

# Dynamique atmosphérique dans une vallée pyrénéenne en conditions stables

## (Campagne Cerdanya-2017)

### Introduction

Durant les périodes anticycloniques hivernales, des “lacs” d’air froid appelés cold-pools se forment dans les vallées. Une couche stable se met en place avec une température en fond de vallée nettement inférieure à celle observée en altitude (jusqu’à 15 °C de différence sur 1000 m dans la vallée de l’Arve en 2015, (Paci et al., 2016)). Ces situations d’inversion sont encore mal représentées dans les modèles de prévision du temps et plus particulièrement en zone de relief. Cela entraîne des difficultés pour prévoir des phénomènes critiques associés comme par exemple les températures minimales très basses, le brouillard ou encore une mauvaise qualité de l’air. Ces situations d’inversion sont un des sujets qui a motivé la campagne Cerdanya-2017, dédiée à l’étude des cold-pools mais aussi des ondes et précipitations orographiques. Elle s’est déroulée entre octobre 2016 et mai 2017 dans la région éponyme située au cœur des Pyrénées au sud-est de l’Andorre (figure 1).

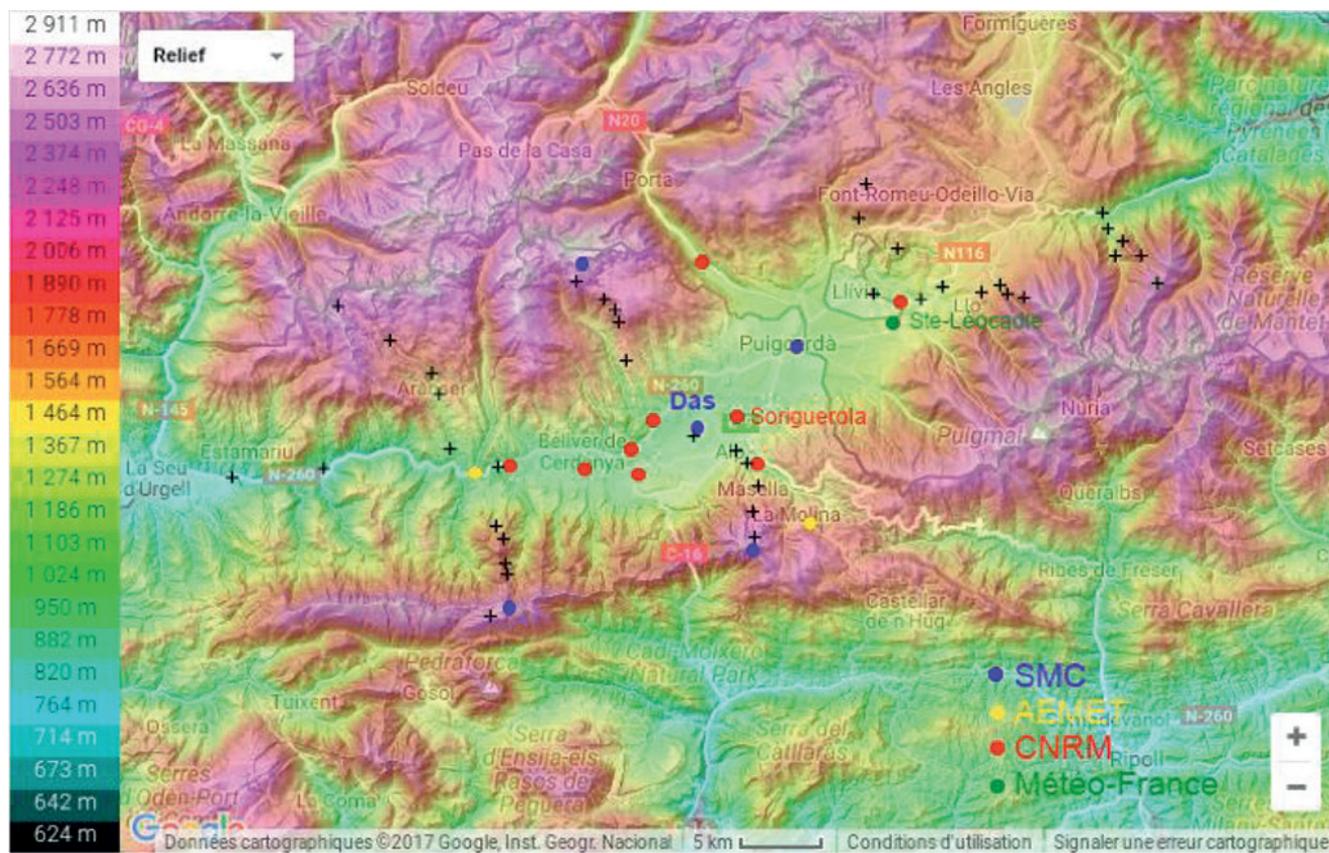


Figure 1 – Points de mesure de la campagne Cerdanya-2017. Fond de carte en couleur : altitude, ronds colorés : stations de surface, croix noires : stations de type « Hobo ». Source du fond de carte : Google Maps.

La collaboration entre plusieurs partenaires de l'euro-région Pyrénées-Méditerranée a permis de mettre en place un dispositif instrumental dense dans cette vallée riche en particularités. C'est en effet la plus vaste des vallées pyrénéennes avec une largeur maximale de 9 km et une longueur de 35 km et l'une des rares orientée est-ouest. Elle est entourée de sommets culminant à plus de 2000 m d'altitude et son orientation qui suit le parcours du soleil contribue à en faire la région la plus ensoleillée et la plus sèche des Pyrénées. D'après une étude statistique sur 4 ans menée par Conangla et al. (2018), des cold-pools sont observés dans cette vallée sur près de 60 % des nuits, principalement en hiver. Un des objectifs de la campagne est précisément de mieux comprendre les mécanismes pilotant la formation et l'évolution des cold-pools, afin notamment d'améliorer les modèles de prévision dans ces conditions.

En complément des 8 stations automatiques de mesures des services météorologiques catalan (représentées par les points violets sur la figure 1), espagnol (points jaunes) et français (point vert), 9 stations mobiles (points rouges) ont été installées par le CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques). Des instruments de télédétection ont également été mis en place par le CNRM sur le site principal de mesure, nommé SMC-Das, situé au centre de la vallée (lidar vent scannant, radiomètre micro-onde, télémètre à nuages, caméra panoramique) et le site d'All (radar UHF), en complément d'instruments déployés par les autres partenaires. Durant la phase d'observations intensives, des radiosondages, des drones profileurs verticaux et un mini

ballon captif sont venus compléter ces mesures. Quarante-trois stations de mesure de la température et de l'humidité (type « Hobo ») sont également réparties sur les pentes (croix noires).

L'objectif de cette étude est de réaliser une première analyse d'une partie des données de la campagne, d'abord pour identifier les différents types de situations rencontrées lors des trois mois d'hiver, ensuite pour étudier plus en détail une de ces situations.

Les données et simulations numériques utilisées sont présentées dans une première partie. La deuxième partie met en exergue les difficultés actuelles des modèles numériques à représenter le cycle diurne de la température en situation de cold-pool. La troisième partie est consacrée à la caractérisation des différentes situations rencontrées sur décembre/janvier/février en s'appuyant notamment sur l'étude de la stabilité des basses couches dans la vallée. L'étude des écoulements dans la vallée lors d'une situation d'inversion persistante rencontrée fin décembre 2016 fait l'objet de la dernière partie.

## Données et simulations numériques utilisées

### Observations

*Stations d'observations de surface (points de couleur sur la figure 1) :* Les mesures utilisées sont principalement la température sous abri à 2 m au-dessus du sol ainsi que la force et direction du vent à 10 m. Elles sont disponibles au pas d'une minute pour la plupart (notamment pour les stations du CNRM) et au pas semi-horaire pour les autres.

*Radiomètre micro-onde :* Il mesure l'intensité du champ électromagnétique émis par les gaz atmosphériques et en déduit la température à l'aide de méthodes de restitution. Il fournit des estimations du profil vertical de température toutes les 10 minutes sur les premiers kilomètres de l'atmosphère avec une résolution de 50 m près du sol et de 200 m au-dessus de 1800 m.

*Radiosondages :* 35 radiosondages ont été lancés par le service météorologique catalan (SMC) entre décembre 2016 et mai 2017 ; ils permettent d'obtenir des profils verticaux de température et de vent.

*Lidar vent scannant :* Le lidar fournit la vitesse radiale du vent (vitesse du vent projetée sur l'axe de visée du lidar) toutes les 10 minutes dans une coupe horizontale et 4 coupes verticales aux azimuts 63°, 133°, 258° et 315° ce qui permet d'avoir une vision spatialisée du champ de vent.

### Simulations numériques

*AROME :* C'est le modèle opérationnel non-hydrostatique à maille fine de Météo-France. Sa résolution horizontale est de 1,3 km et sa résolution verticale varie depuis 10 m près du sol en diminuant avec l'altitude. Le premier niveau est à 5 m au-dessus du sol. Les principaux paramètres utilisés sont la température à 2 m et le vent à 10 m issus de prévisions quotidiennes à 36 h d'échéance initialisées à 12 UTC. Les conditions aux limites sont fournies par le modèle ARPEGE.

*Meso-NH :* Les résultats préliminaires de deux simulations de 72 h, réalisées par l'Université des Îles Baléares (Cuxart et Jimenez, communications personnelles) avec le modèle de recherche non-hydrostatique Meso-NH, permettent d'obtenir la température à 1,5 m et le vent à 10 m. Ces simulations couvrent la période du 24 décembre à 12 UTC au 30 décembre à 00 UTC et sont initialisées à partir du modèle européen ECMWF. Meso-NH comprend deux modèles imbriqués, avec une résolution horizontale de 2 km pour le plus vaste et de 400 m pour celui qui couvre la Cerdagne et les environs immédiats. La résolution verticale près du sol est de 3 m et diminue avec l'altitude.

## Modélisation : surestimation des températures minimales en situation stable

La vallée de Cerdagne est l'endroit où sont en général atteints les minima de température en Catalogne. Lors de ces minima, les modèles numériques surestiment généralement la température (Pagès et al., 2017). La figure 2 représente les températures et la force du vent observées à la station SMC-Das (courbe bleue) et prévues par le modèle AROME (courbe verte) et Meso-NH (courbe rouge) du 20 au 31 décembre 2016. Jusqu'au 21 décembre, les températures prévues sont proches des observations

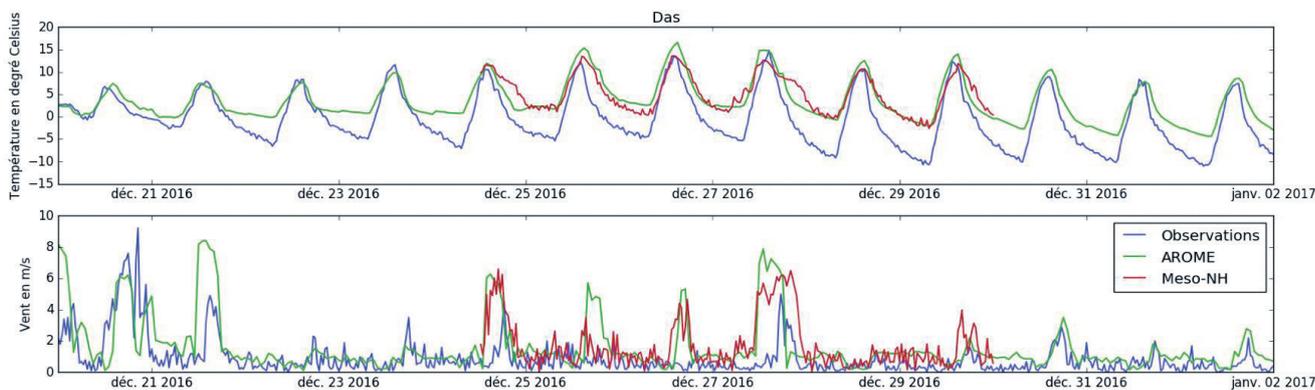
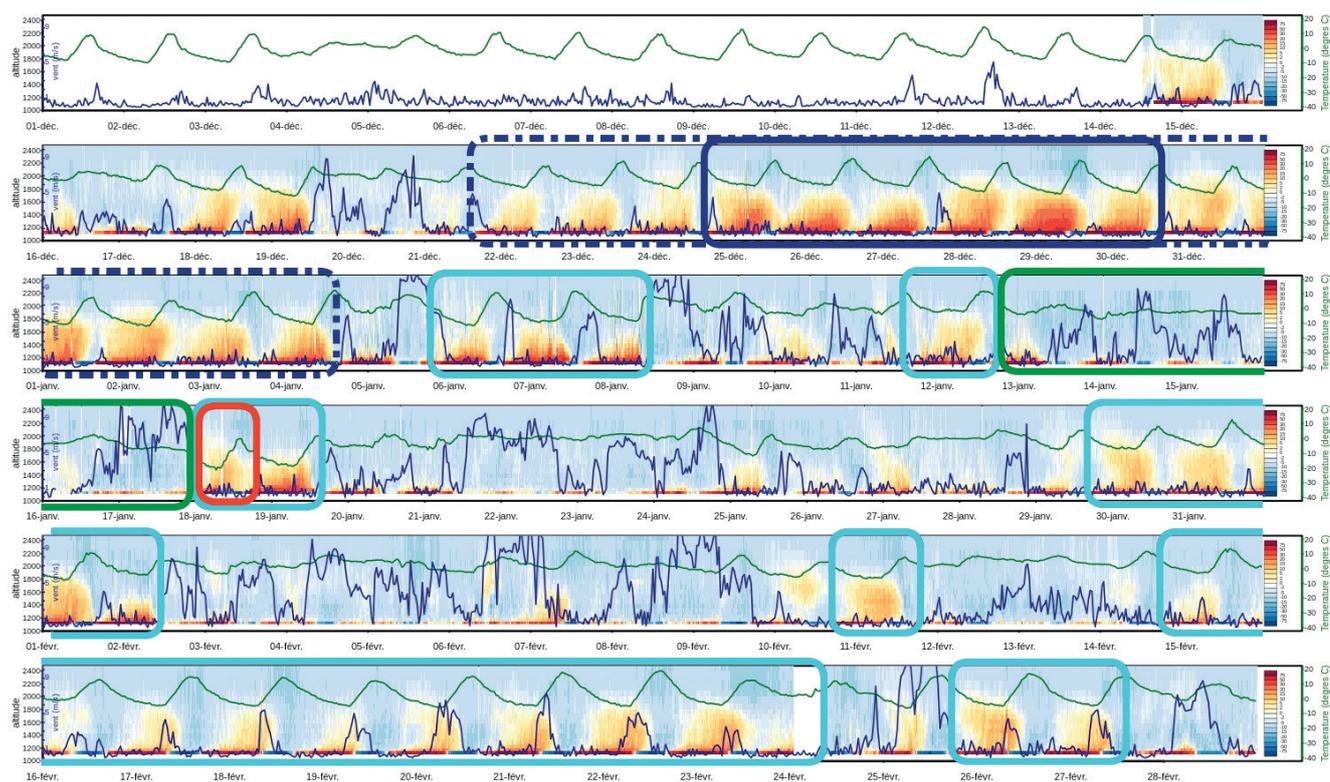


Figure 2 - Température en degrés Celsius et vent en m/s relevés à la station SMC-Das (courbe bleue) prévus par les modèles AROME (courbe verte) et Meso-NH (courbe rouge) du 20 au 31 décembre 2016.

alors qu'après, les modèles surestiment fortement les températures nocturnes avec des biais qui atteignent jusqu'à 10°C en fin de nuit. Les températures en journée sont également légèrement surestimées par le modèle AROME. Le changement de comportement qui apparaît le 21 décembre coïncide avec l'installation de conditions stables avec de fortes inversions de température. Les modèles ont également tendance à surestimer le vent, en particulier en fin d'après-midi entre 15 UTC et 18 UTC, ce qui peut être à l'origine d'une partie des biais en température. Pour améliorer les prévisions dans ce type de situation, il est nécessaire de connaître les conditions de stabilité et les écoulements qui y sont associés.

### Caractérisation des situations rencontrées durant l'hiver 2016-2017

Afin de caractériser les différentes situations rencontrées lors de la campagne, en particulier les cold-pools, la stabilité de l'atmosphère est étudiée entre décembre 2016 et février 2017 à partir des gradients de température calculés à partir des données du radiomètre micro-onde. La figure 3 représente ces gradients avec des couleurs chaudes pour les inversions de températures et des couleurs froides pour les atmosphères instables, ainsi que le vent à 10 m et la température à 2 m sur la station SMC-Das.



**Figure 3 - Gradients de température en K/100 m calculés à partir des données du radiomètre micro-onde (couleurs chaudes pour les inversions de températures et couleurs froides pour les atmosphères instables) ; Température à 2 m en °C et vent à 10 m en m/s à la station SMC-Das (lignes verte et bleue respectivement) ; Présence de neige au sol à la station SMC-Das (flocons rouges).**

Une longue période de stabilité s'étend du 22 décembre 2016 au 4 janvier 2017 (encadré bleu foncé tireté). Au cours de cette période, les 6 nuits du 24 au 31 décembre (encadré bleu foncé) présentent des inversions marquées qui persistent en journée. Cette période d'inversion persistante a été choisie pour être étudiée plus en détail (voir partie suivante).

À partir du 9 janvier et jusqu'au 13 février, les perturbations alternent avec des périodes plus calmes durant lesquelles des inversions nocturnes se mettent en place mais ne persistent pas en journée (encadrés cyan). La nuit du 18 au 19 janvier (encadré rouge), l'inversion de température est marquée et une température minimale de -21,6°C est relevée sur la station SMC-Das, second record de température minimale depuis l'ouverture de la station en 2001. La période du 13 au 17 janvier (encadré vert) est, quant à elle, propice à la formation d'ondes orographiques avec un vent de secteur nord en altitude à plus de 20 m/s et des basses couches stables.

Il faut attendre mi-février pour retrouver des conditions stables sur plusieurs nuits consécutives (encadrés cyan) mais les inversions sont moins marquées que celles de décembre. Cette différence d'intensité est en partie liée au brassage plus important des basses couches en matinée par les brises de pente et la convection (vent à 10 m de plusieurs m/s entre 06 et 12 UTC).

### Écoulements dans la vallée lors de la situation d'inversion persistante

Pour aborder la caractérisation des écoulements de basses couches en conditions stables, nous nous concentrons ici sur le vent dans l'axe de la vallée du 24 au 31 décembre 2016, période d'inversion persistante mise en évidence précédemment.

La figure 4 est une série temporelle de vitesse radiale de vent entre le sol et l'altitude 700 m dans l'axe de la vallée du 24 au 31 décembre 2016. Les couleurs chaudes représentent les vents qui remontent la vallée (d'ouest en est) et les couleurs froides ceux qui descendent la vallée (d'est en ouest).

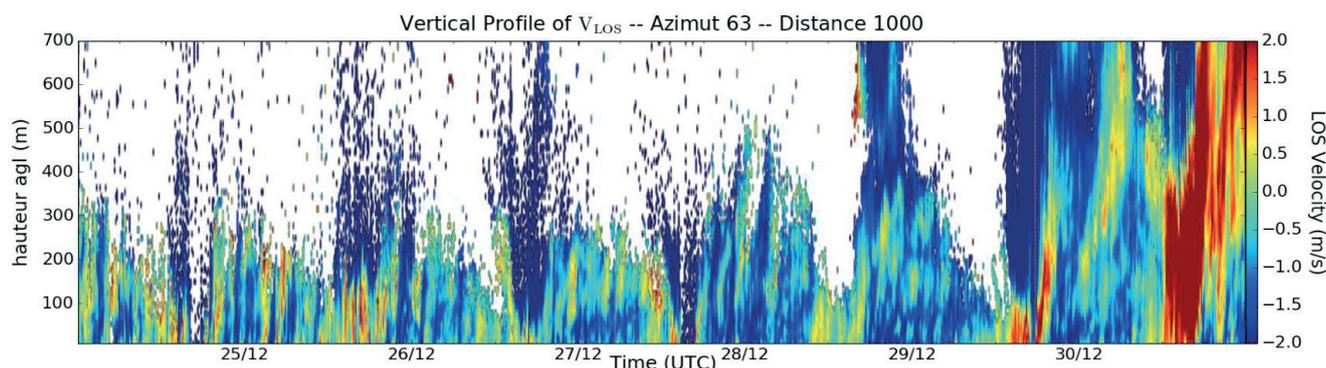


Figure 4 – Coupe verticale temporelle du vent radial (à 1000 m de SMC-Das vers le nord-est, dans la direction azimut 63°) du 24 au 31 décembre 2016.

Le vent est relativement faible et homogène dans l'axe de la vallée. Il présente un cycle diurne piloté par les brises de pente et de vallée. Entre 12 UTC et 16 UTC, les vents dominants dans les 100 premiers mètres au dessus du sol remontent la vallée alors que la nuit, entre 18 UTC et 07 UTC, ils la redescendent. Aux périodes de transition, le matin comme le soir, le comportement du vent est plus variable.

Les conditions stables favorisent le caractère stratifié et oscillatoire du vent. Sur la figure 4 les variations de vitesse radiale (et donc de teinte) sont aussi bien visibles temporellement (oscillations) que verticalement (stratification en couche). Les oscillations sont plus marquées la nuit dans les 100 premiers mètres au dessus du sol. Le vent descendant la vallée se renforce temporairement avec une périodicité d'environ une heure (passage du cyan au bleu foncé). À ce stade, l'hypothèse la plus plausible sur l'origine de ces oscillations dont les périodes sont estimées entre 30 min et quelques heures, est une superposition d'oscillations des vents de pente et d'ondes internes de fréquence plus basse excitées par ces vents de pente (Largeron et al., 2013).

Les variations de force et d'orientation du vent dans la vallée ont une influence sur les températures et particulièrement à la station SMC-Das, au centre de celle-ci. Ils accélèrent la baisse des températures entre 14 UTC et 17 UTC en advectant de l'air froid en provenance notamment de la vallée de La Molina et des hauteurs du Malniu. Sur la figure 2, une asymétrie de la courbe des températures observées en journée avec une baisse brutale des températures à partir de 14 UTC illustre ce refroidissement précoce. Ces advections peuvent également contribuer à la baisse des températures nocturnes qui atteignent des valeurs très inférieures à celles mesurées en dehors du cold-pool : les écarts de température atteignent jusqu'à 13 °C entre la station SMC-Das et celle de Sainte-Léocadie seulement située 13 km en amont et 210 m plus haut.

## Conclusion

Les cold-pools qui se forment dans la vallée de la Cerdagne pendant près de 60 % des nuits, majoritairement en hiver, sont mal représentées par les modèles de prévision du temps. Grâce à l'étude de la stabilité de l'atmosphère dans cette vallée pendant l'hiver 2016-2017, plusieurs périodes favorables à la formation de cold-pools ont été mises en évidence. C'est notamment le cas de la période du 24 au 31 décembre 2016 sur laquelle ont été étudiés les écoulements dans la vallée et leur impact sur le cycle temporel d'évolution de la température à 2 m.

En conditions stables, le vent, bien que généralement faible, est un des facteurs qui contribuent à la formation et à l'évolution des cold-pools. Près du sol et dans les basses couches de l'atmosphère, il est principalement dirigé par les brises de pente et de vallée (remontantes en journée et descendantes la nuit). Lorsque les brises de pente descendantes se mettent en place, elles transportent de l'air froid des sommets vers la vallée ce qui alimente la cold-pool en participant au refroidissement du fond de vallée.

Les modèles numériques AROME et Meso-NH ont tendance à surestimer les températures nocturnes et les vents dans ces conditions. Une boucle de rétroaction positive entre la surestimation des vents de pente et l'érosion partielle induite sur la cold-pool peut expliquer en partie cette difficulté de modélisation.

Ces résultats sont un premier pas vers la connaissance et la compréhension des écoulements en Cerdagne en conditions stables. Il reste encore de nombreuses données à exploiter pour compléter cette étude et contribuer à améliorer les performances des modèles numériques dans ce type de situation.

HÉLÈNE DUMAS

### Références :

- Conangla, L., Cuxart, J., Jimenez, M.-A., Martinez, D., Miró, J.-R., Tabarelli, D. and Zardi, D. (2018). Cold air pool evolution in a wide pyrenean valley. *International Journal of Climatology*, 38(6), 2852-2865.
- Largeron, L., Staquet, C. and Chemel, C. (2013). Characterization of oscillatory motions in the stable atmosphere of a deep valley. *Boundary layer meteorology*, 148(3), 439-454.
- Paci, A., Staquet, C., Allard, J., Barral, H., Canut, G., Cohart, J.-M., Jaffrezo, J.-L., Martinet, P., Sabatier, T., Troude, F. et alii (2016). La campagne Passy-2015 : dynamique atmosphérique et qualité de l'air dans la vallée de l'Arve. *Pollution atmosphérique*, 271, 231-232.
- Pagès, M., Pepin N. and Miró, J., (2017). Measurement and modelling of temperature cold pools in the Cerdanya valley (Pyrenees, Spain). *Meteorological Applications*, 24(2), 290-302.