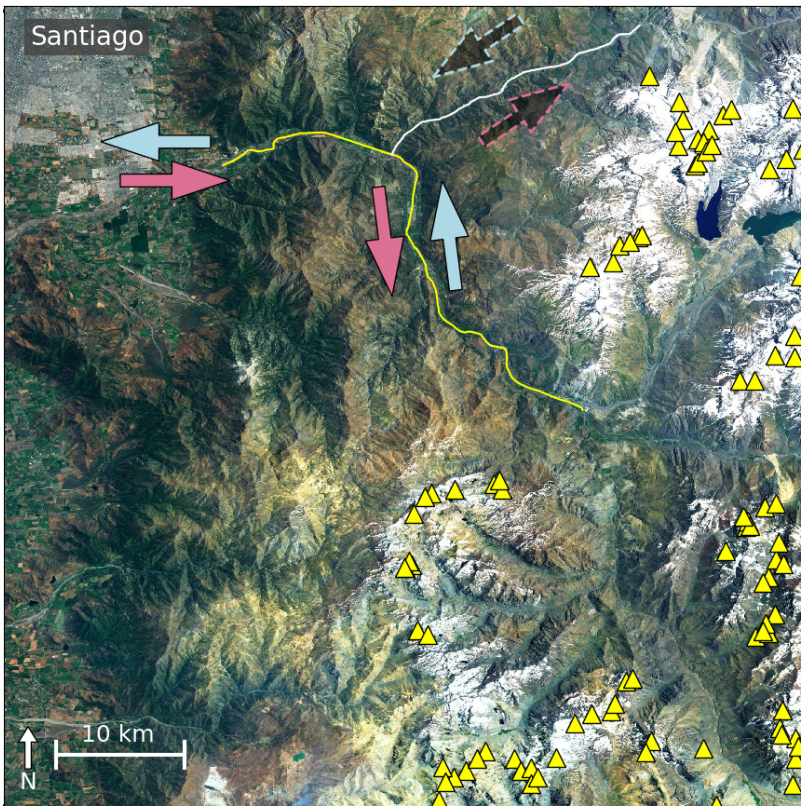
NETDESA: Emissions, transport et dépôts d'aérosols en conditions extrêmes de stagnation dans les régions anthropisées et à fort relief.

Laurent MENUT, Bertrand BESSAGNET, Rémy LAPERE,
Sylvain MAILLER, Solène TURQUETY

Laboratoire de Météorologie Dynamique,
Ecole Polytechnique, Palaiseau.

Rapport final du contrat 2018 60 0074

15 Juin 2023



Contents

1 Introduction **3**
1.1 Problématique: . . . 3
1.2 Objectifs . . . 4
1.3 Aspects innovants . . . 4

2 Analyse de la pollution sur le bassin Méditerranéen **5**
2.1 Le cas d'étude . . . 5
2.2 Configuration du modèle . . . 6
2.3 Données d'entrée . . . 7
2.4 Evaluation des simulations . . . 7

3 Analyse de la pollution au Chili **10**
3.1 Cadre général de l'étude . . . 10
3.2 Identification de l'origine de forts pics de $PM_{2.5}$ . . . 11
3.3 Modélisation des extrèmes de $PM_{2.5}$ . . . 13
3.4 Dépôt en hiver sur les Andes . . . 13
3.5 Mega-feux Chiliens de 2017: impact météorologique et dépôt de particules opaques sur les Andes . . . 14
3.6 Transport régional de polluants atmosphériques à l'échelle du Chili central: Variations saisonnières et conséquences . . . 16
3.7 Intrusions de matière particulaire dans une vallée Andine . . . 16
3.8 Saisonnalité du dépôt de carbone suie sur les glaciers du Chili central . . . 18

4 Publications du projet **19**

5 Conclusion sur le déroulement du projet **20**

1 Introduction

Le cycle de vie des aérosols est d'intérêt pour la compréhension et la prévision de la pollution atmosphérique, qu'ils soient émis de manière anthropique (du trafic automobile jusqu'aux rejets accidentels) ou naturelle. Ce projet vise à mieux modéliser les émissions, le transport et le dépôt des aérosols en milieux à forts reliefs et dans des conditions de stagnation atmosphérique, lorsque les concentrations dépassent les seuils réglementaires de la qualité de l'air.

1.1 Problématique:

En Europe et en Amérique du Sud, les dépassements de seuils réglementaires de la pollution atmosphérique sont fréquents et impactent les populations résidentes [Molina et al. (2015)]. Cette pollution atmosphérique est à la fois gazeuse (comme l'ozone, les NOx) et particulaire et a de nombreuses origines différentes: anthropique (le trafic, les industries, le résidentiel), biogénique (les COVs émis par les plantes), naturelle (les volcans, les feux de végétation, les aérosols minéraux), [Mingari et al. (2017)], [Cuchiara et al. (2017)], [Ulke et al. (2016)], [Turquety et al. (2014)], [Rea et al. (2015)]. L'ensemble de ces sources se mélange en étant transporté par le flux atmosphérique et par recombinaison chimique dans l'atmosphère.
Les outils de modélisation permettent d'analyser des évènements a posteriori et faire de la prévision (à 3 jours, selon l'état de l'art actuel des prévisions météorologiques). Si les évènements moyens sont aujourd'hui bien reproduits, les évènements extrèmes le sont nettement moins. Parmi ces évènements extrèmes, les périodes de stagnation sont propices à l'accumulation des polluants. Si en zone à faible relief, ces accumulations sont relativement bien modélisées, ce n'est pas le cas des zones à forts reliefs ou la variabilité de petite échelle reste difficile à reproduire.
Les deux régions étudiées sont complexes d'un point de vue topographie. Si l'Europe voit sa démographie et ses émissions comme assez stables, ce n'est pas le cas de Santiago qui est en croissance constante. La Figure ci-dessous montre une carte utilisée pour nos premiers tests de modélisation sur la région, avec les iso-lignes représentant la topographie de la Cordillère des Andes.
Le système de modélisation utilisé a déjà l'avantage d'intégrer toutes les sources de polluants existantes et de donner des simulations et prévisions correctes sur des domaines allant de la région au continent. Le point faible reste les endroits avec de forts gradients horizontaux de topographie qui peuvent difficilement être représentés par le modèle si la maille de calcul n'est pas très fine (de l'ordre du km).
Or, il faut pouvoir simuler:

- de grands domaines pour bien prendre en compte les émissions et le transport à longue distance (comme les émissions d'aérosols minéraux au sahara puis leur transport et dépôt en Europe)
- de fines résolutions pour bien prendre en compte les hétérogénéités de surface, comme la topographie Il est difficile de faire les deux en même temps, les ressources de calcul actuelles ne le permettant pas. De plus, le modèle étant utilisé en prévision opérationnelle, il y'a des contraintes de temps de calcul fortes.

La difficulté sera donc de développer des paramétrisations de variabilité sous-maille, de les implanter dans le modèle CHIMERE et d'évaluer leur impact. Nous pensons que cela est faisable car nous avons déjà fait des développements de ce genre pour estimer la variabilité sous-maille des émissions anthropiques en ville, nous permettant de reproduire la pollution atmosphérique en fonction des stations de mesures (trafic ou résidentielle). Il faudra aussi revoir les cadastres

d'emissons anthropiques, notamment au Chili (mais ce sera fait en colaboration avec l'Université de Santiago).
L'objectif est de tester la nouvelle méthodologie sur deux sites différents: le pourtour Nord de la Méditerranée, incluant les Alpes, ainsi que la région de Santiago du Chili (avec qui nous avons des collaborations actuellement).
Les retombées scientifiques seront:

- une version améliorée de la plate forme de prévision PREVAIR sur la France et CAMS sur l'Europe
- une version installable pour faire la prévision journalière de la pollution sur la région de santiago du Chili.

1.2 Objectifs

Le but de ce projet était de créer une plate-forme de modélisation atmosphérique régionale à même de modéliser les aérosols dans des conditions extrêmes de stagnation et d'accumulation. Cette plate-forme est basée sur les modèles WRF (météo, développé au NCAR, Colorado) et CHIMERE (chimie-transport, développé au LMD et à l'INERIS). Ces deux modèles sont 'open-source'. La plate-forme est utilisée pour reproduire et analyser des évènements passés. Elle peut être utilisée sur des cas d'alertes en fonction des évènements atmosphériques extrêmes qui peuvent avoir lieu, comme un rejet accidentel de polluant ou l'accumulation d'une émission continue en fonction des conditions météorologiques.
Un système de modélisation basé sur WRF et CHIMERE existe déjà et est utilisé pour la recherche (dans de nombreux laboratoires) et pour la prévision. La prévision est notamment réalisée par l'INERIS pour la France (système PREVAIR) et pour l'Europe (Copernicus CAMS). Ce projet a permis de modifier le modèle CHIMERE afin qu'il puisse simuler avec plus de réalisme des évènements extrêmes de pollution aux aérosols, jusqu'à présent mal appréhendés par les modèles. Si le système de modélisation a aujourd'hui fait ses preuves pour des résolutions de l'ordre de quelques kilomètres et en zones de faible relief, il a été montré que les zones à fort relief restaient mal simulées, que les concentrations extrêmes mesurées dans certaines vallées encaissées étaient mal simulées. Il faut donc revisiter les schémas d"emissions, de transport et de dépôts dans le cas ou la variabilité sous-maille des émissions et du relief deviennent importants. Cela signifie des développements afin de représenter les forts reliefs, le transport le long de ces reliefs en limitant la diffusion numérique des modèles, la variabilité sous-maille de la topographie.

1.3 Aspects innovants

1. Modélisation multi-échelle: du continental à la ville: Un des aspects innovants du projet est de développer un système de modélisation multi-modèle à même de simuler à la fois les grandes échelles (et donc faibles résolutions) pour le transport à longue distance puis les petites échelles (la ville, les vallées encaissées) pour la stagnation de polluants pouvant mener à des concentrations extrêmes, impactant fortement l'exposition humaine. Ce système multi-échelle sera un modèle complet qui s'adaptera seul à la résolution simulée et permettra sont implantation facilement pour les systèmes de prévision opérationnels déjà existants comme PREVAIR et CAMS.

2. Concentrations de polluants: de la moyenne aux extrêmes: La plupart des systèmes de modélisation sont plus performants sur le calcul des valeurs moyennes (par jour, par saison) des

concentrations de polluants. Ils ont plus de difficulté à simuler correctement les extrêmes, notamment les pics journaliers de pollution. C'est pourtant un aspect important de la prévision opérationnelle, basée sur le nombre d'heures de dépassements de seuils pré-établis.

3. Validation multi-site: La plupart des études de développement de modélisation de la pollution sont basées sur une unique région. Cela permet de concentrer les efforts sur un problème précis. Mais cela peut aussi masquer certains problèmes, difficilement détectables avec un cas unique et particulier. Ce projet a donc réalisé les développements et les validations sur deux régions très différentes: (i) Le sud de la France, avec les Alpes et la Méditerranée, (ii) la région de santiago du Chili, incluant la Cordillère des Andes.

2 Analyse de la pollution sur le bassin Méditerranéen

Avant de faire des tests de sensibilité sur les paramétrisations sous-maille et avant de faire des simulations longues de validation, il est nécessaire de faire des premières simulations sur les régions étudiées et de voir le comportement du modèle en confrontant les résultats des calculs aux observations disponibles.

2.1 Le cas d'étude

Nous avons sélectionné un cas d'étude hivernal dans les Alpes où des épisodes de pollution avaient été observés. Il s'agit de la période du 15 Novembre au 20 Décembre 2013. Dans cette région il est fréquent d'observer en cette période de l'année des épisodes de particules parfois intenses et dus à des conditions anticycloniques engendrant un temps très stable avec le développement de couches limites très basses en fond de vallée, Figure 1.

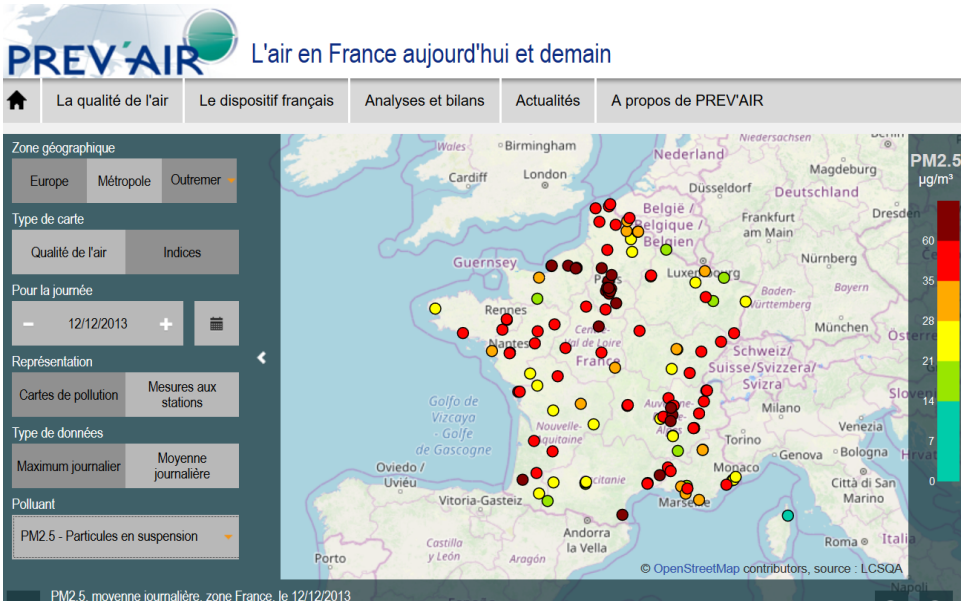


Figure 1: *Observations de $PM_{2.5}$ le 12/12/2013 issues de PREV'AIR*

Ces épisodes ont fait l'objet de campagnes de mesures mais finalement assez peu d'études de modélisation. Dans cette région les modèles de qualité de l'air doivent être utilisés à des résolutions

assez élevées pour simuler au mieux le transport des polluants des centres urbains dans le complexe réseau des vallées Alpines. Le projet DECOMBIO, [Jaffrezo et al. (2018)], financé par l'ADEME a permis d'exploiter des données chimiques pour identifier la nature des épisodes de particules dans les vallées Alpines. Les résultats de ce programme confirment que la source de combustion de la biomasse est dominante pour les concentrations de PM_{10} en hiver, contribuant en moyenne entre 60 et 70% de leur masse selon le site de mesure lors du 1er hiver du programme. Ce pourcentage augmente légèrement lors des épisodes de dépassement des normes (50 μg m^{-3}), pour Passy et Chamonix (deux stations de la vallée de l'Arve). Les résultats montrent très clairement l'impact fondamental de la météorologie locale sur les concentrations, le gradient thermique dans les premières centaines de mètres au-dessus des fonds de vallée étant déterminant pour les concentrations atmosphériques des PM_{10}. Du fait de l'impact prépondérant des inversions thermiques, les concentrations des particules issues de la combustion de la biomasse ont ensuite été comparées selon des classes de jours présentant des conditions atmosphériques similaires sur les 4 hivers du programme dont l'hiver 2013-2014.
Le projet NETDESA s'appuie donc sur ces résultats d'analyse ainsi que sur les observations officielles issues du réseau AURA, des données météorologiques disponibles.

2.2 Configuration du modèle

Le modèle CHIMERE, [Mailler et al. (2017)], dans sa version 2020 (avec possibilité de couplage on line avec le modèle WRF) a été utilisé sur quatre domaines imbriqués sur trois niveaux de 0.1^o de résolution à 0.011^o afin de conserver un facteur 3 entre les niveaux de nesting. Le sommet de chaque niveau est fixé à 300 HPa, et le premier niveau à 998 HPa soit environ 20 mètres. Les quatre domaines sont décrits dans le Tableau 1.

Domaines	CL Chimique	CL météo	Δx	N_z
EUR01	LMDz-INA/GOCART	GFS 1^o + nudging	0.100^o	15
ALP0033	EUR01	EUR01	0.033^o	20
GRE0011	ALP0033	ALP0033	0.011^o	20
ARV0011	ALP0033	ALP0033	0.011^o	20

Table 1: *Configurations du modèle utilisées avec 'CL' les conditions aux limites utilisées, Δx, la résolution horizontale (dans les directions zonales et méridiennes) et N_z le nombre de niveaux verticaux.*

Le modèle CHIMERE est ici couplé au modèle météorologique WRF en offline dans la simulation de référence, il n'y a pas d'impact de la chimie sur la météorologie. Pour la météo et la chimie il s'agit d'un couplage en one-way nesting sans retour du domaine fils sur le domaine père.
Pour les aérosols, le module H2O est activé dans sa version complète, [Couvidat et al. (2018)]. Il s'agit là d'un premier test avec cette nouvelle version du modèle CHIMERE dans sa nouvelle version en développement à de telles résolutions spatiales.
La suite de modèles CHIMERE-WRF est lancée sur la période du 10/11/2019 au 20/12/2020. Les 5 premiers jours sont utilisés à titre de spin-up afin d'initialiser le modèle, seules les données à partir du 15/11 sont exploitées.

2.3 Données d'entrée

Le modèle utilise les données globales GFS à 1^o de résolution mise à disposition par la NOAA. Ces données alimentent directement le modèle WRF qui permet de raffiner les données météorologiques sur les différents domaines décrits précédemment. Par ailleurs, le modèle WRF calcule d'autres variables météorologiques qui peuvent être utilisées par le modèle CHIMERE comme la hauteur de couche limite. Seul le modèle EUR01 fait l'objet d'un nudging (spectral ici) qui consiste à assimiler les conditions météorologiques de grandes échelles tout en laissant une certaine latitude au modèle pour bénéficier de la physique décrite et résolue dans le modèle WRF.
Le modèle CHIMERE utilise les émissions EMEP 2013 (*www.emep.int*) mises à jour en 2019 et initialement obtenues sur une grille de 0.1^o. Un pré-processeur mis à jour dans le cadre du projet NETDESA a permis de calculer les émissions des principaux polluants réglementaires (PM2.5, PMcoarse, NOx, SO2, NH3, COVNM, CO) sur les domaines de l'étude. Pour la France, les données de l'INS à 1km de résolution ont été utilisées pour spatialiser plus finement les émissions sur les domaines les plus hautement résolus.
CHIMERE utilise des conditions limites aux domaines EUR01 issues de climatologies de modèles globaux (LMDz-INCA pour les aérosols anthropiques et les espèces gazeuses, GOCART pour les poussières désertiques). Les autres domaines sont forcés en cascade par le domaine supérieur.

2.4 Evaluation des simulations

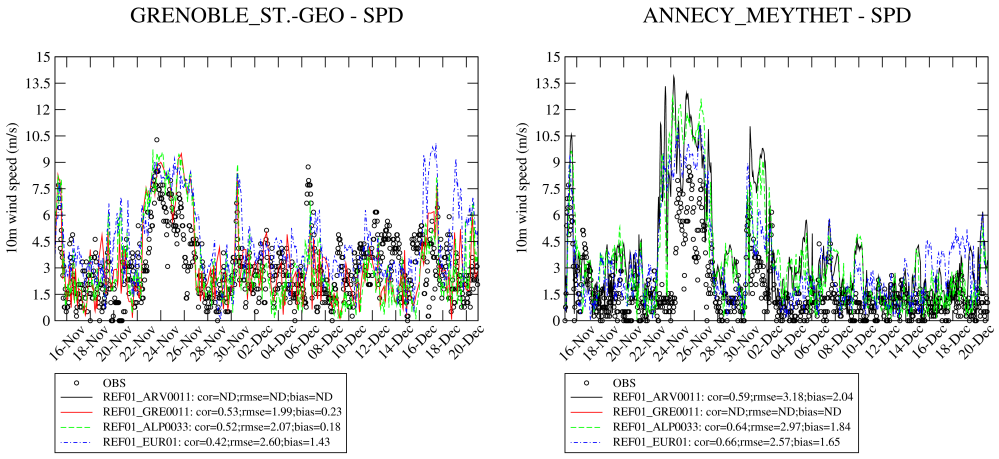


Figure 2: *Comparaison mesures-modèles pour le module du vent à 10m pour les différents domaines à Annecy et Grenoble.*

Le réseau MESONET est formé d'une série de stations météorologiques qui comportent au minimum des capteurs pour la température ambiante, le point de rosée, les précipitations, la direction et la force du vent. La base de données E-OBS, [Cornes et al. (2018)] propose des données intégrant des observations sur une grille à 0.1^o de résolution sur l'Europe pour les principales variables météorologiques. La Figure 2 propose une évaluation sur deux stations à Grenoble et Annecy pour le module du vent à 10 m (SPD) et la Figure 3 pour la température à 2m (TMP). Les figures proposent également une évaluation statistique aux stations en termes de biais, RMSE et corrélation.
Nous observons généralement une plus value de l'accroissement de la résolution (de 0.1^o à 0.011^o) au niveau des corrélations ou du biais. Si le biais est amélioré sur la station de Grenoble, un biais

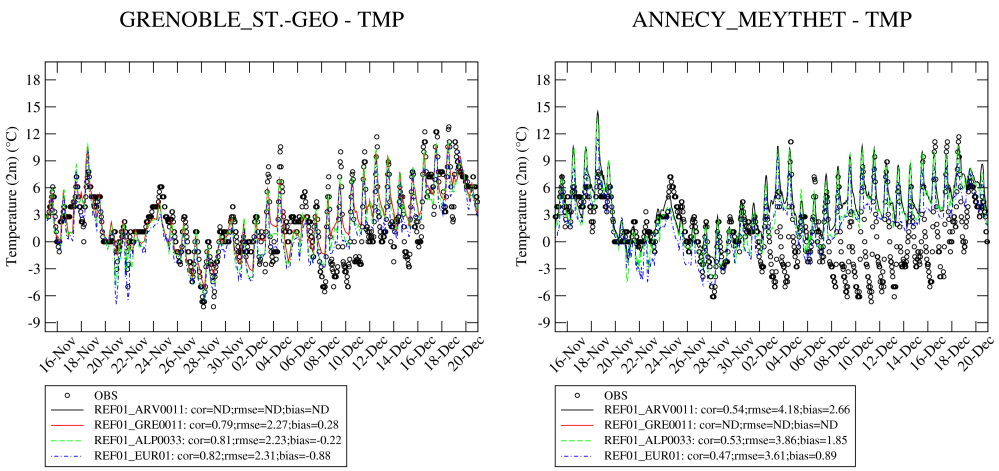


Figure 3: *Comparaison mesures-modèles pour la température à 2m pour les différents domaines à Annecy et Grenoble.*

fortement positif est observé à la station d'Annecy début décembre. La présence du Lac d'Annecy est certainement à la source d'une température trop élevée dans le modèle. La station est localisée à 3 km du lac et l'influence de cette source d'énergie tempérant le voisinage dans le modèle est certainement une des causes qu'il faudra confirmer. De tels écarts ont des effets sur les vitesses de vents et humidités relatives et affecteront le transport des polluants.
Par ailleurs, la station de Grenoble montre un biais moyen légèrement positif sur la vitesse du vent cache une disparité entre faibles et fortes vitesse de vents. Malgré l'accroissement de la résolution le biais atteint $+1$ m s^{-1} sur pour les vitesses situations observées par temps stables (vitesse inférieures à 2 m s^{-1}). Sur le domaine ALP0033, on observe globalement un biais négatif (Figure 4) sur les températures moyennes très variables d'une journée à l'autre.

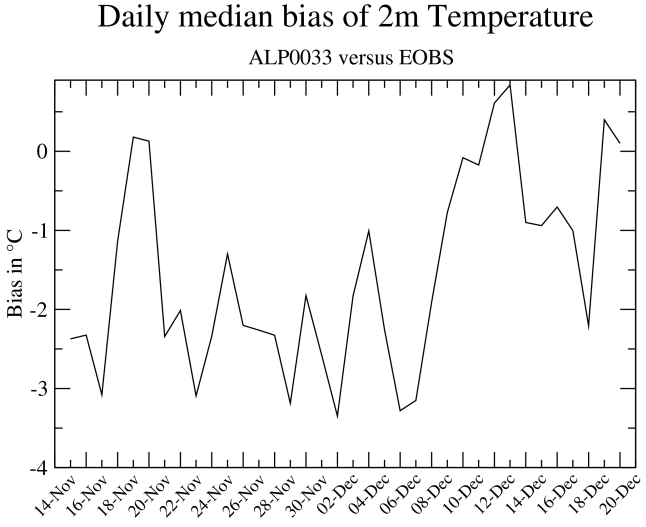


Figure 4: *Evolution de l'écart spatial médian de la température à 2m sur le domaine ALP0033 par rapport aux données E-OBS, base de données assimilant les données d'observation disponibles*

Durant la période simulée plusieurs épisodes ont lieu en France et particulièrement en région

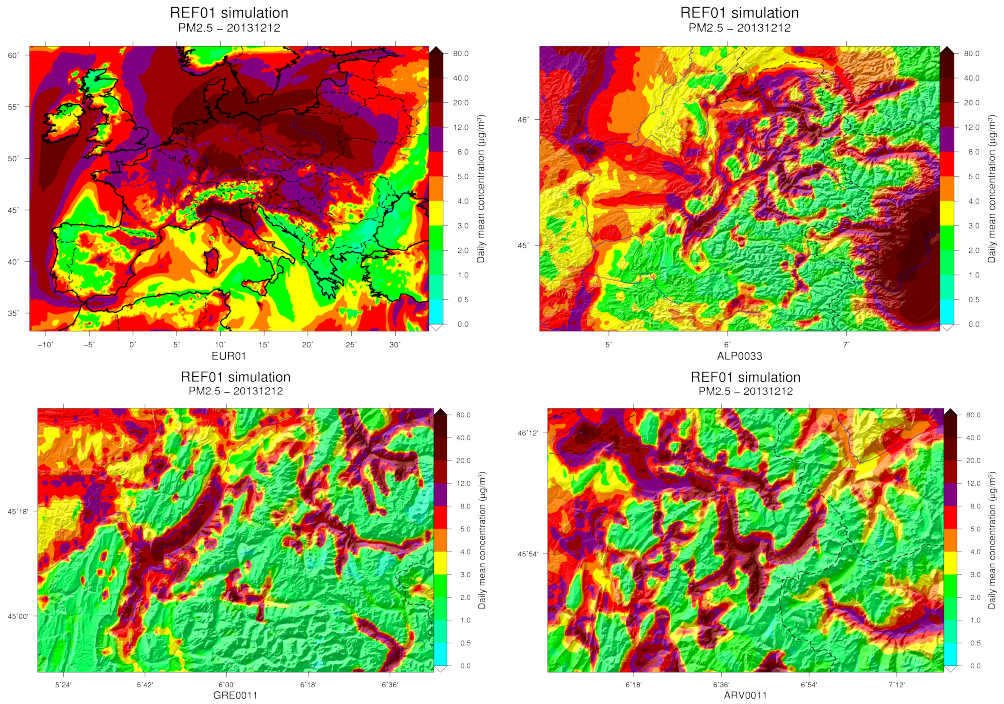


Figure 5: *Simulation des concentrations moyennes en PM2.5 pour l'épisode du 12 Décembre 2013 et des 4 domaines étudiés (EUR01, ALP0033, ARV0011 et GRE0011)*

Auvergne-Rhône Alpes. L'accroissement de la résolution ne permet pas de combler le fort biais négatif observés sur la plupart des stations, Figure 5. Ce biais est en grande partie dû à une sous-estimation de la fraction organique, [Bessagnet et al. (2016)]. D'une part les modèles sous estiment les émissions réelles à cette période lorsque les températures s'écartent négativement des normales saisonnières, les émissions de particules fines dues au chauffage au bois s'intensifiant. D'autre part, les modèles peuvent surestimer la diffusion des polluants comme on l'a montré précédemment avec des vitesses de vents simulées trop élevées en conditions de forte stabilité.
Les premiers résultats à une fréquence horaire, Figure 6, montrent que le modèle utilisé à haute résolution permet d'améliorer pour la station de Grenoble les simulations de PM2.5 et NO2 pour la simulation à 0.033^o (ALP0033) de résolution mais pas dans le cas d'une résolution plus importante 0.011^o (GRE0011). Néanmoins, certaines journées présentent de fortes sous-estimations difficiles à expliquer par une recrudescence de l'usage du chauffage au bois. En effet, les 16-17-18 décembre les concentrations en NO2 et PM2.5 restent à des niveaux élevées dans cette région des Alpes alors que la température n'est pas particulièrement froide. La sur-estimation du transport et de la diffusion des polluants dans le modèle pendant cette période pourrait davantage expliquer ces différences à la vue des différences observées sur les vitesses de vents en fin de période à Grenoble et Annecy.
A une résolution journalière, le modèle capture mieux les concentrations en Black Carbon à plus haute résolution, le meilleur compromis étant la simulation à 0.033^o de résolution (Figure 7).

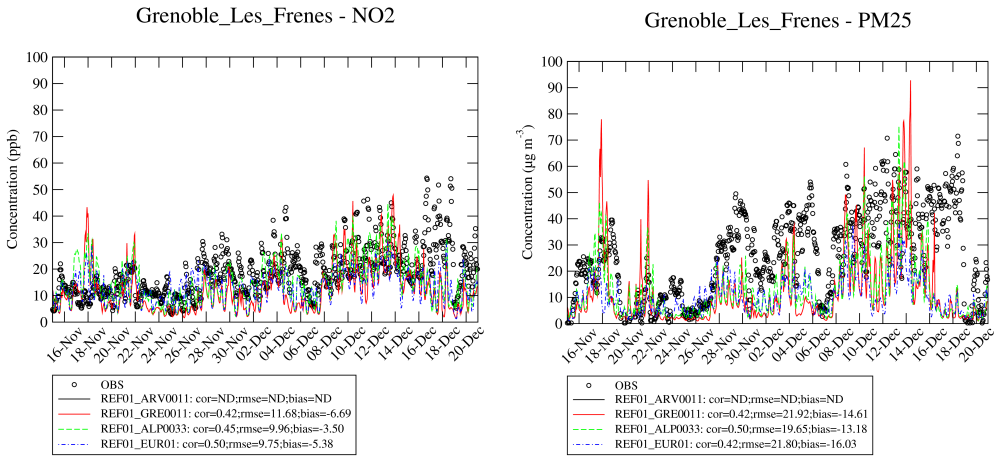


Figure 6: *Evaluation du modèle pour NO2 et PM25 à Grenoble sur une station urbaine*

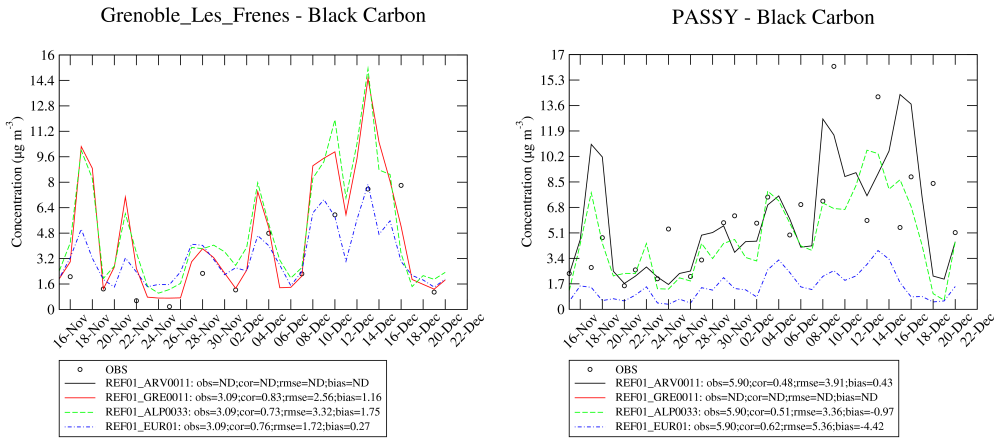


Figure 7: *Evaluation du modèle pour le Black Carbon à Grenoble, et Passy (station située dans la vallée de l'Arve).*

3 Analyse de la pollution au Chili

3.1 Cadre général de l'étude

La situation géographique de Santiago du Chili est un cas d'étude unique de la pollution en milieu fortement urbanisé et montagneux. Une première étude a été réalisée afin de quantifier l'impact d'évènements ponctuels d'émissions de particules sur la qualité de l'air de la métropole de Santiago. Le même système de modélisation est utilisé, WRF-CHIMERE. La Figure 8 présente les deux domaines de simulation imbriqués. Comme pour la région Méditerranée, le grand domaine est alimenté à ses limites par des simulations globales climatologiques et le plus petit domaine est alimenté par le grand domaine.
La période simulée s'étend du 1er juin au 15 juillet 2016 (les 15 premiers jours étant ensuite considérés comme du spin-up donc non analysés). Cette période corresponds à une période hivernale dans l'hémisphère Sud et on cherche donc à comprendre un évènement de forte pollution aux particules dans un environnement de faible convection et de couches limites de faible épaisseur et en région montagneuse.

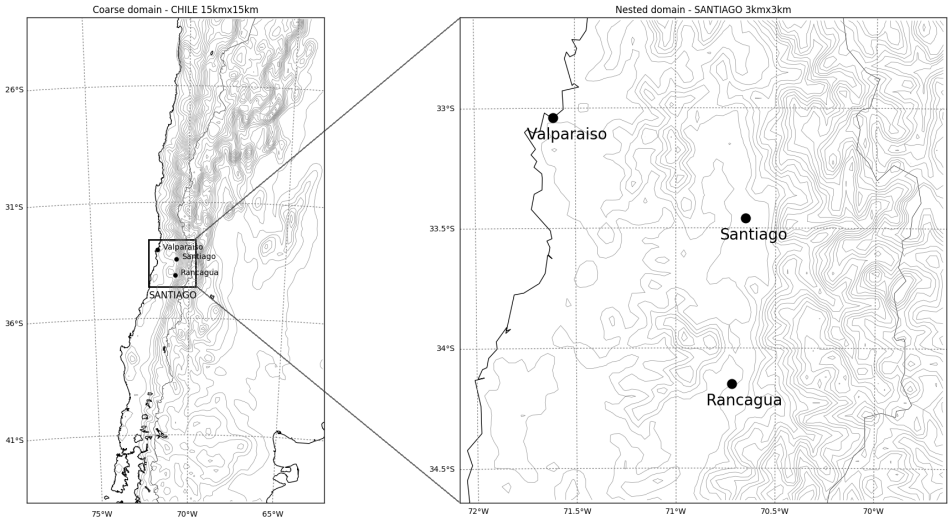


Figure 8: *Les domaines de simulation utilisés pour le Chili.*

Les simulations vont être comparés aux stations de mesures SINCA de la région de Santiago et pour les concentrations de surface de $PM_{2.5}$. Durant la période étudiée, des pics aanormalement élevés sont mesurés, d'une amplitude jusqu'à 10 fois supérieure aux valeurs usuellement relevées. On cherche donc dans cette étude à comprendre l'origine de ces pics, notamment en terme de secteur d'activité.

3.2 Identification de l'origine de forts pics de $PM_{2.5}$

Une premiere analyse montre que ces pics intenses démarrent en même temps pour plusieurs stations de la région: cela signifie que c'est le même phénomène de secteur d'activité qui se reproduit en différents lieux ou que c'est un panache très étendu qui se propage rapidement. Une première analyse des conditions météorologiques a montré que les périodes des pics ne correspondaient pas à une météorologie atypique ou particulière: une anomalie marquée de température ou d'humidité n'était pas présente dans les données et ne pouvait pas expliquer une soudaine augmentation des concentrations de surface. Après analyse de mesures autour de la région de Santiago, l'hypothèse d'une advection d'un panache distant, assez massif et arrivant soudainement sur toute la région en même temps a aussi été écartée. On a donc affaire à une production locale, qui se déclenche au même moment en plusieurs lieux de la métropole.
Pour identifier la nature de ces fortes concentrations, nous avons étudié sa signature chimique. A partir de rapports de concentrations, et sachant que certaines espèces sont émises majoritairement par certains secteurs d'activité plutot que d'autres, on peut avoir une vision claire de l'origine de certaines concentrations et les relier aux secteurs d'activité des émissions locales. A Santiago, les principaux émetteurs sont le trafic automobile (39%), le chauffage résidentiel (20%) et les industries (18%). Pour le trafic automobile, [Barraza et al. (2017)] a montré que les rapports de concentrations étaient NO_x/CO=12% et $NO_x/PM_{2.5}$=1680%.
Le calcul de ces rapports de concentrations est montré sur la Figure 9. En bleu, les points de mesures correspondants à des rapports proches de secteurs d'activité bien identifiés comme le trafic. En rouge, des rapports de concentrations plus atypiques. Comme les pics mesurés sont très ponctuels et apparaissent plutôt le soir et début de nuit, on a cherché à voir si ces fortes

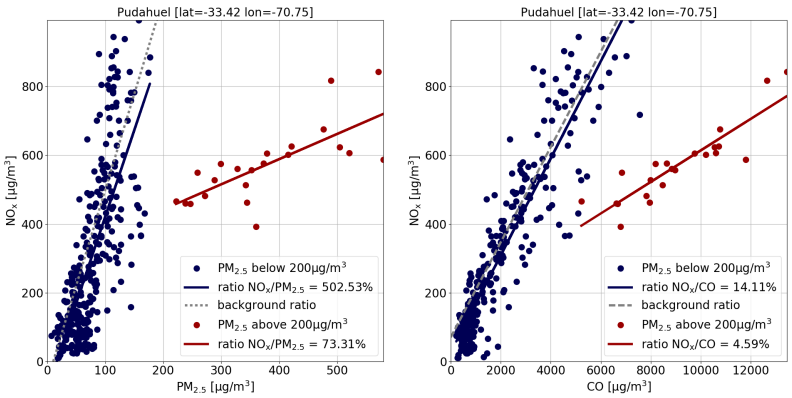


Figure 9: *Rapports de concentrations mesurées en surface à la station urbaine de Pudahuel pendant l'hiver 2016 et pour identifier les différents secteurs d'activité émetteurs.*

valeurs pouvaient être dues à des produits de combustion de cuisine ou barbecue. Des études récentes ont montré que cette combustion pouvait donner des ratios de NO_x/CO=1.4% à 2.4% et $NO_x/PM_{2.5}$=40.5% à 61.5%. Ce sont ces valeurs que l'on retrouve sur la Figure 9. On peut donc conclure que les pics importants observés sont probablement dûs à des émissions urbaines de barbecues certains soirs. Cela epxliquerait que l'on ait des pics pour plusieurs stations urbaines en même temps, et sur des périodes temporelles de quelques heures uniquement.

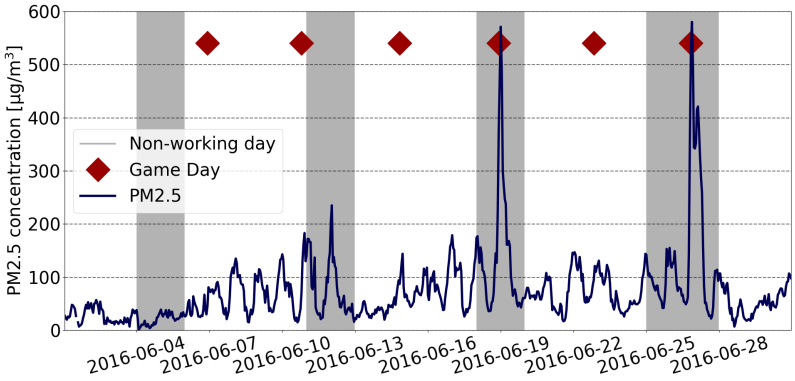


Figure 10: *Concentrations de surface de $PM_{2.5}$ et symboles pour les jours ou a joué l'équipe de de football Chilienne.*

La question suivante est de comprendre pourquoi de tels pics d'émissions apparaissent certains jours et pas d'autres si l'émission est liée à de la cuisine. Dans le cas des barbecues, il est à noter que usuellement, cette pratique culinaire est liée la célébration d'un évènement social comme un match de football. Après recoupements d'informations dans la presse, nous avons montré que sur les 8 pics supérieurs à 200 $\mu g.m^{-3}$, 5 avaient eu lieu des soirs ou l'équipe nationale de football Chilienne avait un match, Figure 10. Cette hypothèse a été confirmée par des rapports de concentrations calculés pour d'autres stations de mesures dans Santiago.

3.3 Modélisation des extrèmes de $PM_{2.5}$

L'identification de l'origine des pics extrèmes de $PM_{2.5}$ amène deux questions: (i) est-ce que cela est reproductible par modélisation (et donc à terme pour la prévision) et (ii) quel est l'impact à longue distance de ces sources locales?
Pour répondre à ces questions, un terme 'source' supplémentaire a été ajouté dans le cadastre d'émissions du modèle CHIMERE. D'un point de vue spatial, ce terme est proportionnel à la population dans la métropole. D'un point de vue intensité de la source, les valeurs ont été choisies après ajustement en fonction des ordres de grandeur des observations.

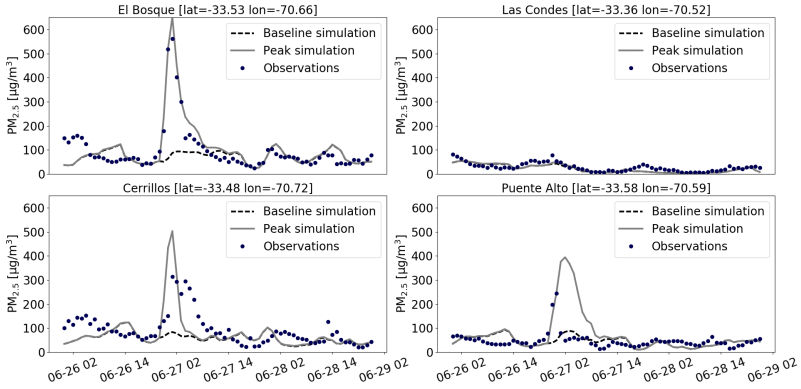


Figure 11: *Modélisation des concentrations de surface de $PM_{2.5}$ pendant la période du 26 au 29 juin 2016 et pour différentes stations de mesure de Santiago. Les observations correspondantes sont sous forme de symboles.*

Les résultats sont présentés sur la Figure 11. On peut voir que pour l'ensemble de stations étudiées, l'ajout des émissions des barbecues permet de retrouver le phasage temporel des observations de particules. On a donc ici une preuve indirecte supplémentaire montrant que cette source est très probablement la raison première de ces forts pics de concentrations dans Santiago.

3.4 Dépôt en hiver sur les Andes

Cette étude a été publiée dans [Lapere et al. (2021b)].
La glace et la neige dans les Andes centrales contiennent des quantités importantes de particules absorbant la lumière, comme le 'black carbon'. La fonte accélérée de la cryosphère est une menace non seulement du point de vue du climat, mais aussi pour les ressources en eau et les ressources en neige espèces et activités, aggravée par la méga sécheresse qui touche la région depuis la dernière décennie. Compte tenu de sa proximité avec les Andes, de la zone métropolitaine de Santiago du Chili sont considérées comme les principaux responsables des dépôts sur les glaciers. Toutefois, aucune preuve ne vient étayer cette affirmation, surtout si l'on considère les conditions habituellement stables de l'hiver, lorsque le manteau neigeux est à son maximum. Sur la base d'une modélisation de chimie-transport à haute résolution avec WRF-CHIMERE, les travaux montrent que, pour le mois de juin 2015, jusqu'à 40% des dépôts secs enregistrés de black carbon et sur les Andes sont des particules venant de la métropole de Santiago. Grâce à l'analyse des traceurs d'aérosols nous avons déterminé que (i) que les zones de la région métropolitaine où les émissions sont les plus importantes lorsqu'il s'agit d'exporter vers les glaciers sont situés à l'est de Santiago, près des contreforts des Andes, (ii) le rôle crucial du réseau de vallées andines qui canalise jusqu'à des

endroits éloignés, près des glaciers, en suivant des pentes douces, comme le montre la Figure 12. Logiquement, la pollution urbaine sévère et les forts dépôt de polluants sur les Andes sont des phénomènes anticorrélés.

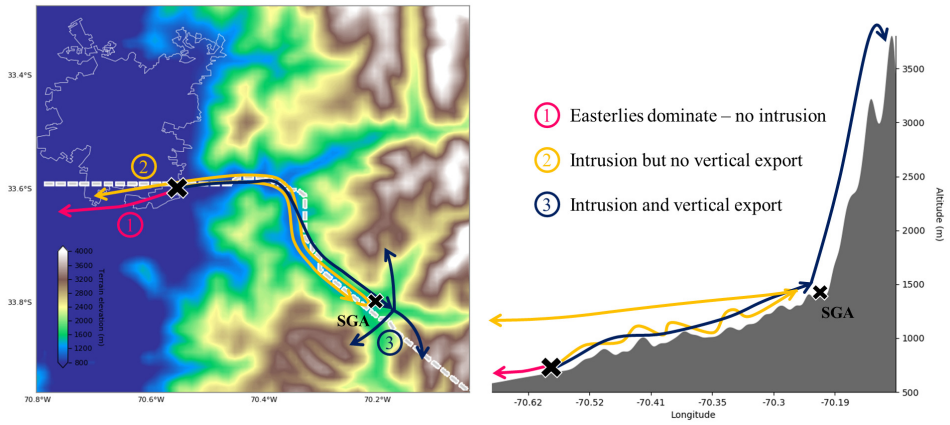


Figure 12: *Coupe verticale de la circulation typique des polluants émis dans Santiago et transportés vers les sommets des Andes pour y être déposés.*

Afin de mieux quantifier l'occurence de ce phénomène complexe de transport, un indice météorologique à deux variables a été élaboré, permettant d'expliquer la dynamique de l'export des aérosols vers les Andes, en fonction de la vitesse du vent zonal au-dessus de la zone urbaine, et en fonction du coefficient de diffusion verticale, K_z, dans les vallées proches des terrains couverts de glace et de neige. Les résultats de cet indice sont présentés sur la Figure 13.

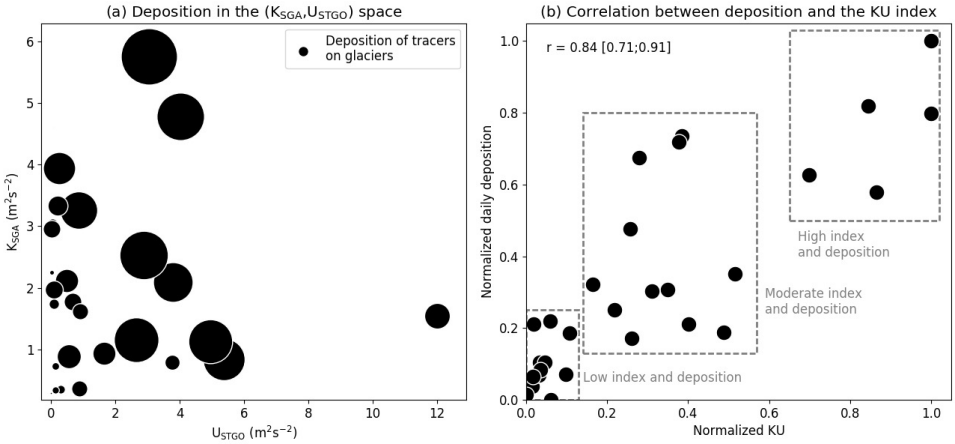


Figure 13: *Relations entre depôt et mélange turbulent.*

3.5 Mega-feux Chiliens de 2017: impact météorologique et dépôt de particules opaques sur les Andes

Cette étude a été publiée dans [Lapere et al. (2021a)].

Les incendies forestiers de Janvier/Février 2017 au centre-sud du Chili ont eu une ampleur sans précédent depuis au moins 150 ans, avec une surface brulée 5 fois supérieure au maximum précédemment observé. Lors de cet événements, de larges quantités d'aérosols ont été libérées. A l'aide de simulations de chimie-transport, de données de mesure de surface, et de données satellites, nous étudions entre autres (i) l'effet de rétroactions de ces aérosols sur la météorologie, notamment les nuages (effet indirects), (ii) le dépôt des aérosols opaques sur la cordillère des Andes et ses glaciers. Le panache issu de ces feux a été principalement transporté vers l'océan Pacifique, où il s'est mêlé et a interagi avec les couches nuageuses comme le montre l'image satellite de la Figure 14a. Grâce à notre approche de modélisation à haute résolution s'appuyant sur le couplage météo-composition atmosphérique récemment développé dans CHIMERE, nous avons pu quantifier ces interactions, et notamment montrer que les aérosols relâchés par les feux ont agi en tant que noyaux de condensation (effet indirect), induisant la formation de gouttes d'eau supplémentaires et épaississant ainsi de manière significative la couche nuageuse au-dessus de l'océan (Figure 14c-d).

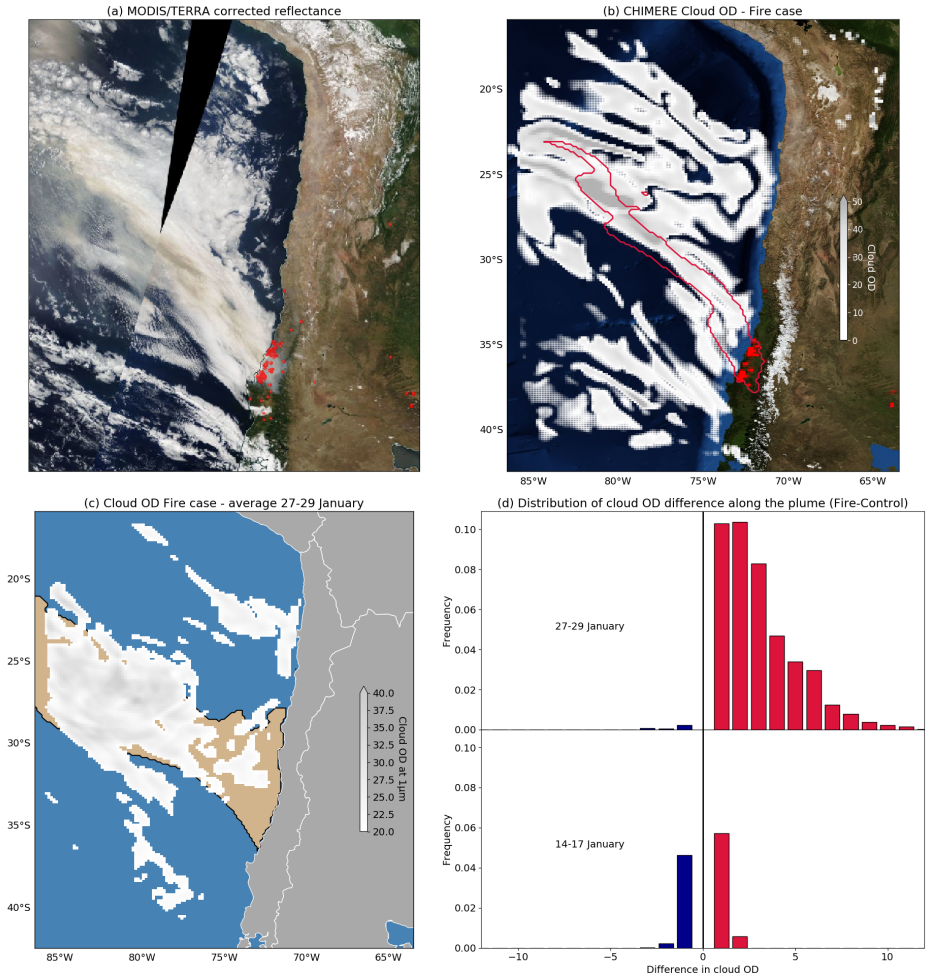


Figure 14: *Interactions entre aérosols issus des incendies et couche nuageuse au-dessus du Pacifique. Images satellite, et quantification de l'effet indirect via CHIMERE*

En parallèle, une partie du panache, riche en aérosols de carbone suie, a également été transportée vers le Nord, et notamment vers la cordillère des Andes. Cet obstacle naturel a alors agi à la fois comme guide du panache mais a aussi intercepté une partie des aérosols via impaction au

sol et dépôt humide. En particulier, cela a conduit a un dépôt cumulé sur les quelques jours de l'événement jusqu'à plusieurs mg/m^2 (Figure 15). Cela correspond à l'ordre de grandeur du dépôt total cumulé pour une année sur les glaciers les plus affectés par ce phénomène en temps normal. Cet événement de quelques jours a donc un impact sur la fonte des glaciers similaire à la pollution anthropique d'une année entière.

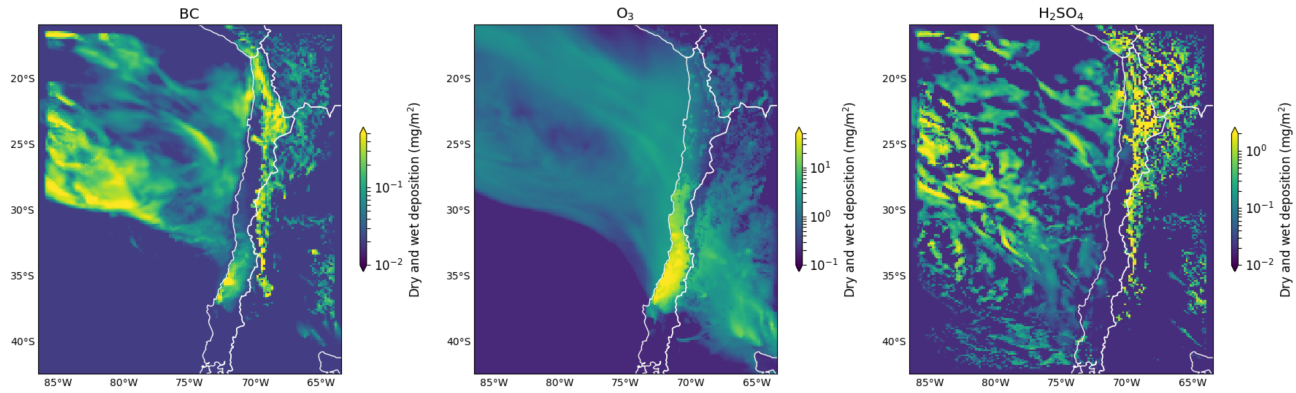


Figure 15: *Flux cumulé de dépôt de carbone suie, ozone et sulfates lors de l'événement de mega-feux 2017, simulé par CHIMERE.*

3.6 Transport régional de polluants atmosphériques à l'échelle du Chili central: Variations saisonnières et conséquences

Cette étude a été publiée dans [Lapere et al. (2021c)].
Au-delà des sources locales, la composition atmosphérique des milieux urbains comporte également une composante liée au transport longue distance. Dans le cas du Chili central, Santiago est un "point chaud" d'émissions, dont la portée du panache n'est pas connue. De la même manière, la proportion de la pollution atmosphérique observée à Santiago provenant de l'advection depuis d'autres agglomérations est mal contrainte. Dans ce contexte, des simulations de chimie-transport avec le modèle CHIMERE ont été effectuées afin de mieux connaître les ordres de grandeur de ce transport régional et les processus associés. Cette étude a révélé une zone d'atteinte de plus de 1000 km d'envergure pour les polluants émis à Santiago (Figure 16), ainsi que la formation d'une bulle d'ozone en altitude au-dessus de Santiago (Figure 17) jamais relevée auparavant mais concordant avec certaines observations. Cette dernière est étroitement liée aux circulations de montagne, qui ont pu être correctement reproduites grâce à des simulations à haute résolution. Cette étude montre également que le transport hivernal de pollution particulaire s'effectue principalement dans la couche limite atmosphérique.

3.7 Intrusions de matière particulaire dans une vallée Andine

Cette étude a été publiée dans [Huneeus et al. (2021)].
[Lapere et al. (2021b)] a montré grâce à une approche de modélisation, le rôle clé joué par la vallée de Maipo, au Sud-Est de Santiago, dans le transport de pollution particulaire depuis la ville vers les glaciers de la Cordillère. En complément, [Huneeus et al. (2021)] s'intéresse au même processus d'intrusion de polluants dans cette vallée, mais du point de vue observationnel à partir

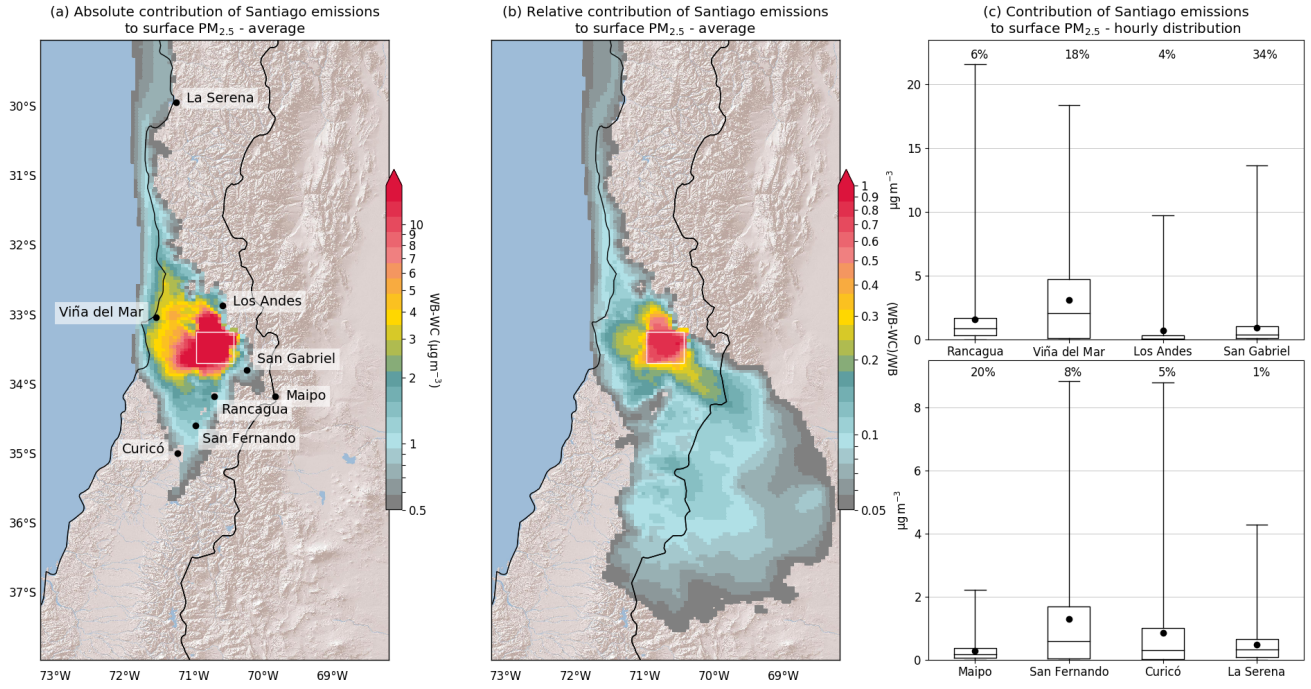


Figure 16: *Zone d'influence du panache des émissions particulaires de la région métropolitaine de Santiago.*

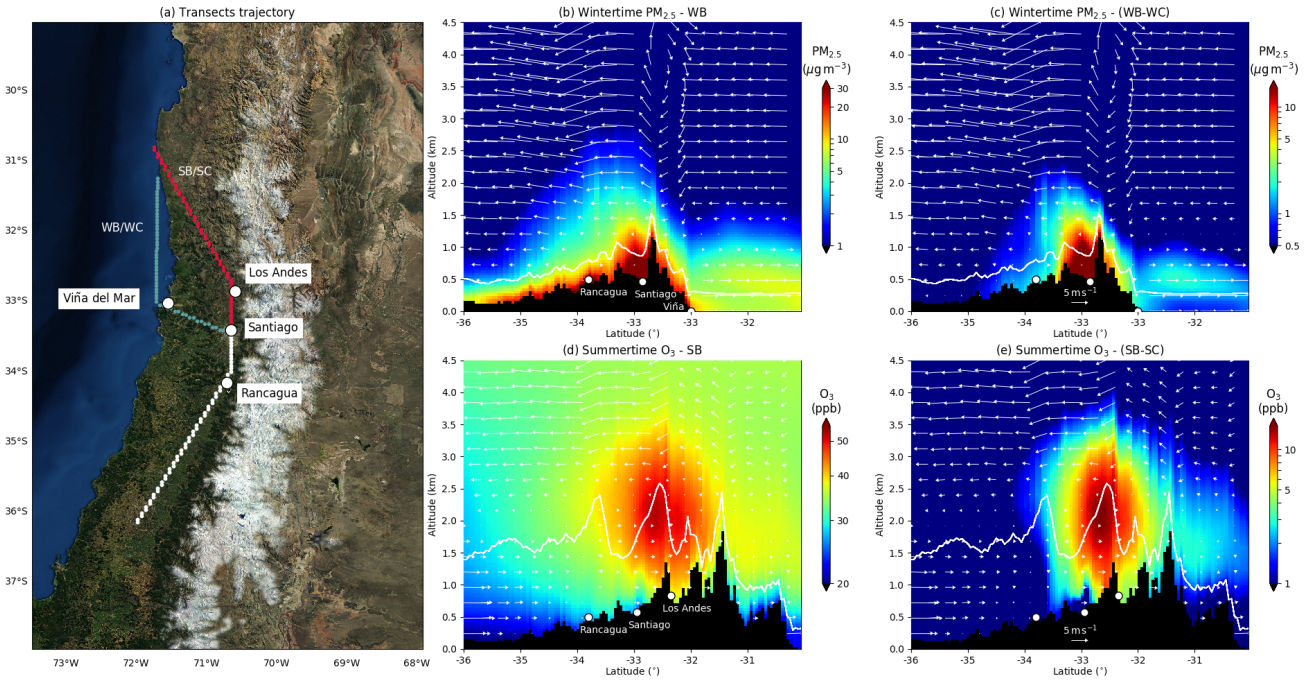


Figure 17: *Coupes longitudinales des concentrations de polluants simulées pour un mois d'été et un mois d'hiver.*

d'une campagne de mesures réalisée en 2015 par Nicolas Huneeus. La Figure 18 précise les sites de mesures concernés et le processus décrit dans l'étude. Ces travaux s'intéressent également

aux déterminants météorologiques de moyenne et grande échelle favorisant ou perturbant ce type d'intrusion.
Il est montré que: (i) le transport de carbone suie urbain s'effectue en couches denses, loin dans la vallée, (ii) un flux de retour est observé le soir lorsque ces intrusions se produisent, (iii) les sources proches de l'entrée de la vallée sont les plus transportées, (iv) climatologiquement ce type d'intrusion se produit 90% du temps en hiver, excepté lorsque la couverture nuageuse empêche la circulation de montagne de se développer.

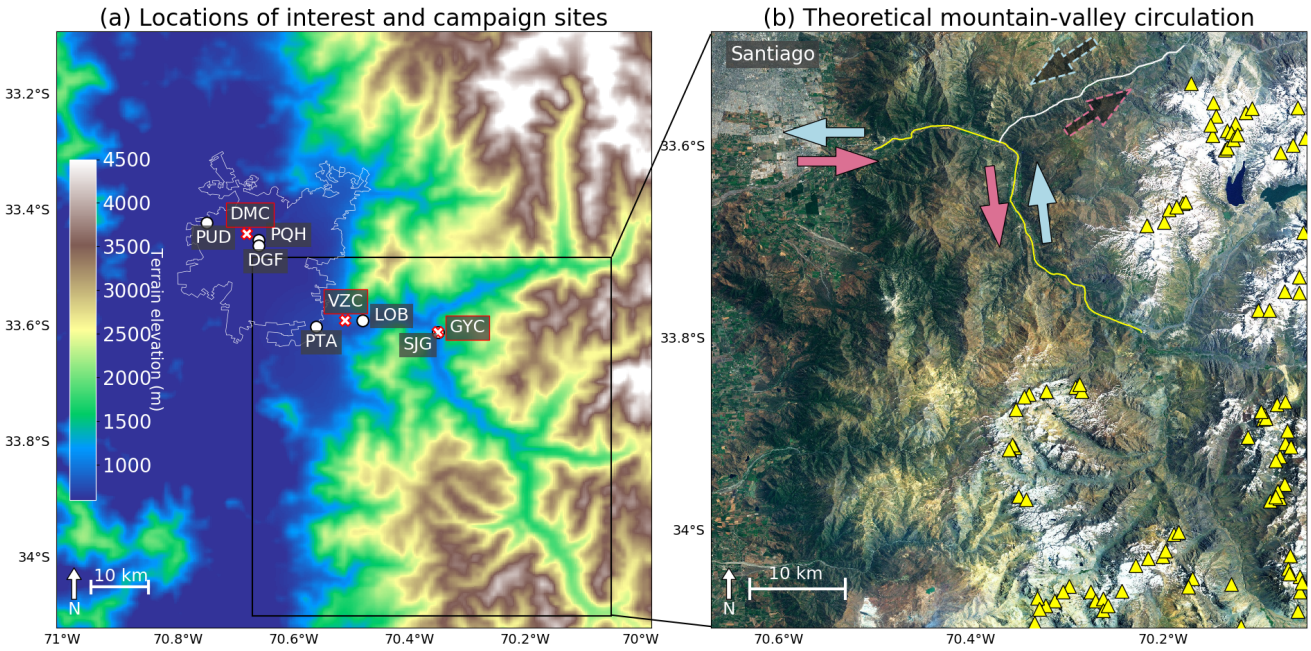


Figure 18: *Sites de mesure de la campagne 2015 et phénomène de circulation montagne-vallée responsable des intrusions de polluants vers les Andes.*

3.8 Saisonnalité du dépôt de carbone suie sur les glaciers du Chili central

La présence de carbone suie dans les glaciers des Andes a été révélée en 2019 par une campagne de mesure dédiée. Bien qu'elle suggère des enjeux importants concernant la fonte accélérée des glaciers, celle-ci a été conduite uniquement sur une courte période hivernale. Par ailleurs, Santiago est pointée du doigt comme la source principale de ces polluants, bien que rien ne permette réellement de l'affirmer à ce stade. L'objectif de notre étude est alors de (i) quantifier la part relative du dépôt attribuable aux émissions de Santiago, (ii) évaluer la variabilité saisonnière de ce dépôt et ses déterminants, (iii) proposer une carte continue décrivant les flux de dépôt sur l'ensemble des Andes du Chili central.
Ici aussi l'approche par la modélisation de chimie-transport est adoptée et montre que (i) si les émissions de Santiago dominent effectivement le signal en été, ce n'est pas la cas en hiver lorsque la majorité du dépôt provient d'autres zones, (ii) le dépôt total est plus faible en moyenne en été mais ce n'est pas le cas pour tous le glaciers, en lien avec les changements saisonniers de météorologie et

de circulation synoptique. Cette période, généralement moins étudiée, est donc aussi importante à prendre en compte que l'hiver. Ces résultats peuvent être schématiquement résumés comme dans la Figure 19.

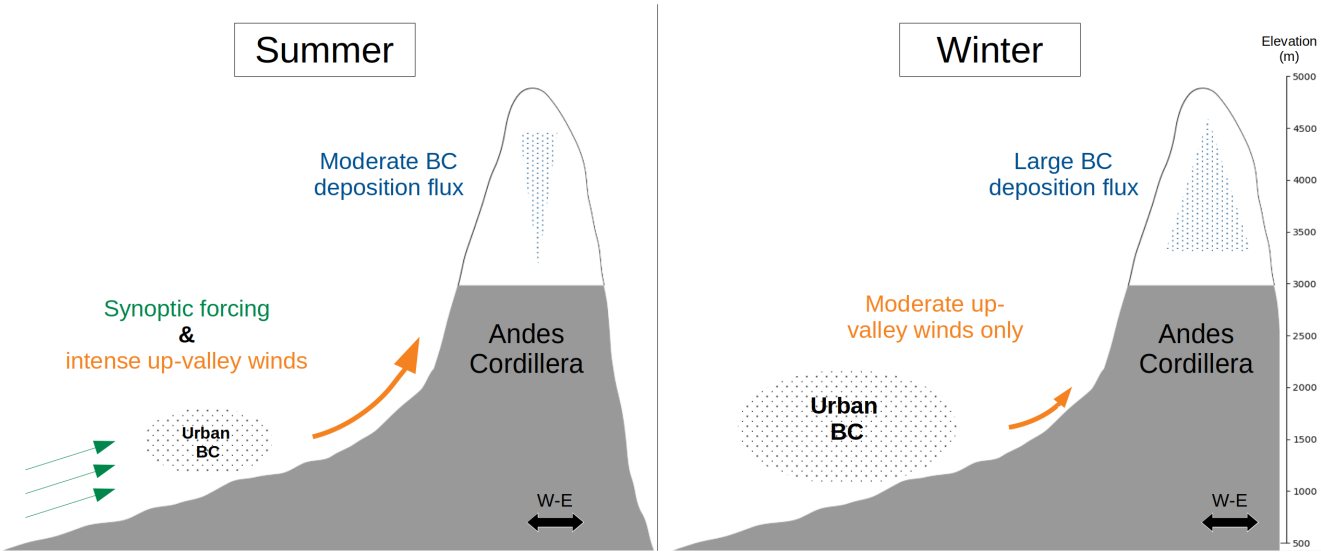


Figure 19: *Schéma de principe du dépôt du carbone suie (BC pour "Black Carbon") sur les glaciers en fonction de la saison.*

4 Publications du projet

1. Bessagnet, B., Menut, L., Lapere, R., Couvidat, F., Jaffrezo, J.-L., Mailler, S., Favez, O., Pennel, R., and Siour, G.: High Resolution Chemistry Transport Modeling with the On-Line CHIMERE-WRF Model over the French Alps-Analysis of a Feedback of Surface Particulate Matter Concentrations on Mountainous Meteorology, Atmosphere, 11, doi: 10.3390/atmos11060565, 2020

2. Lapere, R., Menut, L., Mailler, S., and Huneeus, N.: Soccer games and record breaking PM2.5 pollution events in Santiago, Chile, Atmos. Chem. Phys., 20, 4681–4694, doi: 10.5194/acp-20-4681-2020, 2020

3. Lapere, R., Mailler, S., Menut, L., and Huneeus, N.: Pathways for wintertime deposition of anthropogenic light-absorbing particles on the Central Andes cryosphere, Environ. Pollut., 272, 115 901, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115901, 2021b

4. Lapere, R., Mailler, S., and Menut, L.: The 2017 Mega-Fires in Central Chile: Impacts on Regional Atmospheric Composition and Meteorology Assessed from Satellite Data and Chemistry-Transport Modeling, Atmosphere, 12, doi: 10.3390/atmos12030344, URL `https://www.mdpi.com/2073-4433/12/3/344`, 2021a

5. Lapere, R., Menut, L., Mailler, S., and Huneeus, N.: Seasonal variation in atmospheric pollutants transport in central Chile: dynamics and consequences, Atmos. Chem. Phys., 21, 6431–6454, doi: 10.5194/acp-21-6431-2021, 2021c

6. Huneeus, N., Lapere, R., Mazzeo, A., Ordoñez, C., Donoso, N., Muñoz, R., and Rutllant, J. A.: Deep winter intrusions of urban black carbon into a canyon near Santiago, Chile: A pathway towards Andean glaciers, Environ. Pollut., 291, 118 124, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118124, 2021

7. Lapere, R., Huneeus, N., Mailler, S., Menut, L., and Couvidat, F.: Meteorological export and deposition fluxes of black carbon on glaciers of the central Chilean Andes, Atmospheric Chemistry and Physics, 23, 1749–1768, doi: 10.5194/acp-23-1749-2023, URL https://acp.copernicus.org/articles/23/1749/2023/, 2023

5 Conclusion sur le déroulement du projet

L'épidémie de COVID19 a eu un impact fort sur le déroulement du projet. On déplore notamment la difficulté puis l'impossibilité de recruter du personnel de recherche en post-doctorat comme cela était prévu au départ.
La partie de recherche sur les Alpes a été réalisée par Bertrand Bessagnet pendant son contrat au LMD. La partie de recherche sur le Chili a été réalisée par Rémy Lapère, en thèse au LMD avec Sylvain Mailler et Laurent Menut. La demande de prolongation du projet a permis de financer Rémy Lapère pour qu'il continue son travail sur le Chili, notamment en allant vers plus d'acquisition et d'analyses de mesures en collaboration avec Nicolas Huneeus de l'Université de Santiago.
En parallèle une annonce de recrutement de post-doc a circulé mais aucun candidat n'a postulé, les vagues successives de COVID ayant probablement limité les déplacements possibles. Nous avons abandonner l'idée de recruter quelqu'un sur ce contrat en janvier 2023: personne n'avait postulé à cette date et, de toute facon, il ne restait plus assez de temps pour cet emploi.

References

Barraza, F., Lambert, F., Jorquera, H., Villalobos, A. M., and Gallardo, L.: Temporal evolution of main ambient $PM_{2.5}$ sources in Santiago, Chile, from 1998 to 2012, Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 10 093–10 107, doi: 10.5194/acp-17-10093-2017, 2017.

Bessagnet, B., Pirovano, G., Mircea, M., Cuvelier, C., Aulinger, A., Calori, G., Ciarelli, G., Manders, A., Stern, R., Tsyro, S., García Vivanco, M., Thunis, P., Pay, M.-T., Colette, A., Couvidat, F., Meleux, F., Rouïl, L., Ung, A., Aksoyoglu, S., Baldasano, J. M., Bieser, J., Briganti, G., Cappelletti, A., D'Isidoro, M., Finardi, S., Kranenburg, R., Silibello, C., Carnevale, C., Aas, W., Dupont, J.-C., Fagerli, H., Gonzalez, L., Menut, L., Prévôt, A., Roberts, P., and White, L.: Presentation of the EURODELTA III intercomparison exercise - evaluation of the chemistry transport models' performance on criteria pollutants and joint analysis with meteorology, Atmospheric Chemistry and Physics, 16, 12 667–12 701, doi: 10.5194/acp-16-12667-2016, 2016.

Bessagnet, B., Menut, L., Lapere, R., Couvidat, F., Jaffrezo, J.-L., Mailler, S., Favez, O., Pennel, R., and Siour, G.: High Resolution Chemistry Transport Modeling with the On-Line CHIMERE-WRF Model over the French Alps-Analysis of a Feedback of Surface Particulate Matter Concentrations on Mountainous Meteorology, Atmosphere, 11, doi: 10.3390/atmos11060565, 2020.

Cornes, R., van der Schrier, G., van den Besselaar, E., and Jones, P.: Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets, J. Geophys. Res., 123, doi: 10.1029/2017JD028200, 2018.

Couvidat, F., Bessagnet, B., Garcia-Vivanco, M., Real, E., Menut, L., and Colette, A.: Development of an inorganic and organic aerosol model (CHIMERE 2017β v1.0): seasonal and spatial evaluation over Europe, Geoscientific Model Development, 11, 165–194, doi: 10.5194/gmd-11-165-2018, 2018.

Cuchiara, G., Rappengluck, B., Rubio, M., Lissi, E., Gramsch, E., and Garreaud, R.: Modeling study of biomass burning plumes and their impact on urban air quality; a case study of Santiago de Chile, Atmospheric Environment, 166, 79 – 91, doi: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.07.002, 2017.

Huneeus, N., Lapere, R., Mazzeo, A., Ordoñez, C., Donoso, N., Muñoz, R., and Rutllant, J. A.: Deep winter intrusions of urban black carbon into a canyon near Santiago, Chile: A pathway towards Andean glaciers, Environ. Pollut., 291, 118 124, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118124, 2021.

Jaffrezo, J., Besombes, J., Marchand, N., Mocnik, G., Brulfert, G., Chevrier, F., Bertrand, A., Jezek, I., and Allard, J.: DEconvolution de la contribution de la COMbustion de la BIOmasse aux particules dans la vallée de l'Arve-projet DECOMBIO, 2018.

Lapere, R., Menut, L., Mailler, S., and Huneeus, N.: Soccer games and record breaking PM2.5 pollution events in Santiago, Chile, Atmos. Chem. Phys., 20, 4681–4694, doi: 10.5194/acp-20-4681-2020, 2020.

Lapere, R., Mailler, S., and Menut, L.: The 2017 Mega-Fires in Central Chile: Impacts on Regional Atmospheric Composition and Meteorology Assessed from Satellite Data and Chemistry-Transport Modeling, Atmosphere, 12, doi: 10.3390/atmos12030344, URL `https://www.mdpi.com/2073-4433/12/3/344`, 2021a.

Lapere, R., Mailler, S., Menut, L., and Huneeus, N.: Pathways for wintertime deposition of anthropogenic light-absorbing particles on the Central Andes cryosphere, Environ. Pollut., 272, 115 901, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115901, 2021b.

Lapere, R., Menut, L., Mailler, S., and Huneeus, N.: Seasonal variation in atmospheric pollutants transport in central Chile: dynamics and consequences, Atmos. Chem. Phys., 21, 6431–6454, doi: 10.5194/acp-21-6431-2021, 2021c.

Lapere, R., Huneeus, N., Mailler, S., Menut, L., and Couvidat, F.: Meteorological export and deposition fluxes of black carbon on glaciers of the central Chilean Andes, Atmospheric Chemistry and Physics, 23, 1749–1768, doi: 10.5194/acp-23-1749-2023, URL `https://acp.copernicus.org/articles/23/1749/2023/`, 2023.

Mailler, S., Menut, L., Khvorostyanov, D., Valari, M., Couvidat, F., Siour, G., Turquety, S., Briant, R., Tuccella, P., Bessagnet, B., Colette, A., Létinois, L., Markakis, K., and Meleux, F.: CHIMERE-2017: from urban to hemispheric chemistry-transport modeling, Geoscientific Model Development, 10, 2397–2423, doi: 10.5194/gmd-10-2397-2017, 2017.

Mingari, L. A., Collini, E. A., Folch, A., Báez, W., Bustos, E., Osores, M. S., Reckziegel, F., Alexander, P., and Viramonte, J. G.: Numerical simulations of windblown dust over complex terrain: the Fiambalá Basin episode in June 2015, Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 6759–6778, doi: 10.5194/acp-17-6759-2017, 2017.

Molina, L. T., Gallardo, L., Andrade, M., Baumgardner, D., Borbor-Cordova, M., Borquez, R., Casassa, G., Cereceda-Balic, F., Dawidowski, L., Garreaud, R., Huneeus, N., Lambert, F., McCarty, J., Mc Phee, J., Mena-Carrasco, M., Raga, G., Schmitt, C., and Schwarz, J.: Pollution and its Impacts on the South American Cryosphere, Earth's Future, 3, 345–369, doi: 10.1002/2015EF000311, 2015.

Rea, G., Turquety, S., Menut, L., Briant, R., Mailler, S., and Siour, G.: Source contributions to 2012 summertime aerosols in the Euro-Mediterranean region, Atmospheric Chemistry and Physics, 15, 8013–8036, doi: 10.5194/acp-15-8013-2015, 2015.

Turquety, S., Menut, L., Bessagnet, B., Anav, A., Viovy, N., Maignan, F., and Wooster, M.: APIFLAME v1.0: High resolution fire emission model and application to the Euro-Mediterranean region, Geoscientific Model Development, 7, 587–612, doi: 10.5194/gmd-7-587-2014, 2014.

Ulke, A. G., Torres Brizuela, M. M., Raga, G. B., and Baumgardner, D.: Aerosol properties and meteorological conditions in the city of Buenos Aires, Argentina, during the resuspension of volcanic ash from the Puyehue-Cordón Caulle eruption, Natural Hazards and Earth System Sciences, 16, 2159–2175, doi: 10.5194/nhess-16-2159-2016, 2016.