Pollution atmosphérique
ISSN : 2268-3798
Publisher : Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique

231-232 | 2016
Varia

La campagne Passy-2015 : dynamique atmosphérique et qualité de l'air dans la vallée de l'Arve

The Passy-2015 field experiment: atmospheric dynamics and air quality in the Arve River Valley

Alexandre PACI, Chantal STAQUET, Julie ALLARD, Hélène BARRAL, Guylaine CANUT, Jean-Martial COHARD, Jean-Luc Jaffrezo, Pauline MARTINET, Tiphaine SABATIER, Florence TROUDE, Gabriele ARDUINI, Frédéric BURNET, Christophe BRUN, Charles CHEMEL, Alain DABAS, Jean-Marie DONIER, Olivier GARROUSTE, Rémi GUILLOT, Yann LARGERON, Dominique LEGAIN, William MAUREL, Diane TZANOS, Sébastien BARRAU, Manuel BARRET, Joël BARRIE, Anne BELLEUDY, Gilles BOUHOURS, Thierry BOURRIANNE, Florie CHEVRIER, Thierry DOUFFET, Jean-Michel ETCHEBERRY, Laurent GUSTAVE, Marie MAZOYER, Stéphane MERCIER, Éric MOULIN, Yann PELLAN, Bruno PIGUET, Quentin RODIER and Isabella ZIN

https://www.peren-revues.fr/pollutionatmospherique/5903

DOI : 10.4267/pollution-atmospherique.5903

Electronic reference
Alexandre PACI, Chantal STAQUET, Julie ALLARD, Hélène BARRAL, Guylaine CANUT, Jean-Martial COHARD, Jean-Luc Jaffrezo, Pauline MARTINET, Tiphaine SABATIER, Florence TROUDE, Gabriele ARDUINI, Frédéric BURNET, Christophe BRUN, Charles CHEMEL, Alain DABAS, Jean-Marie DONIER, Olivier GARROUSTE, Rémi GUILLOT, Yann LARGERON, Dominique LEGAIN, William MAUREL, Diane TZANOS, Sébastien BARRAU, Manuel BARRET, Joël BARRIE, Anne BELLEUDY, Gilles BOUHOURS, Thierry BOURRIANNE, Florie CHEVRIER, Thierry DOUFFET, Jean-Michel ETCHEBERRY, Laurent GUSTAVE, Marie MAZOYER, Stéphane MERCIER, Éric MOULIN, Yann PELLAN, Bruno PIGUET, Quentin RODIER and Isabella ZIN, « La campagne Passy-2015 : dynamique atmosphérique et qualité de l'air dans la vallée de l'Arve », *Pollution atmosphérique* [Online], 231-232 | 2016, Online since 06 novembre 2017, connection on 02 mars 2026. URL : https://www.peren-revues.fr/pollutionatmospherique/5903

Copyright
CC-BY

La campagne Passy-2015 : dynamique atmosphérique et qualité de l'air dans la vallée de l'Arve

The Passy-2015 field experiment: atmospheric dynamics and air quality in the Arve River Valley

Alexandre PACI, Chantal STAQUET, Julie ALLARD, Hélène BARRAL, Guylaine CANUT, Jean-Martial COHARD, Jean-Luc Jaffrezo, Pauline MARTINET, Tiphaine SABATIER, Florence TROUDE, Gabriele ARDUINI, Frédéric BURNET, Christophe BRUN, Charles CHEMEL, Alain DABAS, Jean-Marie DONIER, Olivier GARROUSTE, Rémi GUILLOT, Yann LARGERON, Dominique LEGAIN, William MAUREL, Diane TZANOS, Sébastien BARRAU, Manuel BARRET, Joël BARRIE, Anne BELLEUDY, Gilles BOUHOURS, Thierry BOURRIANNE, Florie CHEVRIER, Thierry DOUFFET, Jean-Michel ETCHEBERRY, Laurent GUSTAVE, Marie MAZOYER, Stéphane MERCIER, Éric MOULIN, Yann PELLAN, Bruno PIGUET, Quentin RODIER and Isabella ZIN

OUTLINE

Introduction
1. Contexte à l'origine de la campagne
   1.1. La qualité de l'air à proximité de la ville de Passy
   1.2. Le projet DECOMBIO
   1.3. Particularités géographiques et météorologie
2. La campagne de mesure Passy-2015
   2.1. Objectifs
   2.2. Période d'observation
   2.3. Sites de mesure et instrumentation
3. Quelques résultats issus des périodes d'observation intensive
   3.1. Les POI de février 2015
   3.2. Visibilité et brouillard lors de la POI1
   3.3. Relation entre [PM_{10}] et le profil vertical de température
4. Conclusion et perspectives

TEXT

Introduction

1 Lors d'une situation anticyclonique hivernale, les sites urbanisés des vallées alpines présentent fréquemment des niveaux de pollution élevés, dépassant les seuils réglementaires. Une couche d'air froid se forme en effet au fond de la vallée et piège les polluants émis au niveau du sol, conduisant à une mauvaise qualité de l'air. Des évènements de forte pollution atmosphérique sont ainsi enregistrés chaque hiver dans la vallée de l'Arve autour de la ville de Passy, en Haute-Savoie.

2 L'origine de ces couches d'air froid en fond de vallée est bien comprise conceptuellement. Lors d'une situation anticyclonique hivernale, qui peut s'établir pendant plusieurs jours voire plusieurs semaines, les vents en altitude sont généralement faibles, de sorte que leur impact dans la vallée peut être supposé insignifiant (Whiteman, 2000). L'arrivée et la mise en place de cet anticyclone s'accompagnent d'une advection d'air chaud en altitude. La dynamique atmosphérique à l'intérieur de la vallée est alors dominée par les vents locaux de pente et de vallée, qui induisent, la nuit et en hiver, un transport d'air froid vers le fond de la vallée dans ces conditions (Largeron et Staquet, 2016a). Le refroidissement net du fond de vallée contribue également à l'accumulation d'air froid. En conséquence, du fait de ces trois processus, la température augmente avec l'altitude dans les basses couches[1], à l'inverse de ce qui est rencontré usuellement. Cette couche stable, appelée couche d'inversion et dans laquelle s'accumulent les polluants, induit un découplage entre la dynamique locale dans la vallée et la dynamique d'altitude qui renforce le phénomène.

3 La pollution hivernale dans la vallée de l'Arve autour de la ville de Passy est surtout due aux particules en suspension. Les sources de ces particules sont principalement la combustion de biomasse liée au chauffage au bois, le transport routier et les activités industrielles. Cependant, la prise en compte des émissions seules ne suffit pas à expliquer les concentrations de particules observées dans cette zone. L'hypothèse d'un rôle majeur de la dynamique atmosphérique a motivé le projet de recherche Passy, qui a débuté en 2014. La campagne de mesure décrite dans cet article s'inscrit dans ce projet.

4 Sur le plan international, les études et campagnes de mesure couplant dynamique et chimie par condition stable hivernale en terrain complexe ne sont pas si nombreuses. La campagne PCAPS (*Persistent Cold Air Pool Study*), menée à Salt Lake City de 2010 à 2012, avait pour double objectif de comprendre la formation des couches d'air froid en fond de vallée et leur influence sur la pollution urbaine (Silcox *et al.*, 2011 ; Lareau *et al.*, 2013). Plus récemment, la campagne KASCADE (*Katabatic winds and Stability over Cadarache for Dispersion of Effluents*, Duine *et al.*, 2016) avait un objectif proche dans la vallée de Cadarache, dans les Bouches-du-Rhône.

5 Quelques études ont concerné des situations stables hivernales en l'absence de pollution, comme la campagne COLPEX (*Cold-Air Pooling Experiment*), menée dans les collines anglaises pour étudier la formation des couches d'air froid en fond de vallée (Price *et al.*, 2011). Avant ces campagnes hivernales, les situations stables considérées étaient celles se formant la nuit, en été (campagne MAP, *Mesoscale Alpine Program*, Rotach *et al.*, 2004) ou en automne (campagne VTMX, *Vertical Turbulence and Mixing*, Doran *et al.*, 2002), avant d'être détruites au cours de la journée. Les conditions stables persistant plusieurs jours étaient donc peu étudiées. À notre connaissance, la campagne décrite dans cet article constitue la première campagne de mesure menée par condition stable persistante dans une vallée alpine en hiver en France.

6 L'article est organisé comme suit. Le contexte à l'origine de la campagne est tout d'abord précisé, avant de décrire la campagne de mesure. Quelques résultats sont ensuite présentés avant de conclure.

1. Contexte à l'origine de la campagne

1.1. La qualité de l'air à proximité de la ville de Passy

7 Les dépassements des seuils règlementaires concernant différents polluants affectant la qualité de l'air sont fréquents dans la vallée de l'Arve, particulièrement à proximité de la ville de Passy (Haute-Savoie, France). Cela concerne entre autres les particules en suspension de

diamètre inférieur à 10 µm (PM_{10}). Cette pollution en PM_{10} peut être suffisamment importante pour être perceptible à l'œil nu. Sur la figure 1, on distingue clairement au-dessus de la ville de Passy la séparation entre l'air pollué en PM_{10} dans les basses couches et l'air plus pur au-dessus.

Figure 1. Vue sur la vallée de l'Arve depuis le site de Plaine-Joux, à 1 360 m d'altitude sur une pente exposée sud, le 11 février 2015 à 16h45 locale, au cours du principal épisode de pollution de février 2015 (source : Atmo Auvergne-Rhône-Alpes). On distingue la ville de Passy en fond de vallée, l'autoroute du Mont-Blanc qui remonte vers Chamonix-Mont-Blanc en bas à gauche, le sommet arrondi et sombre de Tête Noire (1 747 m) en haut à gauche, et le sommet pointu et enneigé du Mont Joly (2 525 m) en arrière-plan.

View of the Arve River Valley from the south-oriented site of Plaine-Joux 1360 m above sea level, on 11 February 2015 at 4:45 pm local time, during the main pollution episode of February 2015 (photo by Atmo Auvergne-Rhône-Alpes). The city of Passy (Haute-Savoie, France) is visible at the val-ley bottom as well as the freeway to Chamonix-Mont-Blanc on the bottom left corner.

La valeur limite de la concentration en PM_{10} de l'air pour la protection de la santé est fixée à 50 µg/m^3 en moyenne journalière,avec un maximum de 35

jours par an de dépassement (article R221-1 du code de l'environnement). La figure 2 présente le nombre de jours présentant un dépassement de ce seuil de 50 µg/m^3 pour l'année 2015 sur différentes stations de la région Rhône-Alpes. Il est frappant de constater qu'en dehors des points de mesures situés dans la ville de Lyon, les trois stations les plus problématiques sur la base de ce critère sont situées dans la vallée de l'Arve sur une distance de moins de 30 km (Chamonix, Passy et Sallanches). Sur ces trois stations, Sallanches a deux fois plus de dépassement que Chamonix, et Passy près de quatre fois et demie. À Passy, le nombre de jours au-delà du seuil dépasse même largement celui de toutes les stations de la région, Lyon compris, et est au-delà des 35 jours règlementaires par an. Marnaz, située pourtant dans la même vallée, à seulement 25 km en aval de Passy (20 km en aval de Sallanches), ne présente qu'un faible nombre de jours de dépassement.

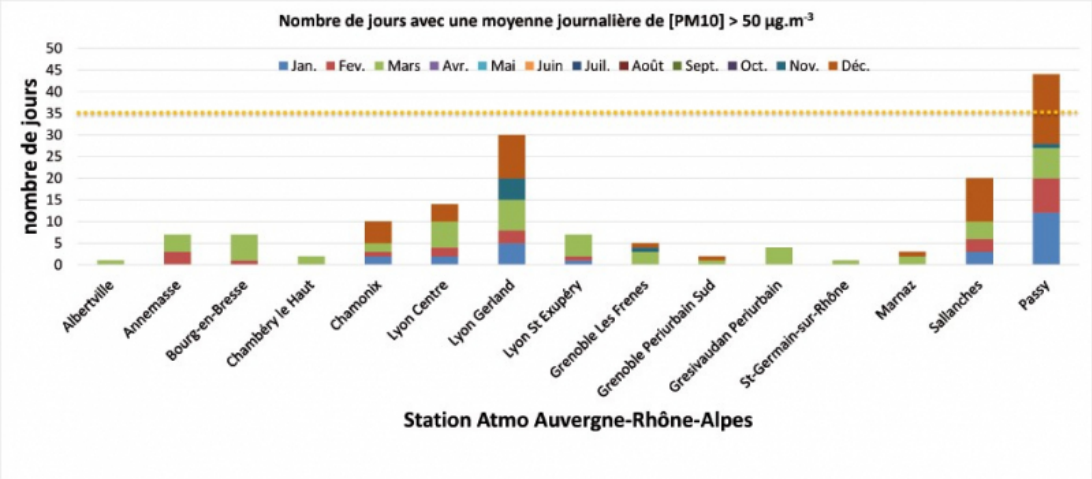

Figure 2. Nombre de jours sur l'année 2015 dépassant le seuil des 50 µg/m^3 de concentration moyenne journalière en PM_{10} sur plusieurs sites de mesure Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de la région Rhône-Alpes. Le détail de la contribution de chaque mois est donné par un code couleur. Le trait tireté horizontal orange marque le seuil règlementaire de 35 jours par an de dépassement, défini par l'article R221-1 du code de l'environnement (source : Atmo Auvergne-Rhône-Alpes).

Number of days with daily PM10 concentration above 50 µg/m³ at different Atmo Auvergne-Rhône-Alpes monitoring sites in 2015. Each month corresponds to a specific color. The dashed orange horizontal line shows the regulatory threshold of 35 days in a calendar year (Article R221-1 of the Environmental code). Source : Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Cette situation observée sur la station de Passy n'est pas spécifique à l'année 2015. Au contraire, 2015 fut l'année la plus favorable des six dernières, comme le montre la figure 3 illustrant la variabilité interannuelle du nombre de jours de dépassement. Le nombre de jours de dépassement du seuil sur les mois de janvier-février-décembre représentant entre 50 % et 88 % du total sur l'année de 2010 à 2015.

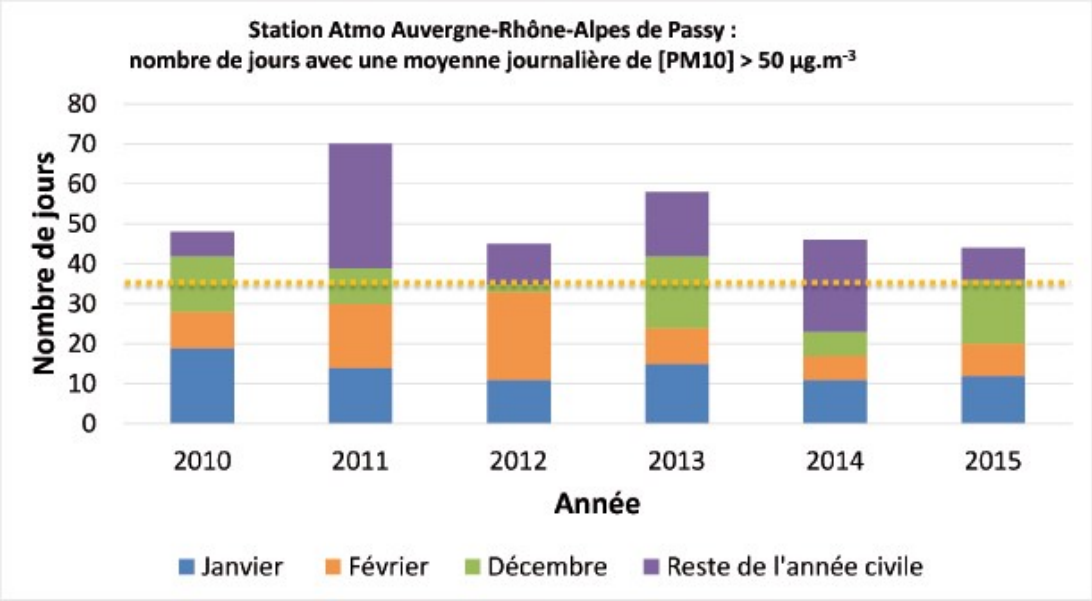

Figure 3. Nombre de jours par an dépassant le seuil des 50 µg/m³ de concentration moyenne journalière en PM_{10} sur le site de mesure Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de Passy, sur les années 2010 à 2015. Le détail de la contribution des mois de janvier (bleu), février (orange) et décembre (vert) est donné par rapport au reste de l'année civile (violet). Le trait tireté horizontal orange marque le seuil règlementaire de 35 jours par an de dépassement, défini par l'article R221-1 du code de l'environnement (source : Atmo Auvergne-Rhône-Alpes).

Number of days with daily PM10 concentration above 50 µg/m³ at Passy (Haute-Savoie, France) Atmo Auvergne-Rhône-Alpes monitoring site for the period 2010 to 2015. The January contribution is in blue, the February one in orange, the December one in green and the rest of the calendar year in purple. The dashed orange horizontal line shows the regulatory threshold of 35 days in a calendar year (Article R221-1 of the Environmental code). Source : Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

8 Parmi les constituants des particules en suspension, certains ont des propriétés mutagènes, tératogènes et cancérogènes, c'est le cas de certains Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP). L'un d'entre eux, le benzo(a)pyrène, est utilisé comme traceur du risque cancérogène lié aux HAP dans l'air ambiant. La valeur limite de sa concentration moyenne, calculée sur une année civile, est fixée à 1 ng/m³ (article R221-1 du code de l'environnement). Sur toutes les stations de Rhône-Alpes (dont Lyon et Grenoble) sur lesquelles ce polluant est mesuré, seules les stations de Passy et Sallanches ont présenté des concentrations supérieures à ce seuil chaque année de mesure entre 2008 à 2015 [2].

9 Cette situation, associée à des problèmes de pollution à l'ozone en saison estivale et à des problèmes de pollution aux oxydes d'azote à proximité des routes, est à l'origine du Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) mis en place depuis 2012 sur la vallée de l'Arve par la préfecture de Haute-Savoie.

1.2. Le projet DECOMBIO

10 Une des actions prévues par ce PPA est un programme d'aide par subvention au remplacement des appareils de chauffage au bois à grande échelle sur la vallée (3 200 poêles visés), sur la base du volontariat, avec une priorité au remplacement des poêles anciens dont la combustion peu efficace favorise l'émission de particules. Cette action a démarré au cours de l'été 2013 et est prévue sur une durée de 4 ans.

11 Le projet scientifique DECOMBIO (déconvolution des sources de combustion de biomasse, projet PRIMEQUAL [3], 2013-2018) a été mis

en place parallèlement au PPA pour évaluer l'impact des actions effectuées sur la concentration des particules en suspension issue de cette combustion de biomasse domestique (Chevrier *et al.*, 2016). Dans le cadre de ce projet coordonné par l'Institut des Géosciences et de l'Environnement (IGE), des mesures sont mises en place sur trois stations gérées par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, pour cinq ans, depuis novembre 2013. Il s'agit des stations de Chamonix, Passy et Marnaz (voir figure 4), sur lesquels l'AASQA effectue des mesures régulières de particules en suspension, ainsi que d'autres polluants, depuis plusieurs années.

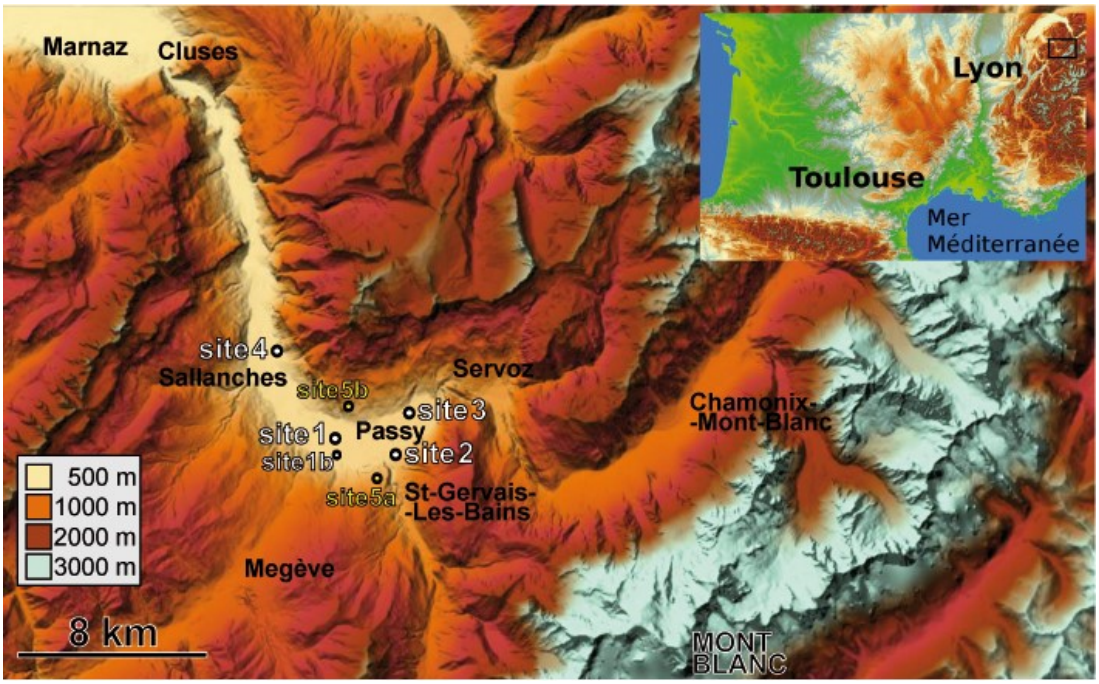

Figure 4. Sites de mesure de la campagne Passy-2015 et principaux repères géographiques. Le mont Blanc (en bas à droite) et les particularités géographiques de la zone d'étude sont clairement visibles sur le relief en fond de carte. La zone d'étude est repérée à plus grande échelle sur la moitié sud de la France par un rectangle noir dans l'encart en haut à droite (source des fonds de carte : www.geoportail.gouv.fr © IGN 2016).

Measurement sites of the Passy-2015 field experiment and main neighbour-ing cities. The Mont Blanc Mountain is located at the bottom right. The small frame at the top-right corner situates this section of the Arve River Valley (black rectangle) at the

larger scale of the southern part of France (topo-graphic maps from www.geoportail.gouv.fr © IGN 2016).

12 Les mesures complémentaires DECOMBIO incluent notamment :

- un aethalomètre Magee scientific AE33 par station ;
- une dizaine de capteurs de température et d'humidité de l'air (TinyTag TGP-4500 ou Campbell ScientificCS215) déployés à différents niveaux sur la pente en face de chaque station [4].

13 Les aethalomètres contribuent à déterminer quelle est la part des particules en suspension ayant pour origine le chauffage au bois ; les capteurs de température et d'humidité de l'air contribuent au suivi de la situation météorologique.

14 Au-delà des mesures concernant la qualité de l'air conduites par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes et par le projet DECOMBIO, il est en effet indispensable de prendre en compte les aspects météorologiques à une échelle fine locale, en particulier en liaison avec les conditions stables hivernales.

1.3. Particularités géographiques et météorologie

15 La zone des villes de Passy et de Sallanches apparaît comme très particulière au regard des mesures de qualité de l'air. Cette particularité est aussi évidente lorsque l'on considère la géographie de la zone présentée sur la figure 4.

16 Cette zone de la vallée de l'Arve est en effet en partie fermée par deux verrous : le premier en amont proche de Servoz, le second en aval proche de Cluses.

17 En amont, la partie entre Servoz et l'est de Passy forme un verrou séparant la haute et la basse vallée de l'Arve. Le fond de vallée est extrêmement étroit et encaissé à cet endroit (moins de 50 m de large) et perd plus de 200 m d'altitude en 4 km (soit une pente moyenne de plus 5 %), entre l'entrée de l'autoroute au niveau de Servoz et la fin du viaduc des Egratz situé à l'est de Passy.

18 En aval, dans la partie entre Sallanches et Cluses, le fond de vallée se resserre de nouveau, jusqu'à environ 100 m de large juste en amont de Cluses, formant le second verrou.

19 Entre ces deux verrous, le fond de vallée est plus large, avec un maximum de 2 km, et perd 220 m d'altitude en 23 km entre le viaduc des Egratz et Cluses (soit une pente moyenne de moins de 1 %). Cette zone est également encaissée, avec une altitude de 560 m en son centre et le sommet le plus proche au nord culminant à plus de 2 500 m (Aiguille de Varan). Bien que relativement étroit, le fond de vallée dans cette zone est assez plat puisqu'il accueille l'une des rares plaines alluviales de montagne du massif alpin (de l'est de Marlioz aux portes de la ville de Sallanches), les Granges de Passy ou plus simplement la plaine de Passy [5]. Seules deux petites vallées des affluents de l'Arve la rejoignent au sud, la première passant par Saint-Gervais-les-Bains, la seconde par Megève.

20 Ces particularités géographiques induisent des contraintes fortes sur les écoulements d'air dans la vallée, qui peuvent avoir un rôle important dans les dégradations de la qualité de l'air révélées par les mesures d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes en hiver, en même temps qu'un ensoleillement particulier lié à l'orientation générale et aux sommets voisins.

21 Une description fine de la météorologie dans les basses couches de l'atmosphère est indispensable en complément de ces mesures pour pouvoir bien comprendre les mécanismes en jeu et nous donner les moyens d'améliorer entre autres notre capacité à gérer les épisodes de pollution dans la vallée.

22 C'est pour cette raison que le projet Passy et la campagne de mesure météorologique Passy-2015 associée sont venus compléter la dynamique initiée par le PPA en 2012 et le projet DECOMBIO en 2013. Cette campagne est décrite dans la suite de cet article.

2. La campagne de mesure Passy-2015

2.1. Objectifs

23 Les objectifs généraux de la campagne, qui correspondent à ceux du projet Passy, sont d'améliorer notre connaissance de la dynamique atmosphérique dans la plaine de Passy lors d'épisodes anticycloniques hivernaux, d'améliorer notre compréhension de son rôle sur

les concentrations de particules en suspension observées lors de ces épisodes, enfin de contribuer à améliorer les modèles de prévision du temps et de la qualité de l'air dans les vallées en hiver.

24 Il s'agit en particulier de déterminer :

- quels mécanismes expliquent les concentrations de particules en suspension particulièrement élevées observées en hiver dans la plaine de Passy ;
- quels mécanismes expliquent, au sein de cette zone enclavée, les valeurs encore plus élevées observées sur la station de Passy ;
- quels mécanismes expliquent l'évolution temporelle d'un épisode de pollution (évolution interjournalière, cycle diurne) ;
- quelle est la part de la dynamique atmosphérique par rapport à celle de la dynamique des sources de pollution (chauffage au bois, sites industriels, transport routier…) dans ces épisodes de pollution [6].

2.2. Période d'observation

25 Pour répondre à ces objectifs, le déploiement d'un grand nombre d'instruments de mesure a eu lieu dans la plaine de Passy, lors de l'hiver 2014-2015. Les mesures ont principalement couvert la période de fin novembre 2014 à fin mars 2015, avec une intensification sur les mois de janvier et février 2015 (voir tableau 1). Cette période centrale de deux mois a fait l'objet d'une veille continue afin de déclencher, des Périodes d'Observation Intensive (POI) en fonction des prévisions de la situation météorologique et de la qualité de l'air. Deux POI ont été réalisées avec un renforcement des mesures et une intensification de leur fréquence, nécessitant une présence sur le terrain vingt-quatre heures sur vingt-quatre. La première POI a eu lieu du 6 au 14 février 2015, la seconde du 17 au 20 février 2015.

Site	Groupe-instrument	Marque et modèle	Date début	Date fin	Nb Jours
Site 1	CNRM-radar UHF	Degreane PCL 1300	2014-12-04	2015-03-24	111
Site 1	CNRM-télémètre de nuages	Vaisala CT25K	2014-12-26	2015-03-23	88
Site 1	CNRM-radiomètre microonde	RPG HATPRO (G3)	2014-11-26	2015-03-25	104
Site 1	AtmoAuRA-lidar vent	Leosphere WLS8-5	2014-11-26	2015-03-24	119
Site 1	AtmoAuRA-aérosols secs PM10 et PM2.5	Thermo Fisher Scientific TEOM FDMS 1405-F	2015-02-16	2015-03-24	37

Site 1 Tour 10m	IGE-3 anémomètres soniques (1.25-3.75-6.25m)	Campbell CSAT3	2015-01-13	2015-03-03	30
Site 1 Tour 10m	CNRM-4 anémomètres soniques (2.5-5-7.5-10m)	Gill HS50	2015-01-08	2015-03-03	51
Site 1 Tour 10m	CNRM-T et RH sous abris Socrima (5m)	Atexis PT1000 class A et Vaisala HMP45	2015-01-08	2015-03-03	51
Site 1 Tour 10m	CNRM-radiomètre (5m)	Kipp&Zonen CNR1	2015-01-08	2015-03-03	51
Site 1 Tour 10m	CNRM-diffusomètre et temps présent (10m)	Vaisala PWD22	2015-01-07	2015-02-22	35
Site 1 Tour 10m	CNRM-aérosols hydratés et gouttelettes 0.3-40 µm (10m)	PALAS welas 2300	2015-01-07	2015-02-21	25
Site 1 Tour 3m	CNRM-aérosols secs 2.5 nm-0.5 µm (2m)	TSI SMPS	2015-01-06	2015-02-18	19
Site 1 Tour 3m	CNRM-gouttelettes 2-50 µm (2.5m)	DMT Fog Monitor FM-100	2015-01-06	2015-02-21	24
Site 1 Tour 3m	CNRM-eau liquide et extinction 3-50 µm (2.5m)	Gerber PVM-100	2015-01-06	2015-02-26	31
Site 1 Tour 3m	CNRM-diffusomètre (1.8m)	Degreane DF20	2015-02-06	2015-02-22	17
Site 1	CNRM-radiosondages	Vasaila RS92-SGP	2015-02-06	2015-02-20	12
Site 1	LEGI-SODAR	Remtech PA2	2015-02-06	2015-02-20	12
Site 1 Tour 10m	CNRM-8 capteurs T HF (1.25-2.5-3.75-5-6.25-7.5-8.75-10m)	CNRM	2015-02-06	2015-02-20 (2015-03-03)	12 (20)
Site 1 Tour 10m	CNRM-gouttelettes 2-50 µm (10m)	DMT/CNRM CDP	2015-02-10	2015-02-12	3
Sites 1-1b Ballon captif	LEGI/IGE-ballon captif CNRM-aérosols 2-50 µm	DMT/CNRM CDP	2015-02-11	2015-02-12	2
Sites 1-1b Ballon captif	LEGI/IGE-ballon captif CNRM-sonde PTU vent	Vaisala TTS111	2015-02-06	2015-02-12	7
Sites 1-1b Ballon captif	LEGI/IGE-ballon captif IGE-sonde PTU	Campbell CS215	2015-02-06	2015-02-20	10
Sites 1-1b Ballon captif	LEGI/IGE-ballon captif IGE-anémo sonique 2D	Gill WindSonic4-L	2015-02-17	2015-02-20	4
Sites 1-1b Ballon captif	LEGI/IGE-ballon captif IGE-micro aethalomètre	Magee scientific AE52	2015-02-07	2015-02-20	10
Site 2	CNRM-lidar vent scannant	Leosphere WLS200S	2015-01-06	2015-04-14	93
Site 2	CNRM-camera panoramique	Videotec ULISSE	2014-12-15	2015-05-04	137
Site 2	CNRM-lidar aérosol scannant	Raymetrics LB100	2015-01-09	2015-04-30	65
Site 3	CNRM-diffusomètre (1.8m)	Degreane DF20	2015-01-08	2015-01-31	24
Site 3	CNRM-radiomètre	Kipp&Zonen CNR1	2015-01-09	2015-03-03	54
Site 4	NCAS-radiomètre microonde	RPG HATPRO (G1)	2015-01-10	2015-03-06	56
Sites 5a-5b	IGE-scintillomètre	Kipp&Zonen LAS MkI	2015-01-28	2015-03-03	33

Tableau 1. Description des instruments déployés lors de la campagne sur chaque site. La date de début correspond à la date des premières données de l'instrument sur la campagne, la date de fin à la date des dernières données. Le nombre de jours correspond au nombre de jours total de fonctionnement de l'instrument (les jours de fonctionnement partiel ou total sur la journée sont comptés, les jours avec panne ou arrêt sur la journée entière ne le sont pas). Les instruments déployés uniquement (ou principalement) pendant les phases d'observation intensive sont sur des lignes en couleur (cyan). Le ballon captif a été déployé sur le site 1 (profils verticaux 0-45 m) du 6 au 10 février 12 :00 puis sur le site 1b (profils verticaux 0-150 m) ensuite.

Instruments deployed during Passy-2015. Dates correspond to the first and last days of data for the corresponding instrument. Number of days corresponds to the total number of day with data from the instrument. Instruments deployed only (or mainly) during the intensive observation periods are highlighted in cyan. The tethered balloon has been deployed from site 1 (0-45 m vertical profiles) from the 6th to the 10th of February at noon, then from site 1b (0-150m vertical profiles).

La figure 5 présente l'évolution de la pression atmosphérique et des concentrations de PM_{10} à Passy au cours de l'hiver 2014-2015. Plusieurs épisodes de pollution aux PM_{10} sont visibles, trois dépassant le seuil de 80 µg/m³ en moyenne journalière (seuil d'alerte), dont un capturé par la première POI, et d'autres plus nombreux dépassant seulement le seuil de 50 µg/m³ (seuil d'information), dont un capturé par la seconde POI. La plupart de ces épisodes ont eu lieu lors de situations anticycloniques établies sur plusieurs jours.

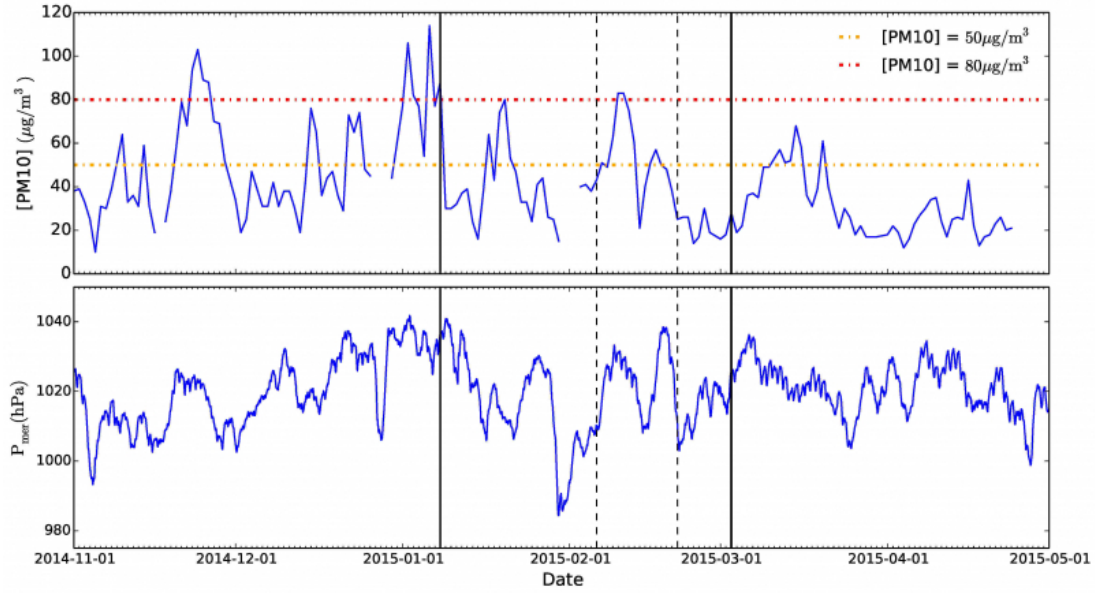

Figure 5. Concentration en PM_{10} en moyenne journalière de la station Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de Passy (haut) et pression rapportée au niveau de la mer de la station METEO-FRANCE la plus proche (station de Meythey-aérodrome d'Annecy en Haute-Savoie) dotée de cette mesure (bas) de novembre 2014 à avril 2015. La période centrale de la campagne (janvier-février 2015) se situe entre les deux traits verticaux pleins, les périodes d'observation intensive, qui ont eu lieu entre le 6 et le 20 février 2015, se situent entre les deux traits verticaux tiretés.

Daily PM10 concentration at the Atmo Auvergne-Rhône-Alpes monitoring site of Passy (top) and sea-level air pressure at the METEO-FRANCE station of Meythet (local airport of Annecy) (bottom) from November 2014 to April 2015. The main period of the field experiment is indicated by two vertical lines. Intensive observation periods, held between the 6th and the 20th of February 2015, are indicated by two vertical dashed lines.

2.3. Sites de mesure et instrumentation

26 Les instruments, dont la liste complète est donnée dans le tableau 1, ont été installés sur cinq sites de mesure couvrant la plaine de Passy.

Ces sites sont indiqués sur les figures 4 et 6, leurs coordonnées précises sont reportées dans le tableau 2.

Site	**Description**	**Longi-tude (deg)**	**Lati-tude (deg)**	**Alti-tude (m)**
Site 1	Centre technique communal de la ville de Passy (74)	6.6741	45.9140	560
Site 1b	Environ 700 m au sud du site 1	6.6745	45.9085	559
Site 2	Terrasse panoramique du lycée du Mont-Blanc (Passy, 74)	6.7072	45.9080	602
Site 3	Station de mesure Atmo ARA de Passy (74)	6.7136	45.9235	588
Site 4	Aérodrome de Sallanches (74)	6.6401	45.9480	535
Site 5a	Le Fayet d'en Haut (74)	6.6998	45.8993	726
Site 5b	Annexe de la mairie de Passy (74)	6.6845	45.9228	692

Tableau 2. Description et coordonnées des sites de mesure de la campagne. Pour le site 1, les coordonnées sont celles de l'aire de lancement des radiosondages. Le site 1 étant étendu sur quelques centaines de mètres, les coordonnées d'autres instruments de ce site peuvent être légèrement différentes. Le site 1b est un site annexe du site 1 sur lequel le ballon captif a été déplacé en cours de POI1, dans le but de se placer dans une zone permettant légalement une plus grande hauteur maximale de vol (150 m au lieu de 45 m). Les altitudes (base site www.geoportail.gouv.fr © IGN 2016) sont celles de l'endroit où est posé l'instrument (sol naturel, terrasse...), l'altitude réelle de l'instrument peut être supérieure, sauf pour les sites 5a et 5b pour lesquels les altitudes données sont celles de l'émetteur (site 5a) et du récepteur (site 5b) du scintillomètre.

Description and coordinates of Passy-2015 measurement sites. Altitudes (using data from* www.geoportail.gouv.fr© IGN 2016 as a reference*) are those of the ground over which the instruments are installed, the actual instrument altitude can be superior, except from sites 5a and 5b for which altitudes are given for the emitter (site 5a) and receiver (site 5b) of the scintillometer.

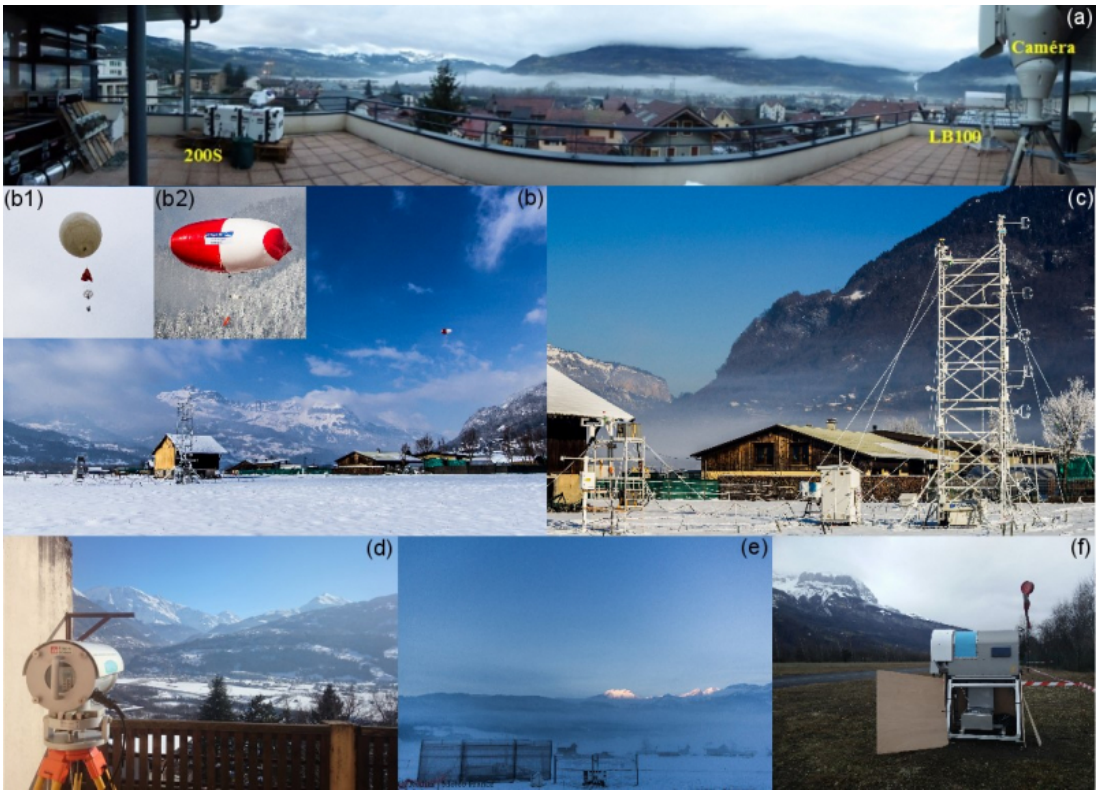

Figure 6. Sélection de photographies des instruments déployés lors de la campagne Passy-2015 : (a) vue panoramique de la terrasse du lycée du Mont-Blanc (site 2), avec à gauche le lidar vent scannant, à droite la caméra panoramique et le lidar aérosol scannant ; (b) vue d'ensemble de la partie sud du site 1 et du site 1b (au loin à droite) avec en vignettes un radiosondage (b1) et le ballon captif (b2) ; (c) vue rapprochée de la partie sud du site 1 avec à gauche la tour instrumentée de 3 m, au centre en second plan le radiomètre micro-onde et à droite la tour instrumentée de 10 m ; (d) récepteur du scintillomètre (site 5b) ; (e) vue de la partie est du site 1 avec le radar UHF en bas à gauche et lidar vent en bas au centre ; (f) radiomètre micro-onde sur l'aérodrome de Sallanches (site 4). Auteurs des photographies : Olivier Garrouste (a), Quentin Rodier (b, b1, b2, c, e), Jean-Martial Cohard (d), Charles Chemel (f).

Selected pictures of instruments deployed during Passy-2015: (a) panoram-ic view from lycée du Mont-Blanc terrace (site 2) with on the left the scan-ning wind lidar and on the right the panoramic camera and the scanning aerosol lidar; (b) general view of the southern side of site 1 and of site 1b (in the background on the right) with close-ups on a radiosonding (b1) and on the tethered balloon (b2); (c) close-up of the southern side of site 1 with the 3-m instrumented tower on the left, the microwave radiometer in the center and the 10-m instrumented tower on the right; (d) scintillo-meter re-ceiver (site 5b); (e) view of the eastern side of site 1 with the UHF radar on the bottom left and the wind lidar on the bottom center; (f) microwave radi-ometer on the Sallanches aerodrome (site 4). Authors of the pictures: Olivi-er Garrouste (a), Quentin Rodier (b, b1, b2, c, e), Jean-Martial Cohard (d), Charles Chemel (f).

Le site 1, au centre de la plaine de Passy, est le site principal. Il concentre quinze types d'instruments différents avec, comme objectif premier, de pouvoir décrire les profils verticaux de vent, de température et d'humidité de l'air depuis le sol jusqu'à plusieurs kilomètres au-dessus. Certains instruments, davantage dédiés à l'étude des épisodes de brouillard, ont permis de décrire les aérosols secs ou hydratés, les gouttelettes d'eau, le contenu en eau liquide et la visibilité.

Pendant les POI, jusqu'à neuf types d'instruments supplémentaires ont été mis en œuvre sur ce site, dans le but de décrire encore plus précisément et finement l'atmosphère sur la verticale. Il s'agit notamment de radiosondages déployés toutes les 3 heures en moyenne (et jusqu'à toutes les 1 heure 30 lors de la POI2) et d'un ballon captif embarquant différents types de capteurs (pression, vent, température, humidité, aérosols, carbone suie) et réalisant des profils verticaux à une cadence encore plus élevée.

Le ballon captif a été déplacé en cours de POI1 sur le site 1b, environ 700 m au sud du site 1, dans le but de se placer dans une zone permettant légalement une plus grande hauteur maximale de vol (150 m au-dessus du sol au lieu de 45 m au site 1).

Les autres sites viennent compléter le site principal en apportant des informations sur la variabilité spatiale des basses couches de l'atmosphère dans la plaine de Passy.

Sur le site 2 se trouvent une caméra panoramique et deux instruments capables de balayer l'atmosphère dans différentes directions (plans horizontaux, plans en élévation, plans verticaux, volumes…) et d'en extraire des informations concernant le vent et les aérosols. Ce site, situé sur la terrasse

du lycée du Mont-Blanc, au pied des pentes à environ 2,6 km du site 1 en direction de l'est-sud-est, dispose d'une vue panoramique sur la plaine de Passy, idéale pour ces instruments.
Sur le site 3, qui est celui de la station Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de Passy, à environ 3,2 km du site 1 en direction de l'est-nord-est, deux capteurs viennent doubler ceux du site 1 pour décrire la variabilité spatiale horizontale de la visibilité et des flux radiatifs nets dans le visible et l'infra-rouge proche du sol.
Sur le site 4, situé sur l'aérodrome de Sallanches à environ 4,6 km du site 1 en direction du nord-nord-ouest, un radiomètre micro-onde donnant accès en continu aux profils verticaux de température et d'humidité vient compléter celui installé sur le site 1.
Les sites 5a et 5b, situés de part et d'autre de la vallée et distants d'environ 2,8 km, accueillent respectivement l'émetteur et le récepteur d'un scintillomètre donnant une information sur le vent dans l'axe de la vallée.
À ces mesures mises en œuvre spécifiquement pour la campagne Passy-2015, s'ajoutent celles du projet DECOMBIO et d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes mentionnées précédemment. À noter qu'une caméra d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est située au nord du site 3 à Passy Plaine-Joux, à environ 800 m au-dessus du fond de vallée, et complète celle du site 2 qui prend des images de la plaine de Passy depuis le sud. Dans un environnement plus large se trouvent également des stations du réseau opérationnel de mesure de METEO-FRANCE (20 stations dans un rayon d'une vingtaine de kilomètres autour de la plaine de Passy).

3. Quelques résultats issus des périodes d'observation intensive

3.1. Les POI de février 2015

27 **La POI1 du 6 au 14 février 2015**. L'arrivée de l'anticyclone se fait progressivement du 6 au 9 février. Le ciel, couvert en début de POI, commence à se dégager dans la fin de matinée du 8. En altitude, le vent se renforce en fin de journée le 8 et dépasse les 30 m/s à 3 000 m au-dessus du sol (au site 1) sur quasiment toute la nuit du 8 au 9, il se calme le 9 au matin. La pression atmosphérique atteint son

maximum de la POI vers 9h locales le 9, un peu plus de 964 hPa[7] sur le site 1, soit 22 hPa de plus que le 6 vers 13h locales (début de la montée de la pression).

28 Cela marque le début de l'épisode anticyclonique établi avec un découplage entre les basses couches et la situation d'altitude, des vents faibles et des températures minimales extrêmes. Le vent à 10 m sur le site 1 dépasse rarement les 2 m/s du 9 au 12. La température à 5 m sur le site 1 est particulièrement basse la nuit sur cette période, avec un minimum avant le lever du jour, atteignant – 10 °C le 10.

29 La situation anticyclonique se termine aux premières heures du 13, avec l'arrivée des premiers nuages et la chute de la pression, qui se poursuit le 14, où elle atteint un niveau comparable à celui du 6.

30 Le sol est couvert de neige en début de POI suite à des chutes de neige récentes. Cette neige fondra en partie en cours de POI, d'abord sur les pentes exposées sud, puis en fond de vallée. Du brouillard avec dépôt de givre est observé pendant trois nuits consécutives, du 9 au 12.

31 **La POI2 du 17 au 20 février 2015**. La période correspond davantage à une accalmie entre deux perturbations qu'à un épisode anticyclonique bien établi. En effet, la pression atmosphérique augmente de nouveau à partir du 15 en milieu de journée, poursuit sa hausse les 16 et 17, se maintient le 18 puis diminue de nouveau dès les premières heures du 19. La neige est peu présente au sol, contrairement à la POI1.

32 La figure 7 présente de façon synthétique sur les deux POI les caractéristiques de la couche limite atmosphérique (partie de l'atmosphère qui se trouve sous l'influence directe de la surface de la terre), estimées à partir des profils verticaux de température mesurés par radiosondages. Concernant la POI1, une couche stable peu épaisse commence à apparaître dès la fin de journée du 8, mais ce n'est que le 9 en fin de journée qu'une couche stable (ronds bleus) d'épaisseur significative commence à être présente. Cette couche d'inversion (Δ T positif sur la figure 7) se renforce jusqu'aux premières heures du 11 février et persiste jusqu'au 13 en milieu de journée. Le gradient de température atteint près de 15 °C le 11 février, entre le sommet de la couche d'inversion, situé alors à plus de 1 000 m au-dessus du site 1,

et 2 m. Au cours de cette période, une couche limite convective (carrés rouges) se forme sur une épaisseur de 500 m maximum en milieu de journée (radiosondages de 13h et 16h locales), mais sans détruire l'inversion située plus en hauteur, dont le sommet est au-dessus de 800 m sur la période (courbe cyan sur la figure 7). La POI2 est assez différente puisque si une couche stable relativement épaisse se forme bien la nuit, cette dernière est complètement détruite au cours de la journée.

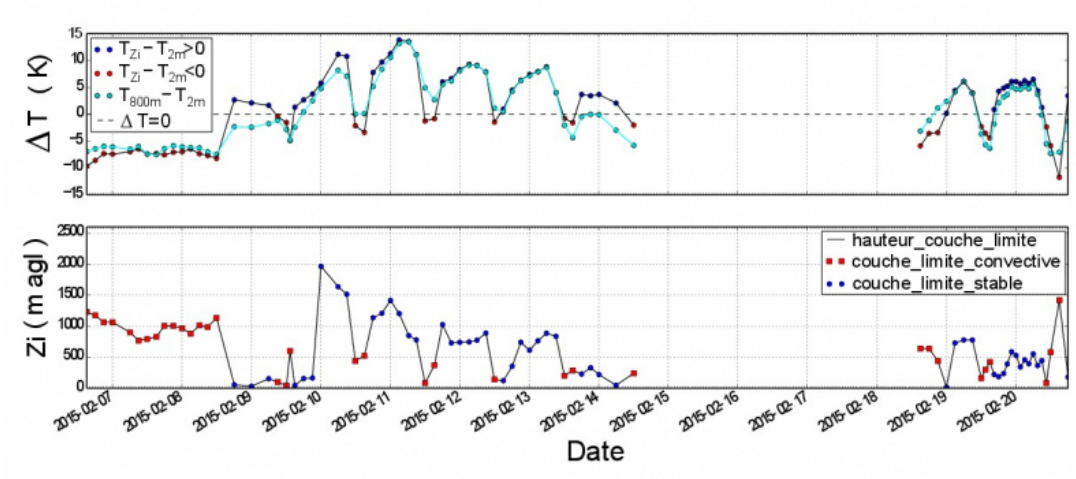

Figure 7. Différences de température entre le sommet de la couche limite (courbe noire) ou 800 m (courbe cyan) et 2 m au-dessus du sol du site 1, estimées à partir des radiosondages lors des deux POI de Passy-2015 (haut). Hauteur du sommet de la couche limite et type de couche limite (carrés rouges : convective, ronds bleus : stable) estimés à partir des mêmes données (bas).

Temperature differences between the top of the boundary layer (black color curve) or 800 m (cyan color curve) and 2 m above ground level at site 1 as inferred from the radiosounding data during the two IOP of the field exper-iment (top). Boundary layer height (continuous black line) and stability of the boundary layer (red square symbols: convective, blue circle symbols: stable) inferred from the same data (bottom).

Lors de la POI1, le seuil des 50 µg/m³ de PM_{10} est dépassé en moyenne journalière pendant 7 jours consécutifs, du 7 au 13 février (figure 5). Le seuil des 80 µg/m³ est dépassé pendant 2 jours les 10 et 11 février, avec un maximum en moyenne horaire dépassant les 160 µg/m³ le 12 février à 0h locale. Les

niveaux des particules en suspension sont moins élevés lors de la POI2, avec un dépassement du seuil des 50 µg/m³ sur 4 jours du 16 au 19 février et un maximum en moyenne horaire d'un peu moins de 110 µg/m³ le 17 février à 1h locale.
En conclusion, les deux POI réalisées correspondent à des situations assez différentes, la première à un épisode de pollution sévère associé à une situation anticyclonique hivernale établie, la seconde à un épisode de pollution moins important dans une situation météorologique de transition. Le contraste entre les deux POI est intéressant, et son exploration sera sans doute instructive.

3.2. Visibilité et brouillard lors de la POI1

33 Les épisodes de brouillard rencontrés au cœur de la POI1 coïncident avec les nuits de la période sur laquelle est observée une couche d'inversion persistante. Le brouillard est un facteur important pour la qualité de l'air. En effet, c'est un milieu complexe où coexistent gaz traces, particules d'aérosols solides et hydrométéores liquides (gouttelettes d'eau) ou glacés (cristaux de glace). Il est donc le siège de réactions chimiques multiphasiques, qui vont modifier les propriétés physico-chimiques de l'atmosphère. La présence de brouillard peut également avoir une influence sur la dynamique atmosphérique observée dans les basses couches, par exemple en limitant le refroidissement nocturne au voisinage du sol ou la pénétration du rayonnement solaire vers le sol lorsqu'il est présent le matin. Pour ces raisons, il doit donc être pris en compte pour la compréhension de l'ensemble de la dynamique atmosphérique et une description *a minima* est nécessaire.

34 L'instrument de référence est le diffusomètre, qui permet une mesure de la visibilité locale et la détection de la présence de brouillard, défini par une visibilité inférieure à 1 000 m. La visibilité locale observée par le diffusomètre situé à 10 m au-dessus du sol sur le site 1 lors de la POI1 est présentée sur la figure 8.

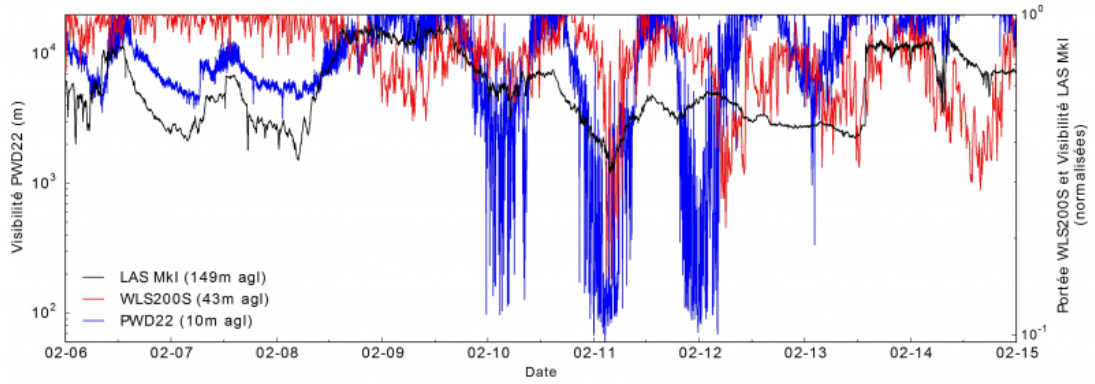

Figure 8. Visibilité locale observée par le diffusomètre (Vaisala PWD22) situé à 10 m au-dessus du sol sur le site 1, lors de la POI1 (courbe bleue), portée (normalisée par sa valeur maximale sur la période) des tirs horizontaux du lidar vent scannant (Leosphere WLS200S) du site 2 en direction du site 1 à 43 m au-dessus du niveau du sol du site 1 (courbe rouge), visibilité (normalisée par sa valeur maximale sur la période) intégrée entre le site 5a et le site 5b à une hauteur moyenne de 149 m au-dessus du sol du site 1 estimée à partir de l'atténuation le long du trajet optique entre l'émetteur et le récepteur du scintillomètre (Kipp&Zonen LAS MkI, courbe noire).

Local visibility as observed by the forward scatter sensor (Vaisala PWD22) located 10 m above ground level at site1 during the first IOP (blue curve), horizontal range (normalized by the maximum value over IOP1) of the scanning wind lidar (Leosphere WLS200S) at site 2 in the direction of site 1 at 43 m above site 1 ground level (red curve), visibility (normalized by the maximum value over IOP1) between site 5a and site 5b at a mean height of 149 m above site 1 ground level estimated from the attenuation along the scintillometer optical path (Kipp&Zonen LAS MkI, black curve).

35 D'autres instruments peuvent apporter une information sur la visibilité. La portée des tirs horizontaux du lidar vent[8] du site 2 en direction du site 1 est fortement réduite en cas de forte baisse de visibilité. Elle renseigne donc sur cette dernière entre le site 2 et le site 1 à 43 m au-dessus du niveau du sol du site 1 (le lidar étant 43 m au-dessus du site 1). L'atténuation le long du trajet optique entre l'émetteur et le récepteur du scintillomètre[9] peut également être reliée à la visibilité

intégrée entre le site 5a et le site 5b, à une hauteur moyenne de 149 m au-dessus du sol du site 1. Ces deux quantités, portée du lidar vent et visibilité estimée à partir du scintillomètre, sont également tracées sur la figure 8 (après normalisation par leur valeur maximale respective sur la POI1).

36 Le diffusomètre permet d'identifier clairement des épisodes de brouillard sur le site 1 : le premier, le 10 février entre environ 0h30 et 10h locale, le second la nuit suivante entre environ 21h30 le 10 février et 10h le 11 février, puis le troisième entre environ 20h30 le 11 février et 6h le 12 février. Enfin, le 13 février, une chute de la visibilité en dessous de 1 000 m est observée de façon fugace autour de 3h locales.

37 Lors du premier épisode de brouillard, il n'y a pas de chute de signal sur les autres capteurs, ce qui suggère que la couche de brouillard était assez mince (moins de 43 m d'épaisseur). En milieu de deuxième épisode en revanche, une chute de signal apparaît pour les deux autres capteurs, ce qui suggère que la couche de brouillard était plus épaisse (probablement au moins 149 m d'épaisseur). À noter que ces conclusions sur les deux épisodes sont cohérentes avec les données du télémètre de nuages du site 1 (non présentées dans cet article).

38 Lors du troisième épisode, une chute du signal à 43 m vers 6h locales le 12 février succède à la chute de visibilité à 10 m sur le site 1 et se poursuit sur quelques heures. Rien ne suggère un décollement de la couche de brouillard sous la forme du nuage de type stratus dans les données du télémètre de nuages du site 1, et il est peu probable qu'il s'agisse d'une advection du site 1 vers le site 2 puisque le vent est plutôt orienté dans la direction opposée sur cette période. Il reste donc la possibilité d'une hétérogénéité spatiale entre le site 1 et la zone située entre le site 2 et le site 1.

3.3. Relation entre [PM_{10}] et le profil vertical de température

39 La stabilité persistante de l'atmosphère dans la couche d'inversion étant à l'origine du mécanisme principal conduisant aux épisodes hivernaux de pollution aux particules en suspension, il est naturel de chercher un indicateur sur la base de ce constat, qui serait en lien avec la concentration en particules en suspension dans la vallée.

40 Une première approche (Whiteman *et al.*, 1999) consiste à calculer la quantité d'énergie thermique nécessaire pour neutraliser la stabilité de l'atmosphère dans la vallée (le terme utilisé en anglais est *heat deficit*). Ce calcul fait intervenir une intégrale sur la verticale entre le sol et une hauteur h au-dessus du sol, représentative de celle de la couche d'inversion lors des épisodes de pollution hivernaux. Chemel *et al.* (2016) ont montré récemment (en utilisant les profils verticaux de température restitués par le radiomètre micro-onde du site 4 de la campagne Passy-2015 et les mesures de la station Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de Sallanches) qu'au cours de la période janvier-février 2015, le maximum de corrélation entre cette quantité et la concentration journalière en PM_{10} est obtenu pour une intégrale sur une hauteur d'un peu moins de 1 000 m au-dessus du sol. Cela correspond bien à l'ordre de grandeur de la hauteur de la couche d'inversion sur l'épisode stable de la POI1 représentée sur la figure 7. L'avantage de cette méthode est de prendre en compte *a priori* la quantité physique la plus représentative de la stabilité de l'atmosphère dans la vallée. L'inconvénient est qu'elle nécessite de connaître le profil vertical de la température en continu avec une résolution et une précision suffisantes sur au moins toute la couche d'inversion. Par exemple, la précision de la mesure du radiomètre micro-onde, *a priori* moins bonne au-delà de 1 500 m au-dessus du sol (Löhnert et Maier, 2012 ; Massaro *et al.*, 2015), peut avoir une influence sur la hauteur à laquelle est atteint le maximum de corrélation mentionné précédemment.

41 Dans une étude dans la région de la ville de Grenoble, située dans la zone de confluence de trois vallées, Largeron et Staquet (2016b) ont montré qu'une approche de type « ΔT » utilisant la différence entre la température à une hauteur proche du sommet de la couche d'inversion et la température proche du sol donnait des résultats très comparables à une approche du type *heat deficit*. La figure 9 présente la relation entre la différence de température à 800 m (hauteur minimale de la couche d'inversion persistant du 9 au 12 février) et à 50 m au-dessus du sol calculée à partir des données du radiomètre micro-onde du site 1 et la concentration en PM_{10} de la station Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de Passy. La bonne corrélation entre ces deux quantités sur la POI1 suggère que cette approche pourrait fonctionner pour la plaine de Passy. La différence de température à 325 m

et à 50 m au-dessus du sol est également tracée sur la figure 9, ainsi que les estimations de différence de température faites à partir des données des radiosondages pour illustrer la bonne qualité des restitutions de température du radiomètre micro-onde à plusieurs niveaux dans les basses couches.

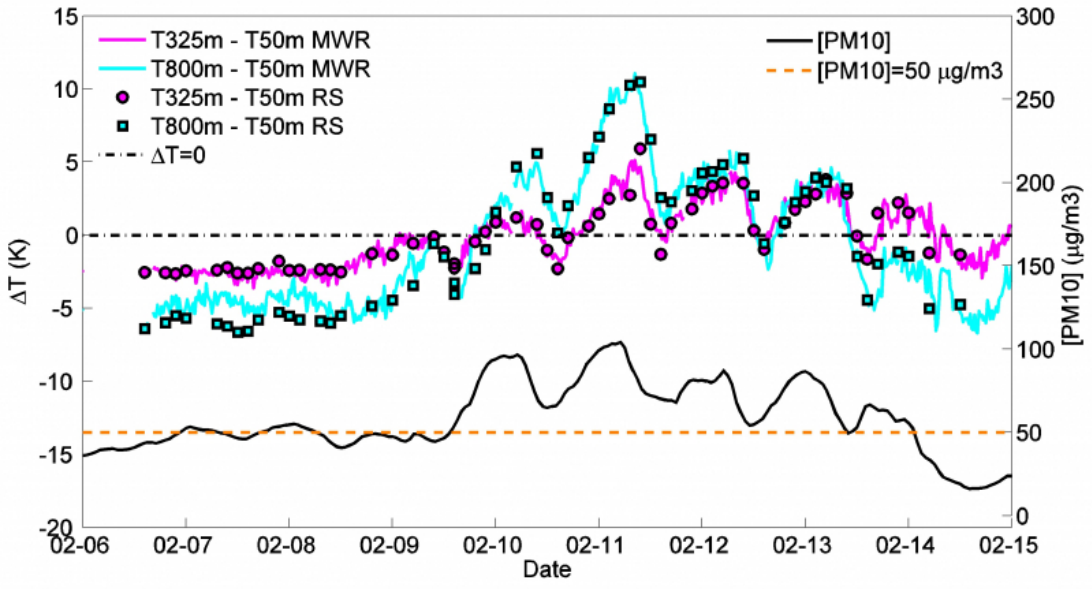

Figure 9. Différences de température entre 800 m (courbe cyan) ou 325 m (courbe rose) au-dessus du sol et 50 m au-dessus du sol, estimées à partir des données du radiomètre micro-onde du site 1 lors de la POI1, les mêmes quantités estimées à partir des radiosondages (carrés cyans et ronds roses) sont également reportées et attestent de la bonne qualité des restitutions du radiomètre. La concentration en PM_{10} (moyenne glissante sur 12 h) de la station Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de Passy sur la POI1 est également présentée sur la figure.

Temperature differences between 800 m (cyan color curve) or 325 m (pink color curve) and 50 m above ground level as inferred from the microwave radiometer data at site 1 during IOP1. Comparison with the radiosounding data (cyan square symbols and pink circle symbols). The 12-h sliding average PM_{10} concentration at the Atmo Auvergne-Rhône-Alpes station in Passy during IOP1 is also plotted (black curve).

Une troisième approche, proposée initialement par Whiteman *et al.* (2001) dans la vallée de la rivière Colombia (état de Washington, États-Unis d'Amérique), est d'utiliser des capteurs de température disposés le long d'une pente ou de plusieurs pentes pour estimer le profil vertical de température dans la vallée attenante. L'avantage de cette approche (dite du « pseudo profil ») est l'utilisation de capteurs relativement peu onéreux et demandant peu de maintenance, qui peuvent donc rester en place pendant plusieurs années. La figure 10 présente la différence de température entre deux capteurs du projet DECOMBIO situés sur la pente proche de la station Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de Passy, respectivement à 799 m et à 23 m au-dessus du site 1. La bonne corrélation avec la concentration en PM_{10} de la station Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de Passy sur la POI1 suggère que cette approche pourrait être également applicable à la plaine de Passy. En effet, la différence de température mesurée par les capteurs sur pente et celle obtenue à partir des restitutions de température du radiomètre microonde sont en bon accord.

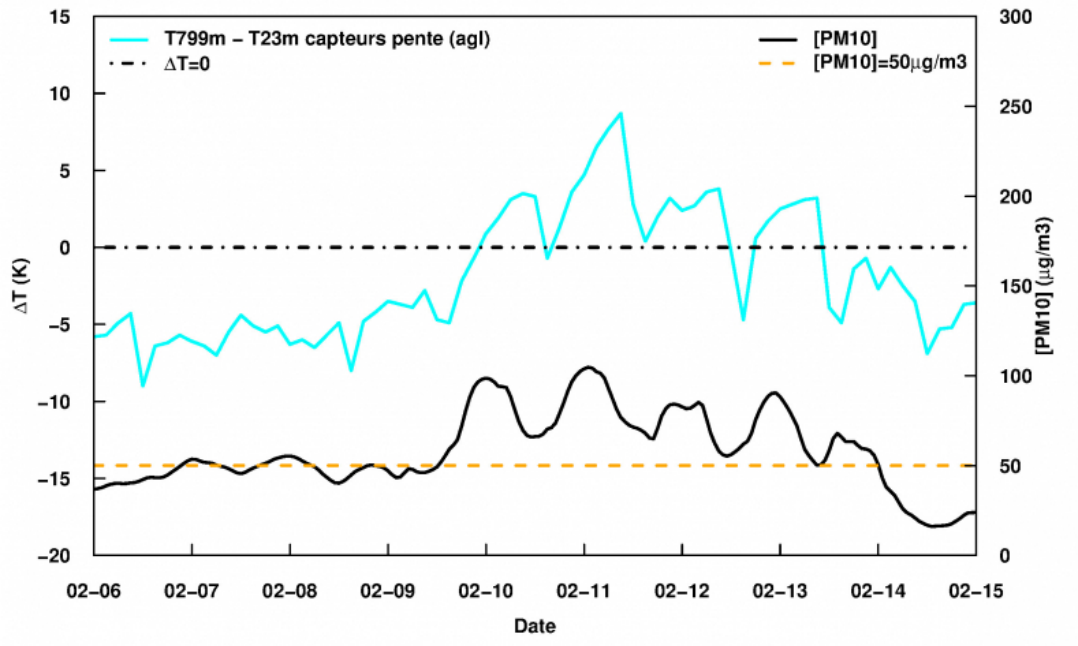

Figure 10. Différence de température entre 799 m et 23 m au-dessus du sol du site 1, estimée à partir des données des capteurs DECOMBIO situés sur la pente proche de la station Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de Passy. La concentration en PM_{10} (moyenne glissante sur 12h) de la station Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de Passy sur la POI1 est également présentée sur la figure.

Temperature differences between 799 m and 23 m above site 1 ground level as inferred from the DECOMBIO sensors on the slope close to the Atmo Auvergne-Rhône-Alpes station in Passy (cyan color curve). The 12-h sliding average PM10 concentration at the Atmo Auvergne-Rhône-Alpes station in Passy during IOP1 is also plotted (black curve).

4. Conclusion et perspectives

42 La campagne Passy-2015 a été réalisée en Haute-Savoie au cours de l'hiver 2014-2015 dans une zone de la vallée de l'Arve particulièrement problématique en termes de qualité de l'air hivernale. Une large combinaison d'instruments (profileurs de vent, de température et de vapeur d'eau, lidars scannant, tours instrumentées...) a été déployée

sur plusieurs sites à proximité de la ville de Passy pour étudier la dynamique atmosphérique associée aux épisodes hivernaux de pollution. En février 2015, lors de deux Périodes d'Observation Intensive (POI), le dispositif a été encore renforcé, notamment par des radiosondages à haute cadence et un ballon captif. Sur la durée de la campagne, le cumul du nombre de jours de fonctionnement tous types d'instruments confondus est de plus de 1 300 jours. Un autre point fort de la campagne est son intégration dans une dynamique de suivi de la qualité de l'air dans la région par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, renforcée sur 2013-2018 dans le cadre du projet de recherche DECOMBIO.

43 Toutes ces observations constituent un ensemble très riche pour comprendre les mécanismes en jeu lors des épisodes hivernaux de pollution. Une première exploration de ces observations a été présentée concernant la couche limite atmosphérique, le brouillard et le lien entre pollution et gradient vertical de température.

44 La présence de neige au sol ou de brouillard à certaines périodes des POI soulève de nouvelles questions, parmi lesquelles :

- quel rôle joue la neige au sol dans le cycle de vie de la couche d'inversion lors de la POI1 (fonte progressive de la neige au sol en cours de POI) et dans le contraste entre les deux POI (peu de neige au sol lors de la POI2) ? Whiteman (2000) suggère que dans une vallée la présence de neige au sol tend à diminuer le vent en journée et à renforcer le refroidissement de l'air près du sol et le vent pendant la nuit ;
- quel rôle joue le brouillard dans le cycle de vie de la couche d'inversion lors de la POI1, au cours de laquelle du brouillard est observé chaque nuit de la période avec couche d'inversion persistante, et ce jusqu'au matin compris pour les deux nuits les plus froides ? Existe-t-il un lien entre la répartition spatiale des zones favorisant le brouillard et celle des zones favorisant une forte concentration de particules ?
- quel rôle jouent la vapeur d'eau et sa condensation sur la qualité de l'air observée lors des POI (formation d'aérosols secondaires, dépôt…) ?

45 Plusieurs pistes sont en cours d'exploration pour déterminer un indicateur du risque de pollution hivernale aux PM_{10} construit sur des paramètres météorologiques (profil vertical de température, par

exemple), et les premiers essais sont encourageants. La meilleure connaissance des spécificités locales qui sera obtenue en travaillant sur les questions mentionnées ici et dans la partie « Objectif » de cet article permettra d'affiner ce travail.

46 Ces questions sont abordées dans le cadre du projet Passy, en combinant analyse de données et modélisation numérique. Les modèles numériques WRF[10] (Skamarock *et al.*, 2008) et Meso-NH[11] (Lafore *et al.*, 1998) sont pour cela utilisés au LEGI et NCAS (WRF) et au CNRM (Meso-NH) pour réaliser des simulations numériques à haute résolution (jusqu'à 100 m sur l'horizontale) sur certaines périodes clés de la campagne en complément des observations.

47 Une évaluation du modèle de prévision de METEO-FRANCE Arome[12], dans sa version opérationnelle à 1.3 km mais aussi dans une version de développement à plus haute résolution, est également en cours.

48 Ces travaux aideront à mieux comprendre l'origine des défauts des modèles numériques actuels pour la prévision du temps et de la qualité de l'air dans les vallées en hiver, et contribueront à leur amélioration.

Remerciements

Le projet Passy a été financé par l'ADEME via le programme national LEFE du CNRS/INSU. La campagne Passy-2015 a été financée par l'ADEME via le projet et par METEO-FRANCE. Nous remercions les Villes de Passy et de Sallanches pour leur soutien. La campagne Passy-2015 a été pilotée par le CNRM, tandis que le LEGI est porteur du projet Passy. Les données sont gérées par le SEDOO à l'observatoire Midi-Pyrénées (http://passy.sedoo.fr).

Nous remercions les agents METEO-FRANCE du centre de Chamonix-Mont-Blanc et du service PAM de l'École Nationale de la Météorologie, pour leur soutien lors de la période sur alerte pour les phases d'observation intensive.

Nous remercions Sébastien Blein (LEGI), Hélène Guyard (IGE), Frédéric Murguet (CNRM), Isabel Peinke (LEGI), Jean-Emmanuel Sicart (IGE), Delphine Six (IGE) et David Suquia (CNRM), pour leur soutien ou participation à la campagne.

Nous remercions le National Centre for Atmospheric Science (NCAS, Royaume-Uni) Atmospheric Measurement Facility (AMF), pour le prêt du radiomètre micro-onde déployé sur le site 4 durant la campagne.

Nous remercions Catherine Coulaud et Jean-Paul Laurent (IGE) pour leur participation, dans le cadre de DECOMBIO, à l'installation et à la maintenance

des capteurs de température et d'humidité de l'air, situés sur la pente proche de la station ATMO Auvergne-Rhône-Alpes de Passy, dont les données sont utilisées pour la figure 10.

Nous remercions Marie-Pierre Dennielou de METEO-FRANCE pour l'extraction des données de pression de la station de Meythey (74, aérodrome d'Annecy) utilisées pour la figure 5.

Nous remercions Grisa Mocnik (Aerosol d.o.o.) pour le prêt du micro-aethalomètre Magee Scientific AE52, déployé sous ballon captif pendant la POI1, et pour le prêt des aethalomètres Magee Scientific AE33 déployés sur les stations ATMO Auvergne-Rhône-Alpes de Chamonix, Passy et Marnaz, dans le cadre de DECOMBIO.

Nous remercions enfin Marie Lothon (OMP/LA) pour avoir inspiré la figure 4.

BIBLIOGRAPHY

Chemel C, Arduini G, Staquet C *et al.* (2016). Valley heat deficit as a bulk measure of wintertime particulate air pollution in the Arve River Valley. *Atmos. Environ*, n° 128, p. 208-215.

Chevrier F *et al.* (2016). DECOMBIO. Contribution de la combustion de la biomasse aux PM_{10} en vallée de l'Arve : mise en place et qualification d'un dispositif de suivi. Article soumis à *Pollution Atmosphérique*.

Doran J *et al.* (2002). The VTMX 2000 campaign. *Boundary-Layer Meteorology*, n° 90, p. 3.

Duine GJ, Hedde T, Roubin P, Durand P. (2016). A Simple Method Based on Routine Observations to Nowcast Down-Valley Flows in Shallow, Narrow Valleys. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, n° 55, p. 1497-1511. doi : 10.1175/JAMC-D-15-0274.1

Lafore JP *et al.* (1998). The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I: Adiabatic formulation and control simulations. *Annales Geophysicae*, n° 16, p. 90-109.

Lareau N *et al.* (2013). The persistent cold-air pool study. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, n° 94, p. 51-63. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00255.1

Largeron Y, Staquet C. (2016a). The Atmospheric Boundary Layer during Wintertime Persistent Inversions in the Grenoble Valleys. *Front. Earth Sci.*, 21 July. doi: 10.3389/feart.2016.00070 (http://dx.doi.org/10.3389/feart.2016.00070)

Largeron Y, Staquet C. (2016b). Persistent inversion dynamics and wintertime PM 10 air pollution in Alpine valleys. *Atmos. Environ.*, n° 135, p. 92-108. doi : 10.1016/j.atmosenv.2016.03.045

Löhnert U, Maie O. (2012). Operational profiling of temperature using ground-based microwave radiometry at Payerne: prospects and challenges. *Atmospheric Measurement Techniques*, n° 5.5, p. 1121-1134.

Massaro G, Stiperski I, Pospichal B, Rotach MW.(2015). Accuracy of retrieving temperature and humidity profiles by ground-based microwave radiometry in truly complex terrain. *Atmospheric Measurement Techniques*, n° 8.8, p. 3355-3367.

Paci A, Staquet C *et al.* (2015). The Passy-2015 field experiment: an overview of the campaign and preliminary results. Proc. of the 33rd International Conference on Alpine Meteorology, Innsbruck, Austria.

PPA. (2012). Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) de la vallée de l'Arve (http://www.rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ppa_20120305_cle75c674.pdf), préfecture de la Haute-Savoie, février.

Price J *et al.* (2011). COLPEX: field and numerical studies over a region of small hills. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, n° 92, p. 1636-1650. doi: 10.1175/2011BAMS3032.1

Rotach M *et al.* (2004). Turbulence Structure and Exchange Processes in an Alpine Valley: The Riviera Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, n° 85, p. 1367-1385, doi:10.1175/BAMS-85-9-1367

Silcox GD *et al.* (2012). Wintertime PM 2.5 concentrations during persistent, multi-day cold-air pools in a mountain valley. *Atmos. Environ.*, n° 46, p. 17-24.

Skamarock WC *et al.* (2008). A *description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR*, NCAR, Boulder, CO, USA. 125 p.

Staquet C, Paci A *et al.*(2015). The Passy project: objectives, underlying scientific questions and preliminary numerical modeling of the Passy Alpine valley. Proc. of the 33rd International on Alpine Meteorology, Innsbruck, Austria.

Whiteman CD, Bian X, Zhong S. (1999). Wintertime evolution of the temperature inversion in the Colorado Plateau Basin. *J. Appl. Meteorol.*, n° 38, p. 1103-1117.

Whiteman CD. (2000). *Mountain Meteorology: fundamentals and applications*. Oxford University Press, 355 p.

Whiteman CD *et al.* (2001). Cold pools in the Columbia Basin. *Wea. Forecasting*, n° 16, p. 432-447.

NOTES

1 Les basses couches sont les couches inférieures de l'atmosphère, typiquement entre le sol et environ 2 000 m au-dessus.

2 Sept années de mesure du benzo(a)pyrène à Passy et deux à Sallanches entre 2008 et 2015 (source : http://www.air-rhonealpes.fr/).

3 Programme PRIMEQUAL : programme de recherche inter-organisme pour une meilleure qualité de l'air à l'échelle locale).

4 Au moment de la campagne Passy-2015, il y avait respectivement 11, 10 et 9 capteurs de température et d'humidité de l'air sur les pentes face aux stations Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de Chamonix, Passy et Marnaz, dans le cadre du projet DECOMBIO. D'autres ont été ajoutés depuis.

5 Nous reprendrons le terme « plaine de Passy » par la suite pour designer par extension la partie semi-fermée de la vallée de l'Arve, située entre les verrous de Servoz et de Cluses, sur laquelle s'est focalisée la campagne Passy-2015.

6 Pour aborder cette question, les données de cadastres d'émission avec une résolution spatiale fine sont nécessaires. Ces données existent avec une résolution de 100 m dans la vallée de l'Arve (au lieu de 1 km sur l'ensemble de la région) suite aux travaux d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

7 Pression atmosphérique locale mesurée à 30 cm du sol sur le site 1 de janvier à février 2015, à ne pas confondre avec la pression rapportée au niveau de la mer de la station METEO-FRANCE la plus proche mesurée en continue et présentée sur la Figure 5.

8 Le lidar vent scannant du site 2 fonctionne dans le proche infrarouge à une longueur d'onde de 1,54 µm.

9 Le scintillomètre des sites 5a et 5b fonctionne dans le proche infrarouge à une longueur d'onde de 880 nm.

10 L'acronyme WRF signifie *Weather Research and Forecasting model*.

11 Meso-NH signifie *Mesoscale Non-Hydrostatic model*.

12 L'acronyme AROME signifie Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Échelle.

ABSTRACTS

Français

Les conditions anticycloniques hivernales (ciel clair, nuits froides) conduisent à la formation de couches stables persistantes qui favorisent les épisodes de pollution, particulièrement en terrain montagneux. La vallée de l'Arve est très sensible à ce phénomène, en particulier près de la ville de Passy (Haute-Savoie), située à 20 kilomètres en aval de Chamonix-Mont-Blanc, où la qualité de l'air est l'une des moins bonnes de France.

Au-delà du suivi de la qualité de l'air, tel que réalisé par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes ou par le projet DECOMBIO piloté par l'Institut des Géosciences et de l'Environnement (IGE), il est primordial d'améliorer la connais-

sance de la dynamique atmosphérique à l'échelle de la vallée en conditions stables pour mieux comprendre comment, couplée au cycle et à la géographie des émissions, elle pilote la dispersion des polluants. C'est la motivation du projet Passy, initié en 2014. Ce projet s'appuie sur les observations de la campagne Passy-2015, présentées dans cet article avec quelques premiers résultats. L'objectif général de cette campagne est de documenter la dynamique atmosphérique au sein de la vallée de l'Arve lors des épisodes de pollution hivernale.
Les travaux menés dans le cadre du projet et de l'analyse des données de la campagne s'inscrivent au sein d'une collaboration sur plusieurs années entre les différents partenaires. Ils contribueront à affiner la prévision du temps et de la qualité de l'air dans ce type de vallée, et plus généralement en conditions stables. Il s'agit en particulier d'améliorer la capacité à prévoir des phénomènes critiques, comme les températures minimales, le verglas, le brouillard, les évènements de pollution ou encore les zones de pollution intense.

English

Wintertime anticyclonic conditions, associated with clear sky and cold nights, trigger the formation of persistent layers of stable air over the ground. In an urban area, these persistent layers lead to poor air quality, especially when the terrain is mountainous. This is particularly the case in the Arve River Valley near the city of Passy, located 20 km downstream of Chamonix-Mont-Blanc, where air quality stands among the poorest ones in France.
Beyond the monitoring of air quality, as performed by the Auvergne-Rhône-Alpes air quality agency or within the scientific project DECOMBIO led by the Institute for Geosciences and the Environment (IGE), knowledge of the atmospheric dynamics at the valley scale should be gained to understand how pollutants are dispersed. This is the motivation of the Passy project, which started in 2014. It relies on the Passy-2015 field experiment, whereof presentation, along with the discussion of a few results, is the purpose of the present paper. The objective of this field experiment is to document the atmospheric dynamics in the Arve River Valley during wintertime pollution episodes.
The work conducted during the Passy project and the analysis of the Passy-2015 field experiment will benefit from a several-year long collaboration among the different partners. The knowledge thus gained will contribute to refine weather forecast and air quality prediction in the Arve River Valley and, more generally, in mountain urban areas under stable conditions. From an operational perspective, our goal is to improve our ability to forecast critical events such as low temperatures, ice and fog formation, pollution events or locations subject to high pollutant concentration.

INDEX

Mots-clés
Conditions stables hivernales, pollution atmosphérique, couche limite atmosphérique, campagne de mesure, vallée de l'Arve, Passy-2015.

Keywords
Wintertime stable conditions, atmospheric pollution, atmospheric boundary layer, field experiment, Arve River Valley, Passy-2015.

AUTHORS

Alexandre PACI
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Chantal STAQUET
Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI), Université Grenoble Alpes et CNRS (UMR 5519), 38000 Grenoble, France.

Julie ALLARD
Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, IGE, 38000 Grenoble, France.

Hélène BARRAL
Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, IGE, 38000 Grenoble, France.

Guylaine CANUT
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Jean-Martial COHARD
Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, IGE, 38000 Grenoble, France.

Jean-Luc Jaffrezo
Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, IGE, 38000 Grenoble, France.

Pauline MARTINET
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Tiphaine SABATIER
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Florence TROUDE
Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, 69500 Bron, France.

Gabriele ARDUINI
Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI), Université Grenoble Alpes et CNRS (UMR 5519), 38000 Grenoble, France / National Centre for Atmospheric Science (NCAS), University of Hertfordshire, Hatfield, AL10 9AB, Royaume-Uni

Frédéric BURNET
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Christophe BRUN
Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI), Université Grenoble Alpes et CNRS (UMR 5519), 38000 Grenoble, France.

Charles CHEMEL
National Centre for Atmospheric Science (NCAS), University of Hertfordshire, Hatfield, AL10 9AB, Royaume-Uni.

Alain DABAS
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Jean-Marie DONIER
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Olivier GARROUSTE
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Rémi GUILLOT
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Yann LARGERON
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Dominique LEGAIN
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France. Maintenant à METEO-FRANCE, Direction Interrégionale Nord Est/OBS/DA, 67403 Illkirch, France.

William MAUREL
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Diane TZANOS
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Sébastien BARRAU
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Manuel BARRET
Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, IGE, 38000 Grenoble, France.

Joël BARRIE
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Anne BELLEUDY
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Gilles BOUHOURS
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Thierry BOURRIANNE
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Florie CHEVRIER
Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, IGE, 38000 Grenoble, France.

Thierry DOUFFET
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Jean-Michel ETCHEBERRY
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Laurent GUSTAVE
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Marie MAZOYER
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Stéphane MERCIER
Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI), Université Grenoble Alpes et CNRS (UMR 5519), 38000 Grenoble, France.

Éric MOULIN
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Yann PELLAN
Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, 69500 Bron, France.

Bruno PIGUET
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Quentin RODIER
Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), METEO-FRANCE et CNRS (UMR 3589), 31100 Toulouse, France.

Isabella ZIN
Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, IGE, 38000 Grenoble, France.