzuki, A. Costa, M. Cerminara, T. Esposti Ongaro, M. Herzog, A. R. Van Eaton, L. C. Denby, "Inter-comparison of three-dimensional models of volcanic plumes," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **326**, 26-42, 2016.
- [15] C. Bogey & C. Bailly, "A family of low dispersive and low dissipative explicit schemes for flow and noise computations," *Journal Computational Physics*, **194**(1), 194-214, 2004.
- [16] C. Bogey, O. Marsden & C. Bailly, "Large-Eddy Simulation of the flow and acoustic fields of a Reynolds number 10^5 subsonic jet with tripped exit boundary layers," *Physics of Fluids*, **23**, 035104, 1-20, 2011.
- [17] C. Bogey & R. Sabatini, "Effects of nozzle-exit boundary-layer profile on the initial shear-layer instability, flow field and noise of subsonic jets," *Journal of Fluid Mechanics*, **876**, 288-325, 2019.
- [18] C. Bogey, "Acoustic tones in the near-nozzle region of jets : characteristics and variations between Mach numbers 0.5 and 2," *Journal of Fluid Mechanics*, **931**, A3, 1-41, 2021.
- [19] C. Bogey & R. Gojon, "Feedback loop and upwind-propagating waves in ideally expanded supersonic impinging round jets," *Journal of Fluid Mechanics*, **823**, 562-591, 2017.
- [20] M. Varé & C. Bogey, "Generation of acoustic tones in round jets at a Mach number of 0.9 impinging on a plate with and without a hole," *Journal of Fluid Mechanics*, **936**, A16, 1-32, 2022.
- [21] M. Capuano, C. Bogey & P. D. M. Spelt, "Simulations of viscous and compressible gas-gas flows using high-order finite difference schemes," *Journal of Computational Physics*, **361**, 56-81, 2018.

La liste complète des publications de l'équipe de recherche du Centre Acoustique est disponible à l'adresse : https://acoustique.ec-lyon.fr/publication_fr.php.