Simulations du Laki en 1783 avec CHIMERE

Laurent MENUT[1]

[1]LMD, Laboratoire de Météorologie Dynamique, UMR CNRS 8539, Ecole Polytechnique, Ecole Normale Supérieure, Université P.M.Curie, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Palaiseau, France

imulations du Laki en 1783 avec CHIMERE

1 Introduction

A partir des archives historiques, l'observation quotidienne de brouillard et neige a été recensée pour différents sites en France et pour l'année 1783. Ces sites, au nombre de 17, sont positionnés sur la carte de la Figure 1 et leurs coordonnées sont reportées dans le Table 1 .

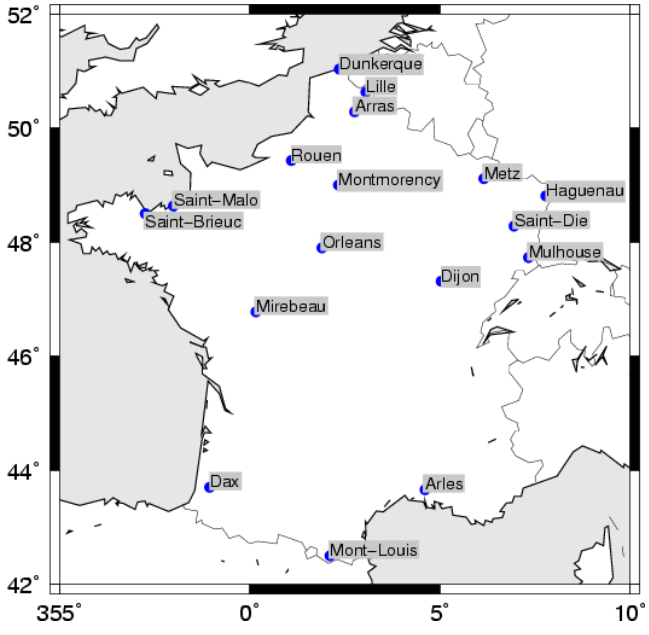


Figure 1. *Les sites d'observations du brouillard*

Ces données indiquent principalement si un brouillard a pu être observé pour une journée de l'année 1783. Afin d'avoir une information synthétique sur l'année, ces données sont présentées sous forme agrégées par semaine. Pour chaque semaine, on compte le nombre de jours ou un brouillard a été vu. Cette information ne permet pas de savoir la nature de ce brouillard, c'est à dire s'il est lié à l'éruption du Laki ou s'il est d'ordre météorologique.

Correspondence to: Laurent Menut, menut@lmd.polytechnique.fr

Region	Site	Longitude	Latitude
West	Saint-Malo	-2.00	48.63
	Saint-Brieuc	-2.75	48.5
North	Dunkerque	2.36	51.03
	Lille	3.05	50.63
	Arras	2.76	50.28
Center	Rouen	1.10	49.43
	Montmorency	2.33	49.0
	Orleans	1.90	47.9
	Mirebeau	0.16	46.78
East	Metz	6.16	49.11
	Haguenau	7.78	48.81
	Saint-Die	6.95	48.28
	Mulhouse	7.33	47.73
	Dijon	5.03	47.31
South	Dax	-1.05	43.7
	Mont-Louis	2.11	42.5
	Arles	4.61	43.66

Table 1. *Liste des sites*

La Figure 2 présente des séries chronologiques des occurences des brouillards observés par semaine. Chaque figure reprend les différentes stations organisées en sous régions sur la France. La Figure "west" montre les observations de Saint Brieuc et Saint Malo. Le nombre de cas de brouillard est faible et aucune semaine de la période n'a vu de cas de brouillard sur plus de 4 jours. De plus, même si les sites sont très proches, il n'y a pas coincidence temporelle entre les observations. On peut donc en déduire que le panache du volcan n'a probablement pas atteint cette région de l'Ouest de la France.

Pour les autres sous-régions, l'occurence des brouillards montrent des variabilités temporelles assez similaires. Un premier pic est observé autour de la semaine 25, c'est à dire du 15 au 21 juin 1783. Un deuxième pic est observé autour de la semaine 34 c'est à dire du 17 au 23 Aout. On note encore deux pics majeurs autour des semaines 42 (12 au 18

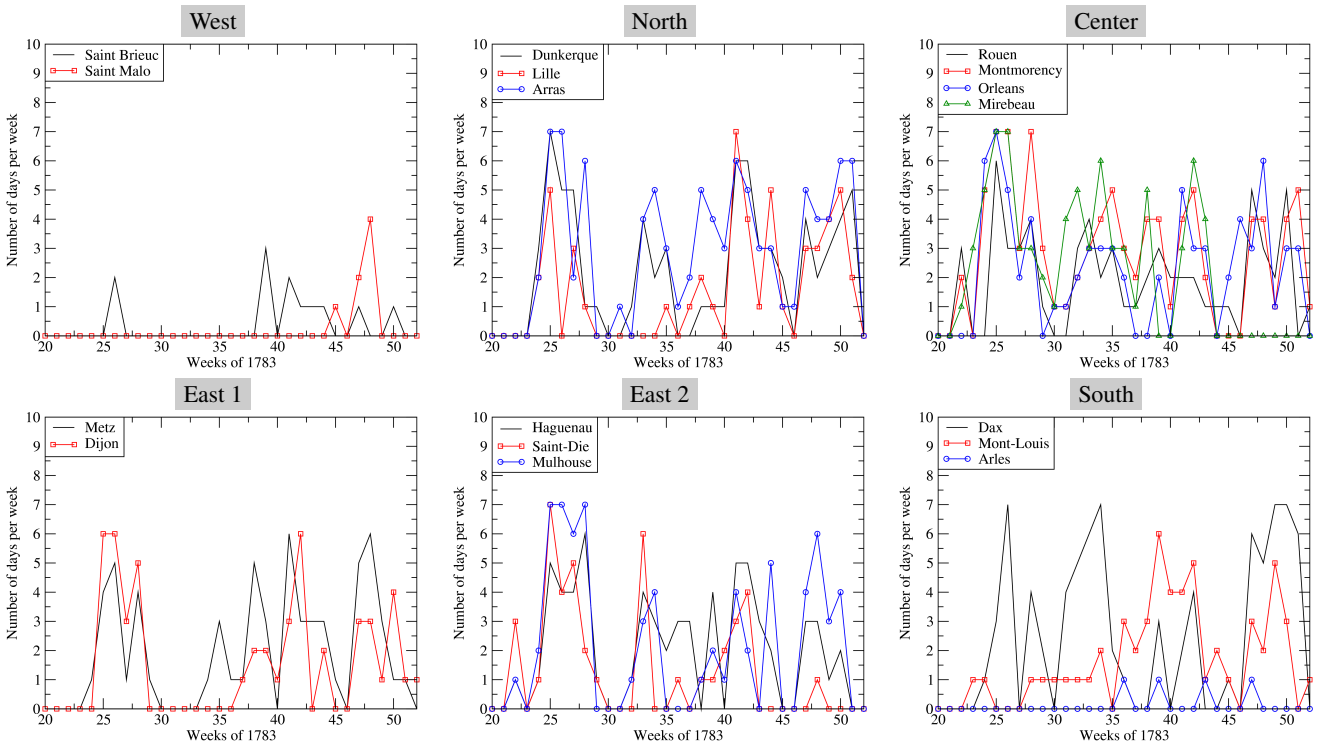


Figure 2. *Nombre de jours par semaine pour lesquels un brouillard (météorologique ou volcanique) a été observé.*

octobre) et 48 (23 au 29 novembre).

On note donc principalement:

- Le nombre de jours par semaine d'observations de brouillard est très variable d'un site à l'autre, même pour des villes relativement proches (comme le domaine "west"). Cela montre la limite des observations historiques, une non-observation ne signifiant pas qu'il n'y avait pas de brouillard: soit l'observateur n'a rien relevé ce jour là, soit la couverture nuageuse "naturelle" ne permettait pas de conclure à un brouillard.
- Globalement, on relève quatre périodes communes à l'ensemble des sites, pendant lesquelles des brouillards significatifs sont observés. Par rapport aux périodes d'émissions, ces maxima coicident avec les éruptions majeures puis un temps de transport d'une dizaine de jours.

2 Modélisation de l'éruption et du transport du panache

Dans différents articles publiés ces dernières années, plusieurs simulations de l'éruption ont déjà été réalisées, principalement avec des modèles globaux. Par exemple, Stevenson et al. (2003) présente une simulation du panache de SO_2 réalisée avec le modèle Lagrangien STOCHEM (MetOffice). Ce travail se focalise principalement sur la conversion du SO_2 et le devenir chimique des émissions, à la fois pendant le transport et pour le dépôt. La météorologie utilisée est un scénario climatique représentatif des années 1990, à défaut d'avoir des renseignements sur la météorologie à utiliser en forcage: les auteurs ne s'attendent donc pas à pouvoir représenter le panache jour à jour mais plutôt à reproduire l'ensemble de la circulation sur les années 1783 et 1784.

2.1 Emissions

Les travaux de Fiacco et al. (1994) à Thordarson and Self (2003) présentent la séquence des émissions pendant l'éruption, de Mai 1783 à Février 1784. Pour la période estivale de 1783, six grandes phases éruptives sont définies, avec une activité explosive et donc l'injection de gaz et particules dans l'atmosphère. Thordarson and Self (2003) présente une carte de dates de premières apparitions de brouillards liés à l'éruption du Laki. Ces données ainsi que l'équivalent estimé par E.Garnier dans le cadre de CHEDAR sont présentées sur la Figure 3. Cette seconde carte présente aussi les décès supplémentaires recensés et imputables au Laki. Ces informations peuvent être comparées au récent travail de Schmidt et al. (2011) qui calcule l'excès de risque relatif de mortalité en Europe, avec une densité de population actuelle, dans le cas où le Laki entre en éruption. Les auteurs concluent que

l'on pourrait alors subir 140 000 décès supplémentaires en Europe.

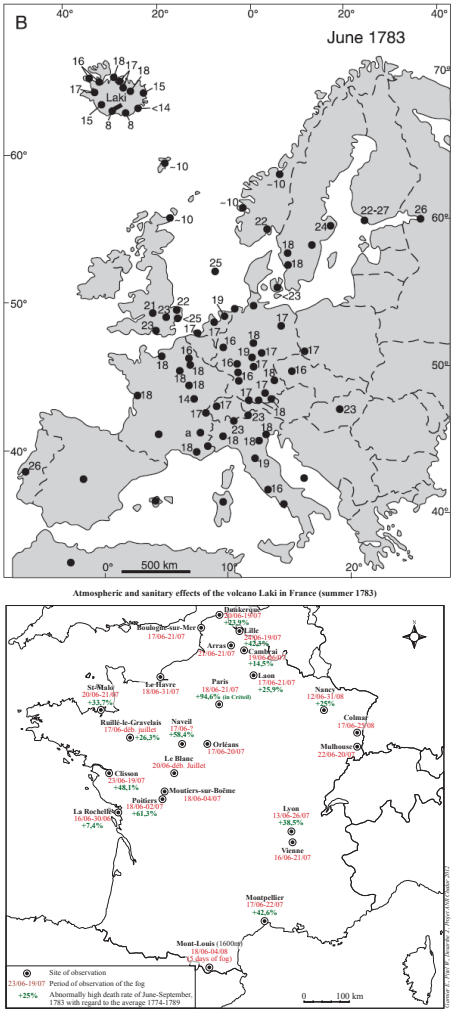


Figure 3. *Les dates de première apparition du panache volcanique telles qu'elles ont pu être localement observées en Europe. (haut) Figure extraite de Thordarson and Self (2003), (bas) Recensement réalisé par E.Garnier dans le cadre du projet CHEDAR.*

Stevenson et al. (2003) présente une série chronologique des émissions à partir du 8 juin 1783, premier jour de l'éruption. Cela permet d'avoir une première estimation des masses émises en fonction des différentes phases éruptives. Ces données ont été croisées avec celles présentées dans Thordarson and Self (2003) pour construte la série chronologique de flux émis.

Pour une modélisation correcte du transport à longue distance, la hauteur d'injection est un paramètre crucial. Stevenson et al. (2003) réalise deux scénarios différents:

- "Lo": les émissions sont distribuées de manière homogène de la surface à 300 hPa (≈ 9 km).
- "Hi" ou 25% du SO_2 est émis entre la surface et 700hPa (≈ 3km) et les 75% restants autour de la tropopause (entre 300 et 175 hPa).

Les auteurs considèrent que le scénario le plus probable est certainement "Hi" sachant que:

- les phases d'émissions correspondent à des phases explosives, et non pas à unn dégazage passif (alors près de la surface uniquement),
- les observations globales ont montré que le panache avait un impact climatique longue durée (plusieurs années), une grande partie a donc dûe être émise dans la stratosphère pour permettre un temps de résidence de plusieurs mois dans l'atmosphère.

Dans le cadre de CHEDAR, les émissions seront sous la forme de traceurs passifs aux propriétés identiques à celles du H_2SO_4. On considérera les masses émises à partir du recensement de Stevenson et al. (2003). La ventilation temporelle est décrite dans le Table 2.

Date (1783)	Masse (Mt)
8-10 juin	17.0
11-13 juin	27.6
14-21 juin	38.2
25 juin - 1 juillet	22.1
9-21 juillet	18.2
29 juillet - 9 aout	26.9
31 aout - 4 septembre	15.8
7-14 septembre	12.0
24-29 septembre	9.0
25-30 octobre	6.0

Table 2. *Calendrier des masses émises, correspondantes aux principales éruptions explosives recensées par Stevenson et al. (2003). Les masses sont données en masse de sulfate et sont adaptées pour les flux de traceurs.*

Ces émissions seront injectées dans l'atmosphère sous la forme de deux traceurs différents, notés PT1 et PT2 dans la suite. On considèrera que pour chaque période, 20% de la masse est émise de manière homogène de la surface à 3000m (traceur PT1) et que les 80% restants seront émis entre 6000 et 9000m d'altitude (traceur PT2). Ces deux niveaux verticaux différents permettront de reproduire les hypothèses de hauteur d'injection telles que présentées dans Stevenson et al. (2003). Le choix de produire des traceurs particulaires permet de calculer ensuite une épaisseur optique que l'on pourra directement comparer aux mesures de visibilité, dénommées "brouillard" et présentées sur la Figure 2.

2.2 Transport et dépôt

Dans Yiou et al. (2014), il a été montré que l'année 2010 était un analogue raisonnable de la météorologie de 1783. Nous

allons donc utiliser ces champs météorologiques comme forcage pour le transport du panache volcanique. Pour l'hiver 1783-1784, on notera que c'est plutot l'hiver 2009-2010 qui est considéré comme un bon analogue, (D'Arrigo et al., 2011).

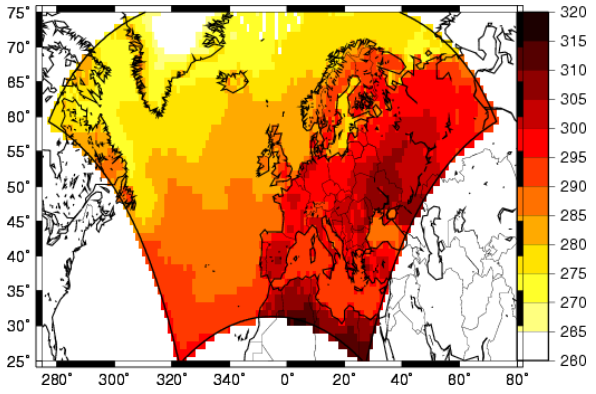


Figure 4. *Carte de température à 2m (K) pour le 20 juillet.*

Pour les moments clefs de l'éruption et du transport, des cartes de pression de surface sont présentées sur la Figure 4. Ces cartes reprennent les données de Kington (1988) et les calculs réalisés avec WRF.

La période du 1er Mai au 30 Octobre 2010 a été simulée avec le modèle WRF 3.5.1. Le domaine de simulation est présenté sur la Figure 4. Il inclut l'Islande avec le Laki, zone principale d'émissions, ainsi que l'intégralité de l'Europe. Le transport et les dépôts, sec et humide, sont ensuite calculés avec le modèle de chimie-transport CHIMERE (Menut et al., 2013). Pour le transport des traceurs, le domaine de simulation CHIMERE est identique au domaine de simulation WRF. Verticalement, 20 niveaux verticaux sont définis de la surface à 200 hPa.

3 Analyse des épaisseurs optiques

Les résultats des simulations sont présentés sous la forme de cartes et de séries chronologiques. Les cartes représentent le contenu intégré sur la colonne atmosphérique sous la forme d'épaisseurs optiques (AOD). Les séries chronologiques représentent les moyennes hebdomadaires d'AOD pour les sites d'observations présentés sur la Figure 1. On peut donc comparer directement la variabilité temporelle des données d'observations et des champs simulés.

3.1 Cartes d'épaisseurs optiques

Les cartes d'épaisseurs optiques sont présentées sur la Figure 5 pour neuf journées différentes. La journée du 10 juin montre un panache très concentré en Islande, localisé sur la source volcanique, avec un début d'advection vers le Nord-Ouest. Le 15 juin les vents dominants changent pour une direction vers l'Europe et la Scandinavie est tout d'abord affectées par le panache, conduisant à de fortes valeurs d'épaisseur optique. Le 20 juin, l'Europe de l'Ouest, dont la France, est à son tour sous ce panache volcanique. Cela correspond bien aux relevés historiques de surface pour les premières apparitions de panaches volcaniques sur la France.

Site	N_{obs}	Obs	Mod	R
Saint-Malo	26	0.038	2.000	-1.000
Saint-Brieuc	26	0.385	1.923	-0.853
Dunkerque	26	2.115	2.308	-0.069
Lille	26	1.308	2.346	-0.186
Arras	26	2.692	2.385	-0.180
Rouen	26	1.846	2.385	0.164
Montmorency	26	2.885	2.269	0.042
Orleans	26	2.077	2.077	**0.403**
Mirebeau	26	2.885	2.077	**0.327**
Haguenau	26	2.192	2.192	-0.115
Saint-Die	26	1.577	2.077	**0.196**
Mulhouse	26	2.038	1.923	0.151
Dijon	26	1.423	2.192	0.075
Dax	26	2.000	1.846	**0.212**
Mont-Louis	26	1.577	1.577	-0.344
Arles	26	0.115	1.846	-0.955

Table 3. *Corrélations entre le nombre de jours par semaine de brouillards observés et d'AOD modélisé dépassant une valeur seuil de 0.05.*

3.2 Comparaisons entre observations et modèle

Le Table 3 présente les corrélations calculées à partir des séries chronologiques d'observations et de modélisation de l'AOD sur des échelles de temps hebdomadaires. Le nombre d'observations N_{obs} est constant et égal à 26, correspondant au nombre de semaines entre début juin et fin octobre.

La valeur "Obs" correspond à la moyenne du nombre de jours par semaine ou un brouillard a été observé sur les différents sites en France. On note que cette moyenne est principalement comprise entre 2 et 3.

La valeur "Mod" correspond au même type de comptage mais réalisé à partir des valeurs horaires d'épaisseur optique modélisée. Si au moins une fois par jour, la valeur de l'AOD est supérieure à une valeur seuil, on compte une observation de brouillard pour la journée. La valeur seuil est AOD_t=0.05.

Les valeurs des corrélations sont, pour la plupart, faibles. Les maxima sont relevés à Mirebeau (R=0.327) et Orléans (R=0.417). On retrouve des valeurs faibles à l'Ouest de la France ou un panache a été simulé mais ou peu d'évènements de brouillards ont été observés.

La Figure 6 reprend les comptages d'observations par semaine sous forme de séries chronologiques avec les observations et l'AOD modélisé. La corrélation la plus faible est calculée à Saint Malo ou une épaisseur optique non négligeable est calculée mais pas observée. A Lille, on note

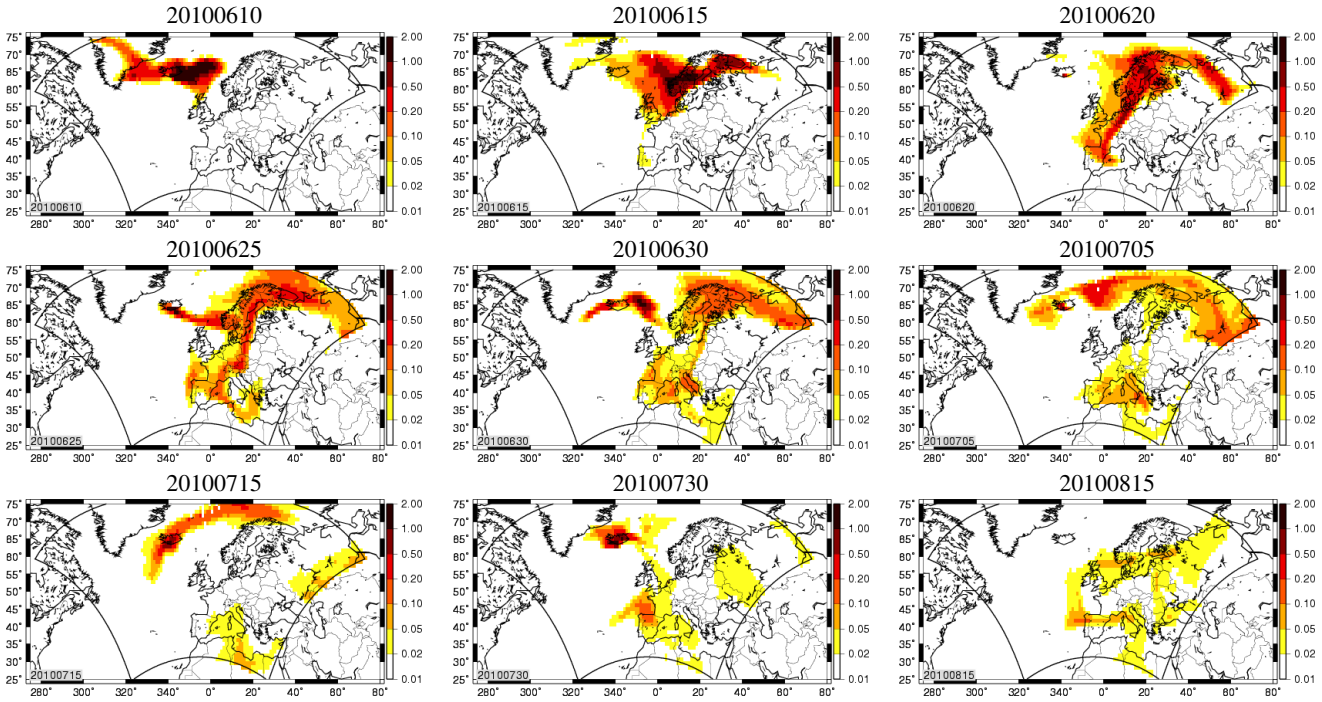


Figure 5. *Cartes d'épaisseur optique produite par les traceurs.*

que le premier pic de la semaine 24 est bien représenté. Peu d'observations de brouillard sont notées entre les semaines 28 et 40 alors que le modèle calcule des épaisseurs optiques significatives sur cette période.

4 Analyse des concentrations de surface

4.1 Séries chronologiques de concentrations de surface

Par rapport à la liste des stations présentée dans le Table 1, nous présentons ici uniquement une station par région. On considère que le transport, à ces échelles de temps et d'espace, permet de considérer qu'une station est représentative de son environnement sur quelques dizaines de kilomètres. On présentera donc ici les résultats pour Saint-Malo (West), Lille (North), Orleans (Center), Mulhouse (East) et Dax et Arles (South).

La Figure 7 présente les résultats pour les deux traceurs émis dans la couche limite (BL) et la troposphère libre (FT). Les données horaires sont moyennées sur une semaine, afin de pouvoir être comparées aux observations de brouillard présentées sur la Figure 2. On retrouve sur ces séries chronologiques les pics principaux qui avaient été relevés dans les données historiques. On ne peut comparer ici directement l'intensité, puisque les données historiques étaient en comptage de jours alors que l'on a ici des valeurs de concentrations de surface. Le résultat important est de voir que l'on retrouve globalement la temporalité des évènements observés.

4.2 Profils verticaux de concentrations de PM_{10}

La Figure 8 présente quelques exemples de profils verticaux pour ces concentrations de traceurs. Pour les sites de Saint-Malo, Orleans, Mulhouse et Dax, les profils sont présentés pour les dates du 20 juin, 25 juin, 30 juin et 15 juillet. On note que même si les traceurs ont été émis à des latitudes très différentes en Islande, leurs concentrations montrent des pics aux mêmes niveaux d'altitude après un transport à longue distance. On peut donc considérer qu'il y'a eu un mélange vertical important juste après l'émission, conduisant à ces profils verticaux relativement similaires entre les deux traceurs.

Les forts gradients verticaux montrent aussi qu'il n'y a pas de raison, a priori, d'avoir le même type de corrélation entre les concentrations de surface et l'épaisseur optique, cette dernière représentant une quantité intégrée sur toute la colonne atmosphérique modélisée.

4.3 Comparaisons observations et simulation des PM_{10}

On reprend la méthode de comptage des évènements par semaine, mais cette fois avec les concentrations de surface de PM_{10}. Les corrélations sont présentées dans le Table 4. On note que les corrélations sont meilleures que lorsque le calcul est fait avec les épaisseurs optiques. Cela peut-être dû

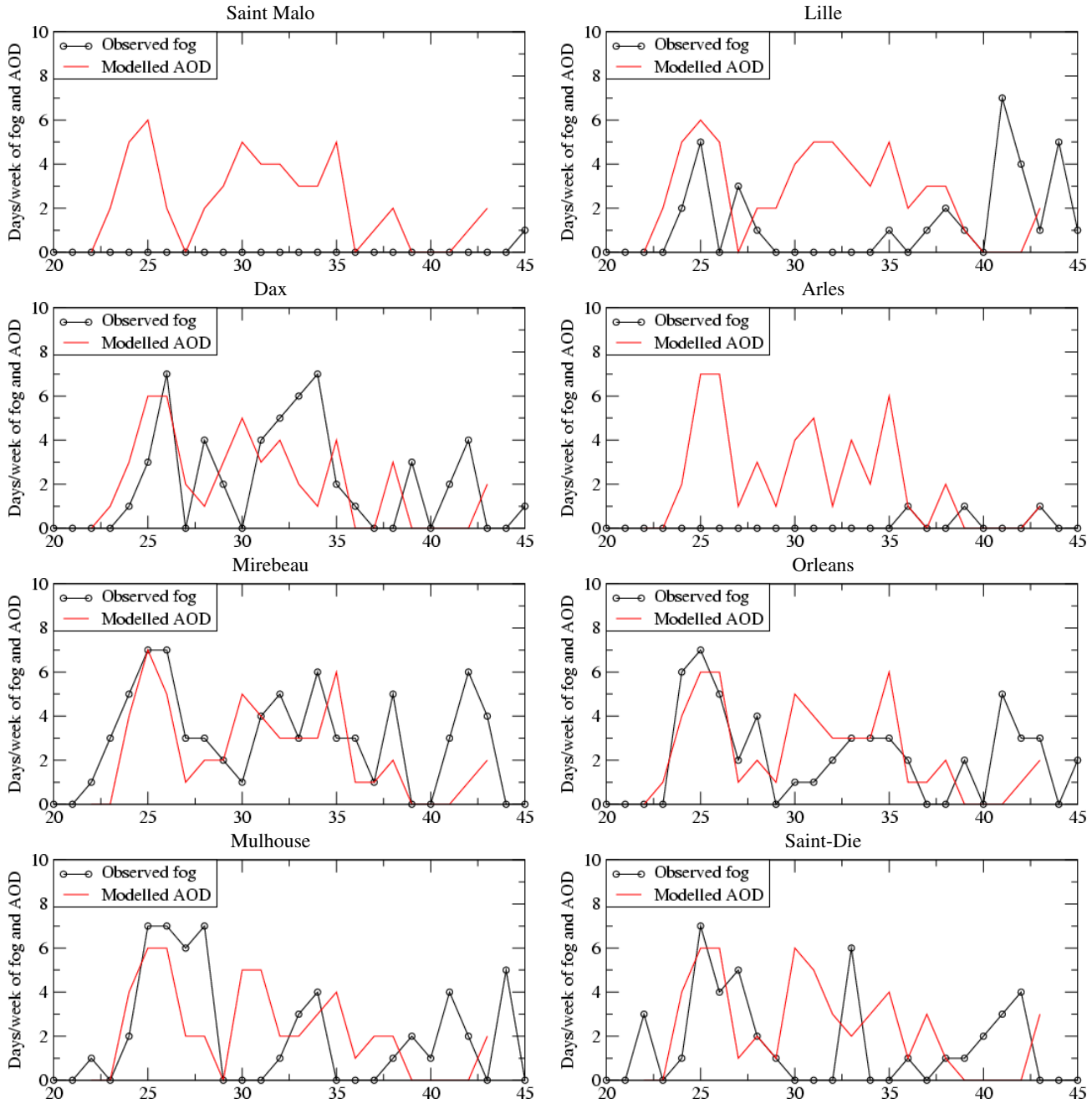


Figure 6. *Comparaison des observations de brouillard et des épaisseurs optiques simulées. Les AOD sont considérées comme significatives si leur valeur dépasse une valeur seuil.*

aux observations en elles-mêmes, faites visuellement et à la surface, où l'observateur sera plus sensible à un brouillard dans la couche limite qu'en altitude.

La Figure 9 présente des séries chronologiques de comptage d'occurence de brouillard observé et de dépassement de seuil sur les PM_{10} de surface. En comparaison avec les mêmes figures faites avec les AOD, on note que l'on a une meilleure modélisation des pics observés pendant la deuxième période de transport, c'est à dire pendant les semaines 30 à 35. Pour les sites ou il n'y avait pas du tout d'observations de brouillard, comme Saint Malo et Arles, la comparaison reste mauvaise, le modèle présentant des valeurs de concentrations de surface non négligeables.

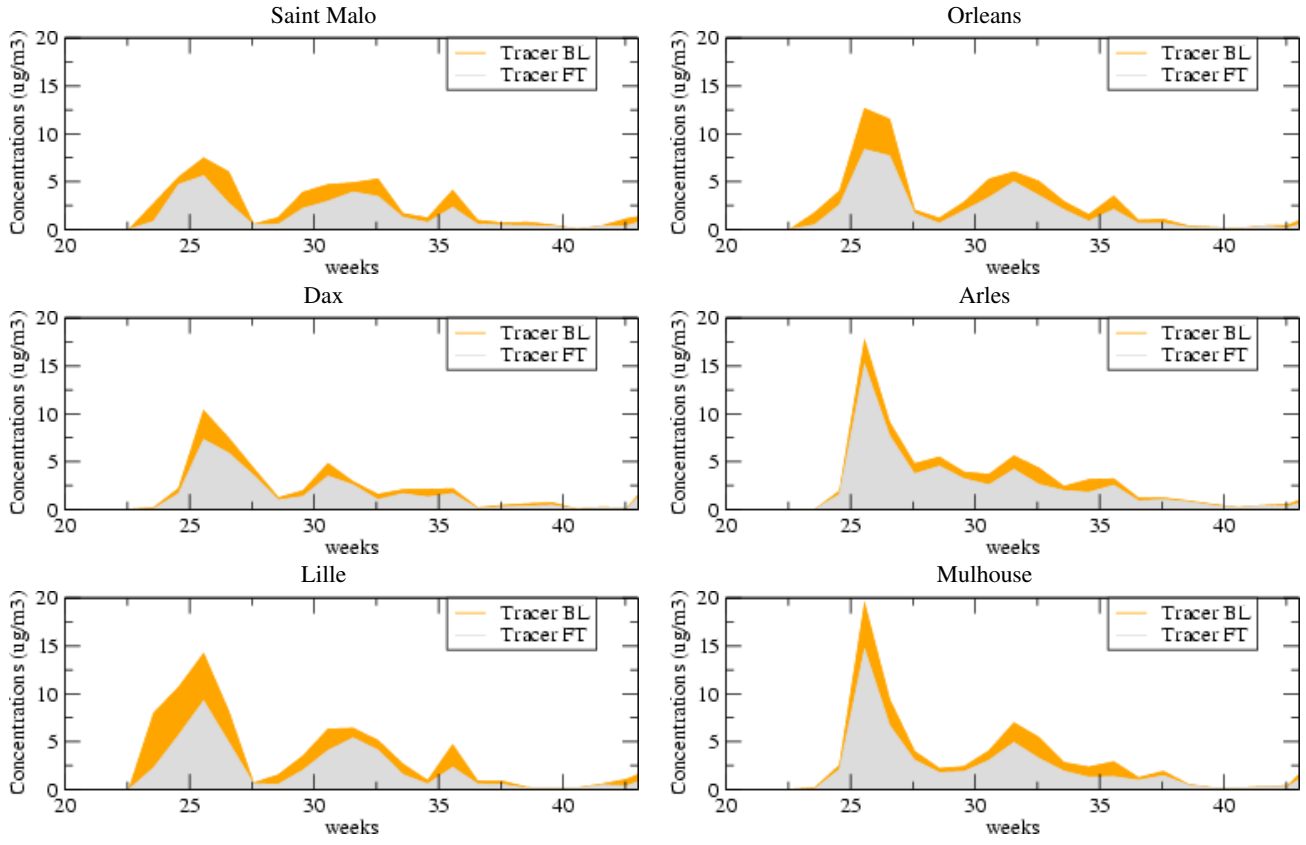


Figure 7. *Séries chronologiques de concentrations de surface pour les deux traceurs émis: dans la couche limite (BL) et dans la troposphère libre (FT).*

Site	N_{obs}	Obs	Mod	R
Saint-Malo	26	0.038	1.269	-1.000
Saint-Brieuc	26	0.385	1.769	-0.634
Dunkerque	26	2.115	1.923	**0.241**
Lille	26	1.308	1.923	0.056
Arras	26	2.692	1.923	-0.049
Rouen	26	1.846	1.923	**0.326**
Montmorency	26	2.885	1.615	**0.273**
Orleans	26	2.077	1.846	**0.528**
Mirebeau	26	2.885	1.808	**0.386**
Metz	26	1.769	1.846	-0.156
Haguenau	26	2.192	1.885	-0.058
Saint-Die	26	1.577	1.731	0.169
Mulhouse	26	2.038	1.808	0.135
Dijon	26	1.423	1.962	0.165
Dax	26	2.000	1.654	0.136
Mont-Louis	26	1.577	1.731	-0.450
Arles	26	0.115	2.077	-0.965

Table 4. *Corrélations entre le nombre de jours par semaine de brouillards observés et les concentrations de surface de PM_{10} modélisé dépassant une valeur seuil de 5 $\mu g\ m^{-3}$.*

5 Conclusions

Une simulation de plusieurs mois et représentant la période de Mai à Octobre 1783 a été réalisée avec les modèles WRF et CHIMERE. Le domaine permet de représenter l'Islande et l'Europe et la météorologie utilisée est cella de 2010. La seule source émise est un traceur passif, produit en Islande et suivant une chronologie qui décrit une éruption en plusieurs périodes très distinctes.

Une comparaison entre des observations et les résultats de simulation est réalisée pour l'ensemble de la période simulée. Un premier calcul a permis de compter le nombre de jours par semaine ou un brouillard est observé. On note une très grande variabilité d'un site à l'autre, montrant certainement que les observations sont très subjectives et que certains panaches ont pu être présents mais non observés. En effet, le transport d'un paanche venant du Laki s'est forcément diffusé horizontalement pendant son transport et s'il est clairement observé à un endroit, il devrait l'être sur un site distant de quelques dizaines de kilomètres.

La modélisation a consisté à émettre au Laki deux traceurs différents mais avec la même temporalité. Par rapport aux masses totales émises, 20% sont émis entre 0 et 3000m

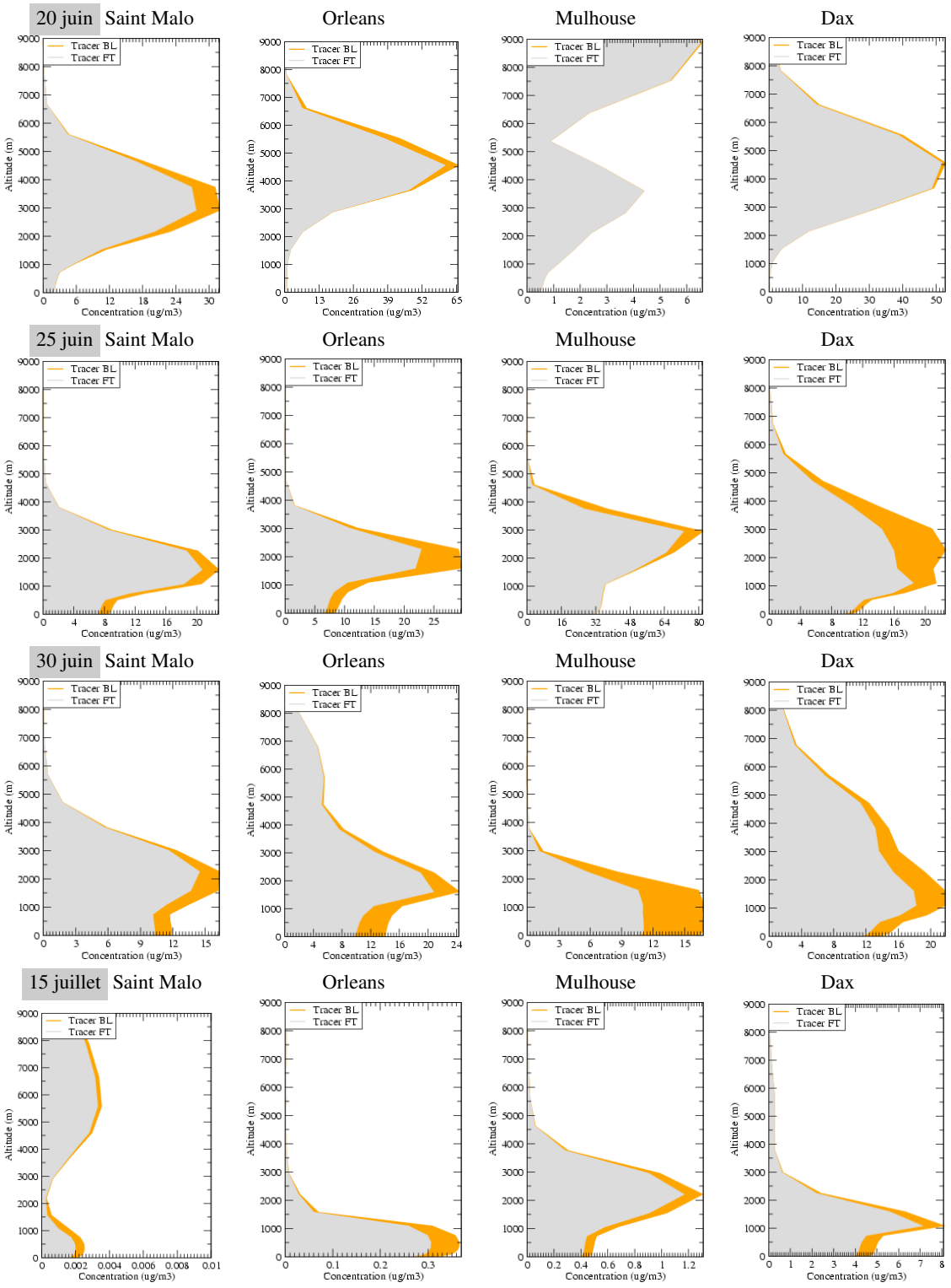


Figure 8. *Profils verticaux ds traceurs BL et FT pour les dates des 20, 25 et 30 juin, 15 juillet. Les profils sont extraits pour les mailles du modèles correspondantes aux sites de Saint Malo, Orleans, Mulhouse et Dax.*

d'altitude et 80% entre 6000 et 9000m d'altitude. Les séries chronologiques sur les sites en France montre que l'on retrouve la même proportion en surface et plusieurs jours après l'émission, preuve d'un mélange vertical efficace pen-

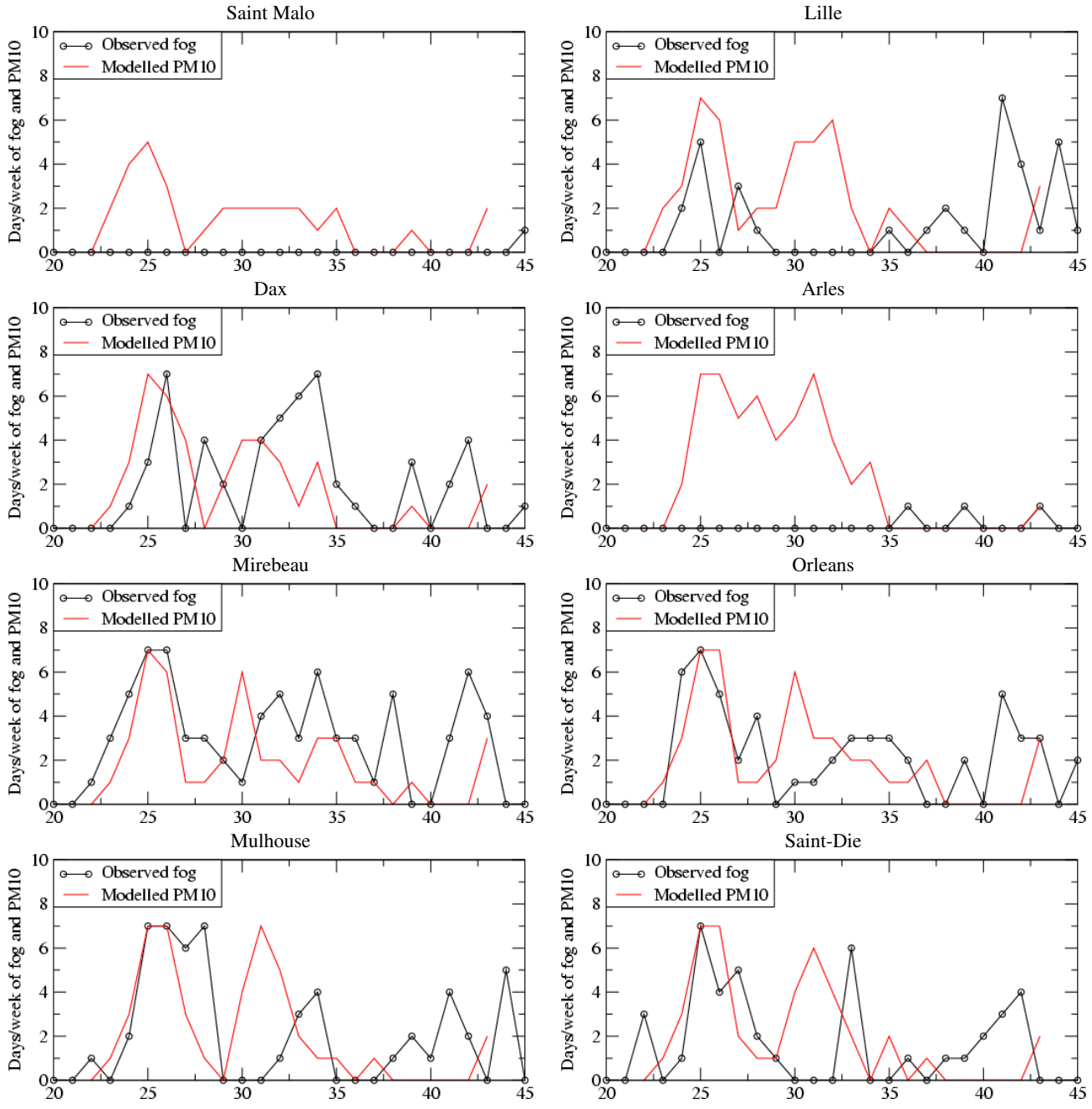


Figure 9. *Comparaison des observations de brouillard et des concentrations de surface de PM_{10} simulées. Les concentrations de PM_{10} sont considérées comme significatives si leur valeur dépasse une valeur seuil de 5 $\mu g\ m^{-3}$.*

dant le transport. Les profils verticaux confirment cette hypothèse de mélange puisque l'on retrouve le traceur émis en surface à des altitudes pouvant aller jusqu'à 5000m au dessus de la France. De même le traceur émis en altitude est simulé en surface.

Les concentrations de surface de particules et l'épaisseur optique modélisées ont été comparés aux mesures. Les concentrations de surface et de PM_{10} ont été ramenées à un nombre d'occurences par semaine afin d'être comparables aux mesures. On note que le premier pic observé, de la semaine 24 est correctement simulé. Le deuxième pic, de la semaine 30, est simulé ou non en fonction des sites. Pour la période allant de septembre à octobre, le modèle sous-estime les concentrations et épaisseurs optiques alors que les observations notent encore la présence de brouillards. On peut donc s'attendre à ce que la météorologie de 2010 soit un ana-

logue suffisant et raisonnable pour les mois de juin et juillet mais insuffisant pour la période septembre et octobre.

References

D'Arrigo, R., Seager, R., Smerdon, J., and LeGrande, A.: The anomalous winter of 1783-1784: Was the Laki eruption or analog of the 2009-2010 winter to blame?, Geophysical Research Letters, 38, L05 706, doi:10.1029/2011GL046696, 2011.

Fiacco, R., Thordarson, T., Germani, M., Self, S., Palais, J., Whitlow, S., and Grootes, P.: Atmospheric aerosol loading and transport due to the 1783-84 Laki eruption in Iceland, interpreted from ash particles and acidity in the GISP2 ice core, Quaternary Research, 42, 231–240, 1994.

Kington, J.: The weather of the 1780s over Europe, Cambridge University Press, Cambridge, New York, 1988.

Menut, L., Bessagnet, B., Khvorostyanov, D., Beekmann, M., Blond, N., Colette, A., Coll, I., Curci, G., Foret, F., Hodzic, A., Mailler, S., Meleux, F., Monge, J., Pison, I., Siour, G., Turquety, S., Valari, M., Vautard, R., and Vivanco, M.: CHIMERE 2013: a model for regional atmospheric composition modelling, Geoscientific Model Development, 6, 981–1028, doi:10.5194/gmd-6-981-2013, 2013.

Schmidt, A., Ostro, B., Carslaw, K., Wilson, M., Throdarson, T., Mann, G., and Simmons, A.: Excess mortality in Europe following a future Laki-style Icelandic eruption, PNAS, 108, 15 710–15 715, 2011.

Stevenson, D. S., Johnson, C. E., Highwood, E. J., Gauci, V., Collins, W. J., and Derwent, R. G.: Atmospheric impact of the 1783-1784 Laki eruption: Part I Chemistry modelling, Atmospheric Chemistry and Physics, 3, 487–507, doi:10.5194/acp-3-487-2003, 2003.

Thordarson, T. and Self, S.: Atmospheric and environmental effects of the 1783-84 Laki eruption: A review and reassessment, Journal of Geophysical Research, 108, 4011, doi:10.1029/2001JD002042, 2003.

Yiou, P., Boichu, M., Vautard, R., Vrac, M., Jourdain, S., Garnier, E., Fluteau, F., and Menut, L.: Ensemble meteorological reconstruction using circulation analogues of 1781-1785, Climate of the Past, 10, 797–809, doi:10.5194/cp-10-797-2014, 2014.