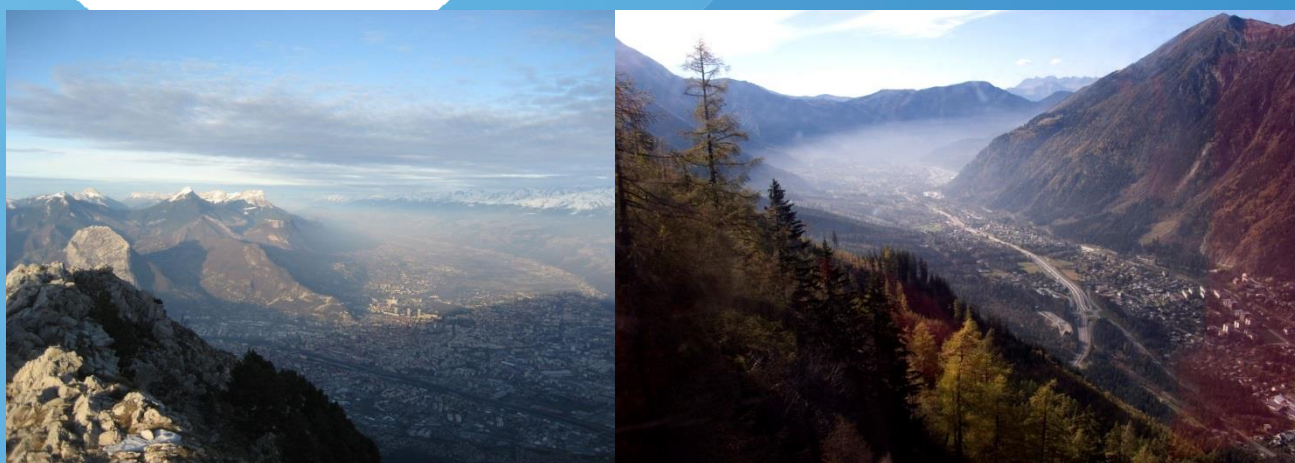


Calage des modèles d'aérodologie sur le sillon alpin



ETUDE DES MODELES METEOROLOGIQUES WFR ET AROME
EN VALLEES ALPINES - MESURES 2012

www.air-rhonealpes.fr



Diffusion : Avril 2014

Siège social : 3 allée des Sorbiers – 69500 BRON

Tel : 09 72 26 48 90 - Fax : 09 72 15 65 64

contact@air-rhonealpes.fr





Air Rhône-Alpes est issu du rapprochement de 6 associations agréées pour la surveillance de la qualité de l'Air (Air-APS, AMPASEL, ASCOPARG, ATMO Drôme-Ardèche, COPARLY, SUP'AIR). Cette régionalisation a eu lieu le 1^{er} janvier 2012 et a eu lieu suite aux orientations prises par le Grenelle de l'Environnement et transcrites par Décret Ministériel (2010-1268 du 22 octobre 2010).

CONDITIONS DE DIFFUSION

Air Rhône-Alpes est une association de type « loi 1901 » agréée par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable des Transports et du Logement (*décret 98-361 du 6 mai 1998*) au même titre que l'ensemble des structures chargées de la surveillance de la qualité de l'air, formant le réseau national ATMO.

Ses missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. La structure agit dans l'esprit de la charte de l'environnement de 2004 adossée à la constitution de l'Etat français et de l'article L.220-1 du Code de l'environnement. Elle gère un observatoire environnemental relatif à l'air et à la pollution atmosphérique au sens de l'article L.220-2 du Code de l'Environnement.

Air Rhône-Alpes communique publiquement sur les informations issues de ses différents travaux et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ses travaux.

A ce titre, les rapports d'études sont librement disponibles sur le site www.air-rhonealpes.fr

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Air Rhône-Alpes. Toute utilisation partielle ou totale de ce document (extrait de texte, graphiques, tableaux, ...) doit faire référence à l'observatoire dans les termes suivants : © **Air Rhône-Alpes (2013) Calage des modèles d'aérodynamique sur le sillon alpin.**

Les données ne sont pas rediffusées en cas de modification ultérieure.

Par ailleurs, Air Rhône-Alpes n'est en aucune façon responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses résultant de ses travaux et pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Air-Rhône-Alpes :

- depuis le formulaire de contact sur le site www.air-rhonealpes.fr
- par mail : contact@air-rhonealpes.fr
- par téléphone : 09 72 26 48 90

Un questionnaire de satisfaction est également disponible en ligne à l'adresse suivante <http://www.surveymonkey.com/s/ecrits> pour vous permettre de donner votre avis sur l'ensemble des informations mis à votre disposition par l'observatoire Air Rhône-Alpes.

Cette étude d'amélioration de connaissances a été rendue possible grâce à l'aide financière particulière des membres suivants :

« Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement, et du Logement »

Toutefois, elle n'aurait pas pu être exploitée sans les données générales de l'observatoire, financé par l'ensemble des membres d'Air Rhône-Alpes.

Version éditée le (31/03/2014)

Sommaire



1

1. Mesures PM10 et stabilité atmosphérique sur l'année 2012	6
1.1. Vallée de l'Arve.....	6
1.2. Vallée de Grenoble	8
1.3. Épisode du 22 février 2013 au 10 mars 2013.....	9
2. Configurations du modèle WRF	13
2.1. Configuration WRF n°1.....	14
2.2. Configuration WRF n°2.....	17
2.3. Temps d'exécution.....	17
3. Comparaison mesures modèle.....	18
3.1. Comparaison mesures modèle : configuration n°1 WRF	18
3.1.1. Tendances générales.....	18
3.1.2. Vallée de Grenoble.....	20
3.1.3. Vallée de l'Arve.....	21
3.2. Comparaison mesures modèle : configuration n° 2 WRF.....	22
3.2.1. Tendances générales.....	22
3.2.2. Vallée de Grenoble.....	24
3.2.3. Vallée de l'Arve.....	25
3.3. Comparaison mesures modèle : autres configurations du modèle WRF.....	27
3.3.1. Option « ifsnow »	27
3.3.2. Option « slope_rad ».....	28
3.4. Comparaison mesures modèle : Arome.....	29
3.4.1. Tendances générales.....	30
3.4.2. Vallée de Grenoble.....	31
3.4.3. Vallée de l'Arve.....	32
4. Synthèse des résultats.....	33
5. Conclusion	35

Annexes

ANNEXE 1 : MODELE MESURES CONFIGURATION WRF N°1 GRILLE 3KM	37
ANNEXE 2 : MODELE MESURES CONFIGURATION WRF N°2 GRILLE 1KM	40
ANNEXE 3 : MODELE MESURES AROME.....	43
ANNEXE 4 : MOYENNES DES ECARTS ABSOLUS	46



Résumé



L'amélioration des connaissances prévue dans l'axe 3 du Plan de Surveillance de la Qualité de l'air de Rhône-Alpes 2011-2015 est divisée en 5 thématiques dans le but d'acquérir des connaissances supplémentaires ou encore pour résoudre les problèmes de points noirs environnementaux ou de populations exposées.

L'amélioration des connaissances prévoit un programme d'amélioration de la modélisation des vallées alpines. Ce territoire est particulièrement exposé à la pollution. Les effets locaux présentent de véritables difficultés de modélisation pour les modèles de dispersion des polluants mais aussi pour les modèles météorologiques. Parmi ces phénomènes, les inversions de températures en basse couche sont très importantes d'un point de vue de la qualité de l'air. En présence d'une inversion, la dispersion atmosphérique des polluants est réduite. La proximité des reliefs accentue alors ce phénomène d'accumulation des polluants en réduisant la dispersion horizontale. Les inversions de températures interviennent lorsque les températures au bas de la vallée deviennent plus froides que les températures en altitude. Le nombre d'inversions et la durée sont plus importants en vallée Alpine qu'en plaine¹. Pour étudier ces inversions, et plus généralement les profils atmosphériques, divers instruments de mesures existent :

- *Le SODAR ou Sonic Detection And Ranging permet d'obtenir des profils verticaux de vents et de températures. Le SODAR fonctionne avec des ondes radio. La diffusion de ces ondes dans l'écoulement permet de déterminer la vitesse et la direction du vent.*
- *Le LIDAR ou Light Detection And Ranging mesure des profils verticaux de vents verticaux et horizontaux. Les mesures LIDAR reposent sur le principe de la rétrodiffusion de lumière et pour le LIDAR vent plus particulièrement sur l'effet Doppler. Ce dernier permet de connaître la vitesse et la direction du vent. Plus généralement, cet instrument permet d'étudier la structure des nuages, la hauteur de couche limite à partir de l'extinction du signal LIDAR en fonction de l'altitude.*
- *Les capteurs de températures positionnés le long des pentes.*
- *Les ballons de radiosondage permettent de mesurer les profils verticaux de températures, pression, humidité à une échéance donnée.*

Pour cette étude, un ensemble de capteurs de température et d'humidité a été implanté dans la vallée de l'Arve et dans la vallée de Grenoble. Le SODAR et le LIDAR n'ont pu être utilisés en raison de difficultés techniques. Le SODAR, qui est un appareil produisant beaucoup de bruits, a dû être éteint en attendant d'un autre emplacement. Le LIDAR, quant à lui, a rencontré de nombreuses difficultés techniques lors de sa mise en place et ne fournit pas assez de données pour une étude sur une année entière. Les capteurs de températures placés dans la vallée de Grenoble ont, quant à eux, fonctionné pour le mois de mars 2012 sans aucun pic notable de PM10. Afin de caractériser le profil type de la vallée de l'Arve, les différents capteurs placés au-dessus de Passy seront utilisés. La vallée de Grenoble sera étudiée avec les stations Météo-France et les stations météo Air Rhône-Alpes disponibles.

L'objectif de cette étude est d'obtenir une caractérisation de la dispersion et des inversions thermiques dans les vallées alpines en vue d'améliorer leurs reproductions dans les modèles météorologiques. Deux vallées seront particulièrement étudiées :

- *La vallée de l'Arve*
- *La vallée du Grenoble*



Les modèles WRF¹ et AROME seront utilisés afin de comparer leurs résultats. Ce sont tous les deux des modèles météorologiques méso-échelle (de résolution intermédiaire entre l'échelle globale ~100 km et l'échelle locale ~100m). Ces deux modèles fournissent les données d'entrées des modèles de dispersion atmosphérique utilisés à Air Rhône Alpes. Il est donc primordial que WRF ou AROME restituent au mieux le phénomène d'inversion de température.

Le modèle AROME, développé par Météo-France, dispose d'une résolution 2.5 km x 2.5 km pour son maillage horizontal. Météo-France met à disposition d'Air Rhône-Alpes les sorties de son modèle dans le cadre de la convention régionale qui lie les deux organismes.

WRF ou Weather Research Forecast est un modèle développé par le National Center for Atmospheric Research² libre d'accès et d'utilisation. Sa résolution dépend du choix de l'utilisateur mais peut varier de ~100km à ~100m.

Dans un premier temps, une étude complète des profils de températures associés aux mesures de PM10 de la vallée de Grenoble et de la vallée de l'Arve sera exposée. Cette partie permettra de mieux comprendre l'enjeu mais aussi les caractéristiques des masses d'air dans les deux vallées. Une section sera dédiée plus particulièrement à l'étude de l'épisode de pollution survenu entre le 22 février au 10 mars 2013. La seconde partie présentera les différentes configurations du modèle WRF choisies pour la comparaison. La troisième partie présentera les résultats des modélisations avec WRF mais aussi avec le modèle AROME en les comparant aux mesures disponibles pour toute la région. Les résultats obtenus pour chacune des deux vallées au niveau des profils verticaux seront ensuite détaillés. Enfin, un bilan des modèles sera entrepris.

¹ The Weather Research and Forecasting Model (WRF) Websites. Deux sites Internet disponibles : <http://www.wrf-model.org/index.php> et <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>

² National Center for Atmospheric Research <http://ncar.ucar.edu/>

1. Mesures PM10 et stabilité atmosphérique sur l'année 2012

1.1. Vallée de l'Arve

Les stations de la vallée de l'Arve ont été placées le long d'une pente au-dessus de la ville de Passy. Ces stations permettent, en première approche, de mesurer le profil vertical de température de la vallée.

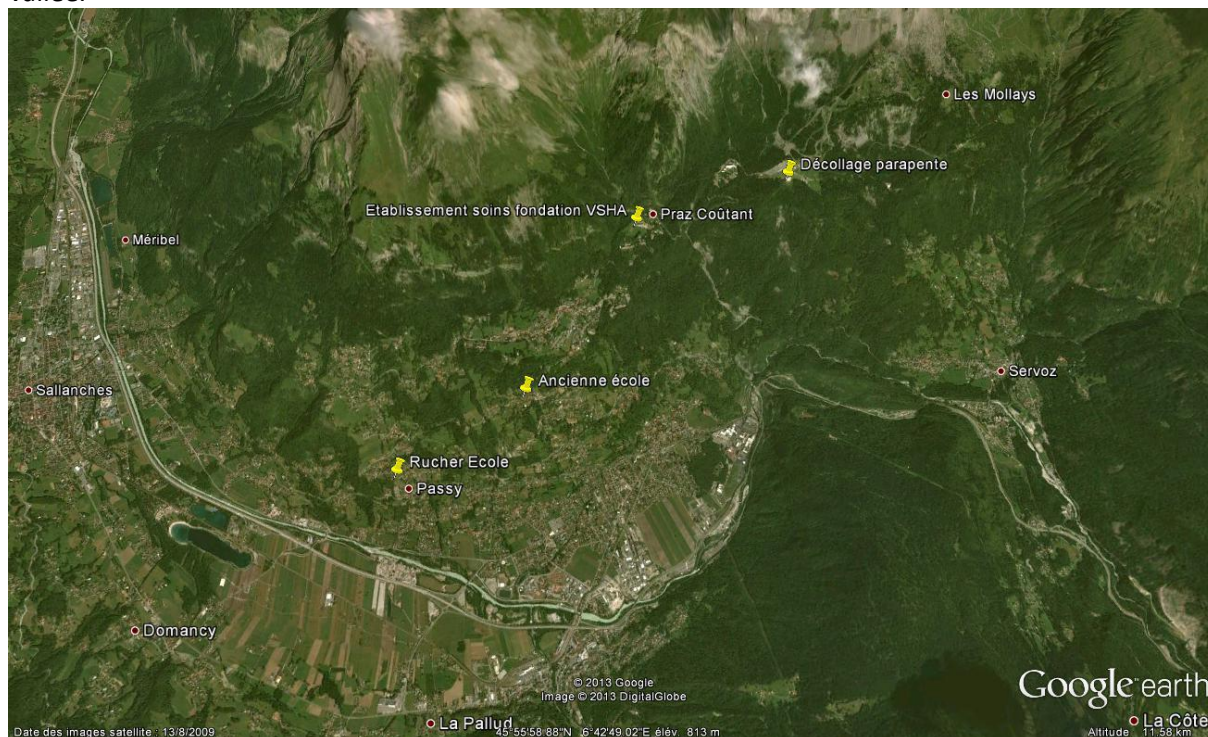


FIGURE 1 – EMPLACEMENT DES STATIONS METEOROLOGIQUES DE LA VALLEE DE L'ARVE

TABLEAU 1 - ALTITUDES DES STATIONS METEOROLOGIQUES DE LA VALLEE DE L'ARVE

Stations	Altitude (m)
rucher école	754
ancien école	900
établissement soins fondation VSHA	1171
décollage parapente	1359

A partir des stations météorologiques placées dans la vallée de l'Arve et de la station de mesures des PM10 de Passy située en bas de la vallée, un premier bilan annuel sur l'année 2012 peut être établi. La concentration moyenne journalière des PM10 est plus importante de octobre à avril. L'effet saisonnier est très marqué sur la Figure 2 en terme de concentration de particules mais aussi en terme d'altitude des inversions de températures. De nombreux pics, dépassant les valeurs réglementaires de moyenne journalière de $50\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, sont mesurés. Ces dépassements sont associés à de nombreuses inversions de températures visibles sur la Figure 2. L'altitude des inversions est calculée par comparaison des températures potentielles virtuelles à différentes altitudes. Ces dernières ont été calculées à partir des températures et des humidités mesurées par les différents capteurs le long de la pente. De plus, la pression a été calculée par approximation de profil hydrostatique de l'air et la pression de vapeur saturante par la relation de Clapeyron. La température potentielle virtuelle est la température qu'aurait la masse d'air humide si on la ramène à une masse d'air sèche et au niveau de pression 1013 hPa par transformation adiabatique. Les altitudes des inversions de températures sont données par rapport à l'altitude des stations.

Par exemple si :

- ➔ θ_v 754 m < θ_v 900m → altitude_inv = 900m.
- ➔ Aucune inversion de température n'est mesurée → on prend une valeur par défaut de 5000m.

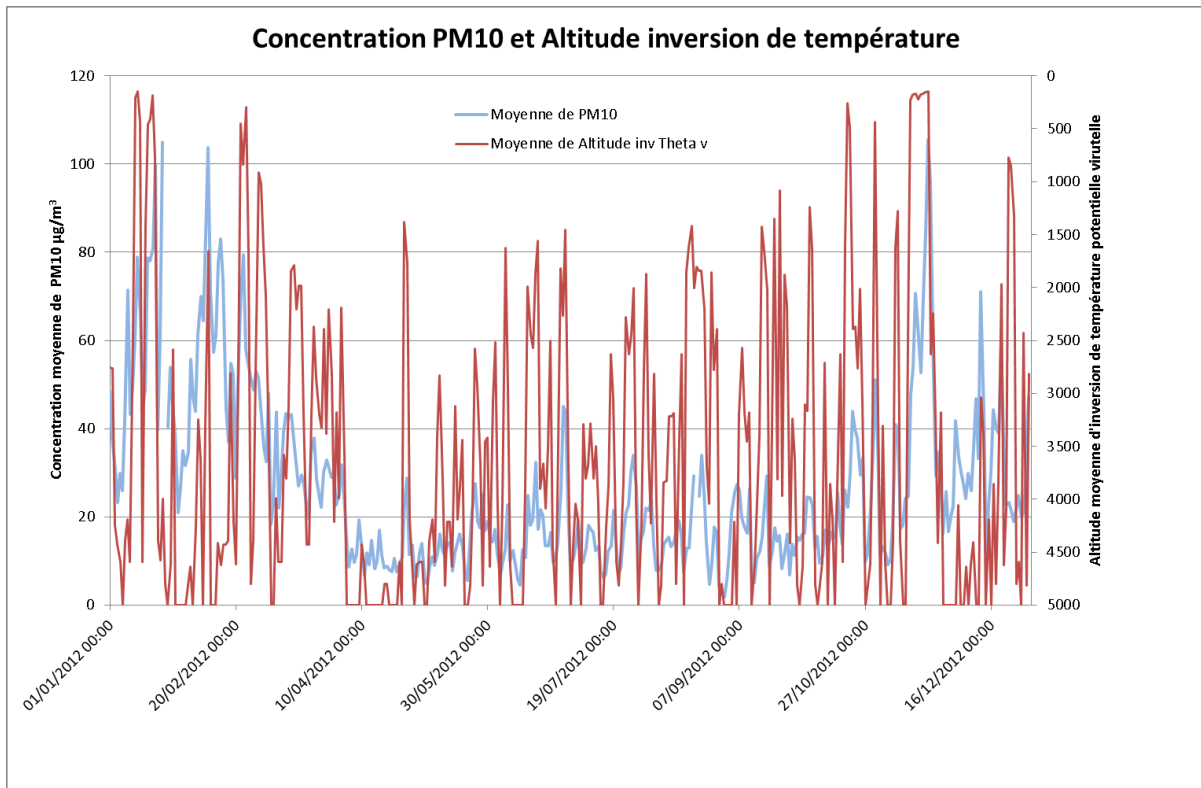


FIGURE 2-CONCENTRATION PM10 ET ALTITUDES DES INVERSIONS DE TEMPERATURES – PASSY

A partir de cette hypothèse, pour l'année 2012, les inversions de températures sont réparties de la manière suivante :

- ➔ 28 % entre les stations situées entre 1359 m et 1171m d'altitude
- ➔ 8 % entre les stations situées entre 1171 m et 900m d'altitude
- ➔ 63 % entre les stations situées entre 900 m et 754m d'altitude

Le phénomène d'inversions de températures s'opère majoritairement dans le bas de la vallée de l'Arve. Cette inversion peut être d'origine locale. Au cours de la nuit, la température du bas de la vallée refroidie plus vite que la masse d'air en haut de la vallée du fait de la présence de plus de surface de terrain échangeant de la chaleur avec l'atmosphère mais aussi à cause de l'influence du rayonnement solaire. En effet, l'ensoleillement est plus faible en bas de vallée que sur les hauteurs. L'air est alors plus froid le matin. En absence de vent pour chasser l'air froid, le phénomène d'inversion s'opère. Les 28 % d'inversions de températures observées pendant l'année 2012 entre 1359m et 1171m peuvent être dus à l'arrivée d'une masse d'air plus chaude en hauteur qui s'installe au-dessus de la vallée de l'Arve.

La plupart des pics de concentration de PM10 sont corrélés à des inversions. Au cours de l'année 2012, sur les 45 dépassements, 40 cas présentent une inversion de température moyenne inférieure à la valeur par défaut de 5000m la même journée.

1.2. Vallée de Grenoble

Plusieurs stations de mesures météorologiques sont implantées dans la vallée de Grenoble. Les stations visibles sur la Figure 3 ont été choisies en fonction des données disponibles pendant la période de l'étude. Ces dernières sont situées à des altitudes différentes permettant d'analyser les conditions météorologiques en moyenne de la masse d'air de Grenoble. L'hypothèse de cette analyse consiste à utiliser des stations à différentes altitudes pour en déduire un profil vertical par rapport au bas de la vallée. On suppose donc que la masse d'air entre ces trois stations est assez homogène.

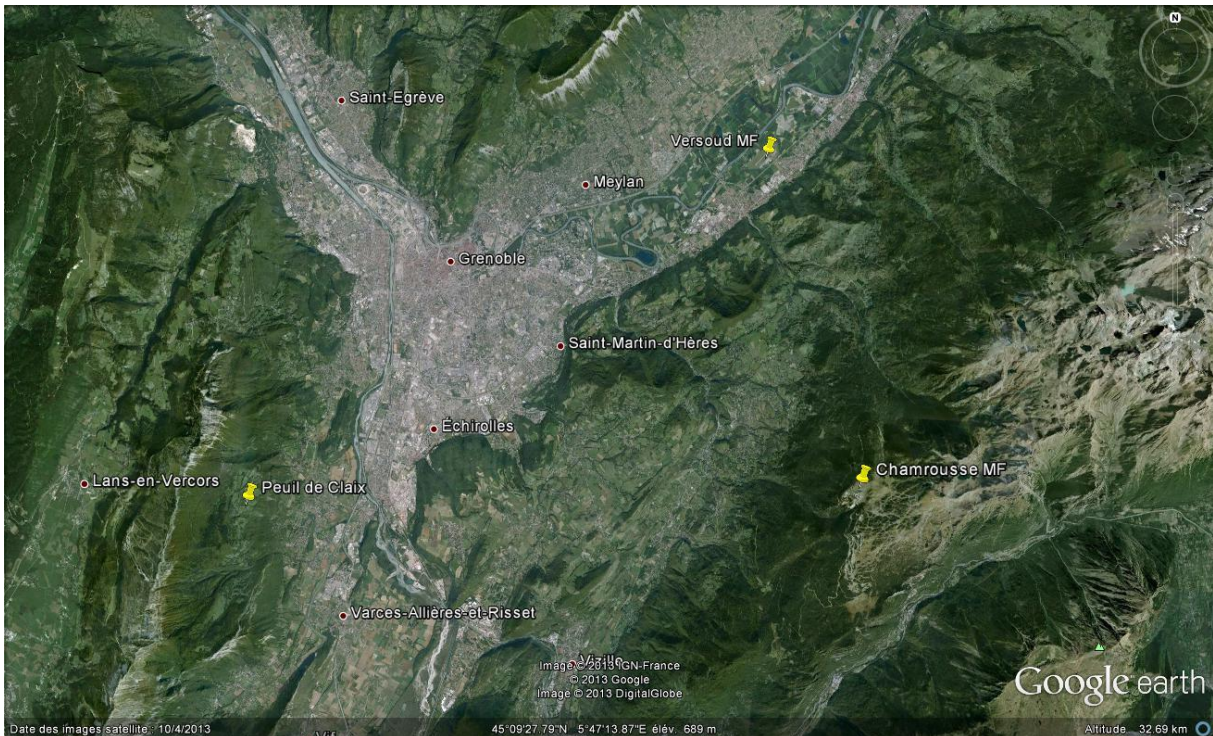


FIGURE 3- STATIONS METEOROLOGIQUES DE GRENOBLE

TABEAU 2 - ALTITUDES DES STATIONS METEOROLOGIQUES DE GRENOBLE

Stations	Altitude (m)
Versoud MF	220
Peuil de Claix	935
Chamrousse MF	1730

Avec la même méthode de calcul du paragraphe 1.1, mais sans prendre en compte l'humidité dans le calcul des températures potentielles, une altitude d'inversion thermique peut être déduite en fonction des trois températures des stations de Versoud, Peuil et Chamrousse. La mesure de l'altitude de l'inversion présente peut d'intérêt ici par manque de points de mesure. En revanche, le nombre d'inversions thermiques par jour est plus intéressant et permet d'évaluer la stabilité atmosphérique de la journée.

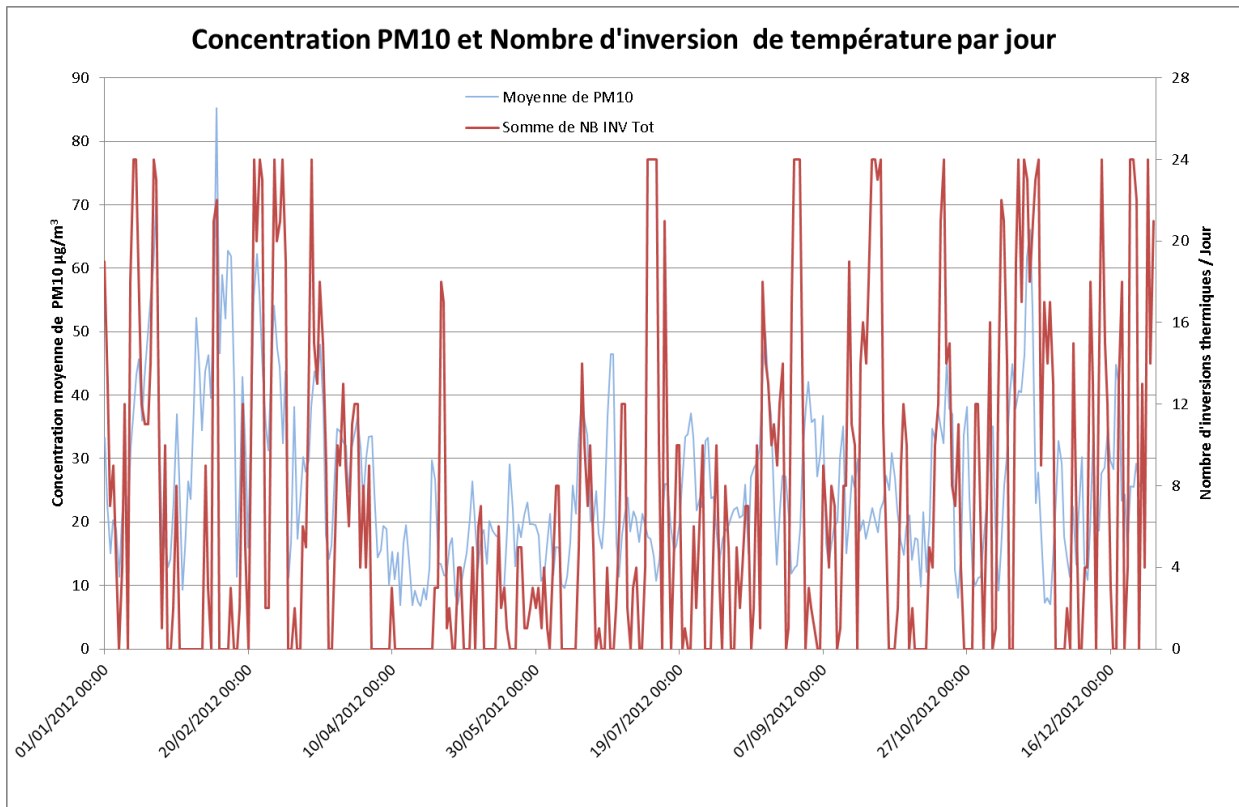


FIGURE 4- CONCENTRATION MOYENNE DE PM10 MESUREE A GRENOBLE BOULEVARDS ET NOMBRE D'INVERSIONS THERMIQUES PAR JOUR

Sur la Figure 4, l'effet saisonnier est marqué pour la concentration moyenne de PM10 mais aussi pour le nombre d'inversions thermiques par jour. L'hiver est la saison où le nombre d'inversions thermiques par jour est le plus important. De nombreux pics de concentration moyenne dépassant le seuil réglementaire de $50\mu\text{g.m}^{-3}$ sont visibles les mêmes journées. La proportion d'inversion entre 220m et 935m et entre 935m et 1730m est identique pour l'année 2012. La masse d'air de la vallée de Grenoble est sans doute relativement homogène, le phénomène d'inversion s'étale sur toute la verticale. Des mesures supplémentaires permettraient cependant de valider cette hypothèse. Le nombre d'heures d'inversion de température joue aussi sûrement un rôle dans la durée d'un épisode. Les pics de concentration dépendent aussi des émissions de la journée. En revanche, les courbes obtenues montrent que lors d'épisodes de pollution importants, en absence d'inversions de températures, la concentration revient à des niveaux proches de $10\mu\text{g.m}^{-3}$ en l'espace d'une journée. Une étude plus détaillée sur un épisode donné est nécessaire pour comprendre le mécanisme.

1.3. Épisode du 22 février 2013 au 10 mars 2013

La période du 22 février 2013 au 10 mars 2013 a été choisie. Elle contient de nombreux épisodes de pollution avec des pics de concentrations de PM10 importants dans la vallée de Grenoble et de l'Arve. La Figure 5 présente le gradient de température potentielle calculé à partir des températures des trois stations de Versoud, Peuil et Chamrousse. Ce gradient représente la stabilité moyenne de la vallée entre l'altitude de Versoud à 220m et Chamrousse à 1730m. Il est calculé par régression linéaire entre les températures des trois stations. L'hypothèse de calcul est de considérer la couche atmosphérique homogène entre ces trois stations. Lorsque le gradient est positif, l'atmosphère est dite stable. Plus le gradient est élevé, plus l'atmosphère est stable. En revanche, lorsqu'il est négatif, l'atmosphère est instable et favorise la dispersion des polluants sur la verticale. Le calcul des gradients de température potentielle montre trois périodes distinctes :

- Du 22 février au 25 février : le gradient de température potentielle est négatif et oscille autour de $-8^{\circ}\text{C.km}^{-1}$. La vitesse du vent est comprise entre 3m.s^{-1} et 5m.s^{-1} . Les concentrations de PM10 varient autour de $40\ \mu\text{g.m}^{-3}$. La dispersion des polluants est favorisée par les vitesses de vent et les conditions instables.
- Du 25 février au 5 mars : le gradient de température potentielle varie beaucoup plus dans la journée et oscille autour de $0^{\circ}\text{C.km}^{-1}$. Les vitesses de vent sont assez faibles en-dessous de 2m.s^{-1} . Les concentrations sont importantes et de nombreux pics supérieurs à $80\ \mu\text{g.m}^{-3}$ sont mesurés. Les concentrations ne redescendent pas en-dessous de $40\ \mu\text{g.m}^{-3}$. Les conditions sont stables et les vitesses de vent faibles ne favorisent pas la dispersion des polluants.
- Du 5 mars au 10 mars : le gradient de température potentielle est majoritairement négatif. Les vitesses de vent sont relativement faibles avec un pic observé le 7 mars. Les concentrations de PM10 sont plus faibles et reviennent pendant la journée à des niveaux proches de $10\ \mu\text{g.m}^{-3}$.

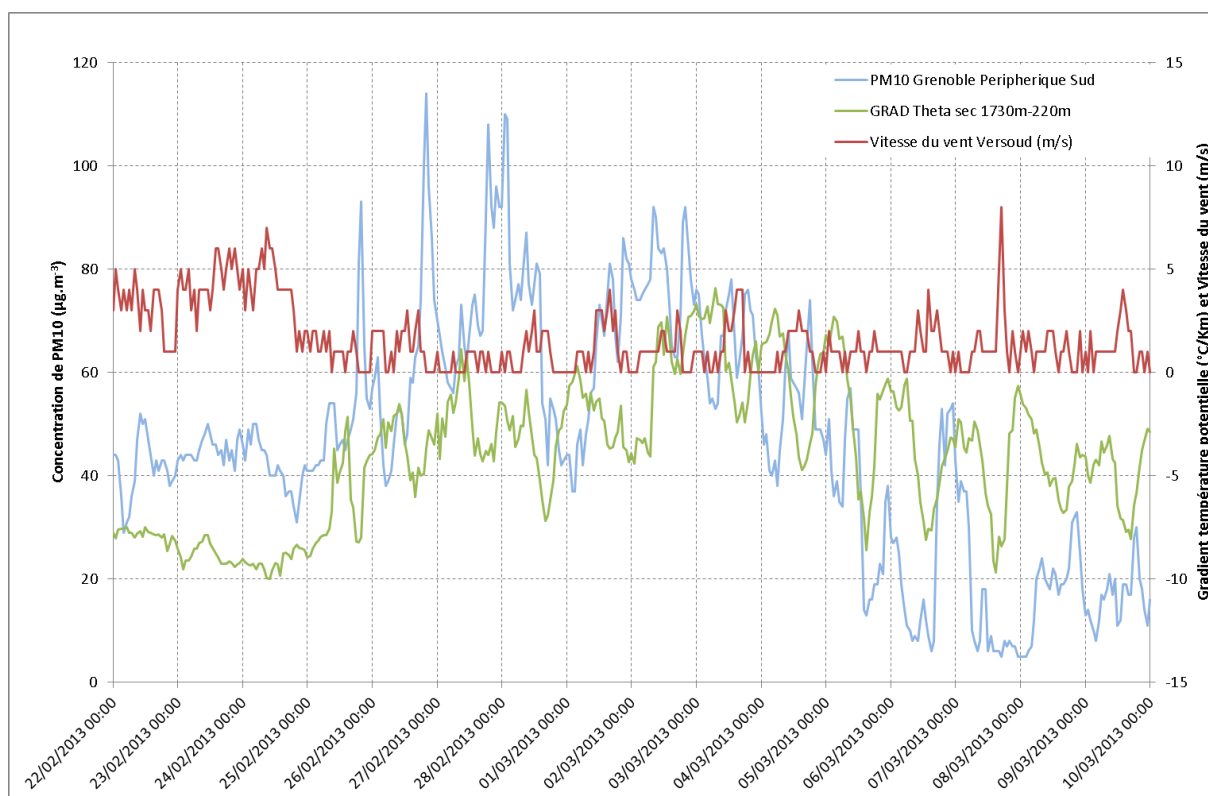


FIGURE 5 - CONCENTRATION DE PM10 A GRENoble PERIPHERIQUE SUD, GRADIENT DE TEMPERATURE POTENTIELLE 1730M-220M, VITESSE DU VENT A VERSOUD A PARTIR DES TROIS STATOS METEO FRANCE

Du 22 février au 5 mars, les températures étaient assez froides : en-dessous de 0°C . Cette période correspond au chevauchement des vacances scolaires des trois zones amenant un trafic routier important. L'influence du sablage est relativement faible pour cette station comme montré dans l'étudeⁱⁱ. On estime à $\sim 5\ \mu\text{g.m}^{-3}$ la quantité de sel qui se retrouve dans les PM10 mesurée par cette station. Les maximums de concentrations peuvent être corrélés à une émission de PM10 provenant du trafic routier et du chauffage au bois. Du 25 février au 1^{er} mars, les minimums de chaque journée augmentent de jour en jour. En revanche, les pics observés interviennent entre 18h et 23h. Les maximums de gradient de température interviennent en début de matinée à partir de 10h. Ces derniers ne peuvent pas être corrélés temporellement aux maximums de concentration. La montée du signal de PM10 semble plus liée à la cinétique de l'émission et à la proximité de la station avec la source. En revanche, la stabilité étant plus forte durant la nuit et le matin, la dispersion des polluants est réduite et peut expliquer pourquoi les concentrations minimales augmentent de jour en jour

pendant cette période. En pleine journée en revanche, le gradient de température potentielle est négatif et un léger vent de 2m.s^{-1} se développe entre 10h et 15h. Hors processus de diffusion et de mélange turbulent un vent de 2m.s^{-1} pendant 5 heures transporte la masse d'air sur 9km. La distance qui sépare Versoud à Grenoble est de $\sim 10\text{km}$. Les vents pendant cette période sont de direction nord-est et participe à une rentrée d'air dans la vallée de Grenoble. Pendant ce créneau, la dispersion est favorisée et doit surement participée au mélange des polluants au sein de la couche. Ces observations reposent sur l'hypothèse que la station de mesure de PM10 de Grenoble boulevard est représentative de la concentration moyenne de la vallée de Grenoble.

Pour confirmer ces hypothèses, plusieurs points de mesure de PM10 sont nécessaires. La mesure de concentration de PM10 en un seul point n'amène pas de réponse supplémentaire car l'échelle des émissions, de la dispersion atmosphérique ou encore des conditions météorologiques semblent plus de l'ordre de la journée ou demi-journée et du km pour cette vallée. La Figure 6 présente la moyenne de concentration de PM10 entre plusieurs stations de mesures disposées dans la vallée de Grenoble. Ses stations sont :

- ➔ Saint Martin d'hères : station de proximité urbaine
- ➔ Grenoble périphérique sud : station de proximité trafic
- ➔ Grenoble boulevard : station de proximité trafic
- ➔ Grenoble les Frênes : station de proximité urbaine

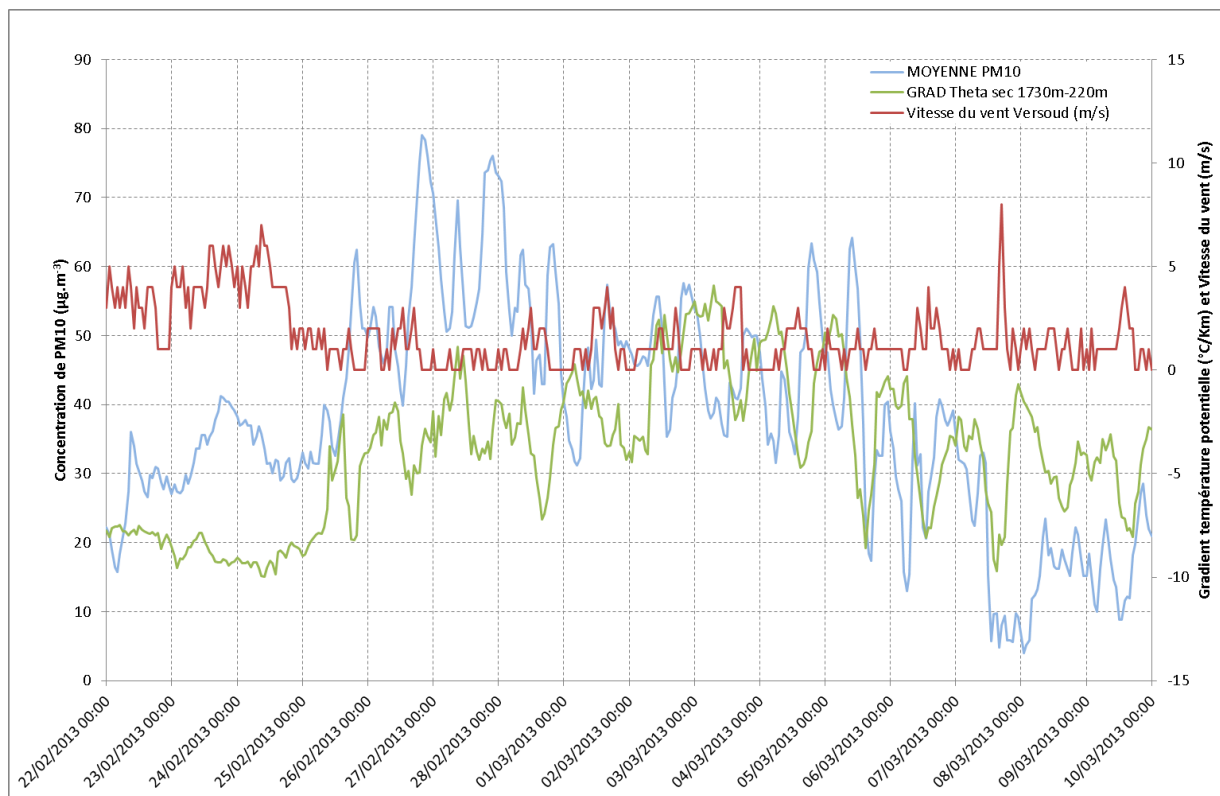


FIGURE 6- GRADIENT DE TEMPERATURE POTentielle 1730M-220M A PARTIR DES 3 STATIONS METEO FRANCE, VITESSE DU VENT A VERSOUD ET CONCENTRATION DE PM10 : MOYENNE ENTRE LES STATIONS SAINT MARTIN D'HERES, GRENOBLE PERIPHERIQUE SUD, GRENOBLE BOULEVARD, GRENOBLE PERIPHERIQUE SUD , GRENOBLE LES FRENES

La moyenne de toutes les concentrations de PM10 ne montre pas de différences importantes avec la station de Grenoble sur le périphérique sud. L'hypothèse de blocage des concentrations en début de matinée par la forte stabilité atmosphérique reste donc valable.

En ce qui concerne la station de Passy, les conditions de stabilité et la concentration de PM10 suivent les mêmes tendances que celles observées pour la vallée de Grenoble (Figure 7). Du 22 au 25 février, les concentrations de PM10 restent en dessous de $60\mu\text{g.m}^{-3}$. Elles varient très peu dans la journée et le gradient de température reste faible. Du 26 février au 7 mars, le gradient est régulièrement positif et de nombreux pics dépassant les $120\mu\text{g.m}^{-3}$ sont mesurés. Enfin, du 7 mars au 10 mars, les concentrations durant la nuit reviennent à des niveaux plus faibles en dessous de $20\mu\text{g.m}^{-3}$ et le gradient thermique retrouve des valeurs négatives.

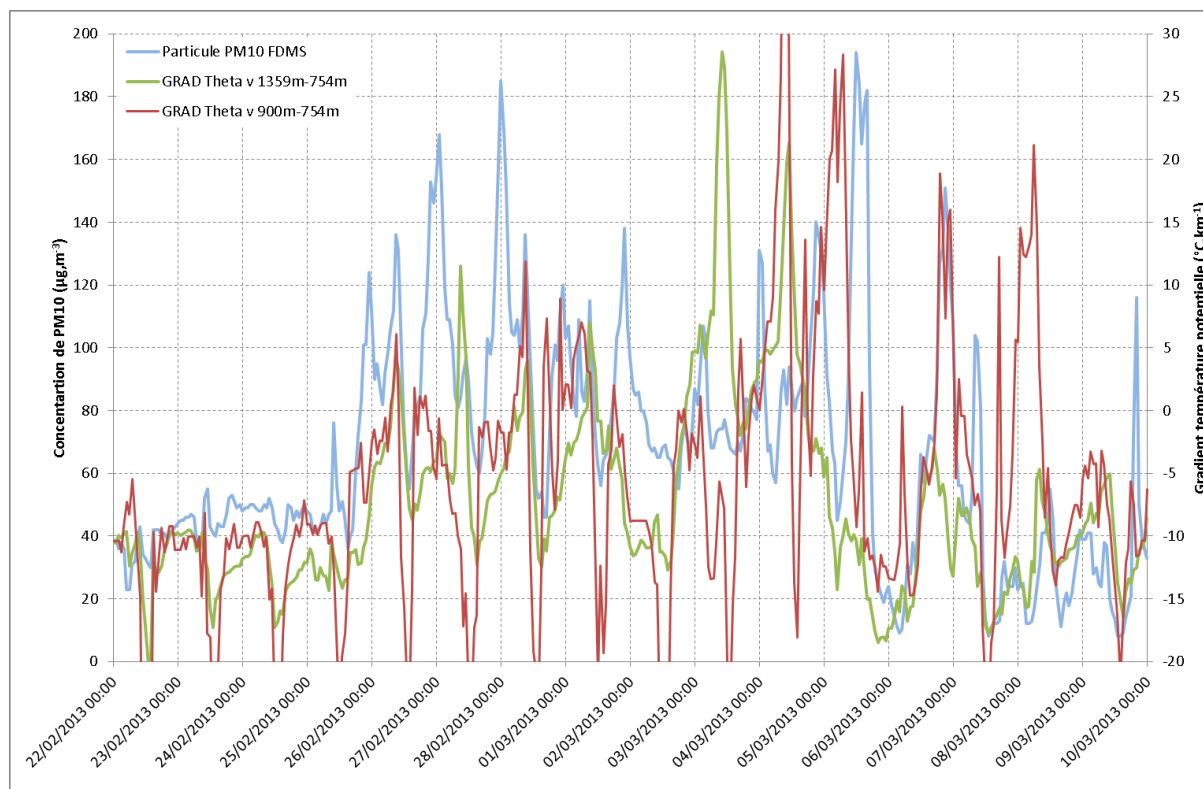


FIGURE 7-CONCENTRATION DE PM10 A PASSY ET GRADIENTS DE TEMPERATURES POTENTIELLES VIRTUELLES

Pour les deux premières périodes, les températures sont relativement froides, elles ne dépassent pas les 6°C . L'influence du chauffage au bois est sans doute importante pendant cette période. Les pics de concentration sont mesurés majoritairement entre 21h et 1h du matin alors que les pics de gradients thermiques sont mesurés en début de matinée. La stabilité atmosphérique bloque la dispersion des polluants pendant la nuit et le matin. Comme pour la vallée de Grenoble, les maximums de concentration de PM10 ne peuvent être corrélés temporellement aux maximums de gradients thermiques. En revanche, les minimums journaliers augmentent de jour en jour. Le calcul du gradient entre 900m et 754m montre que le profil vertical est hétérogène. Il peut être négatif en bas de la vallée mais positif sur la hauteur et inversement. Du 6 mars au 10 mars, les températures à Passy sont relativement douces (de 5°C à 10°C). L'émission de particules semble réduite pendant cette période. La baisse du niveau de fond des concentrations est importante. Elle est accompagnée par un décrochage significatif du gradient de température.

L'encaissement de cette vallée induit des effets plus locaux d'un point de vue météorologique comme montré dans la section 1.1. Les échelles caractéristiques semblent plus faibles par rapport à Grenoble. L'hypothèse que la station de PM10 de Passy mesure la concentration moyenne du bas de la vallée paraît plus valable. Il existe sûrement un gradient vertical important de concentration de PM10 au sein de la vallée. Des mesures spécifiques en altitude permettraient de valider cette hypothèse.

D'après l'ensemble de ces observations, le mécanisme des épisodes de pollution peut être schématisé comme sur la Figure 8.

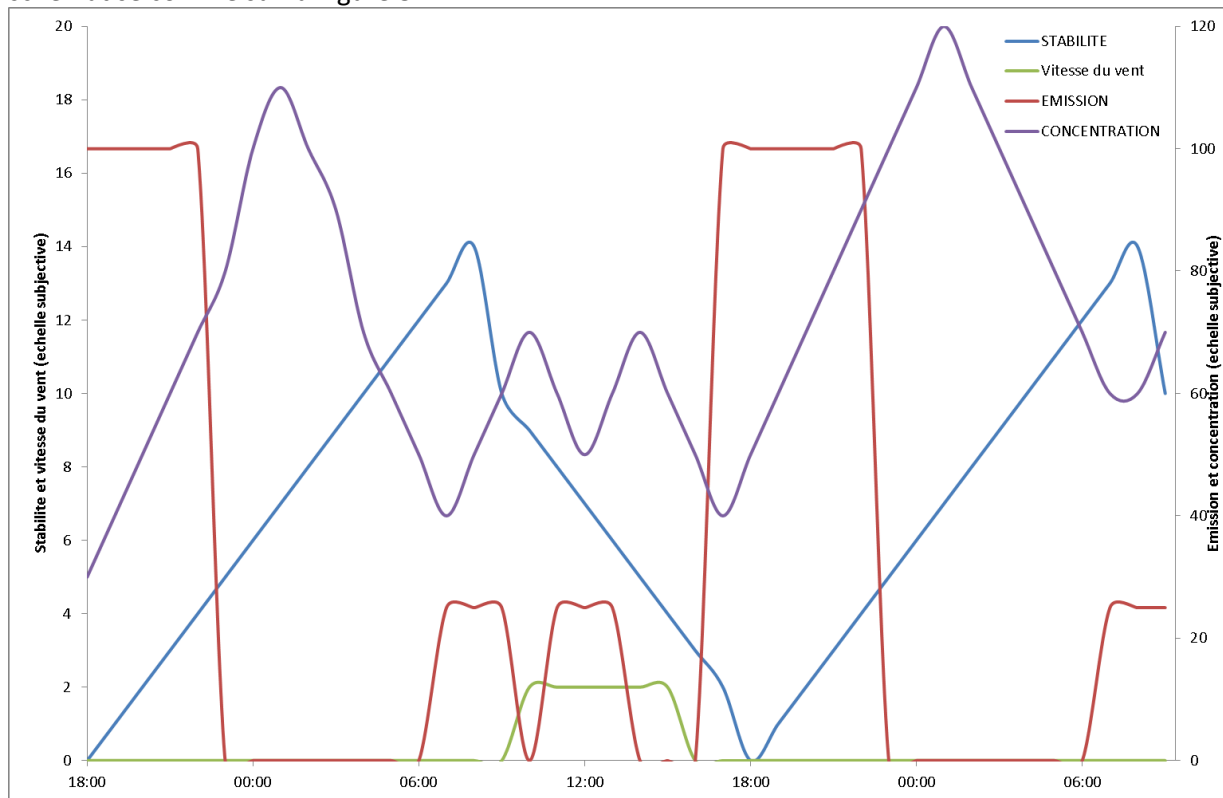


FIGURE 8 - SCHEMA HYPOTHESE DE MECANISME DES EPISODES DE POLLUTION EN CONDITIONS STABLES

- ➔ De 0h à 6h, le facteur d'émission est nul. La concentration de PM10 est maximale. Les émissions sont coupées et la concentration diminue progressivement. L'atmosphère est très stable et bloque le niveau de concentration dans sa diminution.
- ➔ De 6h à 18h : l'atmosphère devient instable. Les émissions du matin et aux alentours de 12h participent aux deux montées de concentrations. Le vent faible participe aussi au mélange des polluants dans la vallée.
- ➔ De 18h à 0h : Les émissions reprennent jusqu'à environ 23h. L'atmosphère devient de plus en plus stable et la concentration de PM10 augmente.
- ➔ Le lendemain de 0h à 6h : l'atmosphère est à son maximum de stabilité. La concentration diminue pendant la nuit car les émissions sont coupées. Le niveau minimal du lendemain est cependant plus important que la veille. Un certain nombre de particules émises la veille sont encore présentes dans la vallée.

La période du 22 février au 10 mars est un choix idéal pour étudier la modélisation des inversions de températures dans les modèles méso-échelle.

2. Configurations du modèle WRF

WRF est un logiciel d'accès libre, parallélisé, en développement continu depuis 7 ans environ et qui reprend les principes de MM5³. Il bénéficie de la très large expérience acquise par la communauté météorologique internationale. A la méso-échelle (intermédiaire entre l'échelle du globe ~100km et l'échelle locale ~100m), il convient de résoudre les équations de la mécanique des fluides, en version compressible, adaptée à la spécificité atmosphérique. L'orographie à haute résolution joue un rôle

³ PSU/NCAR Mesoscale Model 5th generation. MM5 Community Model Homepage.
<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>

majeur sur les écoulements dans la couche limite atmosphérique et tous les phénomènes physiques doivent être considérés explicitement ou en les paramétrant : interaction sol / atmosphère, convection, rayonnement, microphysique des nuages, etc. Ces chaînes de calcul font généralement appel à des domaines imbriqués de résolution horizontale croissante en zoomant sur la zone d'intérêt. Dans le cas de WRF, verticalement, la résolution est la même dans tous les domaines. La configuration des domaines est libre de choix. Le rapport entre les résolutions de chaque domaine est cependant conseillé à 3 de manière à obtenir la configuration la plus stable numériquement. L'utilisateur a le choix de configurer son calcul via un système d'options. Il existe de nombreuses options physiques disponibles permettant de prendre en compte un certain nombre de phénomènes physiques comme les échanges thermiques au niveau du sol, le processus radiatif, la microphysique des nuages, etc... Certaines options sont plus adaptées à certaines zones que d'autres. Le choix est un compromis entre précision, temps de calculs et schémas physiques adaptés. Le besoin de ressources informatiques massives est d'autant plus important que les simulations concernent des domaines de calculs étendus spatialement et/ou de longues périodes temporelles. WRF est un modèle à aire limitée, des conditions aux limites spécifiques dites de grandes échelles sont nécessaires. Les données grandes échelles FNL : Final Analysis⁴, ont été utilisées pour guider WRF pour l'ensemble des simulations. Ces données ont une résolution horizontale de 1°x1° pour tout le globe terrestre et sont libres d'accès. Il existe d'autres données grandes échelles pour WRF, d'origines diverses comme les GFS⁵, GDAS⁶ ou encore les ECMWF⁷. Elles sont issues de différents modèles de prévisions globales développés par des centres de prévisions météorologiques. Les données d'orographie ou encore de type de sol (végétation, sable etc..) sont aussi requises. Elles proviennent de mesures satellitaires fournies gratuitement⁸ avec une résolution maximal de 1km.

Plusieurs configurations du modèle WRF ont été testées pour la période du 22 février au 10 mars 2013 (voir la section 1.3). Deux configurations qui ont données les meilleurs résultats sont présentées en détails. Les autres configurations qui ont abouties à de mauvais résultats ne seront présentées que succinctement. Elles présentent toutefois un réel intérêt et un véritable apprentissage sur la paramétrisation du modèle WRF.

2.1. Configuration WRF n°1

La première configuration choisie est une configuration à trois grilles de résolution 27km / 9km et 3 km respectivement. L'emprise des domaines est visible sur la Figure 9. Le dernier domaine à 3 km de résolution encadre toute la région Rhône-Alpes. La configuration des grilles de calculs est identique à l'emprise des domaines de la chaîne PREVALPⁱⁱⁱ WRF utilisée lors des diverses études de cartographies annuelles. Cette configuration de référence a servi de base pour tester l'influence de quelques paramètres de WRF.

⁴ <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>

⁵ GFS : Global Forecast System

⁶ GDAS : Global Data Assimilation System

⁷ ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

⁸ USGS : <http://www.usgs.gov/> ou MODIS : <http://modis.gsfc.nasa.gov/>

Le système de coordonnées « ETA » est identique pour toutes les grilles de calculs. Le Tableau 3 présente l’altitude par rapport au sol des niveaux « ETA » pour un point de coordonnées à Lyon.

TABLEAU 3 – ALTITUDES PAR RAPPORT AU SOL DES NIVEAUX VERTICAUX DANS WRF - 41 NIVEAUX VERTICAUX (LYON)

Niveau « ETA »	Altitude (m)	Niveau « ETA »	Altitude (m)
1	0	22	3919
2	43	22	4349
3	93	23	4797
4	151	24	5261
5	217	25	5733
6	290	26	6209
7	372	27	6676
8	461	28	7123
9	559	29	7512
10	674	30	7854
11	805	31	8177
12	954	32	8752
13	1129	33	9271
14	1331	34	9828
15	1564	35	10476
16	1821	36	11625
17	2105	37	12551
18	2418	38	13069
19	2761	39	13629
20	3127	40	14240
21	3513	41	14911

Le bilan établi dans le chapitre 1 a montré qu’une modélisation assez fine du profil vertical dans les vallées est primordiale pour reproduire le phénomène d’inversion. En effet, les inversions de températures observées dans la vallée de l’Arve sont assez hétérogènes verticalement. Le raffinement vertical proposé semble assez résolu au niveau du sol puisqu’il propose 17 niveaux verticaux de 0 à 2000m. Un test de sensibilité amènerait cependant à définir plus précisément la répartition idéale de ces niveaux. Il existe toutefois une limite, hormis le temps de calcul, au nombre de niveaux verticaux. Des niveaux trop proche les uns des autres peuvent générer de nombreuses instabilités numériques. Le pas de temps et la résolution verticale doivent respecter la condition CFL¹⁰. Pour respecter cette condition, il faut utiliser un pas de temps suffisamment faible par rapport à la résolution choisie afin de résoudre les équations des écoulements atmosphériques.

¹⁰ Courant-Friedrichs-Levy

2.2. Configuration WRF n°2

La configuration n°2 est une configuration à 4 grilles de calculs de résolutions 27km, 9km, 3km et 1km pour la plus petite grille (Figure 11). Cette dernière est centrée sur les vallées alpines s'étendant de la vallée de Grenoble à la vallée de l'Arve. La configuration des options physiques et des niveaux verticaux est la même que celle utilisée pour la configuration n°1.



FIGURE 11 - CONFIGURATION N°2 WRF - 4 GRILLES DE RESOLUTION 27KM / 9KM / 3KM / 1KM

Les options physiques choisies sont identiques à la configuration n°1. L'ajout unique d'une nouvelle grille permettra de comparer l'apport d'une résolution plus fine sur les résultats. A noter qu'une résolution en dessous de 1km paraît peu judicieuse puisque les données d'entrées d'occupation des sols (classe de végétation, type de sol , etc...) et de relief sont fournies avec une résolution de 1km.

2.3. Temps d'exécution

Les temps de calcul WRF sont donnés à titre indicatif. Ils dépendent du type de processeur utilisé, taille mémoire, vitesse d'écriture sur les disques, etc.... Seuls les temps de calculs du code WRF sont présentés. Le temps de calcul des préprocesseurs utiles à la préparation des données d'entrées est de l'ordre de la demi-heure.

TABLEAU 4 – TEMPS DE CALCULS POUR LES CONFIGURATIONS WRF N°1 ET N°2

	Configuration WRF n°1 3 grilles 27/9/3km de résolution	Configuration WRF n°2 4 grilles 27/9/3/1 km de résolution
Machine	mod-rhonealpes	
Nombre de cœurs utilisés	28	
Temps de calcul	32 heures 30 minutes	169 h 30 minutes

L'apport d'une nouvelle grille de résolution à 1km est très couteuse et présente des temps 5 fois plus importants. Le passage de la configuration n°2 sur la chaîne de prévision PREVALP à 4 jours sur la même machine demanderait 42 h de calculs contre 4h actuellement. En supposant que l'augmentation du nombre de cœur est proportionnelle à la diminution du temps de calculs ; il faudrait 280 cœurs pour réaliser une prévision PREVALP en moins de 4h. Ces résultats sont à prendre avec précaution puisque les options de compilation du code WRF étaient réduites. Les temps de calcul sur cette machine peuvent être améliorés^v. Un gain de temps de 30% à 100% peut être envisagé en optimisant les options de compilations.

3. Comparaison mesures modèle

Afin de comprendre les performances et d'estimer le modèle ou la configuration WRF la plus réaliste, il est nécessaire de comparer les résultats aux mesures. Dans le cadre de la convention qui lie Météo France et Air Rhône-Alpes, les mesures des stations météorologiques sur toute la région sont disponibles. Une comparaison des écarts pour toutes les stations est nécessaire afin de dégager une éventuelle tendance générale du modèle par région. Cette comparaison est aussi utile pour voir l'apport globale lors d'un changement de configuration. Les écarts entre le modèle et les mesures pour les paramètres températures à 2m, vitesse du vent à 10m et humidité relative à 2m sont résumés dans une carte. Pour les profils verticaux, le gradient de température ou les altitudes des inversions de températures sont étudiés spécifiquement pour la vallée de l'Arve et la vallée de Grenoble. Les écarts obtenus pour chaque stations météorologiques par configuration WRF et pour AROME sont présentés en détail en ANNEXE.

3.1. Comparaison mesures modèle : configuration n°1 WRF

3.1.1. Tendances générales

D'après la carte des écarts moyens (Figure 13) entre la modélisation WRF et les observations, le modèle a tendance à surestimer les humidités relatives. L'écart moyen absolu entre la simulation et les observations montre que l'erreur est assez homogène pour toutes les stations, elle est d'environ ~12%.



Moyenne des écarts absolus |Simu - Obs| Humidité relative a 2m (%)

Moyenne des écarts (Simu - Obs) Humidité relative a 2m (%)

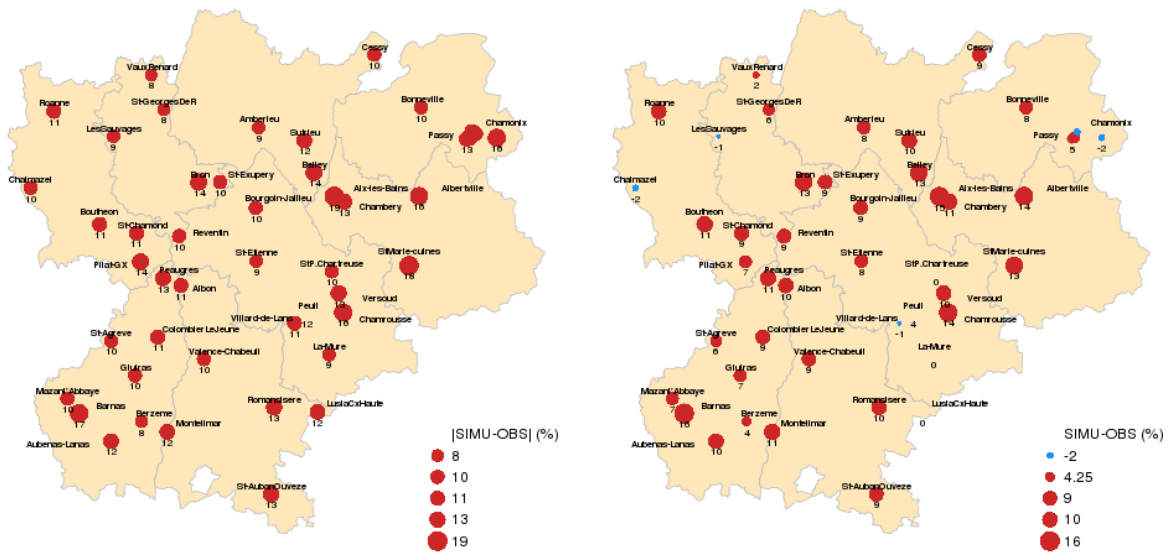


FIGURE 12 – MOYENNES DES ECARTS ABSOLUS ET MOYENNES DES ECARTS – HUMIDITE RELATIVE A 2M – CONFIGURATION N°1-GRILLE 3 KM DE RESOLUTION

En ce qui concerne la température, l'écart moyen entre la simulation et les observations montre que sur l'ensemble du domaine, le modèle WRF sous-estime la température à 2m. Les écarts sont importants (~-3°C) pour les stations situées dans les vallées fortement encaissées comme : Passy, Chamonix, Allevard, Versoud, Sainte-Marie Cuines, Aix-les-Bains ou encore Barnas. La sous-estimation est en revanche plus faible entre -1°C et 1°C pour les autres stations. La moyenne absolue des écarts permet de savoir si les erreurs négatives se confirment ou sont compensées par des valeurs positives. La carte des écarts moyens absolus montre une erreur plus importante pour l'ensemble des stations. De manière générale, cette configuration montre que WRF a tendance à sous-estimer les températures à 2m et que les erreurs sont plus importantes pour le sud Isère, la Savoie et la Haute-Savoie.

Moyenne des écarts absolus |Simu - Obs| Temperature a 2m (C)

Moyenne des écarts (Simu - Obs) Temperature a 2m (C)

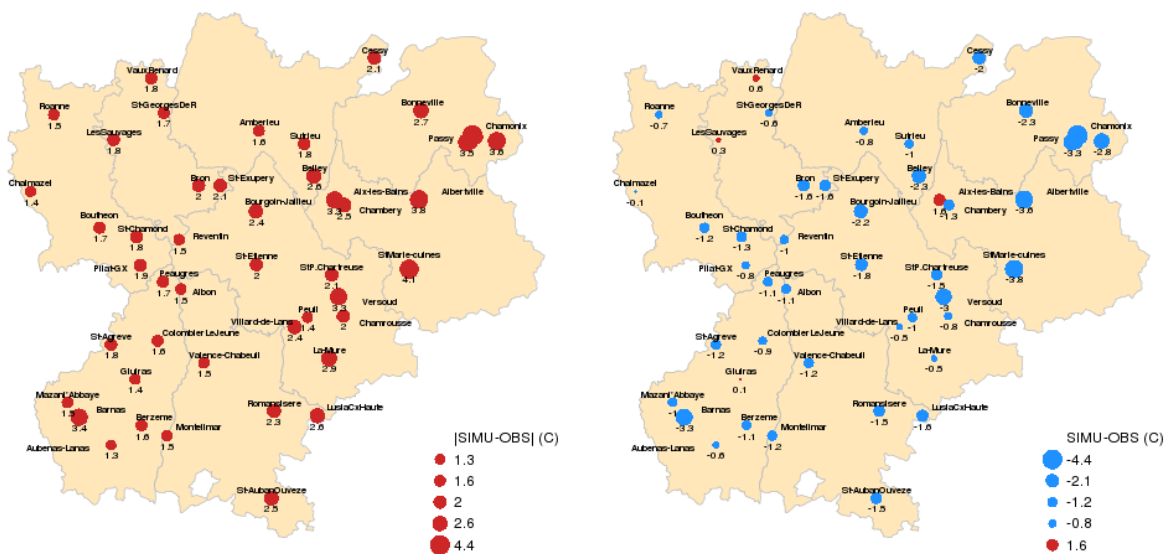


FIGURE 13 - MOYENNES DES ECARTS ABSOLUS ET MOYENNES DES ECARTS – TEMPERATURE A 2M – CONFIGURATION N°1-GRILLE 3 KM DE RESOLUTION

En ce qui concerne la vitesse du vent à 10m, le modèle WRF tend à surestimer les valeurs. L'écart est relativement faible pour la majorité des stations de 1 à 2 m.s⁻¹. Les stations de Lus-la-Croix-haute, Berzème, Peaugres, Pilat et Chambéry présentent les écarts les plus importants.

Moyenne des écarts absolus |Simu - Obs| Vitesse du vent a 10m (m/s) Moyenne des écarts (Simu - Obs) Vitesse du vent a 10m (m/s)

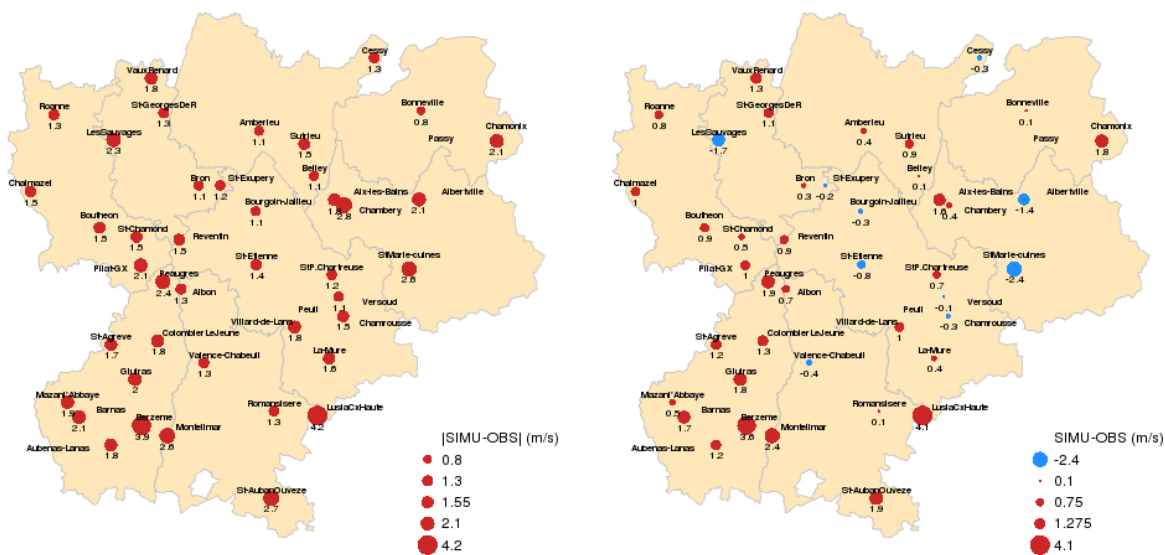


FIGURE 14 - MOYENNES DES ECARTS ABSOLUS ET MOYENNES DES ECARTS – VITESSE DU VENT A 10M – CONFIGURATION N°1 - GRILLE 3 KM DE RESOLUTION

3.1.2. Vallée de Grenoble

Pour la vallée de Grenoble, les stations sont distantes de quelques kilomètres. Afin d’être le plus comparable entre la mesure et la simulation, le gradient de température a été calculé à partir des coordonnées des trois stations entre le modèle et les mesures. Bien que la tendance montre que les températures sont sous-estimées, le fait de comparer un gradient thermique plutôt que des stations individuellement permet de voir si même avec un biais, WRF pronostique le même état d’atmosphère que les observations.

Les gradients thermiques modélisés (Figure 15) sont globalement surestimés, l’écart moyen est de 1,4°C.km⁻¹. WRF a tendance à modéliser une atmosphère trop stable. Pour la première période du 22 février au 25 février, le gradient thermique est surestimé mais la dynamique est identique. En revanche, pour les périodes suivantes, les gradients sont trop importants en journée et trop faibles dans la nuit. La dynamique atmosphérique est mal représentée.

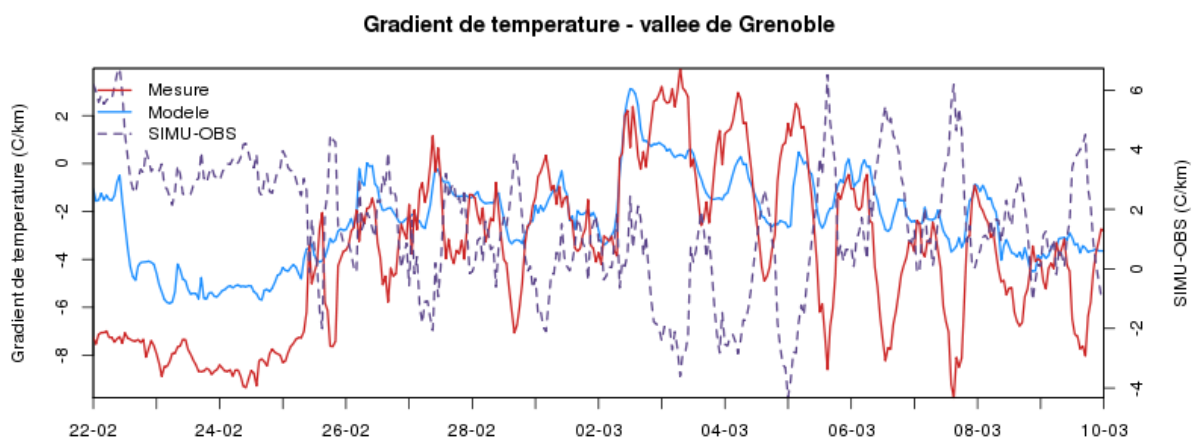


FIGURE 15 -- GRADIENT DE TEMPERATURE ENTRE LES TROIS STATIONS DE LA VALLEE DE GRENOBLE (VERSOU, PEUL ET CHAMROUSSE) MODELISEES ET OBSERVEES-- CONFIGURATION WRF N°1 GRILLE 3KM DE RESOLUTION

On retrouve l'évolution du gradient thermique modélisée dans le paramètre hauteur de la couche limite qui est une des sorties du modèle WRF (Figure 16). Plus celle-ci est grande plus l'atmosphère est instable et inversement. C'est un bon moyen de vérifier la cohérence entre l'évolution du gradient thermique calculée et le profil vertical de WRF. La hauteur de la couche limite modélisée est en accord avec l'évolution du gradient thermique calculé. L'évolution des maximums et minimums de ce dernier se retrouve dans les minimums et maximums de la hauteur de la couche limite modélisée à Versoud. Ce résultat confirme, d'un point de vue modélisation, l'hypothèse d'évaluation de la stabilité atmosphérique de la vallée de Grenoble à partir du calcul de gradient de température des trois stations.

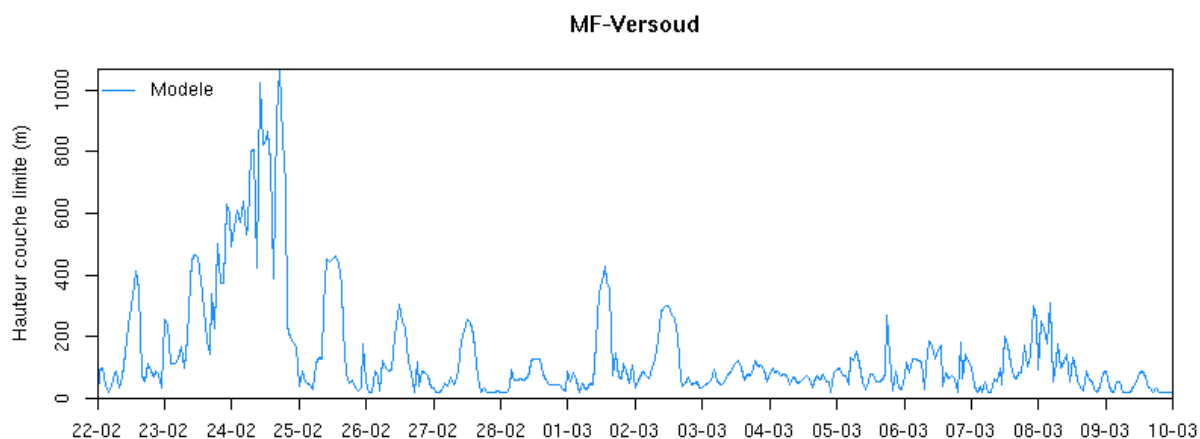


FIGURE 16 – HAUTEUR DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE MODELISEE A VERSOU – CONFIGURATION WRF N°1 GRILLE 3KM DE RESOLUTION

3.1.3. Vallée de l'Arve

Les stations de la vallée de l'Arve sont relativement proche (espacées de 1,5 à 2 km environs) et l'encaissement de la vallée est trop important pour que le modèle à 3km puisse restituer les mêmes pentes. Dans le but de comparer le modèle aux mesures, les altitudes des inversions de températures ont été calculées à partir des niveaux verticaux de WRF. Les niveaux « ETA » de WRF utilisés sont extraits à partir de la verticale au-dessus du point de coordonnées de Passy « Rucher

Ecole ». Les 11 premiers niveaux verticaux sont comparés un à un. Lorsque la température d'un niveau plus bas est plus faible que le niveau juste au-dessus de lui, on considère que l'on est en présence d'une inversion de température. Lorsqu'aucune inversion n'est trouvée, la valeur de 2000m est prise par défaut pour des raisons d'affichage plus pratique. La Figure 17 montre que WRF a tendance à modéliser des inversions de température trop basse. L'écart relatif moyen avec les observations est de -273m. La période du 2 mars au 5 mars par exemple n'est pas en bon accord avec les mesures.

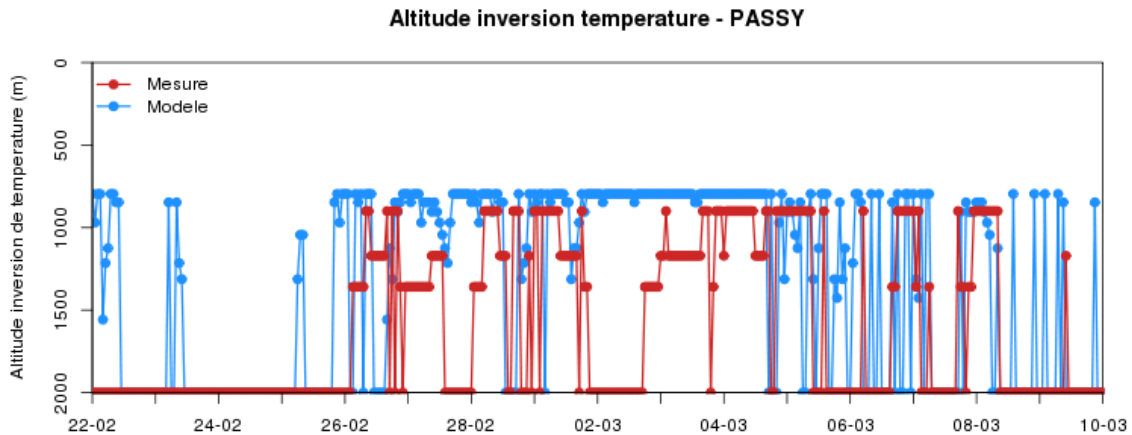


FIGURE 17 - INVERSION DE TEMPERATURES OBSERVEE ET MODELISE - CONFIGURATION WRF N°1 GRILLE 3KM DE RESOLUTION

Ce résultat se retrouve dans la hauteur de la couche limite calculée par le code. La Figure 18 montre que WRF modélise des hauteurs très basses en pleine journée pour la période du 26 février au 5 mars.

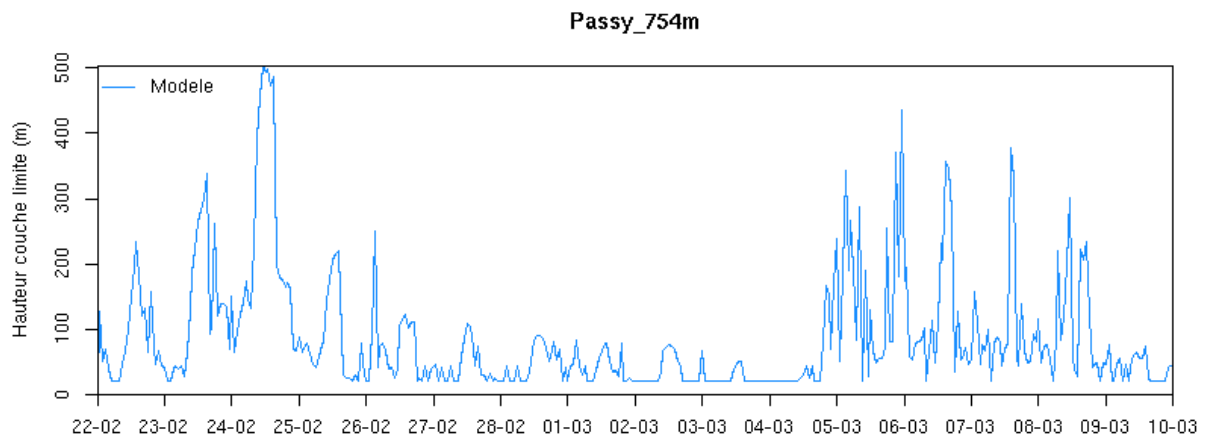


FIGURE 18 - HAUTEUR DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE MODELISEE A PASSY - CONFIGURATION WRF N°1 GRILLE 3 KM DE RESOLUTION

3.2. Comparaison mesures modèle : configuration n° 2 WRF

3.2.1. Tendances générales

La configuration n°2 présente la même tendance que la configuration n°1 avec une surestimation des humidités relatives (Figure 19). L'écart est cependant plus faible dans cette configuration pour les stations comprises dans le domaine à 1km de résolution mais aussi pour toutes les autres stations. La

nouvelle grille amène une amélioration sur l'ensemble du domaine à 3km. L'écart moyen absolu pour toutes les stations est de ~11%.

Moyenne des écarts absolus |Simu - Obs| Humidité relative a 2m (%)

Moyenne des écarts (Simu - Obs) Humidité relative a 2m (%)

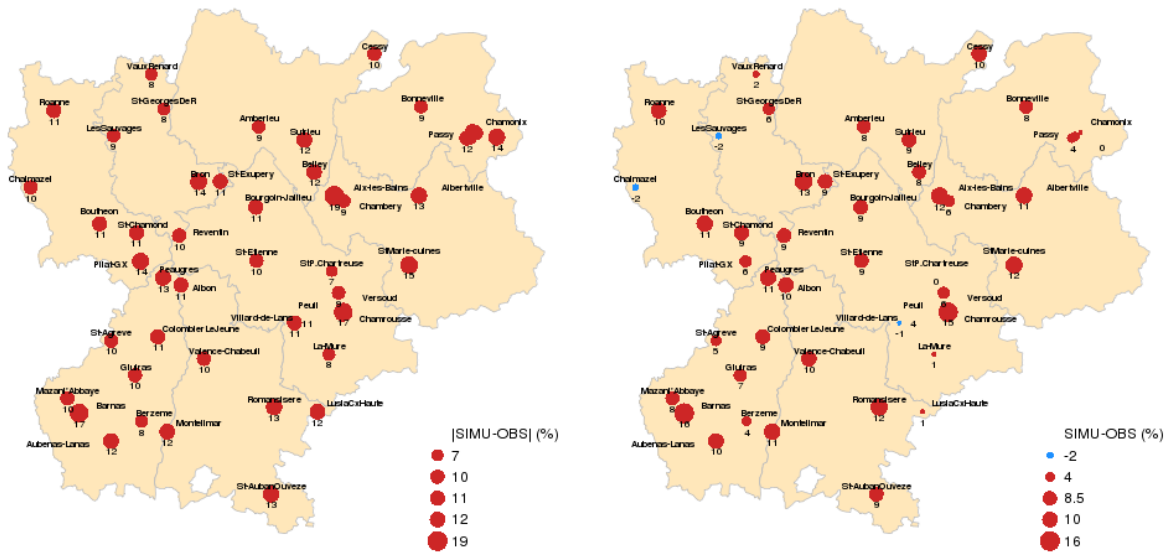


FIGURE 19 - MOYENNES DES ECARTS ABSOLUS ET MOYENNES DES ECARTS – HUMIDITE RELATIVE A 2M – CONFIGURATION WRF n°2 –GRILLE 3KM DE RESOLUTION

La configuration n°2 du modèle WRF sous-estime encore les températures à 2m. Les écarts sont cependant plus faibles et l'apport de la grille à 1km de résolution est visible sur les résultats de la grille à 3km pour les départements de Savoie, Haute-Savoie et Sud-Isère. L'écart moyen et l'écart moyen absolu sont réduits entre ~1°C à ~2°C pour les stations de Passy, Chamonix, Alerville, Versoud, Sainte Marie Cuines, Aix-les-Bains par rapport à la configuration n°1.

Moyenne des écarts absolus |Simu - Obs| Temperature a 2m (C)

Moyenne des écarts (Simu - Obs) Temperature a 2m (C)

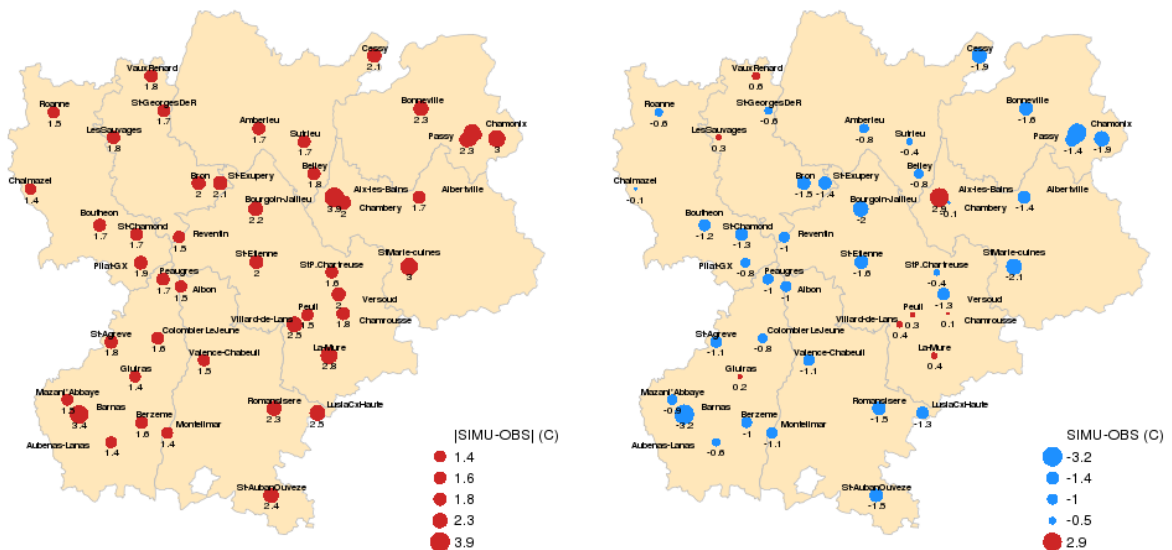


FIGURE 20-MOYENNES DES ECARTS ABSOLUS ET MOYENNES DES ECARTS – TEMPERATURE A 2M – CONFIGURATION WRF n°2 –GRILLE 3KM DE RESOLUTION

Les écarts pour la vitesse du vent montrent que la tendance de la configuration n°1 est conservée avec une surestimation générale du modèle. Les écarts sont cependant réduits pour les stations en Haute-Savoie, Savoie et Sud-Isère.

Moyenne des écarts absolus |Simu - Obs| Vitesse du vent a 10m (m/s)

Moyenne des écarts (Simu - Obs) Vitesse du vent a 10m (m/s)

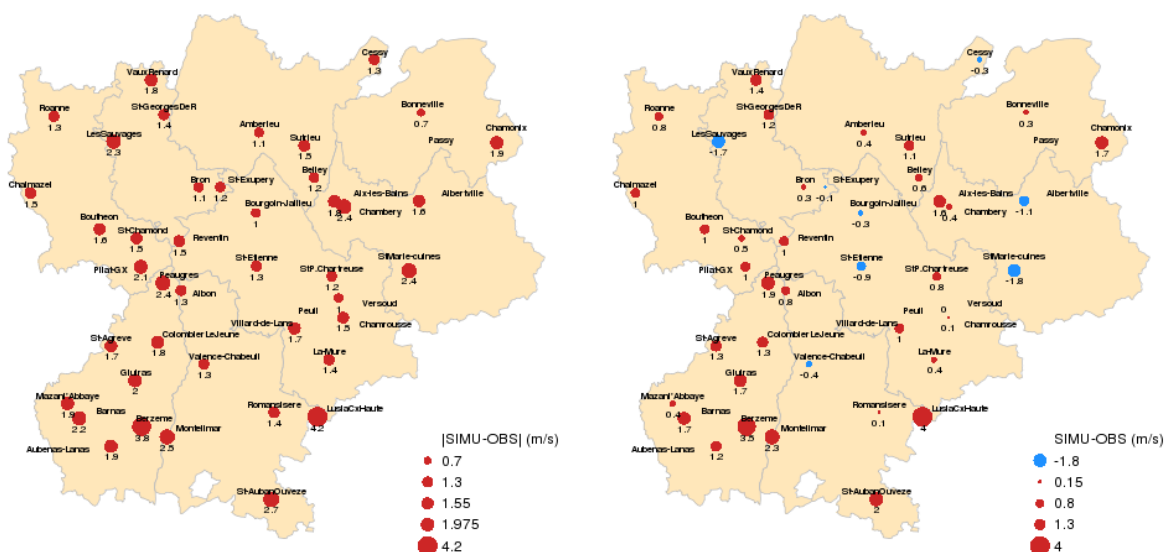


FIGURE 21 – MOYENNES DES ECARTS ABSOLUS ET MOYENNE DES ECARTS – VITESSE DU VENT A 10M – CONFIGURATION N°2 – GRILLE 3KM DE RESOLUTION

L’apport de la grille à 1km de résolution couplée au mode « two way nesting » est donc bénéfique pour l’ensemble des paramètres. La meilleure prise en compte du relief joue sûrement un rôle important dans les résultats.

3.2.2. Vallée de Grenoble

Le calcul des gradients thermiques à partir des trois stations de la vallée de Grenoble sur la Figure 22 montre que le modèle se rapproche des observations. Les résultats de modélisation qui sont présentés proviennent de la grille à 1km de résolution. Si l’on compare ces résultats à la configuration n°1, la configuration n°2 est plus réaliste. La dynamique est en bon accord avec les observations. A contrario de la configuration n°1, les gradients thermiques modélisés redescendent suffisamment la nuit mais sont encore en retard la journée. L’écart moyen est de $0.9^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$. La tendance est encore vers une surestimation des gradients thermiques donc vers une modélisation légèrement plus stable de l’atmosphère. L’apport de la grille à 1km de résolution est donc important et restitue mieux les variations de la journée.

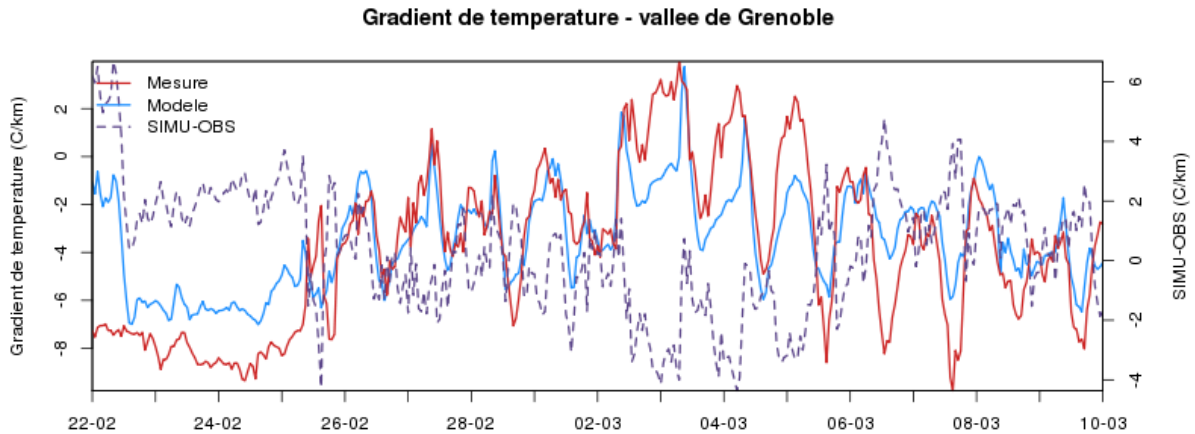


FIGURE 22 - GRADIENT THERMIQUE ENTRE LES 3 STATIONS DE LA VALLEE DE GRENOBLE (VERSOU, PEUIL ET CHAMROUSSE) MODELISE ET OBSERVE - CONFIGURATION WRF N°2 GRILLE 1KM DE RESOLUTION

La hauteur de la couche limite modélisée à Versoud (Figure 23) évolue de manière diurne avec des maxima journaliers plus importants que la configuration n°1. Cette évolution semble plus réaliste par rapport aux observations de températures.

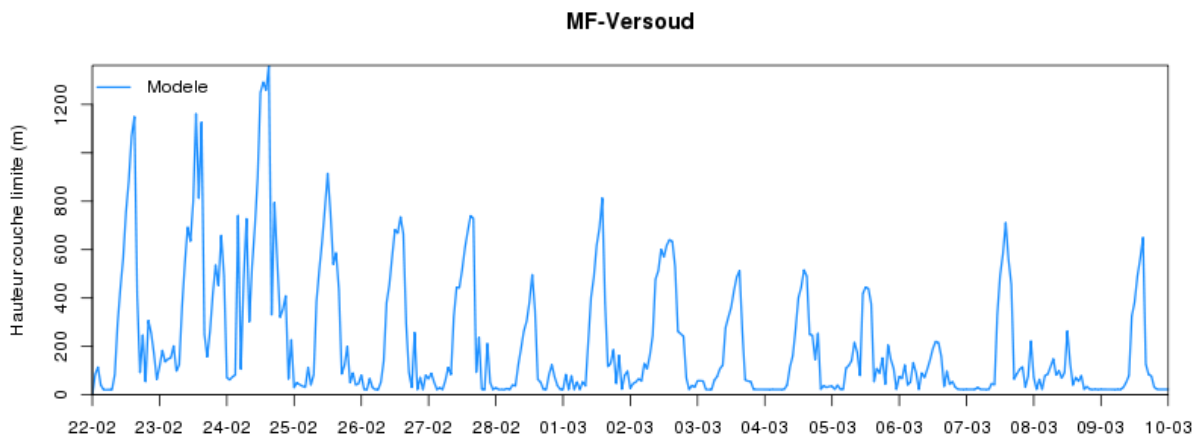


FIGURE 23 - HAUTEUR DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE MODELISEE A VERSOU – CONFIGURATION WRF N°2 GRILLE 1KM DE RESOLUTION

3.2.3. Vallée de l'Arve

Pour la vallée de l'Arve, la configuration n°2 du modèle WRF est en bon accord avec les altitudes d'inversions de températures observées. Même si WRF modélise encore des inversions de températures trop basses, l'amélioration par rapport à la configuration n°1 est visible. Les résultats présentés sur la Figure 24 montrent une meilleure variation de l'altitude des inversions thermiques pour la période du 2 au 5 mars. L'écart moyen est de -239m. La configuration n°2 présente des altitudes d'inversions plus haute dans la journée par rapport à la configuration n°1. Ce résultat peut s'expliquer par un raffinement horizontal améliorant le calcul des échanges thermiques, la représentation du relief et du type de sol. L'alternance jour/nuit modélisée n'est toutefois pas assez forte par rapport aux observations. La méthode de calculs pour les altitudes d'inversions est identique à la section 3.1.3.

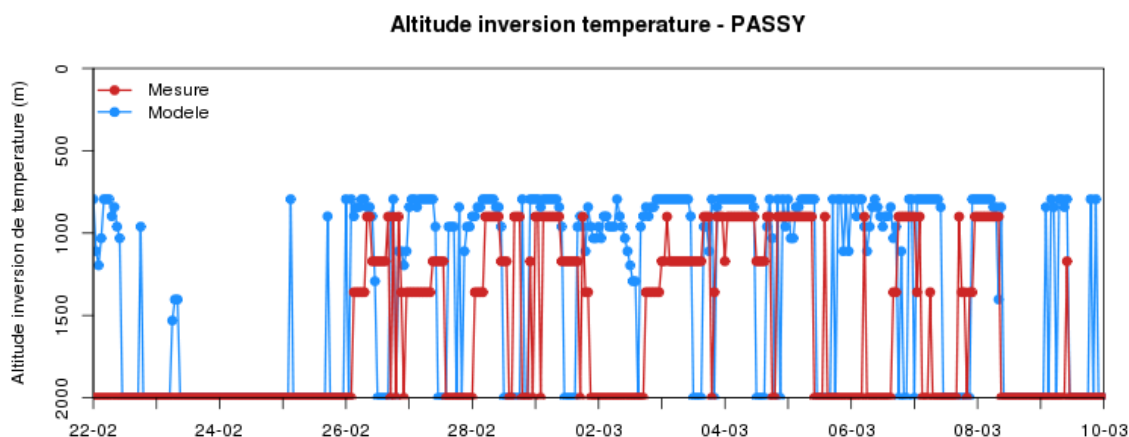


FIGURE 24- ALTITUDE DES INVERSIONS THERMIQUES MODELISEES ET OBSERVEES - CONFIGURATION WRF N°2 GRILLE 1 KM DE RESOLUTION (MODELE = PROFIL VERTICAL AU DESSUS DE PASSY)

En calculant l'altitude des inversions thermiques modélisée à partir des coordonnées des stations à Passy, le résultat n'est pas en bon accord avec les mesures (voir Figure 25). L'altitude des inversions est quasiment constante à 1359m. Ce résultat induit une mauvaise représentation des températures pour la station située au niveau de la piste de décollage parapente. Le relief semble donc encore mal représenté même avec une résolution de 1km au niveau de cette station. Une augmentation de la résolution horizontale du modèle est encore possible mais doit nécessairement être réalisée avec une autre base de données topographiques comme par exemple la base de données SRTM 3 secondes de résolution issue de campagne satellite de la NASA. Cette base de donnée contient la hauteur du sol par rapport au niveau de la mer avec une résolution de $\sim 90\text{m}^{11}$. Une modification du code WRF est toutefois nécessaire pour lire ces données.

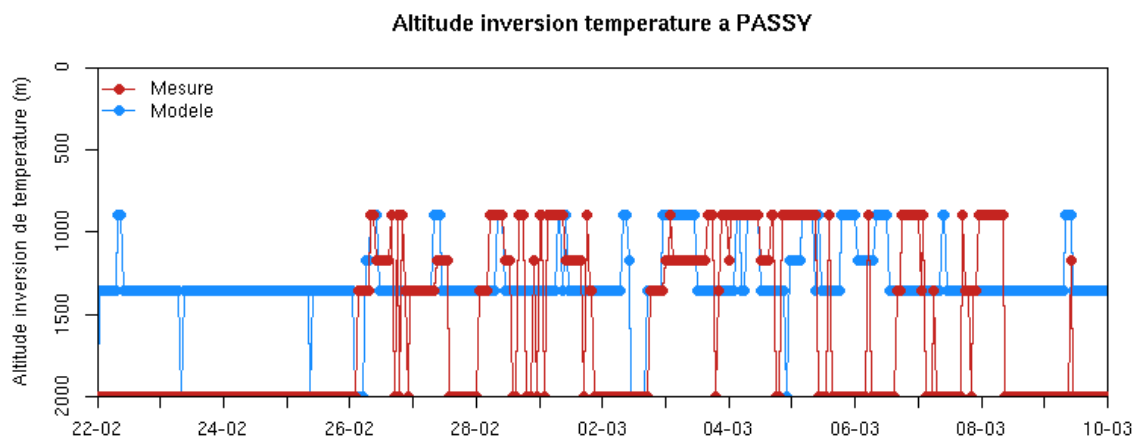


FIGURE 25 - ALTITUDE DES INVERSIONS THERMIQUES MODELISEES ET OBSERVEES - CONFIGURATION WRF N°2 GRILLE 1 KM DE RESOLUTION (MODELE = AUX COORDONNEES DES STATIONS)

¹¹ <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM2>

3.3. Comparaison mesures modèle : autres configurations du modèle WRF

3.3.1. Option « ifsnow »

Une autre configuration identique à la configuration n°1 mais avec l’option physique « ifsnow » a été testée. Cette option permet de prendre en compte les effets de la neige sur le rayonnement et les échanges de chaleur. L’activation de cette option ne produit pas de bons résultats. Les températures sont bien en dessous des valeurs mesurées et ce pour toutes les stations de la grille à 3km. La principale cause de cette sous-estimation viendrait d’un schéma qui pronostique des échanges de chaleur trop important la journée amenant à des températures proches du sol ne dépassant pas le 0°C. La température modélisée et observée au niveau de la station de Versoud sur la Figure 26 montre bien cet écart.

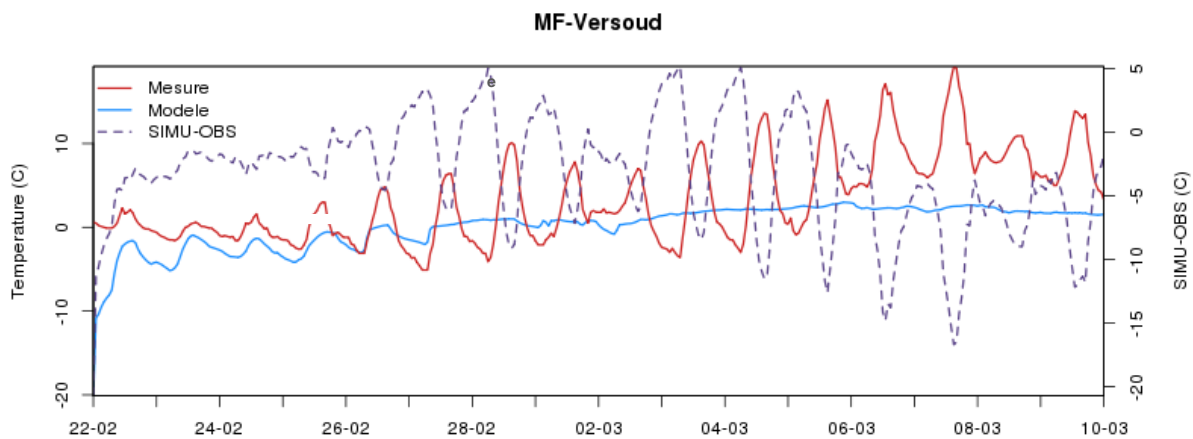


FIGURE 26 - TEMPERATURE A 2M MESUREE ET MODELISEE - CONFIGURATION WRF N°1 + OPTION IFSNOW ACTIVEE GRILLE 3KM DE RESOLUTION

Le schéma « ifsnow » peut aussi ne pas prédire la fonte du manteau neigeux. Les cartes de la Figure 27 montrent que la couverture du manteaux neigeux est responsable d’une sous-estimation localisée des températures à 2m. L’indice de couverture du manteau neigeux se retrouve dans le champs de température donnant des écarts significatifs sur le domaine. Plusieurs configurations avec cette option ont été testées sans succès : réduction du pas de temps, utilisation d’une grille supplémentaire, changement des options de compilation, changement des différentes options physiques.

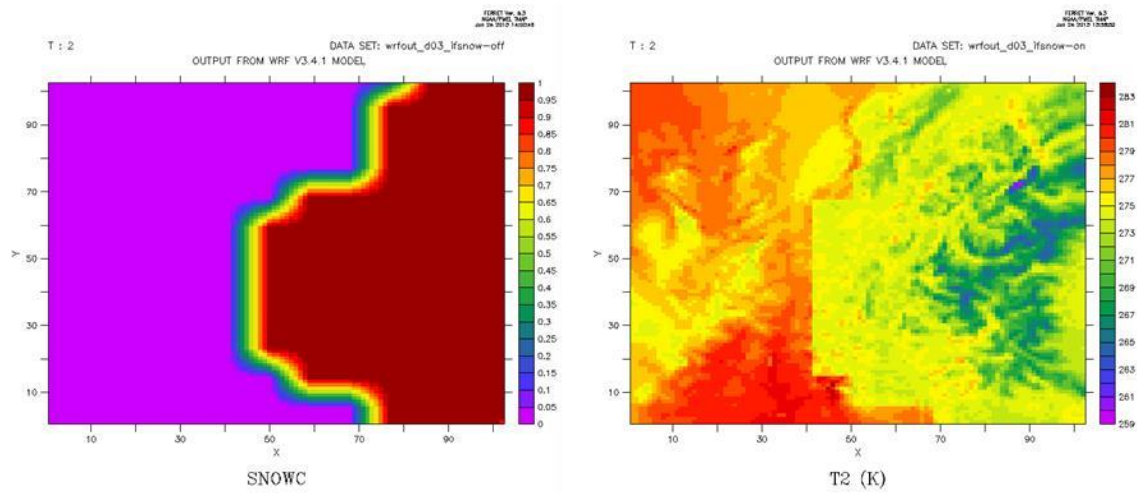


FIGURE 27 – INDICES DE COUVERTURE DU MANTEAU NEIGEUX ET TEMPERATURES A 2M POUR LA GRILLE 3KM DE RESOLUTION – OPTION « IFSNOW » ACTIVEE

3.3.2. Option « slope_rad »

Un autre test sur une configuration identique à la configuration n°1 mais l’option « slope_rad » en plus a été effectué. Cette option permet de prendre en compte l’inclinaison du relief dans le calcul du bilan radiatif. L’option « slope_rad » ne doit être utilisée que sur des domaines à fine résolution. Cette option a été activée pour le domaine à 3km de résolution. La comparaison avec les mesures ne montre pas d’améliorations significatives. Par exemple, l’écart absolu moyen des températures à 2m est de 2.25°C contre 2.26°C pour la configuration n°1. Cette configuration amène des écarts légèrement plus faibles au niveau des stations de Passy (voir ANNEXE). Le profil de température modélisé dans la vallée de l’Arve ou encore le gradient de température à Grenoble (Figure 28 et Figure 29) sont quasiment identiques à la configuration n°1.

Gradient de température - vallee de Grenoble

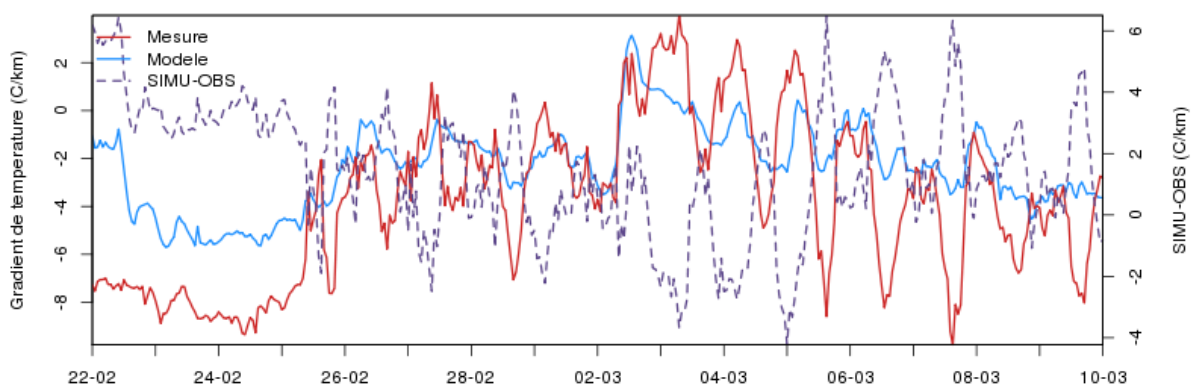


FIGURE 28 - GRADIENT THERMIQUE ENTRE LES 3 STATIONS DE LA VALLEE DE GRENOBLE (VERSOU, PEUIL ET CHAMROUSSE) MODELISE ET OBSERVE – CONFIGURATION WRF N°1 + OPTION « SLOPE_RAD » ACTIVEE GRILLE 3KM DE RESOLUTION

Les données AROME utilisées proviennent du téléchargement quotidien des sorties mises à disposition par Météo France pour Air Rhône Alpes. Deux chargements sont réalisés par jour. Le choix a été fait d'utiliser les quatre premières échéances de chaque prévision/chargement AROME permettant de recouvrir l'ensemble de la période de l'étude avec les données les plus « fraîches » disponibles.

3.4.1. Tendances générales

L'écart du modèle avec les humidités relatives est relativement faible pour l'ensemble des stations. La tendance générale du modèle est moyenne, AROME sous-estime autant qu'il surestime. L'écart moyen absolu montre bien que les erreurs se compensent. Ce résultat est comparable aux écarts obtenus avec la configuration n°2 de WRF. En revanche, certaines stations comme Passy, Aix-les-bains, Chambéry, Chamrousse, Chamonix ou encore Saint Pierre de Chartreuse sont encore mal estimées.

Moyenne des écarts absolus |Simu - Obs| - Humidite relative a 2m (%) Moyenne des écarts (Simu - Obs) - Humidite relative a 2m (%)

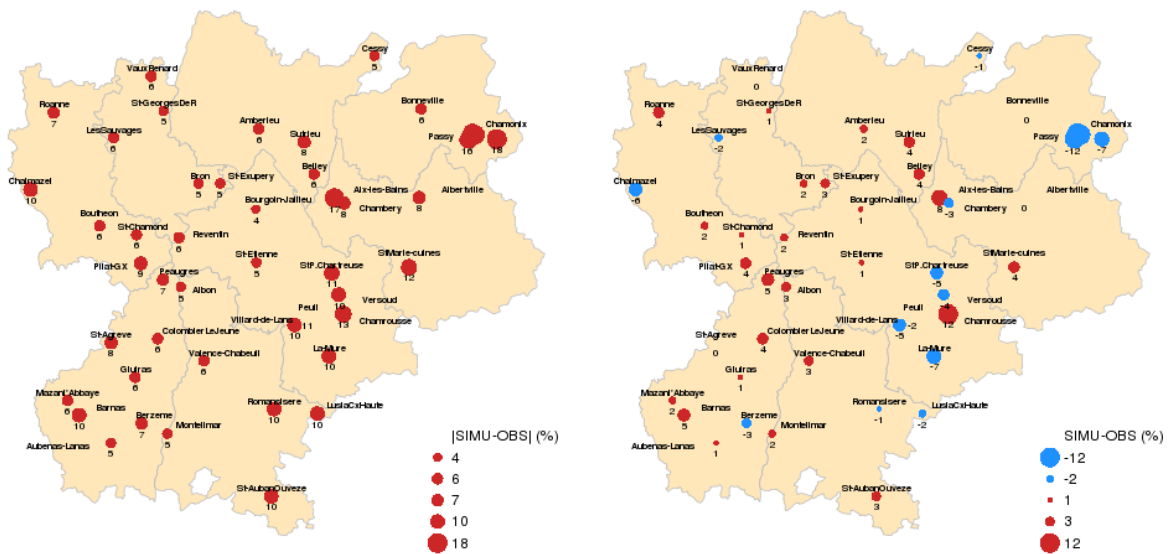


FIGURE 31 - MOYENNE DES ECARTS ABSOLUS ET MOYENNE DES ECARTS – HUMIDITE RELATIVE A 2M – AROME

Pour les températures à 2m, AROME présente des résultats sensiblement meilleur par rapport à la configuration n°2 de WRF. Les stations avec les plus grands écarts sont les mêmes que celles identifiées pour l'humidité relative. La tendance d'AROME est assez moyenne.

Moyenne des écarts absolus |Simu - Obs| - Temperature a 2m (C)

Moyenne des écarts (Simu - Obs) - Temperature a 2m (C)

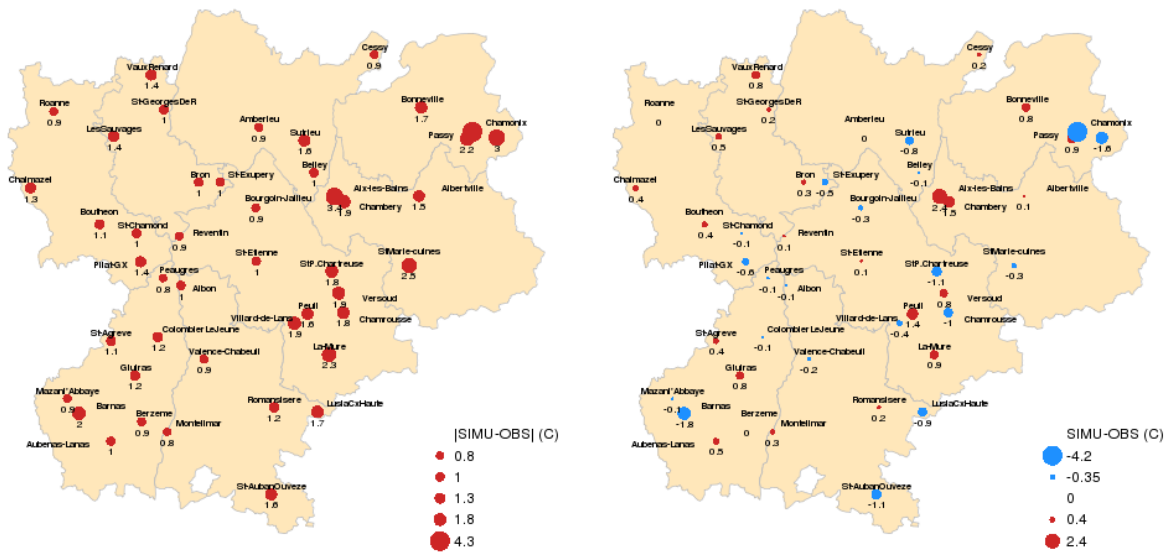


FIGURE 32 - MOYENNE DES ECARTS ABSOLUS ET MOYENNE DES ECARTS – TEMPERATURE A 2M – AROME

En ce qui concerne les vitesses de vent à 10m, AROME a tendance à sous-estimer les valeurs. L'accord est cependant relativement bon et comparable à la configuration n°2 de WRF.

Moyenne des écarts absolus |Simu - Obs| - Vitesse du vent a 10m (m/s)

Moyenne des écarts (Simu - Obs) - Vitesse du vent a 10m (m/s)

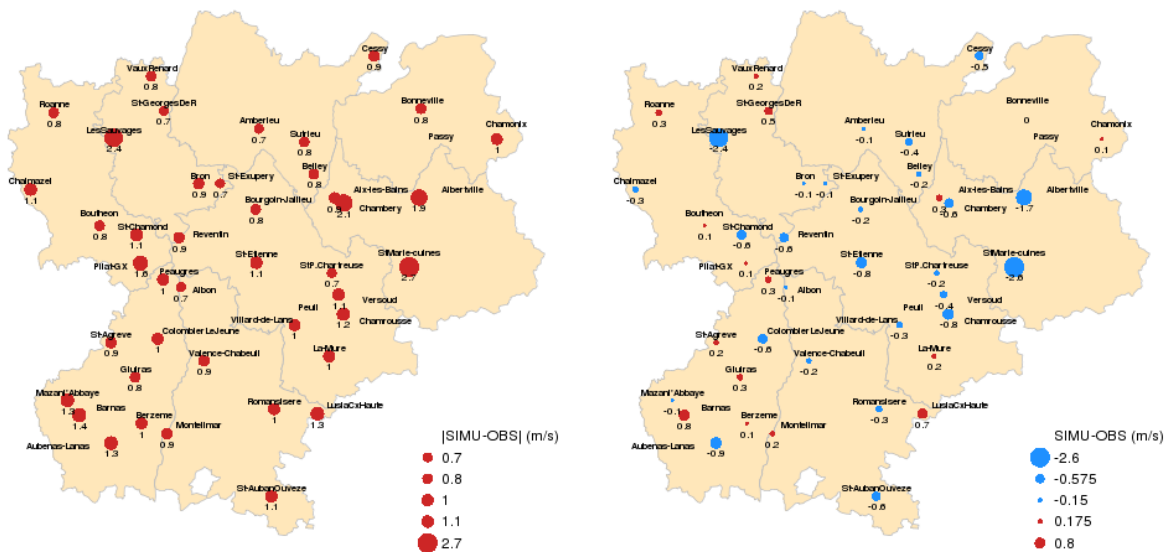


FIGURE 33 - MOYENNE DES ECARTS ABSOLUS ET MOYENNE DES ECARTS – VITESSE DU VENT A 10M – AROME

La comparaison de AROME avec les observations montre que le modèle est en bon accord avec les mesures. Les résultats sont meilleurs que la configuration n°2 de WRF. L'assimilation des données joue sans doute un rôle important dans ces résultats car les stations de Passy, qui ne sont pas Météo France, présentent les plus mauvais résultats. Les vallées Alpines sont aussi mal-estimées par AROME.

3.4.2. Vallée de Grenoble

Le gradient de température calculé à partir des trois stations de Grenoble est globalement sous-estimé dans AROME. L'écart moyen est de $-1.2^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$. L'écart entre le gradient mesuré et modélisé

est plus important en milieu de journée. AROME surestime le gradient de température pour la période du 22 février au 27 février, puis sous-estime du 27 février au 5 mars et enfin surestime du 5 au 10 mars. Les trois périodes identifiées dans la section 1.3 sont visibles dans cet écart. En période de forte stabilité atmosphérique, AROME sous-estime la stabilité et en période instable, AROME modélise une atmosphère trop stable. Les écarts sont plus importants en période de forte stabilité atmosphérique.

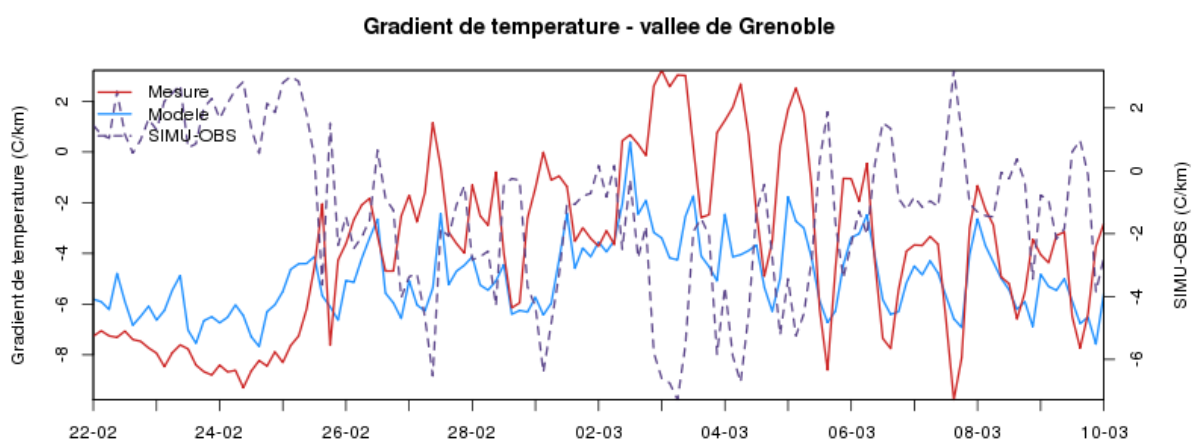


FIGURE 34 - GRADIENT DE TEMPERATURES ENTRE LES TROIS STATIONS DE LA VALLEE DE GRENOBLE (VERSOU, PEUIL ET CHAMROUSSE) MODELISE ET OBSERVE – AROME

3.4.3. Vallée de l'Arve

Les altitudes des inversions de températures modélisées par AROME sur le profil vertical au-dessus de Passy sont sous-estimées (Figure 35). L'écart moyen est de -167m et l'écart absolu moyen est de 437m. L'alternance jour nuit est très marquée dans AROME et suit, à partir du 26 février, un schéma presque constant. AROME ne présente pas d'évolution continue sur la verticale entre les situations de jour ou de nuit, l'inversion est soit très basse soit trop haute. AROME reste comparable à la configuration n°2 de WRF mais montre plutôt des évolutions schématiques de journée. La hauteur de couche limite permettrait de trancher sur cette hypothèse de paramétrisation mais celle-ci n'est pas disponible dans les données fournies.

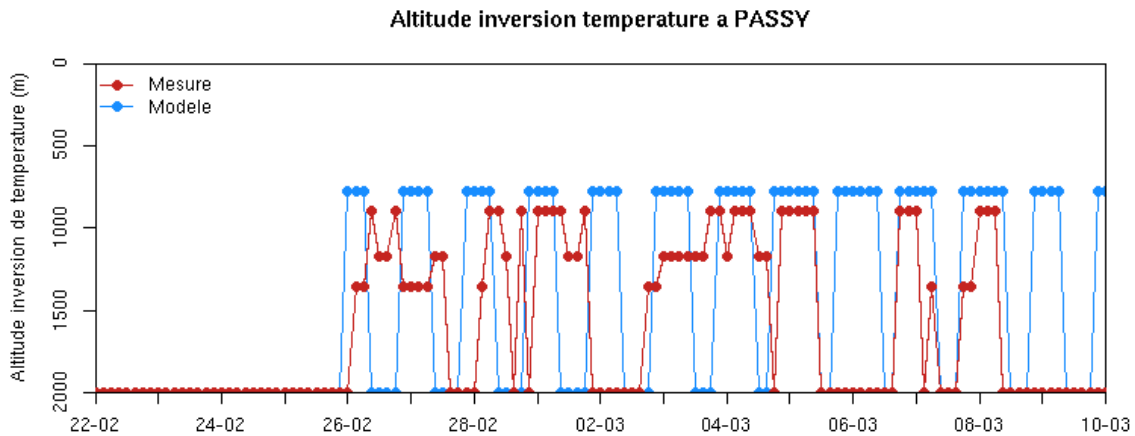


FIGURE 35 - ALTITUDE DES INVERSIONS DE TEMPERATURE MODELISEES ET OBSERVEES - AROME (MODELE = PROFIL VERTICAL AU DESSUS DE PASSY)

En calculant les altitudes des inversions de température à partir des coordonnées des stations dans AROME (Figure 36), le résultat montre une altitude d’inversion de température constante à 1359m, au niveau de la station située sur le site de décollage parapente. Comme pour WRF, le relief est sans doute mal représenté au niveau de cette station.

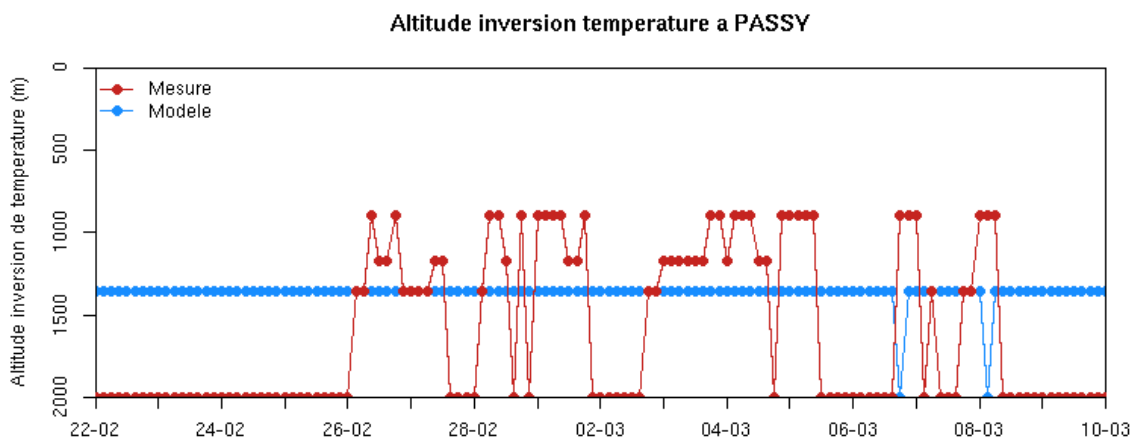


FIGURE 36 - ALTITUDE DES INVERSIONS DE TEMPERATURE MODELISEES ET OBSERVEES - AROME (MODELE = AUX COORDONNEES DES STATIONS)

4. Synthèse des résultats

Le calcul de la moyenne des écarts absolus sur toutes les stations pour chaque simulation permet de comparer les différentes configurations (Figure 37). Au niveau des paramètres : température à 2m, humidité relative à 2m et vitesse du vent à 10m, AROME est meilleur que toutes les configurations de WRF testées. Vient en second plan la configuration n°2 puis la configuration n°1. Pour les profils verticaux, les configurations n°1 et n°2 de WRF donnent les meilleurs résultats. WRF est plus proche des mesures, le modèle AROME est quant à lui plus schématisé sur son profil vertical. A noter que les résultats de la grille à 3km de résolution de la configuration n°2 sont cependant meilleurs que la grille à 1km pour la vallée de l’Arve. Les altitudes des inversions de températures semblent plus proches pour la grille à 1km de résolution mais le comportement moyen des températures de la grille

à 3km est meilleur. L'effet de l'interpolation pour extraire les données est sans doute à mettre en cause dans ce résultat. Le gradient de température à Grenoble est mieux pris en compte dans les configurations n°1 et n°2 de WRF que dans AROME. La grille à 1km de résolution présente le plus petit écart avec les observations.

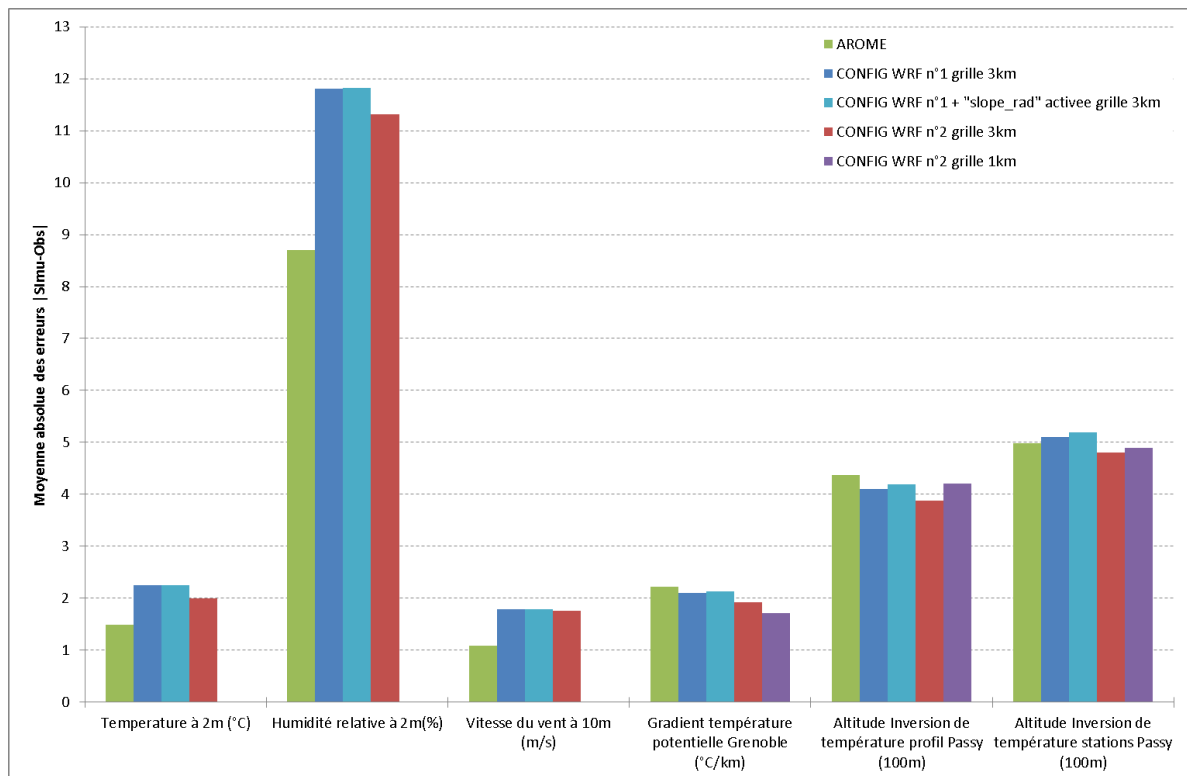


FIGURE 37- MOYENNE ABSOLUE DES ERREURS POUR TOUTES LES OBSERVATIONS POUR CHAQUE CONFIGURATION DU MODELE WRF ET POUR AROME

Axes d'améliorations :

Plusieurs axes d'améliorations sont encore possibles pour WRF. Quelques tests de sensibilité semblent pertinents. La paramétrisation « slope_rad », permettant de prendre en compte l'inclinaison des pentes dans le calcul de l'ensoleillement, est une option qui pourrait être intéressante sur la grille à 1km de résolution. Son influence est quasi nulle sur la grille à 3km sans doute parce que la résolution est encore trop faible dans les vallées alpines. WRF possède aussi un module d'assimilation des données d'observations. L'utilisation de ce module nécessite au préalable de bien configurer le poids des mesures. Cette option amènerait sans doute une amélioration importante au niveau du sol. Les résultats d'AROME montrent d'ailleurs l'importance de l'assimilation dans une chaîne de prévisions. Un autre axe est aussi envisageable en utilisant les données de relief SRTM à 90m de résolution dans WRF. L'utilisation de cette base de données peut amener une meilleure représentation du relief mais peut aussi permettre une descente d'échelle avec une grille de résolution inférieure au km dans les vallées alpines. Le temps de calcul qui en découlerait serait en revanche beaucoup plus important. Un test de sensibilité des schémas physiques de couche limite ou encore de modèle de sol semble aussi pertinent et permettrait de voir s'il existe une option capable de mieux prédire les conditions de stabilité atmosphérique dans la vallée de l'Arve. Ce test permettrait aussi de trancher si le problème peut être résolu en terme d'échelle ou avec des options physiques plus raffinées.

Au niveau des mesures, les profils LIDAR ou SODAR peuvent aussi amener une description plus fine des profils verticaux dans les vallées alpines pour les comparer directement à WRF. Un déploiement plus important de stations de mesures de température et humidité dans la vallée de Grenoble sur une année entière ou une saison hivernale permettrait aussi de vérifier si le profil vertical de la vallée

est homogène. La mesure de PM10 en altitude est aussi un axe intéressant, l'absence de vents verticaux et horizontaux lors d'épisodes de pollution induit un transport très réduit au sein de la couche la plus basse. En revanche, même si l'échange est réduit, il existe sûrement des transferts de polluants entre les deux couches. Au sein de la couche la plus basse, il serait aussi intéressant de mesurer la concentration en fonction de l'altitude. Cette mesure permettrait de savoir si le profil de concentration est plutôt moyen, orienté vers le sol ou le haut de la couche ou encore totalement homogène. La vallée de l'Arve semble une zone d'étude appropriée pour ce type de mesures. La modélisation peut aussi apporter des éléments de réponse à l'étude de ce mécanisme. L'utilisation d'un modèle Lagrangien peut sûrement être très pratique pour caractériser les temps de résidence des particules dans la vallée en épisodes stables mais aussi pour comprendre la répartition de la concentration en altitude.

5. Conclusion

Les mesures de température et de concentration de PM10 sur l'année 2012 montrent que le phénomène d'inversions de températures est saisonnier. On trouve plus d'inversions de températures l'hiver que l'été. L'émission spécifique de PM10 de l'hiver couplée au phénomène d'inversion amplifie les épisodes de pollution. Les observations dans la vallée de l'Arve et de Grenoble ont amené à définir un mécanisme type d'une journée hivernale sous atmosphère stable. L'étude montre que l'atmosphère devient plus stable pendant la nuit jusqu'au matin et empêche les concentrations de redescendre pendant cette période.

La masse d'air de la vallée de Grenoble semble assez homogène verticalement. Idéalement des mesures de températures dans les 3 vallées de Grenoble (« y » Grenoblois) permettraient de conclure sur l'homogénéité de la masse d'air sur tout le domaine. La mesure SODAR ou LIDAR pourrait aussi amener une caractérisation plus fine des profils verticaux¹².

En revanche, les mesures dans la vallée de l'Arve tendent à montrer que la couche est hétérogène verticalement. Le refroidissement plus important de la masse d'air en bas de la vallée est le principal moteur du phénomène d'inversion à Passy puisqu'on observe le plus souvent des inversions de température en bas de vallée. Le LIDAR a été récemment installé dans la vallée de Passy. L'exploitation de ces mesures permettra d'étudier les profils verticaux de vents et d'en déduire la stratification de la couche limite. La mesure de PM10 en altitude permettrait aussi de conclure sur la distribution verticale des concentrations. D'autres modèles peuvent aussi apporter des éléments de réponses dans les gradients de concentrations au sein de la vallée de l'Arve ou de Grenoble. L'utilisation du modèle CHIMERE¹³ ou du modèle FLEXPART¹⁴ couplée à WRF amènerait des premiers éléments que la mesure en altitude pourrait confirmer.

La comparaison modèle mesures entre WRF et AROME montre l'importance d'une modélisation à une échelle inférieure au km et de l'assimilation des données dans les vallées alpines. AROME est en meilleur accord avec les mesures que WRF. La configuration de WRF avec une grille de 1km est cependant plus proche des mesures dans les vallées alpines que AROME. Les profils verticaux modélisés dans WRF semblent plus dynamiques et plus réalistes que AROME. D'après les premiers résultats, la modélisation de la stabilité atmosphérique dans la vallée de l'Arve est un problème d'échelle. Différents paramètres et possibilités de WRF sont encore intéressants à investiguer comme l'influence de l'assimilation des données, du paramètre « slope_rad » sur la grille à 1km, l'utilisation

¹² Étude expérimentale de la couche limite atmosphérique stable de Grenoble à l'aide d'un Sodar. Alexandre Capron

¹³ CHIMERE : Modèle de chimie transport de polluants développé à l'Institut Pierre Simon Laplace par le Laboratoire de Météorologie dynamique, l'Institut National de l'Environnement industrielle et des RISques INERIS et le Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques
<http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/chimere.php>

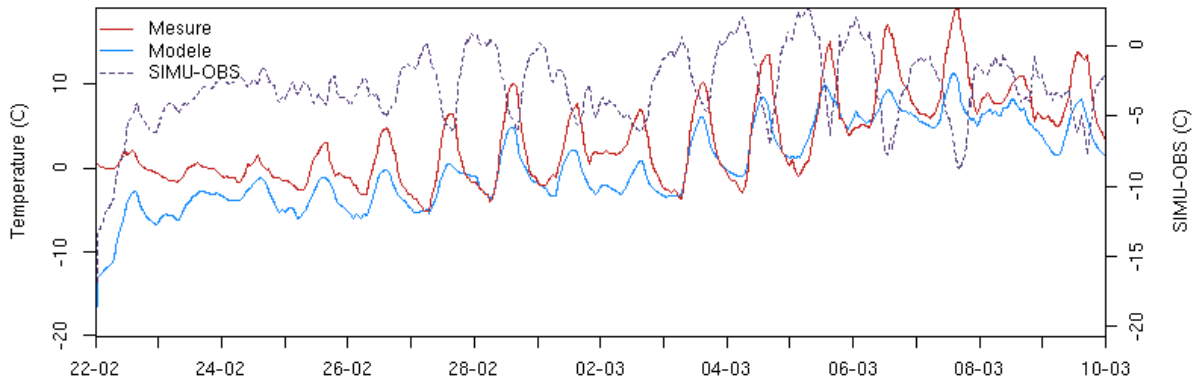
¹⁴ FLEXPART : modèle de transport de polluants lagrangien développé au Norwegian Institute for Air Research
<http://transport.nilu.no/flexpart>

de données d'entrées grandes échelles mieux résolues, ou encore l'ajout d'une grille supplémentaire à plus fine résolution au niveau de la vallée de l'Arve. Selon les moyens informatiques disponibles, ces conclusions seront intégrées aux futures modélisations météorologiques des cartographies annuelles ou encore prévisions opérationnelles d'Air Rhône Alpes pour une meilleure prévision d'épisodes de pollution dans des conditions de forte stabilité atmosphérique.

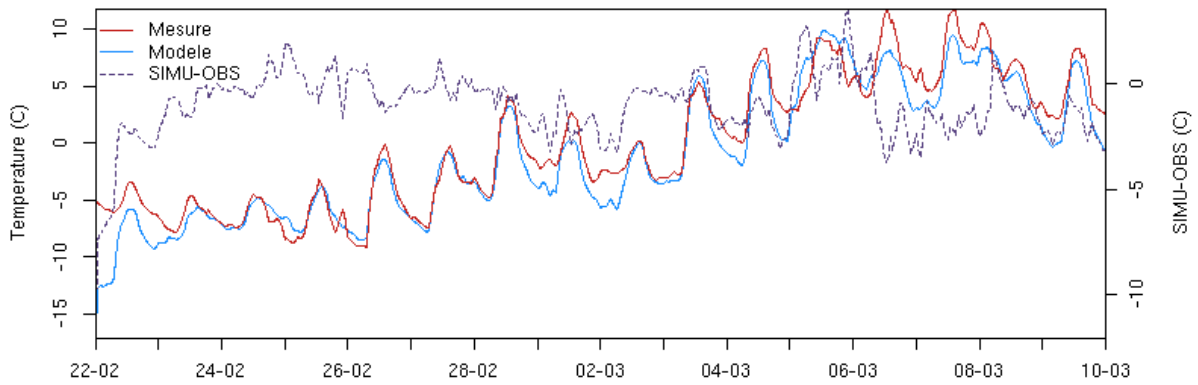
Annexes

ANNEXE 1 : Modèle mesures configuration WRF n°1 grille 3km

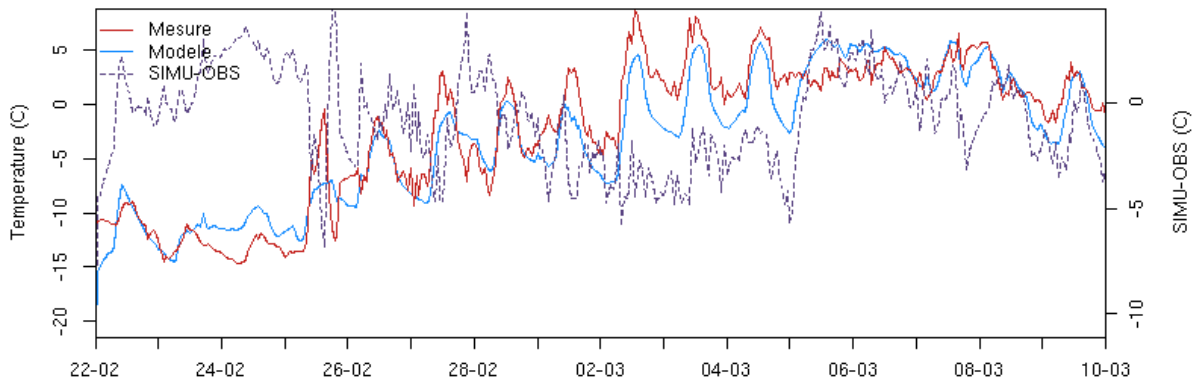
MF-Versoud



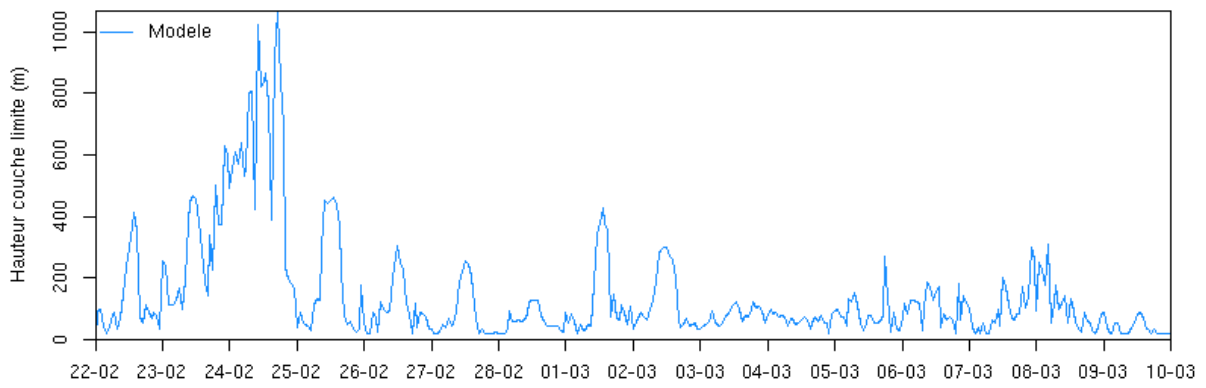
Peuil-de-Claix



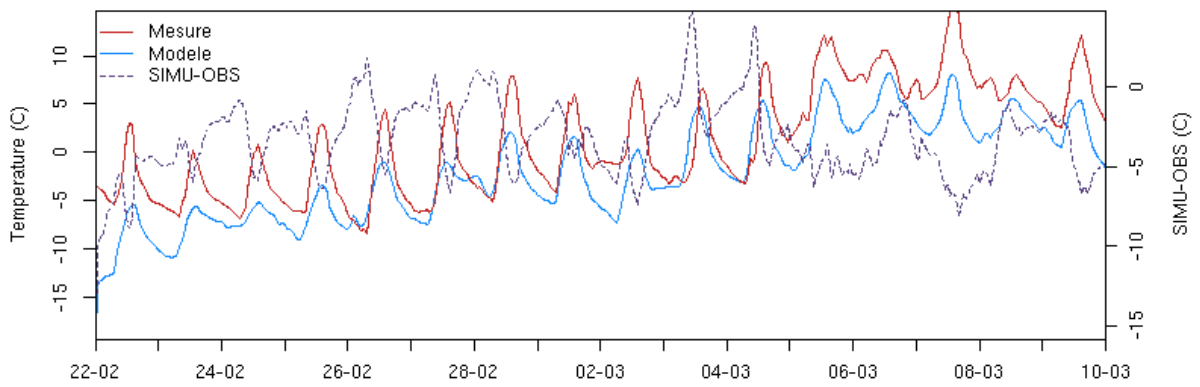
MF-Chamrousse



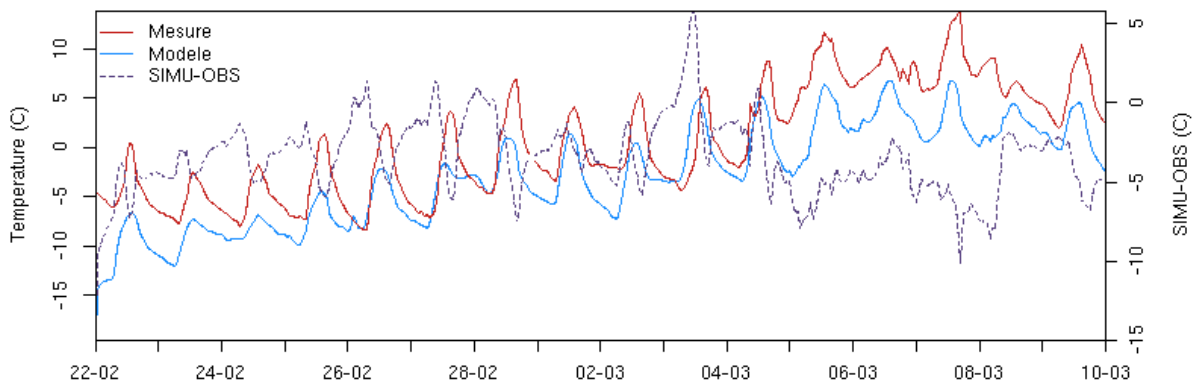
MF-Versoud



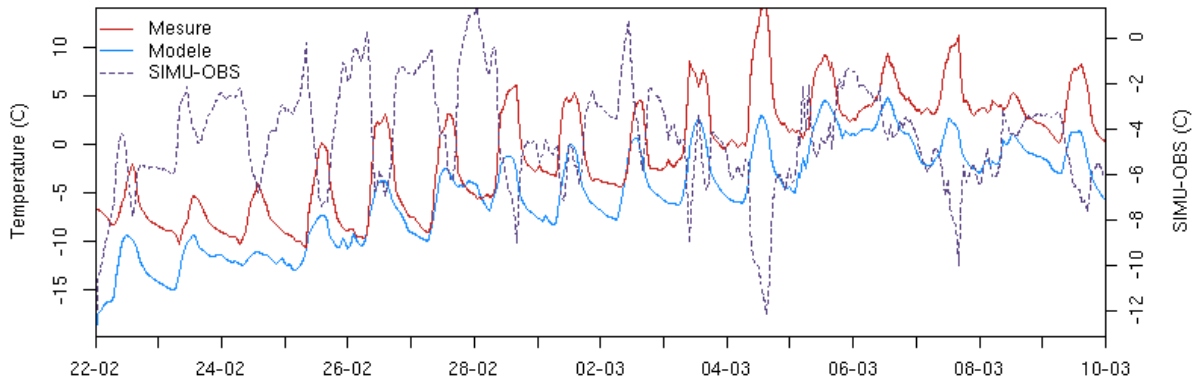
Passy_754m



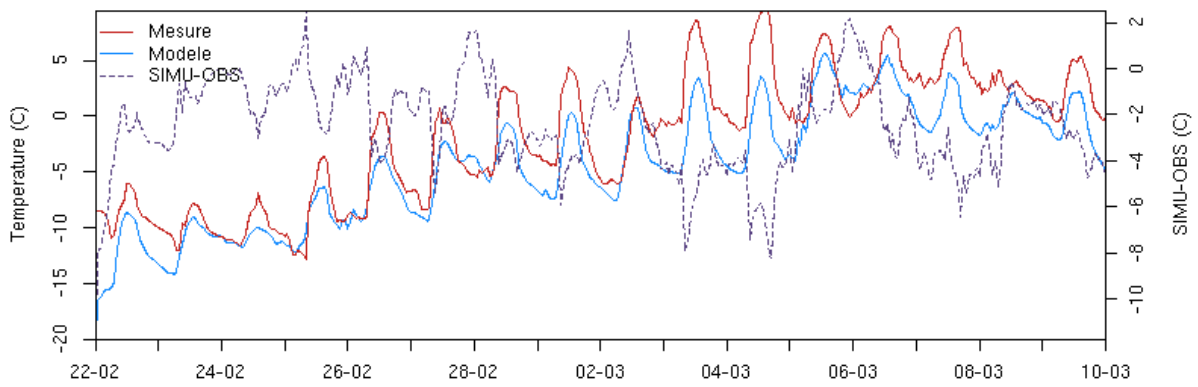
Passy_900m



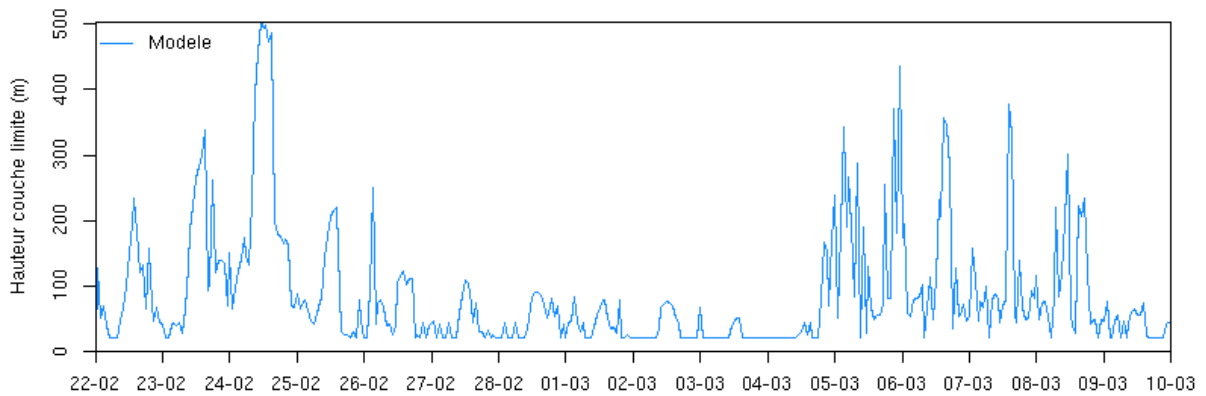
Passy_1171m



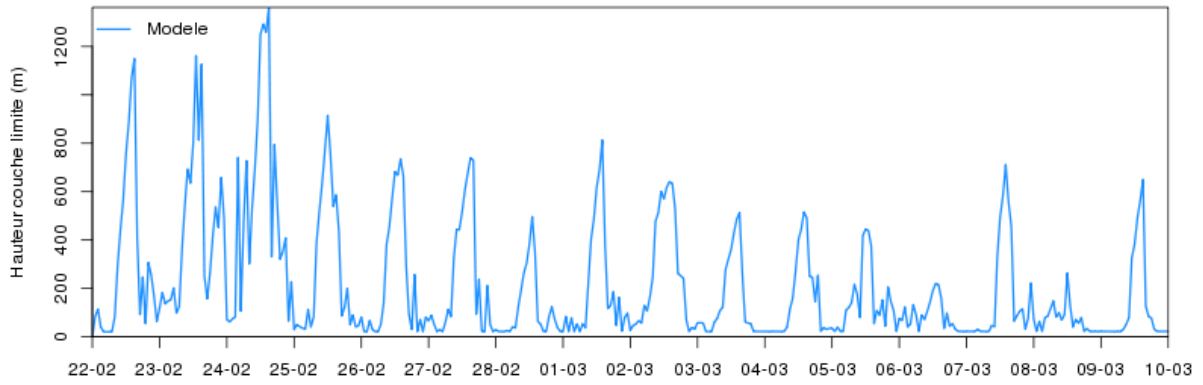
Passy_PI_Joux_1359m



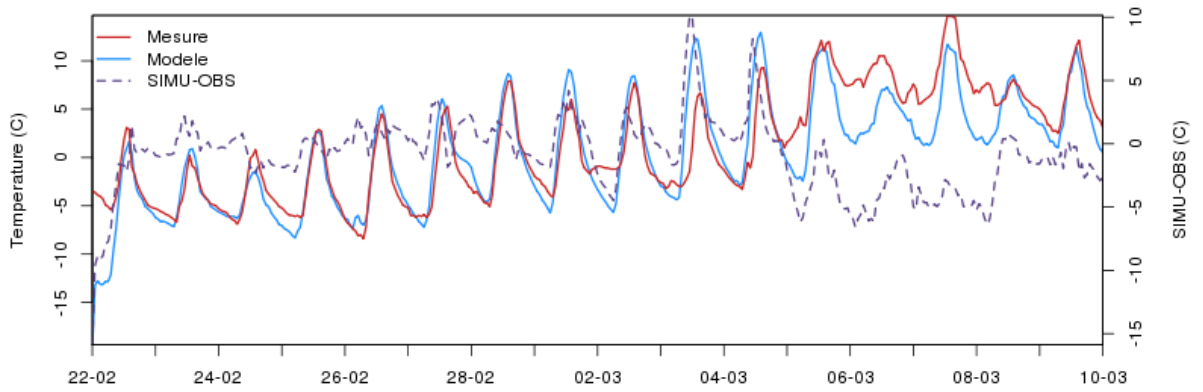
Passy_754m



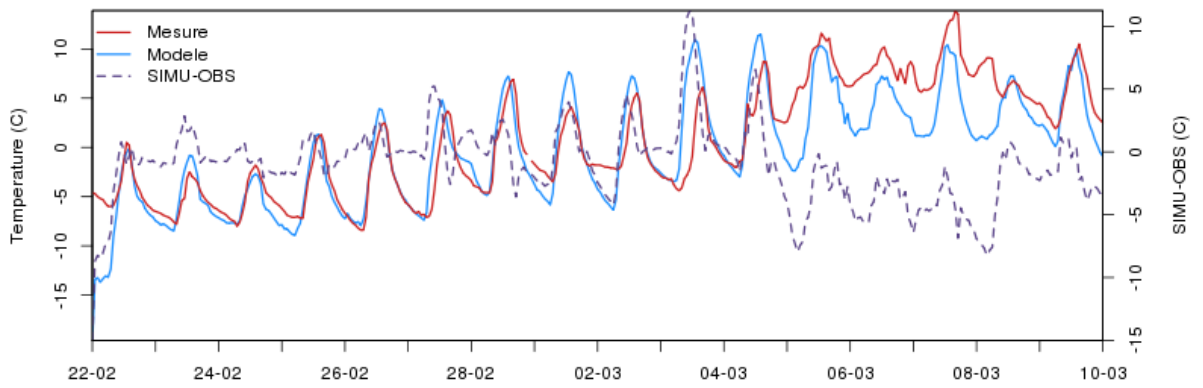
MF-Versoud



Passy_754m

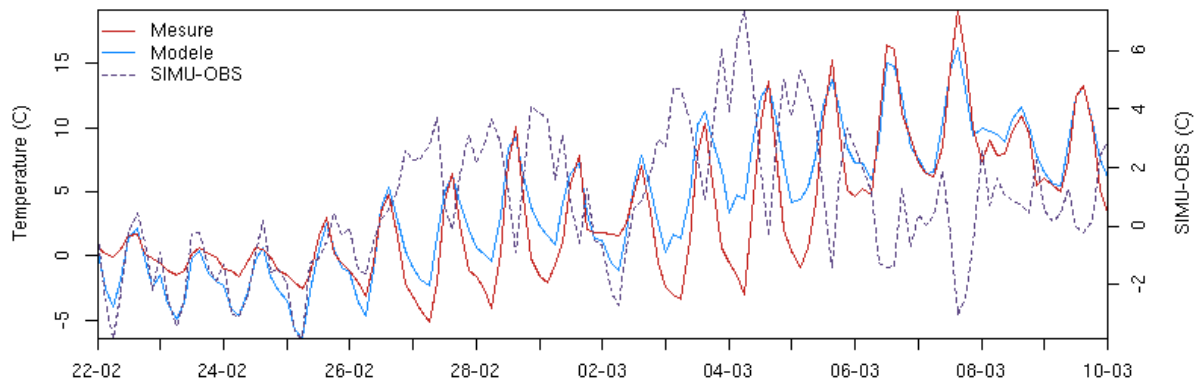


Passy_900m

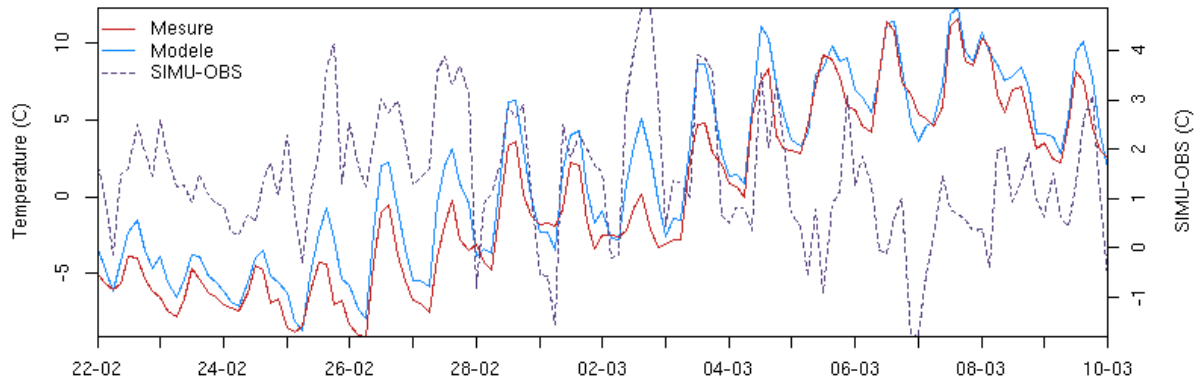


ANNEXE 3 : Modèle mesures AROME

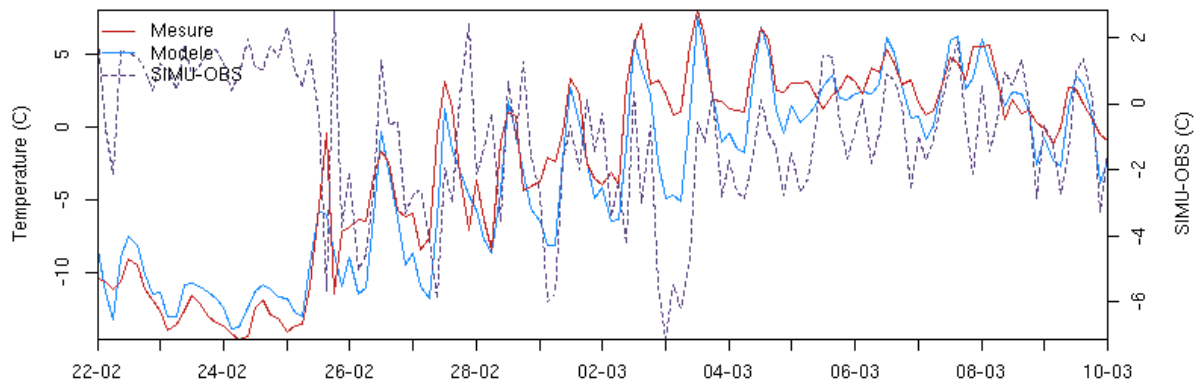
MF-Versoud



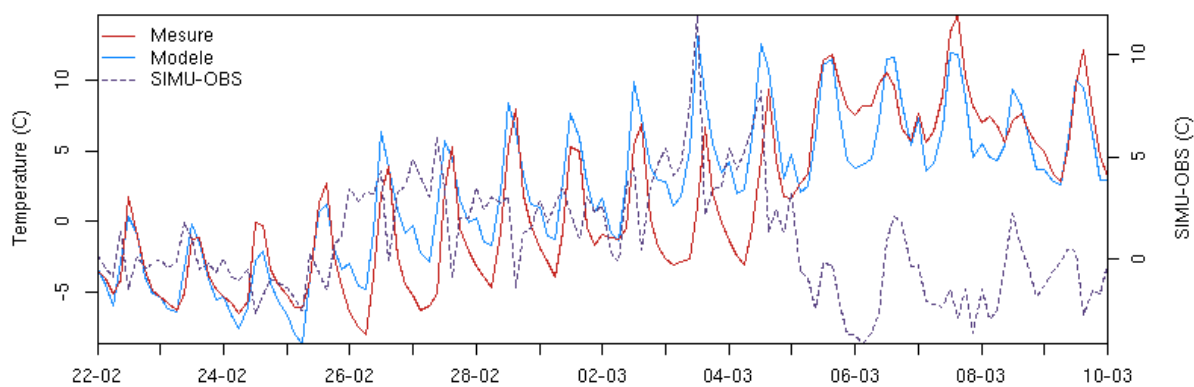
Peuil-de-Claix



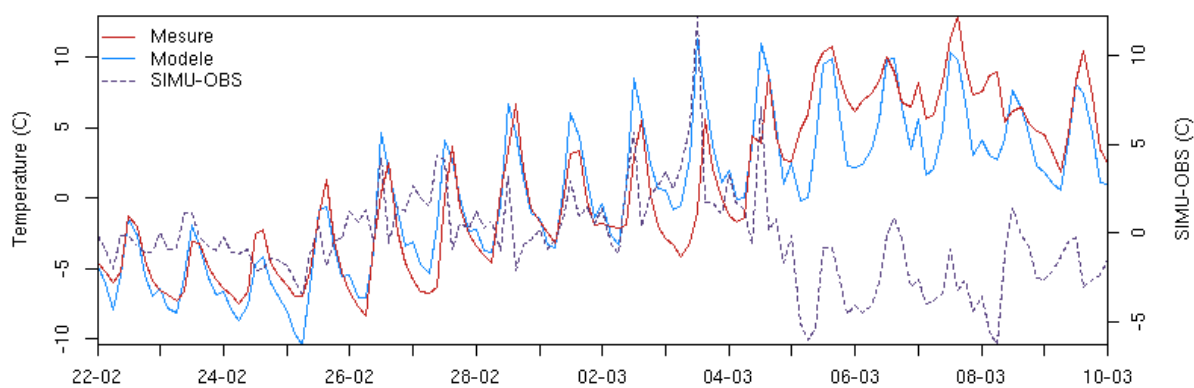
MF-Chamrousse



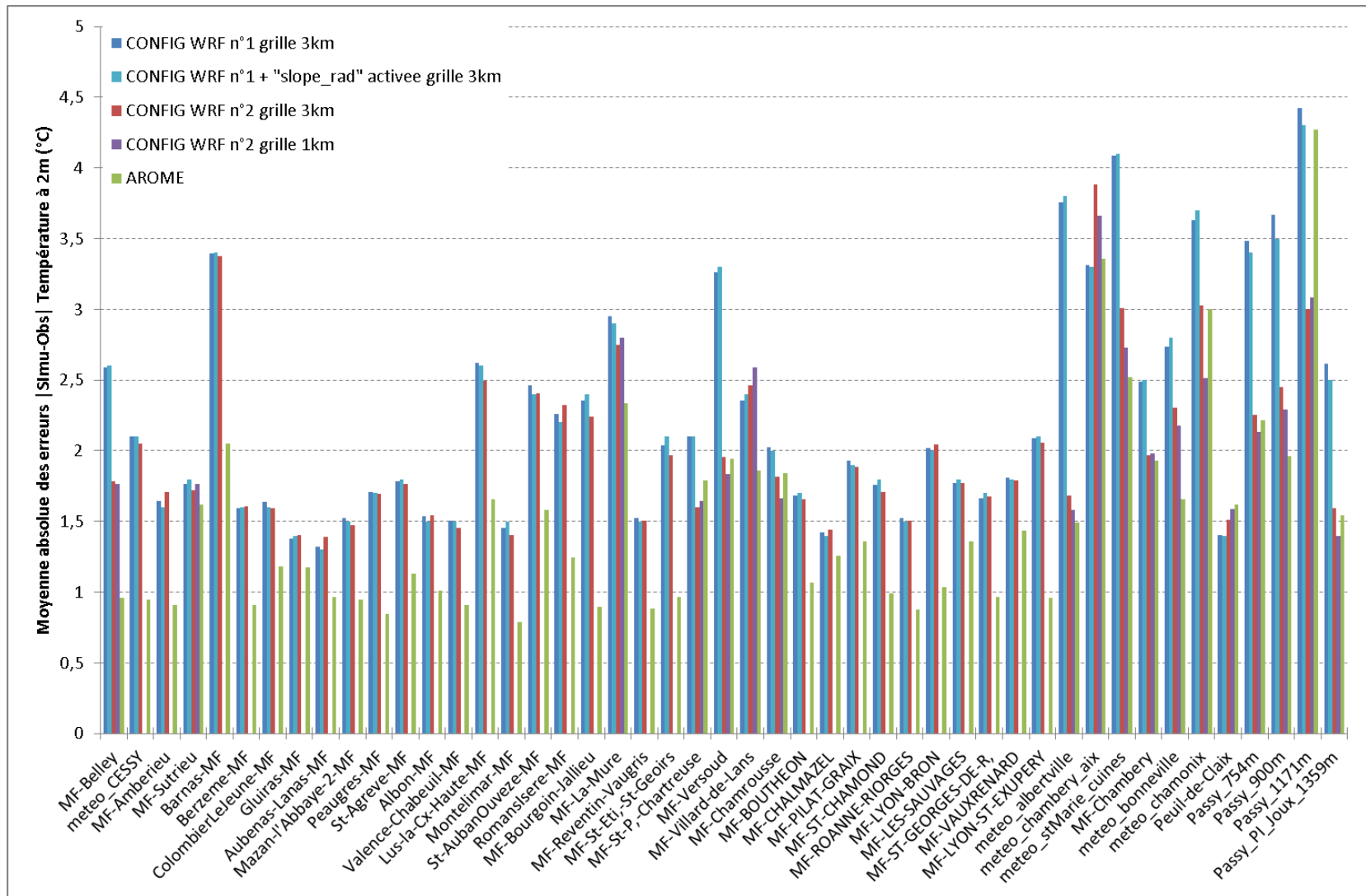
Passy_754m

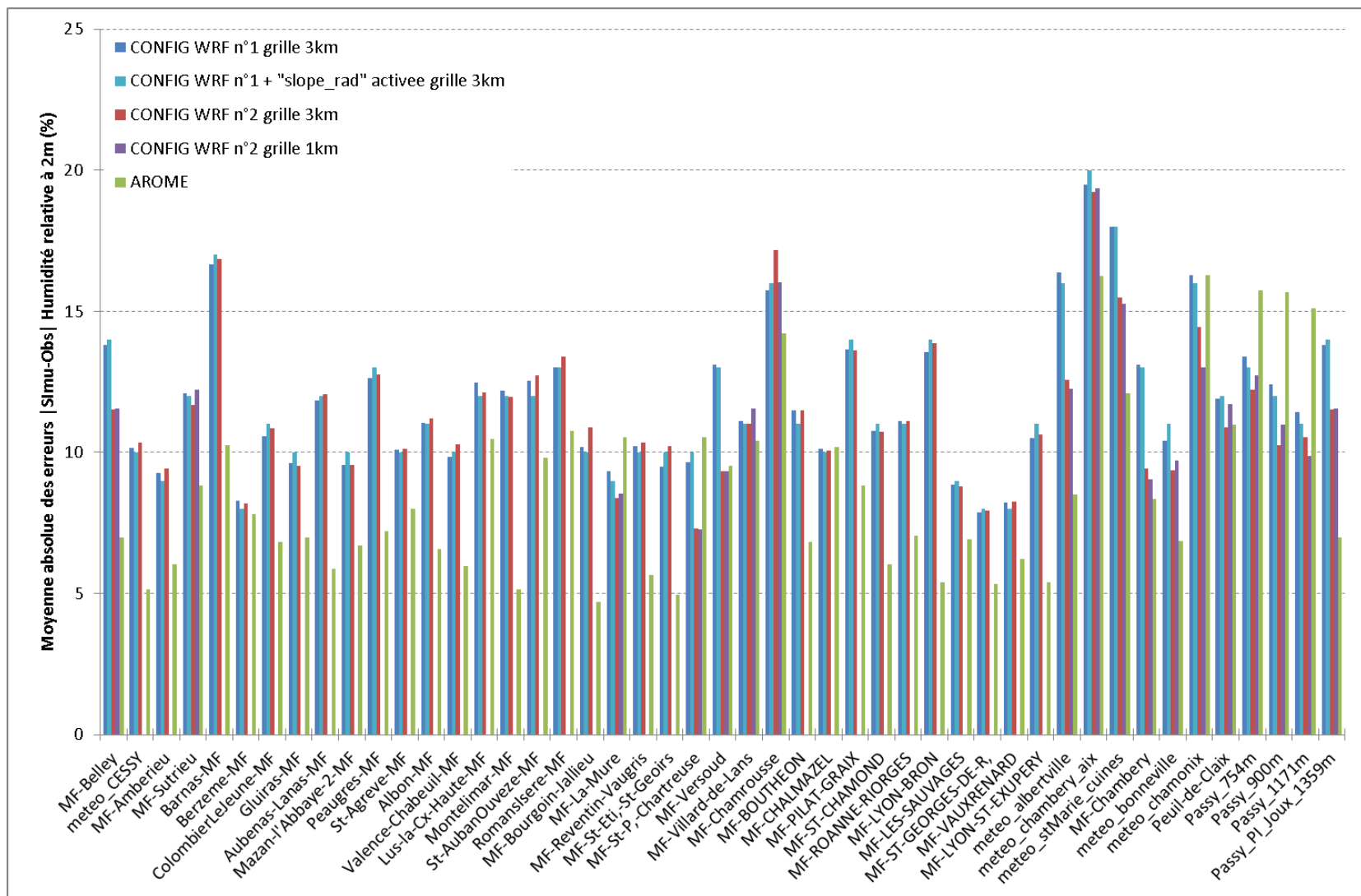


Passy_900m



ANNEXE 4 : Moyennes des écarts absolus





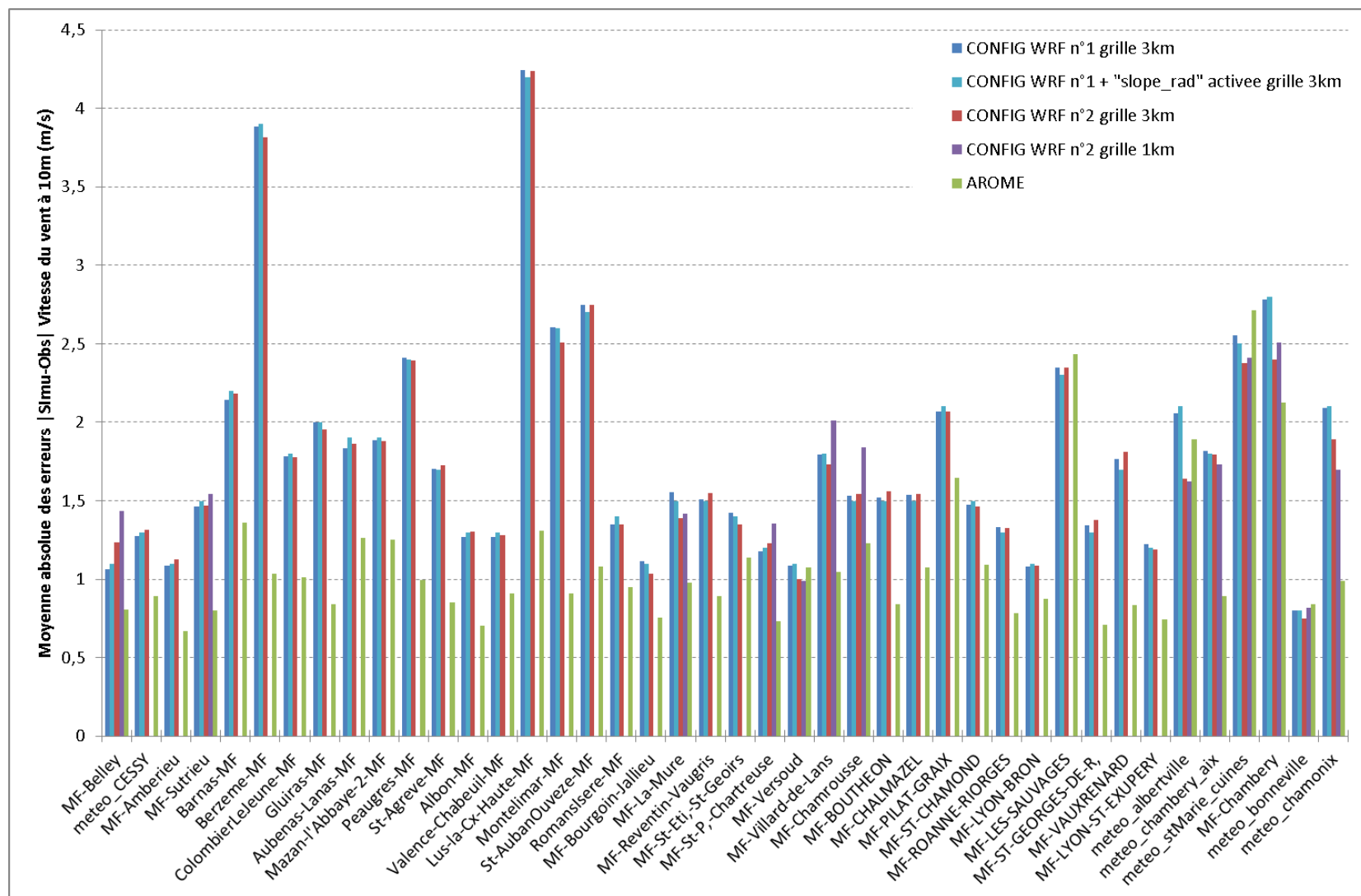


Table des illustrations

FIGURE 1 – EMBLACEMENT DES STATIONS METEOROLOGIQUES DE LA VALLEE DE L'ARVE	6
FIGURE 2-CONCENTRATION PM10 ET ALTITUDES DES INVERSIONS DE TEMPERATURES – PASSY	7
FIGURE 3- STATIONS METEOROLOGIQUES DE GRENOBLE.....	8
FIGURE 4- CONCENTRATION MOYENNE DE PM10 MESUREE A GRENOBLE BOULEVARDS ET NOMBRE D'INVERSIONS THERMIQUES PAR JOUR	9
FIGURE 5 - CONCENTRATION DE PM10 A GRENOBLE PERIPHERIQUE SUD, GRADIENT DE TEMPERATURE POTENTIELLE 1730M-220M, VITESSE DU VENT A VERSOUD A PARTIR DES TROIS STATONS METEO FRANCE	10
FIGURE 6- GRADIENT DE TEMPERATURE POTENTIELLE 1730M-220M A PARTIR DES 3 STATONS METEO FRANCE, VITESSE DU VENT A VERSOUD ET CONCENTRATION DE PM10 : MOYENNE ENTRE LES STATIONS SAINT MARTIN D'HERES, GRENOBLE PERIPHERIQUE SUD, GRENOBLE BOULEVARD, GRENOBLE PERIPHERIQUE SUD , GRENOBLE LES FRENES.....	11
FIGURE 7-CONCENTRATION DE PM10 A PASSY ET GRADIENTS DE TEMPERATURES POTENTIELLES VIRTUELLES...	12
FIGURE 8 - SCHEMA HYPOTHESE DE MECANISME DES EPISODES DE POLLUTION EN CONDITIONS STABLES	13
FIGURE 9- CONFIGURATION N°1 WRF - 3 GRILLES 27KM/9KM/3KM DE RESOLUTION	15
FIGURE 10 - EXEMPLE DE COORDONNEES « ETA » POUR UN RELIEF DE TYPE GAUSSIEN ⁹	15
FIGURE 11 - CONFIGURATION N°2 WRF - 4 GRILLES DE RESOLUTION 27KM / 9KM / 3KM / 1KM.....	17
FIGURE 12 – MOYENNES DES ECARTS ABSOLUS ET MOYENNES DES ECARTS – HUMIDITE RELATIVE A 2M – CONFIGURATION N°1- GRILLE 3 KM DE RESOLUTION	19
FIGURE 13 - MOYENNES DES ECARTS ABSOLUS ET MOYENNES DES ECARTS – TEMPERATURE A 2M – CONFIGURATION N°1- GRILLE 3 KM DE RESOLUTION	19
FIGURE 14 - MOYENNES DES ECARTS ABSOLUS ET MOYENNES DES ECARTS – VITESSE DU VENT A 10M – CONFIGURATION N°1 - GRILLE 3 KM DE RESOLUTION.....	20
FIGURE 15 - - GRADIENT DE TEMPERATURE ENTRE LES TROIS STATIONS DE LA VALLEE DE GRENOBLE (VERSOUD, PEUL ET CHAMROUSSE) MODELISEES ET OBSERVEES– CONFIGURATION WRF N°1 GRILLE 3KM DE RESOLUTION.....	21
FIGURE 16 – HAUTEUR DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE MODELISEE A VERSOUD – CONFIGURATION WRF N°1 GRILLE 3KM DE RESOLUTION.....	21
FIGURE 17 - INVERSION DE TEMPERATURES OBSERVEE ET MODELISE - CONFIGURATION WRF N°1 GRILLE 3KM DE RESOLUTION.....	22
FIGURE 18 - HAUTEUR DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE MODELISEE A PASSY - CONFIGURATION WRF N°1 GRILLE 3 KM DE RESOLUTION	22
FIGURE 19 - MOYENNES DES ECARTS ABSOLUS ET MOYENNES DES ECARTS – HUMIDITE RELATIVE A 2M – CONFIGURATION WRF N°2 –GRILLE 3KM DE RESOLUTION.....	23
FIGURE 20-MOYENNES DES ECARTS ABSOLUS ET MOYENNES DES ECARTS – TEMPERATURE A 2M – CONFIGURATION WRF N°2 – GRILLE 3KM DE RESOLUTION	23
FIGURE 21 – MOYENNES DES ECARTS ABSOLUS ET MOYENNE DES ECARTS – VITESSE DU VENT A 10M – CONFIGURATION N°2 – GRILLE 3KM DE RESOLUTION	24
FIGURE 22 - GRADIENT THERMIQUE ENTRE LES 3 STATIONS DE LA VALLEE DE GRENOBLE (VERSOUD, PEUL ET CHAMROUSSE) MODELISE ET OBSERVE - CONFIGURATION WRF N°2 GRILLE 1KM DE RESOLUTION.....	25
FIGURE 23 - HAUTEUR DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE MODELISEE A VERSOUD – CONFIGURATION WRF N°2 GRILLE 1KM DE RESOLUTION.....	25

Bibliographie



-
- ⁱ A. Brisson, R. Pelletier, Février 2010, Spécificités de la dispersion atmosphérique dans les vallées alpines, rapport Météo France
- ⁱⁱ Influence des pratiques de viabilité hivernale sur les concentrations de PM10, rapport Air Rhone-Alpes, Mars 2013
- ⁱⁱⁱ E. Chaxel, Novembre 2006, Photochimie et Aérosol en Région Alpine : Mélange et Transport, Thèse de Doctorat du Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble ENSHMG
- ^{iv} Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), 16663–16682
- ^v T. Langkamp and J. Böhner, Influence of the compiler on multi-CPU performance of WRFv3, Published in Geosci, Institute of Geography, University of Hamburg, Germany, 13 July 2011