Soutenance de thèse CNRM

lundi 23 novembre 2026 à 14h

Caractérisation du dioxyde de soufre volcanique dans l'atmosphère par la synergie d'observations satellitaires

par Mickaël BACLES (CNRM/GMGEC/COMPO)

au CIC

Lien visio: https://meteo.webex.com/meteo-fr/j.php?MTID=m43c91eac1d7b8aed2992820a8d7aad50

Composition du jury:

Rapporteur.es: Gaëlle DUFOUR, Nicolas THEYS
Examinateur.ices: Valérie THOURET, Marie BOICHU, Jérôme VIDOT
Directeur de thèse: Vincent GUIDARD

Résumé en français

Les éruptions volcaniques injectent dans l'atmosphère de grandes quantités de gaz et de particules susceptibles d'avoir des impacts sanitaires, environnementaux, climatiques et socio-économiques. Parmi les composés émis, le dioxyde de soufre (SO_2) représente un enjeu particulier pour l'aviation: sa présence dans l'atmosphère, ainsi que sa transformation en aérosols sulfatés, peuvent endommager les aéronefs et dégrader la qualité de l'air en cabine. La localisation horizontale et verticale, ainsi que l'évolution de ces panaches, sont donc des informations essentielles que les prévisionnistes des VAAC (Volcanic Ash Advisory Centre) doivent pouvoir déterminer. Des modèles de chimie-transport, comme MOCAGE (MOdèle de Chimie Atmospérique à Grande Échelle), permettent de simuler l'évolution de ces panaches. Cependant, afin de représenter correctement les panaches, des paramètres difficilement estimables en temps réel sont nécessaires, tels que l'altitude d'injection, la durée des émissions ou encore la quantité de SO_2 injectée.

Cette thèse s'inscrit dans ce contexte et vise à caractériser les panaches de SO_2 volcanique dans le modèle MOCAGE en exploitant la synergie des observations satellitaires. Deux approches complémentaires sont étudiées. La première repose sur l'assimilation d'observations satellitaires, ce qui permet de corriger le modèle. La seconde vise à reconstruire les émissions volcaniques à partir des observations.

L'assimilation d'observations de colonnes totales en SO_2, sans information d'altitude, a d'abord été testée sur le cas de l'éruption de La Soufrière Saint Vincent, démontrant l'apport de l'assimilation conjointe de IASI (Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge) et de TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument). Une méthode a ensuite été développée afin de prendre en compte l'altitude du panache, diagnostiquée par les instruments IASI et TROPOMI Layer Height, lors de l'assimilation. Avant de les assimiler, un traitement a été développé et appliqué à certaines de ces observations. L'assimilation de ces observations, en considérant leur altitude, améliore la représentation des panaches, notamment leur forme et leur intensité. Cependant, cette méthode repose sur l'hypothèse d'un panache mono-couche et est sensible aux limitations propres à chacun des instruments.

La seconde approche consiste à reconstruire les émissions volcaniques à partir des observations TROPOMI. Les émissions sont découpées en sources élémentaires, réparties dans le temps et selon l'altitude. Leur intensité est estimée par combinaison linéaire d'un ensemble de simulations, contrainte par les observations. Appliquée aux éruptions du Hayli Gubbi et de l'Etna, cette méthode permet de simuler le panache plus tôt que l'assimilation, le SO_2 étant injecté dans le modèle avant le premier passage satellite. Cependant, le panache ainsi obtenu

peut être trop étendu spatialement, notamment lorsque certaines sources sont considérées comme entièrement actives alors qu'elles ne le sont que partiellement. De plus, l'intensité des panaches modélisés est généralement sous-estimée avec cette approche.

Une expérience combinant les deux approches a également été menée afin de corriger les limites de la reconstruction seule. Les observations IASI sont assimilées, selon la méthode développée pour prendre en compte l'altitude du panache, à partir d'une simulation initialisée avec les émissions reconstruites. Cette combinaison permet d'obtenir des colonnes totales plus proches des observations, en particulier lors de la première assimilation. Cependant, les structures du panache issues de la reconstruction et non confirmées par les observations ne sont pas corrigées par l'assimilation, celle-ci n'agissant que là où des observations sont disponibles. Le panache modélisé reste donc parfois trop étendu, bien que plus intense là où il est effectivement observé.

****

Abstract

Volcanic eruptions inject large quantities of gas and particles into the atmosphere that can have health, environmental, climatic, and socio-economic impacts. Among the emitted compounds, sulfur dioxide (SO_2) poses a particular challenge for aviation: its presence in the atmosphere, as well as its conversion into sulfate aerosols, can damage aircraft and degrade cabin air quality. Consequently, the horizontal and vertical locations, as well as the evolution of these plumes, are essential information that the VAAC (Volcanic Ash Advisory Centre) forecasters must be able to determine. Chemical-transport models, such as MOCAGE (MOdèle de Chimie Atmospérique à Grande Échelle), enable simulation of plume evolution. However, accurately representing these plumes requires parameters that are difficult to estimate in real time, such as injection altitude, emission duration, and the quantity of SO_2 injected.

This thesis addresses this context and aims to characterize volcanic SO_2 plumes within the MOCAGE model by taking advantage of the synergy of satellite observations. Two complementary approaches are investigated. The first relies on the assimilation of satellite observations to correct the model, while the second aims to reconstruct volcanic emissions from the observations.

The assimilation of SO_2 total column observations, without altitude information, was first tested during the La Soufrière Saint Vincent eruption, demonstrating the benefits of the joint assimilation of the IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) and TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) data. Subsequently, a method is developed to account for plume altitude, diagnosed by the IASI and TROPOMI Layer Height products, during the assimilation process. A specific processing step is developed and applied to some of these observations before being assimilated. Assimilating these observations by accounting for their altitude improves the representation of the plumes, particularly regarding their shape and intensity. However, this method relies on the assumption of a single-layer plume and is sensitive to the inherent limitations of each instrument.

The second approach involves reconstructing volcanic emissions from TROPOMI observations. The emissions are broken down into elementary sources distributed in time and altitude. Their intensity is estimated through a linear combination of an ensemble of simulations, constrained by the observations. When applied to the Hayli Gubbi and Etna eruptions, this method allows the plume to be simulated earlier than with data assimilation, as the SO_2 is injected into the model before the first satellite overpass. However, the resulting plume may be spatially too extended, particularly when certain sources are treated as fully active, despite being only partially so. Furthermore, the intensity of the modelled plumes is generally underestimated with this approach.

An experiment combining both approaches is also conducted to address the limitations of reconstruction alone. IASI observations are assimilated using a method designed to account for plume altitude, based on a simulation initialized with the reconstructed emissions. This combination yields total columns that align more closely with observations, particularly during the first assimilation. However, plume structures resulting from the reconstruction that are not corroborated by observations remain uncorrected by the assimilation process, as the latter operates only where observations are available. Consequently, the modelled plume sometimes remains overly extensive, although it is more intense in areas where it is actually observed.