

5. Annexe technique / Allegati tecnici

Recherche de sources et de responsabilités dans la pollution particulaire – Individuazione delle fonti e dei contributi di inquinamento da particolato

Rédacteurs / Scrittori

Laure Chevallier, Damien Piga, Romain Souweine
(Air PACA)

Nabil Ben Salem, Hervé Chanut, Claire Chappaz, Florence Troude
(Air Rhône-Alpes)

Stefano Bande, Francesca Bissardella, Monica Clemente, Valeria Garbero
(ARPA Piemonte)

Tiziana Magri, Giordano Pession, Ivan Tombolato
(ARPA Vallée d'Aoste)

Remerciements/Ringraziamenti

Les auteurs remercient le programme de coopération transfrontalière entre la France et l'Italie « ALCOTRA », la commission Européenne, la région PACA, la région Rhone-Alpes, la région Piemonte et la région Autonome Vallée d'Aoste pour le financement du projet SH'AIR. Les partenaires français remercient la société Ramboll-Environ pour la mise à disposition du modèle CAMx. Les partenaires italiens remercient la société AriaNET pour la mise à disposition du modèle FARM. L'ensemble des partenaires remercient les équipes de développement du modèle WRF pour la mise à disposition du modèle. Enfin, les partenaires remercient l'INERIS pour la mise à disposition des données de la plateforme Prév'Air.

Gli autori ringraziano il programma di cooperazione transfrontaliera tra la Francia e l'Italia « ALCOTRA », la Commissione Europea, la Regione PACA, la Regione Rhone-Alpes, la Regione Piemonte e la Regione Autonoma Valle d'Aosta per il finanziamento del progetto SH'AIR. I partners francesi ringraziano la società Ramboll-Environ per aver messo a disposizione il modello CAMx. I partners italiani ringraziano la società AriaNET per aver fornito il modello FARM. L'insieme dei partners ringraziano i team di sviluppo del modello WRF per aver messo a disposizione il modello. Infine i partners ringraziano l' INERIS per aver reso disponibili i dati della piattaforma Prév'Air.

Résumé

Le projet SH'AIR a quantifié les contributions des différentes sources de pollution sur les concentrations en particules sur l'intégralité des 4 régions partenaires du projet : PACA, Piémont, Rhône-Alpes et Vallée d'Aoste. Deux systèmes de calculs numériques complets, basés sur les modèles CAMx et FARM, ont été utilisés en regroupant les sources d'émissions suivant leur secteur d'activité et leur position géographique sur le territoire. L'étude a porté sur deux périodes de un mois, représentatives d'épisodes de pollutions particulières sur le territoire ALCOTRA. De manière générale, les résultats des deux systèmes sous-estiment les concentrations totales en particules au cours des deux périodes mais reproduisent correctement les proportions des espèces chimiques particulières. Au cours de la période hivernale, la combustion de biomasse est le principal contributeur aux concentrations en PM10 sur le domaine ALCOTRA. La contribution du trafic routier est également importante dans les grandes agglomérations. Durant la période estivale, le trafic routier est trouvé comme le contributeur le plus important, quelle que soit la région. Pour les deux périodes d'étude, la pollution particulaire a une origine très majoritairement locale, c'est-à-dire qu'elle provient de source de pollution localisées à l'intérieur de chaque région. Les échanges entre les régions peuvent être significatifs à l'occasion d'épisodes de transports ponctuels particuliers.

Riassunto

Il progetto SH'AIR ha valutato il contributo delle diverse fonti di inquinamento in concentrazioni di particolato nell'insieme delle quattro regioni partner del progetto: PACA, Piemonte, Rhône-Alpes e Valle d'Aosta. Due sistemi di calcolo numerico completi, basati sui modelli FARM e CAMx, sono stati utilizzati considerando le fonti di emissione in base al loro settore di attività e alla loro posizione geografica sul territorio. Lo studio si è focalizzato su due periodi di un mese ciascuno riferiti ad episodi rappresentativi di inquinamento da polveri nel territorio ALCOTRA. In generale, i risultati dei due sistemi hanno sottovalutato le concentrazioni totali di polveri in entrambi i periodi, ma hanno correttamente riprodotto le proporzioni delle specie chimiche che le compongono. Durante l'inverno, la combustione della biomassa è la principale responsabile delle concentrazioni di PM10 sull'area ALCOTRA. Il contributo del traffico stradale è comunque rilevante in corrispondenza delle grandi città. In estate, il traffico è risultato essere il maggior contribuente, indipendentemente dalla regione. Per entrambi i periodi di studio, l'inquinamento legato al particolato ha un'origine fondamentalmente locale, vale a dire, proviene da fonti di inquinamento localizzate all'interno di ciascuna regione. Gli scambi tra le regioni possono essere significativi durante specifici episodi di trasporto locale.

Synthèse

Le projet SH'AIR poursuit les travaux stratégiques pour la protection de l'air menés sur le territoire du programme ALCOTRA. Il vise à répondre aux interrogations des ministères italiens et français sur les origines et les responsabilités de la pollution particulaire. Pour approfondir les conclusions des études précédentes (AERA et PART'AERA) sur ce territoire, ce projet a quantifié les contributions des différentes sources de pollution sur l'intégralité des 4 régions partenaires du projet : PACA, Piémont, Rhône-Alpes et Vallée d'Aoste (Figure 1). Les sources étudiées ont été regroupées suivant leur secteur d'activité (industrie, transport routier, chauffage au bois, agriculture et autres sources) et suivant leur position géographique sur le territoire. La contribution de chacune des régions a ainsi été quantifiée pour mettre en évidence leur responsabilité dans les épisodes de pollution particulaire.

Le projet s'est organisé en quatre étapes. La première s'est assurée du fonctionnement des systèmes de calculs numériques par chacun des partenaires. La seconde a permis d'harmoniser les données d'émissions de polluants atmosphériques, pour alimenter les modèles avec un cadastre homogène entre les territoires. La troisième étape a confronté les résultats de simulations aux observations réalisées par les réseaux de mesures de qualité de l'air implantés sur les territoires. Ceci a permis d'évaluer la qualité des simulations. Enfin, la dernière action a exploité les fonctionnalités avancées des modèles numériques pour répondre à l'objectif principal de recherche des sources et des responsabilités de la pollution particulaire.

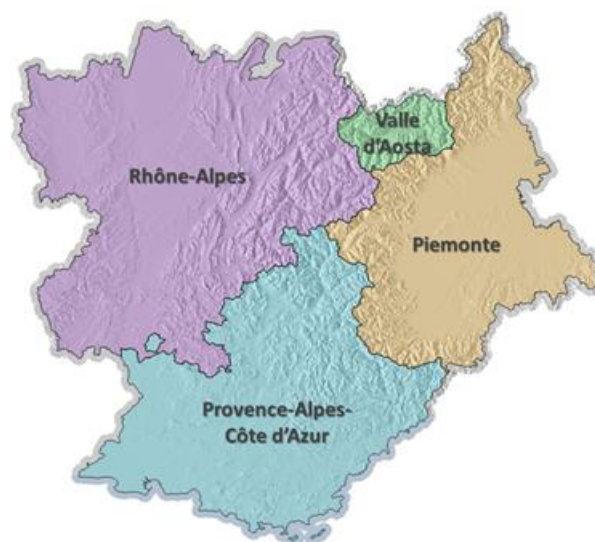


Figure 1 : Régions franco-italienne composant le partenariat de SH'AIR

Deux périodes représentatives d'épisodes de pollutions particulaires ont été sélectionnées. La première débute au 20 novembre 2013 pour finir au 20 décembre 2013, la seconde couvre la période du 20 juillet 2013 au 20 août 2013. Le choix de ces deux périodes permet d'étudier des épisodes aux caractéristiques bien distinctes.

Deux systèmes de calculs numériques pour étudier la pollution particulaire

Deux systèmes de calculs numériques complets ont été développés pour estimer les concentrations en particules et les contributions des sources d'émissions sur les régions PACA, Piémont, Rhône-Alpes et Vallée d'Aoste. Ces systèmes intègrent l'ensemble des étapes nécessaires à la réalisation de ces calculs, de la préparation des données d'entrée à la mise en forme des sorties de calculs pour permettre leur exploitation.

Les partenaires français ont orienté leur choix vers le modèle CAMx, développé par Ramboll-Environ. Ce modèle intègre un module spécifique de calcul des contributions des sources sur les

concentrations en particules, nommé PSAT (PM Source Apportionment Technology). Il utilise des traceurs réactifs associés à chacune des sources de pollution. Ces traceurs permettent de suivre les particules primaires, les précurseurs gazeux de particules et les particules secondaires formées par réactions chimiques, tout au long des simulations. Cette méthode de calcul permet une stricte conservation de la masse entre les concentrations totales et les contributions. Dans le cadre du projet SH'AIR, le système de calculs basé sur le modèle CAMx a été déployé par les deux partenaires français sur leur région respective. Son fonctionnement technique a été évalué dans le cadre de la réalisation de deux cas tests. Les résultats obtenus ont permis de s'assurer de la cohérence des différentes étapes de la chaîne de calculs développée (Figure 2).

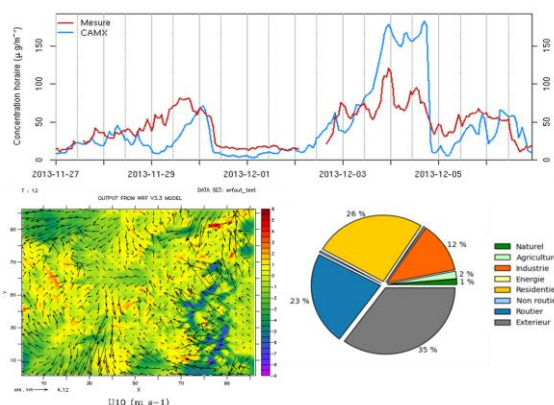


Figure 2 : Série temporelle en PM10 sur la station de Lyon centre (haut), cartographie des champs de vents en région Rhône-Alpes (bas gauche) et contribution des sources sur une journée à d'Aix-en-Provence (bas droite)

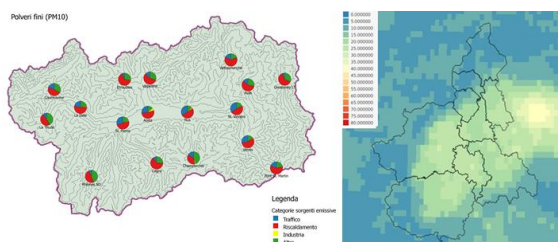


Figure 3 : Cartographie des contributions en Vallée d'Aoste et champs de concentrations sur le Piémont pour les PM10.

Les partenaires italiens ont quant à eux orienté leur choix vers le modèle FARM, développé par ARIANET. Ce choix a été conditionné par l'opérationnalité de ce modèle sur le territoire italien. Dans le cadre du projet, un module spécifique d'analyse de sensibilité, basé sur l'approche BFM (Brute Force Method), a été développé. Cette méthode consiste à évaluer la réponse d'une source en analysant la réponse du modèle à la variation de son émission. Le développement réalisé a permis d'intégrer directement ce module à celui de préparation des émissions ainsi qu'au code de calcul de FARM pour une gestion directe des simulations de sensibilité. Ce système de calcul a été déployé par les partenaires italiens sur leur région respective. Les résultats obtenus à partir des simulations de bases et des simulations de sensibilité ont permis de valider le fonctionnement de chacun des modules composant la chaîne de calcul (Figure 3).

Des données harmonisées sur les 4 régions partenaires

Pour partager les données d'entrée des modèles de chimie-transport, une base de données commune des émissions relatives à l'année 2013 a été créée. Cette étape a nécessité une uniformisation préalable de l'année de référence. Pour cela, les partenaires ont défini une méthodologie d'évolution des données d'émissions pour les inventaires antérieurs. Une harmonisation des profils temporels, utilisés lors de l'intégration des émissions dans les modèles de dispersion, a été effectuée après l'analyse de tous les profils temporels utilisés par chacun des partenaires. Dans certains cas, des profils temporels communs ont été identifiés. Dans d'autres cas,

les profils temporels régionaux ont été maintenus pour conserver les spécificités régionales. La sectorisation des émissions (codes SNAP) et des combustibles (codes NAPFUE) a également été harmonisée par tous les partenaires.

Les émissions ont été projetées sur une grille transfrontalière de 1km de résolution en conservant les informations sur les secteurs d'émissions (industrie, transport routier, chauffage au bois,...). Ce calcul a été réalisé par un outil de modélisation spécifique (EMMA), adapté dans le cadre de ce projet, pour fournir des émissions spatialisées pour chacun des secteurs d'activité détaillés (SNAP niveau 3), dans différents systèmes de projection et différents formats de sortie (Figure 4).

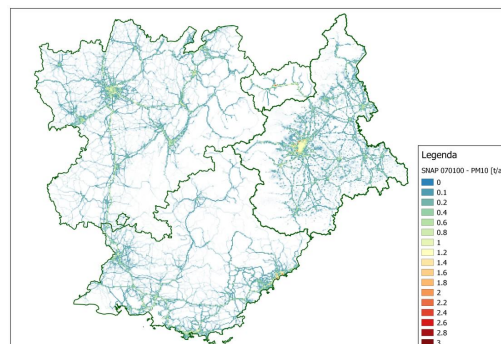


Figure 4 : Cartographie des émissions routières de PM10 sur le domaine d'étude

Des résultats de simulation cohérents avec les observations

Les simulations des conditions météorologiques ont été réalisées avec le modèle WRF à une résolution de 6km. Les résultats sont apparus cohérents avec les observations sur l'ensemble du territoire et pour les deux périodes étudiées.

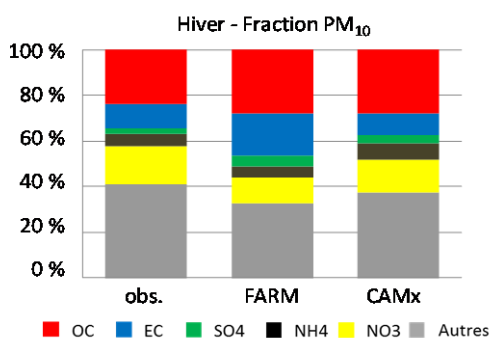


Figure 5: Comparaison entre observations et simulations en pourcentage sur les espèces composant les PM10 sur le site de Torino Rubino

Les résultats issus des modèles CAMx et FARM ont été confrontés aux mesures réalisées sur le territoire ALCOTRA. Leur évaluation a été réalisée au moyen de cartes de concentration, de calculs de paramètres statistiques et de graphiques de comparaison aux observations. De manière générale, les deux modèles, même avec des différences, sous-estiment les niveaux de particules sur les deux périodes d'étude, en raison notamment de la résolution spatiale (6km) nécessaire pour couvrir l'ensemble des régions partenaires.

Les résultats de spéciation (composition chimique) des particules, issus des calculs des modèles, ont également été comparés aux mesures (Figure 5). Une cohérence entre les sorties des deux modèles de chimie-transport sur les deux périodes de mesures est observée. Les résultats sur la période hivernale montrent une reproduction correcte des contributions des différentes espèces aux concentrations en particules. Cette observation renforce la confiance dans l'exploitation des résultats.

La cartographie des concentrations en particules (Figure 6) montrent des niveaux de pollution élevés dans différentes aires de la zone ALCOTRA au cours de la période hivernale. Les analyses de spéciation de ces particules, issues des mesures locales et des résultats du projet Part'Aera, montrent l'importance de la matière organique durant cette période.

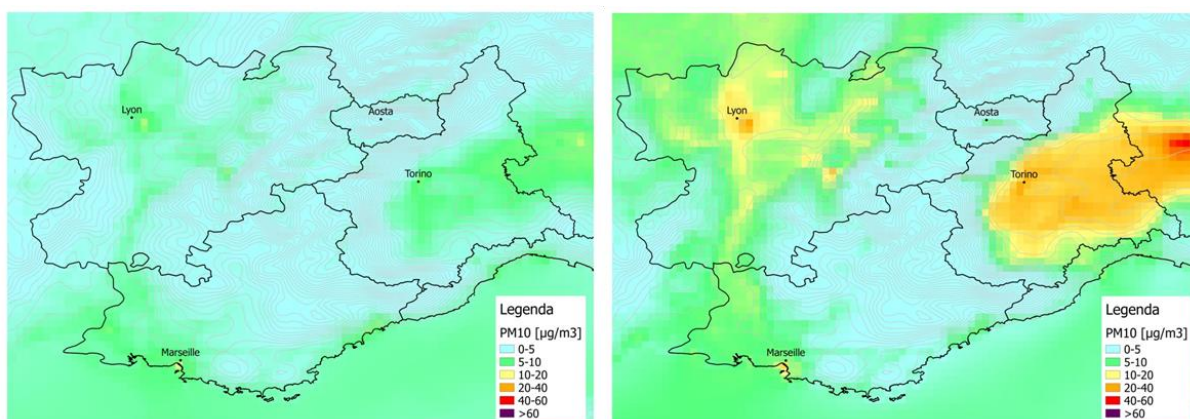


Figure 6 : Moyenne des concentrations en PM10 au cours de la période estivale (gauche) et hivernale (droite).

Une pollution particulaire d'origine locale

Les systèmes de modélisation développés ont évalué les différentes responsabilités dans la pollution particulaire sur le territoire ALCOTRA. Ils ont permis la quantification des sources de pollutions sur les concentrations en PM10 par secteur d'activité et l'impact de la pollution issue de chaque région sur les autres territoires du domaine d'étude. L'intercomparaison des résultats indique un bon accord entre les deux outils de modélisation.

La combustion de la biomasse est le principal contributeur aux concentrations en PM10 sur la majorité du domaine ALCOTRA pendant la période hivernale. Ce résultat est plus marqué sur les territoires préalpins et alpins (Figure 7). Durant cette période, la contribution du trafic routier est également importante dans les grandes agglomérations et à proximité des axes routiers structurants.

Au cours de la période estivale, le trafic routier apparaît comme le contributeur le plus important aux concentrations en particules, quelle que soit la région étudiée (Figure 8). Dans les grandes agglomérations comme Turin, Nice ou Lyon, sa contribution moyenne est proche des 70%. Sur l'ensemble du territoire, près d'un quart des particules fines est associé à des secteurs non explicités dans cette étude regroupés dans le secteur « autres ».

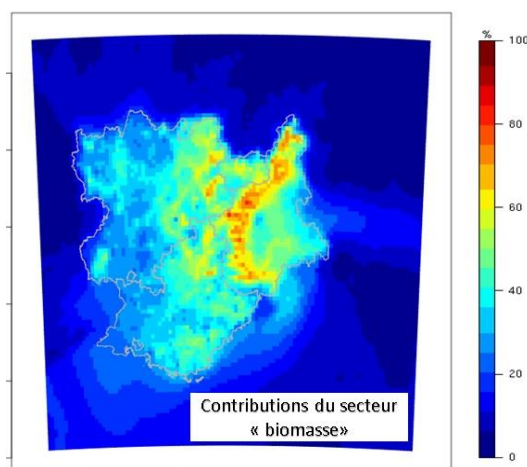


Figure 7 : Cartographie des contributions relative de la combustion de biomasse au cours de la période hivernale.

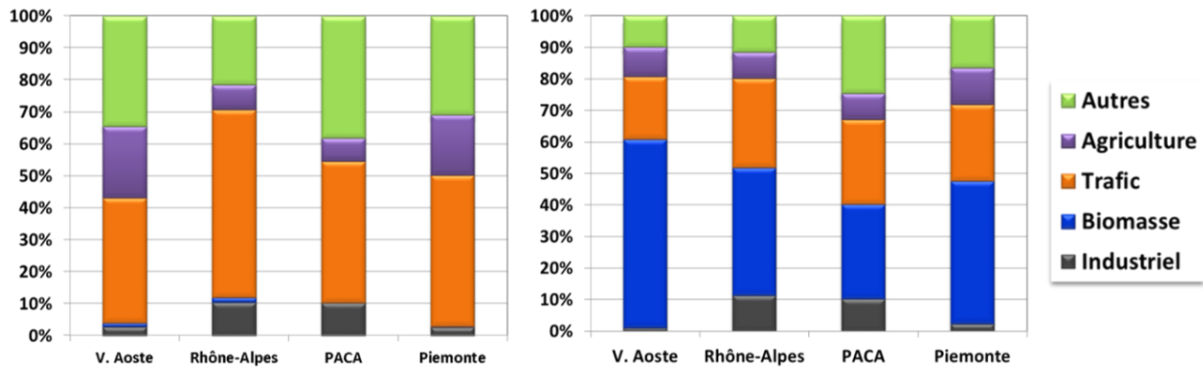


Figure 8 : Bilans des contributions des sources par secteur d'activité sur les régions partenaires au cours de la période estivale (gauche) et hivernale (droite).

Au niveau géographique, les contributions majeures à la pollution particulaire dans chaque région proviennent des émissions locales (Figure 9). Les transferts interrégionaux de pollution dépendent principalement des conditions météorologiques et du relief, bloquant ou canalisant le transport des masses d'air (Figure 10). Les imports, en provenance de l'extérieur, dans chaque région partenaire sont plus importants en été qu'en hiver. Enfin les échanges entre les différentes régions de la zone ALCOTRA sont faibles mais peuvent être significatifs à l'occasion d'épisodes de transports particuliers.

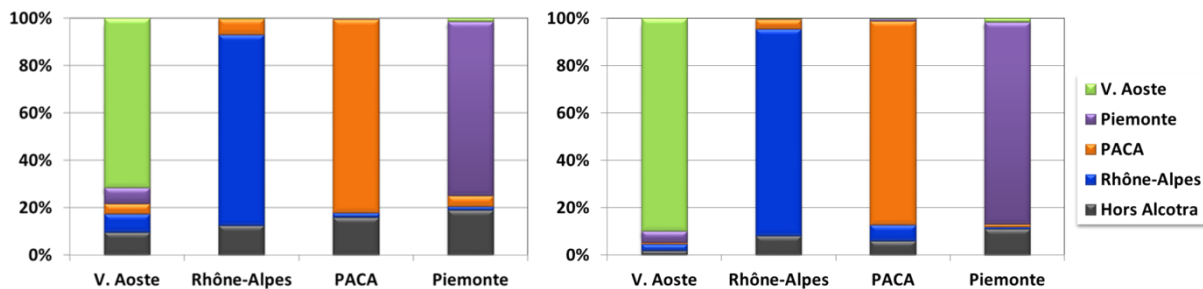


Figure 9 : Bilans des contributions des sources de pollution par secteur géographique sur les 4 régions au cours de la période estivale (gauche) et hivernale (droite).

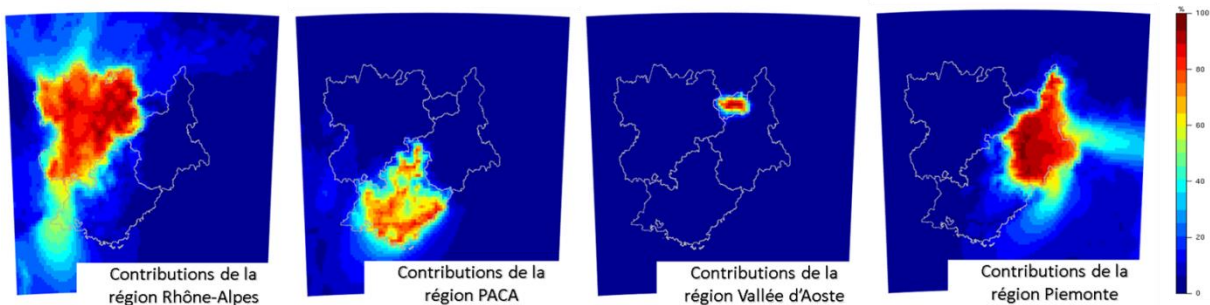


Figure 10 : Cartographie des contributions de chacune des régions sur les concentrations en PM10 au cours de la période hivernale.

Des perspectives de travail...

Les travaux menés au cours de ce projet ont porté sur des périodes météorologiques spécifiques associant des niveaux de pollution et des dynamiques atmosphériques particulières. Il est donc nécessaire de poursuivre ce travail en analysant d'autres périodes caractérisées par des configurations de transports transfrontaliers différentes. L'analyse de périodes complémentaires pourrait mettre en évidence des contributions différentes des secteurs d'activité étudiés, comme dans les cas des épisodes de pollution printaniers. Enfin, l'identification plus particulière de certains territoires hors région ALCOTRA (Suisse, Europe de l'Est, Afrique du Nord,...) pourrait permettre de mieux comprendre les influences extérieures

Sintesi

Il progetto SH'AIR prosegue il lavoro finalizzato alle strategie per la protezione della qualità dell'aria condotte sul territorio del programma ALCOTRA. Il progetto ha lo scopo di rispondere alle domande dei Ministeri italiani e francesi sulle origini e sulle responsabilità dell'inquinamento da polveri. Per approfondire i risultati degli studi precedenti (AERA e PART'AERA) in questo territorio, il progetto ha valutato i contributi delle diverse fonti di inquinamento su tutte le quattro aree partner di progetto: PACA, Piemonte, Rhône-Alpes e Valle Aosta (Figura 1). Le fonti di emissione sono state raggruppate in base al loro settore di attività (industria, trasporto su strada, riscaldamento a legna, agricoltura e altre fonti) e in base alla loro localizzazione sul territorio. Il contributo di ogni regione è stato quantificato per evidenziare la responsabilità di ciascuna in episodi di inquinamento di particolato.

L'attività si è articolata in quattro fasi. La prima ha verificato il funzionamento dei sistemi di calcolo numerico di ciascun partner. La seconda ha armonizzato i dati sulle emissioni di inquinanti atmosferici, per la fornitura ai modelli di un inventario emissioni omogeneo tra le regioni. La terza fase ha confrontato i risultati delle simulazioni con le osservazioni registrate dalle reti di misura della qualità dell'aria situate sul territorio. Questa fase è stata utile per valutare la qualità delle simulazioni. Infine, l'ultima azione ha sfruttato le caratteristiche avanzate dei modelli numerici per raggiungere l'obiettivo principale della ricerca delle fonti di inquinamento da polveri e delle responsabilità. Sono stati selezionati due periodi rappresentativi di episodi di inquinamento da particolato. Il primo inizia al 20 novembre 2013 per terminare il 20 dicembre 2013, il secondo copre il periodo dal 20 luglio 2013 al 20 agosto 2013. La scelta di questi due periodi ha permesso di studiare episodi con caratteristiche distinte.

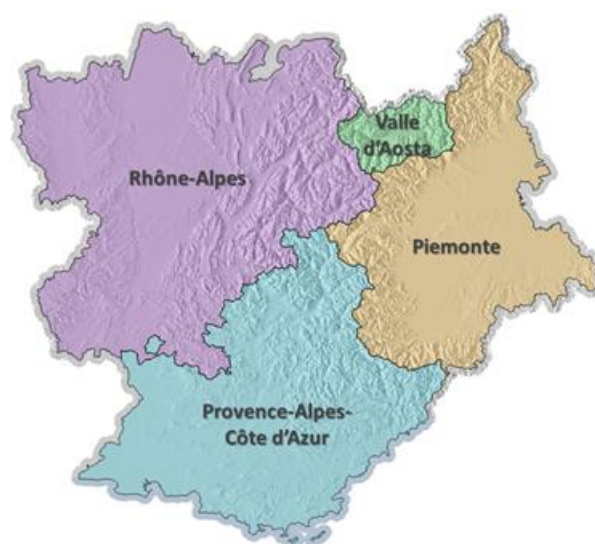


Figura 1 : Regioni francesi ed italiane che compongono il partenariato di SH'AIR

Due sistemi di calcolo numerico per lo studio dell'inquinamento da particolato

Due sistemi di calcolo numerico completi sono stati sviluppati per stimare le concentrazioni di particelle ed i contributi delle fonti di emissione per le regioni PACA, Piemonte, Rhône-Alpes e Valle d'Aosta. Questi sistemi integrano tutti i passi necessari per raggiungere questi risultati, dalla preparazione dei dati di input per i calcoli fino al layout di uscita per il loro utilizzo.

I partner francesi hanno orientato la loro scelta verso il modello CAMx sviluppato da Ramboll-Around. Questo modello integra un modulo speciale per il calcolo dei contributi delle fonti emissive

sulle concentrazioni di particelle chiamato PSAT (PM Source Apportionment Technology). Tale modulo utilizza traccianti reattivi associati a ciascuna fonte di inquinamento. Questi traccianti sono in grado di monitorare le polveri primarie, quelle legate ai precursori gassosi e quelle secondarie formate da reazioni chimiche per tutta la durata delle simulazioni. Questo metodo di calcolo consente una rigorosa conservazione della massa tra il totale delle concentrazioni e dei contributi. Nell'ambito del progetto SH'AIR, i calcoli del sistema in base al modello CAMx è stato utilizzato dai due partners francesi nelle loro rispettive regioni. Il suo funzionamento tecnico è stato valutato nel contesto di raggiungere entrambi i test. I risultati hanno contribuito ad assicurare la coerenza delle varie fasi della catena di calcoli sviluppata (Figura 2).

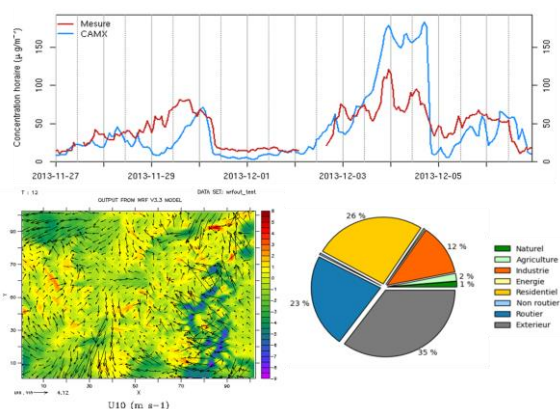


Figura 2: Andamento temporale del PM10 per la stazione di Lione Centro (in alto), mappa dei campi di vento in regione Rhône-Alpes (in basso a sinistra) e contributi giornalieri delle fonti di emissione ad Aix-en-Provence (in basso a destra)

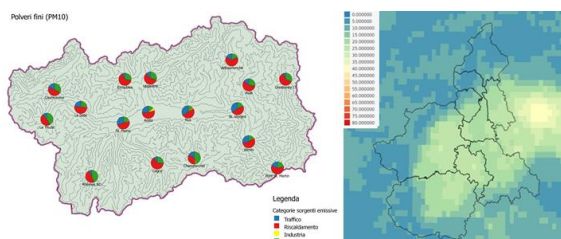


Figura 3: Mappa dei contributi in Valle d'Aosta e campi di concentrazioni in Piemonte per il PM10.

Il partner italiani hanno nel frattempo orientato la loro scelta verso il modello FARM sviluppato da ARIANET. Questa scelta è stata condizionata dal modello che opera sudel territorio italiano. Nell'ambito del progetto, è stato sviluppato un modulo specifico di analisi di sensitività, basato su un approccio BFM (Brute Force Method). Questo metodo consente di valutare il contributo di una sorgente analizzando la risposta del modello ad una variazione della sua emissione. Lo sviluppo realizzato ha permesso di integrare questo modulo direttamente alla fase di preparazione delle emissioni e di portare il codice FARM ad una gestione automatica delle simulazioni di sensitività. Questo sistema di calcolo è stato utilizzato dai partner italiani nelle loro rispettive regioni. I risultati ottenuti da simulazioni basi e simulazioni di sensitività sono stati usati per validare il funzionamento di ciascuno dei moduli componenti catena di calcolo (Figura 3).

Dati armonizzati per le quattro regioni partners

Per condividere i dati di input dei modelli di chimica-trasporto, è stato creato un database comune delle emissioni per l'anno 2013. Tale operazione ha richiesto un'adattamento di tutti gli inventari all'anno di riferimento. Per questo, i partner hanno definito una metodologia per lo sviluppo dei dati di emissione applicato agli inventari di anni precedenti. Una armonizzazione dei profili temporali, utilizzati per l'integrazione delle emissioni nei modelli di dispersione è stata condotta dopo aver analizzato tutti i profili temporali utilizzati da ciascun partner. In alcuni casi, sono stati identificati profili temporali comuni. In altri casi i profili temporali regionali sono stati mantenuti per

mantenere le specificità locali. Anche la nomenclatura delle attività (codici SNAP) e quella dei carburanti (codici NAPFUE) sono state armonizzate da tutti i partner. Le emissioni sono state proiettate su una griglia transfrontaliera di risoluzione 1 km, mantenendo le informazioni sui settori di emissione (industria, trasporti su strada, riscaldamento a legna, ...). Questo calcolo è stato fatto con un modulo di calcolo specifico (EMMA), adattato come previsto dal progetto, per fornire le emissioni spazializzate per ciascuno dei settori di attività dettagliate (livello SNAP 3) in diversi sistemi e formati di proiezione in uscita (Figura 4).

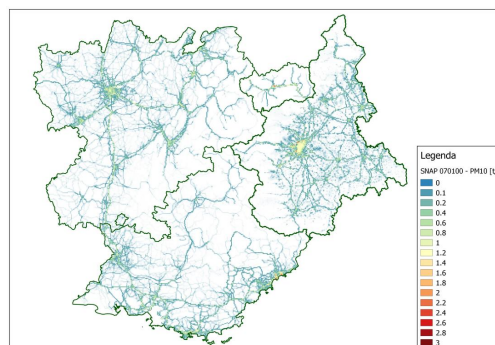


Figura 4 : Mappa delle emissioni stradali di PM10 nell'area di studio

Risultati delle simulazioni coerenti con le misure

Le simulazioni delle condizioni meteorologiche sono state eseguite con il modello WRF ad una risoluzione di 6 km. I risultati sono risultati in linea con le osservazioni del territorio per i due periodi di studio.

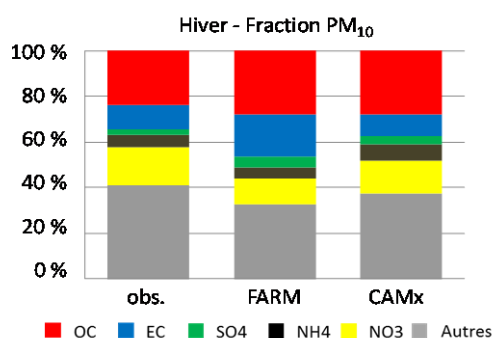


Figura 5: Confronto tra le misure e le simulazioni in percentuale delle specie componenti il PM10 nel sito di Torino Rubino

I risultati profitti dai modelli CAMx e FARM sono stati confrontati con le misure effettuate sul territorio ALCOTRA. La loro valutazione è stata effettuata tramite mappe di concentrazione, calcoli dei parametri statistici e grafici di confronto con le misure. In generale, entrambi i modelli, anche se in modo differente, sottovalutano i livelli di particolato nei due periodi di studio, soprattutto a causa della risoluzione spaziale (6km) necessaria per coprire tutte le regioni partner.

I risultati di speciazione (composizione chimica) delle particelle elaborati dai modelli di calcolo sono stati confrontati con le misure (Figura 5). Si osserva una coerenza tra i risultati dei due modelli di chimica-trasporto nei due periodi analizzati. I risultati dell'inverno mostrano una corretta riproduzione dei contributi di specie diverse alle concentrazioni del particolato. Questa osservazione rafforza la confidenza nell' utilizzo di questi risultati.

La mappa delle concentrazioni di polveri (Figura 6) mostra livelli di inquinamento elevati in diverse aree della zona ALCOTRA durante il periodo invernale. L'analisi di speciazione di queste particelle, risultati delle misure locali del progetto Part'Aera, mostrano l'importanza della sostanza organica durante questa stagione.

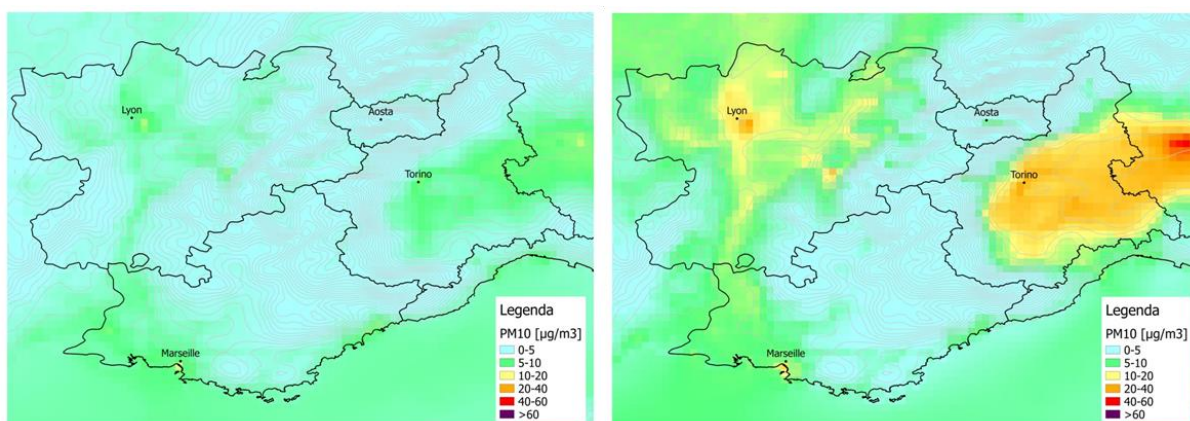


Figura 6 : Concentrazioni medie di PM10 durante l'episodio estivo (a sinistra) e quello invernale (a destra).

Un'inquinamento di particolato di origine locale

I sistemi di modellistica sviluppati hanno valutato le diverse responsabilità per l'inquinamento di particolato sul territorio ALCOTRA. Essi hanno permesso la quantificazione delle fonti di inquinamento sulle concentrazioni di PM10 da parte delle diverse attività e l'impatto dell'inquinamento originato da ogni regione sugli altri territori dell'area di studio. L'interconfronto dei risultati indica un buon accordo tra i due strumenti modellistici.

La combustione della biomassa è il principale responsabile delle concentrazioni di PM10 su gran parte dell'area ALCOTRA durante il periodo invernale. Questo risultato è più marcato sulle zone pre-alpine ed alpine (Figura 7). Durante questa stagione il contributo del traffico stradale è rilevante anche nelle grandi città e nei pressi degli assi stradali principali.

In estate il traffico sembra essere il maggiore contribuente delle concentrazioni di polveri, indipendentemente dalla zona di studio (Figura 8). Nelle grandi città come Torino, Nizza o Lione, il contributo medio è vicino al 70%. Su tutto il territorio, quasi un quarto di polveri fini è associato a settori non illustrati in questo studio raggruppati nella dicitura "altro".

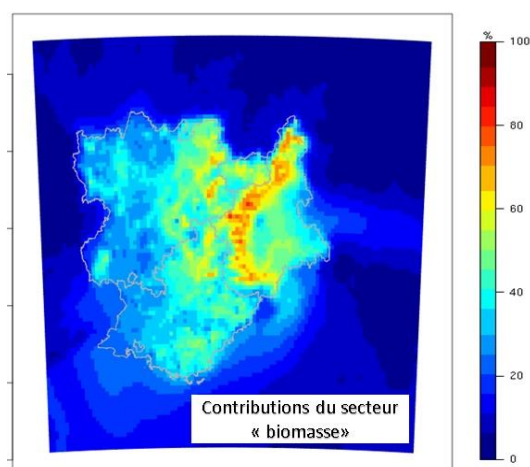


Figura 7 : Mappa dei contributi relativi alla combustione della biomassa nel periodo invernale.

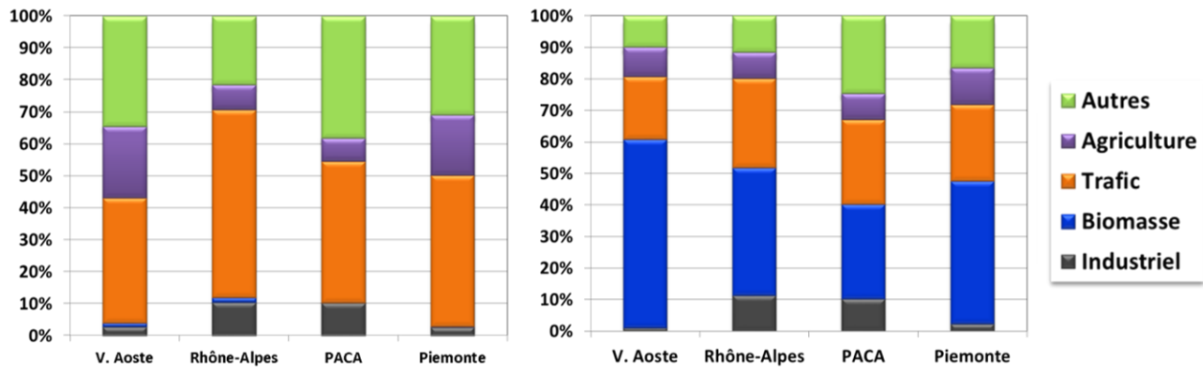


Figura 8 : Bilanci dei contributi delle fonti per settore di attività nelle regioni partners durante il periodo estivo (a sinistra) e quello invernale (a destra).

A livello geografico i maggiori contributi alla polveri sottili in ogni regione provengono da emissioni locali (Figura 9). Trasferimenti interregionali di inquinamento dipendono principalmente dalle condizioni meteo e della conformazione del territorio che portano al blocco o alla canalizzazione delle masse d'aria (Figura 10). Gli apporti dall'esterno in ogni regione partner sono maggiori in estate che in inverno. Infine gli scambi tra le diverse regioni della zona ALCOTRA sono bassi, ma possono diventare significativi per episodi occasionali di trasporto delle polveri.

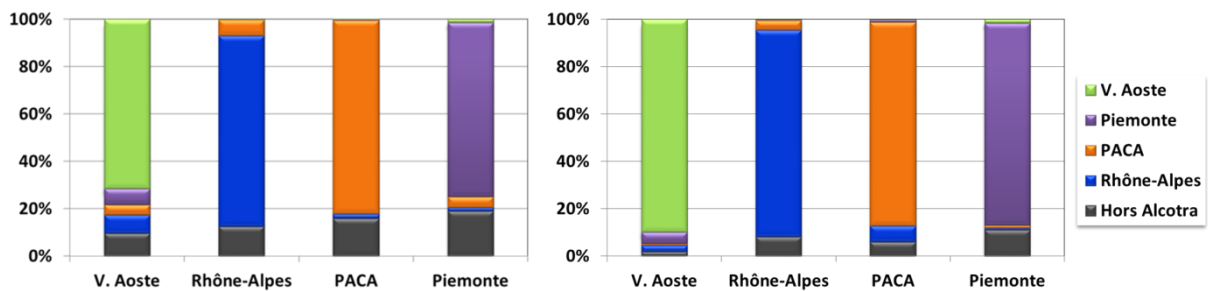


Figura 9 : Bilanci dei contributi delle fonti per settore geografico nelle regioni partners durante il periodo estivo (a sinistra) e quello invernale (a destra).

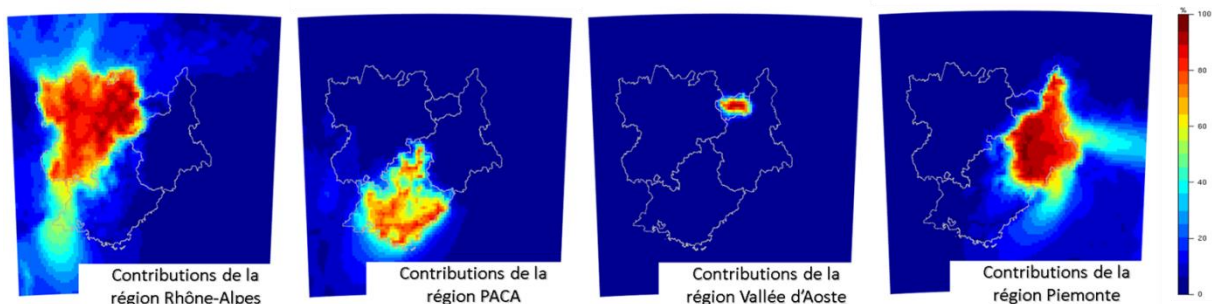


Figura 10 : Mappa dei contributi di ogni regione alle concentrazioni di PM10 durante il periodo invernale.

Delle prospettive di lavoro...

Le attività di questo progetto si sono concentrate su periodi meteo specifici che coinvolgono livelli di inquinamento e dinamiche atmosferiche specifiche. Sarebbe quindi necessario continuare questo lavoro analizzando altri periodi con diverse configurazioni di trasporto transfrontaliero. L'analisi di ulteriori periodi potrebbe evidenziare i diversi contributi delle attività indicate, come nel caso di episodi di inquinamento primaverili. Infine, l'identificazione più specifica di alcune regioni al di fuori dell'area ALCOTRA (Svizzera, Europa dell'est, Nord Africa, ...) potrebbe permetterci di comprendere meglio le influenze provenienti dall'esterno.

Recherche de sources et de responsabilités dans la pollution particulaire

Table des matières

3.0. Présentation de l'action de modélisation	202
3.0.1 Introduction de l'action	202
3.0.2 Présentation de la démarche.....	203
3.0.3 Les paramètres généraux de l'action	204
3.1. Mise en place des modèles de chimie atmosphérique.....	206
3.1.1 Description des modèles.....	206
3.1.2 Réalisation des cas tests	210
3.1.3 Synthèse de l'action	232
3.2. Préparation des émissions sur les 4 régions partenaires.....	233
3.2.1 Présentation des inventaires/cadastres des émissions	233
3.2.2 Harmonisation des données d'émission	237
3.2.3 Harmonisation des profils d'évolution temporelle	238
3.2.4 Calcul du cadastre sur la zone ALCOTRA	239
3.2.5 Intégration des cadastres dans les modèles photochimiques	240
3.2.6 Synthèse de l'action	244
3.3. Évaluation des résultats de modélisation	245
3.3.1 Les mesures de concentration et de spéciation des particules	245
3.3.2 Calcul des champs météorologiques	256
3.3.3 Analyse des champs de concentration calculés avec les modèles	268
3.3.4 Analyse de la spéciation calculée avec les modèles	283
3.3.5 Synthèse	288
3.4. Scénarios : calculs des contributions	290
3.4.1 Définition des secteurs sources	290
3.4.2 Résultats des contributions par secteur d'activité	290
3.4.3 Résultats des contributions par région.....	304
3.4.4 Conclusions	319
3.4.5 Synthèse	321
Annexe A	448
Annexe B	452
Annexe C	456
Annexe D	481
Annexe E	486
Annexe F	492

3.0. Présentation de l'action de modélisation

3.0.1 Introduction de l'action

Le projet SH'AIR s'inscrit dans la lignée des projets européens AERA et PART'AERA. Il poursuit les travaux stratégiques liés à la protection de la qualité de l'air sur le territoire ALCOTRA couvrant les régions italiennes du Piémont, de la Ligurie et de la Vallée d'Aoste et les régions françaises de Rhône-Alpes et de Provence-Alpes-Côte d'Azur (Figure 3.0.1-1).



Figure 3.0.1-1 : Régions franco-italiennes composant le territoire ALCOTRA

Au moment de cette étude, l'ensemble du territoire alpin franco-italien est soumis à une pollution particulaire parmi les plus importantes et plus récurrentes en Europe. Les valeurs réglementaires européennes y sont régulièrement dépassées. Ces épisodes de pollutions sont un véritable enjeu de santé publique puisque l'OMS leur attribue près de 350 000 décès anticipés par an.

La pollution de l'air agit non seulement sur la population des zones urbaines mais aussi dans les zones protégées. Les régions ALCOTRA possèdent de nombreuses zones sensibles, dont les plus importantes sont : le Parc National du Val Grande, le parc national de 5 Terre, le parc national du Grand Paradis, le parc National de la Vanoise, le parc National des Ecrins, le parc national du Mercantour, les parcs Nationaux littoraux de Port-Cros et celui des Calanques de Marseille.

Ces territoires, concernés par la protection des populations, sont très impliqués dans la réduction des émissions anthropiques. Afin d'éclairer les plans d'actions régionaux et locaux, il est nécessaire de connaître avec précisions les principales sources anthropiques impliquées dans la pollution particulaire. Il est également indispensable de comprendre et de quantifier la part du transport transfrontalier dans la pollution particulaire de chaque région du territoire ALCOTRA.

Le projet SH'AIR est un projet de coopération transfrontalière franco-italien visant à répondre aux interrogations des ministères italiens et français sur les origines et les responsabilités de la pollution particulaire qui touche régulièrement le territoire ALCOTRA, principalement durant les saisons hivernales et printanières. Il est fondé sur un partenariat solide et efficace permettant l'échange des connaissances et des outils afin de répondre aux attentes des décideurs et des citoyens en matière de pollution particulaire.

Afin de pouvoir agir efficacement contre les épisodes de pollutions particulières dégradant la qualité de l'air sur ces territoires, il est avant tout nécessaire de rechercher leurs sources et de les quantifier pour définir les différentes responsabilités et ainsi pouvoir mettre en place des actions d'amélioration et de préservation.

3.0.2 Présentation de la démarche

Le projet Part'AERA a permis d'établir un premier diagnostic en quantifiant durant une année les contributions des différentes sources de pollution dans les épisodes de pollution particulaire au niveau de 4 stations de mesures implantées sur le territoire ALCOTRA. Cette étude a mis en évidence les principaux secteurs d'activité contribuant aux épisodes, différents suivant la saison et l'emplacement du site de mesure.

Pour approfondir ces conclusions, le projet SH'AIR ambitionne de réaliser cette quantification sur l'intégralité du territoire étudié et d'ajouter dans le champ de ses investigations la responsabilité des différents territoires lors des épisodes de pollution impliquant un transport des masses d'air.

Pour répondre à ces attentes, il est nécessaire de mettre en place des outils numériques qui vont fournir une information spatialisée sur le territoire. Les choix de ces outils se sont orientés vers les modèles FARM et CAMx, tous deux des modèles de chimie-transport (CTM), utilisés par les partenaires italiens et français respectivement. Ces deux modèles intègrent des modules de calculs spécifiques permettant de marquer les différentes sources de polluants afin de suivre leurs déplacements et leurs transformations dans l'atmosphère sur l'ensemble du territoire d'étude.

La réalisation de ces objectifs se décline sous la forme de quatre sous-actions associant à chacune d'elles un objectif précis. La première de ces actions doit s'assurer du fonctionnement des modèles numériques sélectionnés sur les sites des partenaires par l'installation opérationnelle des modèles, la préparation de l'ensemble des données d'entrées nécessaires à la réalisation des calculs et la réalisation d'un cas test. La seconde action doit s'assurer de la cohérence des données d'émissions de polluants fournies par chacun des partenaires pour alimenter les modèles de chimie-transport par la réalisation d'un cadastre homogène sur l'ensemble du territoire ALCOTRA. La troisième action vise à valider les résultats fournis par les modèles en confrontant les sorties de simulations aux observations réalisées sur les sites de mesures implantés sur le territoire. Enfin, la dernière SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

action doit exploiter les fonctionnalités des modèles numériques pour répondre à l'objectif principal du projet de recherche des sources et des responsabilités de la pollution particulaire.

3.0.3 Les paramètres généraux de l'action

Afin de capitaliser efficacement les résultats et les conclusions des projets précédents, l'année d'étude retenue dans ce projet est l'année 2013 au cours de laquelle de nombreuses mesures de spéciation ont été réalisées sur le territoire ALCOTRA, notamment dans le cadre du projet Part'AERA. L'exploitation de cette base de données permet de confronter les résultats des modélisations aux concentrations en particules d'une part, et également aux contributions des différents secteurs d'activité étudiés dans ce précédent projet au niveau des sites de mesures.

A l'intérieur de cette base de données, deux périodes représentatives d'épisodes de pollutions particulières ont été sélectionnées. La première période débute au 20 novembre 2013 et finit au 20 décembre 2013, soit une durée de 1 mois au cours de laquelle plusieurs dépassements sur les territoires étudiés ont été observés. La seconde période couvre également 1 mois, du 20 juillet 2013 au 20 août 2013.

Le choix de ces deux périodes permet d'étudier des épisodes aux propriétés bien distinctes. Les épisodes de pollutions hivernales se caractérisent par des situations de forte stratification de l'atmosphère conduisant à une accumulation des polluants dans les basses couches avec une activité photochimique peu intense et donc une moindre formation de particules secondaires. A l'inverse, les épisodes de pollutions estivales sont plus souvent associés à une photochimie intense avec une production plus importante de polluants secondaires, notamment des aérosols organiques secondaires (SOA).

La recherche des sources et des responsabilités de la pollution particulaire lors de ces épisodes est réalisée sur l'ensemble du domaine ALCOTRA. Son emprise est présentée sur la figure 3.0.3-1. L'ensemble des calculs, sur la base des deux modèles numériques FARM et CAMx, sera réalisé sur ce domaine.

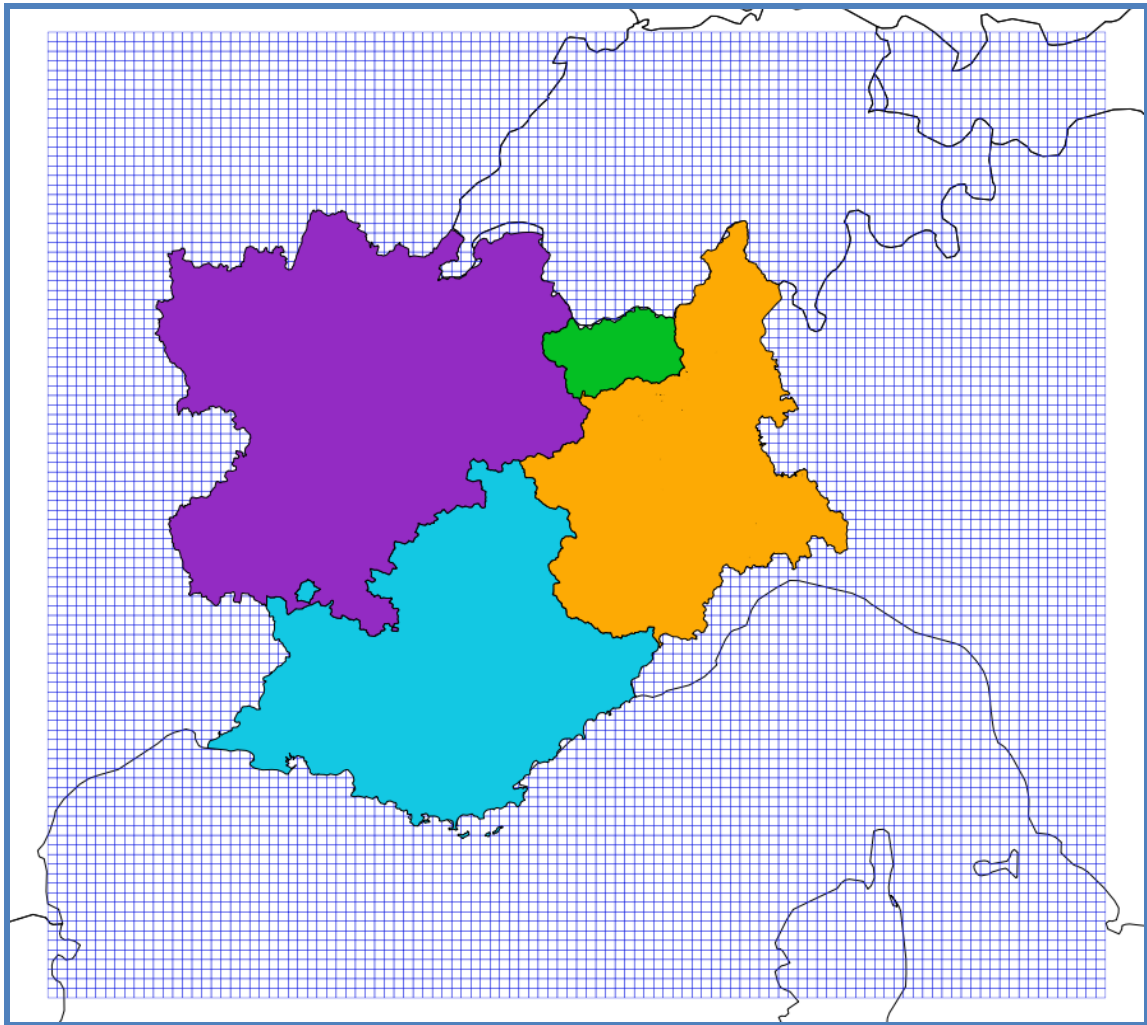


Figure 3.0.3 - 1 : Emprise du domaine d'étude pour les simulations numériques

3.1. Mise en place des modèles de chimie atmosphérique

Cette action vise à développer les systèmes de calculs nécessaires au fonctionnement des deux modèles de chimie-transport sélectionnés par les partenaires italiens et français, respectivement FARM et CAMx, et à s'assurer de leur fonctionnement technique. Ces systèmes doivent intégrer la préparation des données d'entrée (conditions météorologiques, forçage aux limites des domaines, intégration des émissions), le fonctionnement du modèle et la mise en forme des sorties pour permettre leur exploitation.

3.1.1 Description des modèles

3.1.1.1 Le modèle CAMx

Le modèle CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extensions) est un modèle Eulérien de chimie-transport développé par les équipes de Environ. Il permet de simuler les concentrations dans l'atmosphère de polluants particulaires et gazeux de l'échelle continentale à suburbaine. Il est composé de différents modules formant un système complet « open-source » pour l'étude de la qualité de l'air.

Plusieurs données d'entrée sont nécessaires afin de pouvoir réaliser les calculs physico-chimiques atmosphériques. Les champs météorologiques peuvent être issus de différents modèles couramment utilisés, comme WRF, MM5 ou RAMS. Des données d'émissions doivent également être fournies en entrée du modèle sur l'ensemble du territoire d'étude. Ces données peuvent être issues de différents préprocesseurs comme SMOKE, CONCEPT, EPS ou EMS, utilisés notamment à l'échelle américaine, ou formatées à partir de données locales d'émissions. Des données verticales sur la colonne atmosphérique doivent également être fournies afin de pouvoir estimer les taux de photolyse.

Différents modules permettent des calculs spécifiques, utiles notamment dans l'estimation des contributions des sources d'émissions sur les concentrations finales. Les méthodes développées dans CAMx se regroupent en deux catégories. La première regroupe les analyses de sensibilité, c'est-à-dire qu'elles évaluent la réponse du système à une modification des données entrantes. Ces méthodes ne produisent pas à proprement parler une réelle évaluation de la contribution des sources à partir du moment où la relation entre les données en entrée, les émissions, et les données en sortie, les concentrations, ne forment pas un système linéaire. La seconde catégorie de méthodes, constituée par les traceurs réactifs, consiste à ajouter aux simulations des espèces marquées qui vont permettre de suivre les polluants à partir de sources spécifiques sélectionnées. Ces méthodes permettent de conserver les masses entre les concentrations totales simulées et les sommes des contributions des différentes sources.

Dans le cadre de cette étude, la méthode retenue pour l'estimation des contributions des sources d'émissions sur les concentrations en particules avec CAMx est la méthode PSAT (PM Source Apportionment Technology). Elle utilise des traceurs réactifs qui permettent de suivre les PM primaires, les précurseurs gazeux de particules secondaires et également les particules secondaires une fois formées. Pour cela, un total de 32 espèces de traceurs réactifs associées à chacune des

sources d'émissions étudiées est intégré à la simulation. Les sources d'émissions ciblées par cette méthode peuvent être regroupées par leurs activités (activités industrielles, naturelles, routières...) et également par leurs lieux géographiques d'émissions. L'intérêt de cette méthode est d'avoir une conservation des concentrations entre les concentrations des simulations de référence et la somme des contributions des secteurs étudiés. Elle permet également un gain important en termes de temps de calculs puisque les concentrations et les contributions sont évaluées en une seule simulation.

En sortie de calculs, CAMx fournit des champs de concentrations pour les principaux polluants, tels que les NO_x (NO et NO₂), le SO₂, l'O₃ ou encore les particules. Ces dernières se décomposent en plusieurs grandes espèces telles les ions majeurs, composés de sulfate, nitrate et ammonium, le carbone élémentaire, les organiques primaires, les organiques secondaires, les chlorures ... Ces données permettent une comparaison avec les analyses de spéciation des particules réalisées lors de campagnes spécifiques de mesures.

3.1.1.2 Le modèle FARM

FARM (Flexible Air quality Regional Model) est un modèle eulérien de chimie-transport permettant de calculer les concentrations dans l'atmosphère des principaux polluants atmosphériques (aérosols et gaz) sur des échelles spatiales qui vont de l'échelle urbaine à continentale, sur des échelles temporelles horaires ou sur une longue période. Le modèle, développé à l'origine par AriaNET [¹] sur la base du modèle STEM [²] comme code propriétaire, est actuellement un code parallèle « open-source » suite à une collaboration entre AriaNET, le Consortium interuniversitaire pour le calcul automatique CINECA (*Consortio Interuniversitario per il Calcolo Automatico*) et l'ARPA Piemonte (Agence régionale pour la protection de l'environnement du Piémont) [³]. FARM est un modèle largement utilisé au niveau italien, il a notamment été adopté par l'ENEA (Agence nationale pour les nouvelles technologies, l'énergie et le développement économique durable) pour le compte du Ministère italien de l'environnement dans le cadre du projet MINNI [⁴]. Parmi les principales caractéristiques du modèle, on peut citer :

- la possibilité de traiter les sources diffuses et les grandes sources ponctuelles avec effet de *plume-rise* (ascension des panaches) ;
- la possibilité d'utiliser différents modules chimiques pour la description des processus de transformation chimique qui se produisent dans l'atmosphère ;

¹ Gariazzo C., Silibello C., Finardi S., Radice P., Piersanti A., Calori G., Cecinato A., Perrino C., Nussio F., Cagnoli M., Pelliccioni A., Gobbi G.P., Di Filippo P., A gas/aerosol air pollutants study over the urban area of Rome using a comprehensive chemical transport model, *Atmospheric Environment* 41,7286-7303, 2007

² Carmichael G. R., Peters L. K., Saylor R. D. The STEM-II Regional Scale Acid Deposition and Photochemical Oxidant Model-I. An Overview of Model Development and Applications. *Atmos. Environ.*, 25A, 10, 2077-2090, 1991

³ Marras G. F., Silibello C., Calori G., 2012, An Hybrid parallelization of Air Quality Model with MPI and OpenMP, *Recent Advances in the Message Passing Interface*, pp235-245, Springer Berlin Heidelberg, 2012

⁴ Mircea M, Zanini G., Briganti G., Cappelletti A., Pederzoli A., Vitali L., Pace G., Marri P., Silibello C., Finardi S., Calori G., Modeling air quality over Italy with MINNI atmospheric modeling system: from regional to local scale. *Air Pollution Modeling and its Application XXI*, 2010, Springer Netherlands, pp.491-498

- la capacité de traitement de la chimie en phase condensée et en phase aqueuse ;
- la possibilité d'utiliser des grilles imbriquées (*nesting*) communiquant entre elles, soit selon la modalité *one-way* (modalité à une seule voie, dont la communication a lieu uniquement par la grille à basse résolution vers la grille principale à plus haute résolution), soit selon la modalité *two-way* (modalité à deux voies, dont la communication entre les grilles a lieu dans les deux sens) ;
- parallélisation à mémoire répartie, à mémoire partagée et hybride ;
- l'intégration du module T.UV [⁵] pour le calcul du transport radiatif et du module MEGAN [⁶] pour les émissions biogéniques.

FARM, de la même manière que CAMx, nécessite de multiples informations en entrée qui doivent être fournies sur les domaines de simulation : champs météorologiques tridimensionnels, concentrations tridimensionnelles des polluants aux bords de la zone d'étude et au début de la période de simulation, des taux d'émission (anthropogéniques et naturels) bi/tridimensionnels pour tous les polluants considérés. Le modèle peut être utilisé seul, en fournissant tous les champs d'entrée selon les modes et les formats demandés, ou intégré dans une suite de modélisation complète (ARIA Regional, développée par AriaNET et délivrée sous licence commerciale), dont les composants préparent toutes les informations nécessaires, à partir de la base de données initiale (orographie et nature du sol, inventaires des émissions, mesures météorologiques et/ou modèles météorologiques à grande échelle).

A la différence de CAMX, FARM n'intégrait pas directement un module pour le calcul de la contribution des sources d'émission à la concentration des polluants : ce module, appelé FARM/BFM, a été spécialement développé par AriaNET, en collaboration avec les partenaires italiens, dans le cadre des activités du projet SH'AIR. L'approche adoptée fait référence aux méthodes d'analyse de sensibilité tridimensionnelle ou Brute Force Method (BFM) [⁷]. L'idée de la méthode est d'effectuer un certain nombre de simulations de sensibilité en éliminant ou en réduisant la source (ou l'ensemble des sources) que l'on souhaite évaluer : la contribution aux concentrations est enfin calculée en analysant les résultats des simulations de sensibilité et des simulations de base. Cette méthodologie a été adoptée au niveau national dans le programme MINNI précédemment évoqué dans le cadre des activités concernant les prescriptions réglementaires édictées par la Directive 2008/50/EC.

Le module FARM/BFM a été développé en intégrant le modèle FARM avec le modèle des émissions EMMA [⁸] : de cette manière, le module gère directement tout le flux opérationnel, depuis la définition des sources à analyser jusqu'aux simulations de sensibilité (simulations d'émission et

⁵ Tropospheric Ultraviolet and Visible (TUV) Radiation Model, NCAR/UCAR Atmospheric Chemistry Observations & Modeling.

⁶ Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN), NCAR/UCAR Atmospheric Chemistry Observations & Modeling.

⁷ Burr M.J., Zhang Y. Source apportionment of fine particulate matter over the Eastern U.S. Part I: source sensitivity simulations using CMAQ with the Brute Force method and Part II: source apportionment simulations using CAMx/PSAT and comparisons with CMAQ source sensitivity simulations, 2011, Atmospheric Pollution Research 300-317,318-336

⁸ AriaNET EMMA (EMGR/make) - User's guide – Arianet report R2010.08.

simulations de chimie et transport) jusqu'à la production des résultats. Dans le détail, FARM/BFM procède de la manière suivante :

1. pour chacune des sources intéressantes ou pour leur regroupement (définies dans un fichier de configuration prévu à cet effet) une série de réductions en pourcentage d'émission sur tous les polluants émis par la source en question est effectuée ;
2. les simulations d'émission sont effectuées pour chacune des sources modifiées individuellement (scénario sectoriel/géographique), pour toutes les sources modifiées simultanément (scénario de contrôle) et pour le cas de base, à savoir avec toutes les sources sans aucune modification (scénario de référence) ;
3. les simulations de chimie et transport correspondantes sont effectuées avec FARM (simulations sectorielles/géographiques, simulation de contrôle et simulation de référence) ;
4. les résultats sont produits, en calculant les variations de concentration par rapport au scénario de référence pour chaque scénario sectoriel D_i et pour le scénario de contrôle D_n ; la contribution de chaque source sur chaque cellule du domaine de calcul est ainsi calculée comme étant le rapport D_i/D_n ;
5. les post-traitements sont calculés (champs de contribution moyens, contributions sur chaque récepteurs spécifiés par l'utilisateur, etc.).

FARM/BFM est un module hautement configurable par le biais de *namelist* et *files* spécifiques. Les sources objet de l'étude peuvent être identifiées à la fois sur une base géographique et sur une base sectorielle avec un détail sur chaque activité jusqu'au cinquième niveau de classification SNAP (pour de plus amples détails, voir le chapitre 3.2) ou sur les deux. Le système peut travailler sur des domaines imbriqués avec différentes résolutions. Les pourcentages de réduction peuvent être définis par l'utilisateur. A cet effet, dans la mesure où le système atmosphère est un système non-linéaire, il convient d'adopter des pourcentages de réductions limitées (non supérieures à 30% d'après les études réalisées par AriaNET dans le cadre des activités concernant les prescriptions réglementaires de la Directive 2008/50/EC), afin de ne pas trop perturber l'équilibre chimique dans l'atmosphère.

3.1.1.3 Comparaison théorique des méthodologies de contributions des sources

Les méthodes d'estimation des contributions des sources sur les concentrations en particules utilisées dans cette étude par les différents partenaires dépendent des modèles utilisés et des développements qu'ils intègrent. Ainsi, le modèle FARM intègre une méthode d'analyse de sensibilité appelée BFM (Brute Force Method) décrite ci-dessus tandis que CAMx offre la possibilité d'utiliser une méthode basée sur les traceurs réactifs appelée PSAT (PM Source Apportionment Technology).

La méthode d'analyse de sensibilité intégrée dans FARM repose sur la capacité du modèle à répondre à la variation d'un paramètre en entrée (dans ce cas la variation des émissions d'une

source spécifique). Cette méthode ne produit pas directement une quantification des contributions des sources pour les systèmes non-linéaires, comme dans le cas des particules atmosphériques qui peuvent être soit primaires, donc directement liées à la quantité de particules émises dans l'atmosphère, soit secondaires, donc produites par réactions dans l'atmosphère à partir d'émissions de précurseurs gazeux. Cette méthode permet toutefois de quantifier indirectement la contribution d'une source en évaluant les effets des modifications d'émission sur les concentrations. Elle est ainsi adaptée pour la définition et l'évaluation des périmètres d'actions comme dans le cas où l'on souhaiterait connaître le gain maximal obtenu si l'on supprimait tous les déplacements de véhicules. Cette méthode peut être appliquée sur tous les modèles numériques de simulation, quel que soit leur formulation.

La méthode de traceurs réactifs, intégrée au modèle CAMx, doit être directement implémentée dans les codes de calculs des modèles numériques. Afin de tracer les polluants associés à des sources spécifiques, des espèces supplémentaires sont ajoutées dans les simulations. Pour l'étude des systèmes non-linéaires, ces espèces supplémentaires, appelées traceurs, doivent être réactives. Ils doivent permettre de suivre la contribution des sources étudiées au cours des modifications de concentrations associées aux processus atmosphériques comme l'émission, le transport ou la chimie. L'application de cette méthode permet une réelle estimation de la contribution des sources sur les concentrations simulées puisque la somme des concentrations des traceurs sera égale à la concentration totale. Toutefois, les coefficients obtenus peuvent varier d'une méthode à l'autre en fonction des hypothèses appliquées à la formulation des traceurs.

L'application d'une méthode peut être contrainte par la structure du modèle utilisé mais il est alors nécessaire de rappeler les réserves associées. Une méthode d'analyse de sensibilité n'est pas exactement une méthode d'estimation directe des contributions des sources pour les systèmes non-linéaires. Les coefficients obtenus permettent de prévoir les réponses non-linéaire du modèle numérique aux modifications d'entrée et ainsi de mettre en place des scénarios de contrôle mais ils ne rendent pas compte directement, mais seulement indirectement, des contributions réelles de chacune des sources. A l'inverse, une réelle méthode de calcul des contributions des sources, comme dans le cas des traceurs réactifs, permet de quantifier l'implication de chaque source dans la concentration totale d'un polluant. Toutefois, les coefficients obtenus ne peuvent pas prédire la réponse du système aux modifications des émissions.

3.1.2 Réalisation des cas tests

Afin de s'assurer du fonctionnement correct des modèles numériques et de la cohérence des simulations sur les différents systèmes, un cas test, différent pour chacun des modèles utilisés par les partenaires, a été définis.

3.1.2.1 Le cas test pour CAMx en PACA

3.1.2.1.1 Paramètres généraux du cas test pour CAMx

Pour CAMx, ce cas test porte sur la période hivernale d'une durée de 1 mois allant du 1er décembre 2013 au 31 décembre 2013. Le domaine final de calcul pour CAMx est une grille régulière (102 x 95 mailles) de 3km de résolution couvrant l'intégralité de la région PACA (figure 3.1.2.1 - 1).

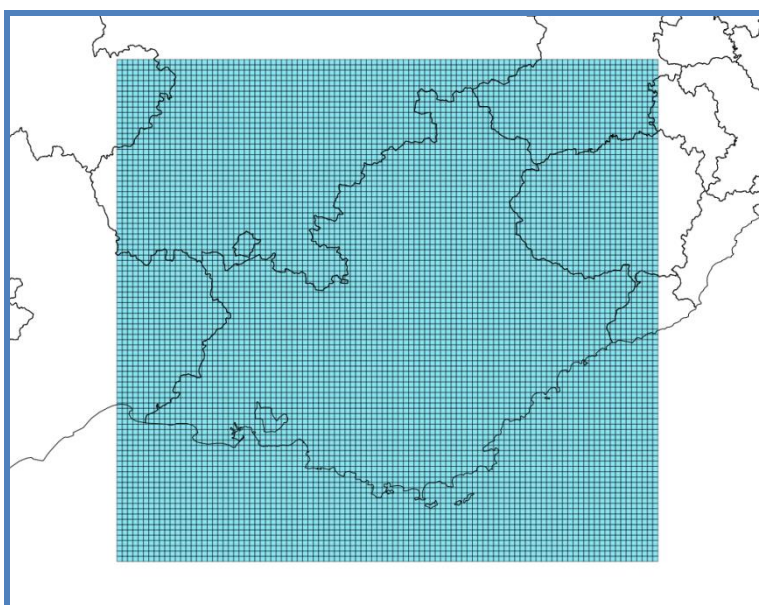


Figure 3.1.2.1.1 - 1 : Emprise de la grille de calcul de CAMx

Les émissions anthropiques sont issues de l'inventaire régional des émissions élaboré par AirPACA pour l'année de référence 2010. Il intègre l'ensemble des secteurs d'activité contribuant aux émissions de polluants dans l'atmosphère. Le cadastre initial a une résolution spatiale de 1km sur une grille régulière. Il est ensuite projeté sur la grille de calcul de CAMx. La déconvolution temporelle est basée sur des profils différenciés suivant les activités. La résolution temporelle finale du cadastre est de 1 heure. En dehors de la région PACA, les émissions anthropogéniques sont issues des données EMEP pour l'année de référence 2010. Sur cette même grille et sur le même pas de temps, les émissions biogéniques, marines et terrigènes sont calculées par les modules MEGAN et « diagbio », tous deux intégrés au préprocesseur de CHIMERE. Ces flux d'émissions sont fonction des conditions météorologiques simulées.

Les champs météorologiques sont issus du modèle WRF [v3.5] (Weather Research Forecast) paramétré pour 3 domaines imbriqués dont le dernier domaine correspond à la grille de calculs de CAMx. Ces données météorologiques sont ensuite formatées pour CAMx en utilisant le module « wrfcamx ». Les 14 premiers niveaux verticaux, sur un total de 27 niveaux, sont conservés. Le schéma YSU (Hong et al., 2006 ^[9]) est utilisé pour paramétrer le coefficient de diffusion verticale (K_v) de CAMx et le schéma de convection sous-maille est désactivé.

Les conditions initiales et aux limites du domaine sont issues d'une simulation réalisée avec le modèle CHIMERE [v2008] sur une grille régulière (72 x 72) de 9km de résolution centrée sur le domaine de calculs de CAMx. Cette simulation est elle-même alimentée par une première simulation CHIMERE sur une grille régulière (89 x 89) de 36km de résolution.

Les taux de photolyse sous conditions de ciel clair sont calculés par le module TUV (Tropospheric Ultraviolet and Visible) en fonction de l'altitude au-dessus du sol, de la topographie du terrain, de

⁹ Hong S.Y., Noh Y., Dudhia J., 2006. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. Monthly Weather Review. Vol. 134, 2318-2341.

l'albedo de surface, de la quantité d'ozone sur l'ensemble de la colonne atmosphérique et de l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Les données d'ozone sur la colonne atmosphérique sont dérivées des observations satellites fournies par OMI.

La simulation CAMx est réalisée sur un pas de temps adaptatif maximal de 15 minutes avec un enregistrement horaire. L'advection horizontale est résolue par la méthode numérique PPM (Piecewise Parabolic Method) (Colella and Woodward, 1984 [¹⁰]). La chimie en phase gazeuse est basée sur le mécanisme CB05 (Yarwood et al., 2005 [¹¹]) et résolue suivant le schéma EBI (Euler Backward Iterative) (Hertel et al., 1993 [¹²]). La chimie des aérosols est également activée. Leur distribution en taille est basée sur le schéma CF (Coarse and Fine), divisant la distribution granulométrique des particules suivant deux modes. Les espèces primaires sont modélisées comme des particules de petites (PM2.5) et grosses tailles (PM10-2.5) tandis que les particules secondaires sont modélisées exclusivement comme des particules de petites tailles. Le dépôt sec est considéré au travers du schéma de Zhang (2003) [¹³] basé sur une occupation du sol suivant 26 catégories. Le dépôt humide est également activé sur la base de coefficients de lessivage.

3.1.2.1.2 Résultats du cas test pour CAMx en PACA

La chaîne de traitement développée dans le cadre de cette étude permet de cartographier les concentrations journalières en PM10 sur le domaine d'étude, d'extraire les concentrations simulées au niveau de sites récepteurs ainsi que de représenter les contributions des différents secteurs d'activité au niveau de ces mêmes sites. Différents exemples de ces traitements sont présentés dans les figures suivantes (Figures 3.1.2.1.2 - 1/2/3).

Il apparaît ainsi une sous-estimation de la moyenne journalière en PM10 par le modèle CAMx sur la période d'étude, notamment en début de période. Cette sous-estimation initiale est à mettre en association avec la non prise en compte d'une phase d'initialisation du modèle, habituellement considérée lors de simulations numériques.

¹⁰ Colella, P., Woodward, P.R., 1984. The Piecewise Parabolic Method (PPM) for gas-dynamical simulations. J. Comput. Phys. 54, 174–201. doi:10.1016/0021-9991(84)90143-8

¹¹ Yarwood, G., S. Rao, M. Yocke, and G.Z. Whitten, 2005: Updates to the Carbon Bond Mechanism: CB05. US EPA Final Report, 161 pp.

¹² Hertel, O., Berkowicz, R., Christensen, J., Hov, Ø., 1993. Test of two numerical schemes for use in atmospheric transport-chemistry models. Atmospheric Environ. Part Gen. Top. 27, 2591–2611. doi:10.1016/0960-1686(93)90032-T

¹³ Zhang, L., Brook, J.R., Vet, R., 2003. A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models. Atmos Chem Phys 3, 2067–2082. doi:10.5194/acp-3-2067-2003

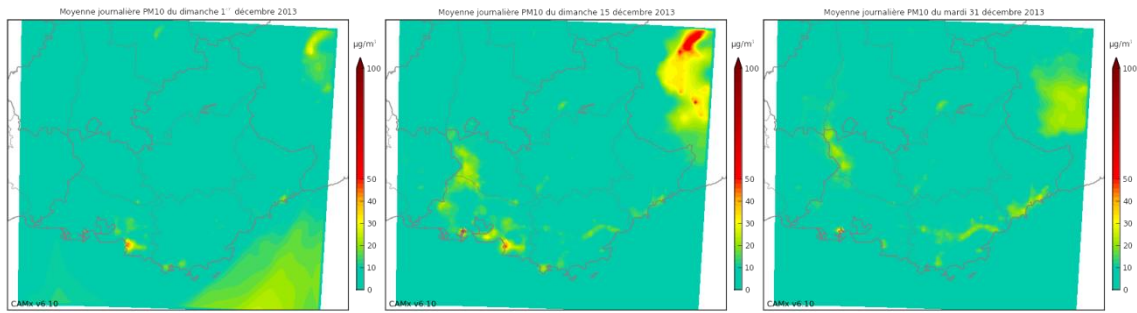


Figure 3.1.2.1.2 – 1 : Cartographies des concentrations journalières en PM10 pour les journées du 1^{er} décembre (gauche), 15 décembre (milieu) et 31 décembre 2013 (droite).

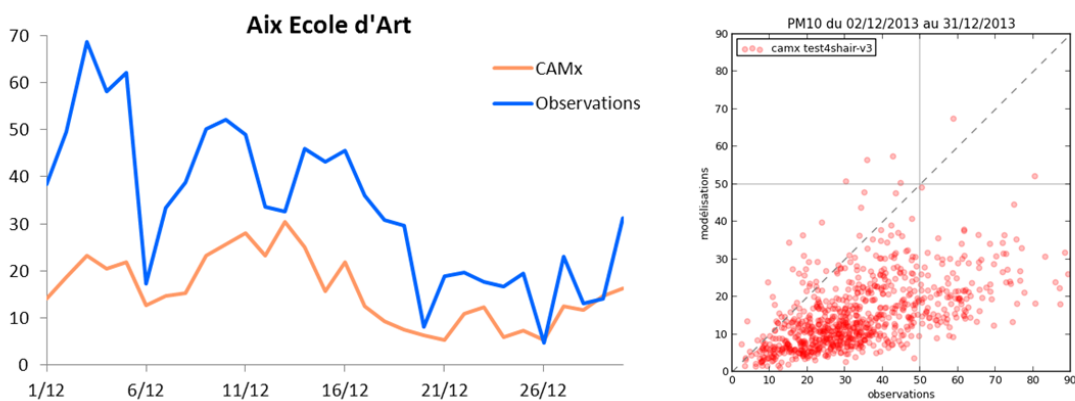


Figure 3.1.2.1.2 - 2 : Gauche : Série temporelle de la concentration journalière en PM10 sur la station urbaine d'Aix-en-Provence issue des simulations (orange) et des observations (bleu) sur la période du cas test. Droite : Comparaison de la concentration journalière en PM10 sur l'ensemble des stations de mesures représentatives en PACA entre les simulations et les observations.

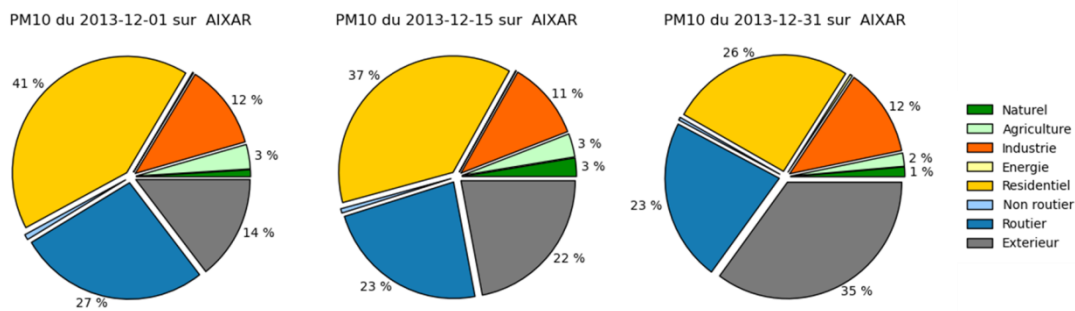


Figure 3.1.2.1.2 - 3 : Contribution des secteurs d'activité à la concentration journalière en PM10 sur la station urbaine d'Aix-en-Provence pour les journées du 1^{er} décembre (gauche), 15 décembre (milieu) et 31 décembre 2013 (droite).

Ce cas test a permis de valider le fonctionnement correct de l'ensemble de la chaîne de calculs, du pré-traitement des données jusqu'au post-traitement des sorties sur les calculateurs de AirPACA.

3.1.2.2 Le cas test pour CAMx en RA

Après avoir configuré le modèle CAMx sur la région PACA, nous effectuons dans cette partie un autre cas test sur la région Rhône-Alpes. L'objectif de cette analyse est de tester la fiabilité (ou/et la SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

compatibilité) du modèle sur une autre région du domaine Alcotra en utilisant les mêmes paramètres que ceux fixés précédemment dans la section 3.1.2.1. Pour rappel, le modèle a été configuré en effectuant plusieurs études de sensibilité et en exécutant une dizaine de scénarios de test sur la région PACA.

Dans cette partie seule la portion du domaine correspondant à la région Rhône-Alpes a été choisie pour effectuer ces cas tests. Les simulations numériques et les analyses de comparaison avec les mesures n'ont donc été effectuées que pour cette région. La table 3.1.2.2-1 et la figure 3.1.2.2-1 présentent les principales caractéristiques de ce domaine d'étude qui ont été adoptées pour la paramétrisation du modèle CAMx.

Table 3.1.2.2-1: Paramètres de simulations utilisés pour la zone d'étude

Résolution	Nx=Ny	SO(°)	NE(°)	Centre de la grille(°)
2 Km	148	Lon=3.5553 Lat=43.9547	Lon=7.4192 Lat=46.6775	Lon=5.0 Lat=47.0

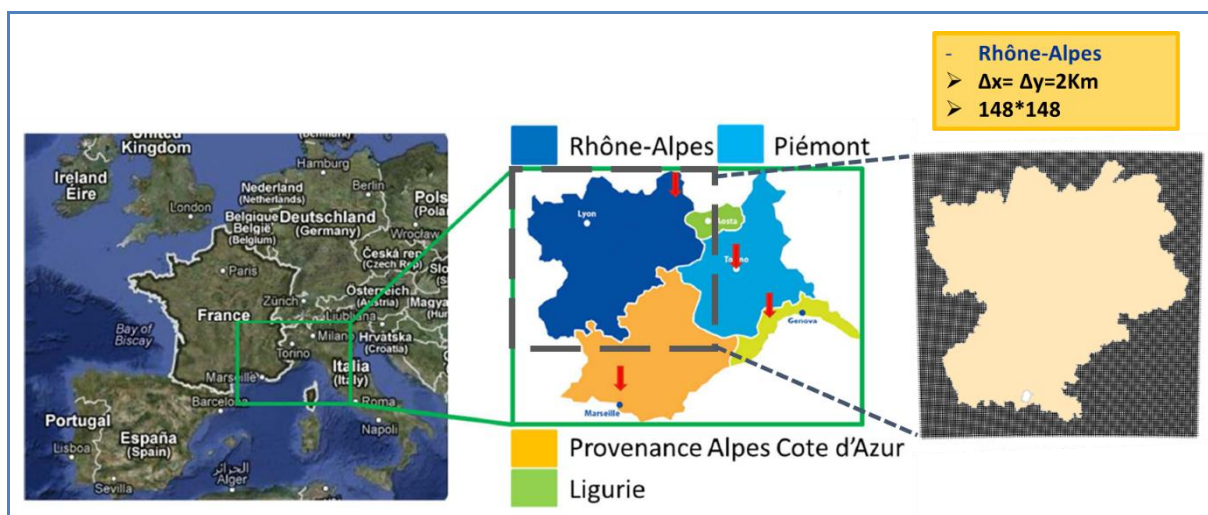


Figure 3.1.2.2-1 : Domaine de l'étude adopté pour les simulations numériques par CAMx.

Plusieurs données d'entrée et paramètres sont nécessaires pour CAMx afin de mieux reproduire et simuler les phénomènes physico-chimiques atmosphériques. La table 3.1.2.2-2 fournit un récapitulatif des principaux paramètres de simulations et données d'entrée.

Table 3.1.2.2-2 : Récapitulatif des principaux paramètres de simulations et données d'entrée.

Données d'entrée et paramètres de simulation	Descriptions
Météo	Données horaires fournies par le modèle WRF (Weather Research and Forecasting Model). Ces données sont interpolées par la suite sur la grille de calcul CAMx par un outil spécifique au modèle.
Emissions	Les émissions sont formatées à partir du cadastre annuel d'Air Rhône-Alpes. Nous avons utilisé les émissions EMEP à l'extérieur de la région d'étude (Figure 3.1.2.2-1).

Conditions limites	Ces données sont calculées à partir des résultats Prev'air sur le domaine européen.
Conditions initiales	Ces données sont calculées à partir des résultats Prev'air sur le domaine européen.
Solveur d'advection horizontale	On utilise dans nos simulations la méthode parabolique par morceaux (PPM) comme solveur d'advection (Colella and Woodward, 1984 [¹⁴]). Il s'agit d'une extension d'ordre supérieur de la méthode de Godounov (Godunov, 1962 [¹⁵]).
Solveur chimique	Nous utilisons pour ces simulations le solveur le plus efficace disponible pour CAMx. Il s'agit d'une méthode itérative (EBI) fondée sur la méthode « Backward Euler » (Hertel et al., 1993 [¹⁶])
Modèle de dépôt sec	On utilise le modèle de Wesely/Slinn.
Modèle de photolyse	Modèle de photolyse externe avec des ajustements intégrés pour la prise en compte des nuages et des aérosols.

3.1.2.2.1 Principales données d'entrée

La modélisation de la dispersion atmosphérique nécessite la connaissance de plusieurs paramètres météorologiques, notamment la vitesse et la direction du vent et les conditions de stratification thermique de l'atmosphère (température, nébulosité...). Ces paramètres sont fournis généralement par des mesures ponctuelles de terrain. Cependant, ces données ponctuelles ne sont pas suffisamment représentatives pour un domaine assez étendu et plus particulièrement quand celui-ci est caractérisé par la présence de relief assez accidenté comme pour notre domaine d'étude. Il est donc nécessaire d'utiliser un modèle météorologique comme WRF qui permet de fournir des champs de données sur l'ensemble de la zone d'étude. Les calculs de données météorologiques avec WRF ont été réalisés sur trois domaines imbriqués avec une résolution décroissante d'un ratio 3 (18Km, 6Km et 2Km) (cf. section 3.3). Les deux premiers domaines intègrent respectivement une large partie de l'Europe et la zone ALCOTRA et le dernier est spécifique à la zone d'étude (la région Rhône-Alpes). La figure 3.1.2.2.1 -2 illustre une cartographie du champ de vitesse à $z = 10\text{m}$ issue du modèle WRF (version 3.34) pour la journée 17/11/2013 à 12h. Comme prévu, cette figure montre que le champ de vitesse se caractérise par une forte variabilité spatiale dans notre zone d'étude

¹⁴ Colella, P., Woodward, P.R., 1984. The Piecewise Parabolic Method (PPM) for gas-dynamical simulations. J. Comput. Phys. 54, 174–201. doi:10.1016/0021-9991(84)90143-8

¹⁵ A.V.Z. S. K. Godunov, A computational scheme for two-dimensional nonstationary problems of gas dynamics and calculation of the flow from a shock wave approaching steady-state, Ussr Comput. Math. Math. Phys. 1 (1962) 1187–1219.

¹⁶ Hertel, O., Berkowicz, R., Christensen, J., Hov, Ø., 1993. Test of two numerical schemes for use in atmospheric transport-chemistry models. Atmospheric Environ. Part Gen. Top. 27, 2591–2611. doi:10.1016/0960-1686(93)90032-T

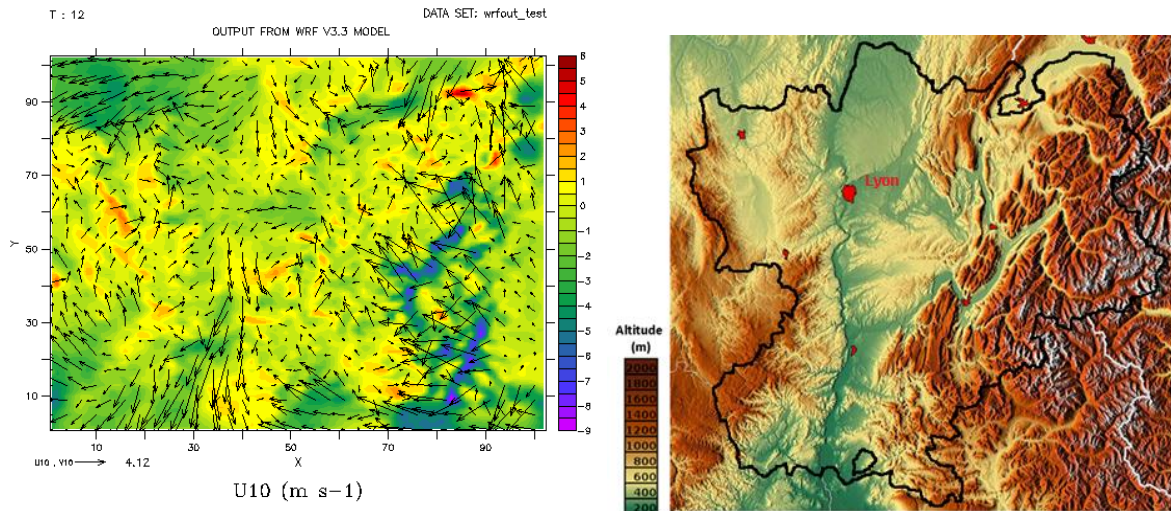


Figure 3.1.2.2.1-2 : Exemple de cartographie du champ de vitesse à $z = 10m$ issu du modèle WRF (version 3.3) pour le 17/11/2013 à 12h (à gauche) et visualisation des variations de relief au sein du domaine d'étude (à droite)

Air Rhône-Alpes met à jour chaque année un cadastre d'émission annuel. Ce cadastre a été formaté pour être intégré dans la chaîne de modélisation. Ce traitement permet de fournir des cadastres surfaciques agrégés et modulés sur toutes les heures de l'année. Ces processus sont détaillés dans la section 3.2. A titre d'illustration, la variabilité spatiale des émissions de NO_2 sur la région Rhône-Alpes est représentée sur la figure 3.1.2.2.1-3. Ces émissions sont calculées pour le 01/12/2013 à minuit au niveau du sol. Par ailleurs, les émissions en dehors de la région Rhône-Alpes sont issues du cadastre européen EMEP¹⁷.

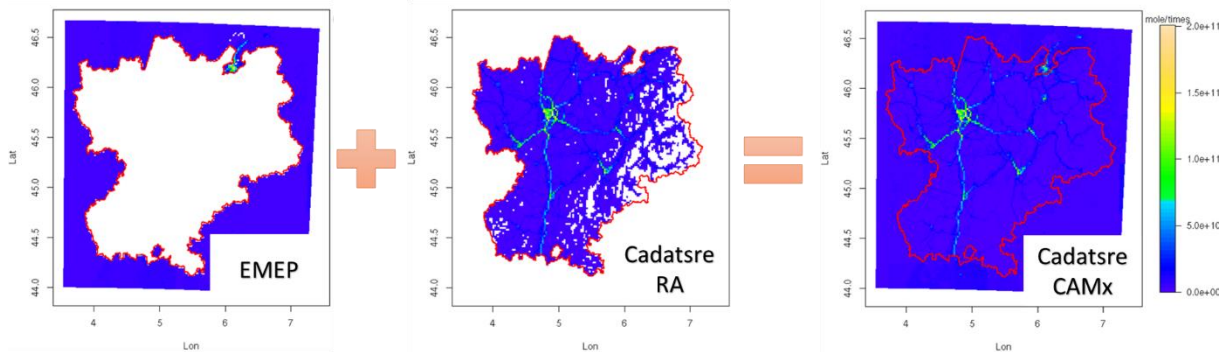


Figure 3.1.2.2.1-3 : Cadastre surfacique d'émission de NO_2 pour le 01/12/2013 à minuit.

3.1.2.2.2 Principaux paramètres de simulations

Les taux de réactions de photolyse atmosphérique dépendent principalement des radiations solaires. Ainsi, ils sont fortement liés à la quantité de rayonnement solaire transmise à travers l'atmosphère et réfléchi par la surface de la terre. Dans CAMx, ce bilan thermique est fondé sur cinq paramètres : l'angle zénithal solaire, l'altitude au-dessous du sol, les colonnes totales de l'ozone, l'albédo de surface terrestre et le niveau topographique (hauteur de terrain). Le processeur

¹⁷ <http://www.emep.int/>

de traitement utilisé dans le calcul de ces taux est une version ajustée du modèle de transfert radiatif développé par le NCAR (NCAR, 2011 [¹⁸]) afin de prendre en compte certains phénomènes physiques liés aux nuages et aux aérosols. Ce modèle est le plus compatible aux mécanismes chimiques comme : CB05, CB6, and SAPRC99.

Le modèle CAMx possède deux solveurs différents pour résoudre les équations d'advection horizontale. Ces derniers ont quasiment le même ordre de précision de calcul et se caractérisent par peu de diffusion numérique. Nous utilisons dans cette étude la méthode parabolique par morceaux (PPM) (Colella and Woodward, 1984 [¹⁹]) qui est suffisamment rapide pour ce type d'application.

Pour modéliser le dépôt sec dans CAMx, nous avons deux options différentes. La première approche est fondée sur les travaux de Wesely (1989) [²⁰] et Slinn and Slinn (1980) [²¹] et la deuxième, qui est plus récente, est basée sur les algorithmes de Zhang et al. (²⁰⁰³ [²²], ²⁰⁰¹ [²³]). Le modèle de Wesely/Slinn utilise seulement 11 catégories des terres tandis que celui de Zhang utilise 26 catégories. Suite à la recommandation des développeurs de CAMx, nous utilisons dans cette étude le modèle le plus simple de Wesely/Slinn. Ce dernier a été largement utilisé dans la littérature pour estimer le dépôt sec des polluants.

Nous utilisons pour ces simulations le solveur le plus efficace disponible pour CAMx. Il s'agit d'une méthode itérative (EBI) ultra précise fondée sur la méthode « Backward Euler » (Hertel et al., 1993 [²⁴]) qui est 10 fois plus rapide que la méthode hybride (IEH).

3.1.2.2.3 Résultats

L'objectif de cette partie est de tester la fiabilité du modèle CAMx en comparant ses résultats avec les mesures. Les simulations numériques de ce cas test ont été réalisées sur une période hivernale (27/11/2013 -07/12/2013). Cette période est en effet représentative d'une période très particulière de l'année 2013 avec des niveaux de concentrations en PM10 assez élevés et des épisodes de pollutions significatifs.

Dans cette partie, nous avons effectué deux types de comparaison entre le modèle et les mesures :

- des comparaisons sur les séries temporelles de concentrations (horaires et moyennes journalières).

¹⁸ NCAR, 2011. The Tropospheric Visible and Ultraviolet (TUV) Radiation Model web page. National Center for Atmospheric Research, Atmospheric Chemistry Division, Boulder, Colorado.

¹⁹ Colella, P., Woodward, P.R., 1984. The Piecewise Parabolic Method (PPM) for gas-dynamical simulations. *J. Comput. Phys.* 54, 174–201. doi:10.1016/0021-9991(84)90143-8

²⁰ Wesely, M.L., 1989. Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. *Atmospheric Environ.* 1967 23, 1293–1304. doi:10.1016/0004-6981(89)90153-4

²¹ Slinn, S.A., Slinn, W.G.N., 1980. Predictions for particle deposition on natural waters. *Atmospheric Environ.* 1967 14, 1013–1016. doi:10.1016/0004-6981(80)90032-3

²² Zhang, L., Brook, J.R., Vet, R., 2003. A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models. *Atmos Chem Phys* 3, 2067–2082. doi:10.5194/acp-3-2067-2003

²³ Zhang, L., Gong, S., Padro, J., Barrie, L., 2001. A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module. *Atmos. Environ.* 35, 549–560. doi:10.1016/S1352-2310(00)00326-5

²⁴ Hertel, O., Berkowicz, R., Christensen, J., Hov, Ø., 1993. Test of two numerical schemes for use in atmospheric transport-chemistry models. *Atmospheric Environ. Part Gen. Top.* 27, 2591–2611. doi:10.1016/0960-1686(93)90032-T

- des comparaisons avec des critères statistiques.

Afin d'évaluer la qualité des simulations effectuées avec le modèle CAMx, nous avons utilisé des mesures de concentrations (horaires et journalières) de PM10 sur plusieurs sites de mesure de la qualité de l'air à différentes localisations de la région Rhône-Alpes. Ces mesures ont été utilisées pour bien évaluer la performance du modèle numérique à reproduire les concentrations journalières et horaires des particules fines sur la totalité du territoire de la région.

3.1.2.2.3.1 Evolution heure par heure des concentrations

Pour évaluer le comportement du modèle CAMx sur la période de calcul, nous présentons sur la figure 3.1.2.2.3.1-1, les évolutions « heure par heure » de la concentration calculée et celle mesurée sur trois stations de la région Rhône-Alpes (voir l'annexe A pour d'autres stations de mesures). Malgré certains décalages identifiés entre les mesures et les résultats numériques, nous observons que le modèle CAMx réussit souvent à reproduire certaines caractéristiques fondamentales d'un panache de pollution. C'est le cas notamment pour le temps d'advection donné par le temps d'arrivée du pic de concentration. En effet, la comparaison des temps d'advection, définis par les temps d'arrivée des pics de concentration, et des étalements des signaux de concentrations mesurés et modélisés, montre que ces paramètres fondamentaux sont bien reproduits dans les différentes stations de mesures. Néanmoins, nous observons l'existence d'une grande variabilité dans les signaux mesurés qui n'est pas reproduite correctement par le modèle numérique. Cela peut être dû à une mauvaise prise en compte de certains mécanismes physiques comme les effets de fluctuation de concentration.

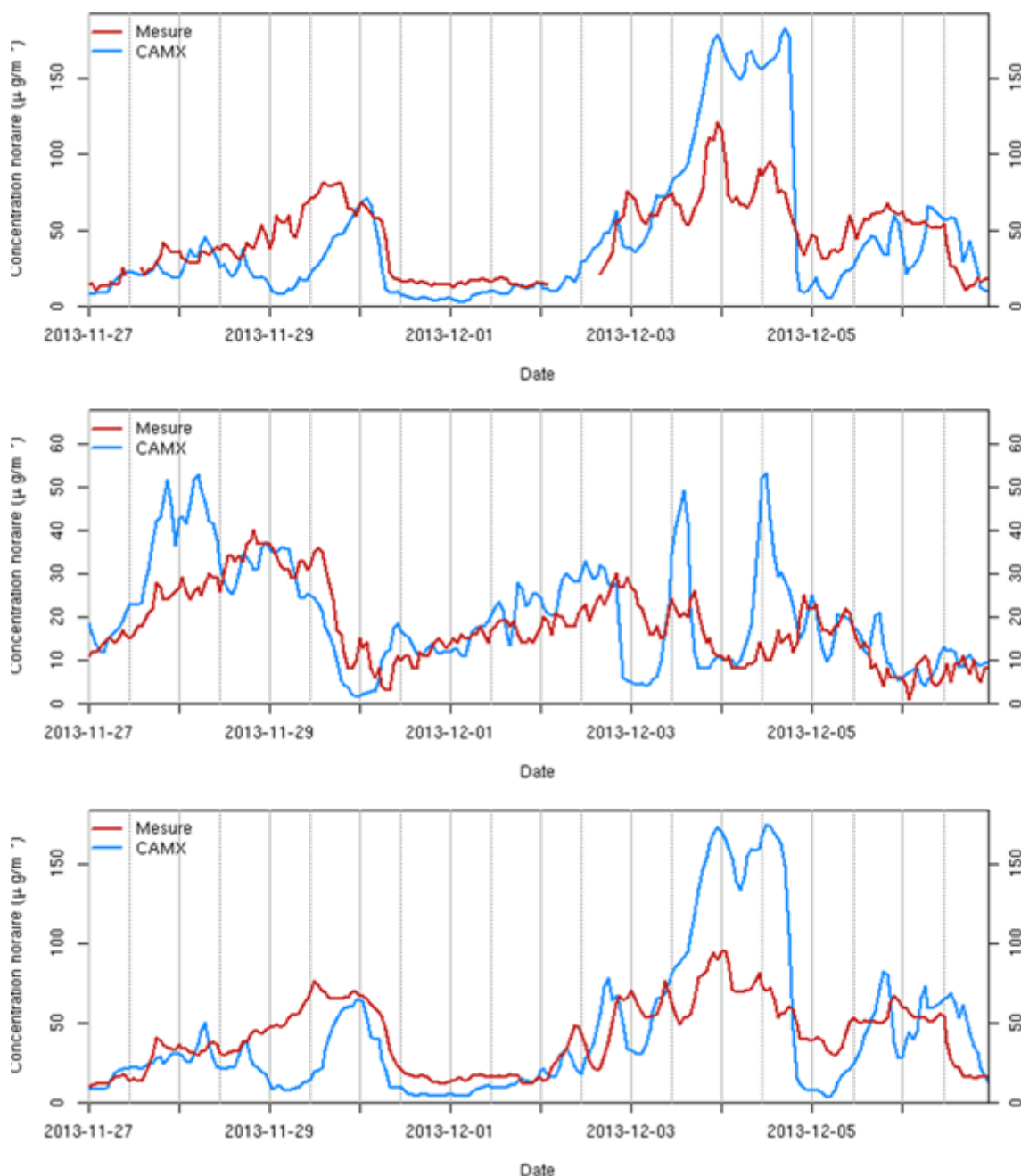


Figure 3.1.2.2.3.1-1 : Evolution temporelle horaire de la concentration en PM10 aux stations des mesures : Lyon Centre (haut) – Drôme rural Sud (milieu) et Côtière de l'Ain (bas) pour la période 27/11/2013 – 07/12/2013. Comparaison entre les mesures (en rouge) et les résultats du modèle CAMx (en bleu).

3.1.2.2.3.2 Evaluation statistique du modèle CAMx

Les études d'évaluation et de validation des modèles de dispersion atmosphérique sont assez nombreuses dans la littérature. Cependant, elles sont fondées sur les mêmes critères statistiques présentés par Chang and Hanna (2004) [25]. Ces variables se partagent généralement en

²⁵ Chang, J.C., Hanna, S.R., 2004. Air quality model performance evaluation. Meteorol. Atmospheric Phys. 87, 167–196. doi:10.1007/s00703-003-0070-7

deux catégories : des erreurs systématiques, qui impliquent que le modèle aura une tendance globale à surestimer ou à sous-estimer la réalité. Cela se traduit par la différence de pente entre la droite de régression et l'axe X=Y. Et les erreurs dites "locales", qui correspondent aux écarts des prédictions individuelles par rapport au comportement moyen du modèle. Cette erreur se traduit par un étalement du nuage de points par la droite de régression. Les autres principaux paramètres statistiques utilisés pour la validation de ces fonctions sont :

- Le biais fractionnel FB qui quantifie l'erreur systématique

$$FB = \frac{\overline{C_p} - \overline{C_m}}{\frac{1}{2}(\overline{C_p} + \overline{C_m})}$$

- L'erreur quadratique moyenne normalisée NMSE. Ce critère quantifie l'erreur locale.

$$NMSE = \frac{(\overline{C_p} - \overline{C_m})^2}{\overline{C_p} \overline{C_m}}$$

- Le biais géométrique moyen MG : lorsque les valeurs mesurées et simulées s'étendent sur plusieurs ordres de grandeur, les paramètres FB et NMSE dépendent davantage des valeurs élevées que des valeurs faibles. Pour compenser cet effet, il peut être intéressant d'utiliser des paramètres basés sur le logarithme des valeurs. Le biais géométrique moyen quantifie de cette manière l'erreur systématique du modèle.

$$MG = \exp\left[\ln(\overline{C_p}) - \ln(\overline{C_m})\right]$$

- La variance géométrique quadratique moyenne VG : elle permet de quantifier l'erreur locale pour des données dont les ordres de grandeur sont très différents.

$$VG = \exp\left[\frac{(\ln(\overline{C_p}) - \ln(\overline{C_m}))^2}{2}\right]$$

- La "fraction dans un facteur de 2" : fraction FAC2 des données telles que $0.5 \leq C_{mes}/C_{mod} \leq 2$. Ce paramètre indique la capacité du modèle à ne pas dépasser une erreur limite.
- La "fraction dans un facteur de 10" : fraction FAC10 des données telles que $0.1 \leq C_{mes}/C_{mod} \leq 10$

Selon les valeurs de références proposées par Chang et Hanna (2004)^[26] pour l'évaluation de la qualité des modèles de dispersion atmosphérique, les résultats de CAMx sont considérés comme assez satisfaisants voir même bons pour les concentrations horaires (Table 3.1.2.2.3.2-1) car les valeurs de nos indicateurs sont toutes dans la marge acceptable et même proche des valeurs idéales. Le calcul de ces critères statistiques (Table 3.1.2.2.3.2-1) a été fondé sur les résultats dans tous les sites de mesures (voir liste annexe A).

²⁶ Chang, J.C., Hanna, S.R., 2004. Air quality model performance evaluation. Meteorol. Atmospheric Phys. 87, 167–196. doi:10.1007/s00703-003-0070-7

Table 3.1.2.2.3.2-1 : Evaluation des paramètres statistiques pour les différentes périodes de simulation : (Calculs fondés sur les résultats dans toutes les stations).

Episodes	Polluants	AFB	NMSE	FAC2	FAC10	VG	MG
27/11/13 07/12/13	PM10	0.23	0.5	0.67	0.96	1.63	0.98
Acceptable – modèle considéré « bon »		AFB ≤ 0.3	NMSE ≤ 1.5	0.5 ≤ FAC2	0.9 ≤ FAC10	VG ≤ 4	0.7 ≤ MG MG ≤ 1.3
Idéal - parfait		0	0	1	1	1	1

3.1.2.2.3.3 Evolution journalière des concentrations

Après avoir comparé les résultats de modèle par des mesures de concentrations horaires effectuées sur plusieurs stations de la région Rhône-Alpes (voir Annexe A), nous évaluons dans cette partie sa capacité à reproduire les concentrations journalières, en comparant ses résultats numériques avec les mesures journalières de PM10 dans les mêmes stations de mesure. Nous présentons sur la figure 3.1.2.2.3.3-1, les comparaisons des signaux journaliers de concentrations simulés numériquement par CAMx et ceux mesurés sur les 3 mêmes stations que celles choisies précédemment (Lyon Centre, Drôme rural Sud et Côtière de l'Ain).

Pour confirmer ces résultats, nous avons poursuivi cette comparaison en réalisant la même comparaison sur d'autres stations de mesures de la région. On obtient les évolutions présentées dans les Annexes B pour les différents sites de prélèvement. Il est important de noter que la méthode de mesure des PM10 n'est pas toujours la même (Gravimétrie, TEOM-FDMS,...). Les stations sont bien réparties spatialement et elles sont représentatives de différents niveaux d'exposition (milieux urbains, vallées montagneuses, et milieux périurbains).

Les figures des Annexes B montrent que le modèle reproduit correctement les concentrations journalières à différents endroits de la région Rhône-Alpes. On remarque que les comparaisons en moyenne journalière reflètent mieux les tendances générales de la modélisation que les comparaisons horaires illustrées précédemment sur la figure 3.1.2.2.3.1-1. Les comparaisons des résultats de CAMx sur d'autres sites de prélèvement (Annexes B) nous permettent de confirmer sa fiabilité et sa capacité à bien reproduire les concentrations journalières des particules fines PM10.

Ces comparaisons indiquent un très bon accord entre notre modèle et les différentes données expérimentales. Cela indique que le modèle représente correctement l'ensemble des processus physiques de transport et de diffusion sur un pas de temps journalier. Néanmoins, nous observons parfois une surestimation significative des mesures pendant la journée 4/12/2013 sur certains sites de mesure.

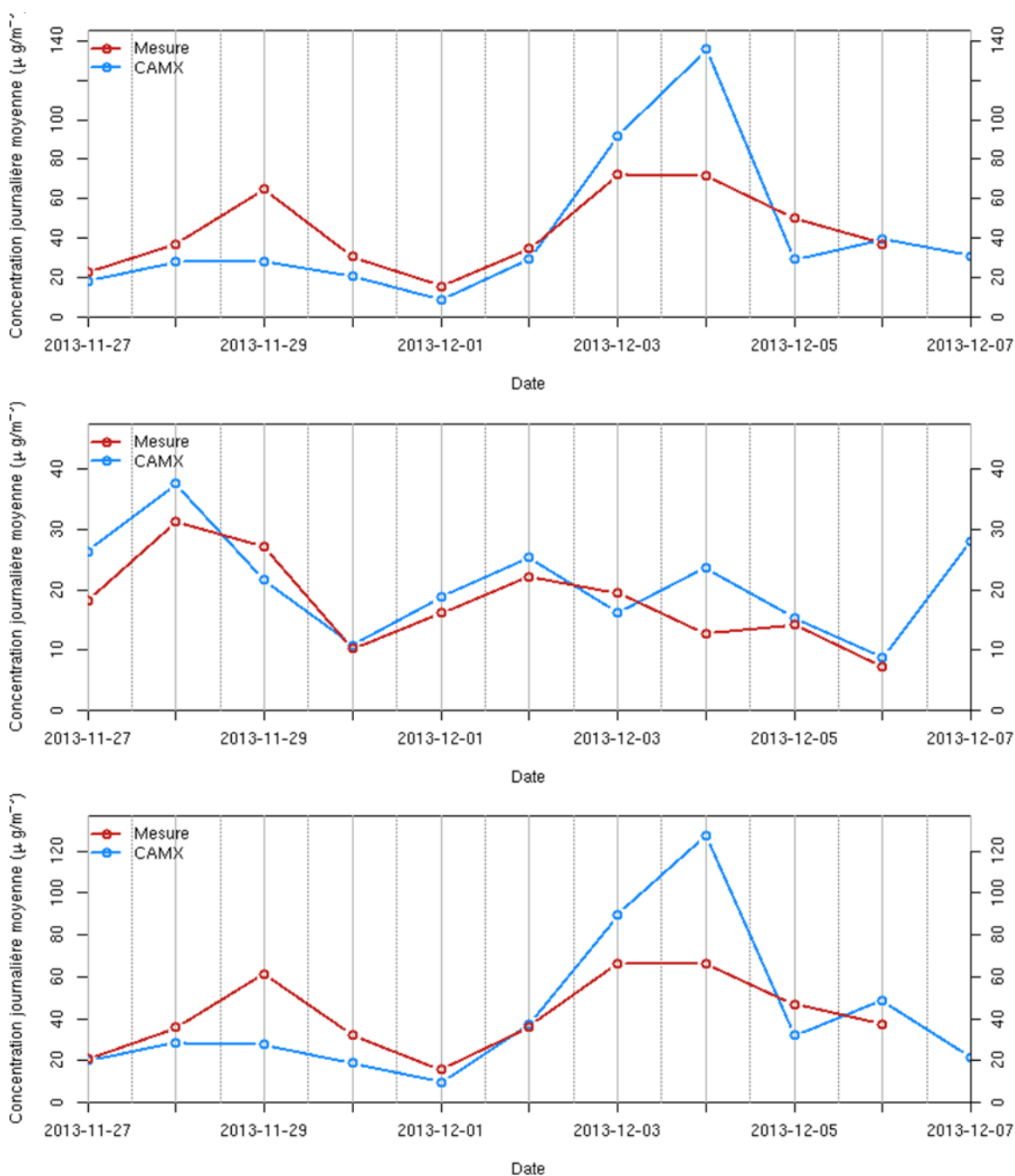


Figure 3.1.2.2.3.3-1 : Evolution temporelle journalière de la concentration en PM10 aux stations des mesures : Lyon Centre (haut) – Drôme rural Sud (milieu) et Côtière de l'Ain (bas) pour la période 27/11/2013 – 07/12/2013. Comparaison entre les mesures (en rouge) et les résultats du modèle CAMx (en bleu).

3.1.2.3 Etude des performances de calculs de CAMx

L'objectif de cette partie est d'étudier les performances de notre outil (CAMx) sur différents clusters de calcul parallèle. Cela nous permet à la fois d'optimiser le coût de calcul et d'étudier la possibilité d'utiliser cet outil pour des applications en temps réel. Pour ce faire, nous avons profilé les « benchmarks » pour chaque serveur de calcul. Notre « benchmark » désigne la mesure des performances de notre modèle numérique CAMx pour exécuter une série des tâches. Dans cette SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

étude, nous mesurerons le temps total d'exécution de CAMx pour simuler une seule heure sur la région Rhône-Alpes. Ce temps dépend des caractéristiques des processeurs, du langage de programmation du modèle CAMx, du compilateur et du programme lui-même.

3.1.2.3.1 Machines de calcul utilisées

3.1.2.3.1.1 Serveur de calcul d'Air Rhône-Alpes (machine interne)

Ce serveur (Figure 3.1.2.3.1.1-1) est construit sur une architecture Xeon. Il possède 28 processeurs de type Xeon E5-2697 v3 @2.6GHz 14C (56 cœurs) et 128 Go de mémoire.



Figure 3.1.2.3.1.1-1: Machine locale d'Air Rhône-Alpes.

3.1.2.3.1.2 Supercalculateur « CRIANN » (cluster externe)

« Le CRIANN (Figure 3.1.2.3.1.2-1) et le Centre de Données Régional sont situés sur la commune de Saint-Étienne du Rouvray, au sud de l'agglomération rouennaise. Ces organismes proposent aux utilisateurs l'accès à deux ressources de calcul distinctes. La principale est un super-calculateur nommé 'Antares' de type grappe x86-64, de la gamme IBM iDataPlex. Sa mise en production a commencé en fin d'année 2010, et elle comporte actuellement 328 serveurs (3048 cœurs) de calcul, auxquels s'ajoutent 51 serveurs (624 cœurs) appartenant à l'Ecole Centrale de Nantes. Un serveur Power, 'Atlas', composé uniquement de 4 processeurs octo-cœurs est réservé pour une petite communauté d'utilisateurs. Ses processeurs sont peu nombreux mais certains codes tirent parti de son architecture spécifique »²⁷.

²⁷ <http://www.criann.fr/calcul-intensif/>



Figure 3.1.2.3.1.2-1: Supercalculateur CRIANN (Source : <http://www.criann.fr/>)

3.1.2.3.1.3 Supercalculateur « Curie » de « TGCC » (cluster externe)

« Le TGCC (Figure 3.1.2.3.1.3-1) est une nouvelle "infrastructure verte" dédiée aux calculs hautes performances, capable d'héberger des supercalculateurs d'échelle pétaflopique. Le supercalculateur Curie, appartenant à Genci et hébergé dans le TGCC du CEA (commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), est la première machine (Tier0) ouverte aux scientifiques européens dans le cadre de la participation française aux infrastructures de recherche PRACE. CURIE propose 3 différents types de ressources de calcul basées sur une architecture x86-64, s'adressant à un large panel de challenges scientifiques, et offrant une puissance de calcul crête globale de 2Pflops »²⁸.

²⁸ <http://www-hpc.cea.fr/fr/complexe/tgcc-curie.htm>

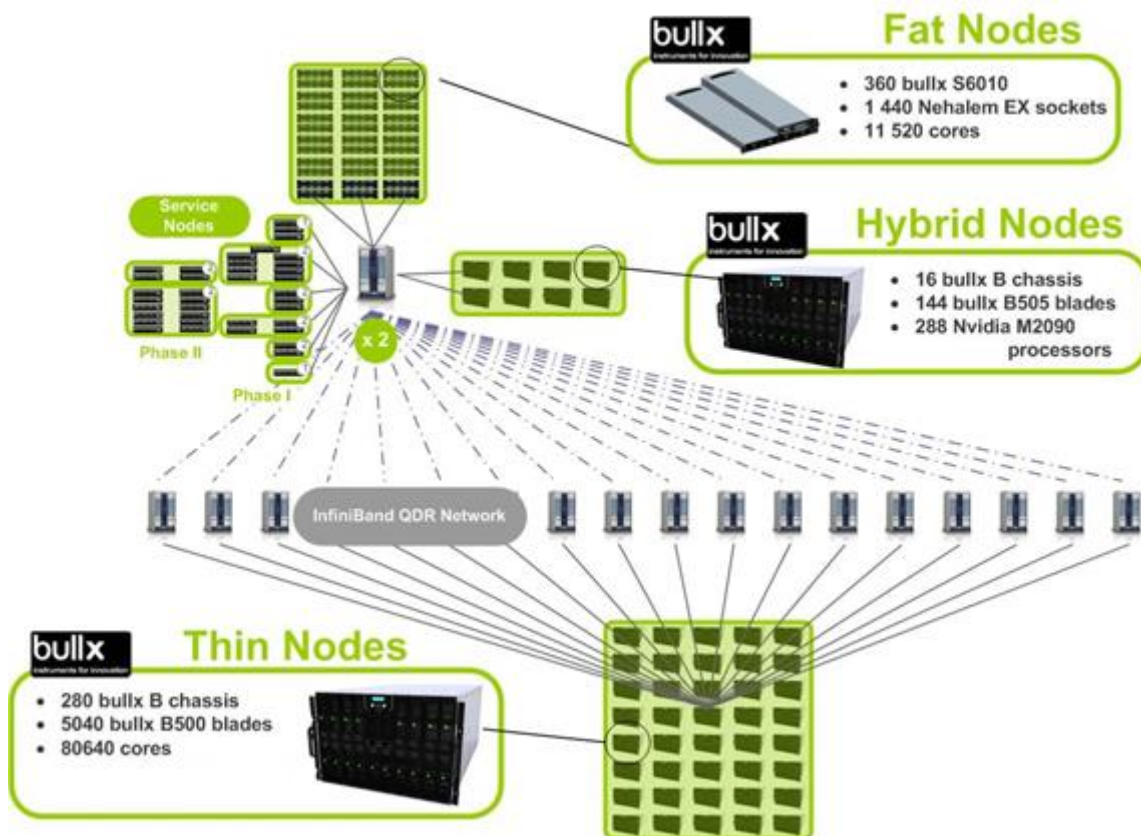


Figure 3.1.2.3.1-1: Schéma de principe de Curie Phases 1 et 2. (Source : <http://www-hpc.cea.fr/fr/complexe/tgcc-curie.htm>)

3.1.2.3.2 Résultats de performance

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats les plus significatifs que nous avons obtenus par cette étude de performance. Nous illustrons sur la figure 3.1.2.3.2-1 la variation de temps total d'exécution du modèle en fonction du nombre de cœurs utilisés sur chaque machine de calcul. Nous remarquons que les courbes d'évolution de ce paramètre se caractérisent par deux phases différentes.

Comme prévu, dans la 1^{ère} phase (entourée par un rectangle) le temps total d'exécution diminue quand le nombre de cœurs utilisés augmente sur les trois machines. Mais observant les différentes courbes, nous constatons qu'il y a une deuxième phase qui commence à partir d'un point « critique » à partir duquel la tendance de cette courbe change. Par exemple, nous observons que l'évolution du temps total d'exécution devient quasi-stationnaire sur les supercalculateurs (CRIANN et TGCC) à partir de respectivement 30 et 50 cœurs et devient croissant sur la machine locale d'Air Rhône-Alpes à partir de 20 cœurs. Cette croissance peut être liée à la limitation des ressources sur ce nœud de calcul. En effet, sur les supercalculateurs une mémoire dédiée est utilisée alors que sur la machine d'Air Rhône-Alpes il s'agit d'une mémoire partagée (128Go/30~4Go). Cela confirme que la simulation effectuée dans le cadre de ce projet nécessite au moins 4Go par cœur.

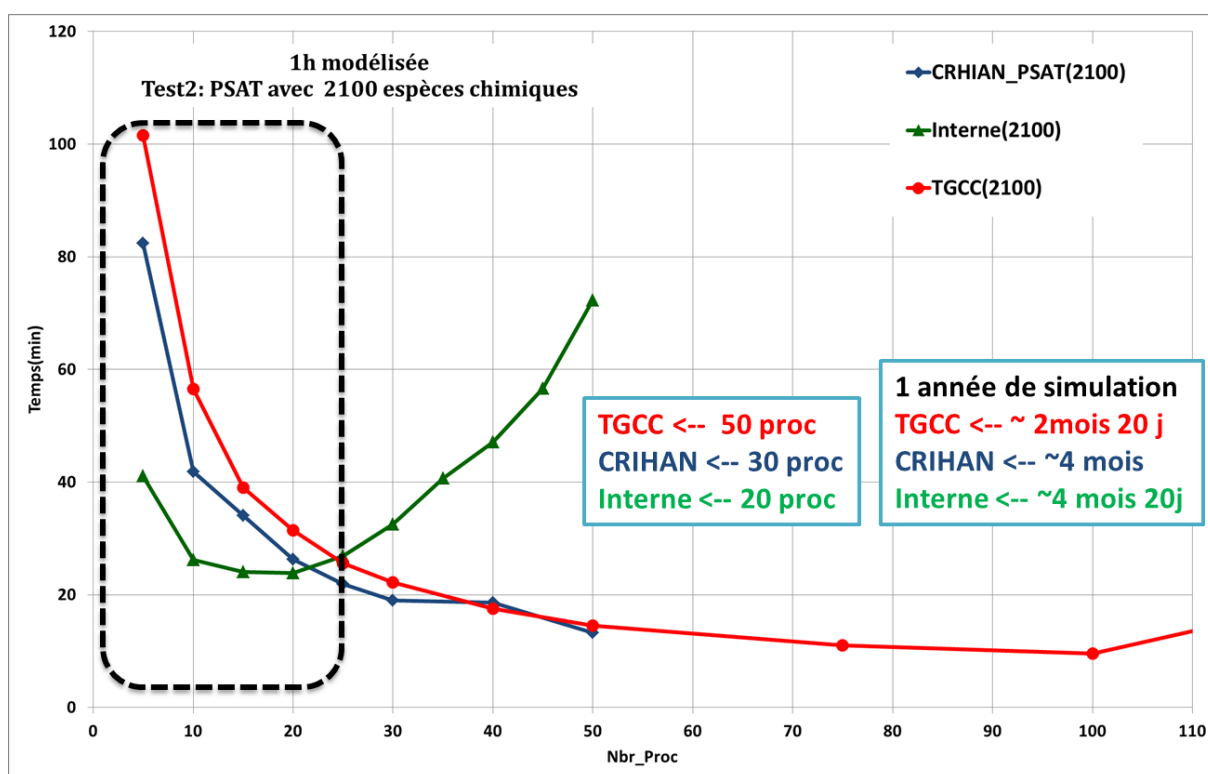


Figure 3.1.2.3.2-1: Evolution du temps total d'exécution en fonction du nombre de cœurs utilisés.

Pour bien étudier ce comportement étrange, nous traçons cette fois sur la figure 3.1.2.3.2-1, la variation de l'accélération en fonction du nombre de processeurs.

$$A(p) = \frac{T(\text{simulation en seq.})}{T(\text{simulation en } p \text{ proc.})}$$

L'accélération est définie par le gain de temps obtenu lors de la parallélisation du programme séquentiel. Elle nous permet de focaliser notre étude sur le gain de temps apporté par l'allocation et l'utilisation de chaque cœur supplémentaire. La droite (X=Y) en noir sur la Figure 10 correspond à une accélération parfaite c'est-à-dire le gain de temps égal au nombre des cœurs alloués (le rendement des processeurs est à 100%). Mais malheureusement, cette figure montre que nos accélérations sur toutes les machines sont au-dessous de cette droite linéaire. Nous avons donc un taux d'activité des processeurs inférieurs à 100%. Cela peut être expliqué par un coût de communication très élevé entre les différents processeurs utilisés dans le calcul.

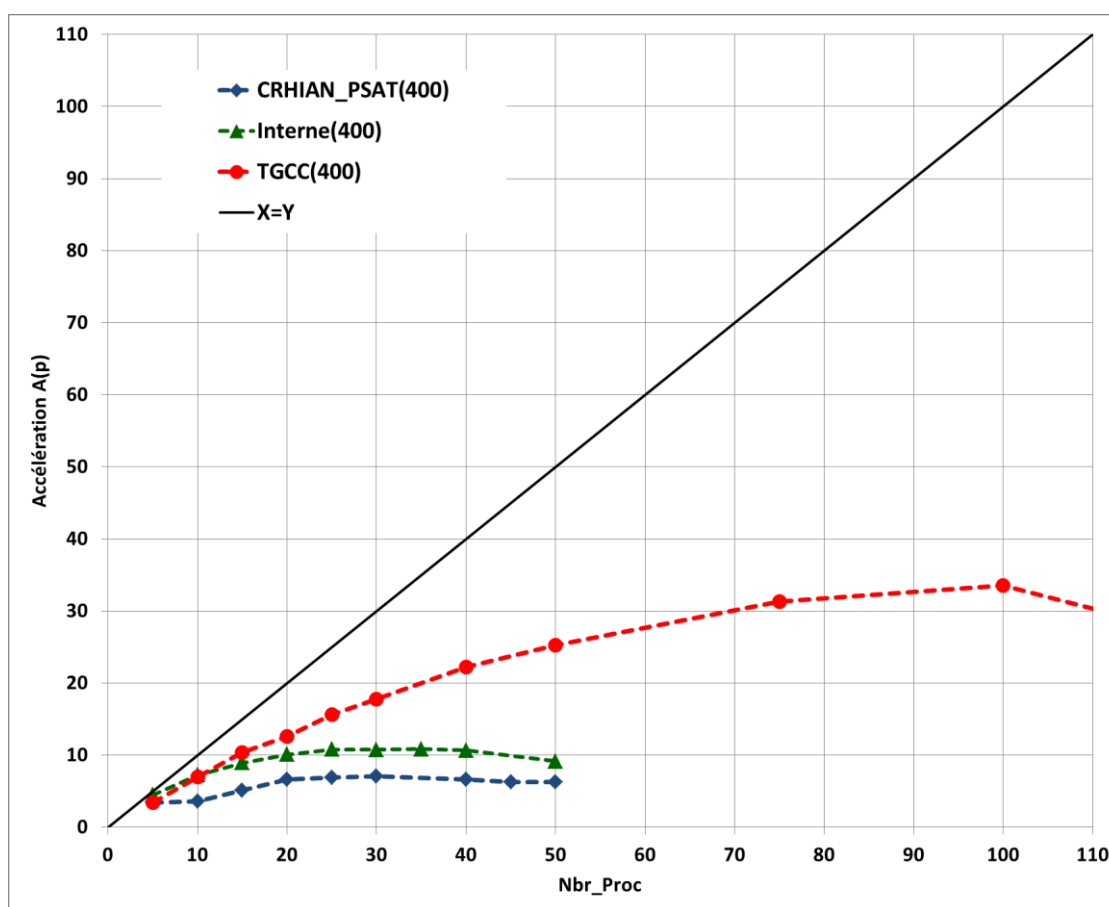


Figure 3.1.2.3.2-2: Evolution de l'accélération en fonction du nombre de processeurs utilisés.

3.1.2.4 Le cas test pour FARM au Piémont et dans la Vallée d'Aoste

Les systèmes de modélisation basés sur FARM ont été mis en place depuis quelques années au sein de l'ARPA du Piémont et de l'ARPA de la Vallée d'Aoste. Ces systèmes sont opérationnels à la fois dans le mode « prévisions » et dans le mode « diagnostique » à court et long terme (analyse du jour précédent ou simulations annuelles) mais sont configurés pour être alimentés avec des données d'entrée et utiliser des domaines de calcul différents de ceux prévus dans le projet SH'AIR. Ainsi, dans le cadre des activités de projet, les configurations et les procédures de calcul et de traitement des données nécessaires qui intègrent les systèmes existant en permettant leur fonctionnement avec de nouvelles données à disposition ont été développées et testées. Le module d'interface entre WRF et FARM a, en tout premier lieu, été développé. Le module se compose de quatre parties : une procédure « ncl » (NCAR Command Language) qui traite les données brutes de WRF en produisant les variables météo standards, une procédure python qui reformate les fichiers netCDF cités dans le paragraphe précédent pour les rendre compatibles avec les modules suivants d'interpolation et de turbulence (modèle SurfPRO). Le modèle SurfPRO fait partie (tout comme le module d'interpolation) du système de modélisation habituel de FARM et procède au calcul des paramètres des nuages, des paramètres de turbulence, des vitesses de déposition, des coefficients de diffusivité, en plus d'intégrer le modèle MEGAN pour les émissions biogéniques. En ce qui concerne le calcul des paramètres de turbulence et des coefficients de diffusivité, l'utilisation de

l'approche diagnostique, testée et validée dans de nombreuses applications, a été préférée plutôt que les champs turbulents produits directement par WRF. Le module a par ailleurs été adapté pour les conditions limites. Dans les versions mises en œuvre sur le plan opérationnel, FARM utilise déjà les champs produits sur une échelle continentale par le modèle CHIMERE et distribués par Prev'Air, mais avec un format différent de ceux mis à disposition dans le projet.

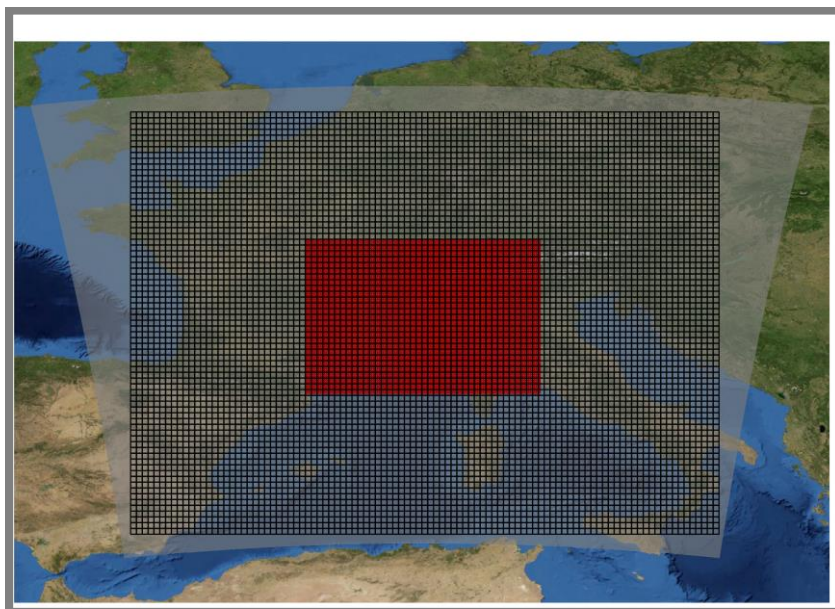


Figure 3.1.2.4-1 : Domaines de simulation de FARM (en noir, domaine continental avec résolution 0.2°, en rouge celui d'ALCOTRA avec résolution 0.065°) avec, en gris, les domaines des données externes WRF utilisées dans le projet.

Le système a été appliqué, selon la modalité *two-way nesting* aux domaines de simulation illustrés sur la Figure 3.1.2.4-1 : il s'agit des domaines définis dans le projet, un premier domaine à l'échelle continentale et un second sur le territoire ALCOTRA, mais adaptés à la projection géographique (EPSG 4326) supportée par FARM. Les résolutions sont respectivement 0.2° pour le domaine continental et 0.065° pour celui d'ALCOTRA (correspondant à environ 18 kilomètres pour la première et environ 6 kilomètres pour la seconde). Toutes les données territoriales en entrée au module SurfPRO et au module des émissions EMMA proviennent du CORINE LAND COVER 2006 intégrées avec des informations sur le territoire suisse (ESA Regional GLOBCOVER), dûment élaborées sur les domaines de calcul.

En aval de la préparation ou mise à jour des modules et des procédures, le système a été testé sur la période hivernale concernée par le projet (20 novembre 2013-20 décembre 2013) en utilisant, dans la mesure du possible, les configurations et les paramétrages physico-chimiques opérationnellement adoptés par les partenaires italiens.

Pour la chimie en phase gazeuse, une version mise à jour du schéma SAPRC-99 (Carter et al, 2000) a été utilisée qui inclut également les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) et le mercure ; la chimie du mercure est dérivée du schéma adopté dans CAMx (Yarwood et al., 2003). Les aérosols sont représentés avec un module appelé AERO3 dérivé de celui mis en œuvre dans le modèle

CMAQ (Community Multiscale Air Quality, Binkowski et al., 1999), mis à jour pour prendre en considération les processus d'adsorption/absorption des HAP ; AERO3 utilise une approche modale, les aérosols sont représentés comme une superposition de trois différentes distributions log-normales (mode Aitken, mode accumulation et mode grossier), il tient compte des processus dynamiques de nucléation, condensation et coagulation, et du transfert de masse gaz/aérosol (ISORROPIA -Fountoukis et al, 2007 - pour les composants inorganiques et Schell et al., 2001 pour les composants organiques). La fonction de Rosenbrock (Sandu et al. 2003) a été utilisée comme solveur des équations différentielles décrivant les mécanismes chimiques alors que l'advection-diffusion horizontale est résolue avec un schéma aux éléments finis (Yamartino, 1993), la diffusion verticale avec un schéma Crank-Nicholson semi-implicite (Yamartino et al., 1992). En ce qui concerne les taux de photolyses, contrairement à ce qui se produit sur le plan opérationnel, le module TUV n'a pas été utilisé, pour des problèmes de stabilité numérique, mais des tables de correspondance (*look-up tables*) dans lesquelles les photolyses sont calculées avec des formules empiriques selon l'angle local du zénith.

Dans le cas test, les configurations sur les systèmes HPC de CINECA ont été également définies : les simulations (à la fois celles du test, celles du cas de base et les simulations de sensibilité) ont été réalisées selon une modalité hybride avec 16 processeurs pour la parallélisation OpenMP et 48 processeurs pour la parallélisation MPI. Les résultats du cas test ont été comparés avec les simulations effectuées de manière opérationnelle dans le Piémont pour l'année 2013, avec une résolution horizontale de quatre kilomètres, en utilisant une météorologie diagnostique produite avec le modèle de type "mass-consistent" MINERVE.

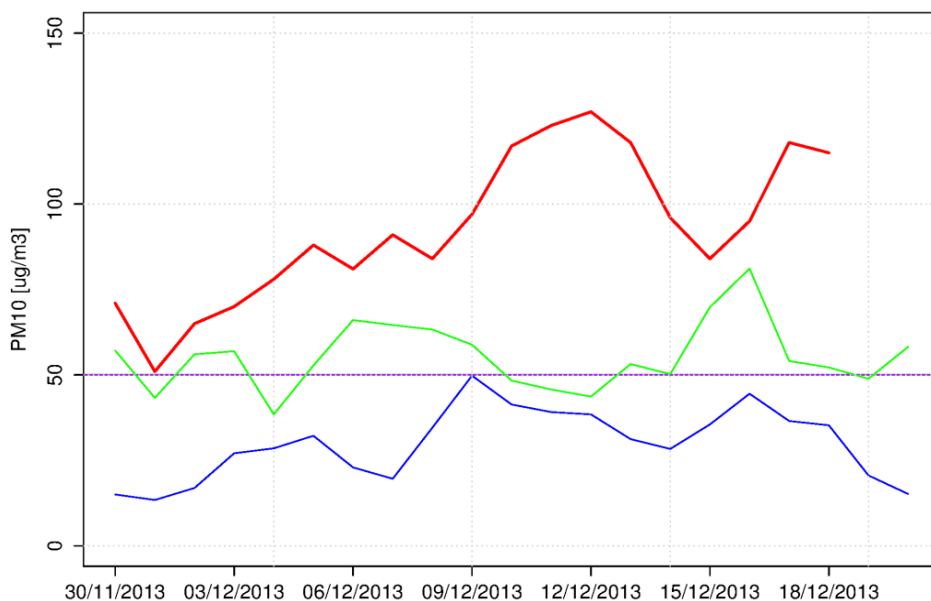


Figure 3.1.2.4-2 : Comparaison entre les évolutions de PM10 observé (en rouge), simulées avec FARM dans le test pour le projet SHAIR (en bleu) et simulées avec FARM dans la version opérationnelle de l'ARPA Piémont (en vert) sur la station de Turin Lingotto pour la période 30/11-20/12/2013

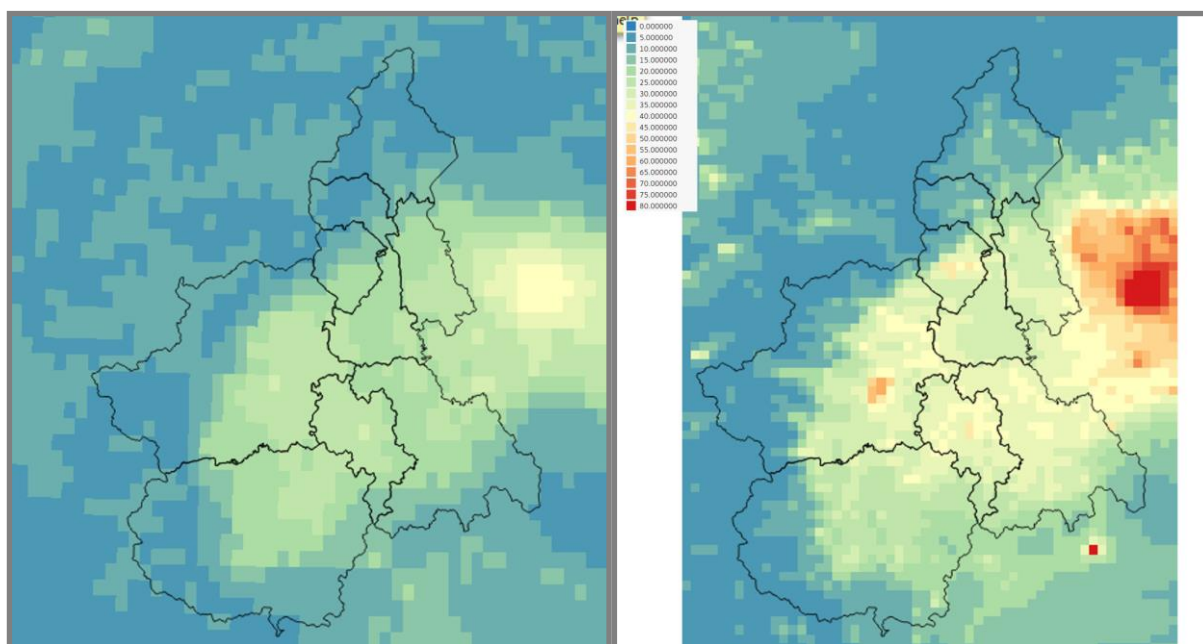


Figure 3.1.2.4-3 : Champ de concentration moyenne de PM10 pour la période hivernale simulée avec FARM dans le cas test pour le projet SHAIR (à gauche) et simulée avec FARM dans la version opérationnelle de l'ARPA Piémont (à droite).

Les résultats obtenus sont cohérents, l'accord entre les distributions spatiales des concentrations est satisfaisant, toutefois les simulations produites dans le cadre du projet SH'AIR s'avèrent largement sous-estimées, notamment pour les PM10. Ce comportement peut vraisemblablement être imputé à trois facteurs :

- la résolution différente : six kilomètres ne semblent pas suffisants pour décrire correctement un territoire comme le Piémont dont la morphologie est complexe (à plus forte raison la Vallée d'Aoste) ;
- les données météorologiques d'un modèle pronostic comme WRF (voir le chapitre concerné) surestiment notablement la vitesse du vent au sol par rapport à un modèle de type "mass-consistent" comme MINERVE et entraînent par conséquent une plus grande dispersion ;
- différences au niveau des données d'inventaire des émissions : dans les simulations opérationnelles, l'inventaire régional mis à jour en 2007 a été utilisé pour le macro secteur trafic sur route.

En plus du système de modélisation, il a également été nécessaire de tester le comportement du module *source apportement* BFM. Les tests ont été réalisés en deux phases : la première dans les activités de mise en œuvre et de développement du code, en accord avec ARIANET, la seconde après l'essai et la mise en œuvre opérationnelle du système. Les deux tests, notamment le second effectué sur le territoire de la Vallée d'Aoste à la résolution d'un kilomètre pendant la durée d'un an de simulation, ont permis à la fois de vérifier le bon fonctionnement du module, et de préparer SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

toutes les procédures de post-traitement des résultats et ultérieurement utilisées dans le projet. Les Figures 3.1.2.4-4 et 3.1.2.4-5 ci-après illustrent des exemples de résultats sur la Vallée d'Aoste.

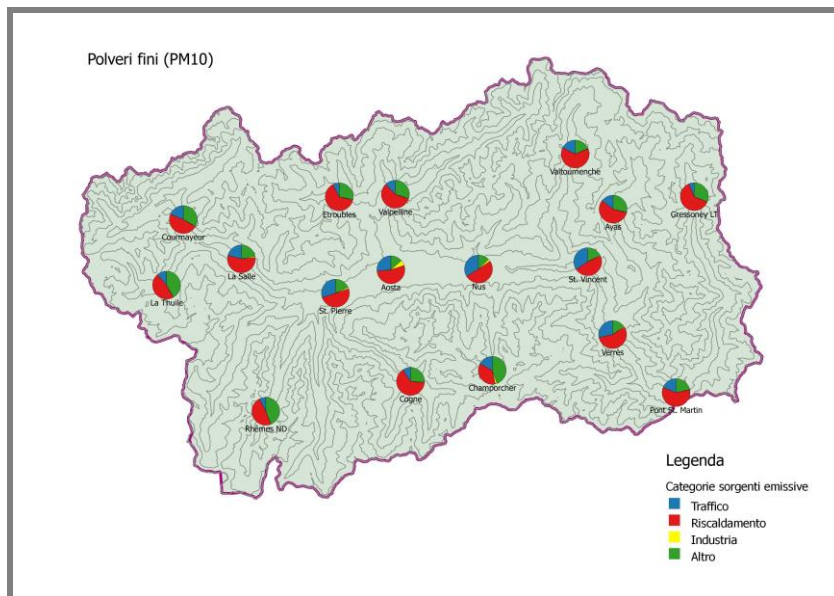


Figure 3.1.2.4-4 : Résultat du source apportement avec BFM pour le cas test appliqué à la Vallée d'Aoste. Contributions en pourcentage sur chaque récepteur pour le PM10.

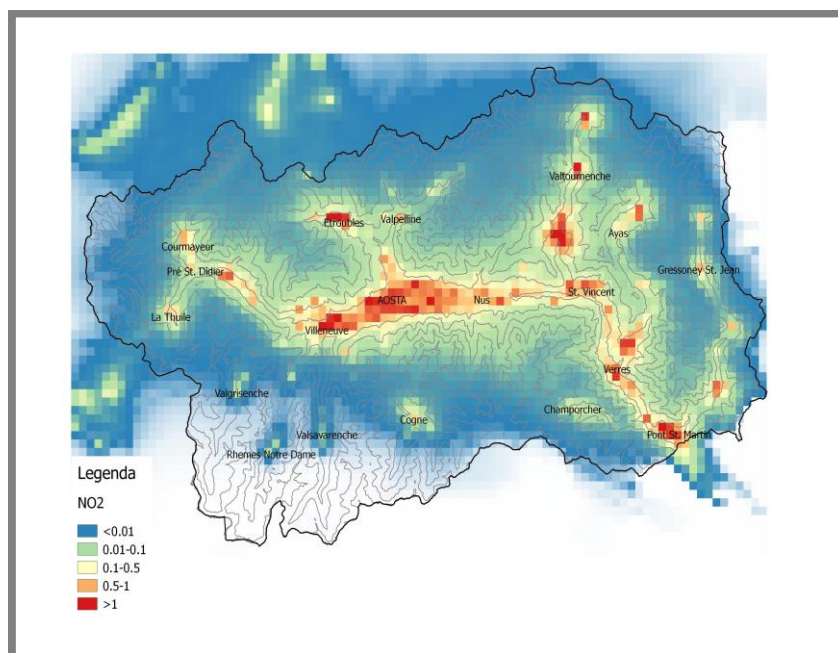


Figure 3.1.2.4-5 : Résultats du source apportement avec BFM pour le cas test appliqué à la Vallée d'Aoste. Cartographie de la contribution en pourcentage du secteur de chauffage domestique sur la moyenne annuelle du dioxyde d'azote.

3.1.3 Synthèse de l'action

Dans le cadre de l'action 3.1, deux systèmes de calculs numériques complets ont été développés pour estimer les concentrations en particules et les contributions des sources d'émissions sur les régions PACA, Piémont, Rhône-Alpes et Vallée d'Aoste. Ces systèmes intègrent l'ensemble des étapes nécessaires à la réalisation de ces calculs, de la préparation des données d'entrée à la mise en forme des sorties de calculs pour permettre leur exploitation.

Les partenaires français ont orienté leur choix vers le modèle « open-source » CAMx, développé par Ramboll-Environ. Ce modèle intègre un module spécifique de calcul des contributions des sources sur les concentrations en particules, nommé PSAT (PM Source Apportionment Technology). Il utilise des traceurs réactifs associés à chacune des sources de pollution. Ces traceurs permettent de suivre les particules primaires, les précurseurs gazeux de particules et les particules secondaires formées par réactions chimiques tout au long des simulations. Cette méthode de calcul permet une stricte conservation de la masse entre les concentrations totales et les contributions.

Dans le cadre du projet SH'AIR, le système de calculs basé sur le modèle CAMx a été déployé par les deux partenaires français sur leur région respective. Son fonctionnement technique a ensuite été évalué dans le cadre de la réalisation de deux cas tests. Les résultats obtenus ont permis de s'assurer de la cohérence des différentes étapes de la chaîne de calculs développée.

Les partenaires italiens ont quant à eux orienté leur choix vers le modèle FARM, développé par ARIANET. Ce choix a été conditionné par l'opérationnalité de ce modèle sur le territoire italien. Dans le cadre du projet, un module spécifique d'analyse de sensibilité, basé sur l'approche BFM (Brute Force Method), a été développé. Cette méthode consiste à évaluer la contribution d'une source en analysant la réponse du modèle à la modification de son émission. Le développement réalisé a permis d'intégrer directement ce module au module de préparation des émissions ainsi qu'au code de calcul de FARM pour une gestion directe des simulations de sensibilité.

Ce système de calcul a été déployé par les partenaires italiens sur le domaine ALCOTRA. Les résultats obtenus à partir des simulations de bases et des simulations de sensibilité ont permis de valider le fonctionnement de chacun des modules composant la chaîne de calcul.

3.2. Préparation des émissions sur les 4 régions partenaires

3.2.1 Présentation des inventaires/cadastres des émissions

Les inventaires des régions Piémont et Vallée d'Aoste et les cadastres des régions PACA et Rhône-Alpes estiment pour chaque année de référence – sur la base d'indicateurs statistiques et de variables « proxy » – les quantités émises par les différentes typologies de source : **sources ponctuelles** (les installations industrielles, Figure 3.2.1-1), **les sources linéaires** (routes et autoroutes, Figure 3.2.1-2) et **sources surfaciques** (sources d'émission répandues sur le territoire). Dans le cas des sources surfaciques, les données d'émission peuvent être associées aux territoires communaux (**inventaires**) ou aux mailles d'une grille régulière (**cadastre**), comme illustré sur la Figure 3.2.1-3.

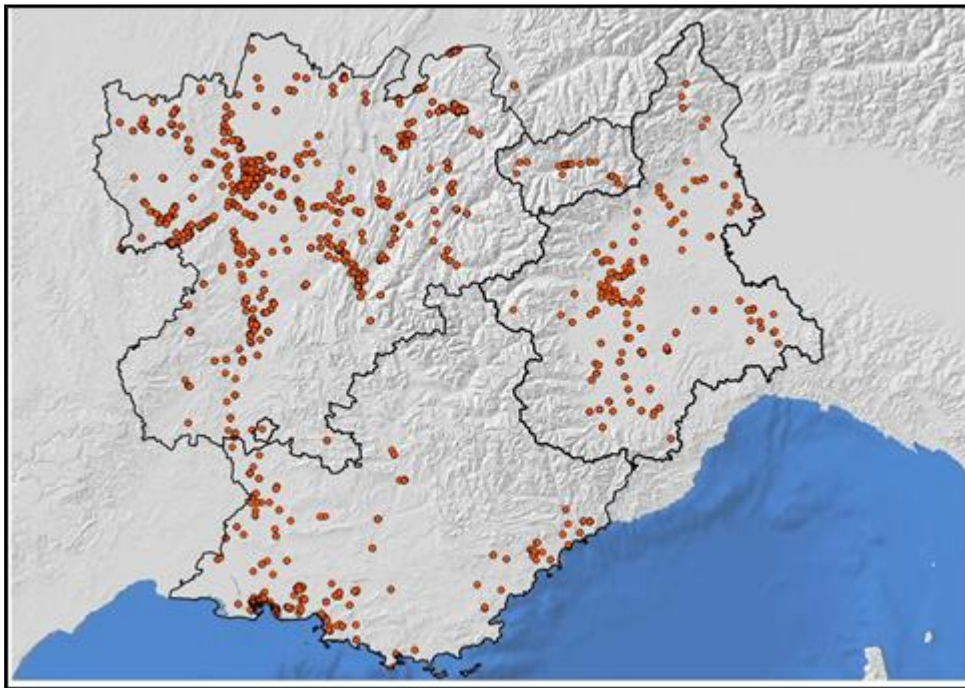


Figure 3.2.1-1 : Sources ponctuelles sur le territoire ALCOTRA

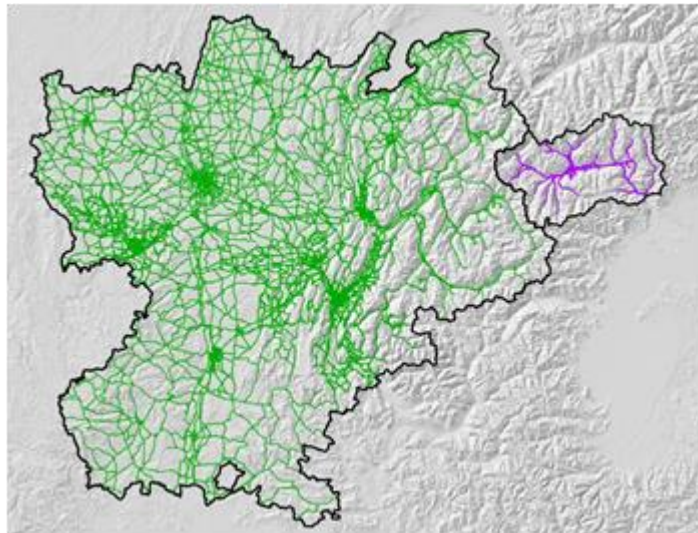


Figure 3.2.1-2 : Sources linéaires sur les régions Rhône-Alpes et Vallée d'Aoste

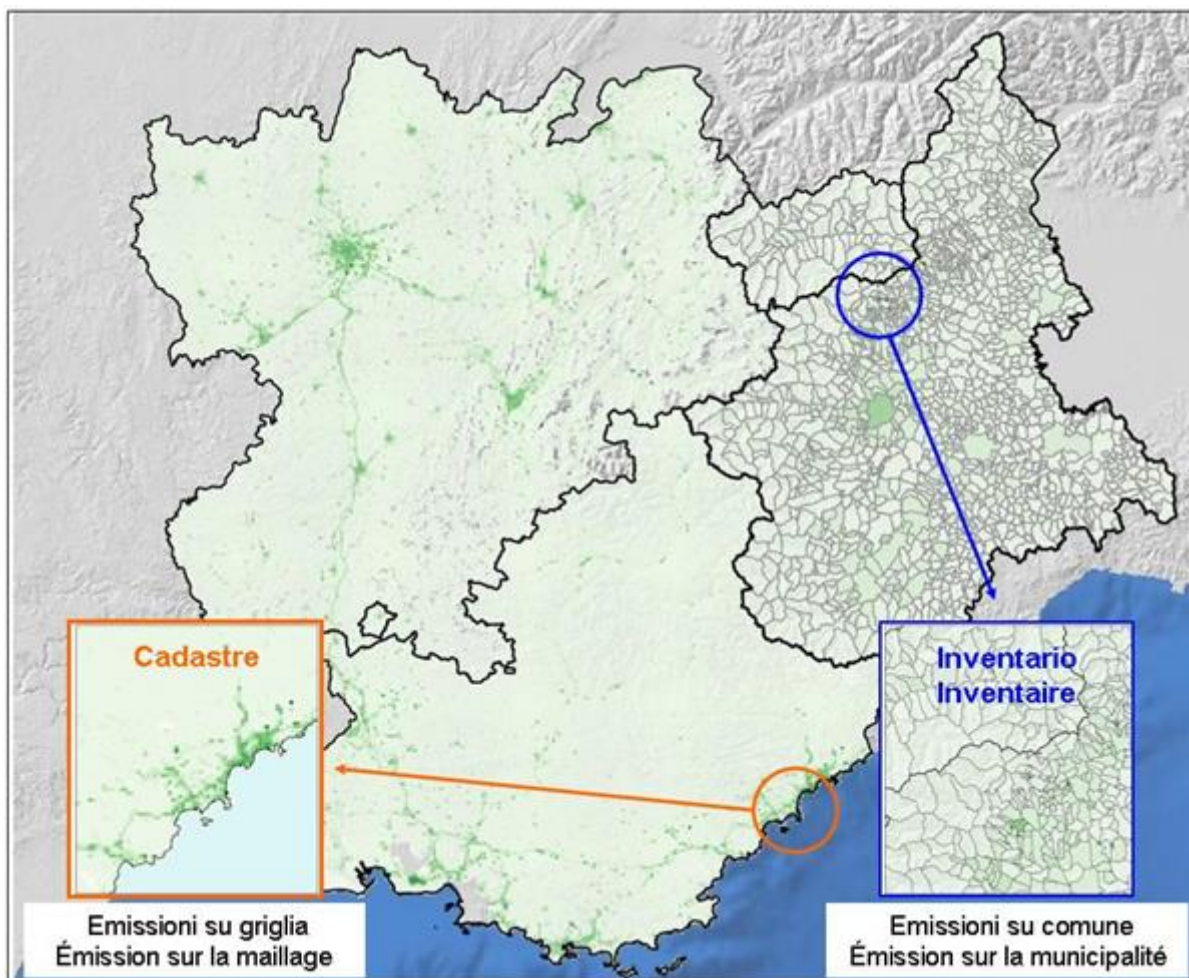


Figure 3.2.1-3 : Sources surfaciques sur le territoire ALCOTRA

Les données d'émission se référant aux différentes activités anthropiques et naturelles – à la fois dans le cas des inventaires régionaux et dans le cas des cadastres – sont classifiées avec un code à SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

trois chiffres (macro-secteur, secteur et activité) selon la **nomenclature SNAP** (*Selected Nomenclature for Air Pollution*), comme prévu par la méthodologie EMEP-CORINAIR adoptée au niveau européen. Les macro-secteurs sont les suivants :

- Macro-secteur 1 : Combustion – Energie et industrie de transformation
- Macro-secteur 2 : Combustion - Non industrielle
- Macro-secteur 3 : Combustion - Industrie
- Macro-secteur 4 : Processus de production
- Macro-secteur 5 : Extraction, distribution de combustibles fossiles/géothermiques
- Macro-secteur 6 : Utilisation de solvants
- Macro-secteur 7 : Transports routiers
- Macro-secteur 8 : Autres sources mobiles
- Macro-secteur 9 : Traitement et élimination des déchets
- Macro-secteur 10 : Agriculture
- Macro-secteur 11 : Autres sources d'émission et absorptions

En plus des trois niveaux de classification SNAP, les inventaires/cadastres fournissent également l'information détaillée concernant le combustible associé aux différentes activités d'émission, conformément à la **nomenclature NAPFUE** (*Nomenclature for Air Pollution Fuel*).

Chaque partenaire a mis à disposition la dernière version mise à jour de ses propres données d'émission sous différents formats :

- **Piémont** : Inventaire régional des émissions **année 2010** lié aux **territoires communaux** dans le système de référence WGS84 UTM32N ;
- **Vallée d'Aoste** : Inventaire régional des émissions **année 2013** lié aux **territoires communaux** dans le système de référence WGS84 UTM32N ;
- **PACA** : cadastre régional **année 2010** sur **grille régulière 1 km x 1 km** dans le système de référence RGF93-Lambert93 ;
- **Rhône-Alpes** : cadastre régional **année 2013** sur **grille régulière 1 km x 1 km** dans le système de référence RGF93-Lambert93.

L'année 2013 ayant été désignée comme période d'étude pour les activités liées au projet – à la fois pour les simulations de modélisation et pour la comparaison avec les résultats analytiques du précédent projet PART'AERA – une méthodologie "d'évolution" des données d'émission a été convenue pour les partenaires qui ne disposaient pas des émissions pour cette année de référence (Arpa Piémont et Air PACA).

3.2.1.1 Calcul de l'inventaire dans la région PACA

L'inventaire régional des émissions dans l'atmosphère en Provence-Alpes-Côte d'Azur est réalisé au sein de l'observatoire régional de la qualité de l'air (Air PACA). Les méthodes de calculs sont conformes aux recommandations du guide méthodologique du Pôle de Coordination national des Inventaires Territoriaux (PCIT), qui permet de se baser sur des approches méthodologiques et des données constitutives homogènes et partagées à l'échelle nationale (Guide PCIT, 2012). L'ensemble

des activités émettrices sont recensées et sont sectorisées suivant la nomenclature SNAP 97c (Selected Nomenclature for Air Pollution) issue des travaux du projet européen CORINAIR. La nomenclature NAPFUE 94c (Nomenclature for Air Pollution of FUEls) est utilisée pour la description des combustibles.

Cet inventaire est réalisé à l'échelle communale sur la base de données d'activité et de facteurs d'émissions. Au total, 35 polluants sont pris en compte dont les particules (TSP, PM10, PM2.5), les gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O), les polluants photochimiques (SO₂, NO_x, CO, COVNM, HCl, HF, NH₃), les composés organiques cancérigènes (C₆H₆, HAP (BaP, BaA, BbF, ...)) et les métaux lourds (As, Cd, Cr, Cu, Hg, ...).

Dans le cadre du projet SH'AIR, l'inventaire a été projeté sur une grille régulière en Lambert 93 de 1x1 km puis exporté dans un format utilisable par l'outil EMMA décrit dans la partie 3.2.5.2. Les émissions étant calculées pour l'année de référence 2010, le secteur du trafic routier a été mis à jour pour 2013 à partir d'évolutions des émissions prenant en compte l'évolution du parc, et le secteur du chauffage résidentiel sur la base de de l'évolution des Degrés Jours Unifiés.

3.2.1.2 Calcul de l'inventaire en région Rhône-Alpes

Depuis près de quinze ans, Air Rhône-Alpes développe et enrichit en continu un inventaire régional des émissions atmosphériques. Développé à l'origine pour alimenter des modèles de simulation de la qualité de l'air, l'inventaire des émissions s'est peu à peu imposé comme un outil permettant de dresser un diagnostic environnemental des territoires, en mettant en avant les secteurs d'activité les plus émetteurs. Outre l'analyse de la situation actuelle, l'outil permet, sur la base d'hypothèses, de se projeter dans le futur en évaluant ce qu'induiront sur les émissions de polluants les politiques publiques de demain.

Les données mises à disposition pour le projet Sh'Air concernent l'année :

- 2013 pour CO, COVNM, NH₃, NO_x, SO₂, PM10 et PM2.5
- 2012 pour BaP et 2010 pour bkf, bbf et ip : en effet, les émissions 2013 de HAP n'étaient pas encore opérationnelles au moment de la mise en commun des inventaires d'émissions entre partenaires.

Pour des raisons de confidentialité, les émissions des sites industriels soumis au secret statistique n'ont pas été fournies à l'établissement mais ont été intégrées aux émissions surfaciques.

3.2.1.3 Calcul de l'inventaire dans la région du Piémont

L'inventaire des émissions du Piémont est réalisé avec le système INEMAR (INventario EMissioni ARia), conçu pour estimer les émissions au niveau communal des principaux micropolluants (SO₂, NO_x, COVNM, CH₄, CO, CO₂, N₂O, NH₃, PM2.5, PM10 et TSP), des fractions carbonées des particules (EC, OC), des hydrocarbures aromatiques polycycliques (BaP, BbF, BkF, IcdP, IPA-CLTRP), des métaux lourds (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) et des polluants agrégés (CO₂eq, précurseurs de l'ozone et substances acidifiantes), pour chaque activité de la classification CORINAIR et type de combustible. Les informations recueillies dans le système INEMAR sont les variables nécessaires pour l'estimation des émissions : indicateurs d'activité (consommation de combustibles, SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

consommation de peinture, quantité incinérée, et, en général, tout paramètre permettant de tracer l'activité de l'émission), facteurs d'émission, données statistiques nécessaires pour la désagrégation spatiale et temporelle des émissions.

Ne disposant pas de toutes les données d'émission relatives à l'année 2013, afin d'harmoniser le niveau de mise à jour de l'input d'émission avec celui des autres partenaires, Arpa Piémont a appliqué aux émissions relatives au macro-secteur 2 ("Combustion non industrielle") et au macro-secteur 7 ("Transports routiers") des coefficients évolutifs spécifiques pour son propre territoire : les données de réchauffement 2010 ont été "corrigées" sur la base des degrés jours relatifs à l'année 2013, alors que les données de trafic ont été actualisées à la date de l'année 2013 sur la base des tendances fournies par le modèle GAINS Italy²⁹.

3.2.1.4 Calcul de l'inventaire dans la Vallée d'Aoste

L'inventaire des émissions de la Vallée d'Aoste est né en 1998 et est mis à jour à une fréquence annuelle.

Les facteurs d'émission généralement utilisés sont ceux indiqués dans l'Atmospheric Emission Inventory Guidebook rédigé dans le cadre du projet EMEP-CORINAIR. La méthodologie de calcul varie selon le secteur d'émission :

- Sources industrielles : utilisation des valeurs d'émission tirées des autocontrôles de celles-ci ;
- Trafic routier : utilisation du logiciel "TREFIC" pour l'évaluation des émissions par tronçon de route sur la base des flux de trafic et du parc de véhicules ;
- Mise en décharge des déchets : utilisation du logiciel EPA appelé "Landgem" ;
- Pour toutes les autres typologies de sources, le calcul sur la base des facteurs d'émission est effectué.

Les polluants considérés dans l'inventaire des émissions de la Vallée d'Aoste sont :

- macro-polluants : les particules (PM₁₀, PM_{2.5}), oxydes d'azote (NO_x), monoxyde de carbone (CO), bioxyde de soufre (SO₂), composés organiques volatils non méthaniques (COVNM), benzène (C₆H₆), ammoniac (NH₃) ;
- gaz à effet nocif : dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O) ;
- micropolluants : arsenic (As), plomb (Pb), cadmium (Cd), chrome (Cr), cuivre (Cu), mercure (Hg), nickel (Ni), sélénium (Se), zinc (Zn), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

3.2.2 Harmonisation des données d'émission

Les données d'émission disponibles pour la zone de coopération transfrontalière ne sont pas toujours cohérentes : tous les partenaires adoptent la classification SNAP pour les activités d'émission et la classification NAPFUE pour les combustibles, mais avec des niveaux de détail souvent différents et avec des spécificités à caractère régional.

²⁹ GAINS ITALY (<http://gains-it.bologna.enea.it/gains/IT/index.login>)

Afin de travailler sur une base de données d'émissions commune, une harmonisation des données fournies par chaque partenaire a été décidée à la fois pour ce qui concerne les catégories SNAP (macro-secteur, secteur et activité), et pour ce qui concerne les combustibles (codes NAPFUE).

Le niveau maximum de détail a été conservé dans la subdivision des émissions – niveau d'activité pour la plupart des codes SNAP, niveau de secteur dans les cas où moins de détails sont fournis dans certaines régions partenaires – afin de différencier le plus possible les paramétrages ultérieurs de l'input de modélisation associés à chaque donnée d'émissions (profils de spéciation des PM10 et des NMVOC, voir paragraphe 3.2.5 ; profils temporels, voir paragraphe 3.2.3).

En ce qui concerne la classification NAPFUE, en l'absence d'informations liées à certaines catégories d'émission, il a été décidé d'utiliser uniquement une subdivision en deux typologies de combustible : combustible bois et combustible indifférencié.

3.2.3 Harmonisation des profils d'évolution temporelle

Les données d'émission dans les inventaires/cadastres sont fournies en tant que somme annuelle (tonnes/an) ; dans l'élaboration de l'input d'émission des modèles de dispersion, cette somme doit être fractionnée sur une base horaire, sur la base de profils de modulation temporelle (**journaliers, hebdomadaires et annuels**) spécifiques par catégorie d'émission.

Une harmonisation des profils d'évolution temporelle a été convenue afin d'uniformiser le plus possible l'input des modèles de chimie-transport. L'analyse de tous les profils d'évolution temporelle adoptés par les différents partenaires associés aux différentes activités d'émission a été effectuée en priorité ; des **profils temporels communs** (Figure 3.2.3-1) ont ensuite été identifiés – pour chaque SNAP – en essayant de choisir des profils “moyens” par rapport aux différents profils régionaux disponibles ; dans d'autres cas (par exemple pour les profils temporels annuels du macro-secteur “combustion non industrielle” et du macro-secteur “agriculture”), des **profils temporels régionaux** ont été maintenus afin de conserver la spécificité territoriale effective, liée à des zones climatiques différentes et aux différentes typologies culturelles.

Les profils de modulation temporelle identifiés en tant que profils communs et leur description sont disponibles en Annexe C.

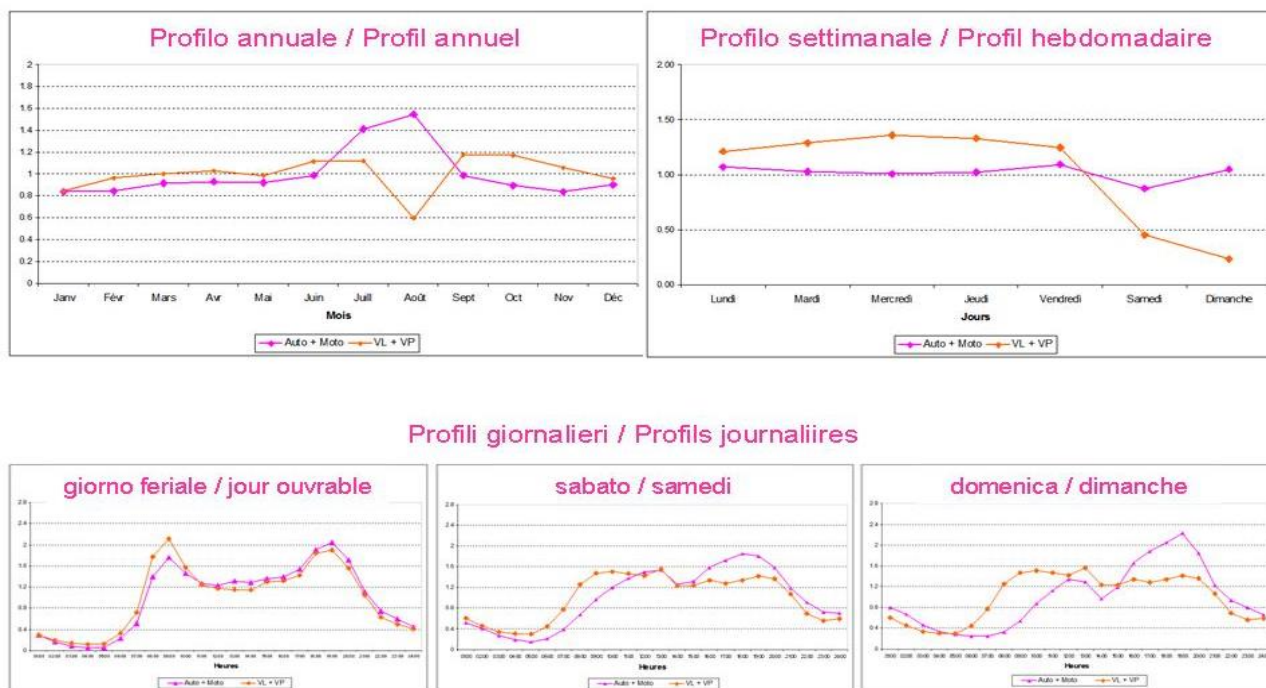


Figure 3.2.3-1 : Exemple de profils temporels communs annuels, hebdomadaires et journaliers

3.2.4 Calcul du cadastre sur la zone ALCOTRA

Au vu de l'expérience précédente avec le même partenariat (projet AERA), afin de faciliter l'échange de données d'émission entre partenaires et d'uniformiser l'élaboration de l'input d'émission, un cadastre commun a été prévu pour tout le territoire ALCOTRA – à partir des sources linéaires et surfaciques appartenant aux régions partenaires - dans le système de référence RGF93-Lambert93. Les sources ponctuelles présentes dans chaque région ont également été géo-référencées dans le système RGF93-Lambert93 et rassemblées en un seul et unique input d'émission pour le territoire ALCOTRA.

A partir des données d'inventaire/cadastre – disponibles sur le polygone communal pour la partie italienne (système WGS84 UTM32N) ou sur des cellules d'une grille pour la partie française (système RGF93-Lambert93) – les émissions produites par les différentes sources ont été attribuées de manière différenciée à une grille transfrontalière ALCOTRA (cellule de 1 km x 1 km, dans le système de référence RGF93-Lambert93), sur la base de données spécifiques (cartographies relatives à l'occupation du sol, aux zones résidentielles, aux zones industrielles, à la végétation, aux cultures agricoles, etc...).

Le processus a été réalisé, dans le cadre du système de modélisation utilisé au sein de l'Arpa Piémont, à partir de la suite de modélisation EMMA30 (paragraphe 3.2.5.2) spécifiquement mise en œuvre dans le cadre du projet pour concevoir un input d'émission subdivisé en catégories SNAP, en différents systèmes de référence (UTM, Lambert93, latitude/longitude) dans le format netCDF (Figura 3.2.4-1).

³⁰ Arianet srl (<http://www.aria-net.it/front/IT/codici/suite.php>)

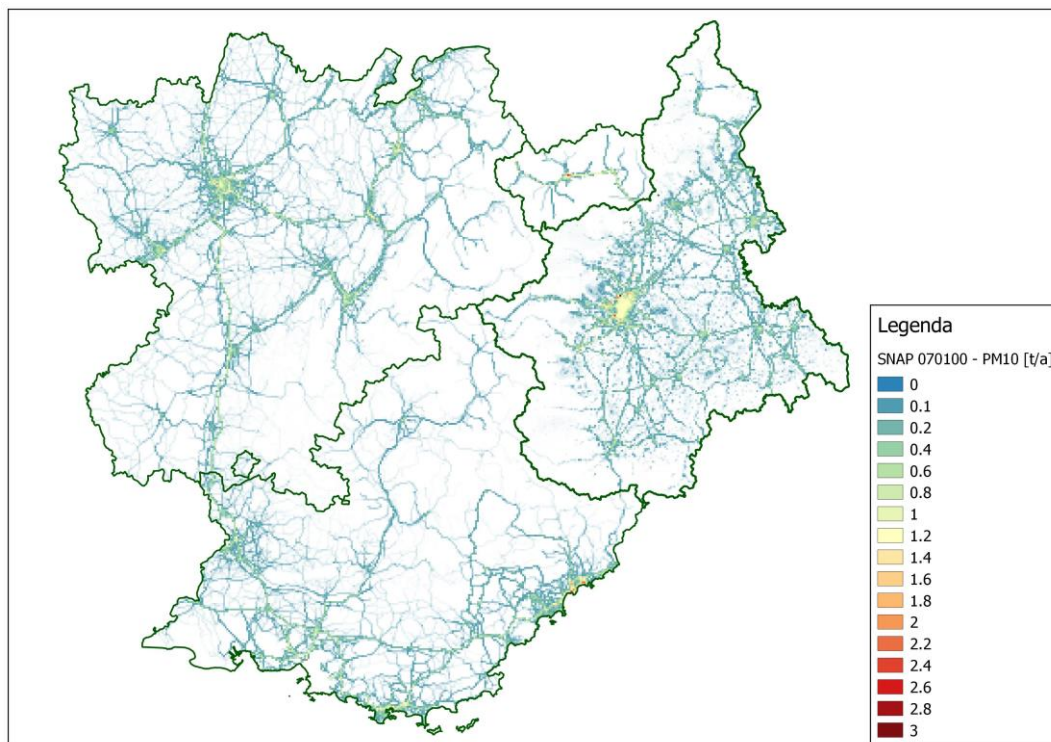


Figure 3.2.4-1 : Exemple de cadastre d'émission commun sur le territoire ALCOTRA –PM10 du trafic automobile

3.2.5 Intégration des cadastres dans les modèles photochimiques

3.2.5.1 Préparation des cadastres pour CAMx

La préparation des émissions pour le lancement du calcul avec le modèle CAMx nécessite la réalisation de plusieurs étapes successives. La première de ces étapes est de redistribuer les émissions cadastrées sur des mailles de 1km en sortie de l'outil EMMA dans la grille de calculs de CAMx avec une résolution de 6km en plus d'une modification du système de projection géographique. La figure 3.2.5.1-1 représente l'emprise du cadastre initial d'EMMA ainsi que la grille de calculs de CAMx dans laquelle les émissions ont été redistribuées.

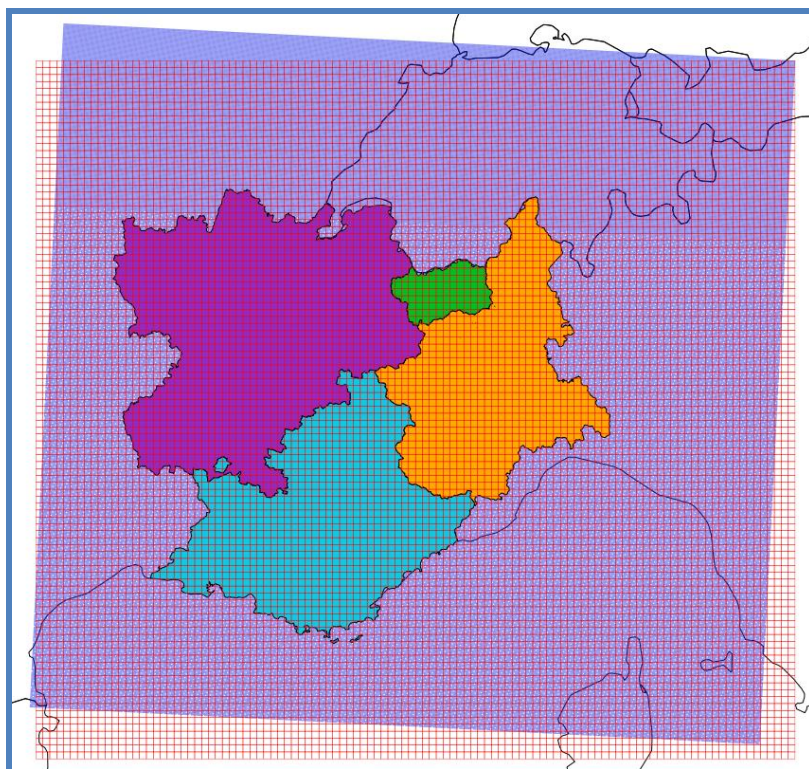


Figure 3.2.5.1-1 : Représentation de la grille de cadastre EMMA à 1 km (bleu) et de la grille de calcul CAMx à 6 km (rouge)

La seconde étape consiste à désagréger les émissions annuelles en émissions horaires sur la base des profils temporels harmonisés décrits dans la partie 3.2.3 pour chacun des 320 codes SNAP différenciés. Les émissions sont alors exprimées en [g/h/cellule].

La troisième étape, appelée spéciation des espèces, permet de convertir les espèces génériques issues du cadastre en espèces spécifiques qui pourront être traitées par les modèles de chimie-transport. Cette étape concerne 3 catégories de polluants : les NO_x, les COV (composés organiques volatiles) et les PM_{2.5}. Un profil de spéciation est associé à chacune des activités différenciées. La spéciation des espèces a été définie pour les espèces intégrées dans le modèle de chimie-transport CHIMERE. Il est donc ensuite nécessaire de définir une relation entre ces espèces et les espèces de CAMx. Les émissions sont exprimées en [mole/h/cellule] pour les gaz et en [g/h/cellule].

Les émissions anthropiques extérieures au 4 régions partenaires sont issues de l'inventaire EMEP pour l'année de référence 2010. Ces données ont une résolution spatiale initiale de 50x50km. Elles sont redistribuées sur les mailles du domaine de simulation à une résolution de 6km en fonction de l'occupation du sol.

Les émissions naturelles (biogéniques, terrigènes et marines) sont calculées sur l'intégralité du domaine pour chaque heure en fonction des conditions météorologiques simulées. Elles sont calculées par les modules MEGAN et « diagbio » intégrés au préprocesseur de CHIMERE. Une étape de conversion des espèces est également nécessaire pour intégrer ces émissions dans CAMx.

Les émissions des activités anthropiques différenciées ainsi que les émissions naturelles sont ensuite regroupées en 5 secteurs d'activité, définis dans la partie 3.2.5.

L'ensemble des données d'émissions traitées est ensuite converti en format binaire en respectant les conventions de format de CAMx. Un traitement similaire est réalisé pour l'ensemble des sources d'émissions ponctuelles.

3.2.5.2 Préparation des cadastres pour FARM

Dans le cadre des chaînes de modélisation utilisée au sein de l'Arpa Piémont, les données d'émission – sources ponctuelles, linéaires et surfaciques – sont traitées par une sous-chaîne spécifique pour la modélisation des émissions (EMMA, Arianet srl), qui prévoit 3 principaux niveaux de traitement :

- la désagrégation spatiale ;
- la modulation temporelle ;
- la spéciation chimique.

En ce qui concerne la désagrégation spatiale, dans la mesure où le modèle photochimique FARM peut travailler à la fois en coordonnées WGS84 UTM32N et en coordonnées RGF93-Lambert93 ou directement en coordonnées géographiques (latitude-longitude), il a été décidé d'élaborer l'input d'émission en coordonnées géographiques afin d'éviter les éventuelles distorsions issues des projections dans les deux autres systèmes de coordonnées. Le processus décrit dans le paragraphe 3.2.4 (spatialisation des émissions avec la suite de modélisation EMMA) a ensuite été appliqué pour l'élaboration de l'input de FARM, en attribuant toutefois les émissions à une grille transfrontalière ALCOTRA avec des cellules de 6 km x 6 km – résolution convenue pour la simulation de dispersion – en coordonnées géographiques WGS84.

Les données d'émission d'EMEP 2010³¹ ont également été intégrées dans l'input d'émission pour FARM pour les territoires voisins compris dans le domaine de simulation ALCOTRA (autres régions italiennes et françaises, autres états européens ainsi que les émissions liées aux zones marines) et dans le domaine transfrontalier de background.

Suite à une erreur dans l'export initial du cadastre en PACA, les émissions polluantes et la cartographie détaillée sur la commune de Marseille étaient absentes. Le module EMMA de préparation des émissions pour le modèle FARM a remplacé automatiquement cette absence de données par des émissions EMEP (les mêmes émissions déjà utilisées comme émissions «extérieures», hors domaine ALCOTRA), qui surestiment les émissions du secteur industriel. L'erreur dans l'export des émissions sur la commune de Marseille a pu être corrigée dans les données d'entrée de la chaîne de calcul du modèle CAMx.

Pour la désagrégation temporelle, les profils temporels communs à la zone ALCOTRA et les profils régionaux spécifiques (paragraphe 3.2.3) ont été appliqués.

³¹ http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/webdab_emepdatabase/emissions_emepmodels/
SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

Pour finir, en suivant le mécanisme chimique SAPRC99 et le schéma pour les aérosols AERO3 adoptés par le modèle de chimie et transport, un module spécifique d'EMMA reproduit – sur la base de profils de spéciation et de profils dimensionnels spécifiques pour chaque catégorie d'émission – la spéciation chimique des composés organiques volatils non méthaniques (dans les principaux composés organiques appartenant à la famille des NMVOC : alcanes, aldéhydes, cétones, aromatiques, oléines, terpènes, etc...), la répartition granulométrique des particules et la répartition chimique des oxydes d'azote en monoxyde et bioxyde.

Le résultat final – output du modèle EMMA et input pour FARM – est la production de débits horaires d'émission sur la grille de simulation pour toutes les espèces chimiques traitées depuis le modèle de chimie et transport.

3.2.6 Synthèse de l'action

Afin d'uniformiser le plus possible les données d'émission, il a été décidé d'élaborer à la fois une base de données d'émission commune – relative à l'année 2013 – et d'harmoniser les paramétrages des émissions pour leur intégration dans les modèles de dispersion.

A partir des données d'émission de chaque partenaire – disponibles pour des années différentes (2010 Piémont et PACA, 2013 Vallée d'Aoste et Rhône-Alpes) et avec une attribution territoriale différente (émissions sur les communes en ce qui concerne les régions italiennes, et émissions sur cellules d'une grille régulière en ce qui concerne les régions françaises) – nous avons en premier lieu uniformisé le niveau de mise à jour, en convenant d'une méthodologie "d'évolution" des données d'émission pour les partenaires qui ne disposaient pas de la mise à jour pour l'année 2013 (Arpa Piémont et Air PACA). Les données d'émission fournies par chaque partenaire ont par ailleurs été harmonisées à la fois en ce qui concerne les **catégories SNAP** (macro-secteur, secteur et activité), et en ce qui concerne les combustibles (**codes NAPFUE**).

En ce qui concerne l'intégration des émissions dans les modèles numériques, une harmonisation des profils d'évolution temporelle a ensuite été convenue, après une analyse de tous les profils temporels adoptés par les différents partenaires, associés aux différentes activités d'émission : dans certains cas, des **profils temporels communs** ont été identifiés – pour chaque SNAP -, dans d'autres cas, des **profils temporels régionaux** ont été maintenus afin de conserver la spécificité territoriale effective.

Enfin, à partir des données d'inventaire/cadastre – disponibles sur le polygone communal pour la partie italienne (système WGS84 UTM32N) ou sur des cellules d'une grille pour la partie française (système RGF93-Lambert93) – les émissions produites par les différentes sources ont été attribuées de manière différenciée à une grille transfrontalière ALCOTRA (cellule 1 km x 1 km, dans le système de référence RGF93-Lambert93), sur la base de données spécifiques (cartographies relatives à l'occupation du sol, aux zones résidentielles, aux zones industrielles, à la végétation, aux cultures agricoles, etc...).

Le processus a été réalisé à partir d'une suite de modélisation spécifique pour les émissions (EMMA32), spécifiquement mise en œuvre dans le cadre du projet pour élaborer un input d'émission subdivisé en catégories SNAP, en différents systèmes de référence (UTM, Lambert93, latitude/longitude) dans le format netCDF (Figure 3.2.4-1).

³² Arianet srl (<http://www.aria-net.it/front/IT/codici/suite.php>)

3.3. Évaluation des résultats de modélisation

La validation des résultats produits par les modèles de transport et de dispersion CAMx et FARM (décrits dans le chapitre 3.1) utilisés pour le calcul des champs de concentration de particules doit être effectuée en comparant les résultats obtenus à partir des simulations avec les observations disponibles sur le territoire objet de l'étude.

3.3.1 Les mesures de concentration et de spéciation des particules

3.3.1.1 Analyse des données de concentration des particules

3.3.1.1.1 Les références réglementaires

En ce qui concerne les valeurs limites sur les concentrations de particules dans l'air, la réglementation actuellement en vigueur au niveau européen est la Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil, du 21 mai 2008, relative à la qualité de l'air ambiant et pour un air plus propre en Europe, transposée en France par le Décret n° 2010-1250 du 21 octobre 2010 et en Italie par le Décret législatif n° 155/2010 du 13 août 2010.

Cette directive établit les valeurs limites indiquées dans la table suivante pour les particules.

Table 3.3.1.1.1-1 : Références réglementaires pour les concentrations de particules dans l'air (directive 2008/50/CE)

	Valeurs limites pour la protection de la santé
PM10	40 µg/m ³ pour la moyenne annuelle
	50 µg/m ³ pour la moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 35 jours par an
PM2.5	25 µg/m ³ pour la moyenne annuelle

3.3.1.1.2 Les mesures de la zone ALCOTRA

Dans l'ensemble du domaine ALCOTRA, 88 stations sont installées pour la mesure des PM10 et 34 stations pour la mesure des PM2.5, dont les caractéristiques sont décrites en détail dans l'Annexe D.

Les valeurs de concentration des PM10 et des PM2.5 mesurées dans les stations sont indiquées sur les cartes suivantes.

Au cours de la période estivale (du 22/07/2013 au 21/08/2013) les valeurs moyennes de concentrations de PM10 sont généralement inférieures à 20 µg/m³, même si dans certaines stations on atteint les 30-35 µg/m³ (figure 3.3.1.1-1).

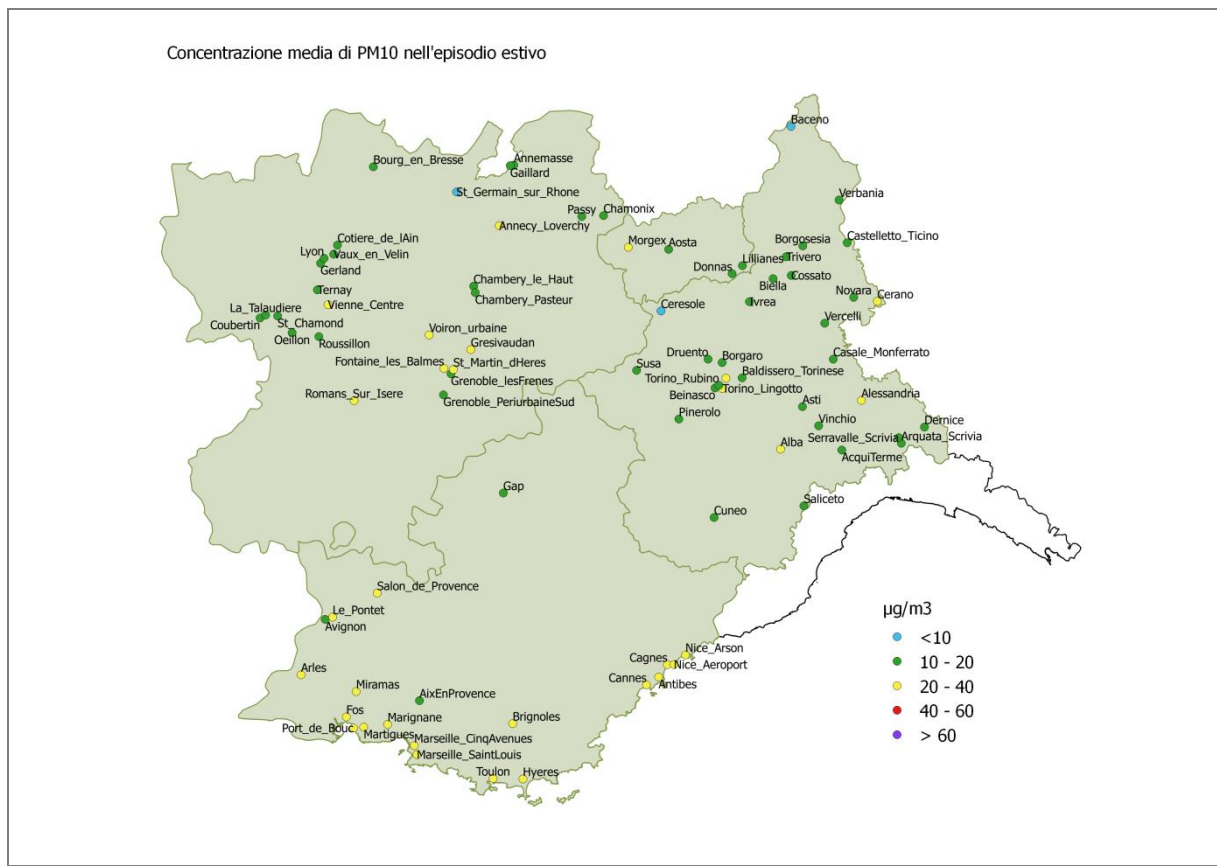


Figure 3.3.1.1.2-1 : Concentrations moyennes de PM10 mesurées pendant la période estivale sur le territoire ALCOTRA.

La moyenne des PM10 au cours de la période hivernale (du 20/11/2013 au 20/12/2013) est plutôt élevée dans de nombreuses stations, notamment dans le Piémont, en Rhône-Alpes et dans la Vallée de l'Aoste (figure 3.3.1.1-2).

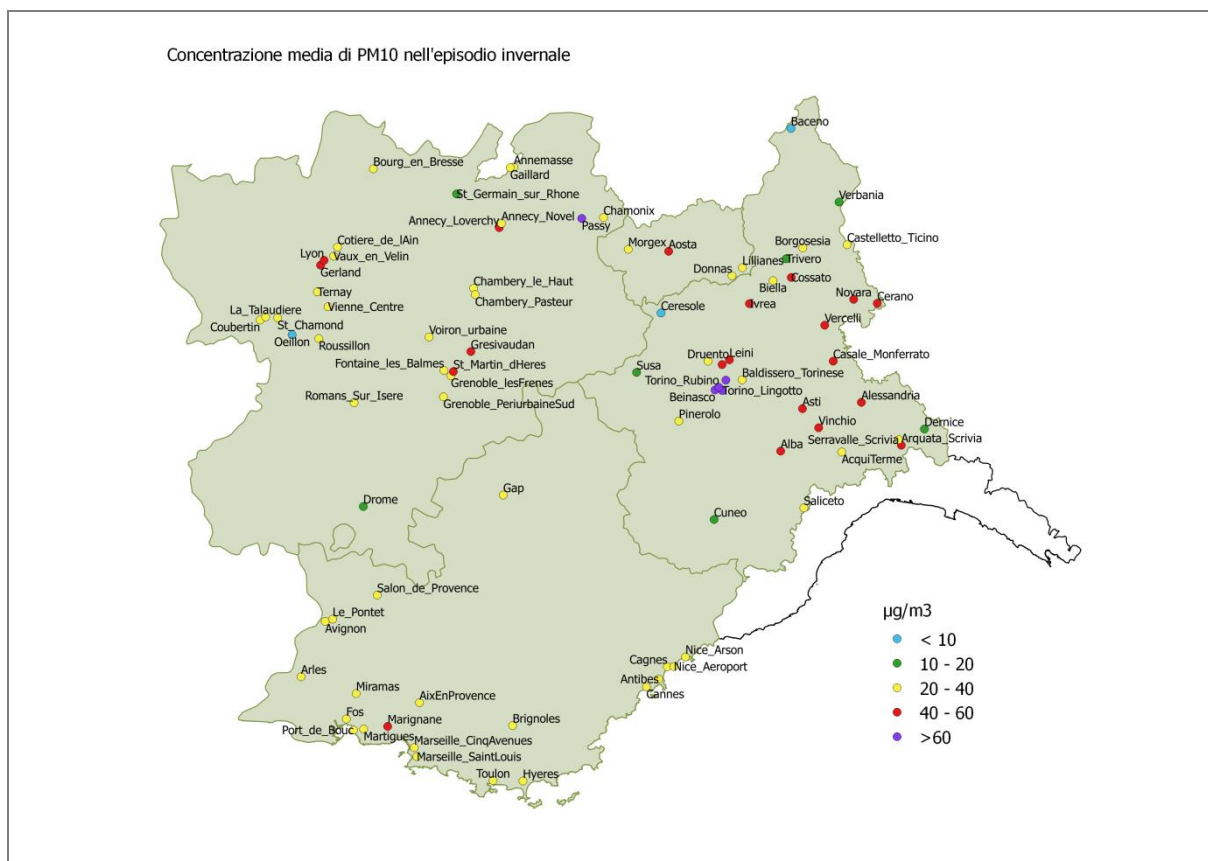


Figure 3.3.1.1.2-2 : Concentrations moyennes de PM10 mesurées pendant la période hivernale sur le territoire ALCOTRA.

Le nombre de dépassements de la valeur de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur la moyenne journalière est un paramètre très intéressant : pendant la période hivernale, dans certaines stations du Piémont, on compte plus de 20 jours de dépassement et les localités de la zone ALCOTRA comptant plus de 10 dépassements sont nombreuses (figure 3.3.1.1.2-3), alors que pendant la période estivale, on n'enregistre pas de dépassements de cette valeur.

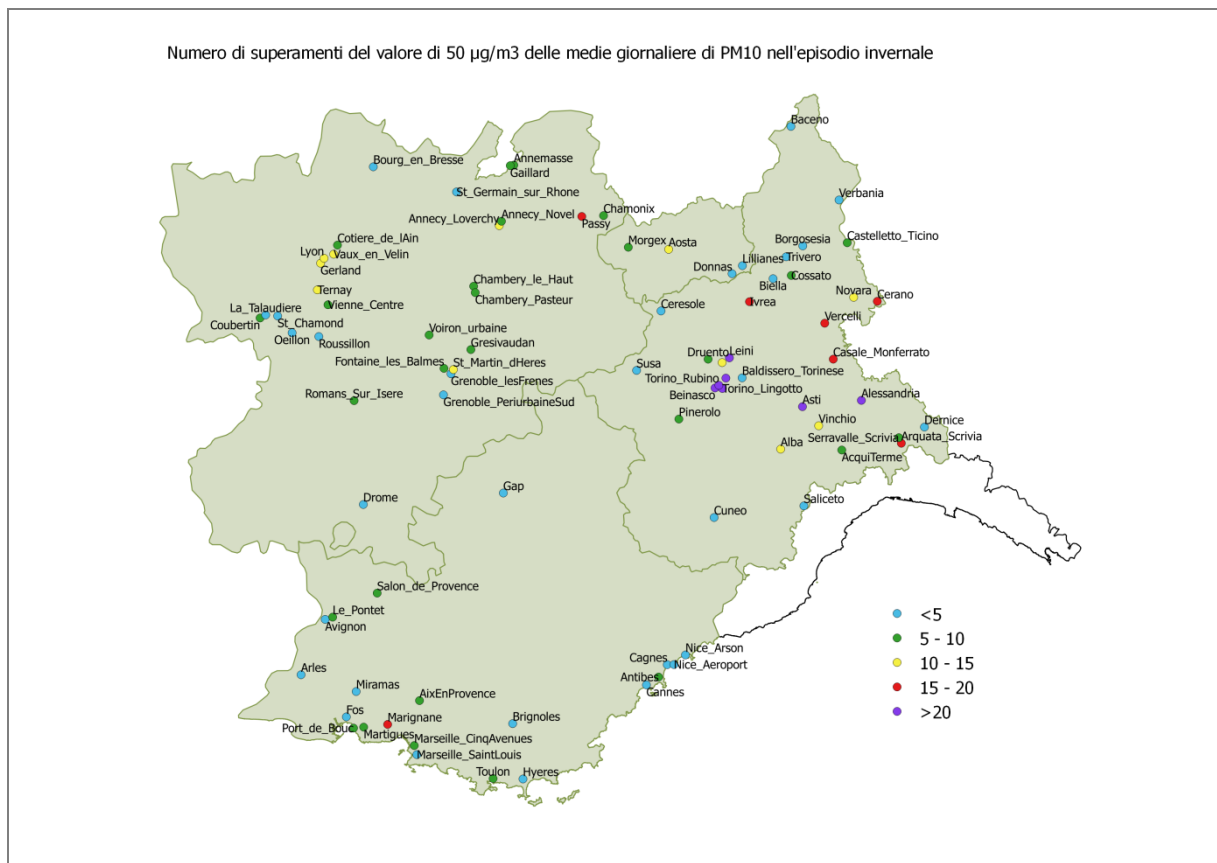


Figure 3.3.1.1.2-3 : Nombres de dépassements de la valeur limite journalière de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 pendant la période hivernale sur le territoire ALCOTRA.

Les concentrations de PM2.5 mesurées ont la même distribution spatiale, avec des valeurs particulièrement élevées dans le Piémont pendant la période hivernale et des valeurs plutôt uniformes (inférieures à $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) pendant la période estivale.

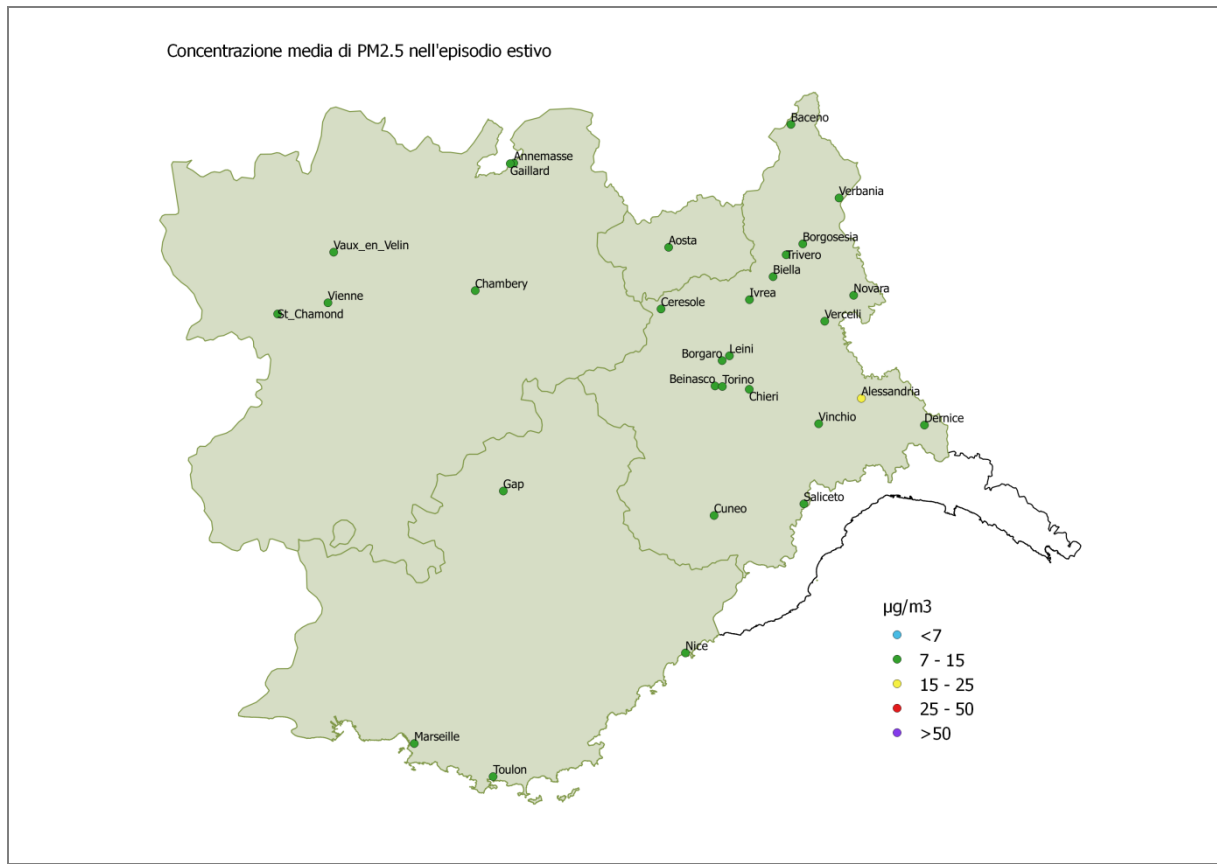


Figure 3.3.1.1.2-4 : Concentrations moyennes de PM2.5 mesurées pendant la période estivale sur le territoire ALCOTRA.

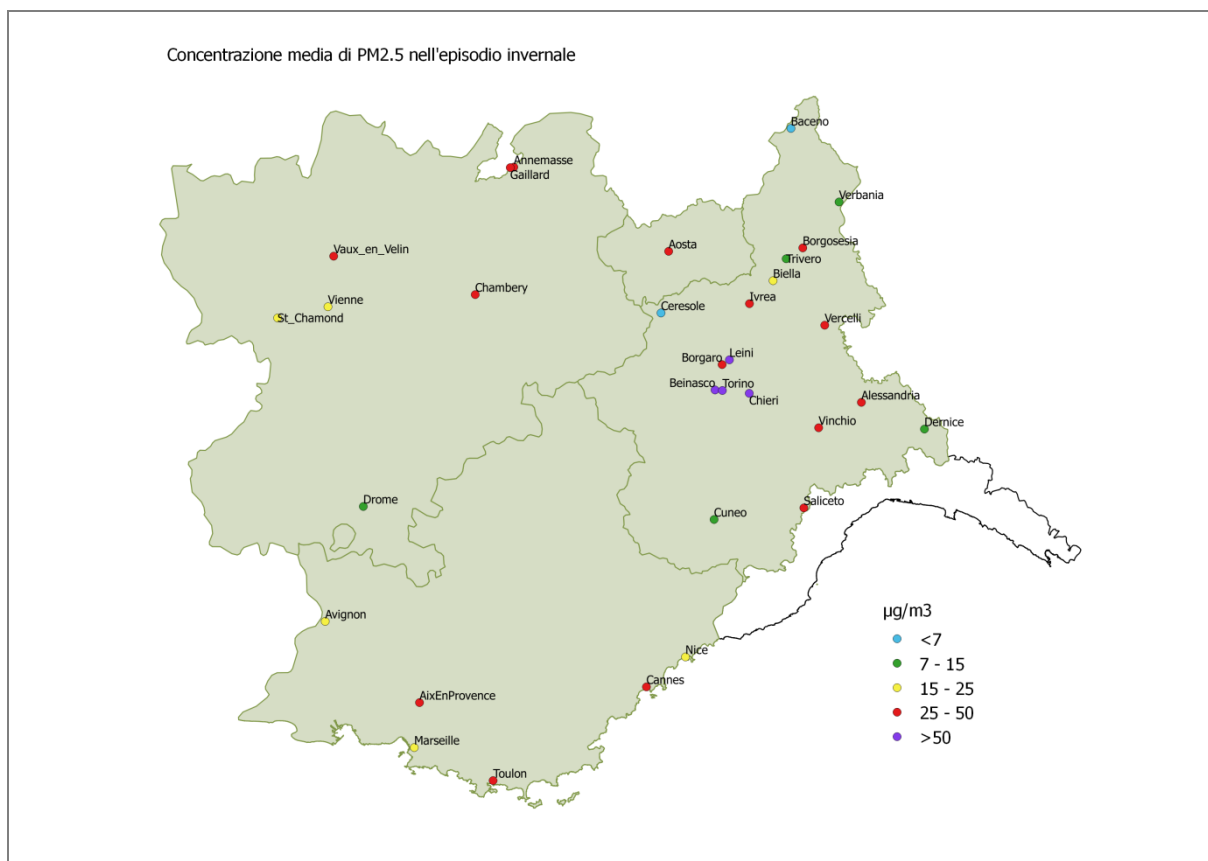


Figure 3.3.1.1.2-5 : Concentrations moyennes de PM2.5 mesurées pendant la période hivernale sur le territoire ALCOTRA.

3.3.1.2 Analyse des données de spéciation

3.3.1.2.1 Localisation des sites de mesure

Les données de spéciation des particules PM10 disponibles dans les quatre régions du territoire ALCOTRA objet de l'étude ont été prises en considération. A cet effet, les résultats des campagnes de surveillance réalisées dans le cadre du projet INTERREG ALCOTRA "PARTAERA", pendant la période juillet 2013 - août 2014, ont été utilisés, ainsi que les résultats des campagnes de surveillance et de spéciation chimique effectuées sur les différents sites de la région Vallée d'Aoste et de la ville de Lyon.

La liste des stations de mesure prises en considération avec leurs caractéristiques est indiquée dans la table suivante.

Table 3.3.1.2.1-1 : Liste des stations de mesure prises en considération pour les données de spéciation

	Pays / Région	Nom - Adresse	Altitude [m]	Typologie	Typologie de la zone	Principales sources
Marnaz	France RA	Marnaz, Rue du Vieux Port	501	Fond	Suburbaine	Chauffage résidentiel
Aix Ecole d'Art	France PACA	Aix-En-Provence, Rue Emile Tavan	188	Fond	Urbaine	Chauffage résidentiel, trafic routier
Torino Rubino	Italie Piemonte	Torino, Parco Rubino	257	Fond	Urbaine	Chauffage résidentiel, trafic routier
Lyon centre	France RA	Lyon, Rue du lac	160	Fond	Urbaine	Chauffage résidentiel, trafic routier
Aosta Via I Maggio	Italie VDA	Aosta, Via I Maggio	566	Industrielle	Suburbaine	Chauffage résidentiel, trafic routier, industrie
Donnas	Italie VDA	Donnas, loc. Montey	341	Fond	Rurale	Chauffage résidentiel, agriculture
Lillianes	Italie VDA	Lillianes, loc. Fey	650	Fond	Rurale	Chauffage résidentiel

Dans le projet PARTAERA, chaque partenaire avait choisi une station pour laquelle les analyses de la composition chimiques des particules apportaient une meilleure compréhension des phénomènes récurrents de zones spécifiques du territoire.

Dans la région PACA (Provence-Alpes-Côte d'Azur), les zones urbanisées avec une structure industrialisée significative révèlent des problèmes liés aux particules atmosphériques ; parmi ces zones, la ville d'Aix-en-Provence, située dans une des zones les plus industrialisées de la région à côté de Marseille, a été choisie comme échantillon significatif.

En revanche, dans la région Piémont il a été décidé de surveiller les zones urbaines densément peuplées. Raison pour laquelle le site de Turin Rubino a été choisi, une station de fond urbain, installée au sein d'un parc urbain dans une zone périphérique de type résidentiel, dans laquelle on trouve d'importantes voies de circulation urbaine, à environ 1 km de l'usine FIAT. Plus en général, le site se situe dans la ville chef-lieu de l'agglomération de Turin qui présente des criticités importantes en ce qui concerne la pollution aux particules et est considérée comme une "zone de réhabilitation".

Dans la région Rhône-Alpes, de nombreuses vallées alpines sont problématiques du point de vue de la qualité de l'air, surtout pendant la période hivernale, à cause des dynamiques de dispersion SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

locales et de la concentration des émissions dans les zones situées au fond des vallées (émissions industrielles, dues à la circulation, au chauffage – surtout s'il est alimenté par du combustible bois). Marnaz est un site représentatif de cette réalité : petite ville typique du fond de la vallée moyennement urbanisée (5000 habitants) ; le site choisi pour les mesures est une station de fond urbain, dont les émissions prépondérantes sont celles produites par le chauffage et la circulation. La ville de Marnaz se trouve dans la vallée de l'Arve, une zone soumise à un Plan de protection de l'atmosphère (PPA).

Concernant la région Rhône-Alpes, les données de la station Lyon centre ont également été analysées, dont les mesures de spéciation effectuées pendant l'hiver 2013/14 sont disponibles.

Concernant la région Vallée d'Aoste, les stations pour lesquelles les données de spéciation sur les particules PM₁₀ étaient disponibles au cours des deux périodes d'étude (été 2013 et hiver 2013) ont été prises en considération.

La station de la Vallée d'Aoste Via I Maggio est un site de type industriel situé à proximité d'une aciérie (production d'aciers spéciaux) présente dans la ville d'Aoste, qui est la zone du territoire régional avec la plus grande présence et densité de sources d'émissions polluantes dans l'atmosphère (trafic, chauffage, industrie). La station de Donnas est au contraire une station rurale, située dans une zone de fond de vallée parcourue par les principales voies de circulation à la frontière avec le Piémont : les principales émissions polluantes proviennent du trafic, du chauffage, des activités agricoles et on suppose la présence d'une contribution provenant du territoire piémontais limitrophe. Le site de Lillianes a en revanche été choisi pour obtenir des informations sur la qualité de l'air dans un petit bourg de montagne d'environ 400 habitants dans une vallée latérale, où les émissions proviennent principalement des installations de chauffage ; le site présente un intérêt pour évaluer les éventuels phénomènes de transport de substances polluantes provenant d'autres zones, principalement de la vallée centrale.

3.3.1.2.2 *Détail des espèces étudiées*

Les particules atmosphériques sont formées de différentes espèces chimiques, dont les proportions varient selon le site et la saison. Certaines espèces sont caractéristiques de sources d'émission spécifiques (par exemple le NaCl pour l'aérosol marin, le lévoglucosan pour la combustion de la biomasse) : la connaissance de la composition des particules est par conséquent importante pour l'identification des sources.

En général, 70% - 80% des particules sont composées d'espèces ioniques et d'espèces carbonées.

Les espèces ioniques sont :

- Nitrates (NO₃)

Ils se forment par l'oxydation de NO₂, NO, N₂O et NO₃, émis sous forme gazeuse notamment par des sources anthropiques, telles que les processus de combustion. Ils sont générés à la fois dans la chimie diurne, en concurrence avec les processus de formation de l'ozone, et dans la chimie

nocturne, par radical nitrique. Ils sont parmi les composants secondaires des PM_{2.5} les plus importants.

- Sulfates (SO₄²⁻)

Les sulfates se forment par oxydation du SO₂ sous forme gazeuse, émis en quantités élevées à la fois par des sources naturelles, telles que les volcans, les mers et les océans, à la fois comme polluant produit par des processus de combustion de carbone, par le raffinage et la combustion du pétrole et de ses dérivés, par les centrales thermoélectriques et par les fonderies ; dans l'air il est ensuite oxydé en acide sulfurique, H₂SO₄, et sulfates pendant une période variable de quelques heures à plusieurs jours.

- Ammonium (NH₄⁺)

Il provient principalement de la salification de l'ammoniaque biogénique avec de l'acide sulfurique et nitrique, mais peut aussi être dû à l'utilisation d'engrais à base d'ammonium et à des sources industrielles.

Les espèces carbonées sont :

- Carbone élémentaire (EC)

Il constitue la fraction de particules carbonées résistant à l'oxydation à une température en dessous des 400 °C. Il est également appelé Black Carbon en raison de ses propriétés optiques : il possède en effet une coloration noire et un fort pouvoir absorbant de la lumière. Il est constitué de particules carbonées d'origine primaire avec une structure graphique hexagonale. En plus du carbone élémentaire au sens strict, il comprend généralement des composés organiques non volatils à poids moléculaire élevé et de couleur noire type goudron, des substances biogéniques et du coke. Les particules, générées pendant la combustion incomplète de fossiles et carburants, ont tendance à s'agglomérer en chaînes qui peuvent à leur tour absorber d'autres espèces. Les particules carbonées recouvertes en surface de substances semi-volatiles prennent le nom de *soot*. Les principales sources sont les combustions à la fois fixes (centrales thermoélectriques, industries, chauffage) et mobiles (trafic). Charbon, bois et moteurs diesel produisent, à combustible brûlé égal, les plus fortes émissions.

- Carbone organique (OC ou ORGC)

Il s'agit de la fraction carbonée de l'aérosol organique présent et qui représente environ 60-80% du carbone présent et est constitué d'un mélange d'hydrocarbures et de composés oxygénés, tels que par exemple les HAP et les dioxines. L'aérosol organique a aussi bien une origine primaire que secondaire ; dans le premier cas, il est formé pendant les processus de combustion et émis principalement comme particules sub-microniques ; dans le second cas, il peut tirer ses origines de la condensation de composés organiques volatils ou de contributions secondaires à partir de réactions de précurseurs dans l'atmosphère. On identifie plus précisément trois mécanismes de formation des particules organiques fines secondaires : condensation de produits finaux de réactions d'oxygénations photochimiques, absorption de composés organiques, généralement les

hydrocarbures aromatiques polycycliques, sur des particules solides et dissolution de gaz solubles en mesure de réagir dans les particules.

- Lévo-glucosan (1,6-anhydre-β-D-glucopyranose)

Il s'agit d'un sucre anhydre qui provient de la pyrolyse de la cellulose et est ainsi utilisé comme marqueur spécifique des processus de combustion de la biomasse. Son incidence en pourcentage sur les PM10 est toutefois très inférieure à celle des composants cités ci-dessus.

Le lévo-glucosan se trouve exclusivement dans les particules fines et présente une bonne stabilité photochimique dans l'atmosphère et en phase liquide.

Sa concentration mesurée dans différentes zones est très variable ; ceci est dû aux différences dans le type de bois utilisé, aux différents types d'installations de combustion et à la nature des particules échantillonnées dans l'air ambiant.

3.3.1.2.3 Analyse des résultats

Les résultats des mesures de spéciation des particules sont présentés ci-dessous à l'aide de graphiques circulaires au niveau des points de mesure reportés sur la carte. Les pourcentages ont été calculés par rapport à la valeur moyenne de la période considérée.

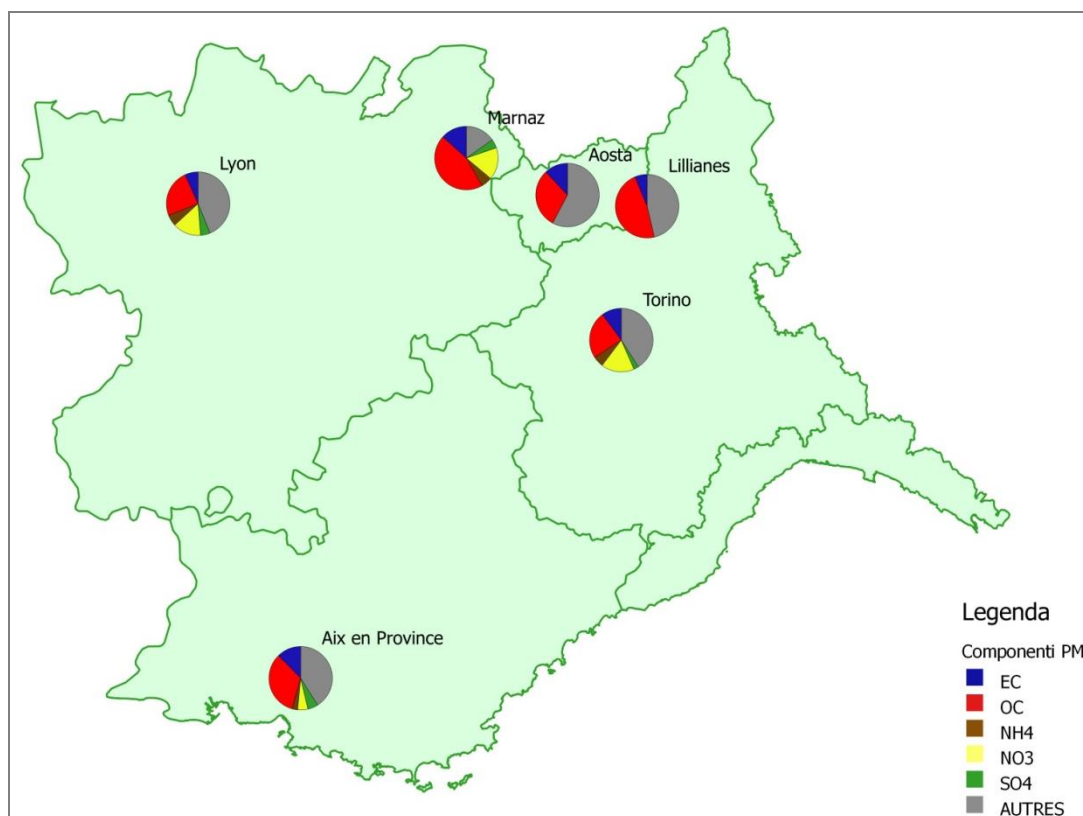


Figure 3.3.1.2.3-1 : Composition moyenne en pourcentage des particules PM10 pendant la période hivernale sur la base des mesures

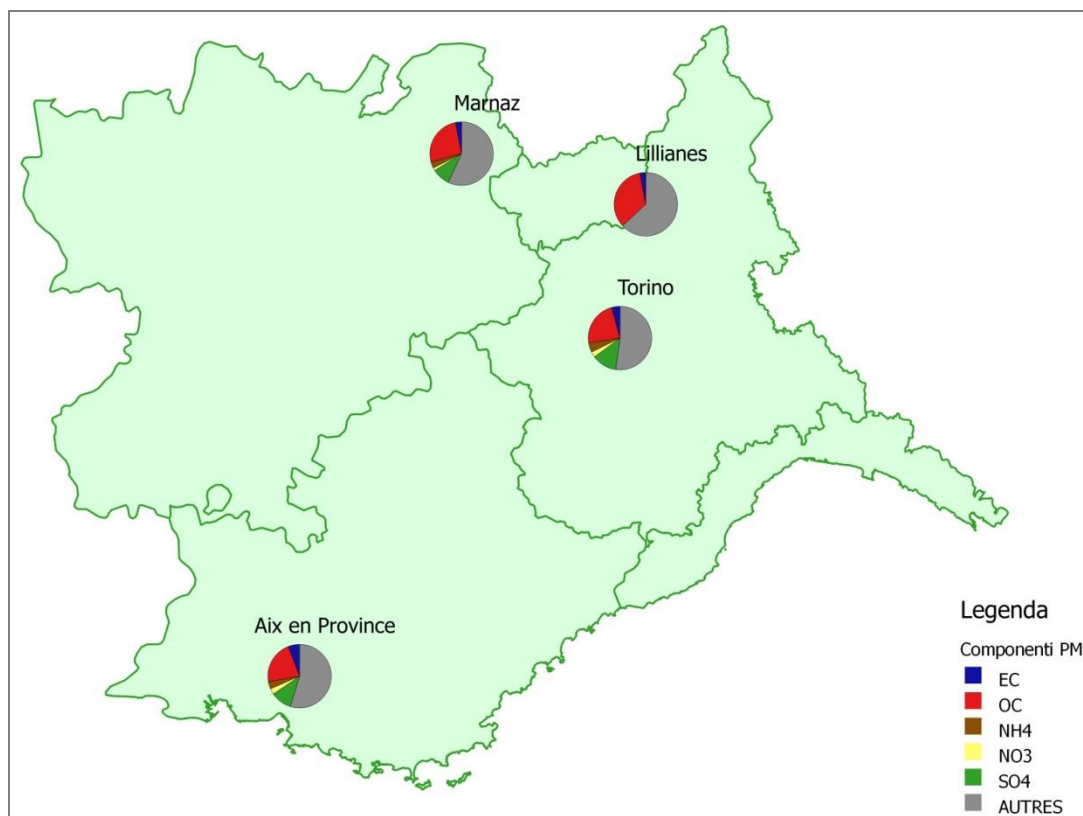


Figure 3.3.1.2.3-2 : Composition moyenne en pourcentage des particules PM10 pendant la période estivale sur la base des mesures

On observe des valeurs réellement plus élevées pour la période hivernale pour les nitrates, probablement à cause des plus grandes concentrations de NOx, que l'on peut principalement attribuer au chauffage domestique.

Les autres espèces ioniques (NH₄, SO₄) affichent en revanche des valeurs plus basses pendant la période hivernale, probablement parce que les processus secondaires d'oxygénation sont potentiellement réduits en hiver à cause de la diminution de l'intensité du rayonnement solaire et des températures par rapport à la période estivale.

Les valeurs maximales des espèces carbonées (notamment leur fraction organique) pendant la période hivernale peuvent s'expliquer, en partie, par la consommation importante de biomasse (surtout de bois) et de combustibles fossiles pour le chauffage des habitations. Cette contribution dans les vallées alpines (voir les valeurs relevées sur les sites de Marnaz et Lillianes) peut représenter plus de 50% de la masse totale des particules. Ces résultats sont également confirmés par les concentrations en lévoglucosan dans les particules atmosphériques. Comme indiqué précédemment, le lévoglucosan est utilisé comme traceur spécifique de la combustion de la biomasse, s'agissant d'un produit de la pyrolyse de la cellulose. Les données de concentration de lévoglucosan relevées sur les sites des campagnes de mesure permettent le calcul de la part du composant organique issu de la combustion de la biomasse de bois, sur la base d'un facteur

d'émission de lévoglucosan moyen (la valeur de 10,7 (Schmidl C., et al, 2008 [³³] a été choisie pour ce travail). Cette contribution, rapportée aux concentrations moyennes relevées dans les deux périodes étudiées (Figure 3.3.1.2.3-3), confirme que la contribution de la combustion de la biomasse en hiver est particulièrement élevée et atteint dans les vallées alpines des valeurs significatives (supérieures à 70%) ; pendant la période estivale, cette contribution est toujours détectée, dans des proportions bien moindres, notamment dans les vallées alpines, probablement due aux pratiques de brûlage des déchets verts, une pratique courante sur ces territoires.

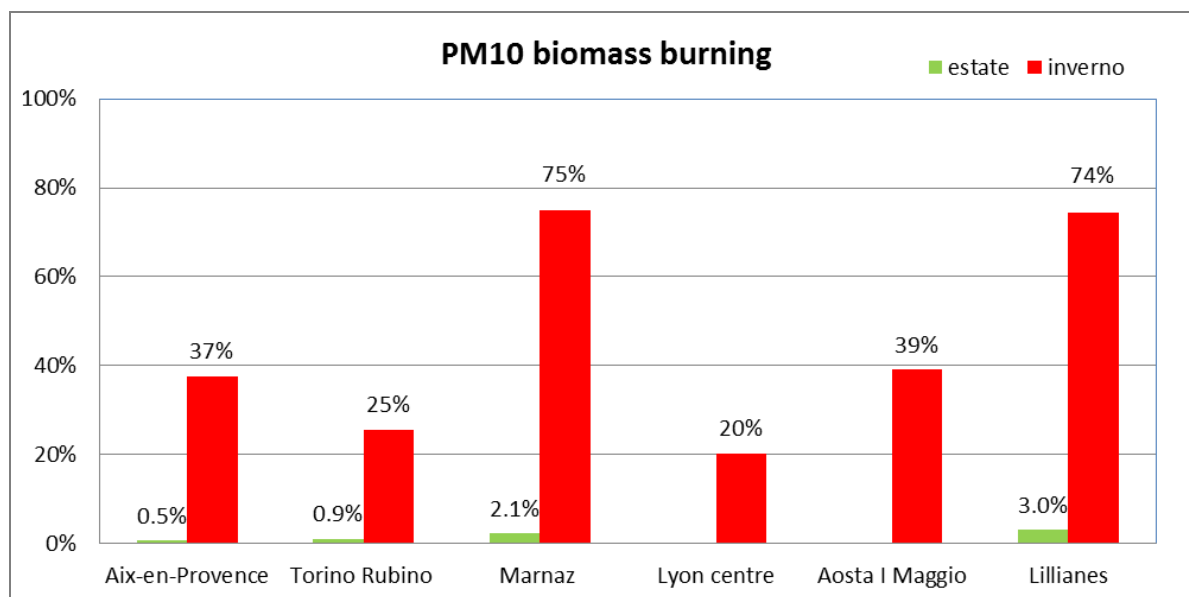


Figure 3.3.1.2.3-3 : Contribution moyenne de la combustion de la biomasse aux PM10 totales pendant les périodes estivales et hivernales

3.3.2 Calcul des champs météorologiques

Tous les modèles numériques de chimie et transport, y compris les modèles CAMx et FARM tels que décrits dans le chapitre 3.1, nécessitent la disponibilité en entrée des champs tridimensionnels des principales variables thermiques et dynamiques de l'atmosphère, ainsi que des paramètres d'échelle de la turbulence. Dans le cadre des activités liées au projet, le modèle WRF (Weather Research and Forecasting model, [³⁴]) a été mis en oeuvre avec la réalisation de simulations météorologiques sur la zone d'étude pour les périodes concernées. Les résultats obtenus pour les principales variables météorologiques (vent et température) ont ensuite été comparés avec les observations (au sol et en hauteur) disponibles sur le territoire ALCOTRA afin d'évaluer la qualité des simulations effectuées.

3.3.2.1 Le modèle WRF : présentation générale.

WRF est un système de simulation atmosphérique créé pour la recherche et la prévision météorologique. Le modèle, parmi les plus avancés existant actuellement, est né de la

³³ Schmidl C., et al, (2008). Chemical characterisation of fine particle emissions from wood stove combustion of common woods growing in mid-European Alpine regions. Atmospheric Environment, Vol. 42, 126-141.

³⁴ Weather Research and Forecasting model: <http://www.wrf-model.org/index.php>

collaboration entre quelques-uns des principaux centres de recherche internationaux dans le cadre de la physique de l'atmosphère (parmi ceux-ci le National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, le National Centers for Environmental Prediction NCEP, et le National Center for Atmospheric Research, NCAR) et, s'agissant d'un modèle "open-source", il a été développé au fil des années grâce à la contribution d'une vaste communauté scientifique qualifiée. WRF est un modèle totalement compressible et non-hydrostatique qui peut travailler sur une vaste gamme d'applications à différentes échelles, de l'échelle synoptique (sur un espace de milliers de kilomètres) jusqu'à une échelle locale (sur un espace de quelques kilomètres ou quelques petites centaines de mètres). Les données nécessaires au fonctionnement du WRF sont essentiellement constituées des données physiographiques du territoire d'étude (orographie, utilisation du sol, paramètres du terrain, etc.) et des données météorologiques tridimensionnelles en bordure du domaine de simulation. WRF est un modèle efficace pour le calcul parallèle, permettant d'utiliser la parallélisation à mémoire répartie (paradigme MPI), à mémoire partagée (paradigme OpenMP), ou les deux (parallélisation hybride) et peut ainsi être utilisé et installé sur des systèmes de calcul à hautes performances (systèmes HPC, High Parallel Computing).

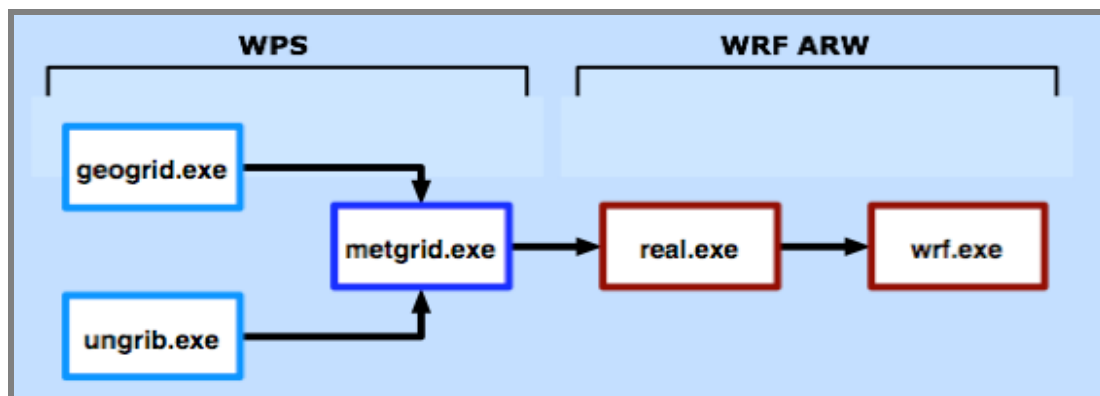


Figure 3.3.2.1-1 : Schématisation du système de calcul du WRF, avec indication des différents modules qui le constituent.

Le système de simulation de WRF, schématisé sur la Figure 3.3.2.1-1, se compose de deux modules principaux : un module de pre-processing (WRF Preprocessing System, WPS), qui prépare les données d'entrée nécessaires à la simulation, et le modèle WRF ARW (Advanced Research WRF) qui effectue la simulation météorologique. Le pré-processeur WPS est à son tour constitué de trois modules distincts :

- *geogrid*, qui définit le domaine de simulation et le système de grilles (nombre de grilles, projection, nombre de points, résolution de la cellule) que l'on veut adopter, en interpolant sur celles-ci les bases des données physiographiques statiques (c'est-à-dire qui restent invariées pendant la période de simulation) ;
- *ungrid*, qui élabore les champs météorologiques provenant de modèles à zone globale, nécessaires pour la construction des conditions limites ;
- *metgrid*, qui interpole horizontalement les champs météorologiques extraits d'ungrid sur les grilles définies par geogrid.

Le modèle WRF-ARW est composé de :

- *real*, module qui effectue l'interpolation verticale des champs météorologiques sur les niveaux du modèle et crée les conditions initiales et les conditions limites sur les grilles de simulation (généralement la grille la plus externe) ;
- *wrf*, le coeur du système qui effectue la simulation météorologique.

WRF peut travailler simultanément avec plusieurs grilles de différentes résolutions, en utilisant un système imbriqué dans lequel la grille à faible résolution (domaine «parent») contient la ou les grilles de plus haute résolution (le ou les domaines «enfant») selon deux modes différents : *one-way nesting*, dans lequel l'échange d'informations se fait entre le domaine parent et le domaine enfant de manière univoque, à savoir de la grille à plus faible résolution à celle à plus grande résolution, et le *two-way nesting*, dans lequel l'échange d'informations est biunivoque, à savoir que le domaine parent fournit les conditions limites au domaine enfant mais il est dans le même temps influencé par le domaine enfant par une action directe appelée *feedback*.

Les paramètres en entrée aux modules de WPS, qui définissent les domaines de simulation, les grilles et la projection de référence, sont spécifiés dans un fichier de configuration (*namelist.wps*), alors que ceux liés à la méthodologie d'interpolation et à la décodification des champs météorologiques des conditions limites sont fournis dans des tables de correspondances. Tous les paramètres nécessaires au fonctionnement de *real/wrf* (notamment les options de physique/dynamique/microphysique, la période de simulation, les modes d'intégration, etc.) sont définis dans un fichier de configuration spécifique (*namelist.input*).

3.3.2.2 Principaux paramétrages et configurations utilisés.

Dans le cadre des activités liées au projet, la version 3.5 de WRF a été utilisée et des procédures spécifiques (en langage python) ont été développées pour la gestion des données, de l'exécution et du contrôle des simulations ; toutes les simulations ont été réalisées selon un mode de calcul parallèle sur un cluster HPC (High Performance Computing) auprès du centre de supercalcul CINECA [³⁵] ; le MPI avec quatre noeuds de calcul et huit processeurs chacun a été utilisé, soit un total de 32 processeurs.

Les simulations ont été réalisées sur les domaines décrits en détail dans le paragraphe 3.3.2.2.1 ci-après pour toute la période d'étude, avec une résolution temporelle horaire, organisées sur un base journalière afin de limiter la dimension des fichiers d'output (1 fichier journalier avec 25 heures de simulation, à partir de 00 UTC - Coordinated Universal Time – du jour jusqu'à 00 UTC le jour suivant). Pour garantir la continuité des simulations, chaque jour a été initialisé avec la dernière heure du jour précédent et, afin d'éviter des phénomènes d'instabilité au début de chacune des deux périodes de simulation, un temps de relâchement initial de 6 jours a été adopté (ainsi les simulations partent de 00 UTC le 14 novembre 2013 pour la période hivernale et de UTC le 16 juillet 2013 pour la période estivale).

³⁵ Consorzio INtEruniversitario per il Calcolo Automatico, <http://www.cineca.it/en>

Ont été utilisées comme données d'entrée au système WRF :

- les bases des données physiographiques et géographiques intégrées dans la distribution du module WPS à la résolution de 30" (environ 1 kilomètre) ;
- les champs météorologiques tridimensionnels d'analyse produits à l'échelle continentale par le modèle IFS (Integrated Forecasting System) d'ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecast) [36] avec les caractéristiques décrites en détail dans la table 3.3.2.2-1 ci-après.

Table 3.3.2.2-1 : Principales caractéristiques des données IFS utilisées comme conditions initiales et limites à WRF.

Domaine	Continental, de [-15°,30°] à [35°,60°]
Résolution horizontale	0.25°
Grille verticale	En niveau de pression, 22 niveaux de 1000hPa à 2hPa
Variables	Toutes les variables nécessaires à WRF, y compris la température de la mer, l'humidité et la température du sol
Résolution temporelle	Analyse hexa-horaire à 00,06,12,18 UTC

3.3.2.2.1 Description des domaines

Les simulations ont été réalisées sur deux domaines imbriqués, un domaine à l'échelle continentale de basse résolution et un domaine à plus haute résolution qui contient l'intégralité du territoire ALCOTRA, comme illustré Figure 3.3.2.2.1-1. Les domaines adoptent tous les deux la projection *Lambert Conformal Conic*, ils sont reliés entre eux en mode two-way nesting et ont un rapport de raffinement entre "parent" et "enfant" égal à trois. La grille verticale est décrite en coordonnées éta, qui suivent le terrain et sont définies en fonction de la pression hydrostatique : 37 niveaux verticaux éta ont été adoptés pour raffiner les niveaux initialement prévus par le modèle dans les couches les plus proches du sol afin d'obtenir une meilleure description des basses couches atmosphériques, lesquelles influencent davantage la dispersion des polluants (Bacer, 2012 [37]).

³⁶ <http://www.ecmwf.int/en/research/modelling-and-prediction>

³⁷ Bacer S., Studio dello strato limite atmosferico tramite simulazioni numeriche ad alta risoluzione, *Tesi di Laurea Università degli Studi di Trieste*, 2012.

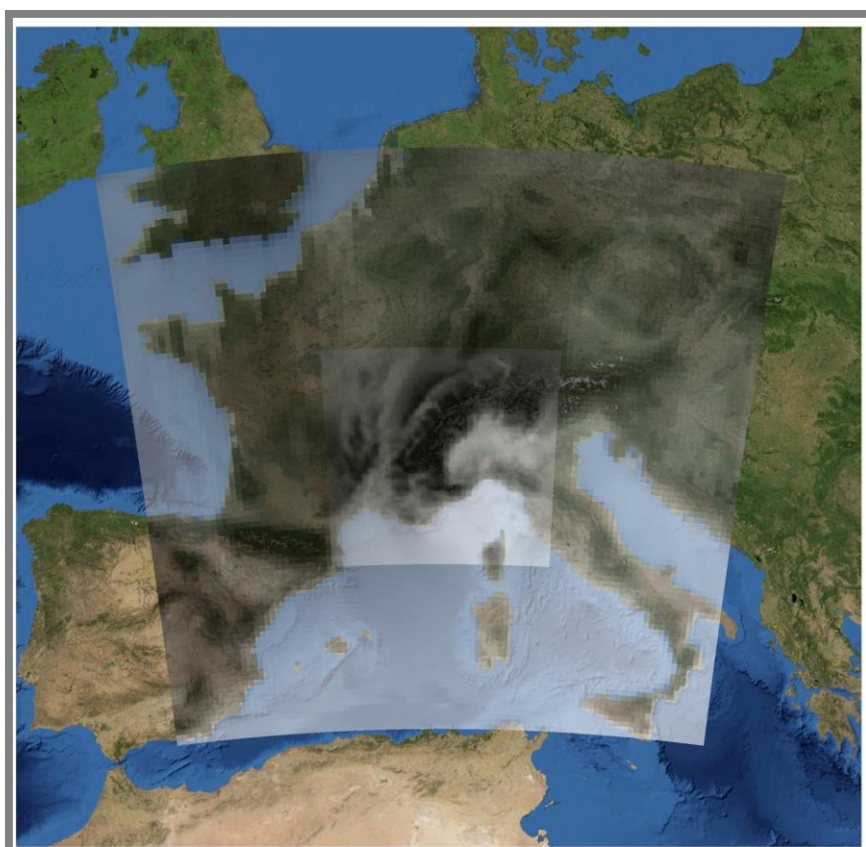


Figure 3.3.2.2.1-1 : domaines de simulation de WRF : d1, domaine continental européen, d2 domaine ALCOTRA.

Dans la table 3.3.2.2.1-1 ci-après, sont indiquées en détail toutes les caractéristiques des domaines de simulation.

Table 3.3.2.2.1-1 : Principales caractéristiques des domaines de simulation.

	Domaine continental (d1)	Domaine ALCOTRA (d2)
Résolution	18 km	6 km
Emprise	SO ~ [-3.2°, 36.6°] NE ~ [20.4°, 52.2°]	SO ~ [2.8°, 41.9°] NE ~ [11.7°, 47.9°]
Nombre de mailles	NX=104 ; NY=100	NX=118;NY=112
Position dans le domaine supérieur	I start = 1 ; J start = 1	I start = 32 ; J start = 33
Nombre de niveaux verticaux	37	37
Niveaux eta	1,0.998,0.996,0.993,0.990,0.987,0.984,0.980,0.975,0.970,0.954,0.934,0.909,0.880,0.836,0.792,0.748,0.704,0.627,0.557,0.493,0.434,0.380,0.331,0.287,0.247,0.210,0.177,0.148,0.121,0.097,0.076,0.057,0.039,0.0249,0.011,0	
Projection	+proj=lcc +lat_1=45 +lat_2=45 +lat_0=45 +lon_0=7 +x_0=0 +y_0=0 +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +units=m	

3.3.2.2.2 Description des namelist

Comme décrit précédemment, WRF possède de nombreuses options de contrôle des données d'entrée/sortie et, surtout, de multiples possibilités de configuration en ce qui concerne les

schémas et le paramétrage de la physique et de la dynamique atmosphérique. A ce sujet, dans le cadre du projet SHAIR, les configurations les plus adaptées aux dimensions et aux caractéristiques du domaine d'étude ont été adoptées, conformément à ce qui est conseillé par le manuel d'utilisation [38], et sur la base de l'expérience acquise par les partenaires qui avaient auparavant eu l'occasion d'utiliser WRF pour des applications locales. La Table 3.3.2.2.2-1 ci-après décrit brièvement quelques-unes des principales variables de configuration adoptées, telles que spécifiées dans le fichier de contrôle *namelist.input*.

Table 3.3.2.2.2-1 : Valeur et signification des principales variables de contrôle configurables dans le fichier *namelist.input*. Se référer au Manuel d'utilisation du modèle WRF pour une explication complète de leur signification.

Section « time_controls »	
interval_seconds=21600	Résolution temporelle des données en entrée à l'échelle continentale (ECMWF)
input_from_file=.true.	Conditions initiales pour le domaine inférieur issues du domaine supérieur
restart=.true.	Option de « restart » (chaque simulation est initialisée avec la précédente)
restart_interval=1440	Intervalle entre deux « restart » [minutes]
Section « domains » (informations complémentaires à celles reportées dans la table 3.3.2.2.1-1)	
time_step=72	Pas de temps d'intégration [secondes]
feedback=1	Activation du mode « two-way nesting »
smooth_option=1	Choix du schéma d'imbrication pour le domaine supérieur
Section « physics »	
mp_physics=2	Schéma de Lin et al. pour la microphysique
ra_lw_physics=1;	Schéma "Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)" pour les radiations de longueurs d'ondes élevées
ra_sw_physics=1	Schéma "Dudhia" pour les radiations de longueurs d'ondes courtes
swint_opt=1	Activation de l'interpolation pour les radiations de longueurs d'ondes courtes
radt=9	Intervalles de temps entre deux calculs de radiations [minutes]
sf_sfclay_physics=1	Schéma pour la couche de surface (MM5/Monin-Obukhov)
sf_surface_physics=2	Modèle de Noah pour l'occupation du sol
sf_urban_physics=1	Schéma "single-layer" pour la canopée urbaine
bl_pbl_physics=1;	Schéma "YSU" pour la couche limite
topo_wind=0	Désactivation de la correction pour le vent de surface topographique
cu_physics=3	Schéma "Grell-Freitas" pour la paramétrisation des cumulus
ishallow=1	Activation de la convection de surface
isfflx=1	Activation du calcul du flux de chaleur latente et sensible à partir de la surface
sst_update=1	Activation de la variation temporelle de la température de surface de la mer, de la glace de mer, de la fraction de végétation et de l'albédo durant la simulation
Section « dynamics »	
rk_order=3	Schéma d'intégration temporel (Runge-Kutta au 3 ^e ordre)
km_opt=4	Schéma de fermeture au 1 ^{er} ordre (Smagorinsky) pour le coefficient de turbulence horizontale
non_hydrostatic=true	Option pour désactiver le modèle hydrostatique

3.3.2.3 Comparaisons avec les observations

Les champs météorologiques produits par WRF ont été comparés avec un ensemble d'observations sélectionnées parmi celles disponibles dans chacune des quatre régions du territoire ALCOTRA.

38 National Center for Atmospheric Research, WRF/ARW Version 3 Modeling System, *User's Guide*, 2015

L'activité de comparaison n'avait pas la prétention de valider le modèle (ce qui ne relève pas des activités de projet), mais au contraire de fournir une évaluation de la qualité des simulations dans la perspective de la dispersion des polluants atmosphériques. Ainsi, les valeurs de température, la vitesse et la direction du vent et (dans certains cas) la précipitation calculés à partir du modèle sur le domaine ALCOTRA ont été analysées et comparées avec des valeurs mesurées auprès des stations météorologiques au sol ; la comparaison entre les profils verticaux de température a par ailleurs été effectuée (uniquement dans la plaine du Pô). Les résultats obtenus pour les différentes régions sont décrits ci-après.

3.3.2.3.1 Comparaison à partir des données météorologiques simulées-observées dans la région PACA

Parmi l'ensemble des stations d'observations du réseau national de Météo-France en région PACA, 3 stations ont été sélectionnées pour évaluer la qualité des simulations réalisées avec WRF. Ces stations sont classées parmi les stations synoptiques et permettent de représenter différents environnements caractéristiques de la région PACA. Elles sont représentées sur la figure 3.3.2.3.1-1. La station de Marnagnane est située au Nord-Ouest de Marseille et se trouve sous l'influence régulière du Mistral, vent de Nord intense canalisé entre les contreforts du Massif Central et des Alpes, formant la Vallée du Rhône. La station de Nice se trouve sur le littoral de la Côte d'Azur et se trouve sous l'influence de l'alternance de brise terre-mer. Enfin, la station d'Embrun est située dans le Nord de la région PACA et est représentative des conditions climatiques des zones montagneuses de la région. Les graphiques de comparaison sont données en Annexe E de ce rapport pour chacune des périodes de simulations.

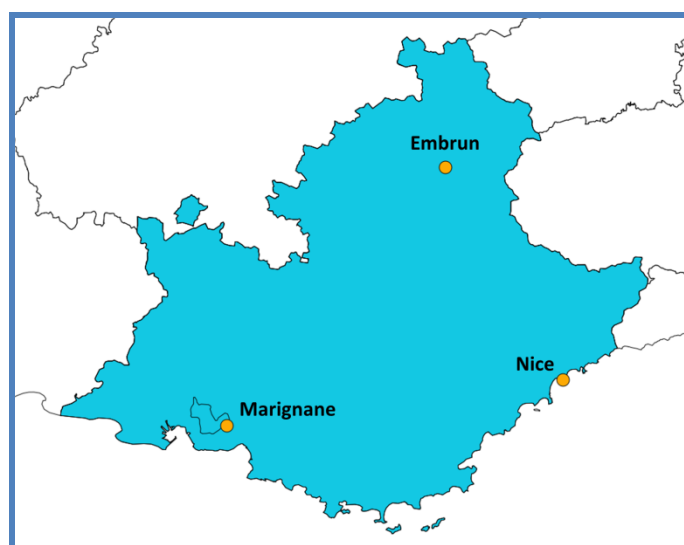


Figure 3.3.2.3.1-1 : Localisation des stations Météo-France utilisées pour la comparaison des mesures-modèles dans la région PACA.

Les principaux épisodes pluvieux sont reproduits par le modèle mais les cumuls sont le plus souvent sous-estimés. Cette tendance est observée pour les deux périodes de simulations.

Les champs de température moyens sont bien reproduits sur les différentes stations mais les extrêmes sont plus difficilement atteints. Ainsi, les maximums durant la période estivale sont sous-estimés à l'inverse de la période hivernale où les minimums sont surestimés. Ce constat a déjà été réalisé dans plusieurs études utilisant le modèle WRF.

Les champs de vent, qui vont piloter la partie transport/dispersion dans les modèles, semblent être surestimés, principalement lors de situations de vents calmes. Bien que les principales directions de vent semblent correctement identifiées par le modèle, il apparait des différences significatives sur les directions secondaires. Cette dernière observation est à mettre en perspective avec la résolution spatiale du modèle (36km²) qui ne permet pas de reproduire de manière fine les écoulements dans les échelles spatiales inférieures.

3.3.2.3.2 Comparaison des données météorologiques mesurées-observées dans le Piémont et dans la Vallée d'Aoste.

Les comparaisons ont été effectuées sur une sélection des stations les plus représentatives du réseau météo-hydrographique de l'ARPA du Piémont, réseau utilisé opérationnellement pour la prévision et de la prévention du risque hydro-géologique et météorologique. La figure 3.3.2.3.2.-1 illustre la localisation des stations utilisées : au total 71 stations entre le Piémont et la Vallée d'Aoste principalement situées dans les plaines, collines ou fonds des vallées.

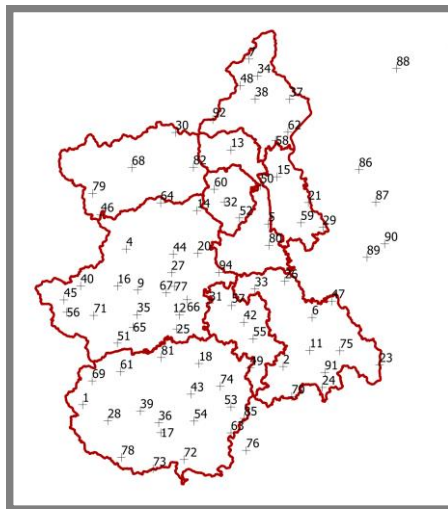


Figure 3.3.2.3.2-1 : distribution spatiale des points de mesure utilisés dans la comparaison ; on constate que des stations situées en dehors du territoire Alcotra, en Lombardie, ont également été utilisées.

L'analyse a été effectuée pour chacune des deux périodes de simulation, à la fois en calculant sur chaque station les principaux indicateurs statistiques de performance (décrits en détail dans le paragraphe 3.3.3 et résumés sur la table 3.3.2.3.2-1), et à la fois par la comparaison entre les séries historiques et roses des vents. Tous les calculs ont été effectués avec le logiciel OpenAir [³⁹]

³⁹ Carslaw, D. C. and K. Ropkins, (2012) openair - an R package for air quality data analysis. Environmental Modelling & Software. Volume 27-28, 52-61

Table 3.3.2.3-1 : Indicateurs statistiques de performance utilisés pour la comparaison observée simulée. Les mêmes indicateurs sont décrits en détail dans le paragraphe 3.3

Indice	Descrizione
MB	Erreur moyenne (Mean Bias) : différence moyenne entre les données simulées et observées (valeur cible = 0). Indique la tendance
NMB	Erreur moyenne normalisée (Normalised Mean Bias): erreur moyenne standardisée par la moyenne des données observées (valeur cible = 0)
RMSE	Racine de l'erreur quadratique moyenne (Root mean square error) : estime les différences entre les données simulées et observées (valeur cible = 0)
R	Coefficient de corrélation de Pearson: exprime la corrélation linéaire entre les données simulées et observées (valeur cible = 1)
FAC2	Facteur FAC2 (fraction of prediction within a factor of two): indique la fraction de la série de données pour lesquelles la relation entre les données simulées et observées est comprise dans l'intervalle [0.5;2]. Il varie entre 0, si aucune données se situe dans la gamme, et 1 si toutes les données se trouvent dans l'intervalle.

Les figures 3.3.2.3.2-2 et 3.3.2.3.2-3 illustrent les distributions des indicateurs statistiques respectivement pour la température et la vitesse du vent au sol. La température est parfaitement reproduite dans l'épisode estival (FAC2=1, NMB≈0, r≈0.9) et plutôt bien reproduite dans l'épisode hivernal (FAC2≈4, NMB≈0, r≈0.75), alors que pour la vitesse du vent, l'accord entre observation et simulation est moins satisfaisant et ne laisse pas apparaître de différences significatives entre les deux épisodes.

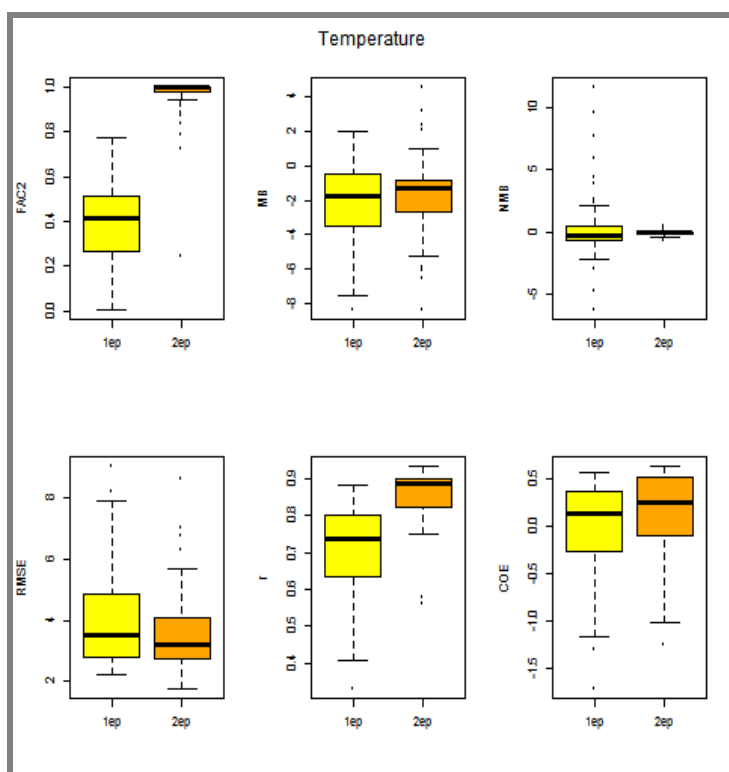


Figure 3.3.2.3.2-2 : boxplot (boîte à moustaches) des distributions des indices statistiques pour la température au sol. "1ep" désigne la période hivernale de simulation (en jaune), et "2ep" la période estivale (en orange).

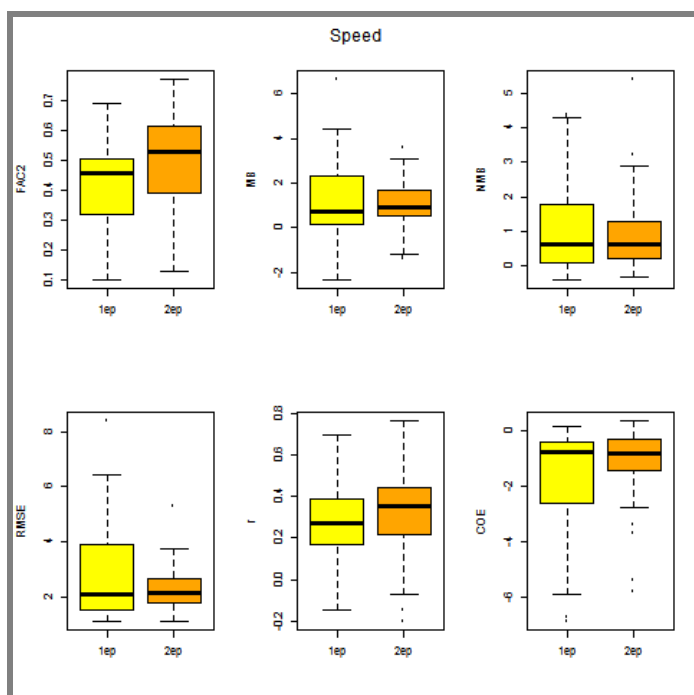


Figure 3.3.2.3-3 : boxplot (boîte à moustaches) des distributions des indices statistiques pour la vitesse du vent au sol. "1ep" désigne la période hivernale de simulation (en jaune), et "2ep" la période estivale (en orange).

La comparaison entre les séries historiques de la température laisse apparaître une parfaite cohérence entre observation et simulation pour la période estivale sur la quasi-totalité des stations ; pour la période hivernale, l'évolution dans le temps est bien reproduite dans les stations de basse montagne et de plaine, alors que l'on observe de plus grosses différences pour les stations de haute montagne. On constate par ailleurs dans la reproduction du cycle journalier une tendance générale à la sous-estimation des valeurs les plus hautes et à la surestimation des valeurs les plus basses. Les figures ci-après illustrent, à titre d'exemple, des résultats concernant la station de Carmagnola, station de plaine (232 mètres au-dessus du niveau de la mer) à proximité de Turin et la station du Col de la Lombarde, station de montagne (2305 m) à la frontière entre l'Italie et la France.

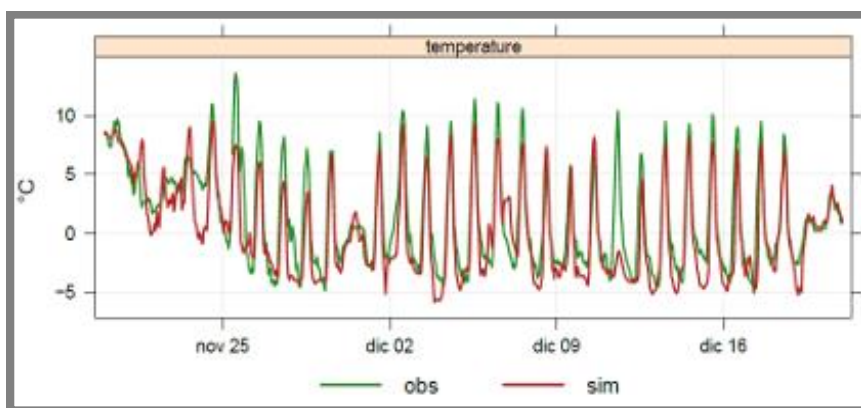


Figure 3.3.2.3-4 : comparaison entre la série historique simulée (en rouge) et observée (en vert) pour la période hivernale dans la station de Carmagnola.

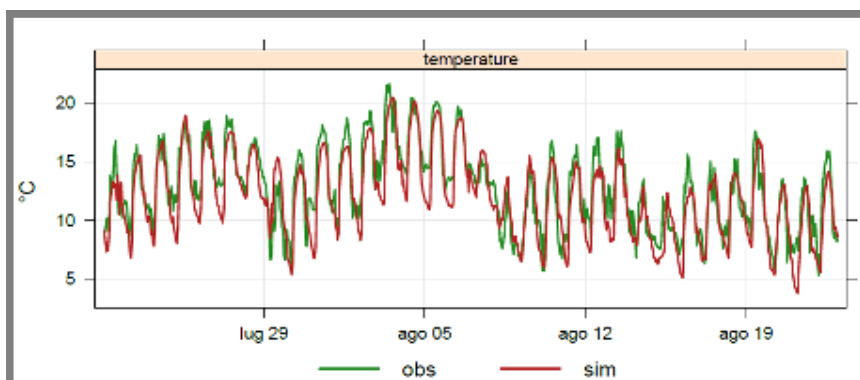


Figure 3.3.2.3.2-5 : comparaison entre la série historique simulée (en rouge) et observée (en vert) pour la période estivale dans la station du Col de la Lombarde.

En ce qui concerne la vitesse et la direction du vent (figure 3.3.2.3.2-6), on ne constate pas de différences significatives entre les deux périodes de simulation mais une nette tendance à la surestimation de la vitesse apparaît, notamment dans les stations de plaine. Il est important de souligner qu'il s'agit là d'un comportement typique des modèles météorologiques à zone limitée non hydrostatiques (comme WRF). La principale direction est généralement bien reproduite, à l'exception de certaines stations situées dans de petites vallées des Alpes ou de l'Apennin, alors que les directions secondaires sont moins bien reproduites. Ce résultat, comme nous l'avons déjà souligné dans le paragraphe précédent concernant la région PACA, est dû à la résolution adoptée dans les simulations (six kilomètres), une distance insuffisante pour reproduire les dynamiques typiques des territoires à orographie complexe.

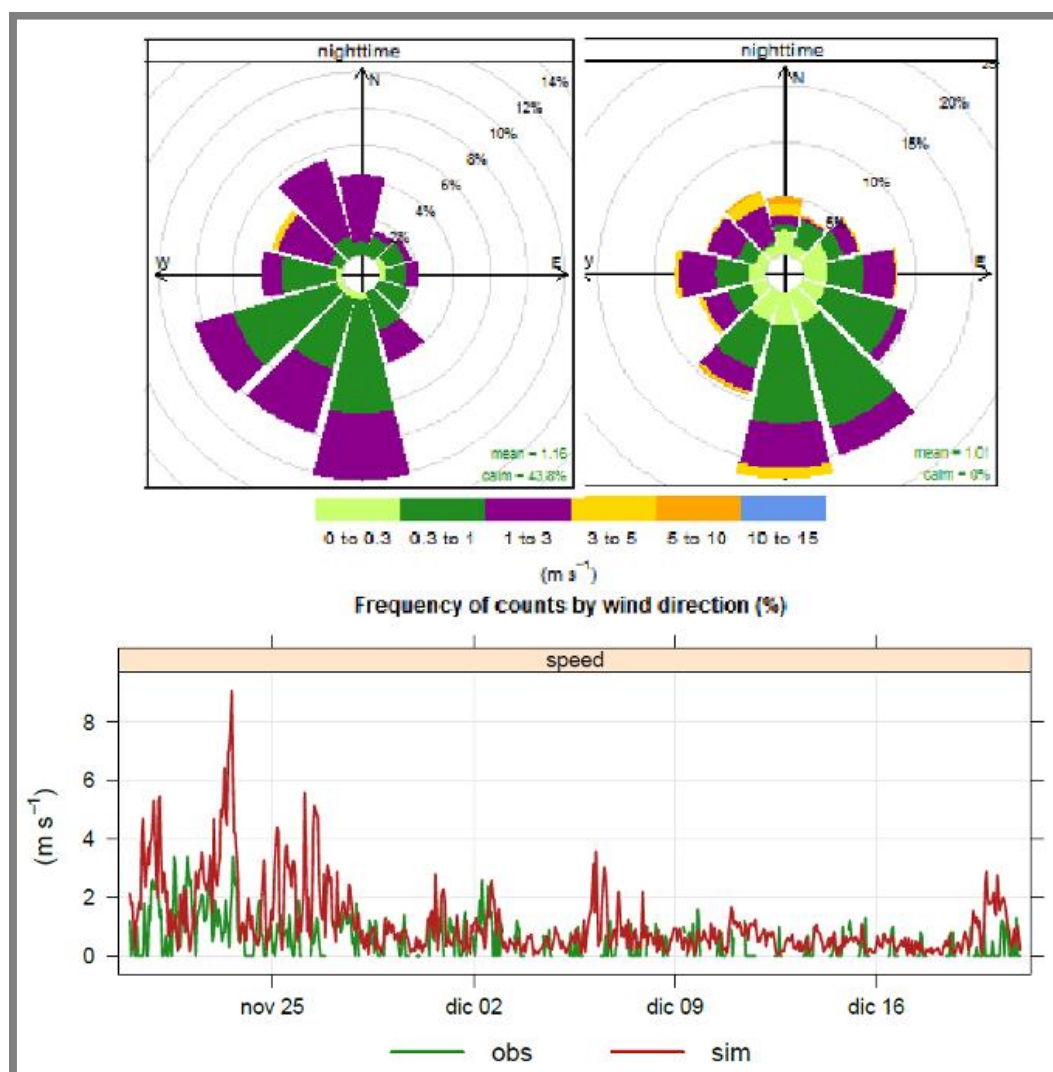


Figure 3.3.2.3.2-6 : vitesse et direction du vent dans la station de Carmagnola pendant la période hivernale. En bas, comparaison observation/simulation entre les évolutions des vitesses du vent, en haut entre les roses des vents nocturnes.

3.3.2.3.3 Comparaison entre les profils verticaux de température simulés et observés.

Les profils verticaux de température simulés par le modèle WRF ont été comparés avec les mesures obtenues par les radiosondages verticaux avec des ballons sondes effectués à l'aéroport de Cuneo Levaldigi (dans le Piémont, entre les villes de Turin et Cuneo) et l'aéroport de Milan Linate (à proximité de la ville de Milan), deux fois par jour, à 00h et à 12 h UTC. Ce dernier, bien qu'étant en bordure du domaine d'ALCOTRA, est représentatif des conditions de toute la plaine du Pô. L'analyse réalisée montre à que le modèle reproduit parfaitement bien les profils verticaux de température, notamment dans les basses couches atmosphériques, également en présence de conditions d'inversion thermique.

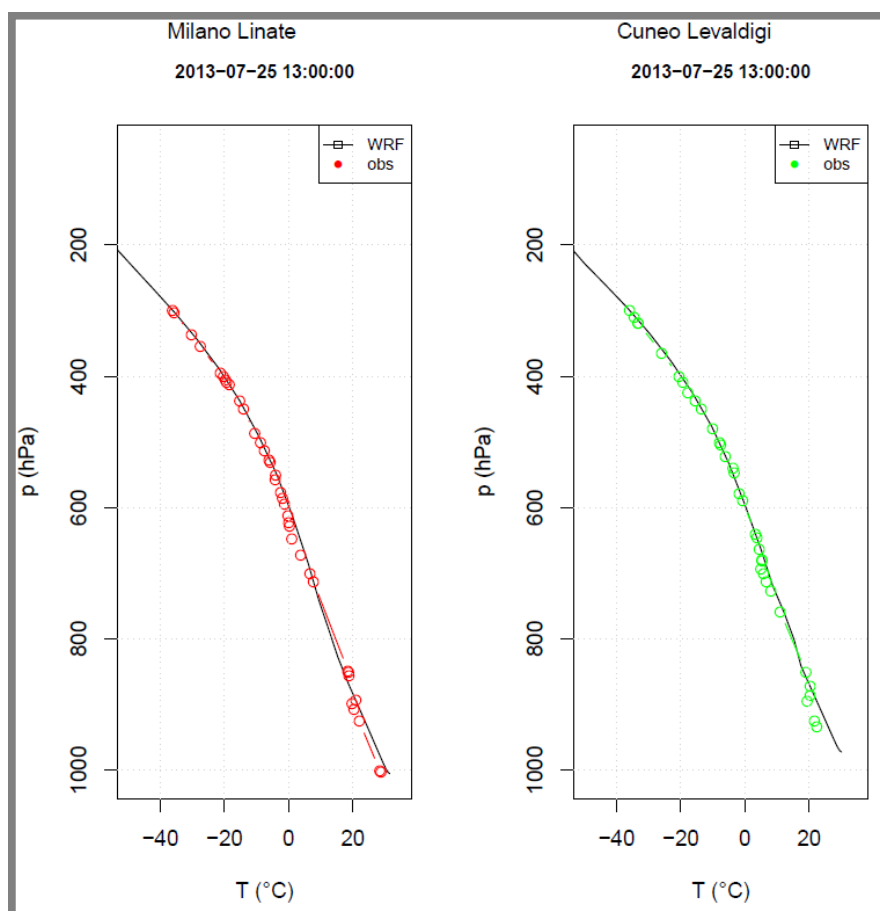


Figure 3.3.2.3.3-1 : exemple de comparaison entre les profils verticaux de température simulés (ligne continue) et observés (ligne en pointillés verts pour le radiosondage de Cuneo, rouge pour celui de Milan) à 12 UTC le 25 juillet 2013 (période estivale).

3.3.3 Analyse des champs de concentration calculés avec les modèles

Les résultats des simulations effectuées en utilisant des cartes de concentration, des indices statistiques, des graphiques et des comparaisons ponctuelles avec les valeurs mesurées dans certaines stations sont présentés dans ce paragraphe.

Les indices statistiques les plus utilisés pour la validation des modèles sont⁴⁰ :

- FAC2 (fraction of predictions within a factor of two) : représente la fraction des valeurs calculées par le modèle pour lesquelles $0.5 \leq \frac{M_i}{O_i} \leq 2$; si le modèle était parfait FAC2=1 ;
- MB (Mean Bias) : donne une indication de la surestimation ou de la sous-estimation du modèle et se calcule avec $MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)$;

⁴⁰ M_i : modeled, valeurs calculées à partir du modèle – O_i : observed, valeurs mesurées
SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

- NMB (Normalised Mean Bias) : est le MB divisé par la concentration mesurée $NMB = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i}$ et est utilisé pour comparer les polluants avec différents niveaux de concentration ;
- RMSE (Root Mean Squared Error) : est une mesure de l'erreur moyenne quadratique avec le carré de l'erreur et estime les différences entre les données simulées et observées (plus on approche de 0, plus le modèle est bon) $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{N}}$;
- r (correlation coefficient) : $r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{M_i - \bar{M}}{\sigma_M} \right) \left(\frac{O_i - \bar{O}}{\sigma_O} \right)$ est une mesure de la linéarité de la relation entre deux variables (pour $r = \pm 1$ la corrélation est linéaire, pour $r = 0$ il n'y a pas de corrélation entre les variables).

Ces indices ont été calculés, pour chaque modèle, tout d'abord sur l'ensemble de toutes les stations, puis en séparant les stations par région géographique.

La corrélation entre deux variables peut également être analysée en utilisant le *scatter plot*, un graphique dans lequel les données sont visualisées comme un ensemble de points dont les coordonnées sont définies par les deux variables (une reportée sur l'axe horizontal et l'autre sur l'axe vertical). Dans les graphiques utilisés dans ce rapport, trois droites ont été ajoutées au scatter plot : la ligne continue représente le rapport 1:1 entre les deux variables, alors que les lignes hachurées représentent les rapports 1:0.5 et 1:2. Ces lignes permettent de visualiser à quel point un groupe de points s'approche du rapport 1:1 et également combien de points entrent dans l'ensemble FAC2.

3.3.3.1 Les résultats des simulations effectuées avec FARM

3.3.3.1.1 PM10

Les figures ci-après représentent les cartes des concentrations moyennes des PM10 résultant des simulations effectuées avec le modèle FARM pendant les deux périodes. Il est évident que pendant l'épisode estival les valeurs sont réellement basses, alors que pendant l'épisode hivernal les niveaux les plus élevés ont été mesurés dans la zone des plaines du Piémont, dans la zone autour de la ville de Lyon et dans la zone de Marseille.

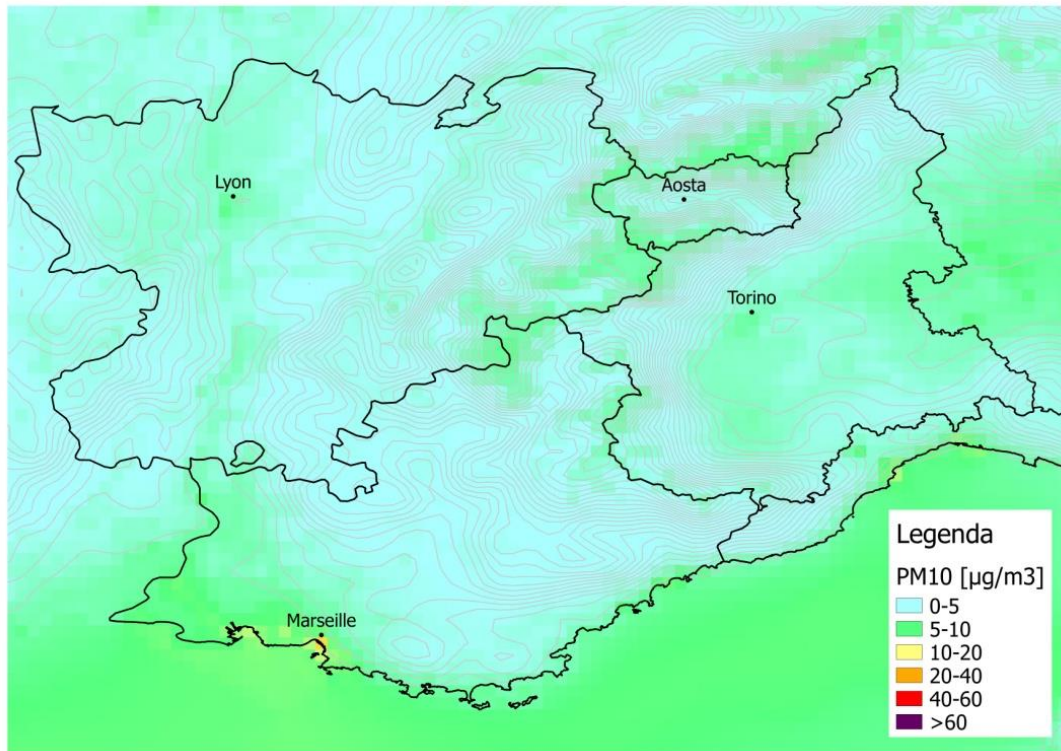


Figure 3.3.3.1.1-1 : Concentrations moyennes de PM10 simulées avec FARM – période estivael.

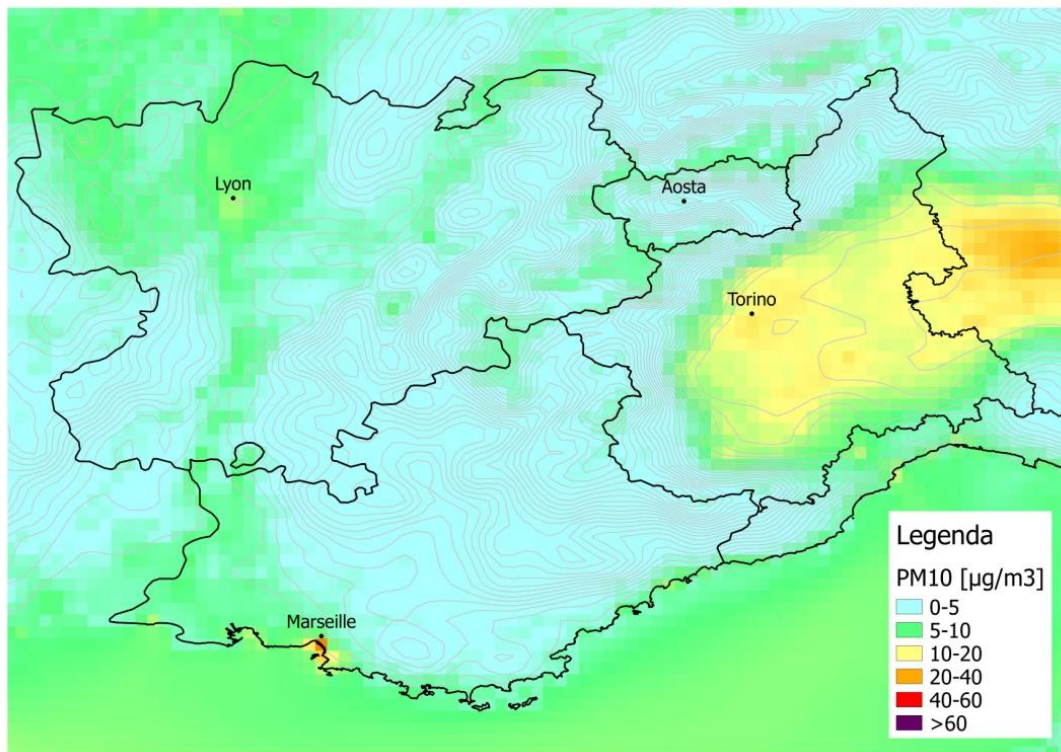


Figure 3.3.3.1.1-2 : Concentrations moyennes de PM10 simulées avec FARM – période hivernale.

La table suivante contient les valeurs des principaux indices statistiques calculés en considérant toutes les stations pour lesquelles les données de mesures sont disponibles. Les indices MB et NMB négatifs indiquent la sous-estimation du modèle ; la valeur du coefficient de corrélation "r" sur toute la zone ALCOTRA et sur la région PACA et Piémont est acceptable alors qu'elle est beaucoup plus basse sur la région Rhône-Alpes et Vallée d'Aoste ; pendant l'épisode hivernal, les valeurs de l'erreur quadrique moyenne sont toujours plus élevées, presque le double par rapport au cas estival.

Table 3.3.3.1.1-1 : Indices statistiques pour le modèle FARM – PM10

PM10 - FARM		FAC2	MB	NMB	RMSE	r	COE
Zone ALCOTRA	estate	0.3	-11.5	-0.6	13.7	0.6	-0.7
	inverno	0.3	-23.3	-0.7	30.8	0.6	-0.3
Région Provence-Alpes-Côte d'Azur	estate	0.2	-16.5	-0.6	17.8	0.6	-1.5
	inverno	0.2	-21.7	-0.7	26.9	0.4	-0.7
Région Piémonte	estate	0.3	-10.0	-0.6	12.4	0.5	-0.6
	inverno	0.4	-22.8	-0.6	32.0	0.7	0.0
Région Rhône-Alpes	estate	0.2	-9.9	-0.6	11.7	0.3	-1.0
	inverno	0.2	-24.2	-0.7	31.6	0.3	-0.4
Région Valle d'Aosta	estate	0.3	-9.8	-0.6	12.1	0.5	-0.5
	inverno	0.0	-28.1	-0.9	33.2	0.0	-1.0

Le *scatter plot* construit avec les concentrations moyennes de PM10 calculées avec FARM et mesurées confirme la sous-estimation du modèle.

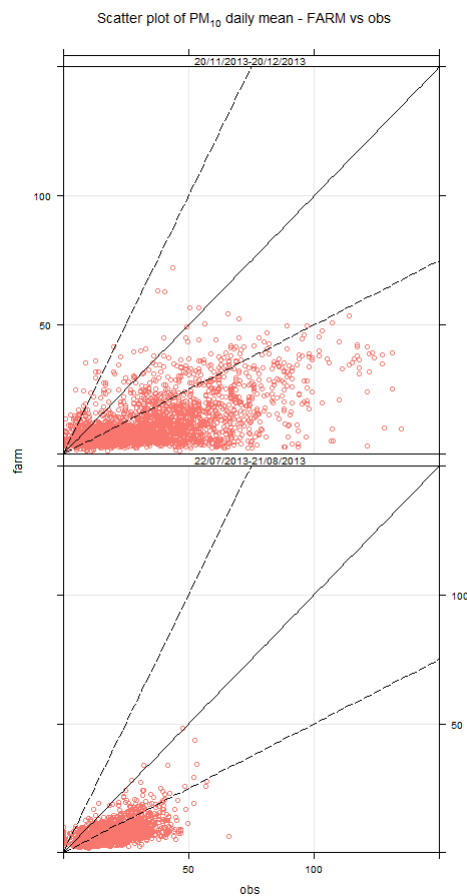


Figure 3.3.3.1.1-3 : Scatter plot des concentrations moyennes de PM₁₀ simulées avec FARM par rapport à celles mesurées (haut: période hivernale; bas période estivale)

3.3.3.1.2 PM_{2.5}

Les figures suivantes représentent les cartes des moyennes calculées sur les deux périodes des concentrations de PM_{2.5} résultant des simulations effectuées avec le modèle FARM : la distribution spatiale des PM_{2.5} reprend celle des PM₁₀, avec des valeurs généralement basses pendant la période estivale et des valeurs plus élevées pendant la période hivernale notamment dans la zone des plaines du Piémont, dans la zone autour de la ville de Lyon et dans la zone de Marseille.

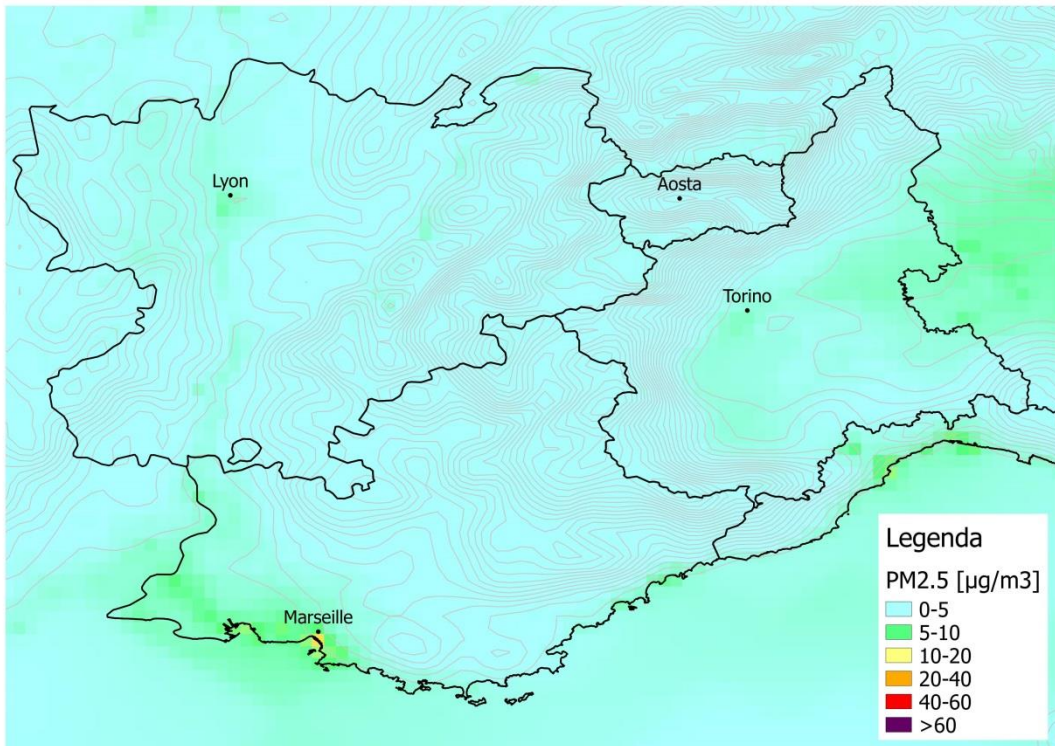


Figure 3.3.3.1.2-1 : Concentrations moyennes de PM2.5 simulées avec FARM – période estivale.

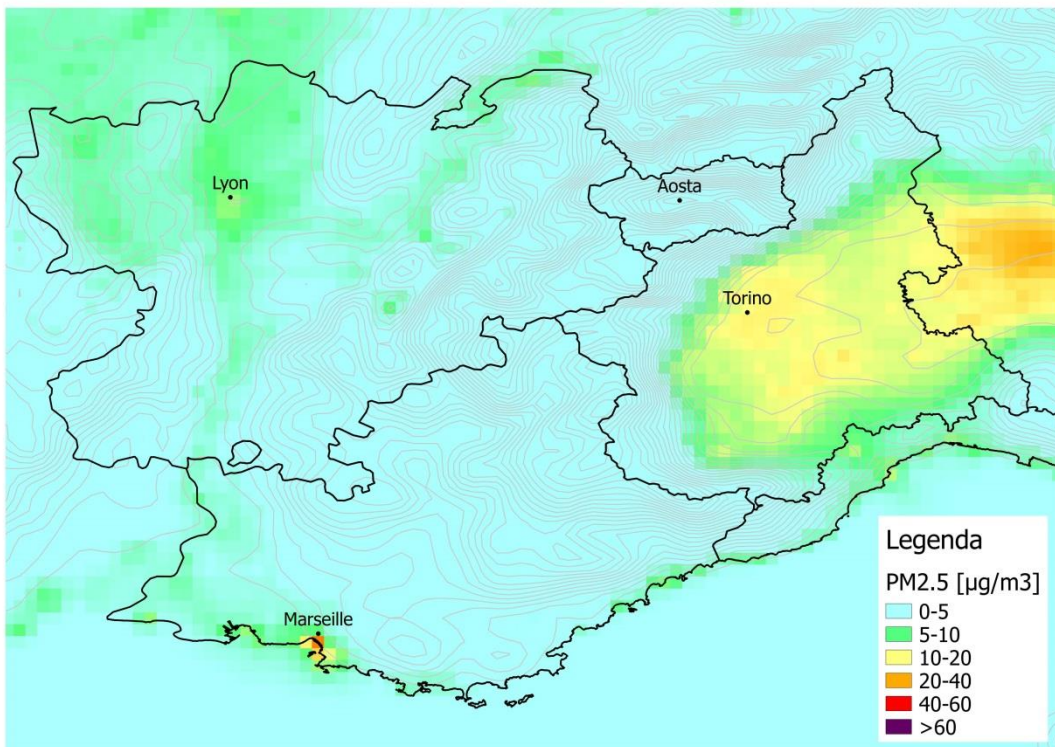


Figure 3.3.3.1.2-2 : Concentrations moyennes de PM2.5 simulées avec FARM – période hivernale.

Dans le cas des concentrations de PM_{2.5} également, les indices statistiques laissent apparaître une sous-estimation des modèles, plus marquée dans l'épisode hivernal.

Table 3.3.3.1.2-1 : Résultat pour le modèle FARM – PM_{2.5}

PM _{2.5} - FARM		FAC2	MB	NMB	RMSE	r	COE
Zone ALCOTRA	estate	0.6	-4.8	-0.4	6.6	0.5	-0.3
	inverno	0.3	-16.4	-0.6	23.9	0.7	0.0
Région Provence-Alpes-Côte d'Azur	estate	0.6	-5.0	-0.4	6.8	0.6	-0.3
	inverno	0.3	-14.8	-0.6	19.3	0.3	-0.5
Région Piemonte	estate	0.6	-5.0	-0.5	6.8	0.5	-0.3
	inverno	0.4	-16.2	-0.5	25.4	0.8	0.2
Région Rhône-Alpes	estate	0.7	-4.2	-0.4	5.7	0.3	-0.4
	inverno	0.3	-16.9	-0.7	22.5	0.5	-0.2
Région Valle d'Aosta	estate	0.6	-4.1	-0.5	5.4	0.7	-0.2
	inverno	0.0	-26.2	-0.9	29.1	0.0	-1.6

Le scatter plot construit avec les concentrations moyennes de PM_{2.5} calculées avec FARM et mesurées confirme la sous-estimation du modèle.

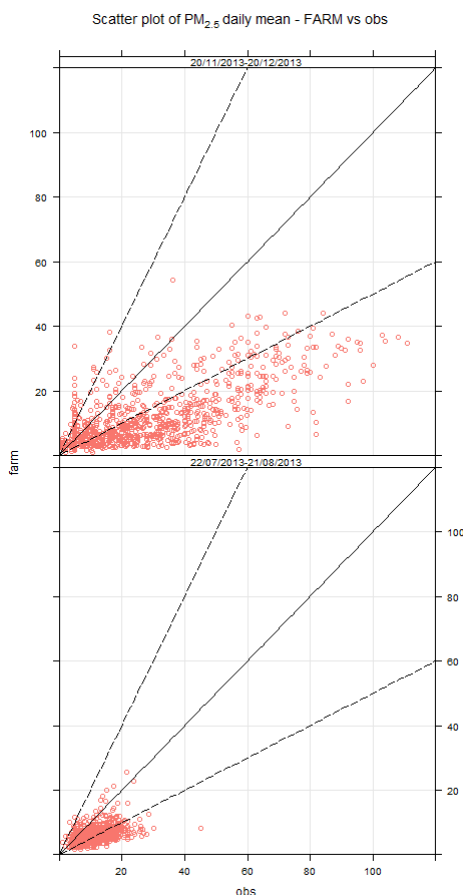


Figure 3.3.3.1.2-2 : Scatter plot des concentrations moyennes de PM_{2.5} simulées avec FARM par rapport à celles mesurées (haut: période hivernale; bas période estivale)

3.3.3.2 Les résultats des simulations effectuées avec CAMx

3.3.3.2.1 PM10

Les figures suivantes contiennent les cartes des moyennes des concentrations de PM10 calculées sur les deux périodes résultant des simulations effectuées avec le modèle CAMx. Pendant la période estivale, les valeurs les plus élevées atteignent $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans la zone de Turin, à côté de Lyon et de Nice, alors que sur le reste du territoire, les niveaux sont plus bas. Pendant la période hivernale, le modèle prévoit des valeurs de concentration également élevées, supérieures à $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans la zone constituée de plaines du Piémont et autour de Lyon.

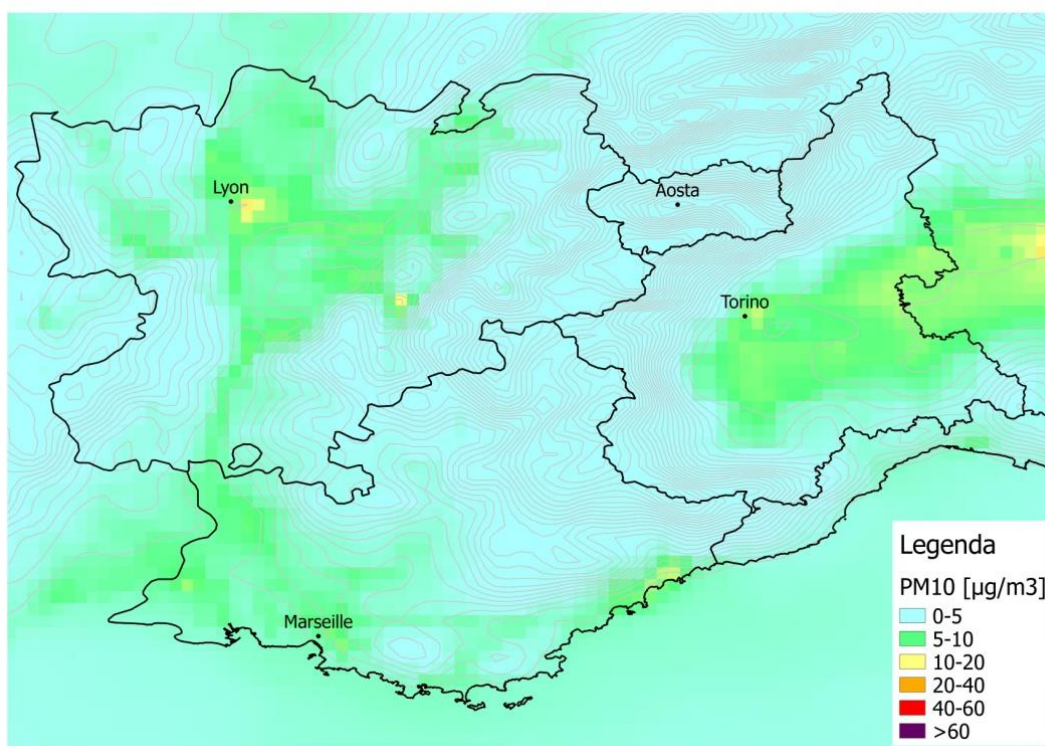


Figure 3.3.3.2.1-1 : Concentrations moyennes de PM10 simulées avec CAMx – période estivale.

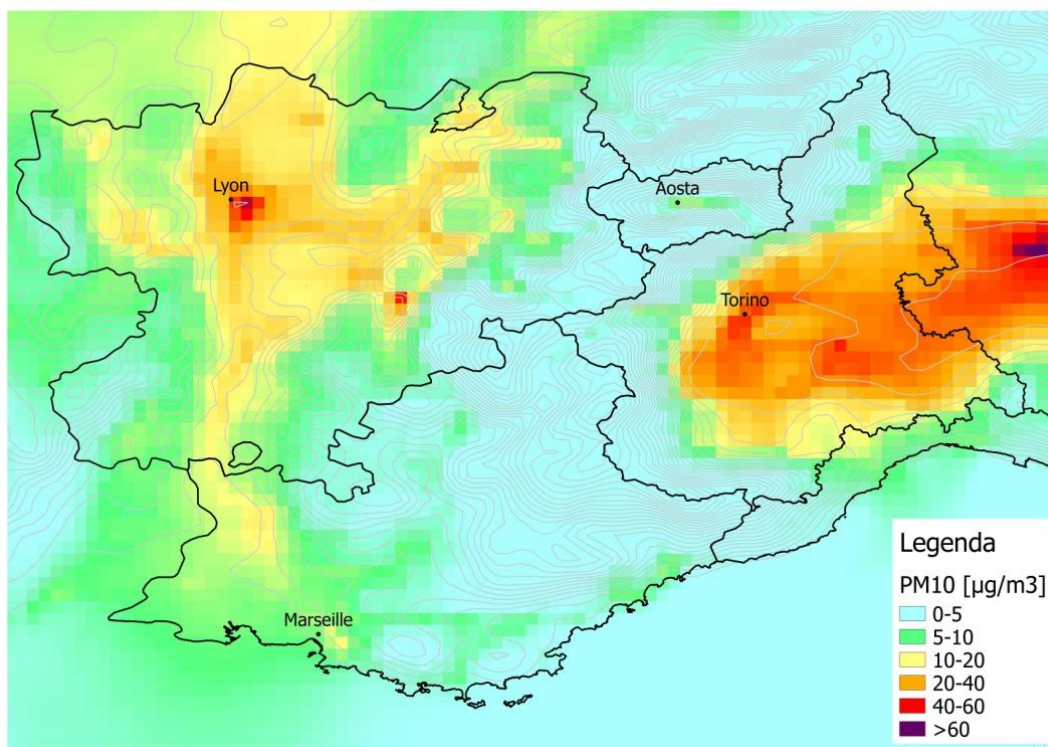


Figure 3.3.3.2.1-2 : Concentrations moyennes de PM10 simulées avec CAMx – période hivernale.

Pour le modèle CAMx également, on constate, d'après les indices statistiques, une sous-estimation du modèle notamment concernant les stations des régions PACA et de la Vallée d'Aoste.

Table 3.3.3.2.1-1 : Résultat pour le modèle CAMx– PM10

PM10 - CAMx		FAC2	MB	NMB	RMSE	r
Zone ALCOTRA	estate	0.4	-9.8	-0.5	13.0	0.4
	inverno	0.6	-9.7	-0.3	23.1	0.6
Région Provence-Alpes-Côte d'Azur	estate	0.2	-16.5	-0.6	18.1	0.5
	inverno	0.3	-20.8	-0.6	26.2	0.4
Région Piemonte	estate	0.5	-8.6	-0.5	11.4	0.4
	inverno	0.8	-7.9	-0.2	18.8	0.8
Région Rhône-Alpes	estate	0.6	-6.0	-0.4	9.4	0.3
	inverno	0.7	-2.1	-0.1	24.1	0.4
Région Valle d'Aosta	estate	0.1	-11.9	-0.8	14.2	0.3
	inverno	0.1	-26.2	-0.8	31.3	0.2

Le scatter plot construit avec les concentrations moyennes de PM10 calculées avec CAMx et mesurées confirme la sous-estimation du modèle pendant la période estivale alors que pendant la période hivernale les valeurs calculées sont mieux reproduites et dans certains cas on constate même une surestimation de CAMx.

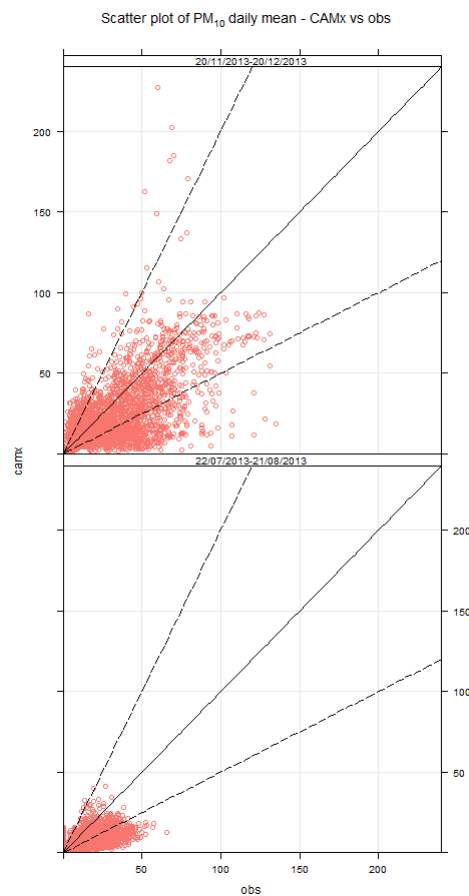


Figure 3.3.3.2.1-3 : Scatter plot des concentrations moyennes de PM10 simulées avec CAMx par rapport à celles mesurées (haut: période hivernale; bas période estivale)

3.3.3.2.2 PM2.5

Les figures suivantes représentent les cartes des moyennes calculées sur les deux périodes des concentrations de PM2.5 résultant des simulations effectuées avec le modèle CAMx : comme précédemment, la distribution spatiale des PM2.5 reprend celle des PM10.

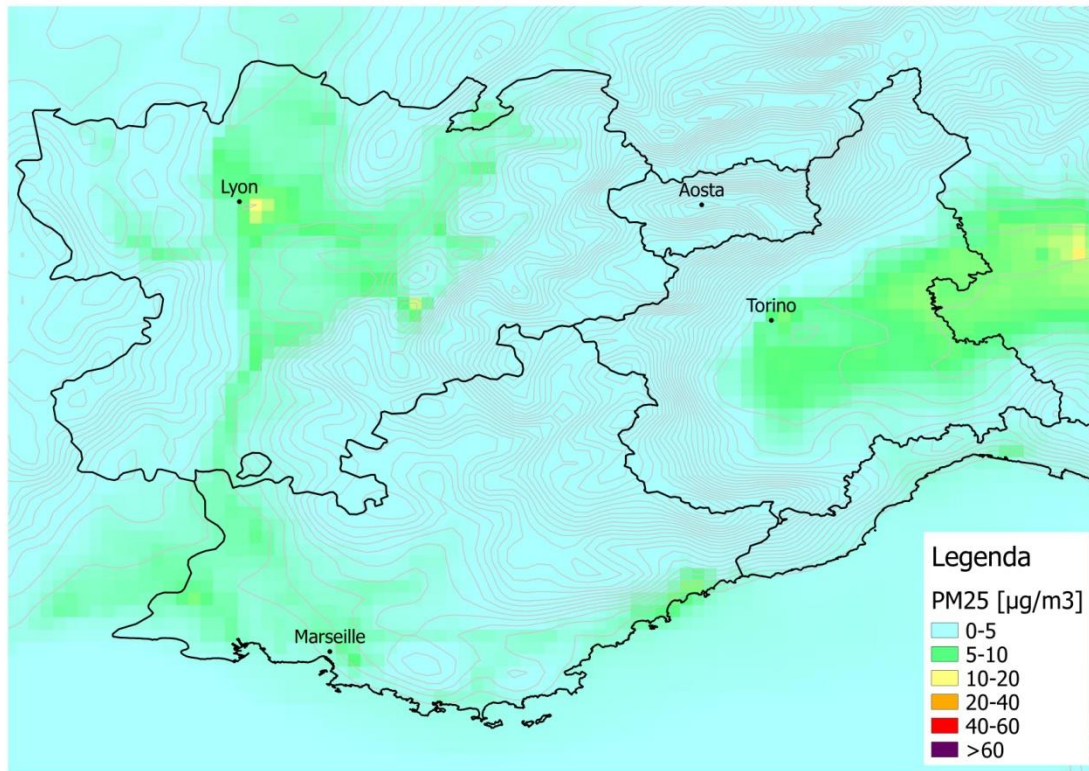


Figure 3.3.3.2.2-1 : Concentrations moyennes de PM2.5 simulées avec CAMx – période estivale.

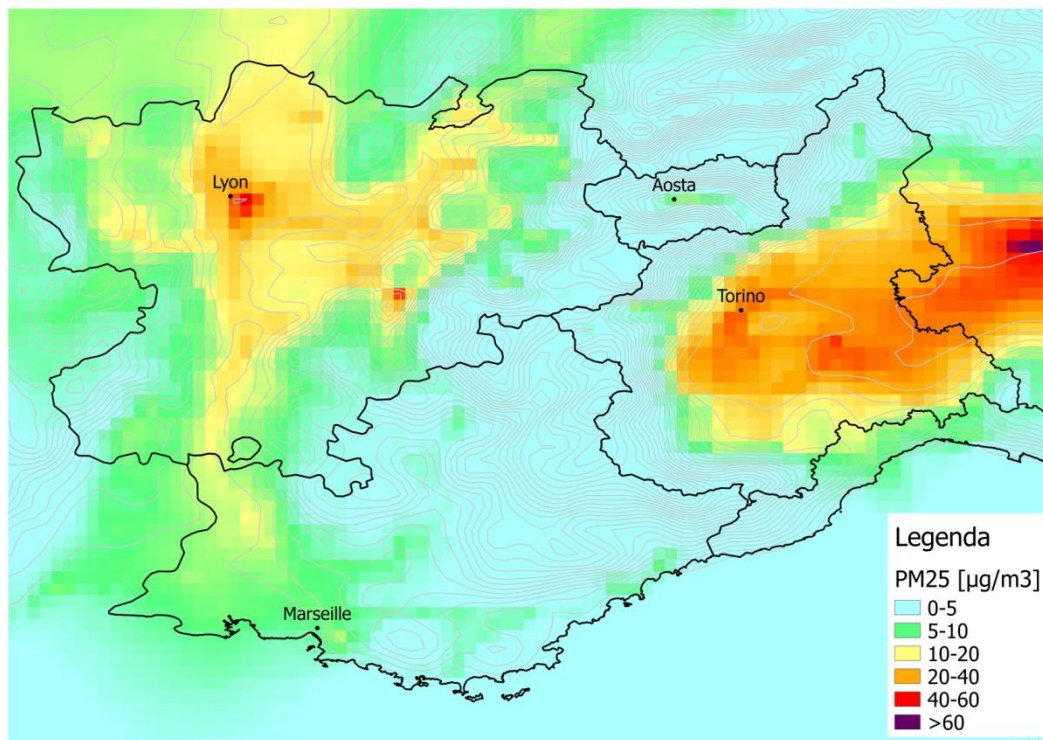


Figure 3.3.3.2.2-2 : Concentrations moyennes de PM2.5 simulées avec CAMx – période hivernale.

Table 3.3.3.2.2-1 : Résultat pour le modèle CAMx – PM2.5

PM2.5 - CAMx		FAC2	MB	NMB	RMSE	r
Zone ALCOTRA	estate	0.6	-3.2	-0.3	6.3	0.3
	inverno	0.6	-4.2	-0.1	18.0	0.7
Région Provence-Alpes-Côte d'Azur	estate	0.6	-4.6	-0.4	6.3	0.6
	inverno	0.3	-13.9	-0.6	18.5	0.3
Région Piemonte	estate	0.6	-3.8	-0.4	6.3	0.4
	inverno	0.7	-3.9	-0.1	14.9	0.8
Région Rhône-Alpes	estate	0.8	0.3	0.0	6.3	0.1
	inverno	0.7	5.6	0.2	22.9	0.5
Région Valle d'Aosta	estate	0.4	-5.7	-0.6	7.1	0.5
	inverno	0.2	-21.3	-0.7	24.6	0.2

Le scatter plot construit avec les concentrations moyennes de PM2.5 calculées avec CAMx et mesurées indique un meilleur comportement du modèle pendant l'épisode estival, alors que, tout comme pour le PM10, on constate pendant l'épisode hivernal quelques cas de surestimation du modèle.

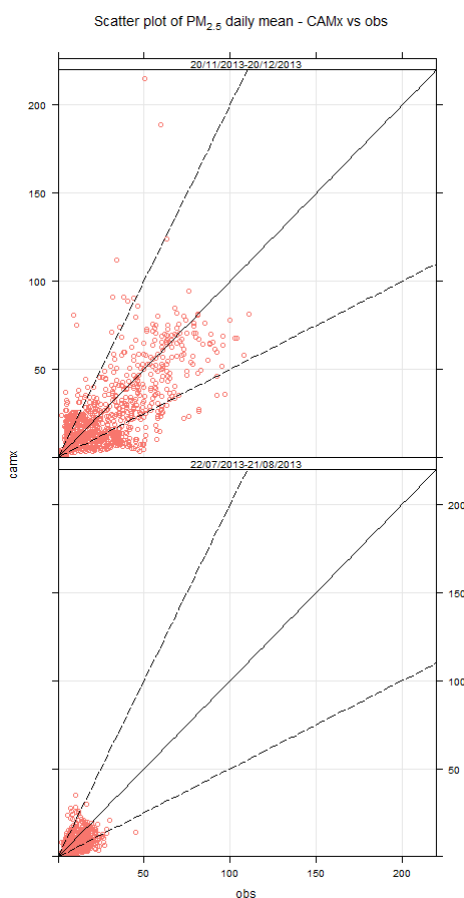


Figure 3.3.3.2.2-3 : Scatter plot des concentrations moyennes de PM2.5 simulées avec CAMx par rapport à celles mesurées (haut: période hivernale; bas période estivale)

3.3.3.3 Comparaison des modèles FARM et CAMx

En comparant les résultats obtenus avec les deux modèles, les observations suivantes peuvent être faites :

- les indices statistiques calculés indiquent globalement un comportement identique des deux modèles à la fois pour les PM10 et pour les PM2.5, dans le sens où les deux sous-estiment les concentrations en particules sur toute la zone ALCOTRA, surtout pendant l'épisode hivernal, avec de "meilleures" performances pour le modèle CAMx ;
- il ressort des cartes de concentration que les deux modèles estiment pour la période hivernale les niveaux de PM10 et de PM2.5 plus élevés dans la zone des plaines du Piémont et en Rhône-Alpes ;
- pendant la période estivale, les valeurs prévues par FARM sont basses sur tout le domaine, alors que CAMx prévoit des valeurs un peu plus élevées sur la zone des plaines du Piémont et en Rhône-Alpes ;
- la distribution spatiale des PM10 et des PM2.5 est la même.

Les figures suivantes contiennent les cartes construites comme moyennes entre les champs de concentration calculés avec CAMx et avec FARM.

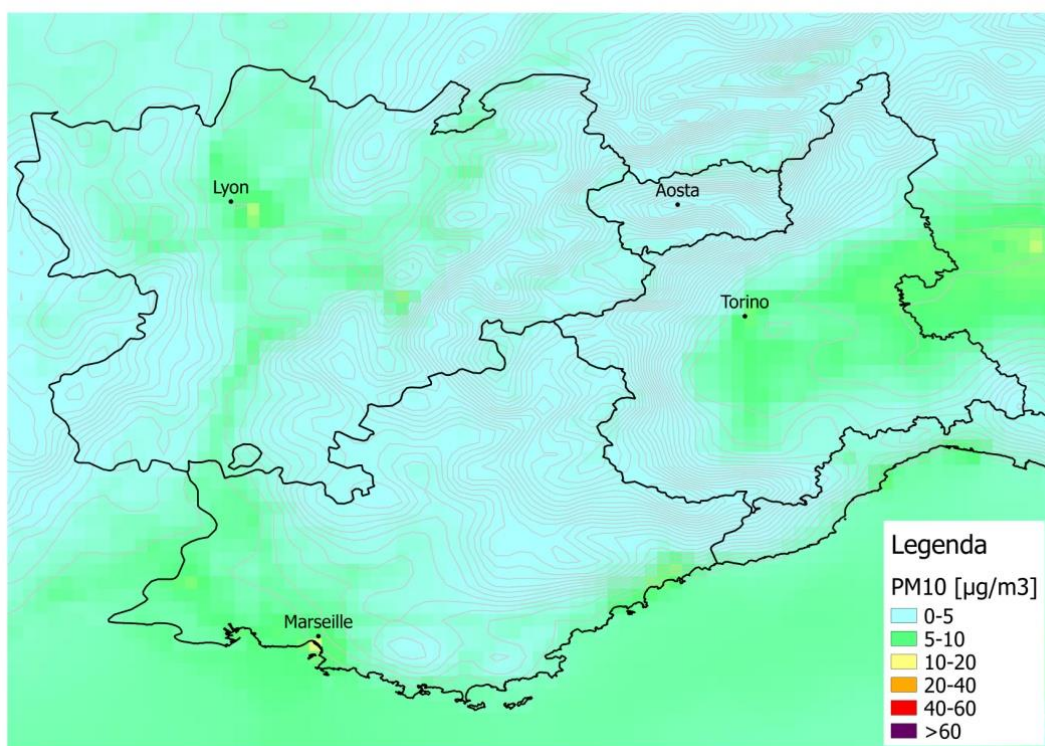


Figure 3.3.3.3-1 : Moyenne entre les concentrations de PM10 simulées avec CAMx et celles simulées avec FARM – période estivale.

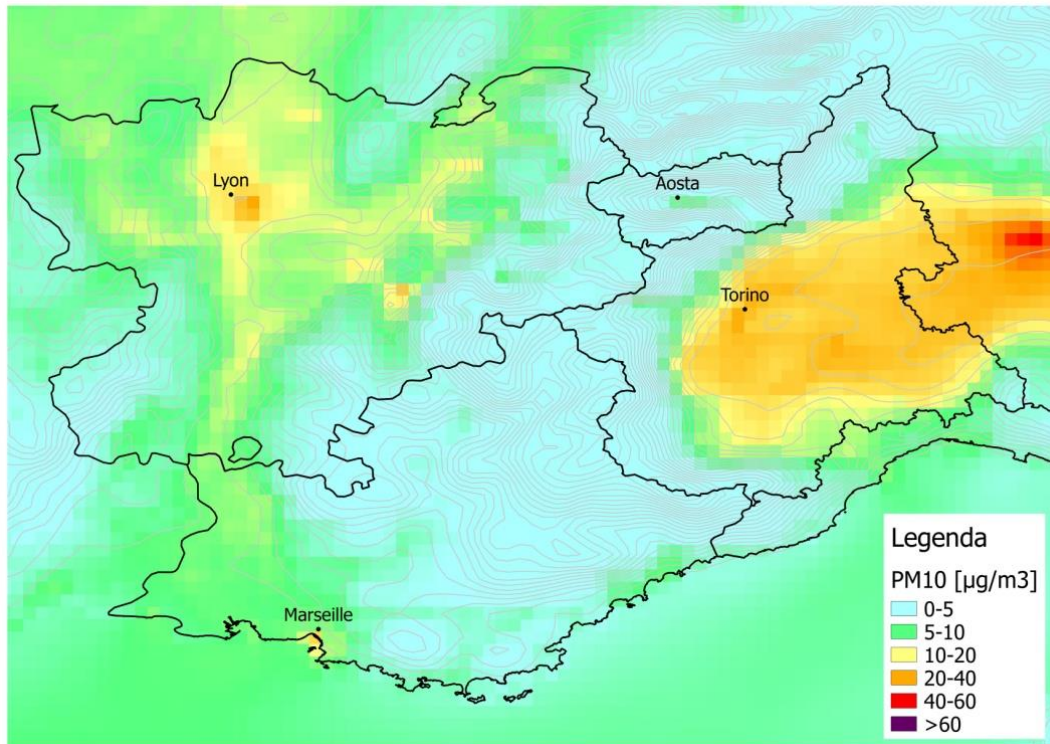


Figure 3.3.3-2 : Moyenne entre les concentrations de PM10 simulées avec CAMx et celles simulées avec FARM – période hivernale.

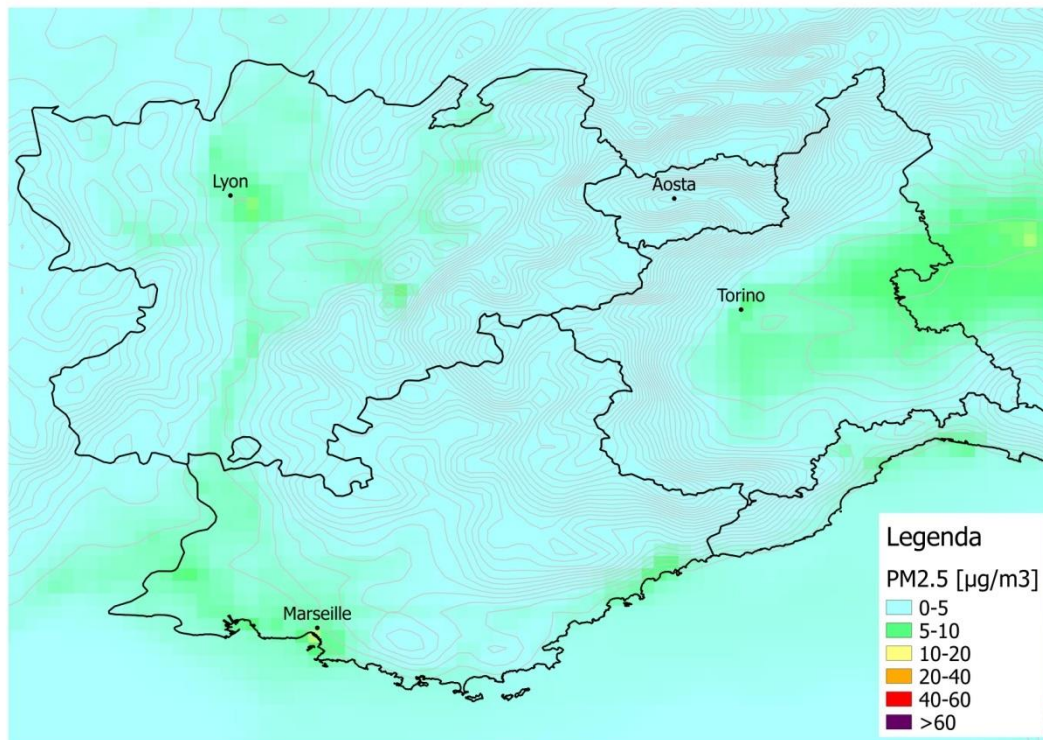


Figure 3.3.3-3 : Moyenne entre les concentrations de PM2.5 simulées avec CAMx et celles simulées avec FARM - période estivale.

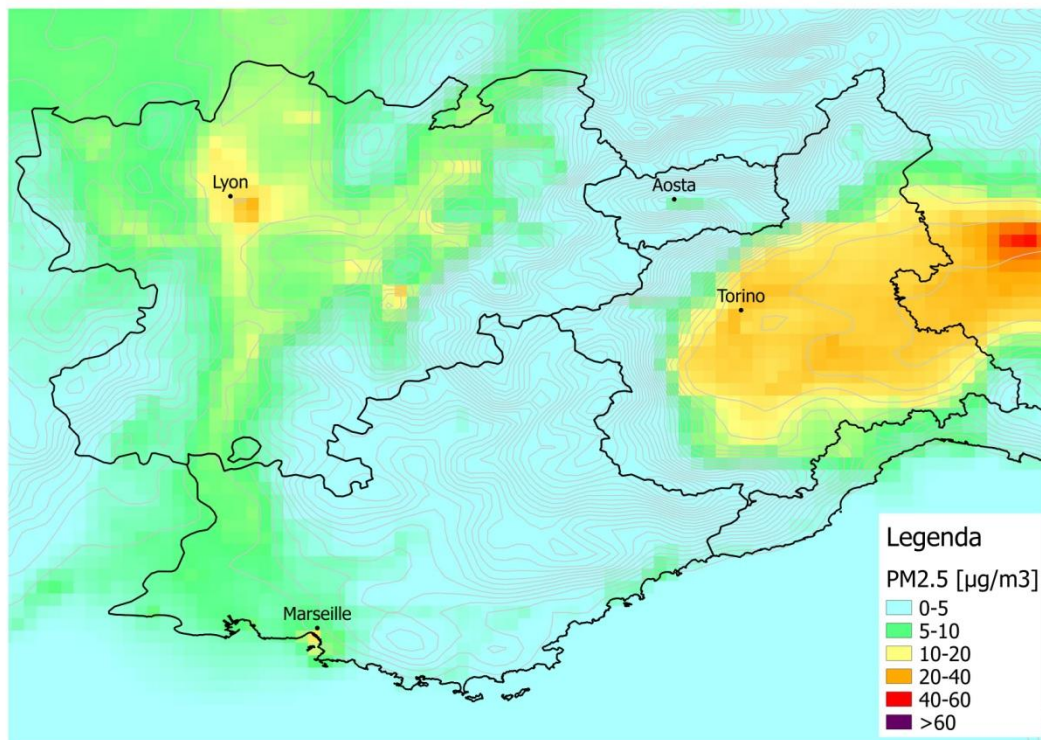


Figure 3.3.3-4 : Moyenne entre les concentrations de PM2.5 simulées avec CAMx et celles simulées avec FARM - période hivernale.

Les figures suivantes représentent les graphiques de la comparaison des évolutions des concentrations moyennes journalières de PM10 observées et calculées avec les modèles pour 4 stations, une pour chaque région : Nice – Arson dans la région Provence-Alpes-Côte d’Azur, Turin – Rubino dans la région Piémont, Grenoble – Les Frens dans la région Rhône-Alpes et Aoste– Piazza Plouves dans la Vallée d’Aoste. Les graphiques des stations jugées significatives pour chaque région sont joints en Annexe F.

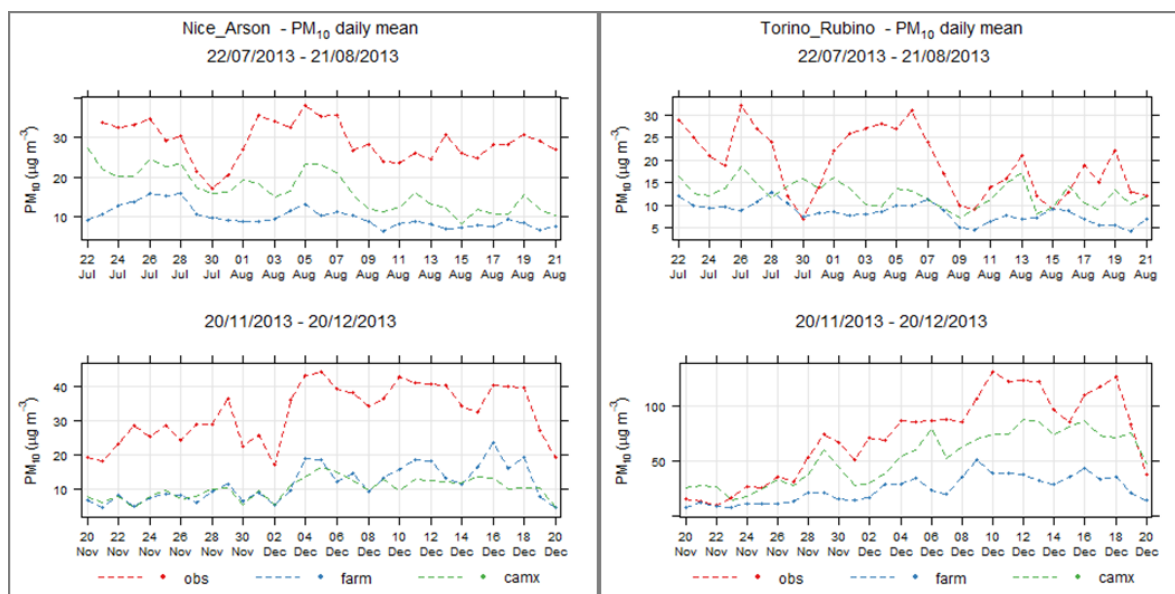


Figure 3.3.3.3-5 : Concentrations moyennes journalières en PM₁₀ observées et simulées aux stations de Nice-Arson (gauche) et Torino-Rubino (droite).

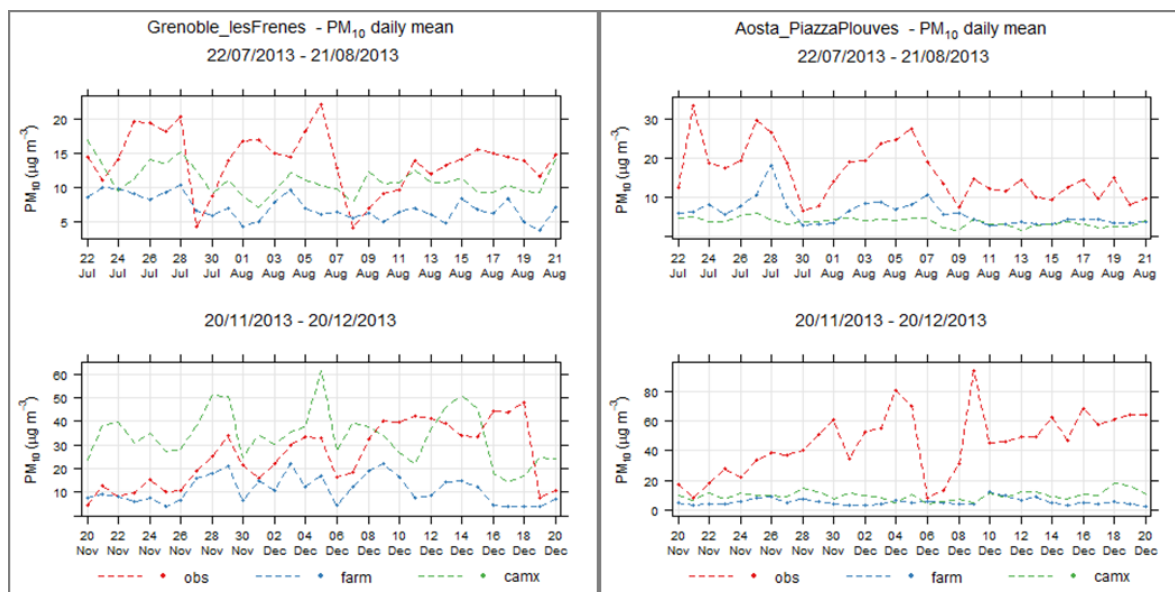


Figure 3.3.3.3-6 : Concentrations moyennes journalières en PM₁₀ observées et simulées aux stations de Grenoble-les Frenes (gauche) et Aoste-Piazza Plouves (droite).

3.3.4 Analyse de la spéciation calculée avec les modèles

Les figures ci-dessous représentent la comparaison pour les composants des PM₁₀ faite entre les espèces chimiques résultant des analyses sur les échantillons de particules atmosphériques (colonne "obs") et les espèces correspondantes calculées à partir des profils de spéciation utilisés par les deux modèles FARM (colonne "sim FARM") et CAMX ("sim CAMX"), à la fois en termes de concentrations en masse et en termes de pourcentages, pendant les deux périodes estivales et hivernales analysées.

Pour les sites de la Vallée d'Aoste (Lillianes, Donnas, Aoste) la comparaison a été faite pour les seuls composants carbonés, dans la mesure où les espèces ioniques n'ont pas fait l'objet d'analyse ; par conséquent, la catégorie “autres espèces” comprend également les espèces ioniques, qui sont en revanche prises en considération dans les autres sites étudiés.

Pour les espèces carbonées, nous avons choisi de prendre en considération l'OC pour la fraction organique : FARM étudie l'espèce AORG qui coïncide avec le carbone organique (Antropogenic secondary organic mass [AORA] + Primary organic mass [AORPA] + Biogenic secondary organic mass [AORB]), alors que CAMx opte pour l'espèce OA qui correspond à l'aérosol organique dans son ensemble, comprenant ainsi également les atomes différents du carbone liés au carbone lui-même et par conséquent l'OA en sortie à partir de CAMx a été divisé par le facteur 1,6 (A. Detournay et al.(2015)^[41]).

Région PACA

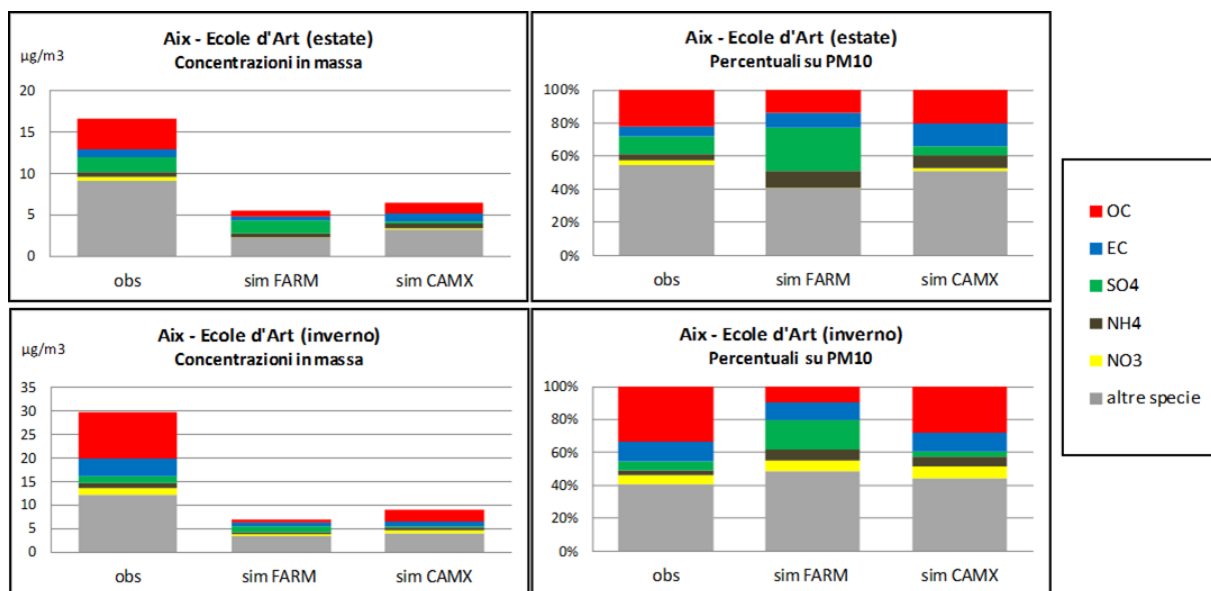


Figure 3.3.3.4-1 : Comparaison des valeurs mesurées (obs) et simulées (sim FARM et sim CAMX) des composants de PM10 pour la station d'Aix-en-Provence – Ecole d'Art pendant les périodes estivale et hivernale

⁴¹ A. Detournay et al.(2012) - Intercomparison campaign (WP3.4): final Report APICE Project

Région Rhône-Alpes

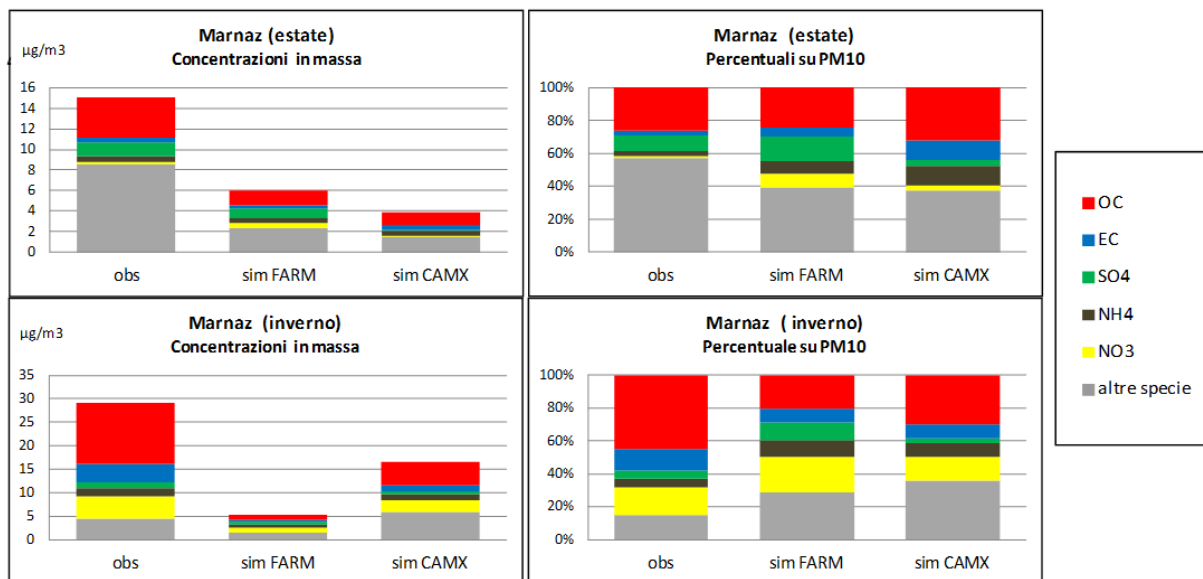


Figure 3.3.3.4-2 : Comparaison des valeurs mesurées (obs) et simulées (sim FARM et sim CAMX) en concentration en masse et en pourcentage des composants de PM10 pour la station de Marnaz pendant les périodes estivale et hivernale

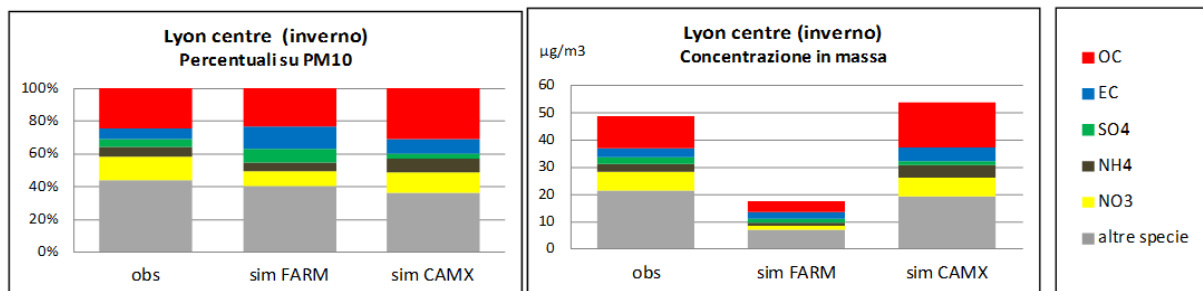


Figure 3.3.3.4-3 : Comparaison des valeurs mesurées (obs) et simulées (sim FARM e sim CAMX) en concentration en masse et en pourcentage des composants de PM10 pour la station de Lyon centre pendant la période hivernale

Région Vallée d'Aosta

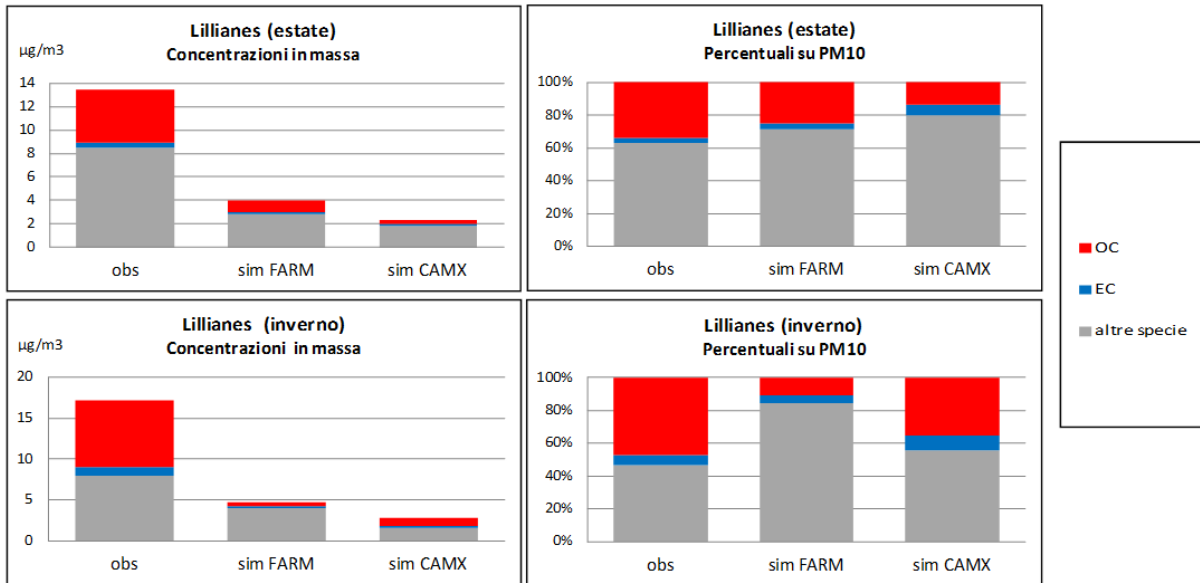


Figure 3.3.3.4-4 : Comparaison des valeurs mesurées (obs) et simulées (sim FARM et sim CAMX) en concentration en masse et en pourcentage des composants de PM10 pour la station de Lillianes pendant les périodes estivale et hivernale

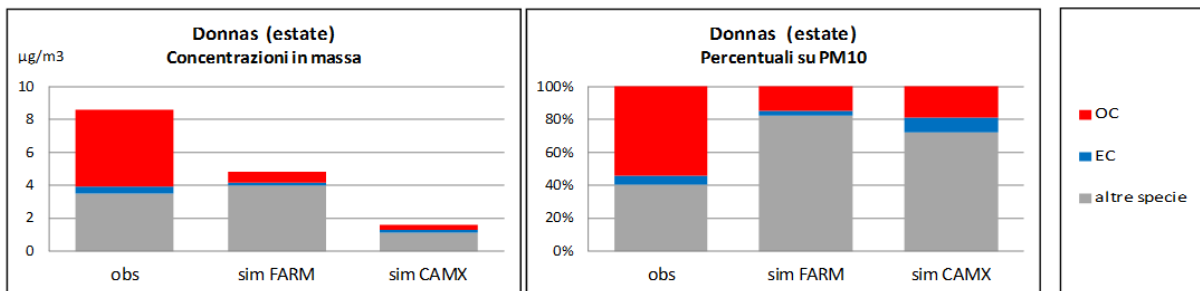


Figure 3.3.3.4-5 : Comparaison des valeurs mesurées (obs) et simulées (sim FARM et sim CAMX) en concentration en masse et en pourcentage des composants de PM10 pour la station de Donnas pendant la période estivale

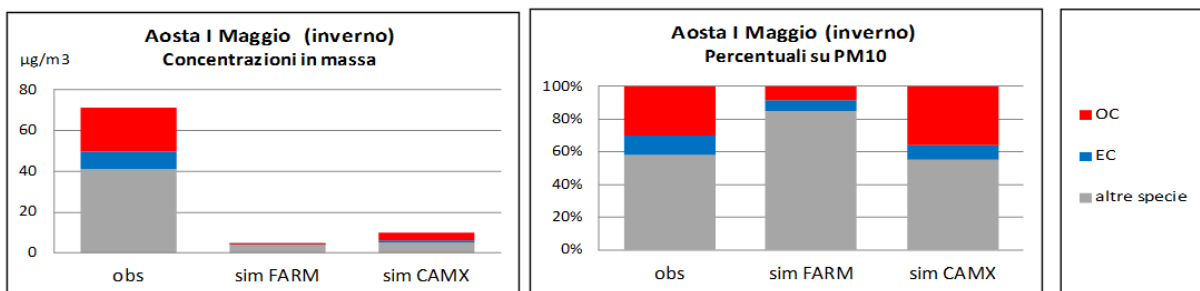


Figure 3.3.3.4-6 : Comparaison des valeurs mesurées (obs) et simulées (sim FARM et sim CAMX) en concentration en masse et en pourcentage des composants de PM10 pour la station d'Aosta Via I Maggio pendant la période hivernale

Région Piemonte

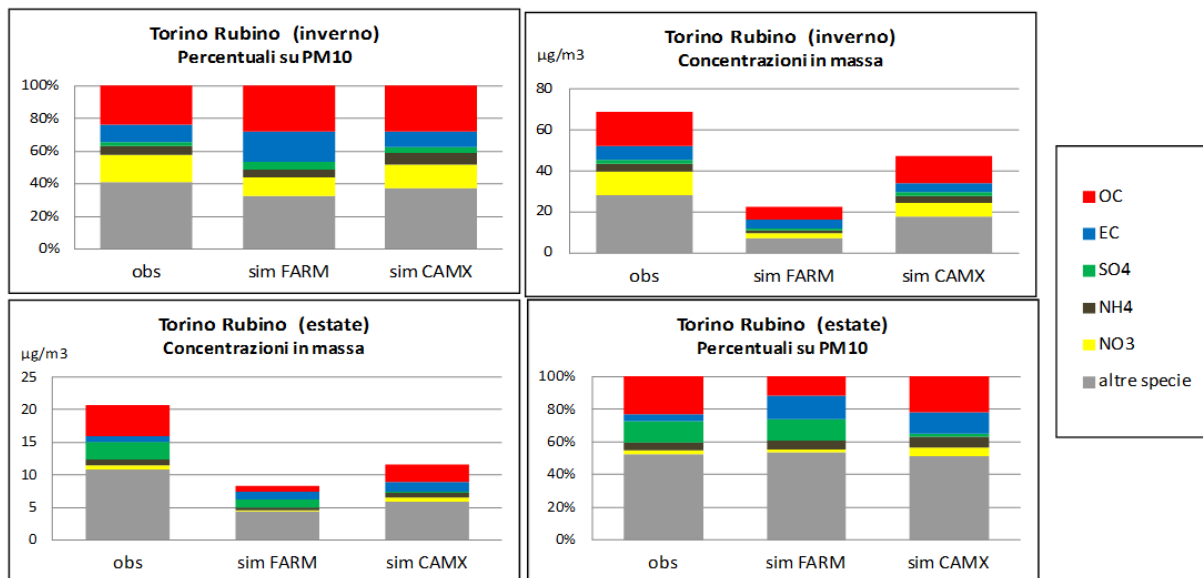


Figure 3.3.3.4-7 : Comparaison des valeurs mesurées (obs) et simulées (sim FARM et sim CAMX) en concentration en masse et en pourcentage des composants de PM10 pour la station de Turin Rubino pendant les périodes estivale et hivernale

De manière générale, on constate la sous-estimation commune des deux modèles étudiés dans l'évaluation des PM10 totales par rapport aux valeurs mesurées, notamment pendant la période hivernale. Cette sous-estimation doit être attribuée à la fois à l'impossibilité de connaître parfaitement le total des émissions de particules sur le domaine d'étude (on pense par exemple aux effets de resuspension) et à la résolution adoptée pour les simulations (cellules de 6 km de côté) qui, surtout pour les sites caractérisés par une orographie complexe, ne permet pas de reproduire correctement les phénomènes locaux de dispersion des polluants.

Toutefois ces modèles de chimie-transport reproduisent plutôt bien la composition des particules (en pourcentage), même avec de légères différences d'un site à un autre ; dans ce contexte CAMx semble davantage correspondre ; en général, le modèle FARM sous-estime la fraction organique et surestime l'EC dans les sites urbains.

3.3.5 Synthèse

L'objectif de l'action 3.3 a été de valider les résultats fournis par les modèles CAMx et FARM en confrontant les sorties de simulations aux observations réalisées sur les sites de mesures implantés sur le territoire ALCOTRA.

En premier, on a analysé les mesures de particules dans le domaine d'étude, soit comme valeurs de concentration soit comme spéciation des particules. Les mesures de concentration en PM10 et PM2.5 montrent des niveaux de pollution élevés dans différentes aires de la zone ALCOTRA durant la période hivernale. Les mesures de spéciation, issues des mesures locales et des résultats du projet Part'Aera, montrent l'importance de la contribution de la combustion de la biomasse à la pollution particulaire au cours de la période hivernale.

A l'intérieur de cette action on a aussi validé les données météorologiques nécessaires aux modèles chimiques, réalisé avec le modèle WRF (Weather Research Forecast) qui a donné les champs météorologiques avec une résolution de 6 km.

L'évaluation des résultats de modélisation a été faite par des cartes de concentration, le calcul de paramètres statistiques et des graphiques de comparaison avec les mesures sur certains sites. Les cartes de concentrations permettent de voir la distribution spatiale des concentrations dans le domaine d'étude. Les deux modèles, même avec des différences, sous-estiment en général les niveaux de PM10 et PM2.5.

Finalement, on a comparé les résultats de la spéciation des particules calculés par les modèles avec les mesures.

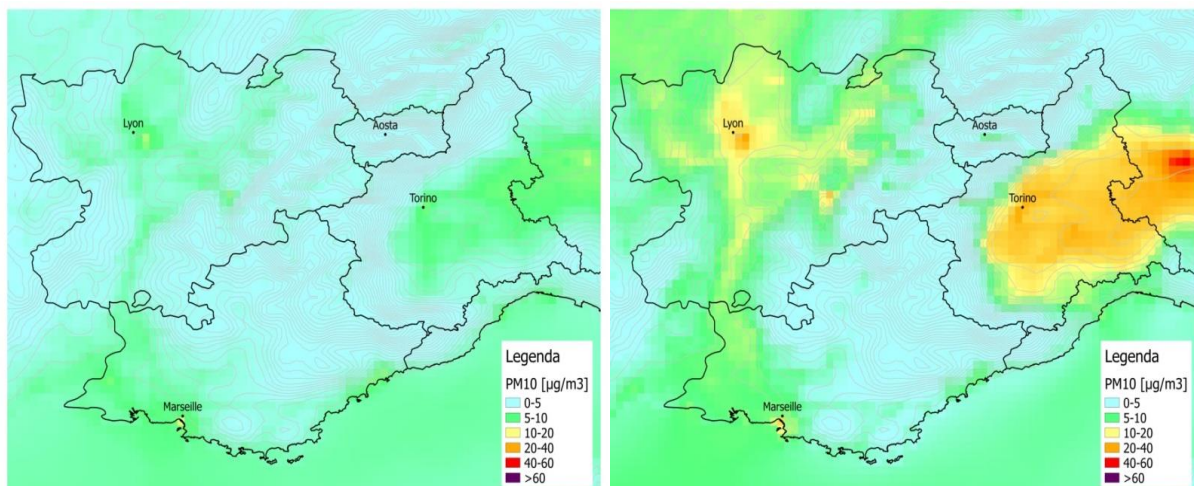


Figure 3.3.5-1: Moyenne entre les concentrations de PM10 calculées avec CAMx et celles calculées avec FARM (gauche : période estivale ; droite : période hivernale)

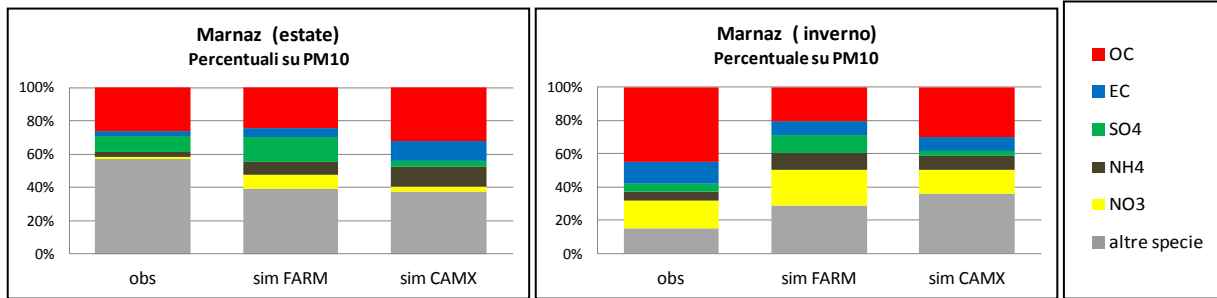


Figure 3.3.5-2: Comparaison entre mesures (obs) et données calculées (sim FARM et sim CAMX) en pourcentage sur les composants de PM10 pour le site de Marnaz

3.4. Scénarios : calculs des contributions

L'objectif principal de cette partie est d'approfondir et d'harmoniser les connaissances sur l'origine des pollutions par les particules fines sur les 4 territoires de la zone Alcotra (Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Piemonte et Vallée d'Aoste). Cela permet de fournir des informations utiles aux décideurs publics et politiques pour cibler et maîtriser les leviers d'actions efficaces pour bien gérer les épisodes de pollution en particules fines.

Ce travail est décliné en deux volets similaires. Le premier consiste à calculer les contributions des sources par secteur d'activité et le deuxième envisage le calcul des contributions des sources par zone géographique d'émissions sur les quatre zones partenaires. Comme cité dans (cf. 3.1.1), nous utilisons dans cette étude les deux modèles de dispersion atmosphérique CAMx et FARM pour répondre à ces objectifs. La mise en place de ces deux plateformes de modélisation a été étudiée dans la partie (cf. 3.1) et a permis de fournir des paramétrisations cohérentes et homogènes entre nos outils sur l'ensemble de la zone Alcotra. Les simulations numériques ont été réalisées à la fois sur une période hivernale (20/11/2013-20/12/2013) qui se caractérise par plusieurs dépassement observés sur chacune des régions partenaires et une autre estivale (22/07/2013-22/08/2013) qui nous permet d'étudier les origines des particules fines secondaires associées à la pollution photochimique. Ces deux périodes nous permettent de mieux étudier les contributions des sources en tenant en compte de la saisonnalité des polluants. Pour chaque période, une étude d'intercomparaison a été effectuée entre les résultats de contribution des sources des pollutions calculées par les deux modèles FARM et CAMX.

3.4.1 Définition des secteurs sources

3.4.1.1 Les secteurs d'activité (Généralité - cf. 3.2.4)

L'utilisation de la nomenclature SNAP97 dans l'élaboration du cadastre des émissions permet de différencier les activités émettrices de polluants atmosphériques et d'établir des tables de correspondances communes pour les regrouper au sein de groupements d'activité (cf. 3.2.5.1- Définition des secteurs d'activité). Les 5 groupements d'activité considérés dans cette étude sont : les émissions issues de la combustion de bois, le trafic routier, les activités industrielles, l'agriculture et l'ensemble des activités restantes.

3.4.1.2 Les zones géographiques

Pour traiter les échanges interrégionaux entre les différentes régions de la zone Alcotra, nous avons découpé la zone d'étude en cinq secteurs géographiques : quatre zones géographiques sont définies par les frontières administratives de chaque région partenaire et une région est située à l'extérieur du domaine Alcotra. (Figure 3.0.3-1).

3.4.2 Résultats des contributions par secteur d'activité

Nous nous intéressons dans cette partie à quantifier les contributions des sources des pollutions par secteur d'activité. Tous les résultats sont présentés en pourcentage par rapport aux concentrations totales de PM10 et non en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

3.4.2.1 Résultats des contributions sur tous les territoires

La **Figure 3.4-1** représente les bilans des contributions des sources par secteur d'activité sur la zone Alcotra pendant les deux périodes : hivernale (à droite) et estivale (à gauche). Ici, chaque colonne représente en pourcentage le bilan des contributions des sources par secteur d'activité sur un seul territoire de la zone d'étude. Pour rappel, notre analyse sectorielle de nos données d'entrée des émissions est réalisée en utilisant la classification par code SNAP (Selected Nomenclature for Air Pollution) comme décrit dans la partie 3.2.

L'intercomparaison des résultats de contribution sur la **Figure 3.4-1** indique un très bon accord entre les deux outils de modélisation dans la période estivale (**Figure 3.4-1a** et **Figure 3.4-1c**) et une moins bonne harmonie des deux modèles sur la période hivernale (**Figure 3.4-1b** et **Figure 3.4-1d**).

En été, les deux modèles fournissent des contributions très faibles de la combustion de la biomasse et des contributions élevées du trafic routier sur les quatre territoires (**Figure 3.4-1a** et **Figure 3.4-1c**). Nous observons également des contributions un peu plus importantes du secteur agricole dans les deux régions Vallée d'Aoste et Piemonte.

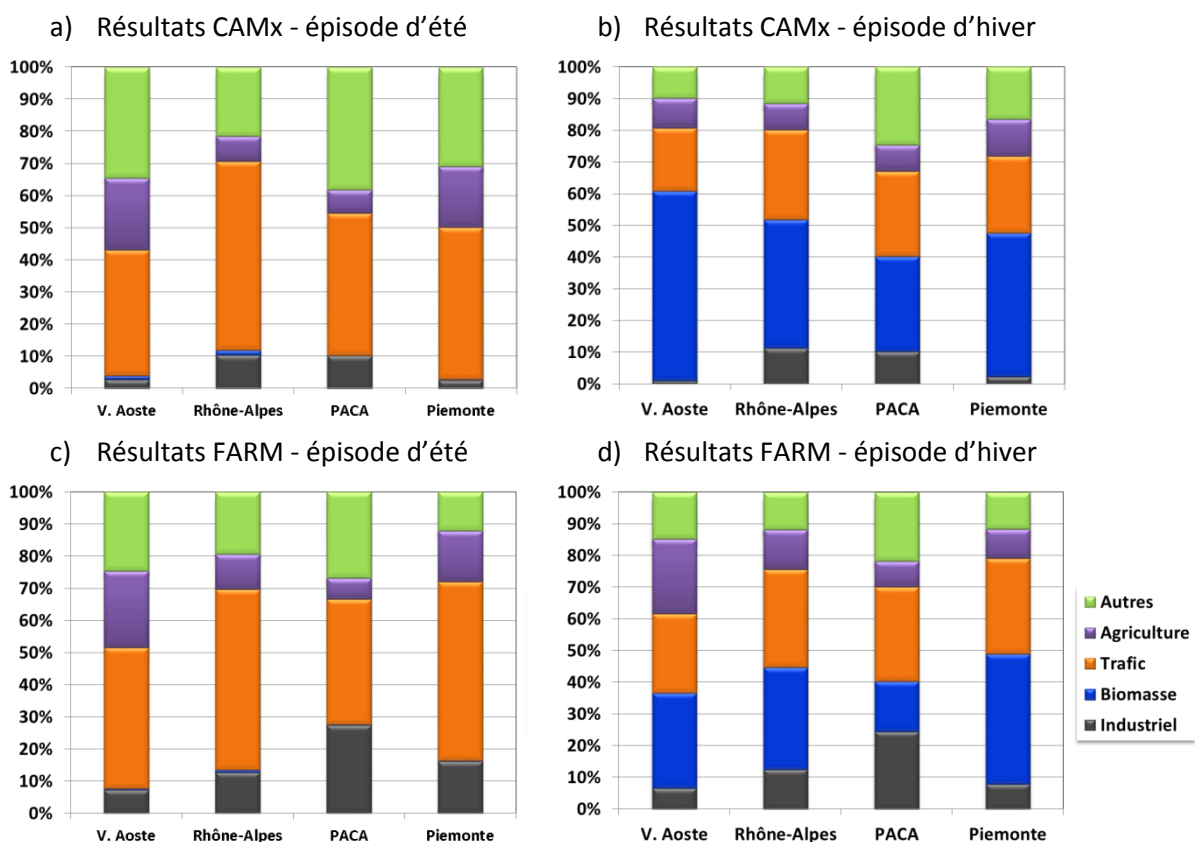


Figure 3.4-1: Bilans des contributions des sources par secteur d'activité sur tous les territoires de la zone Alcotra : résultats des modèles CAMx (a et b) et FARM (c et d).

3.4.2.2 Résultats des contributions sur les sites de prélèvement

Après avoir étudié la contribution des sources de pollution aux émissions des particules fines sur chaque territoire, nous traitons dans cette section les résultats des deux modèles CAMx et FARM sur différents sites de mesure dans chaque région.

Les sites de mesure choisis dans le cadre de ce travail sont localisés sur les zones et les principales agglomérations qui se caractérisent souvent par les plus fortes concentrations des régions. Ils sont aussi représentatifs des zones similaires ne se trouvant pas à proximité immédiate (comme recommandé par la directive européenne 2000/69).

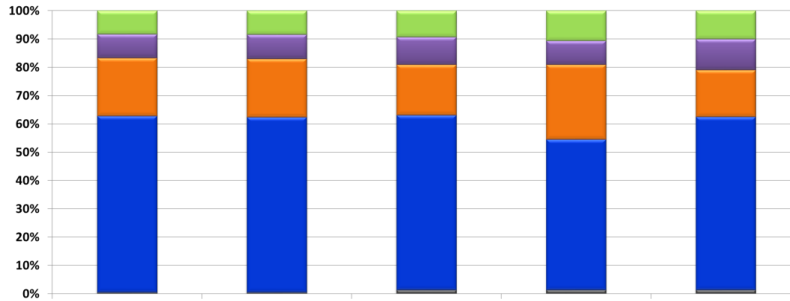
Les Figures **Figure 3.4-2**, **Figure 3.4-3**, **Figure 3.4-4**, **Figure 3.4-5** présentent les résultats d'intercomparaison entre les deux modèles utilisés (CAMx et FARM). Nous avons illustré sur chacun de ces graphiques les résultats de contributions estimés dans différentes stations de qualité de l'air dans la même région. Ainsi, les graphes **Figure 3.4-2a** et **Figure 3.4-2b** illustrent l'impact des émissions des sources par secteur d'activité sur les stations de la région Vallée d'Aoste, calculées respectivement par les modèles CAMx et FARM pendant la période hivernale. Les Figures **Figure 3.4-2c** et **Figure 3.4-2d** correspondent à la période estivale.

Cette analyse montre que les résultats de CAMx et FARM sont assez similaires sur la majorité des sites de mesures et sur les différents territoires d'étude. En effet, les valeurs des contributions estimées par les deux modèles sont très cohérentes qualitativement en hiver comme en été. Ceci peut s'expliquer par les travaux effectués en amont pour harmoniser les données d'entrée (émissions, météo, ...) pour les deux modèles. Notons que les résultats de FARM et CAMx sont quasi-identiques sur les différentes stations de la Vallée d'Aoste pendant l'été (Figures **Figure 3.4-2c** et **Figure 3.4-2d**). Néanmoins, nous avons certains décalages entre les deux modèles sur quelques sites comme la station « Drome Rural Sud » de la région Rhône-Alpes (voir les Figures 4.3c et 4.3d)

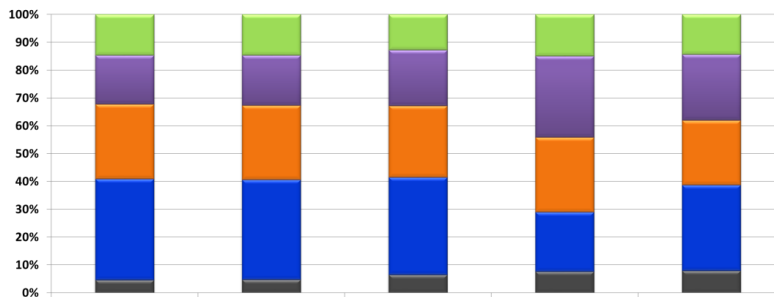
Comme le prévoient nos analyses des données d'émission dans le chapitre 3.2, les résultats issus des deux modèles en été sont assez différents de ceux calculés en hiver. En effet, la part de contribution liée à la combustion de la biomasse dans chaque station de mesure est quasiment nulle sur la période estivale.

Les figures de contribution des sources par secteur d'activité (Figures **Figure 3.4-2** à **Figure 3.4-5**) montrent que nous avons une grande variabilité spatiale dans les bilans de contribution des sources sur les différents territoires. Néanmoins, la combustion de la biomasse reste le principal contributeur pour la concentration en PM10 sur la majorité du domaine Alcotra pendant la période hivernale. Le trafic routier est le contributeur le plus remarquable durant la période estivale. Nous observons également que la contribution du reste des secteurs d'activités (secteur « Autres » dans les figures) est relativement élevée. En effet, le ¼ de la quantité totale des particules fines est souvent associé à des secteurs non tracés dans cette étude.

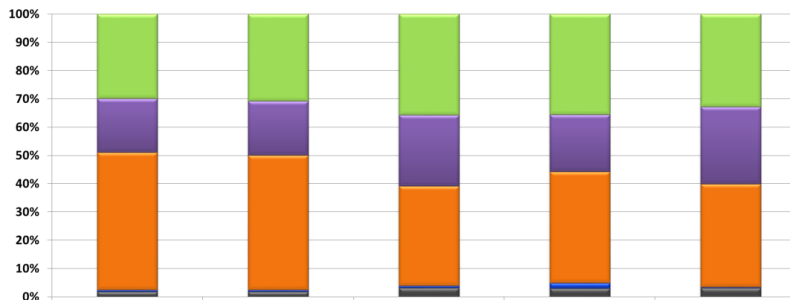
Résultats des contributions en utilisant le modèle CAMx - épisode d'hiver



Résultats des contributions en utilisant le modèle FARM – épisode d'hiver



Résultats des contributions en utilisant le modèle CAMx – épisode d'été



Résultats des contributions en utilisant le modèle FARM – épisode d'été

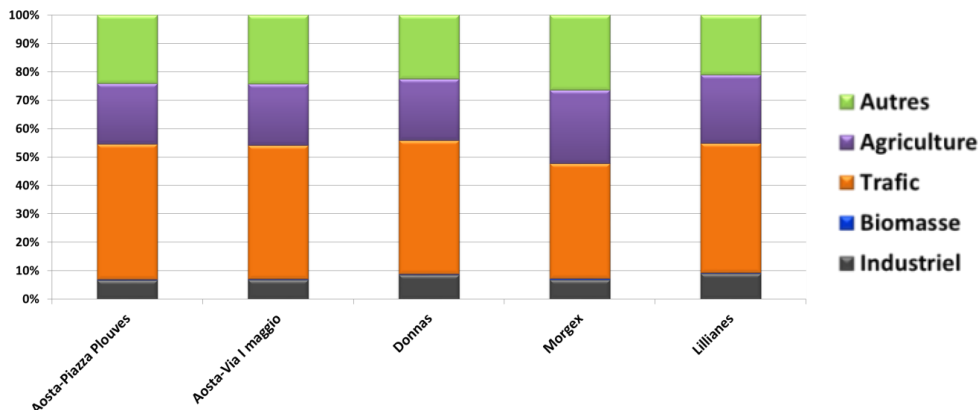


Figure 3.4-2 : Contributions en pourcentage de chaque secteur d'activité sur les stations de la région Vallée d'Aoste.

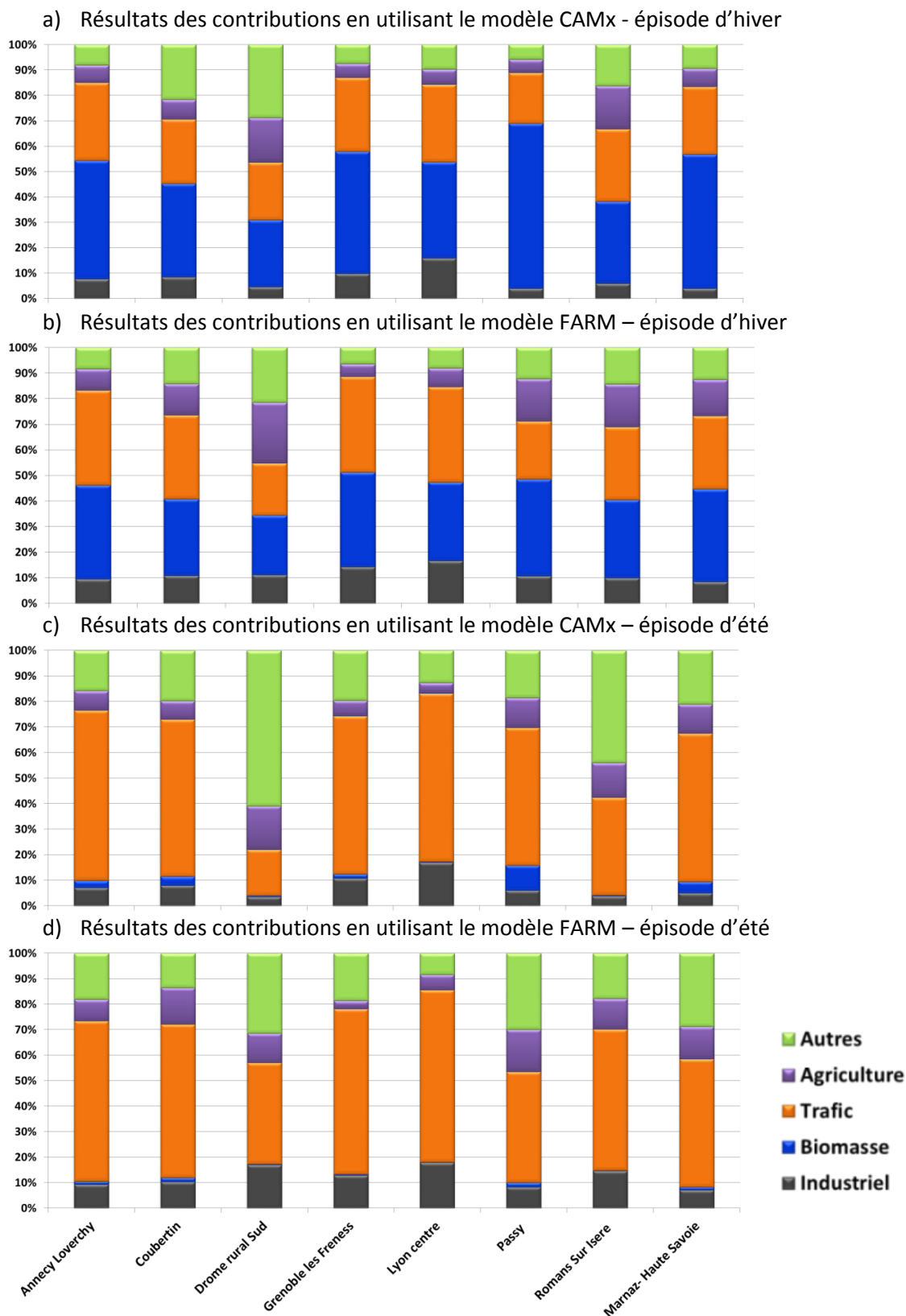


Figure 3.4-3: Contributions en pourcentage de chaque **secteur d'activité** sur les stations de la région Rhône-Alpes.

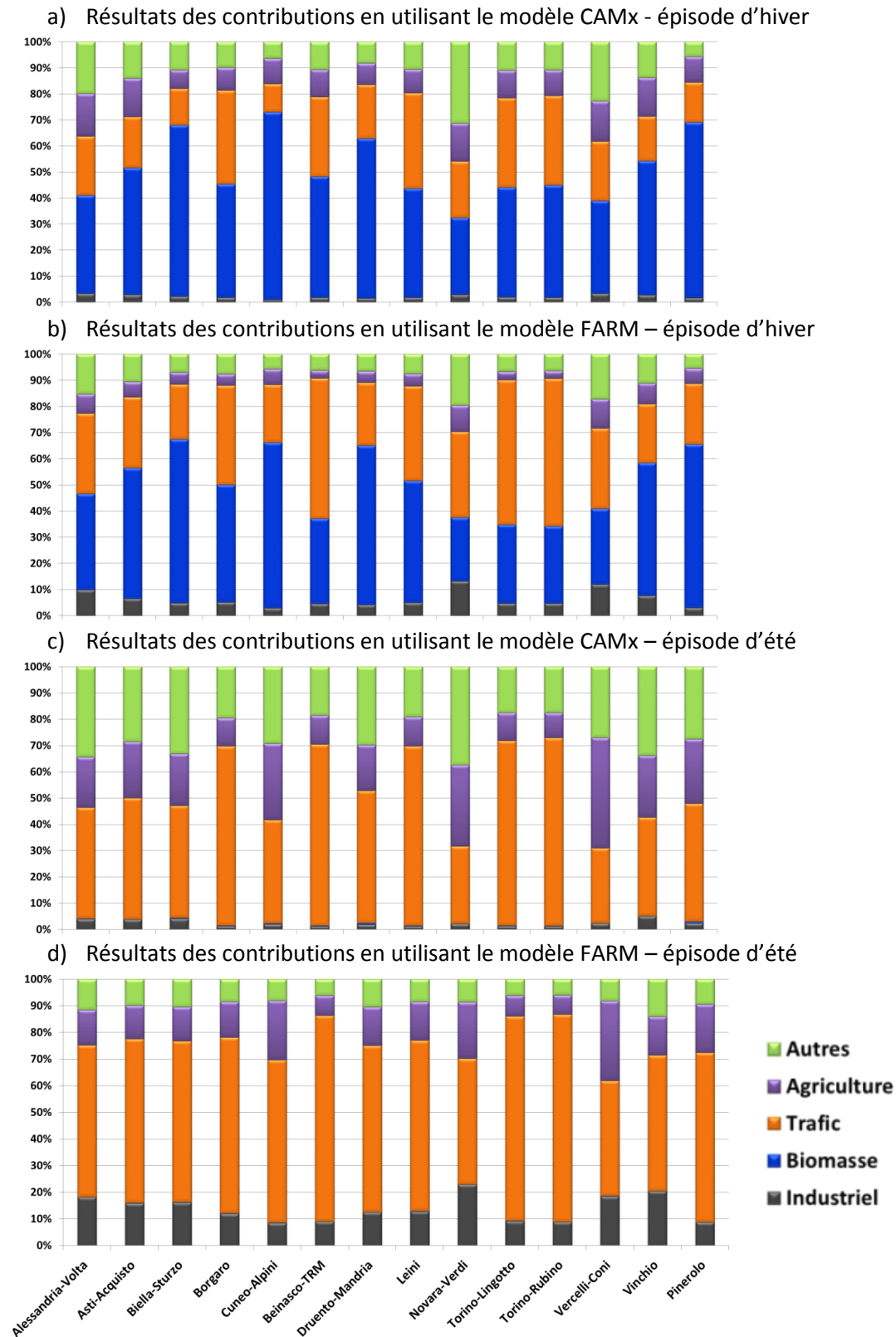


Figure 3.4-4 : Contributions en pourcentage de chaque secteur d'activité sur les stations de la région Piemonte.

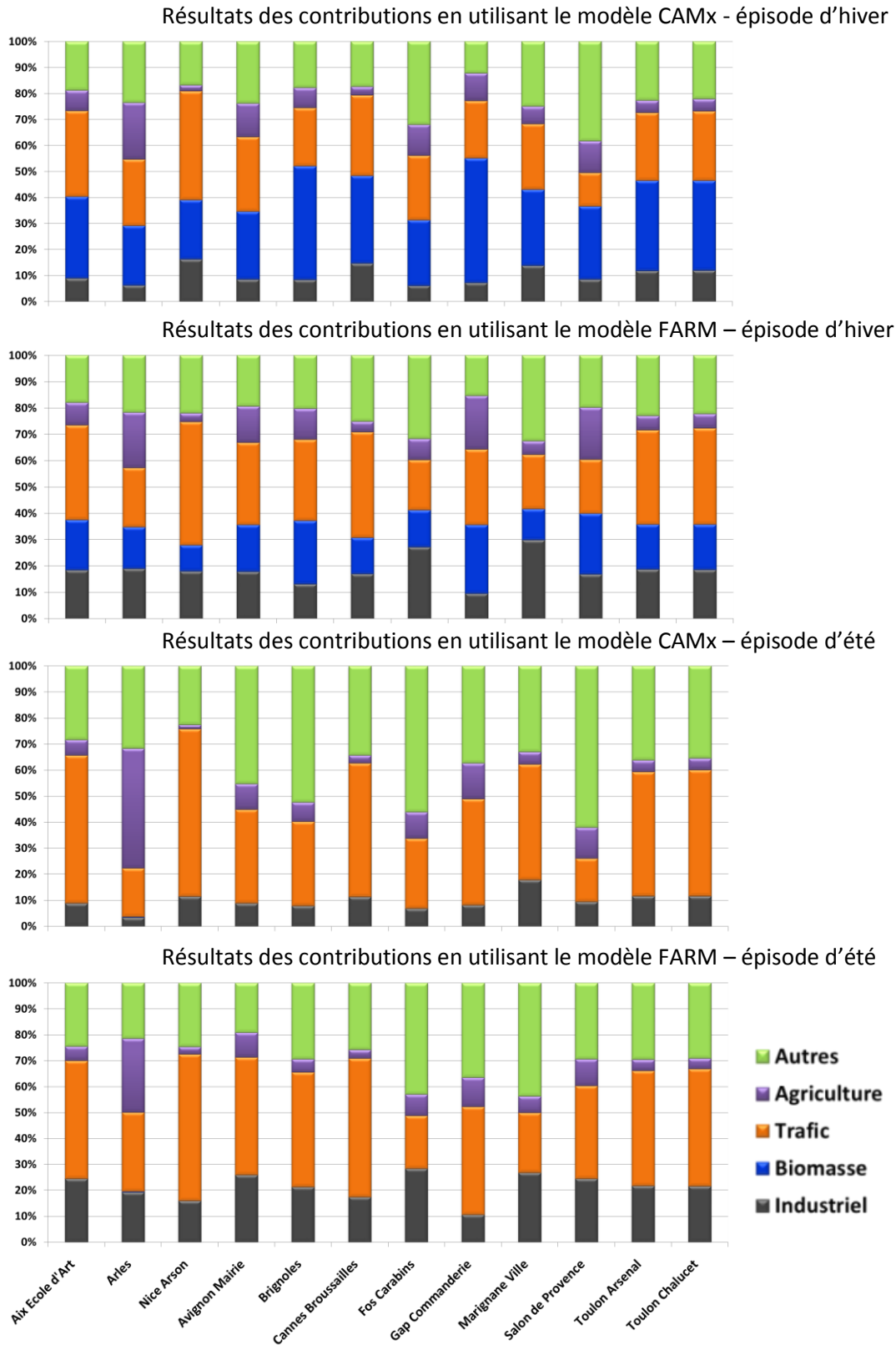


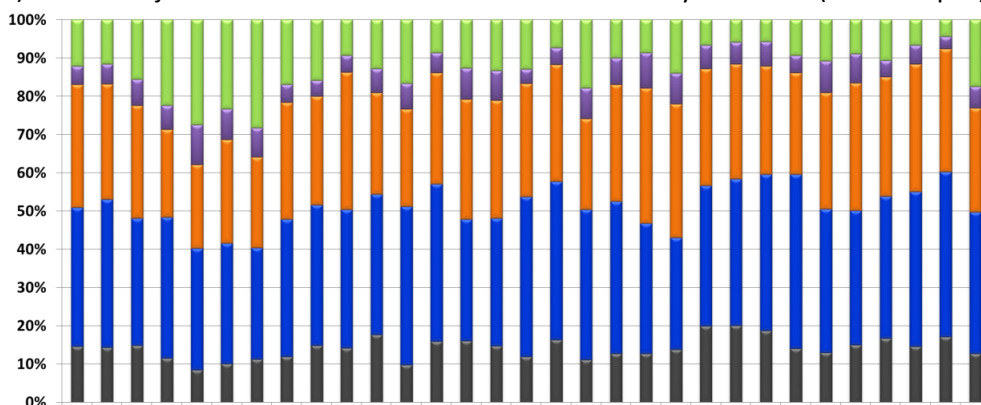
Figure 3.4-5: Contributions en pourcentage de chaque **secteur d'activité** sur les stations de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

3.4.2.3 Variations temporelles (journalières) des contributions de chaque secteur d'activité

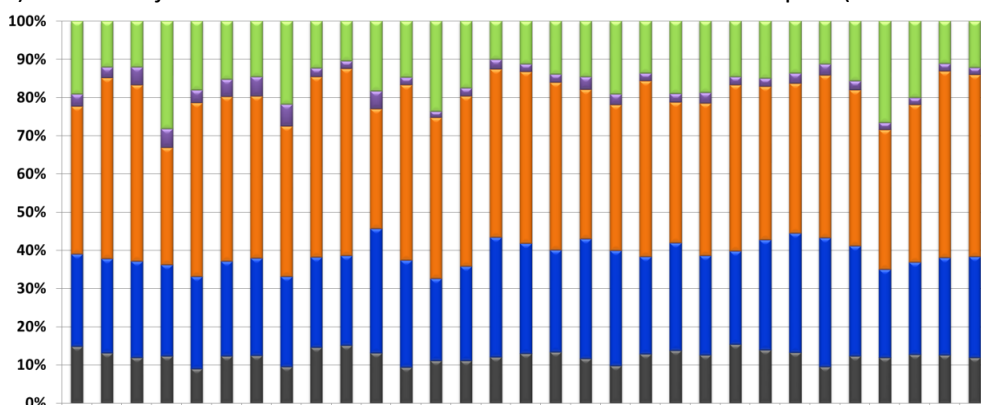
Afin de compléter l'analyse précédente, nous avons tracé sur la Figure 3.4-6 les évolutions journalières des contributions des sources sur quatre sites de mesure tout au long de la période hivernale. Les Figures Figure 3.4-6a, Figure 3.4-6b, Figure 3.4-6c et Figure 3.4-6d correspondent respectivement aux stations : Lyon Centre de la région Rhône-Alpes, Nice aéroport de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Parco Rubuno Torino de de la région Piemonte et Aoste-Plouves de la région Vallée d'Aoste. Les évolutions temporelles des bilans de contribution dans ces sites de mesures se caractérisent par une faible variabilité intra-journalière. Cela peut être dû à une faible variation temporelle des émissions dans cet épisode hivernal.

Ces figures confirment que la combustion de la biomasse est le principal contributeur pour la concentration en PM10 pendant toute la période d'hiver sur les différents territoires du domaine Alcotra. Ce résultat est plus marqué sur la station d'Aoste-Plouves de la Vallée d'Aoste (Figure 3.4-6d). Ainsi, nous remarquons que la contribution du trafic routier est relativement importante dans les grandes agglomérations (Lyon, Nice et Turin).

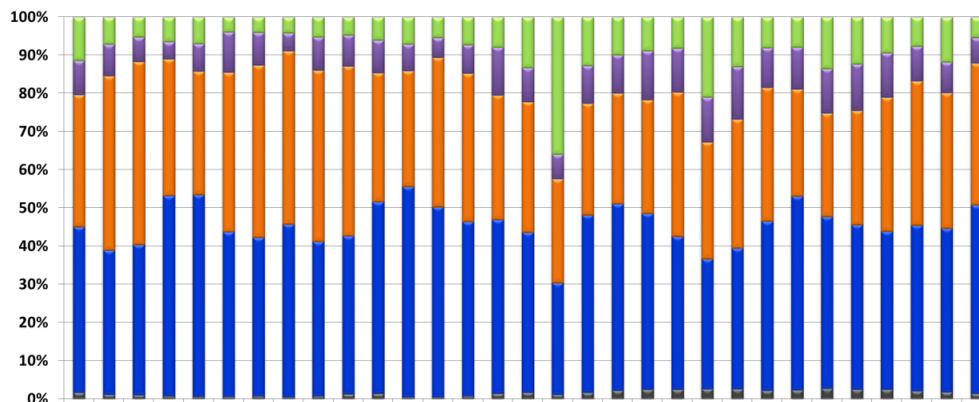
a) Variation journalière des contributions sur la station Lyon Centre (Rhône-Alpes)



b) Variation journalière des contributions sur la station Nice Aéroport (Provence Alpes Côte d'Azure)



c) Variation journalière des contributions sur la station Parco Rubuno Torino (Piemonte)



d) Variation journalière des contributions sur la station Aoste-Plouves (Vallée d'Aoste)

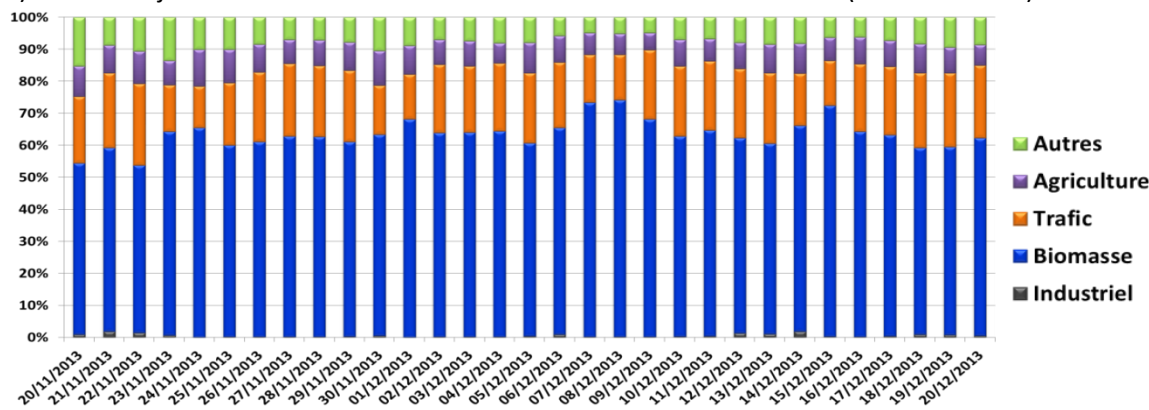


Figure 3.4-6 : Evolutions journalières des contributions des sources par secteur d'activité pendant la période hivernale sur 4 stations du territoire ALCOTRA.

3.4.2.4 Variabilité spatiale des pourcentages de contribution par secteur d'activité sur le domaine d'étude

Après avoir étudié les résultats des deux modèles au niveau de quelques stations de mesure représentatives de chaque région, nous montrons maintenant l'utilité de nos outils pour des fins opérationnelles. Les Figures **Figure 3.4-7, Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, Figure 3.4- 9, Figure 3.4-10 illustrent respectivement la variabilité spatiale des pourcentages de contribution des différents secteurs d'activité au cours des deux périodes de calcul : hivernal (20/11/2013-20/12/2013) et estival (22/07/2013-22/08/2013). Ce type de cartes de contribution permet d'analyser et d'identifier les sources de pollution qui contribuent le plus aux valeurs de dépassement de PM10 en tout point de nos régions. En effet, ces cartes permettent de visualiser rapidement la spatialisation des contributions des différents secteurs par rapport aux cartes de dépassement des valeurs réglementaires des particules fines.

En comparant les sorties de deux modèles FARM et CAMx sur les Figures **Figure 3.4-7, Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, Figure 3.4- 9, Figure 3.4-10, nous constatons que les résultats sont plus cohérents spatialement à l'intérieur du domaine Alcotra qu'à l'extérieur. La différence des résultats à l'extérieur du domaine Alcotra entre les deux modèles CAMx et FARM s'explique par le

type de traitement des émissions EMEP dans cette région par les deux outils. En effet, dans CAMx nous considérons que toutes les émissions d'EMEP font partie de la catégorie « Autres » c'est-à-dire non identifiées dans les secteurs choisis mais dans FARM ces émissions (EMEP) ont été partagées par catégorie comme dans le domaine Alcotra. Néanmoins, le secteur « Autres » est associé à la fois aux émissions anthropiques non différenciées et aux émissions naturelles.

Nous observons que les contributions de la « combustion de la biomasse » calculées par le modèle FARM sont plus faibles que celle calculées par le modèle CAMx. Néanmoins les contributions des activités agricoles calculées par FARM sont plus élevées que celles issues du modèle CAMx.

De même, nous observons que l'agriculture apparait comme un secteur significatif sur certains territoires, notamment dans la région Piemonte et en Camargue (Sud- Ouest de la région Provence Alpes Côte d'Azur).

La contribution de la combustion de biomasse dans les concentrations de particules fines est plus marquée sur les territoires pré-alpins et alpins, par contre les contributions du trafic routier sont plus significatives voire même majoritaires dans les grands centres urbains et dans les bassins traversés par des axes routiers majeurs. La Figure **Figure 3.4-7** (Contributions du Trafic) montre que cette forte contribution du trafic routier peut être assez localisée sur les routes principales dans les zones rurales. Ce résultat est très cohérent avec la variation spatiale des émissions associées au trafic routier dans le cadastre. Les résultats des deux modèles FARM et CAMx confirment que le trafic routier est l'un des principaux contributeurs aux concentrations en PM10 durant l'été (Figures **Figure 3.4-7** et 3.4-8 – Contributions du Trafic). Par exemple, plus de 70% des concentrations en PM10 de Nice et de Turin s'expliquent par les émissions du trafic routier (Figures **Figure 3.4-7** et 3.4-8– Contributions de Trafic).

Enfin, nous constatons que les contributions des activités industrielles sont très similaires entre l'été et l'hiver. En revanche, l'industrie a une contribution significative et marquée seulement à proximité des zones industrielles majeures. Nous observons que les contributions des activités industrielles calculées par le modèle FARM sont plus élevées que celles estimées par le modèle CAMx.

Les contributions du secteur industriel sur la commune de Marseille obtenues dans les simulations de FARM (figure 3.4-8 et 3.4-10) sont très fortement surestimées en raison du problème sur les données d'entrée mentionné dans la section 3.2.5.2. Les résultats sont donc invalidés sur la commune de Marseille. Le même commentaire est fait concernant les contributions du "domaine extérieur" dans les figures 3.4-18 et 3.4-20.

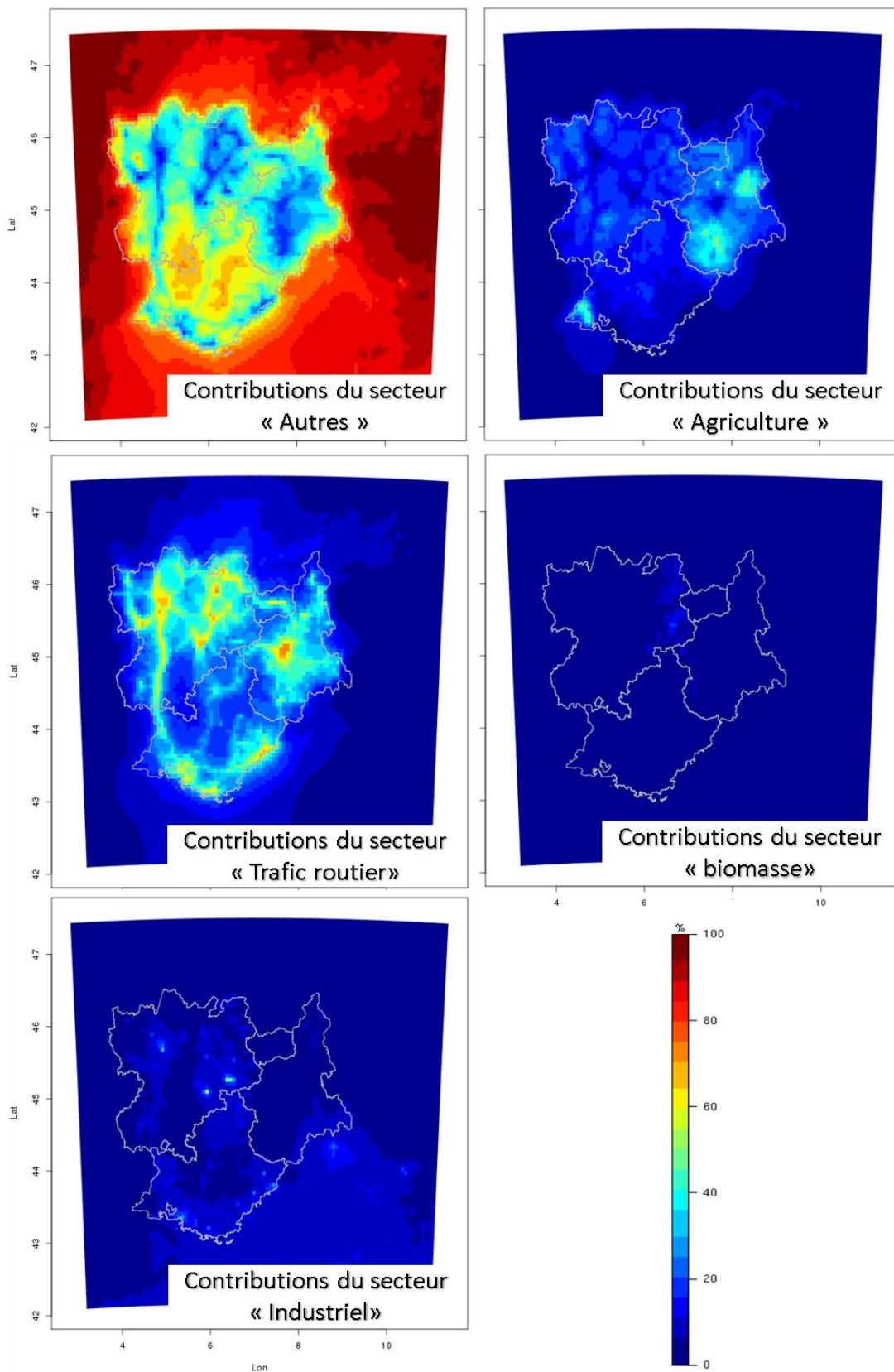


Figure 3.4-7: Cartographies des contributions des sources par secteur d'activité pour la période estivale : Résultats du modèle CAMx

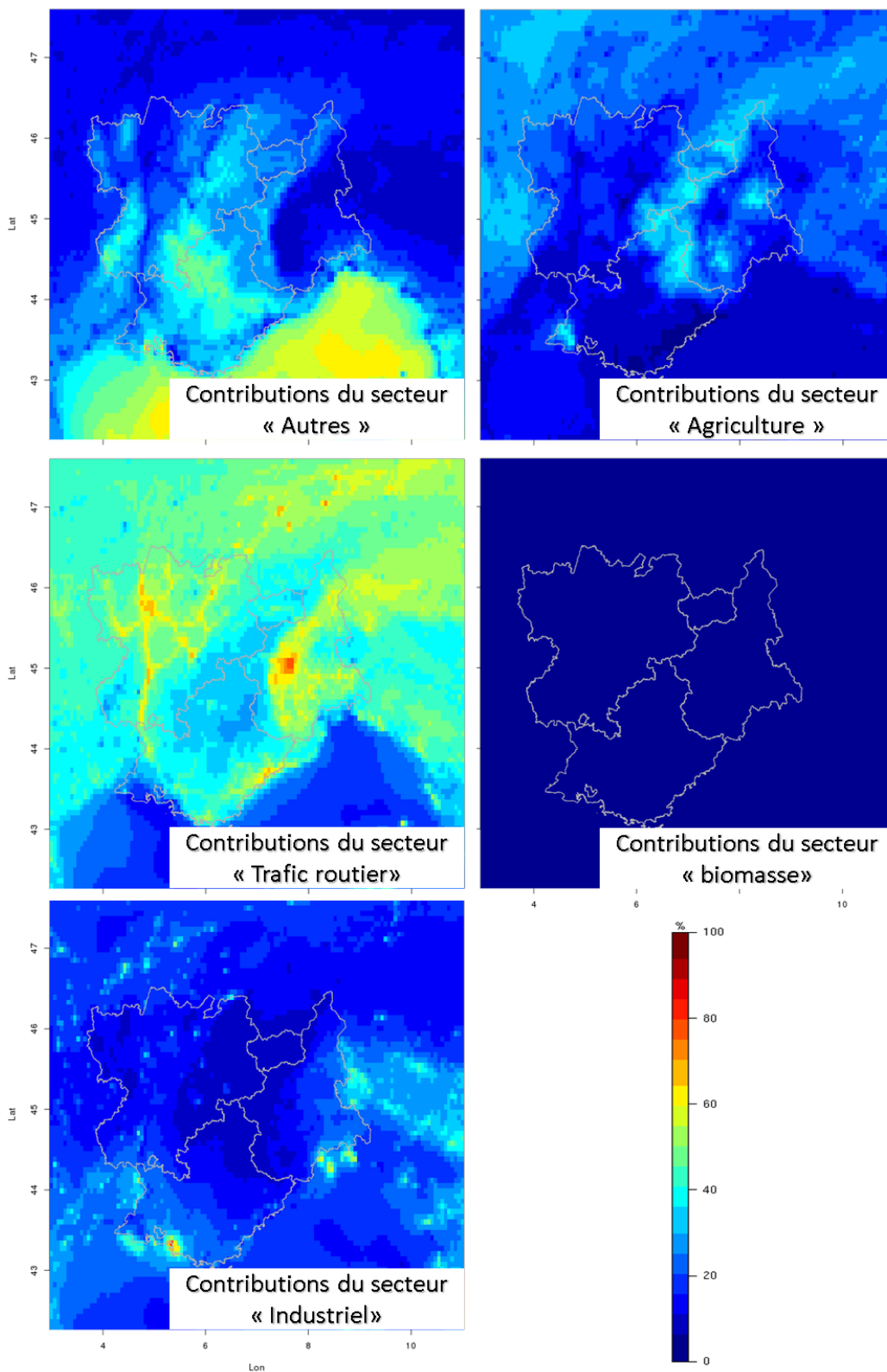


Figure 3.4-8 : Cartographies des contributions des sources par secteur d'activité pour la période estivale : Résultats du modèle FARM (Résultats invalidés sur le territoire de Marseille (cf. section 3.4.2.4))

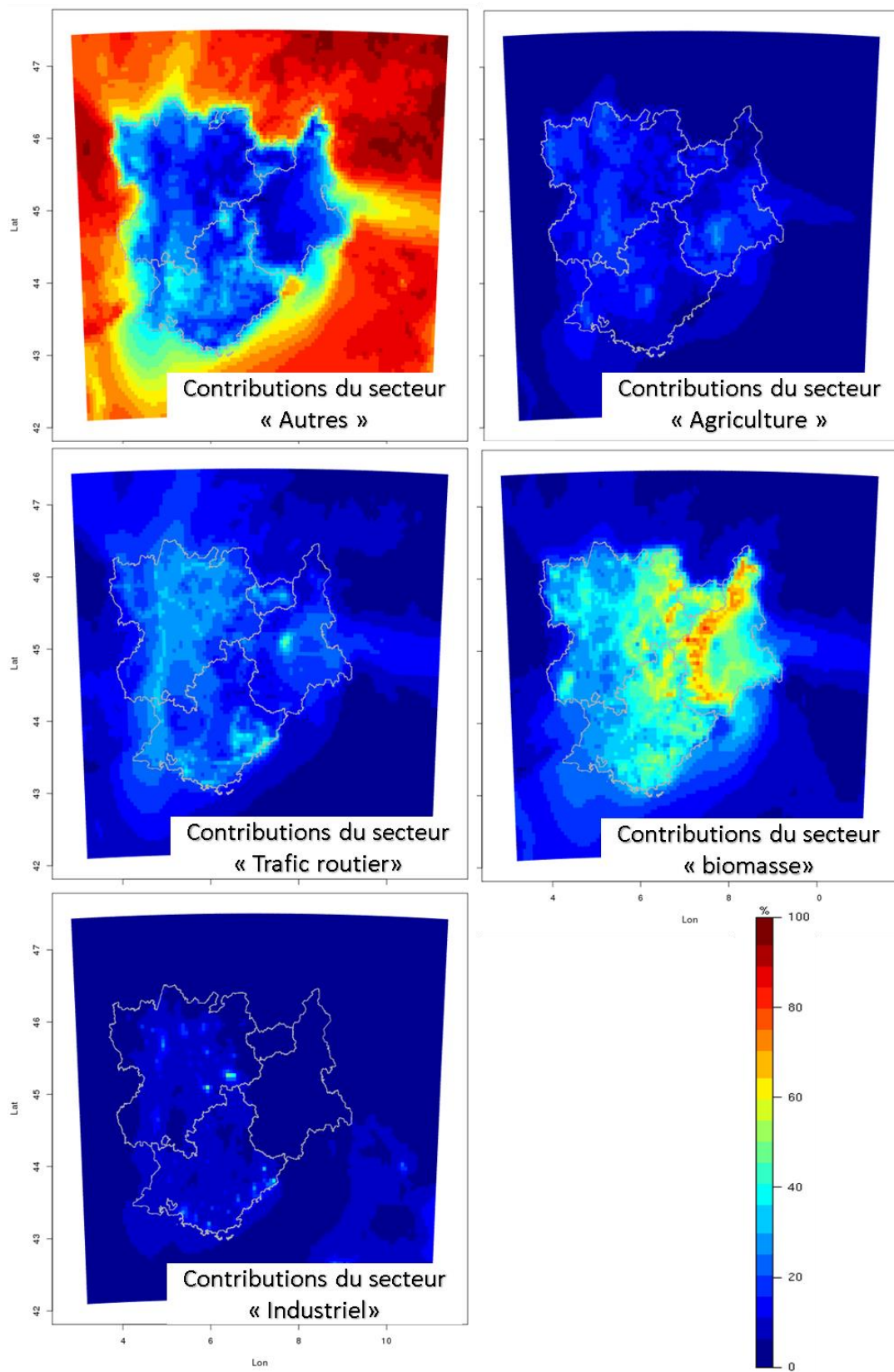


Figure 3.4- 9 : Cartographies des contributions des sources par secteur d'activité pour la période hivernale
Résultats du modèle CAMx

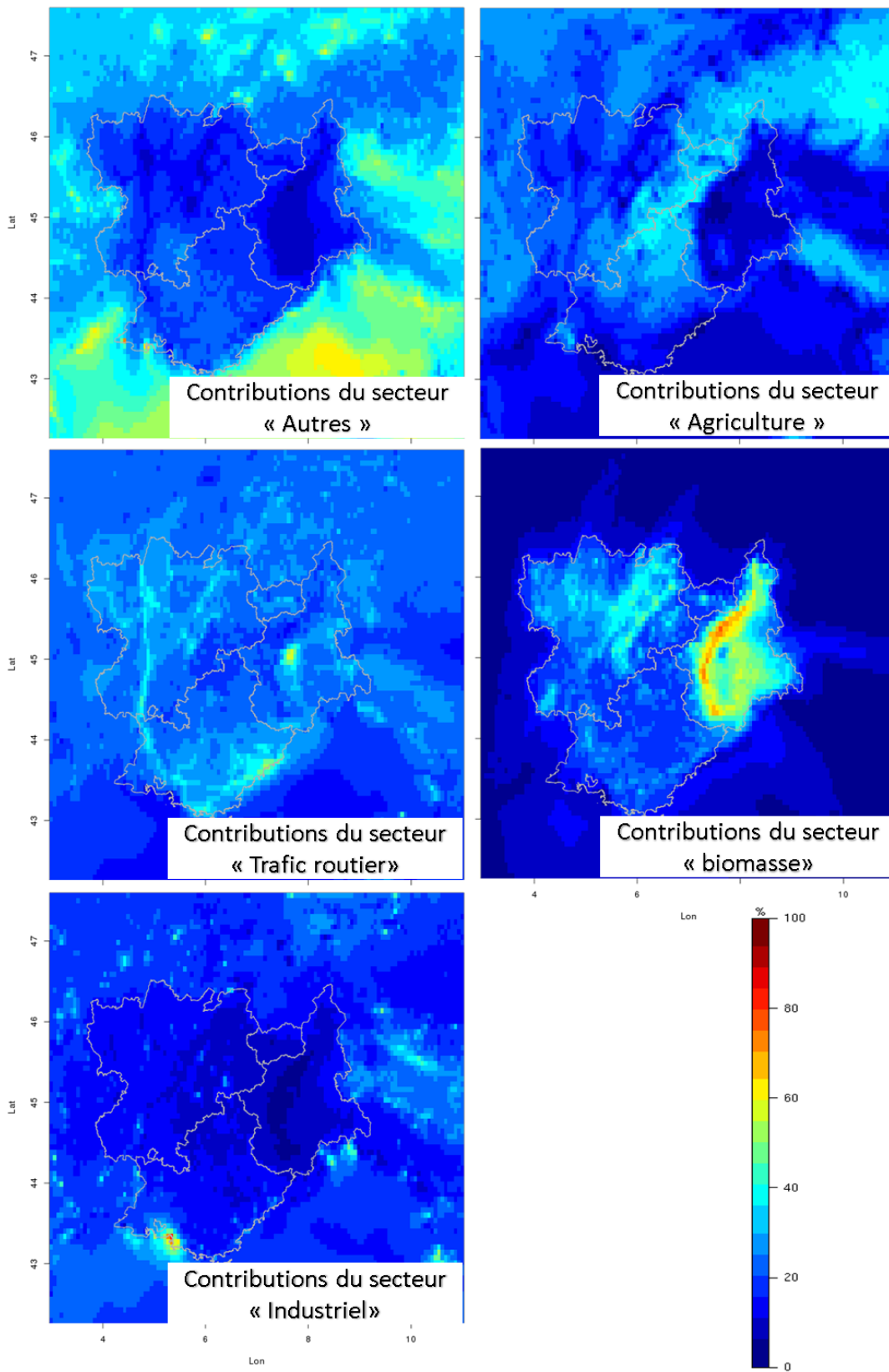


Figure 3.4-10: Cartographies des contributions des sources par secteur d'activité pour la période hivernale : Résultats du modèle FARM (Résultats invalidés sur le territoire de Marseille (cf. section 3.4.2.4))

3.4.3 Résultats des contributions par région

Nous nous intéressons dans cette partie à quantifier la contribution des sources des pollutions par secteur géographique comme définis dans la partie 3.4.1.2. Dans cette partie, tous les résultats sont présentés en pourcentage par rapport aux concentrations totales de PM10 et non en $\mu\text{g.m}^{-3}$.

3.4.3.1 Résultats des contributions sur tous les territoires

La **Figure 3.4-11** fournit une estimation des parts de PM10 importées pendant les deux périodes d'études sur les différents territoires de notre domaine Alcotra. Elle représente les bilans de contribution calculés par les deux modèles CAMx (Figures 3.4-11a et 3.4-11b) et FARM (Figures 3.4-11c et 3.4-11d). Ici, chaque colonne de ces quatre figures représente le bilan des contributions des sources par secteur géographique en pourcentage sur chaque territoire de notre zone d'étude.

L'intercomparaison des résultats de contribution illustrés sur la **Figure 3.4-11** indique un moins bon accord entre les deux modèles par rapport aux résultats des contributions par secteur d'activité. Sur les différentes régions, l'impact des émissions propres à la région elle-même est compris entre 45% et 95%. De même, nous observons sur les différents graphiques de la Figure 4.11 qu'une part importante des concentrations en PM10 s'explique par des apports provenant de l'extérieur du domaine Alcotra (les portions grises dans chaque colonne). On note par exemple sur la période estivale, qu'environ 1/3 des concentrations en PM10 dans les différentes régions s'explique par les émissions extérieures à la zone Alcotra.

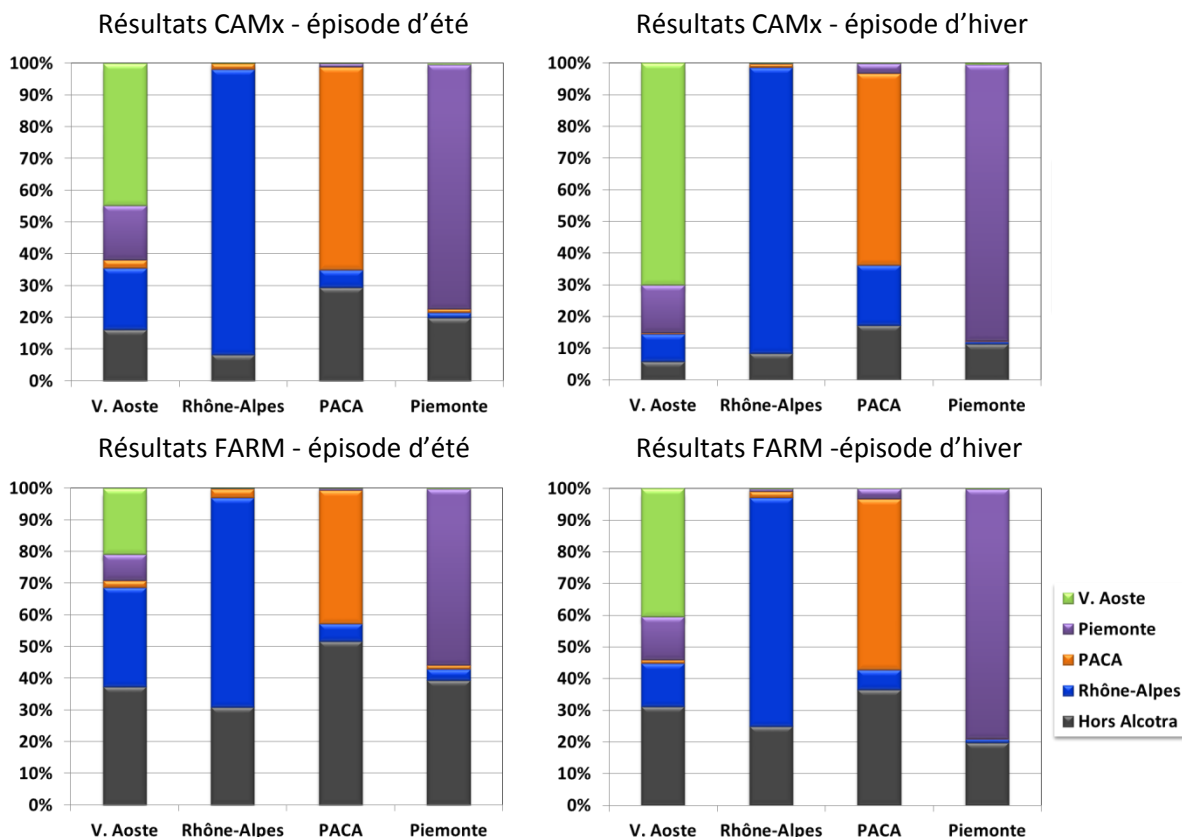


Figure 3.4-11 : Bilans des contributions des sources de pollution par secteur géographique sur les 4 régions : résultats CAMx (a et b) et FARM (c et d).

3.4.3.2 Résultats des contributions sur les sites de prélèvement

Afin de mieux quantifier les échanges de pollution entre ces quatre régions, nous avons tracé les bilans de contribution sur plusieurs stations dans chaque territoire. Les stations les plus pertinentes ont été choisies pour chaque région. Pour ce faire, nous avons pris en considération leurs typologies et leurs positions (proximité aux frontières communes, stations situées dans des vallées communes) pour bien étudier le transport transfrontalier sur notre domaine d'étude. Les stations ont également été sélectionnées de manière à fournir des renseignements sur les concentrations les plus fortes et les plus faibles dans les différentes régions.

Nous avons exclue dans cette étude toutes les stations de proximité automobile.

Les figures ci-dessous (**Figure 3.4- 12 - Figure 3.4- 15**) synthétisent les contributions des émissions de chaque région sur les concentrations des stations fixes choisies. Pour rappel, les apports illustrés en pourcentage ne sont pas représentatifs de toute l'année 2013 car nous avons travaillé seulement sur deux épisodes très particuliers de cette année (épisode hivernal et estival).

Les Figures **Figure 3.4- 12** et **Figure 3.4- 15** montrent que les résultats de contribution des deux modèles FARM et CAMx présentent des différences sur les deux régions Vallée d'Aoste et PACA. Par exemple, sur la région Vallée d'Aoste, les contributions du domaine extérieur calculées par FARM sont souvent supérieures à 20% et celles estimées par CAMx sont généralement inférieures à 20%.

Les Figures **Figure 3.4- 12**, **Figure 3.4- 13**, **Figure 3.4- 14** et **Figure 3.4- 15** confirment que les concentrations en PM10 sur tous les territoires résultent des émissions locales des régions. En effet, sur toutes les régions étudiées, les concentrations s'expliquent en grande partie par une part importante des émissions locales (entre 50% et 90%). Dans la plupart des cas, les contributions maximales proviennent des émissions de la région dans laquelle est située la station.

De même, les figures ci-dessous montrent une forte variabilité spatiale des résultats de contribution. En effet, les bilans des imports aux stations varient en fonction de leurs positions géographiques car l'impact des émissions d'une région régresse logiquement en fonction de la distance à la limite régionale.

Les émissions issues des régions Rhône-Alpes et Piemonte influent sur les concentrations en PM10 sur les autres territoires. Ainsi, les émissions de la région Piemonte expliquent plus de 30% des concentrations de la station Donnas située dans la vallée d'Aoste. De même, la station « Morgex » située sur le territoire de la Vallée d'Aoste subit un fort apport de la région Rhône-Alpes (environs 30%).

Nous observons sur toutes les figures que les contributions des émissions locales sur chaque territoire sont relativement moins importantes en été qu'en hiver et que les contributions du domaine extérieur à la zone Alcotra sont souvent plus importantes en été. Cela peut être expliqué principalement par les conditions météorologiques de la période hivernale choisie. Cette période s'est caractérisé par une atmosphère stable pendant plusieurs jours favorisant ainsi une accumulation de la pollution. En effet, lorsque les mouvements de l'atmosphère sont limités en raison de conditions anticycloniques, par exemple lors des périodes hivernales dites « stables », les SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

masses d'air vont se charger au cours du temps de polluants émis dans les basses couches. En l'absence de vent permettant leur dispersion, les concentrations vont augmenter à cause de la stagnation des émissions. Ensuite quand le temps devient plus perturbé (sous certaines conditions météorologiques), les masses d'air vont se mettre en mouvement, l'intensité de ces mouvements va dépendre à la fois de l'ampleur des dépressions, des reliefs et des zones traversées.

Les deux **Figure 3.4- 13** et **Figure 3.4- 15** montrent que les contributions de PACA en Rhône-Alpes augmentent quand celles de Rhône-Alpes en PACA diminuent et inversement. Cette anti-corrélation est fortement dépendante de la direction du vent : en cas de vent de Nord, les contributions de Rhône-Alpes sur PACA augmentent. En cas de vent de sud, les imports de Rhône-Alpes en PACA sont très faibles alors que les contributions de PACA augmentent rapidement. Ce même phénomène de « bascule d'import » entre les 2 régions en fonction de la direction du vent est également visible sur les Figures **Figure 3.4- 16b** et **Figure 3.4- 16d** qui représentent l'évolution journalière des contributions dans deux stations de ces régions. Les résultats de CAMx montrent que l'import de la région Rhône-Alpes sur le territoire de PACA semble être important sur plusieurs stations de cette région en hiver (**Figure 3.4- 15a**). Cela peut être expliqué par la direction du vent dominante dans cette période (Nord → Sud). Cependant, l'impact des émissions de la région PACA est relativement important sur certaines stations de la région Rhône-Alpes pendant la période d'été comme c'est le cas sur le site Drôme Rural (**Figure 3.4- 13**). Cela peut être expliqué cette fois par un vent de sud dominant pendant l'épisode estival.

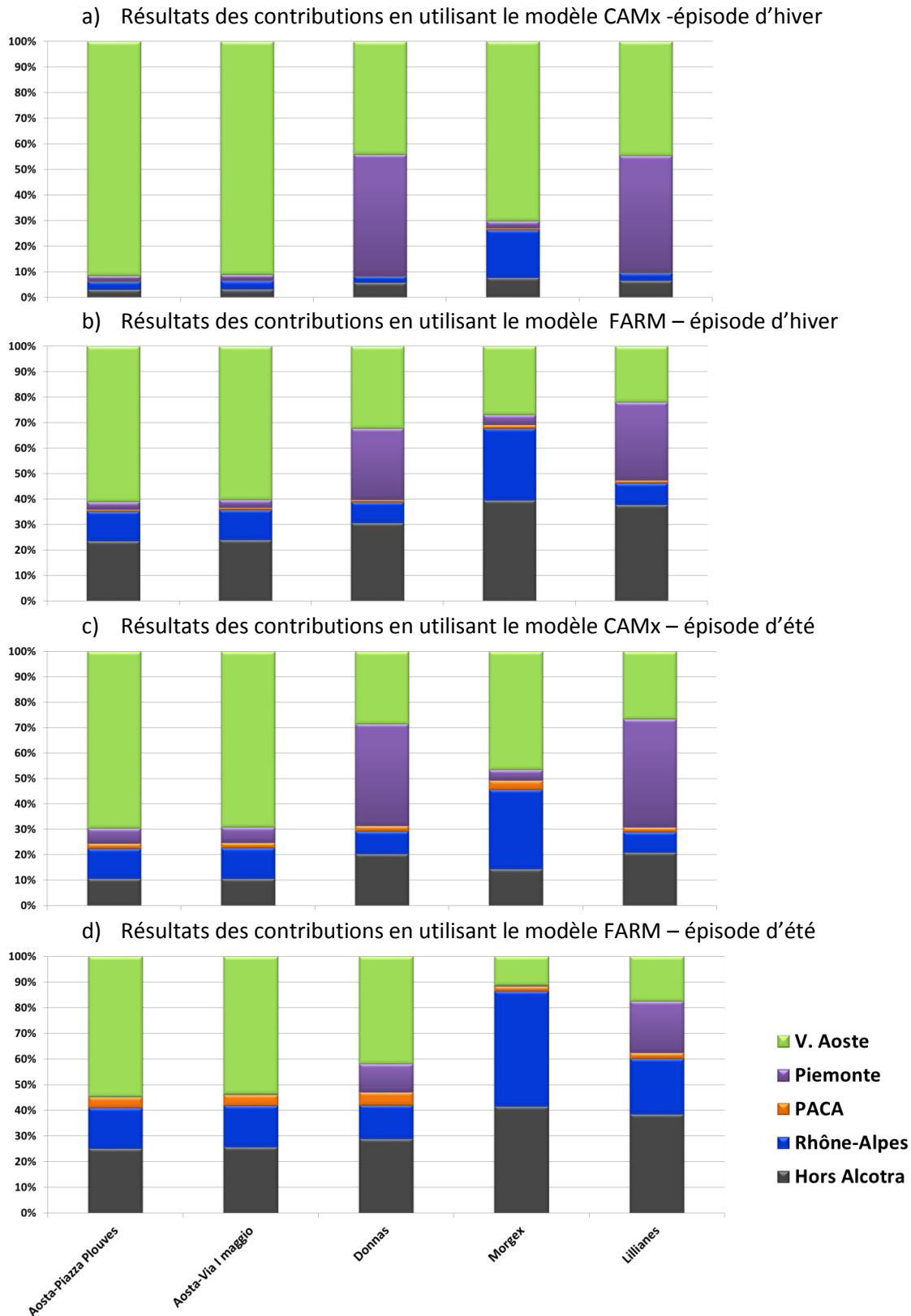


Figure 3.4- 12: Contributions en pourcentage de chaque région sur les stations de la région Vallée d'Aoste.

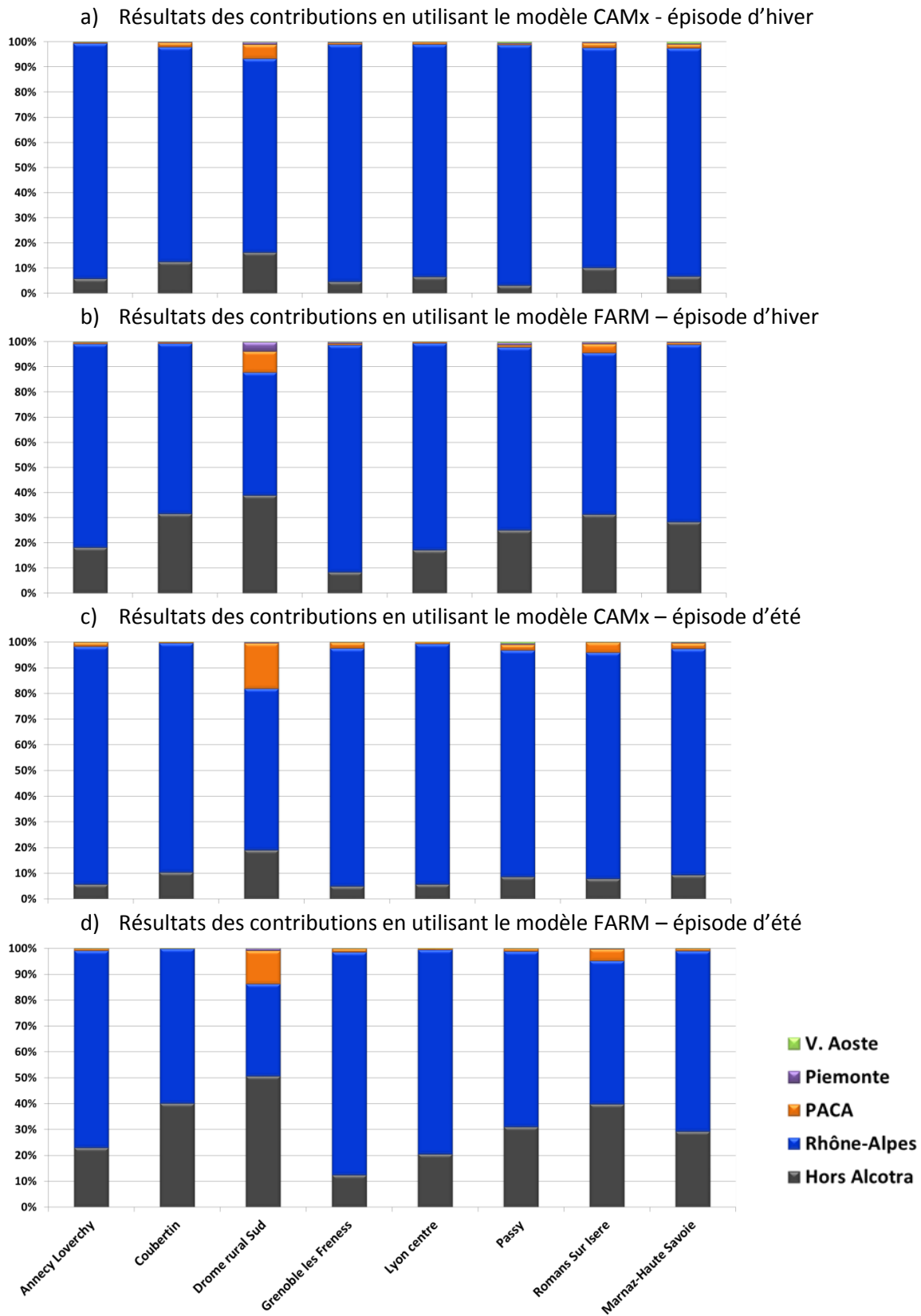


Figure 3.4- 13: Contributions en pourcentage de chaque région sur les stations de la région Rhône-Alpes.

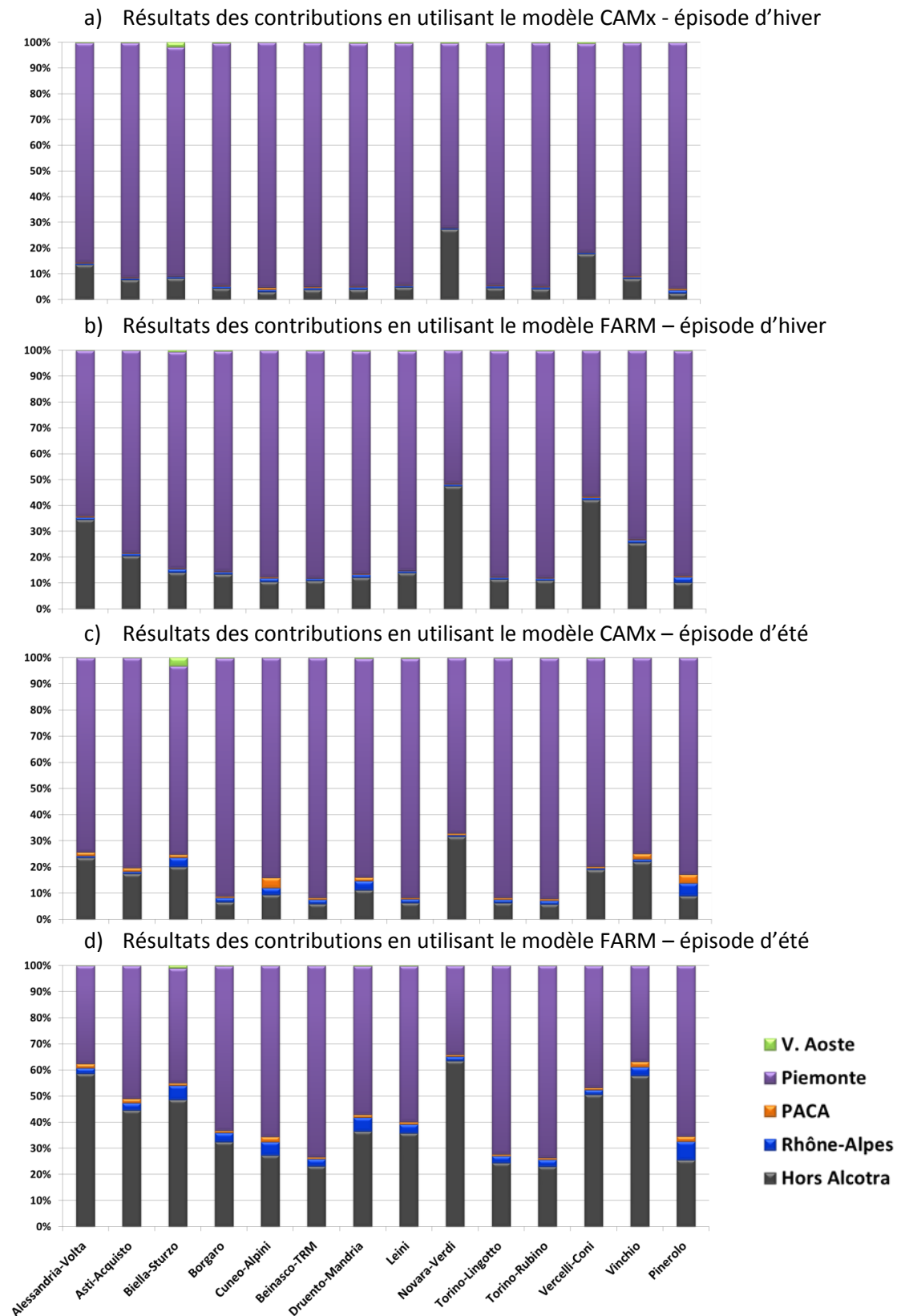


Figure 3.4- 14 : Contributions en pourcentage de chaque région sur les stations de la région Piemonte.

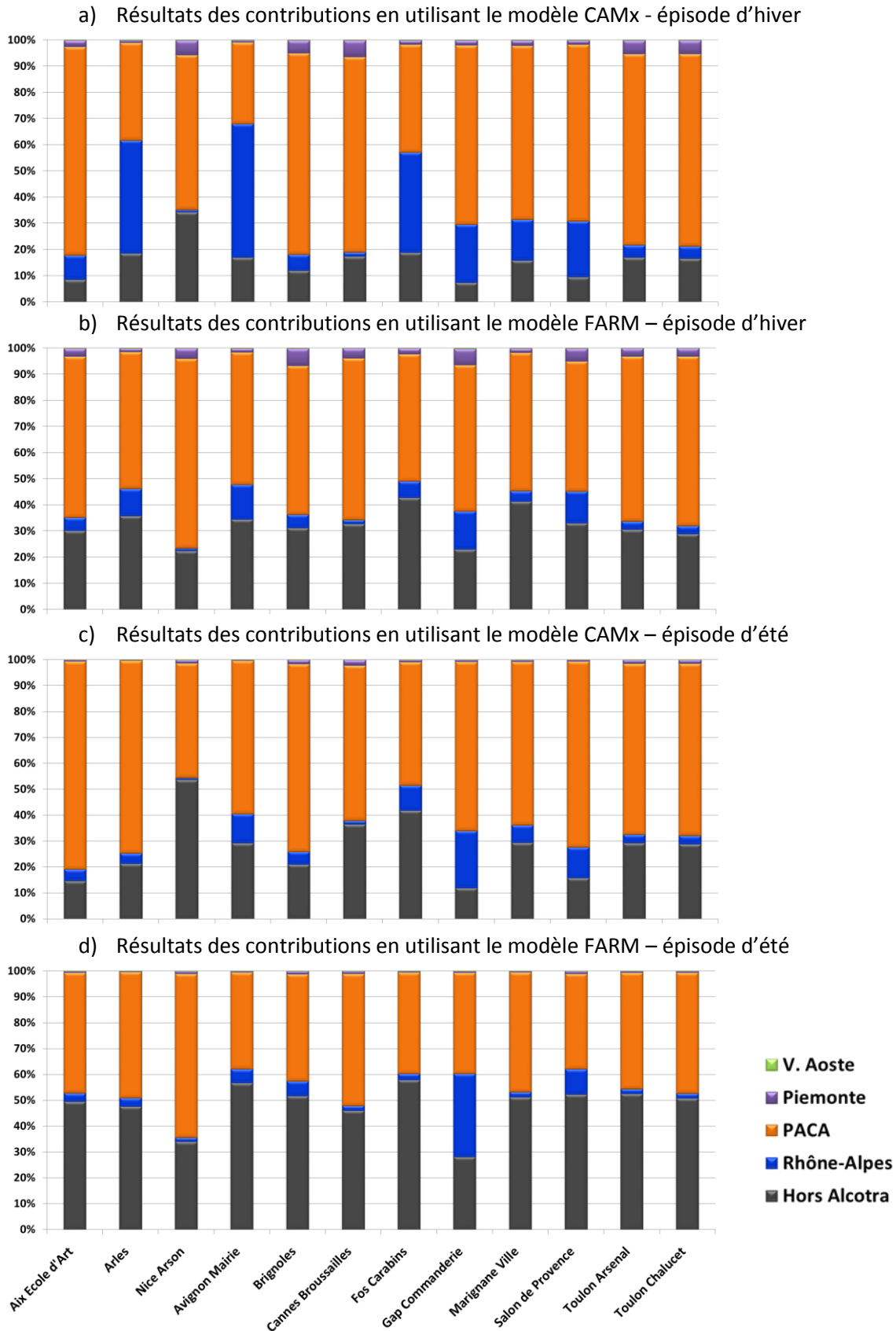


Figure 3.4- 15: Contributions en pourcentage de chaque région sur les stations de la région PACA.

3.4.3.3 Variations temporelles (journalières) des contributions de chaque région

L'impact de chaque région est très variable géographiquement mais aussi temporellement. Certaines périodes et certaines conditions météorologiques sont plus propices aux échanges interrégionaux. Pour illustration, le graphe suivant (**Figure 3.4- 16**) représente les évolutions journalières des contributions des sources par secteur géographique pendant la période hivernale sur 4 stations du territoire Alcotra. Les parts les plus importantes des contributions sont associées aux émissions propres de la région elle-même.

Pendant certaines périodes, les concentrations sur Parco Rubino et Aoste-Plouves s'expliquent uniquement par les émissions locales dans chacune des deux régions. C'est le cas par exemple entre le 25 et le 29/11/2013 où toutes les contributions des autres régions sont quasiment nulles (**Figure 3.4- 16c** et **Figure 3.4- 16d**).

Cependant, pour d'autres périodes, les contributions des autres régions peuvent être relativement élevées. Ceci est illustré par exemple sur la **Figure 3.4- 16b** où les contributions de la région Piemonte sur la station Nice-Aéroport de PACA sont importantes entre le 22 et le 27/11/2013. L'analyse de ces cas présente un intérêt certain dans cette étude car elle illustre précisément la complexité des échanges possibles entre les différentes régions. En effet, parfois à un seul jour d'écart, la répartition géographique des contributions peut être complètement différente en raison d'une variabilité continue des conditions météorologiques et en particulier des flux d'air qui transportent la pollution.

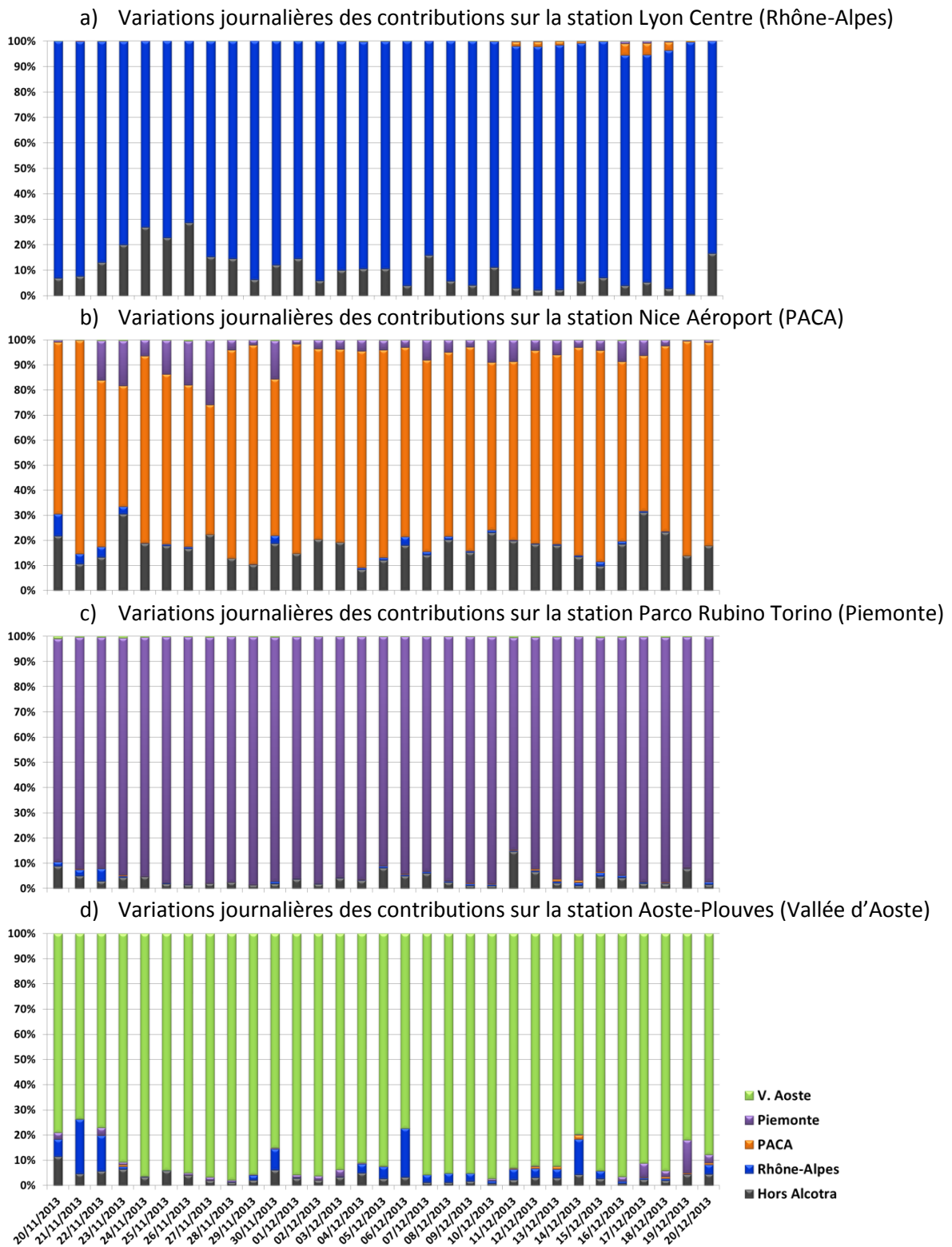


Figure 3.4- 16 : Evolutions journalières des contributions des sources par secteur géographique pendant la période hivernale sur 4 stations du territoire ALCOTRA

3.4.3.4 Cartographie des contributions spatiales des secteurs géographiques

La méthodologie mise au point permet de quantifier en chaque station la contribution de chaque région mais elle permet également de cartographier l'impact d'une région sur les autres territoires. Ces résultats sont illustrés sur les Figures Figure 3.4- 17, Figure 3.4- 18, Figure 3.4- 19 et Figure 3.4- 20. Chaque figure représente l'impact des émissions d'une seule région sur le reste des territoires voisins de la zone Alcotra.

- **Contribution de la région Rhône-Alpes**

Les échanges sont majoritaires avec la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Par exemple en hiver, lors d'épisodes de flux de Nord, les émissions de la région Rhône-Alpes ont une influence significative sur les territoires situés à l'embouchure de la Vallée du Rhône (Avignon, Arles). En effet, la présence de perturbations sur le Nord de l'Europe ainsi que sur le Golfe de Gênes vont créer un « appel d'air » sur la partie ouest de la zone, entraînant un écoulement des masses d'air du Nord vers le Sud. Cet écoulement se trouve canalisé entre les contreforts du Massif Central et des Alpes, formant la Vallée du Rhône, ce qui va entraîner une accélération de l'écoulement. A la sortie de la vallée, les masses d'air vont s'orienter vers l'Est pour aller s'enrouler dans la dépression présente sur le Golfe de Gênes. Ainsi, la typologie des régions PACA et Rhône-Alpes favorise les échanges atmosphériques le long de la vallée du Rhône. Toutefois, cette situation météorologique est le plus souvent associée à des vents intenses (Mistral) favorisant la dispersion des polluants et limitant les épisodes de pollutions.

La Vallée d'Aoste est parfois impactée par les émissions de la région Rhône-Alpes. Aux frontières plus de 20% des concentrations de la vallée d'Aoste peuvent provenir des émissions de la région Rhône-Alpes. L'impact en moyenne sur le Piémont est moindre avec une contribution d'environ 5% qui se limite aux frontières.

- **Contribution de la région PACA**

L'impact des émissions de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur sur la région rhônalpine est concentré au sud et sur la vallée du Rhône. Aux abords de la frontière avec Rhône-Alpes, l'impact des émissions de Provence-Alpes-Côte d'Azur peut dépasser 10% en moyenne pendant l'été. L'impact des émissions de Provence-Alpes-Côte d'Azur sur la Vallée d'Aoste est quasi-nul, et ne concerne que les frontières sur les territoires du Piémont et de Rhône-Alpes.

- **Contribution de la région Piemonte**

Presque la totalité du territoire de la vallée d'Aoste est sous l'influence des émissions de la région Piemonte. L'impact aux frontières avoisine même les 20%. L'impact sur les régions françaises est moindre mais reste tout de même notable en particulier aux frontières (10%). Une grande majorité du territoire de PACA est sous l'influence faible, mais néanmoins présente, du Piémont. En effet, en hiver, les Figures 4.18 et 4.19 montrent que les émissions de la région Piemonte peuvent influencer la région Ligurie au sud et atteindre le littoral de l'est de la région PACA sous certaines conditions météorologiques. De même d'autres échanges entre ces deux territoires peuvent tout de même avoir lieu, principalement par la zone côtière. Sous certaines conditions synoptiques, les masses

d'air provenant de la plaine du Pô descendent vers la côte puis s'enroule vers l'ouest pour s'orienter vers les régions côtières de PACA. En l'absence de pluie pouvant lessiver les polluants en suspension dans l'atmosphère, ces conditions peuvent entraîner un déplacement de masses d'air chargées vers les territoires influencés. Dans certains cas, les masses d'air peuvent également remonter du Sud vers le Nord. Cette situation est le plus souvent associée à des masses d'air chaud, en provenance du Nord du continent Africain.

- **Contribution de la région Vallée d'Aoste**

L'impact des émissions de la Vallée d'Aoste se concentre principalement sur son territoire et est très limité sur les autres régions (à peine 5%). En effet, les reliefs existants autour de cette région conditionnent les parcours empruntés par les masses d'air. Ainsi, l'arc alpin crée une barrière naturelle entre les régions françaises et italiennes.

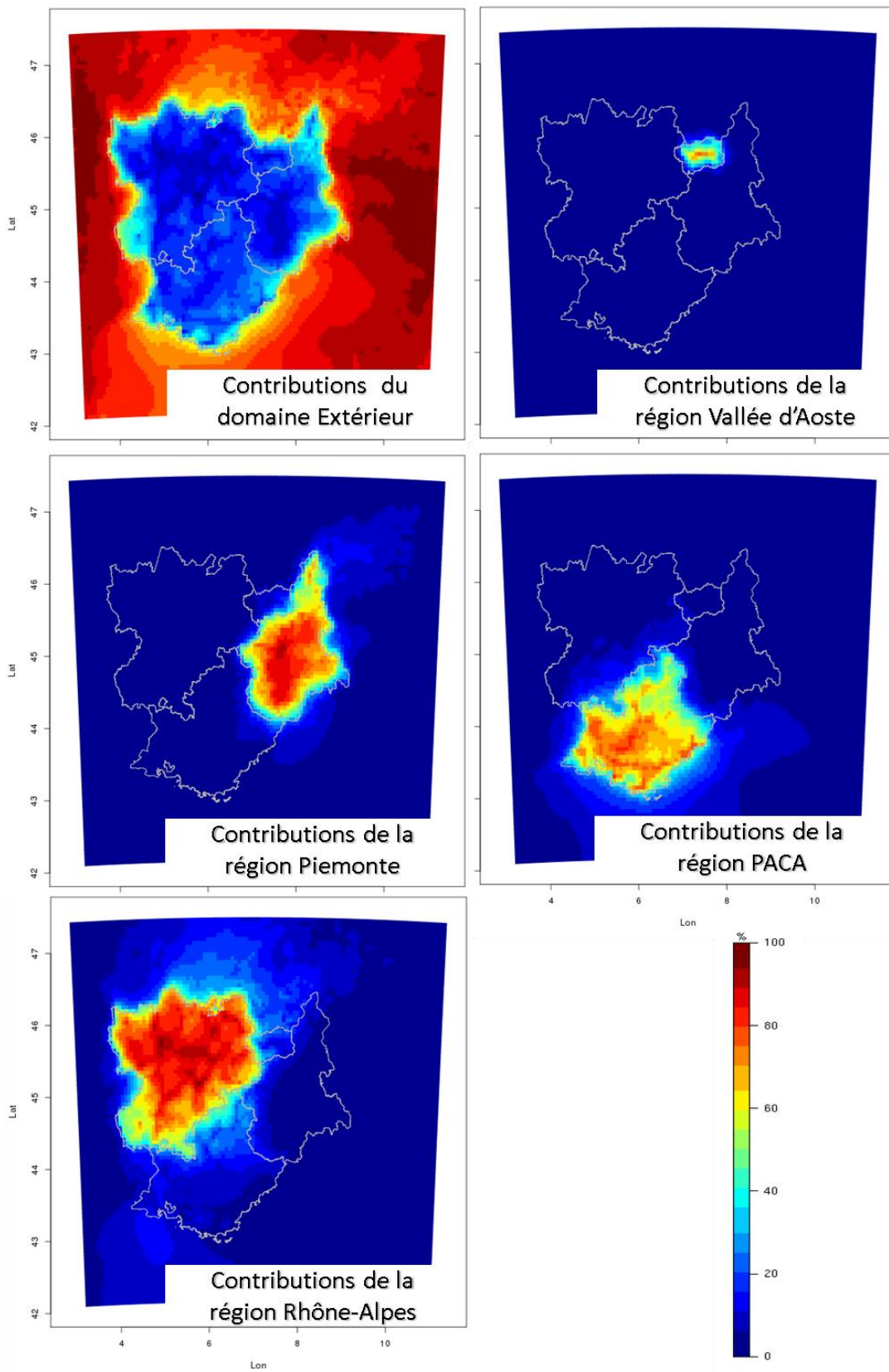


Figure 3.4- 17 : Cartographies des contributions des PM10 issues de chaque région sur les autres territoires – résultats calculés par CAMx pour la période estivale.

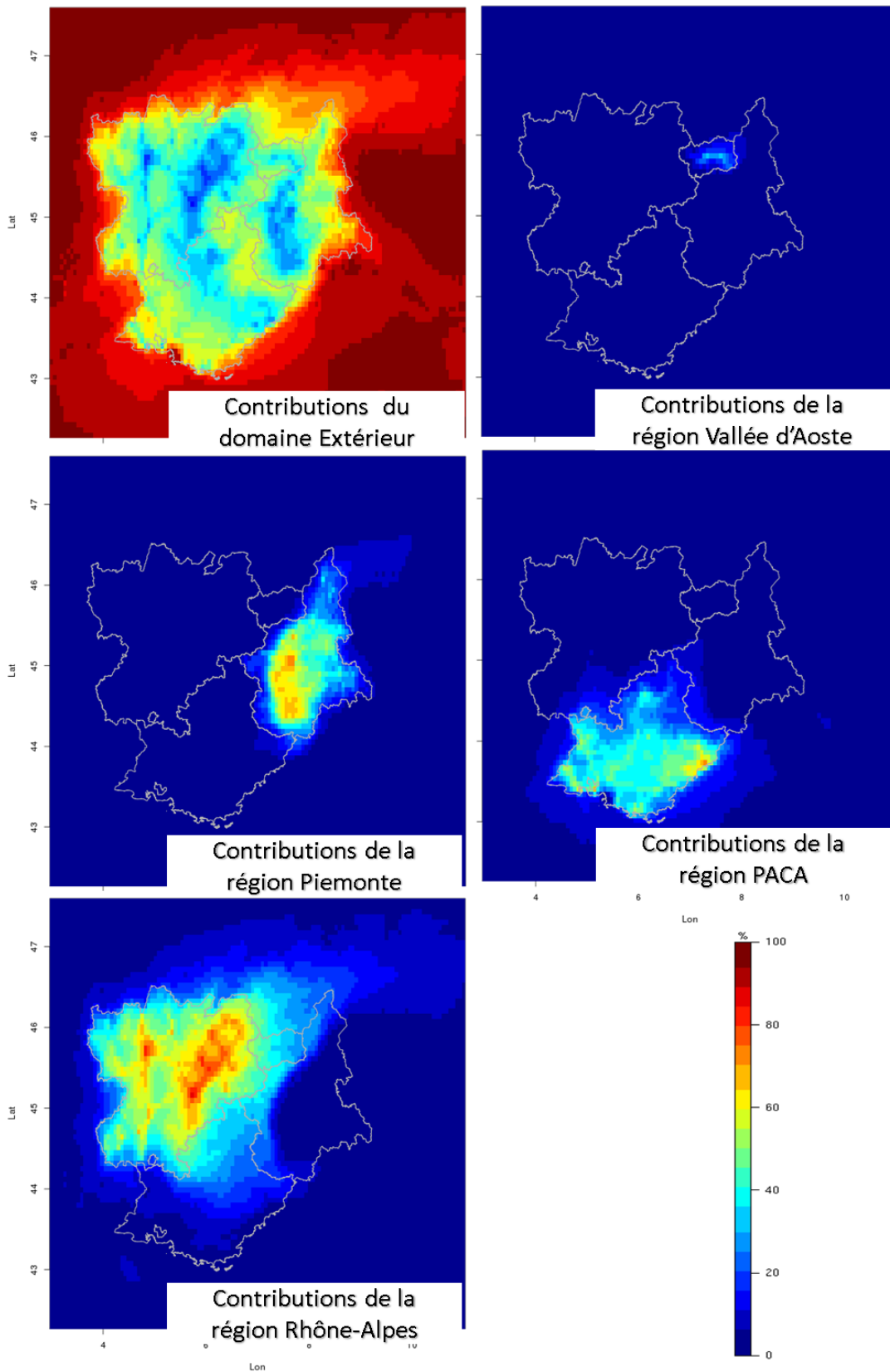


Figure 3.4- 18 : Cartographies des contributions des sources par secteur d'activité pour la période estivale : Résultats du modèle FARM (Résultats invalidés sur le territoire de Marseille (cf. section 3.4.2.4))

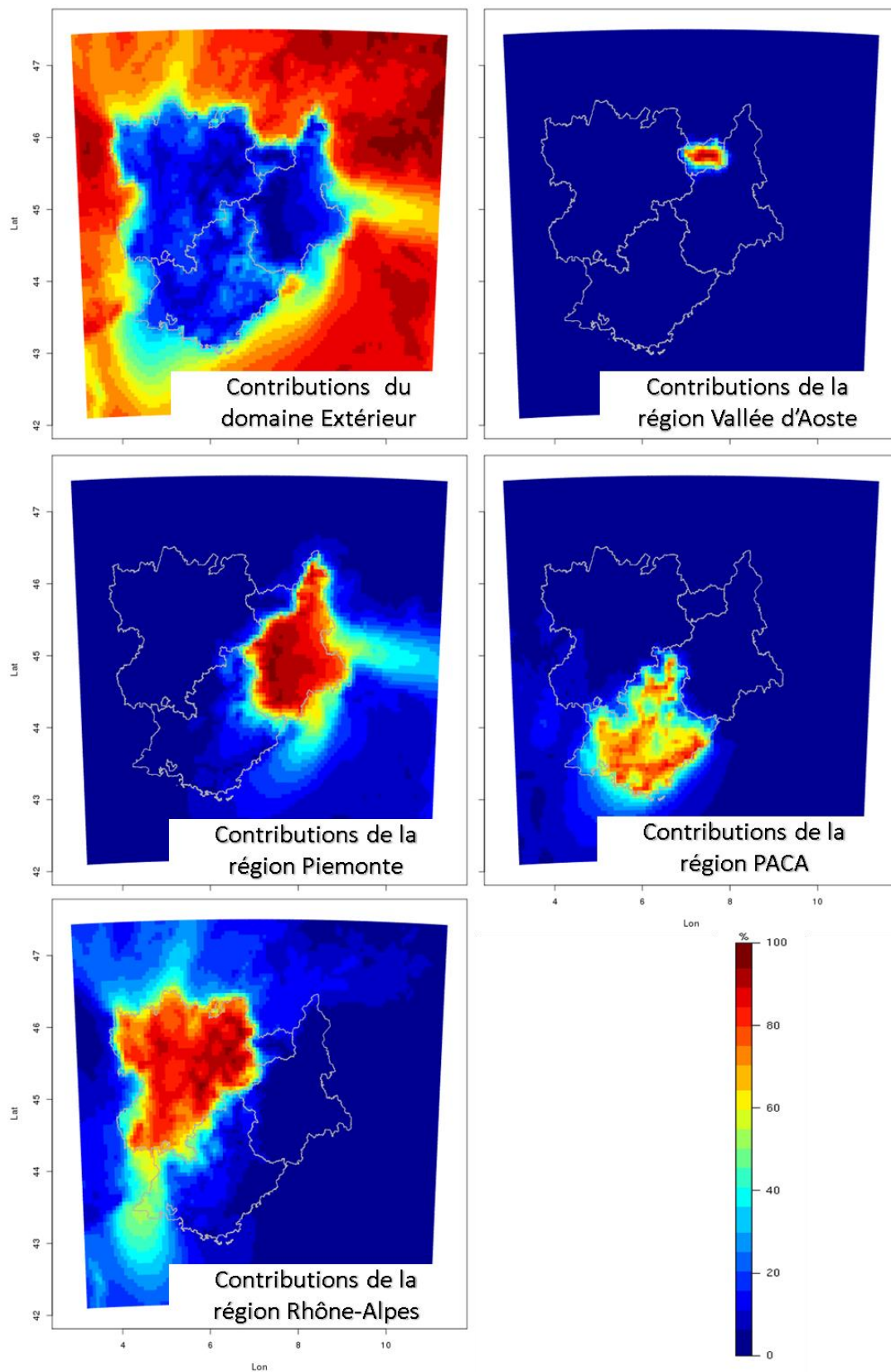


Figure 3.4- 19 : Cartographies des contributions des PM10 issues de chaque région sur les autres territoires – résultats calculés par CAMx pour la période hivernale.

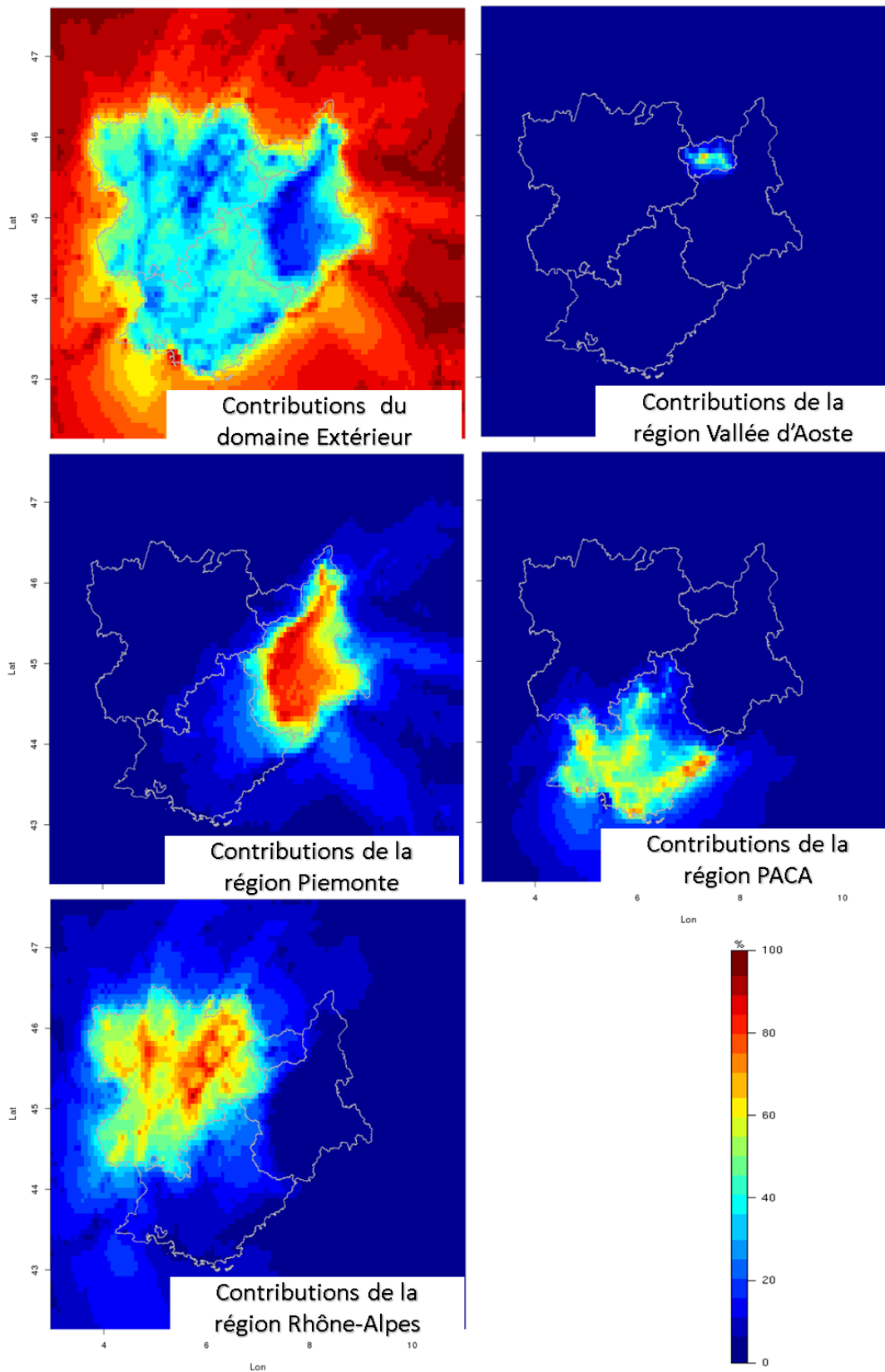


Figure 3.4- 20 : Cartographies des contributions des sources par secteur d'activité pour la période hivernale : Résultats du modèle FARM (Résultats invalidés sur le territoire de Marseille (cf. section 3.4.2.4))

3.4.4 Conclusions

Aujourd'hui, l'ensemble du territoire alpin franco-italien est soumis à une pollution particulaire parmi les plus importantes et plus récurrentes en Europe.

La troisième action du projet Sh'air s'est focalisée sur l'identification des sources et le transport exogène de cette pollution sur la zone ALCOTRA. Dans un contexte de contentieux Européen, la question des responsabilités est essentielle et doit servir de base à la mise en place de leviers d'actions efficaces pour réduire la pollution particulaire.

Pour identifier ces responsabilités, une nouvelle plateforme de modélisation numérique, fondée sur deux modèles de chimie-transport FARM et CAMx, a été mise en place. Ces outils ont été utilisés dans un premier temps pour quantifier sur chaque station de mesure les contributions des sources de PM10 par secteur d'activité. Dans un deuxième temps, le travail a permis d'estimer l'impact de la pollution issue de chaque région sur les autres territoires du domaine Alcotra.

Plusieurs conclusions ont pu être mises en évidence grâce à ce travail :

- l'étude d'intercomparaison réalisée sur les résultats de contribution des sources fournis par les deux modèles FARM et CAMx indique globalement un bon accord entre les deux outils de modélisation utilisés.
- la combustion de la biomasse reste le principal contributeur pour la concentration en PM10 sur la majorité du domaine Alcotra pendant la période d'hiver. Ce résultat est plus marqué sur les territoires préalpins et alpins.
- le trafic routier est le secteur d'activité qui contribue le plus aux concentrations en PM10 durant l'été, en particulier dans les grands centres urbains de la zone Alcotra (Lyon en Rhône-Alpes, Turin en Piemonte et Nice en Région PACA,...).
- dans chaque région, les contributions majeures à la pollution particulaire proviennent des émissions locales.
- les transferts interrégionaux de pollution dépendent principalement des conditions météorologiques et du relief (montagnes, vallées, ...).
- De manière générale, les échanges sont plus importants en été qu'en hiver, à la fois entre les régions de la zone Alcotra et avec le domaine extérieur.

Cependant, il est important de noter que les travaux menés au cours de ce projet ont porté sur des périodes particulières avec une météorologie et des niveaux de pollution spécifiques : niveaux faibles en été et plus élevés en hiver.

Par ailleurs, près d'un quart de la quantité totale des particules fines sur les sites de mesure est issu de secteurs d'activités qui n'ont pas été tracés dans le cadre de cette étude et la part de contribution du domaine extérieur est significative sur les régions du domaine Alcotra.

Il semble donc indispensable de poursuivre le travail en analysant d'autres périodes de mesures caractérisées par d'autres configurations météorologiques et en identifiant de manière plus précise

les contributeurs hors région Alcotra (Suisse, Afrique du Nord...) et les secteurs d'activité non tracés dans le cadre de cette étude.

La compréhension totale de l'intégralité de ces processus demande encore un travail important pour mieux appréhender toute la complexité des phénomènes et généraliser les résultats obtenus.

3.4.5 Synthèse

Les systèmes de modélisation développés ont évalué les différentes responsabilités dans la pollution particulaire sur le territoire ALCOTRA. Ils ont permis la quantification des sources de pollutions sur les concentrations en PM₁₀ par secteur d'activité et l'impact de la pollution issue de chaque région sur les autres territoires du domaine d'étude. L'intercomparaison des résultats indique un bon accord entre les deux outils de modélisation.

La combustion de la biomasse est le principal contributeur aux concentrations en PM₁₀ sur la majorité du domaine ALCOTRA pendant la période hivernale. Ce résultat est plus marqué sur les territoires préalpins et alpins (Figure 1). Durant cette période, la contribution du trafic routier est également importante dans les grandes agglomérations et à proximité des axes routiers structurants.

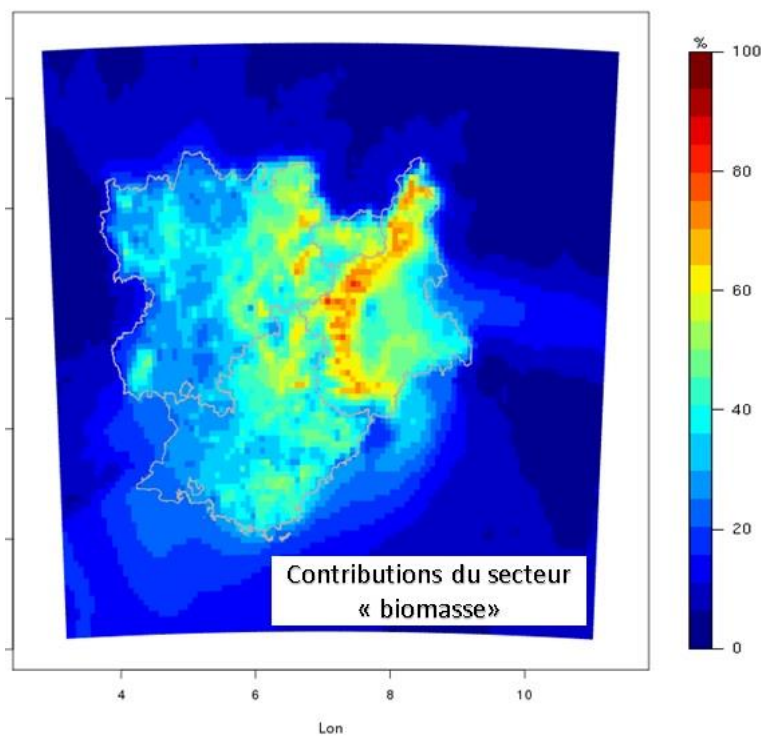


Figure 3.4.5-1: Cartographie des contributions relative de la combustion de biomasse au cours de la période hivernale.

Au cours de la période estivale, le trafic routier apparaît comme le contributeur le plus important aux concentrations en particules, quelle que soit la région étudiée (Figure 2). Dans les grandes agglomérations comme Turin, Nice ou Lyon, sa contribution moyenne est proche des 70%. Sur l'ensemble du territoire, près d'un quart des particules fines est associé à des secteurs non explicités dans cette étude.

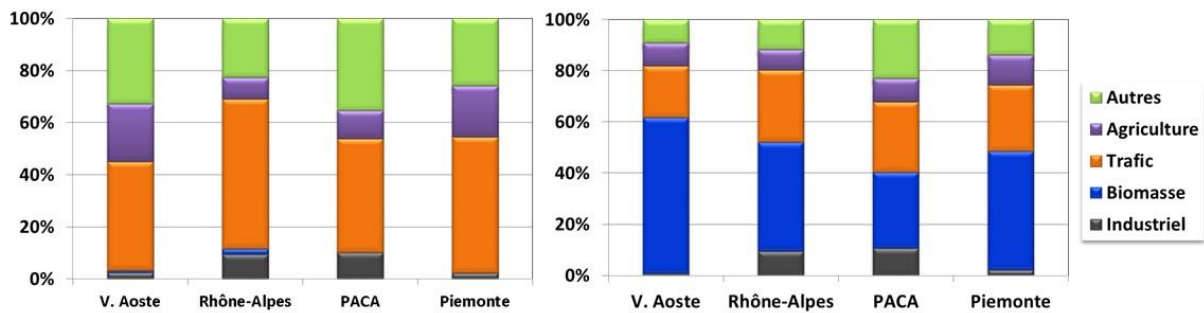


Figure 3.4.5-2: Bilans des contributions des sources par secteur d'activité sur les régions partenaires au cours de la période estivale (gauche) et hivernale (droite).

Au niveau géographique, les contributions majeures à la pollution particulaire dans chaque région proviennent des émissions locales (Figure 3). Les transferts interrégionaux de pollution dépendent principalement des conditions météorologiques et du relief, bloquant ou canalisant le transport des masses d'air (Figure 4). Les imports, en provenance de l'extérieur, dans chaque région partenaire sont plus importants en été qu'en hiver. Enfin les échanges entre les différentes régions de la zone ALCOTRA sont faibles mais peuvent être significatifs à l'occasion d'épisodes de transports particuliers.

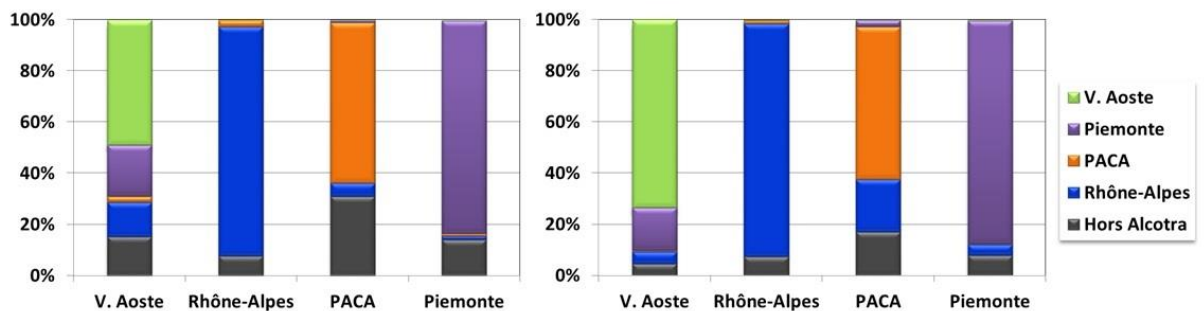


Figure 3.4.5-3: Bilans des contributions des sources de pollution par secteur géographique sur les 4 régions au cours de la période estivale (gauche) et hivernale (droite)

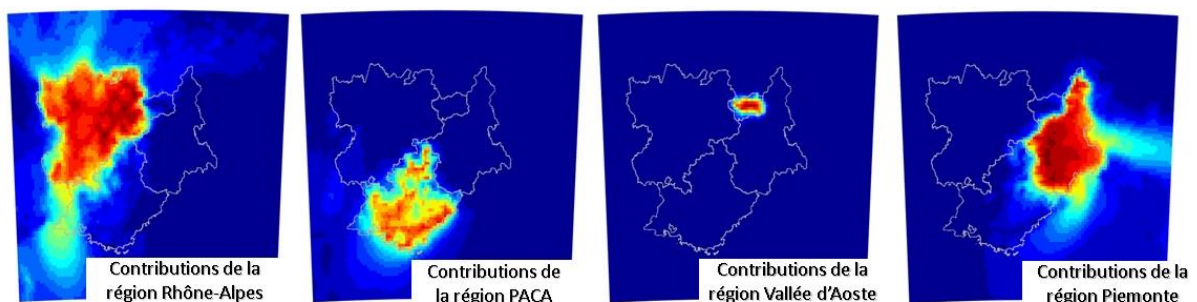


Figure 3.4.5-4: Cartographie des contributions de chacune des régions sur les concentrations en PM10 au cours de la période hivernale.



Individuazione delle fonti e dei contributi di inquinamento da particolato

Sommario

3.0. Presentazione dell'azione sulla modellizzazione	326
3.0.1 Introduzione dell'azione	326
3.0.2 Presentazione della metodologia	327
3.0.3 I parametri generali dell'azione.	328
3.1. Messa in opera dei modelli di chimica e trasporto	330
3.1.1 Descrizione dei modelli.....	330
3.1.2 Realizzazione di casi test.....	334
3.1.3 Sintesi dell'azione	356
3.2. Preparazione delle emissioni sulle 4 regioni partner	357
3.2.1 Presentazione degli inventari/catasti delle emissioni	357
3.2.2 Armonizzazione dei dati emissivi.....	361
3.2.3 Armonizzazione dei profili di evoluzione temporale	362
3.2.4 Calcolo del catasto sulla zona ALCOTRA	363
3.2.5 Integrazione dei cadastres nei modelli fotochimici	364
3.2.6 Sintesi dell'azione	368
3.3. Valutazione dei risultati modellistici	369
3.3.1 Le misure di concentrazione e di speciazione del particolato	369
3.3.2 Calcolo dei campi meteorologici.....	379
3.3.3 Analisi dei campi di concentrazione calcolati con i modelli.....	391
3.3.4 Analisi della speciazione calcolata con i modelli.....	406
3.3.5 Sintesi.....	411
3.4. Scenari: calcolo dei contributi	413
3.4.1 Definizione dei settori emissivi	413
3.4.2 Risultati dei contributi per settore emissivo.....	413
3.4.3 Risultati dei contributi per regione.....	427
3.4.4 Conclusioni.....	442
3.4.5 Sintesi.....	444
Allegato A	448
Allegato B	452
Allegato C	456
Allegato D	481
Allegato E	486
Allegato F	492

3.0. Presentazione dell'azione sulla modellizzazione

3.0.1 Introduzione dell'azione

Il progetto SHAIR si inserisce nell'asse dei progetti europei AERA et PART'AERA, proseguendone le attività strategiche legate alla protezione della qualità dell'aria sul territorio ALCOTRA che interessa le regioni italiane di Piemonte, Liguria e Valle d'Aosta e le regioni francesi di Rhône-Alpes e di Provence-Alpes-Côte d'Azur (Figura 3.0.1-1).



Figura 3.0.1-1: Regioni che compongono il territorio ALCOTRA

Attualmente l'insieme del territorio alpino franco italiano è soggetto a fenomeni di inquinamento da particolato tra i più importanti e ricorrenti in Europa. I valori limite stabiliti dalla normativa europea sono superati con regolarità. Questi episodi di inquinamento costituiscono un problema per la salute pubblica, dal momento che OMS li addita come causa di circa 350.000 decessi prematuri all'anno.

L'inquinamento dell'aria agisce non solo sulle popolazioni residenti in zone urbane, ma ha effetti anche su quelle che vivono in aree protette; a questo proposito va ricordato come le regioni ALCOTRA possiedano numerose aree naturali sensibili: il Parco Nazionale della Val Grande, il Parco Nazionale delle 5 Terre, il Parco Nazionale del Gran Paradiso, il Parco Nazionale de la Vanoise, il Parco Nazionale des Ecrins, il Parco Nazionale del Mercantour, i Parchi Nazionali litoranei di Port Cros e delle Calanques di Marsiglia.

I territori interessati dalla protezione della popolazione sono coinvolti nella riduzione delle emissioni antropiche. Per migliorare i piani di intervento regionali e locali è però necessario conoscere con precisione le principali sorgenti antropiche responsabili dell'inquinamento da particolato e, allo stesso modo, comprendere e quantificare l'eventuale contributo del trasporto transfrontaliero all'interno di ciascuna regione del territorio ALCOTRA.

Il progetto SHAIR è un progetto di cooperazione transfrontaliera franco-italiano che vuole rispondere alle richieste degli Enti Istituzionali italiani e francesi sull'origine e sulle cause dell'inquinamento da particolato che interessa regolarmente il territorio ALCOTRA, specie nella stagione invernale. Il progetto si appoggia ad un partenariato solido ed attivo, che favorisce lo scambio delle conoscenze e degli strumenti al fine di rispondere alle richieste in materia dei decisori e dei cittadini.

Per poter agire efficacemente sugli episodi di inquinamento da particolato che portano ad un peggioramento della qualità dell'aria su questi territori, è innanzitutto necessario indentificarne e quantificarne le sorgenti, per definirne le differenti cause e quindi mettere in atto delle azioni di mitigazione e conservazione.

3.0.2 Presentazione della metodologia

Il progetto Part'AERA ha permesso di effettuare una prima diagnosi quantificando, a livello di quattro stazioni di misura collocate sul territorio ALCOTRA, i contributi delle diverse sorgenti durante gli episodi di inquinamento da particolato verificatesi nel corso di un anno. Questo primo studio ha messo in evidenza i principali settori di attività responsabili degli episodi, mostrando inoltre come questi siano differenti a seconda della stagione e della localizzazione del sito di misura.

Il progetto SHAIR, per approfondire ulteriormente tali risultati, ha l'ambizione di realizzare tale individuazione e quantificazione delle sorgenti su tutto il territorio di studio, aggiungendo anche tra i settori di indagine le eventuali responsabilità dei differenti territori negli episodi che implicano un trasporto su scala regionale o sovragionale delle masse d'aria.

Per dar seguito a queste premesse, è necessario mettere in opera dei modelli numerici che siano in grado di fornire un'informazione spazializzata sul territorio. La scelta dei modelli si è orientata sui modelli FARM et CAMx, entrambi modelli di chimica e trasporto (CTM), utilizzati rispettivamente dai partner italiani e francesi. Questi due modelli integrano dei moduli di calcolo specifici che permettono di identificare le differenti sorgenti inquinanti seguendo, sull'insieme del territorio di studio, il trasporto e le trasformazioni in atmosfera degli inquinanti da loro emessi.

La realizzazione di questi obiettivi si declina in quattro sotto azioni, ciascuna delle quali associata ad un preciso compito. La prima deve assicurare il funzionamento dei modelli numerici adottati attraverso l'installazione operativa delle catene di calcolo, la preparazione delle base di dati in ingresso ai modelli, e la prova di funzionalità con la realizzazione di un caso test. La seconda azione ha, da un lato, il compito di assicurare la coerenza dei dati di emissione degli inquinanti forniti da ciascun partner relativamente ai territori di propria competenza e, dall'altro, di produrre un inventario delle emissioni omogeneo sull'insieme del territorio ALCOTRA che possa essere utilizzato per alimentare i modelli di chimica e trasporto. La terza azione ha lo scopo di validare i risultati forniti dai modelli confrontandoli con i dati di qualità dell'aria misurati dalle stazioni di SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

monitoraggio localizzate sul territorio. Infine, l'ultima azione utilizza le funzionalità dei modelli numerici per rispondere all'obiettivo principale del progetto: la ricerca delle sorgenti e delle cause dell'inquinamento da particolato.

3.0.3 I parametri generali dell'azione.

Per capitalizzare al meglio i risultati e le conclusioni dei progetti precedenti, l'anno di studio scelto nel progetto è il 2013, anno nel corso del quale sono state realizzate numerose misure di speciazione sul territorio ALCOTRA, in particolare nell'ambito del progetto Part'Aera. L'esplorazione di questa base dati permetterà di confrontare i risultati della modellizzazione sia con le concentrazioni di particolato sia con i contributi dei differenti settori di attività studiati a livello dei siti di misura.

Sono stati selezionati due periodi rappresentativi di episodi di inquinamento da particolato. Il primo va dal 20 novembre 2013 al 20 dicembre 2013, mese nel corso del quale si sono avuti molteplici superamenti del valore limite giornaliero per il particolato su tutto il territorio di studio. Il secondo episodio ha ugualmente la durata di un mese e va dal 20 luglio al 20 agosto 2013

La scelta di questi due periodi permette di studiare episodi con caratteristiche ben distinte. L'episodio invernale è caratterizzato da situazioni di forte stratificazione atmosferica che favoriscono l'accumulo degli inquinanti nei bassi strati atmosferici; in questi casi l'attività fotochimica non è molto intensa e dunque si ha meno formazione di particolato secondario. Al contrario negli episodi estivi si assiste ad una intensa attività fotochimica associata ad una produzione importante di inquinanti secondari quali gli aerosols secondari organici (SOA).

La ricerca delle sorgenti e delle cause dell'inquinamento da particolato verificatosi durante questi episodi è realizzata sull'insieme del dominio ALCOTRA, rappresentato in Figura 3.0.3-2. Tutti le simulazioni con FARM e CAMx saranno realizzate su questo dominio.

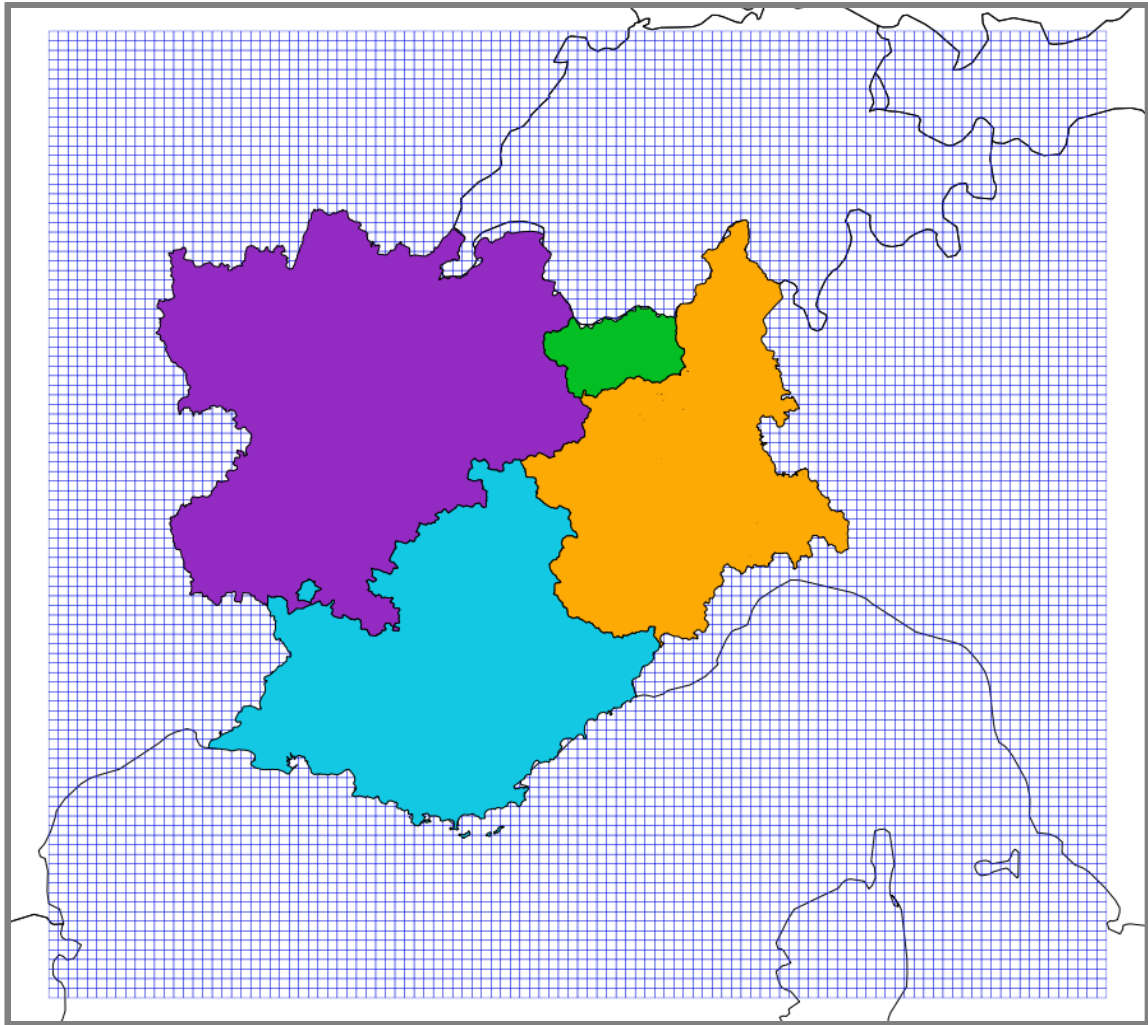


Figura 3.0.3 - 1 : Rappresentazione del dominio ALCOTRA utilizzato per le simulazioni numeriche.

3.1. Messa in opera dei modelli di chimica e trasporto

Questa azione punta a sviluppare i sistemi di calcolo necessari al funzionamento dei due modelli di chimica e trasporto scelti dai partner italiani, FARM, e francesi, CAMx. Tali sistemi devono integrare la fase di preparazione dei dati di ingresso (meteorologia, condizioni al contorno del dominio, emissioni), la fase di esecuzione del modello e la fase di elaborazione e preparazione dei risultati per l'analisi.

3.1.1 Descrizione dei modelli

3.1.1.1 Il modello CAMx

CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extensions) è un modello euleriano di chimica e trasporto, sviluppato da Environ, che permette di simulare le concentrazioni in atmosfera del particolato e degli inquinanti gassosi, su scale che vanno dalla continentale a quella urbana. Il modello è composto da differenti moduli che ne fanno un sistema completo « open-source » per lo studio della qualità dell'aria.

CAMx necessita di molteplici dati di ingresso per poter realizzare i calcoli della fisica e della chimica atmosferica. I campi meteorologici possono provenire da differenti modelli comunemente utilizzati come, ad esempio, WRF, MM5 o RAMS. I dati di emissione devono essere forniti come ingresso al modello su tutto il dominio di studio; questi dati possono provenire sia da differenti preprocessori emissivi come SMOKE, CONCEPT, EPS o EMS, solitamente utilizzati negli Stati Uniti, sia da dati locali di emissione, previa opportuna formattazione. Per stimare i tassi di fotolisi devono inoltre essere forniti dati di profilo verticale sulla colonna atmosferica.

Moduli differenti permettono di effettuare calcoli specifici, come quelli per la stima dei contributi delle sorgenti emissive sulle concentrazioni finali. Le metodologie utilizzabili in CAMx si raggruppano in due categorie: la prima fa riferimento alle analisi di sensibilità, ovvero la valutazione della risposta del sistema ad una variazione dei dati in ingresso, la seconda, quella dei traccianti reattivi, consiste nell'introdurre nelle simulazioni delle specie aggiuntive che vengono marcate, permettendo così di seguire gli inquinanti emessi da sorgenti specifiche. Mentre la prima metodologia non produce una valutazione diretta in senso stretto del contributo della sorgente poichè la relazione tra i dati in ingresso, le emissioni, ed i dati in uscita, le concentrazioni, non è lineare, la seconda permette di conservare la massa della concentrazione totale simulata e della somma delle concentrazioni dei contributi delle differenti sorgenti.

Nell'ambito di questo studio si è deciso di adottare con CAMx il metodo PSAT (PM Source Apportionment Technology) per la stima dei contributi delle sorgenti emissive alle concentrazioni di particolato. PSAT utilizza la metodologia dei traccianti reattivi che permette di seguire la componente primaria del particolato, il particolato secondaria ed anche i suoi precursori gassosi. Il metodo prevede pertanto l'integrazione nella simulazione di 32 specie di traccianti reattivi per ciascuna sorgente emissiva in esame. Le sorgenti bersaglio possono essere raggruppate sulla base dei loro settori di attività (industriali, naturali, veicolari), ma anche per localizzazione geografica. Il valore aggiunto di questa metodologia è, come ricordato in precedenza, quello di conservare le

concentrazioni tra la simulazione di riferimento e la somma dei contributi dei singoli settori esaminati. Permette inoltre un guadagno importante in termini di tempo di calcolo poiché le concentrazioni ed i contributi sono valutati in una sola simulazione. In uscita CAMx fornisce i campi di concentrazione dei principali inquinanti, come gli ossidi di azoto (NO, NO₂), il biossido di azoto SO₂, l'ozono O₃ ed il particolato. Quest'ultimo si compone di molteplici specie, quali gli ioni solfati, nitrati ed ammonio, il carbonio elementare, le componenti organiche primarie e secondarie, i cloruri, etc. Questi dati permettono un confronto con le analisi di speciazione del particolato realizzate in specifiche campagne di misura.

3.1.1.2 Il modello FARM

FARM (Flexible Air quality Regional Model) è un modello euleriano di chimica e trasporto in grado di calcolare le concentrazioni in atmosfera dei principali inquinanti atmosferici (aerosols e gas) su scale spaziali che vanno da quella urbana a quella continentale, su scale temporali sia orarie sia di lungo periodo. Il modello, sviluppato originariamente da AriaNET [42] sulla base del modello STEM [43] come codice proprietario; è attualmente un codice parallelo « open-source » a seguito di una collaborazione tra la stessa AriaNET, il Consorzio INTERuniversitario per il Calcolo Automatico CINECA ed ARPA Piemonte [44]. FARM è un modello molto utilizzato a livello italiano, in particolare è stato adottato da ENEA (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, energia e lo sviluppo economico sostenibile) per conto del Ministero Italiano dell'Ambiente nell'ambito del progetto MINNI [45]. Tra le principali caratteristiche del modello si possono ricordare:

- la possibilità di trattare le sorgenti diffuse e le grandi sorgenti puntuali con effetto di plume-rise;
- la possibilità di utilizzare diversi moduli chimici per la descrizione dei processi di trasformazione chimica che avvengono in atmosfera;
- la capacità di trattazione della chimica in fase condensata ed in fase acquosa;
- la possibilità di utilizzare griglie innestate (nesting) in comunicazione tra loro, sia in modalità one-way (modalità ad una via, in cui la comunicazione avviene solo dalla griglia a bassa risoluzione verso la griglia principale a più alta risoluzione), sia in modalità two-way (modalità a due vie, in cui la comunicazione tra le griglie avviene nei due versi);
- parallelizzazione a memoria distribuita, a memoria condivisa ed ibrida;

42 Gariazzo C., Silibello C., Finardi S., Radice P., Piersanti A., Calori, G., Cecinato A., Perrino C., Nussio F., Cagnoli M., Pelliccioni A., Gobbi G.P., Di Filippo P., A gas/aerosol air pollutants study over the urban area of Rome using a comprehensive chemical transport model, *Atmospheric Environment* 41,7286-7303, 2007

43 Carmichael G. R., Peters L. K., Saylor R. D. The STEM-II Regional Scale Acid Deposition and Photochemical Oxidant Model-I. An Overview of Model Development and Applications. *Atmos. Environ.*, 25A, 10, 2077-2090, 1991

44 Marras G. F., Silibello C., Calori G., 2012, An Hybrid parallelization of Air Quality Model with MPI and OpenMP, *Recent Advances in the Message Passing Interface*, pp235-245, Springer Berlin Heidelberg, 2012

45 Mircea M, Zanini G., Briganti G., Cappelletti A., Pederzoli A., Vitali L., Pace G., Marri P., Silibello C., Finardi S., Calori G., Modeling air quality over Italy with MINNI atmospheric modeling system: from regional to local scale. *Air Pollution Modeling and its Application XXI*, 2010, Springer Netherlands, pp.491-498

- l'integrazione del modul T.UV [⁴⁶] per il calcolo del trasporto radiativo e del modulo MEGAN [⁴⁷] per le emissioni biogeniche.

FARM, analogamente a CAMx, necessita in ingresso di molteplici informazioni che devono essere fornite sui domini di simulazione: campi meteorologici tridimensionali, concentrazioni tridimensionali degli inquinanti ai bordi dell'area di studio ed all'inizio del periodo di simulazione, ratei di emissioni (antropogeniche e naturali) bi/tridimensionali per tutti gli inquinanti considerati. Il modello può essere usato da solo, fornendogli tutti i campi di ingresso secondo i modi ed i formati richiesti, oppure integrato in una suite modellistica completa (ARIA Regional, sviluppata da AriaNET e rilasciata sotto licenza commerciale), le cui componenti preparano tutte le informazioni necessarie, a partire dalle base dati di partenza (orografia ed uso del suolo, inventari delle emissioni, misure meteorologiche e/o modelli meteorologici a grande scala).

A differenza di CAMX, FARM non integrava direttamente un modulo per il calcolo del contributo delle sorgenti emmissive alla concentrazione degli inquinanti: tale modulo, denominato FARM/BFM, è stato appositamente sviluppato da AriaNET, in collaborazione con i partners italiani, nell'ambito delle attività del progetto SH'AIR. L'approccio utilizzato è quello che fa riferimento ai metodi di analisi di sensibilità tridimensionale o Brute Force Method (BFM appunto) [⁴⁸]. L'idea del metodo è quella di effettuare un certo numero di simulazioni di sensibilità eliminando o riducendo la sorgente (o l'insieme di sorgenti) che si vuole valutare: il contributo alle concentrazioni è infine calcolato analizzando i risultati delle simulazioni di sensibilità e delle simulazioni di base. Tale metodologia è stata adottata a livello nazionale nel già citato programma MINNI nell'ambito delle attività concernenti le prescrizioni normative della Direttiva 2008/50/EC.

Il modulo FARM/BFM è stato sviluppato integrando il modello FARM con il modello delle emissioni EMMA [⁴⁹]: in tal modo il modulo gestisce direttamente tutto il flusso operativo, dalla definizione delle sorgenti da analizzare, alle simulazioni di sensibilità (simulazioni emmissive e simulazioni di chimica e trasporto) fino alla produzione dei risultati. Nel dettaglio FARM/BFM opera nel seguente modo:

- per ognuna delle sorgenti di interesse o per un loro raggruppamento (definite in un apposito file di configurazione) vengono effettuate una serie di riduzioni percentuali di emissione su tutti gli inquinanti emessi dalla sorgente stessa;

46 Tropospheric Ultraviolet and Visible (TUV) Radiation Model, NCAR/UCAR Atmospheric Chemistry Observations & Modeling.

47 Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN), NCAR/UCAR Atmospheric Chemistry Observations & Modeling.

48 Burr M.J., Zhang Y. Source apportionment of fine particulate matter over the Eastern U.S. Part I: source sensitivity simulations using CMAQ with the Brute Force method and Part II: source apportionment simulations using CAMx/PSAT and comparisons with CMAQ source sensitivity simulations, 2011, Atmospheric Pollution Research 300-317,318-336

49 AriaNET EMMA (EMGR/make) - User's guide –. Arianet report R2010.08.

- vengono effettuate le simulazioni emissive per ognuna delle sorgenti variate singolarmente (scenario settoriale/geografico), per tutte le sorgenti variate contemporaneamente (scenario di controllo) e per il caso base, ovvero con tutte le sorgenti senza nessuna variazione (scenario di riferimento);
- vengono effettuate le corrispondenti simulazioni di chimica e trasporto con FARM (simulazioni settoriali/geografiche, simulazione di controllo e simulazione di riferimento);
- vengono prodotti i risultati, calcolando le variazioni di concentrazione rispetto allo scenario di riferimento per ogni scenario settoriale D_i e per lo scenario di controllo D_n ; il contributo di ciascuna sorgente su ogni cella del dominio di calcolo è quindi calcolato come rapporto D_i/D_n ;
- vengono calcolate le post-elaborazioni (campi di contribuzione medi, contributi su singoli recettori specificati dall'utente, etc).

FARM/BFM è un modulo altamente configurabile tramite apposite namelist e files. Le sorgenti oggetto dello studio possono essere identificate sia su base geografica, sia su base settoriale con un dettaglio sulle singole attività fino al quinto livello di classificazione SNAP (si veda per maggiori dettagli il capitolo 3.2) oppure su entrambe. Il sistema può lavorare su domini innestati a differenti risoluzioni. Le percentuali di riduzione possono essere definite dall'utente. A riguardo, dato che il sistema atmosfera è un sistema non lineare, è opportuno adottare percentuali di riduzioni contenute (non superiori al 30 % da studi condotti da AriaNET nell'ambito delle attività concernenti le prescrizioni normative della Direttiva 2008/50/EC), in modo tale da non sbilanciare in modo rilevante l'equilibrio chimico in atmosfera.

3.1.1.3 Confronto teorico delle metodologie di calcolo dei contributi delle sorgenti

I metodi di stima dei contributi delle sorgenti sulle concentrazioni di particolato utilizzati in questo progetto dai differenti partners dipendono del modello di chimica e trasporto adottato. Come sopra descritto, FARM integra un metodo basato sull'analisi di sensitività denominato BFM (Brute Force Method), mentre CAMx offre la possibilità di utilizzare una metodologia basata sui traccianti reattivi chiamata PSAT (PM Source Apportionment Technology).

La metodologia integrata in FARM si basa sulla capacità del modello di rispondere ad una variazione di un parametro in ingresso (in questo caso la variazione di emissione di una sorgente). Nei sistemi non lineari, come l'atmosfera, il metodo non permette di identificare il contributo della sorgente in maniera diretta, bensì in maniera indiretta valutando gli effetti della variazione emissiva sulle concentrazioni. Tale metodologia è anche adatta per valutare gli impatti di determinate misure di riduzione in materia di qualità dell'aria (analisi di scenario), sia reali o teoriche quali, ad esempio, il blocco totale o parziale del traffico veicolare. L'analisi di sensitività può essere applicata a tutti i modelli numerici di qualità dell'aria, quale che sia la loro formulazione.

Il metodo dei traccianti reattivi, integrato in CAMx, deve essere direttamente implementato all'interno del codice di calcolo del modello. Per poter tracciare gli inquinanti legati a sorgenti specifiche, sono aggiunte nelle simulazioni alcune specie chimiche supplementari (i traccianti)

rispetto a quelle normalmente utilizzate dal modello. Per lo studio dei sistemi non lineari questi traccianti devono essere reattivi: essi devono permettere di seguire il contributo della sorgente in esame durante tutti i processi chimico-fisici che avvengono in atmosfera e che ne modificano nel tempo e nello spazio la concentrazione associata. L'applicazione di tale metodologia permette di quantificare direttamente il reale contributo delle singole sorgenti, dal momento che la somma delle concentrazioni dei traccianti deve essere uguale alla concentrazione totale simulata. Per contro, i risultati ottenuti dipendono dalle ipotesi utilizzate nella formulazione dei traccianti.

L'applicazione di una metodologia o dell'altra può dipendere dalla struttura del modello utilizzato. Entrambi i metodi presentano vantaggi e svantaggi, che è importante ricordare per valutare al meglio i risultati. L'analisi di sensitività non è propriamente un metodo di stima diretta del contributo di una sorgente. I coefficienti che si ottengono permettono di prevedere la risposta non lineare del modello alla variazione dei parametri di ingresso, e dunque di mettere in atto scenari di controllo delle emissioni, ma per contro non calcolano direttamente, ma solo indirettamente, il contributo di ciascuna sorgente. Invece un metodo diretto di calcolo del contributo delle sorgenti, come i traccianti reattivi, permette di calcolare l'impatto effettivo di ciascuna sorgente alla concentrazione totale di un inquinante. Tuttavia i coefficienti ottenuti non possono predire la risposta del sistema ad una variazione emissiva in ingresso.

3.1.2 Realizzazione di casi test.

Al fine di assicurare il corretto funzionamento dei modelli numerici e la coerenza delle simulazioni sui differenti sistemi, sono stati realizzati casi test per ciascuno dei modelli utilizzati dai partner.

3.1.2.1 Il caso test per CAMx in PACA

3.1.2.1.1 Parametri del caso test per CAMX

Per CAMx, il caso test è stato effettuato su un periodo invernale della durata di un mese, dal 1 dicembre 2013 al 31 dicembre 2013. Il dominio finale di calcolo è una griglia regolare (102x95 celle), con 3km di risoluzione orizzontale, che copre l'intero territorio della regione PACA (Figura 3.1.2.1 – 1).

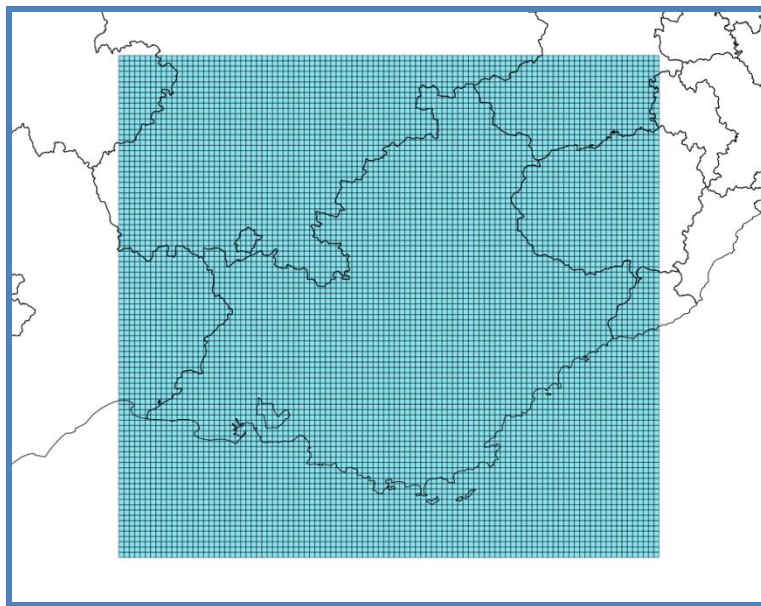


Figura 3.1.2.1.1 - 1 : griglia di calcolo per il caso test di CAMx

Le emissioni antropiche derivano dall'inventario regionale delle emissioni elaborato da AirPACA per l'anno di riferimento 2010. Esso considera l'insieme dei settori di attività che contribuiscono alle emissioni degli inquinanti in atmosfera. Il catasto iniziale ha una risoluzione spaziale di 1km su una griglia regolare ed è successivamente proiettato sulla griglia di calcolo di CAMx. La risoluzione temporale del catasto è oraria, ottenuta con profili di modulazione temporale differenti a seconda dell'attività considerata. All'esterno della regione PACA le emissioni antropogeniche derivano dai dati EMEP, sempre relativi all'anno 2010. Le emissioni biogeniche, marine e terrigene sono calcolate dal modello MEGAN e dal processore « diagbio » (entrambi facenti parti della suite di preprocessori adottati da CHIMERE) sulla stessa griglia e con lo stessa frequenza temporale oraria in funzione delle condizioni meteorologiche simulate.

I campi meteorologici sono prodotti con il modello WRF (Weather Research Forecast), parametrizzato con tre domini innestati, di cui il più interno corrisponde alla griglia di calcolo di CAMx. I dati meteorologici prodotti da WRF sono elaborati per essere formattati secondo le specifiche di CAMX utilizzando il modulo « wrfcamx ». Dei livelli originari di WRF sono mantenuti i primi 14 livelli su un totale di 27. Tra le opzioni di WRF adottate si ricorda che lo schema YSU è utilizzato per parametrizzare i coefficienti di diffusione verticali di CAMX e che lo schema di convezione sub-griglia è stato disattivato.

Le condizioni iniziali ed al contorno derivano da una simulazione realizzata con il modello CHIMERE [v2008] su una griglia regolare (72 x 72) con 9km di risoluzione centrata sul dominio di calcolo di CAMx. Questa simulazione è a sua volta alimentata da una prima simulazione di CHIMERE su un dominio più esterno alla risoluzione di 36 km (griglia regolare con 89x89 punti).

I tassi di fotolisi in condizione di cielo sereno sono calcolati dal modulo TUV (Tropospheric Ultraviolet and Visible) in funzione dell'altezza dal terreno, della topografia del terreno, dell'albedo

superficiale, della quantità di ozono colonnare e dell'angolo di incidenza della radiazione solare. I dati di ozono colonnare sono derivati dalle osservazioni satellitari OMI.

La simulazione con CAMx è realizzata con un passo temporale adattivo al massimo di 15 minuti con salvataggio orario dei risultati. L'avvezione orizzontale è risolta numericamente con il metodo PPM (Piecewise Parabolic Method) [Colella and Woodward,1984^[50]]. La chimica in fase gassosa si basa sul meccanismo chimico CB05 [Yarwood et al., 2005 ^[51]] ed è risolta seguendo lo schema EBI (Euler Backward Iterative) [Hertel et al., 1993 ^[52]]. La chimica degli aerosol è attivata e la loro distribuzione dimensionale si basa sullo schema CF (Coarse and Fine), che divide la distribuzione granulometrica utilizzando due mode. Le specie primarie sono modellate come particelle di piccola (PM2.5) e grossa taglia, mentre il particolato secondario è modellato esclusivamente tramite le particelle di piccola taglia. La deposizione secca è tenuta in conto mediante lo schema di Zhang (2003) ^[53], basato su un utilizzo di suolo che considera 26 categorie. La deposizione umida è attiva e si basa su specifici coefficienti di dilavamento.

3.1.2.1.2 Risultati del caso test per CAMx in PACA

La catena di calcolo ed elaborazione sviluppata nell'ambito del progetto permette di rappresentare la cartografia delle concentrazioni giornaliere di PM10 sul dominio di studio, di estrarre le concentrazioni simulate sui siti recettori, nonché di rappresentare il contributo dei differenti settori di attività sugli stessi siti. Nelle successive figure sono riportati differenti esempi di elaborazioni possibili (Figure 3.1.2.1.2 - 1/2/3).

A livello di risultati si evince una sottostima della media giornaliera del PM10 da parte del modello CAMx su tutto il periodo di studio, soprattutto all'inizio del periodo di simulazione. Tale sottostima iniziale è da mettere in relazione con una fase di inizializzazione del modello, solitamente da considerare nelle simulazioni numeriche.

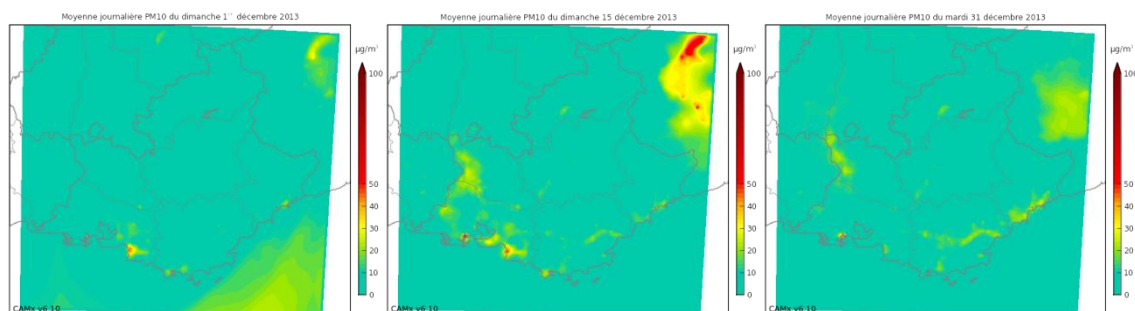


Figura 3.1.2.1.2 – 1 : Cartografia delle concentrazioni giornaliere di PM10 per il primo dicembre (sinistra), il 15 dicembre (al centro) ed il 31 dicembre (destra) 2013..

50 Colella, P., Woodward, P.R., 1984. The Piecewise Parabolic Method (PPM) for gas-dynamical simulations. J. Comput. Phys. 54, 174–201. doi:10.1016/0021-9991(84)90143-8

51 Yarwood, G., S. Rao, M. Yocke, and G.Z. Whitten, 2005: Updates to the Carbon Bond Mechanism: CB05. US EPA Final Report, 161 pp.

52 Hertel, O., Berkowicz, R., Christensen, J., Hov, Ø., 1993. Test of two numerical schemes for use in atmospheric transport-chemistry models. Atmospheric Environ. Part Gen. Top. 27, 2591–2611. doi:10.1016/0960-1686(93)90032-T

53 Zhang, L., Brook, J.R., Vet, R., 2003. A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models. Atmos Chem Phys 3, 2067–2082. doi:10.5194/acp-3-2067-2003

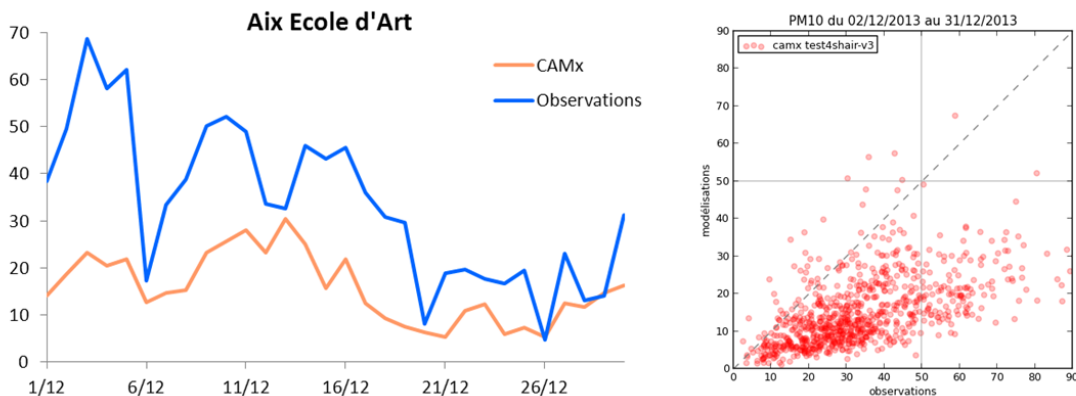


Figura 3.1.2.1.2 - 2 : A sinistra: serie temporale della concentrazione giornaliera di PM10 sulla stazione urbana di Aix-en-Provence, simulate (arancione) e osservate (blu) sul periodo del caso test. A destra :confronto osservato-simulato per la concentrazione media giornaliera di PM10 su tutte le stazioni di misura rappresentative in PACA.

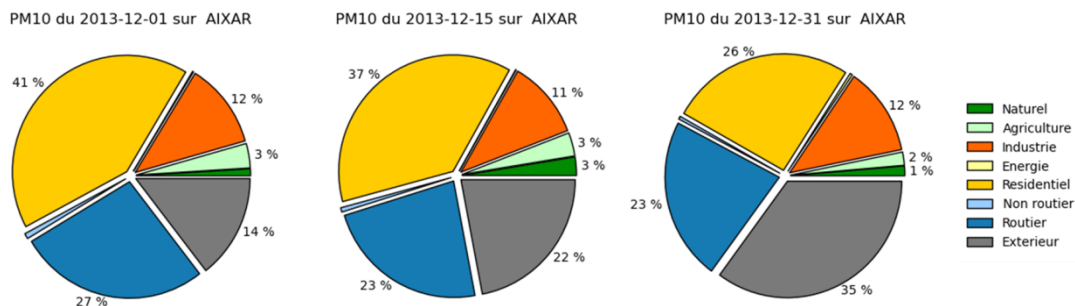


Figura 3.1.2.1.2 - 3 : Contributo dei settori di attività alla concentrazione giornaliera di particolato PM10 sulla stazione urbana di Aix-en-Provence per il primo dicembre (sinistra), il 15 dicembre (al centro) ed il 31 dicembre (destra) 2013.

Il caso test ha permesso dunque di validare il funzionamento corretto dell'intera catena di calcolo sui server di calcolo di AirPACA, dal pre-trattamento dei dati fino alla post-elaborazione dei risultati.

3.1.2.2 Il caso test per CAMx in RA

Dopo aver configurato il modello CAM nella regione PACA, abbiamo eseguito un test anche nella regione del Rhône-Alpes. L'obiettivo di questa analisi è quello di testare l'affidabilità (o/e la compatibilità) del modello su un'altra parte del dominio Alcotra utilizzando gli stessi parametri precedentemente stabiliti nel paragrafo 3.1.2.1. Come promemoria, il modello è stato configurato effettuando numerosi studi di sensibilità ed eseguendo una dozzina di casi di test nella regione PACA.

Solo la porzione di superficie corrispondente alla regione del Rhône-Alpes è stata scelta per eseguire questi casi di test. Sono state quindi effettuate le simulazioni numeriche ed il confronto con le misurazioni solo per questa regione. La tabella 3.1.2.2-1 e la figura 3.1.2.2-1 presentano le caratteristiche principali di quest'area di studio che sono state adottate per la parametrizzazione del modello di CAMx.

Tabella 3.1.2.2-1: Parametri delle simulazioni utilizzati per l'area di studio

Risoluzione	Nx=Ny	SO(°)	NE(°)	Centro della griglia(°)
2 Km	148	Lon=3.5553 Lat=43.9547	Lon=7.4192 Lat=46.6775	Lon=5.0 Lat=47.0

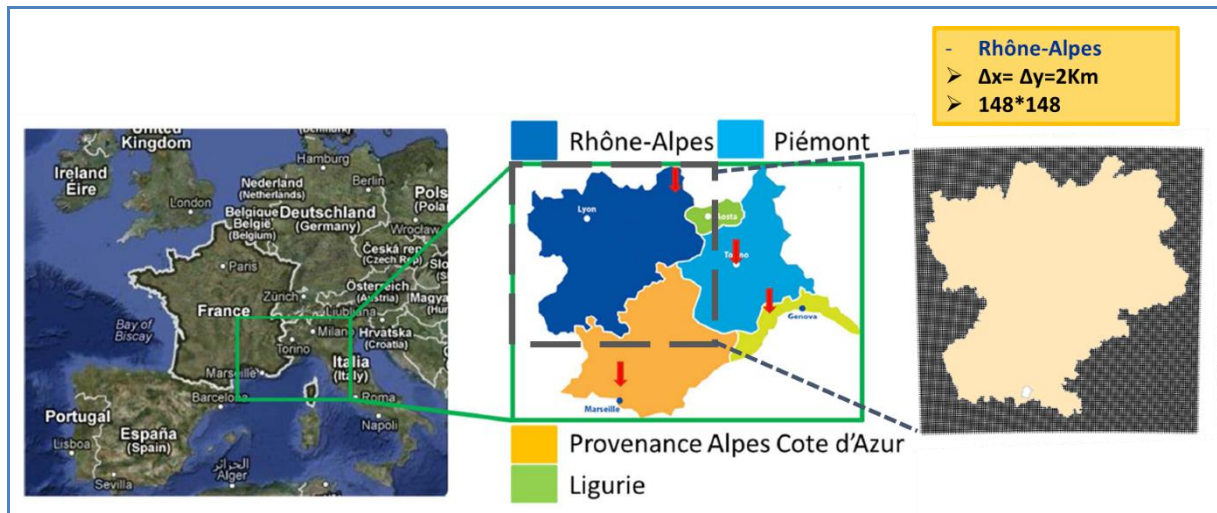


Figura 3.1.2.2-1 : Area di studio adottata per le simulazioni numeriche di CAMx.

Molti parametri e dati di input sono necessari per CAM per meglio simulare e replicare fenomeni fisico-chimici in atmosfera. La tabella 3.1.2.2-2 fornisce una sintesi dei principali parametri di simulazioni e dati di input.

Tabella 3.1.2.2-2 : Sintesi dei principali parametri delle simulazioni e dati di ingresso.

Dati di ingresso e parametri della simulazione	Descrizioni
Meteo	Dati orari forniti dal modello WRF (Weather Research and Forecasting Model). I dati sono quindi interpolati sulla griglia di calcolo di CAMx con un tool specifico del modello.
Emissioni	Le emissioni sono inserite sulla base dell'inventario annuale di Air Rhône-Alpes. Si sono utilizzate le emissioni EMEP all'esterno dell'area di studio (Figura 3.1.2.2-1).
Condizioni al contorno	Dati calcolati dai risultati di Prev'air sul dominio europeo.
Condizioni iniziali	Dati calcolati dai risultati di Prev'air sul dominio europeo.
Modulo per l'avvenzione orizzontale	Metodo parabolico a pezzi (PPM, Colella and Woodward, 1984 [⁵⁴]). E' un'estensione di ordine superiore del metodo di Godunov (Godunov, 1962 [⁵⁵]).
Modulo chimico	Abbiamo utilizzato il modulo più efficace disponibile per CAMx che corrisponde ad un metodo iterativo (EBI) fondato sul metodo « Backward Euler » (Hertel et al., 1993 [⁵⁶])
Deposizione secca	Si è utilizzato il modello di Wesely/Slinn.
Modello di fotolisi	Modulo di fotolisi esterno con implementazioni integrate per considerare le nuvole e gli aerosol.

3.1.2.2.1 Principali dati di ingresso

La dispersione degli inquinanti in atmosfera richiede la conoscenza di diversi parametri meteo, tra cui la velocità e la direzione del vento e le condizioni per la stratificazione termica dell'atmosfera (temperatura, nuvole ...). Queste impostazioni vengono di solito fornite in base a misure puntuali in campo. Tuttavia, questi dati puntuali non sono sufficientemente rappresentativi per un'area così estesa e in particolare quando quest'ultima è caratterizzata dalla forte presenza di rilievi come il nostro dominio di studio. È quindi necessario utilizzare un modello meteo come WRF che può fornire campi numerici sull'intera area di studio. I calcoli dei dati meteo con WRF sono stati eseguiti su tre griglie di calcolo sovrapposte con la diminuzione della risoluzione di un rapporto di 3 (18Km, 6 km e 2 km) (vedere paragrafo 3.3). Le prime due aree incorporano rispettivamente gran parte dell'Europa e l'area ALCOTRA e l'ultima è specifica sull'area di studio (Rhône-Alpes). La figura 3.1.2.2.1-2 mostra una mappatura del campo di velocità ad altezza 10 m prodotta dal modello WRF (versione 3.34) per il giorno 17/11/2013 alle ore 12. Come prevedibile, questa figura mostra che il campo di velocità è caratterizzato da una forte variabilità spaziale nella nostra area di studio.

⁵⁴ Colella, P., Woodward, P.R., 1984. The Piecewise Parabolic Method (PPM) for gas-dynamical simulations. J. Comput. Phys. 54, 174–201. doi:10.1016/0021-9991(84)90143-8

⁵⁵ A.V.Z. S. K. Godunov, A computational scheme for two-dimensional nonstationary problems of gas dynamics and calculation of the flow from a shock wave approaching steady-state, Ussr Comput. Math. Math. Phys. 1 (1962) 1187–1219.

⁵⁶ Hertel, O., Berkowicz, R., Christensen, J., Hov, Ø., 1993. Test of two numerical schemes for use in atmospheric transport-chemistry models. Atmospheric Environ. Part Gen. Top. 27, 2591–2611. doi:10.1016/0960-1686(93)90032-T

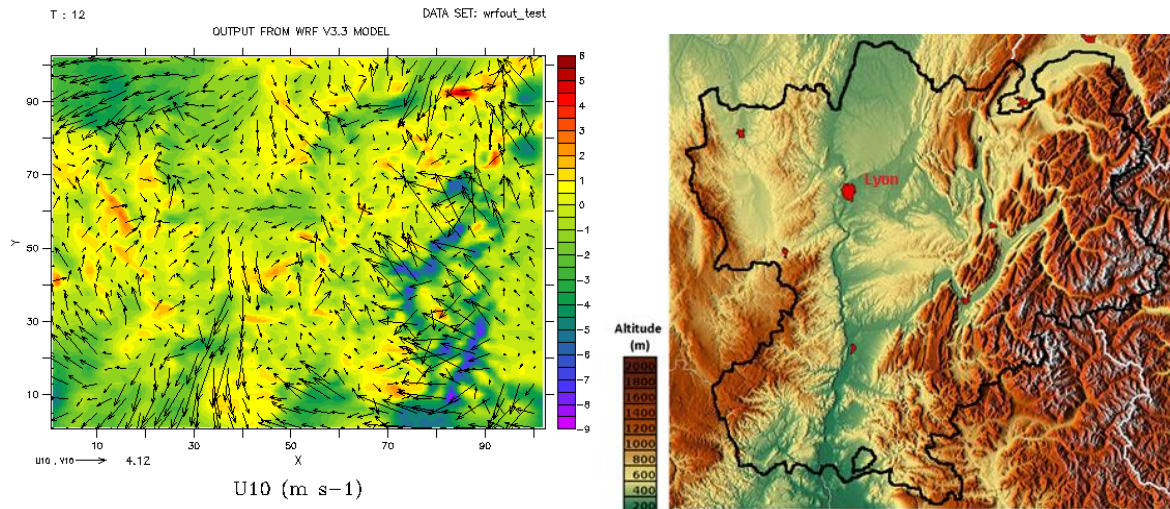


Figura 3.1.2.2.1-2 : Esempio di mappa del campo di velocità ad altezza 10m prodotto dal modello (versione 3.3) per il 17/11/2013 alle ore 12 (a sinistra) e visualizzazione dell'orografia complessa nel dominio di studio (a destra)

Air Rhône-Alpes aggiorna ogni anno un inventario annuale delle emissioni. Questo registro è stato realizzato per essere integrato nella catena di modellistica. Questo trattamento fornisce delle emissioni su grigliato superficiale e modulato per ogni ora dell'anno. Questi processi sono descritti nella sezione 3.2. A titolo di esempio, la variabilità spaziale delle emissioni di NO₂ nella regione Rhône-Alpes è mostrato nella figura 3.1.2.2.1-3. Queste emissioni sono calcolate per il 01/12/2013 a mezzanotte a livello del suolo. Inoltre, le emissioni di fuori della regione del Rhône-Alpes derivano dal catasto europeo EMEP⁵⁷.

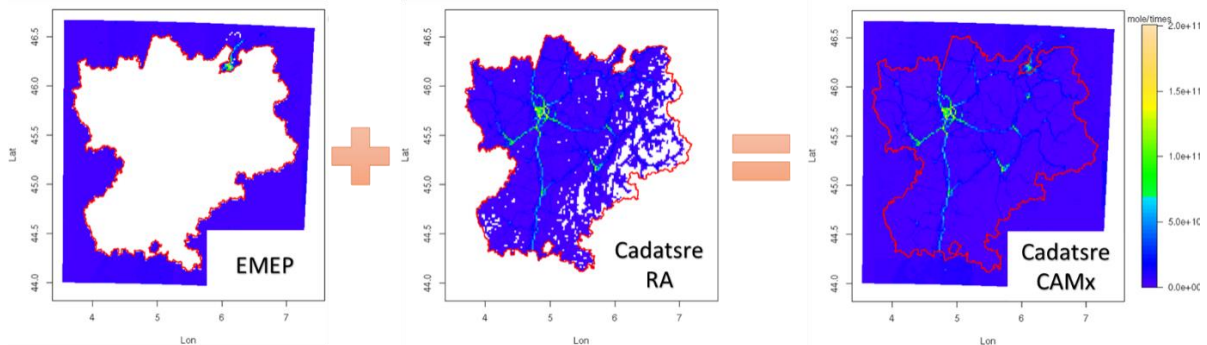


Figura 3.1.2.2.1-3: Grigliato delle emissioni di NO₂ per il 01/12/2013 a mezzanotte.

3.1.2.2.2 Parametri principali delle simulazioni

Le velocità di reazione di fotolisi atmosferica dipendono principalmente dalla radiazione solare. Così, esse sono fortemente correlate alla quantità di radiazione solare trasmessa attraverso l'atmosfera e riflessa dalla superficie della terra. In CAMx, questo equilibrio termico si basa su cinque parametri: angolo zenitale solare, quota sul livello del mare, ozono colonnare totale, albedo della superficie terrestre e livello topografico (altezza del terreno). Il processore utilizzato nel

⁵⁷ <http://www.emep.int/>

calcolo di questi tassi è una versione rivista del modello di trasferimento radiativo sviluppato da NCAR (NCAR, 2011 [⁵⁸]) per tener conto di certi fenomeni fisici associati alle nubi ed agli aerosol. Questo modello è quello più compatibile con i meccanismi chimici come: CB05, CB6, e SAPRC99.

Il modello CAMx ha due risolutori diversi per risolvere le equazioni di avvezione orizzontale. Essi hanno un ordine di accuratezza di calcolo molto simile e sono caratterizzati da poca diffusione numerica. Usiamo in questo studio il metodo parabolico a tratti (PPM) (Woodward e Colella 1984 [⁵⁹]), che è abbastanza veloce per questo tipo di applicazione.

Per simulare la deposizione secca in CAMx, abbiamo due opzioni. Il primo approccio si basa sul lavoro di Wesely (1989) [⁶⁰] e Slinn e Slinn (1980) [⁶¹] e la seconda, più recente, basata su algoritmi Zhang et al. (²⁰⁰³ [⁶²], ²⁰⁰¹ [⁶³]). Il modello Wesely / Slinn utilizza solo 11 categorie di terreno mentre quello di Zhang ne utilizza 26. In seguito alla raccomandazione degli sviluppatori di CAMx, usiamo in questo studio il modello più semplice Wesely / Slinn. Quest'ultimo è stato ampiamente utilizzato in letteratura per la stima deposizione secca di inquinanti.

Usiamo per queste simulazioni il risolutore più efficiente disponibile per CAMx. E' un metodo iterativo (EBI) basato sul metodo ultra-preciso "Backward Euler" (Hertel et al., 1993 [⁶⁴]), che è 10 volte più veloce del metodo ibrido (IEH).

3.1.2.2.3 Risultati

L'obiettivo è quello di verificare l'affidabilità del modello di CAMx confrontando i risultati con le misure. Delle simulazioni numeriche di scenari test sono state effettuate per un periodo invernale (2013/11/27 -07/12/2013). Questo scenario è davvero rappresentativo di un periodo molto speciale del 2013 caratterizzato da livelli di concentrazioni di PM10 abbastanza alti ed episodi di inquinamento significativo.

Abbiamo condotto due tipi di confronto tra il modello e le misure:

- Il confronto con la serie storica delle concentrazioni (orarie e medie giornaliere).
- Il confronto con criteri statistici.

Per valutare la qualità delle simulazioni con il modello CAMx, abbiamo usato le misure di concentrazioni (ogni ora e giorno) del PM10 su più siti per la misurazione della qualità dell'aria in

⁵⁸ NCAR, 2011. The Tropospheric Visible and Ultraviolet (TUV) Radiation Model web page. National Center for Atmospheric Research, Atmospheric Chemistry Division, Boulder, Colorado.

⁵⁹ Colella, P., Woodward, P.R., 1984. The Piecewise Parabolic Method (PPM) for gas-dynamical simulations. J. Comput. Phys. 54, 174–201. doi:10.1016/0021-9991(84)90143-8

⁶⁰ Wesely, M.L., 1989. Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. Atmospheric Environ. 1967 23, 1293–1304. doi:10.1016/0004-6981(89)90153-4

⁶¹ Slinn, S.A., Slinn, W.G.N., 1980. Predictions for particle deposition on natural waters. Atmospheric Environ. 1967 14, 1013–1016. doi:10.1016/0004-6981(80)90032-3

⁶² Zhang, L., Brook, J.R., Vet, R., 2003. A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models. Atmos Chem Phys 3, 2067–2082. doi:10.5194/acp-3-2067-2003

⁶³ Zhang, L., Gong, S., Padro, J., Barrie, L., 2001. A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module. Atmos. Environ. 35, 549–560. doi:10.1016/S1352-2310(00)00326-5

⁶⁴ Hertel, O., Berkowicz, R., Christensen, J., Hov, Ø., 1993. Test of two numerical schemes for use in atmospheric transport-chemistry models. Atmospheric Environ. Part Gen. Top. 27, 2591–2611. doi:10.1016/0960-1686(93)90032-T

diverse località della regione del Rhône-Alpes. Tali misure sono state utilizzate per comprendere le prestazioni del modello numerico per riprodurre le concentrazioni giornaliere e orarie di particelle fini su tutto il territorio della regione.

3.1.2.2.3.1 Evoluzione oraria delle concentrazioni

Per valutare il comportamento del modello CAMx nel periodo di calcolo, si presentano nella fig 3.1.2.2.3.1-1 gli andamenti temporali della concentrazione calcolata e di quella misurata in tre stazioni nella regione Rhône-Alpes (vedere l'Appendice A per ulteriori stazioni di misura). Nonostante alcune differenze identificate tra le misurazioni ed i risultati numerici, si osserva che il modello CAMx é in grado di riprodurre le caratteristiche fondamentali di un evento di inquinamento. In effetti, il confronto dei tempi di avvezione tempo in tempo di arrivo del picco di concentrazione. Infatti, il confronto dei tempi di avvezione, definiti dai tempi di arrivo dei picchi delle concentrazioni, e gli andamenti delle concentrazioni misurate e calcolate, mostra che questi parametri fondamentali sono ben riprodotti nelle diverse stazioni di misura. Tuttavia, si osserva che c'è una notevole variabilità degli andamenti delle misure che non viene riprodotta correttamente dal modello numerico. Questo può essere dovuto alla scarsa riproduzione di alcuni meccanismi fisici come gli effetti di fluttuazione delle concentrazioni.

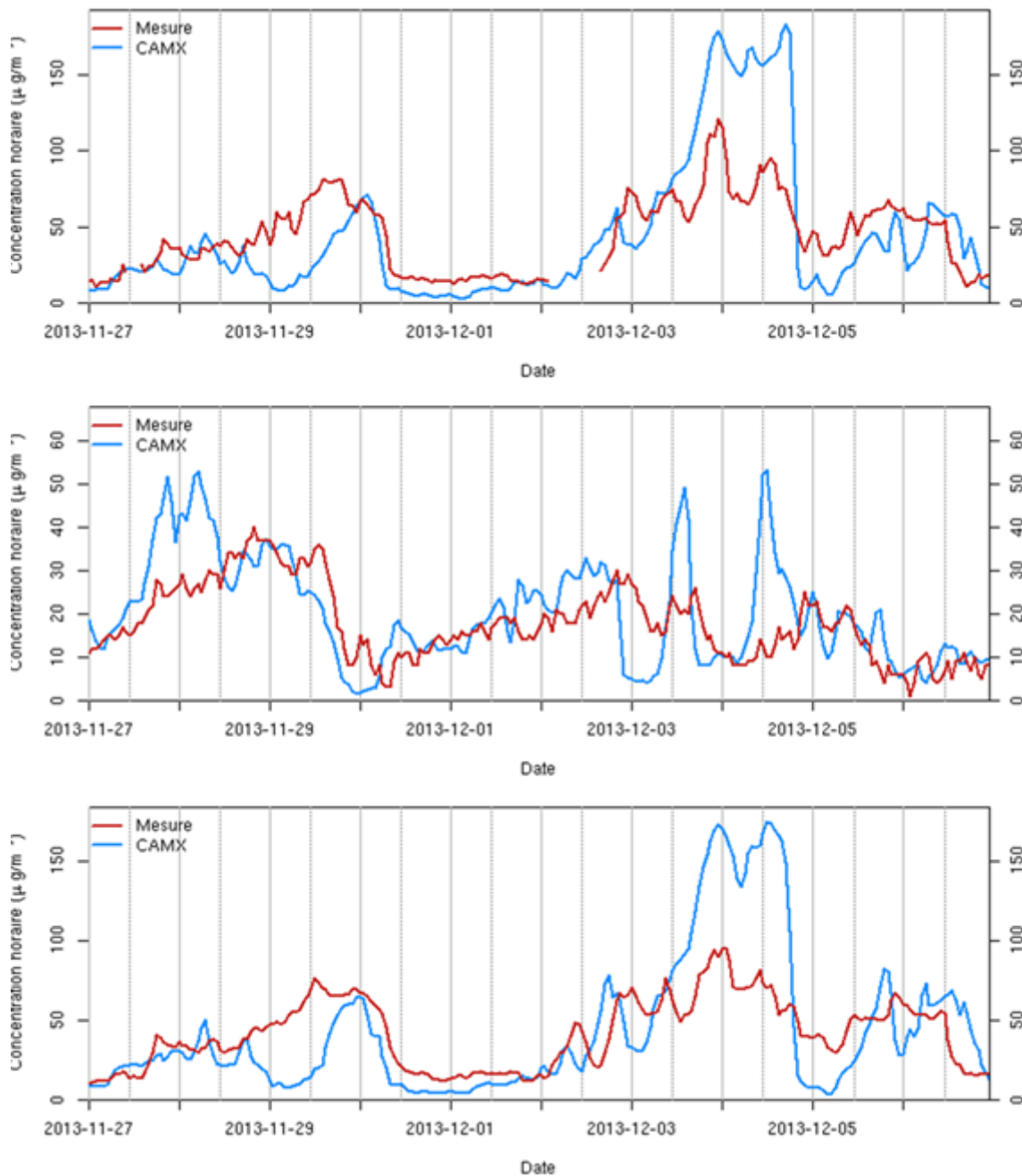


Figura 3.1.2.2.3.1-1 : Evoluzione temporale oraria delle concentrazioni di PM10 nelle stazioni di misura: Lyon Centro (in alto) – Drôme rurale Sud (in mezzo) e Costiera dell'Ain (in basso) per il periodo 27/11/2013 – 07/12/2013. Confronto tra le misure (in rosso) e i risultati del modello CAMx (in blu).

3.1.2.2.3.2 Valutazione statistica del modello CAMx

Gli studi di valutazione e validazione dei modelli di dispersione in atmosfera sono molto numerosi in letteratura. Tuttavia, essi sono basati sugli stessi criteri statistici presentati da Chang e Hanna (2004) [65]. Queste variabili sono generalmente suddivise in due categorie: errori sistematici, che

⁶⁵ Chang, J.C., Hanna, S.R., 2004. Air quality model performance evaluation. Meteorol. Atmospheric Phys. 87, 167–196. doi:10.1007/s00703-003-0070-7

presumono che il modello avrà una tendenza generale o a sovrastimare o a sottostimare la realtà (evidenziato dalla differenza di pendenza tra la linea di regressione e l'asse $X = Y$) ed errori cosiddetti "locali", che corrispondono alle differenze dei singoli andamenti dal comportamento medio del modello. Questo errore si traduce in una nuvola di diffusione di punti dalla retta di regressione. Gli altri principali parametri statistici utilizzati per la validazione di queste funzioni sono:

- il « fractional bias » FB che quantifica l'errore sistematico :

$$FB = \frac{\overline{C_p} - \overline{C_m}}{\frac{1}{2}(\overline{C_p} + \overline{C_m})}$$

- l'errore quadratico medio normalizzato NMSE che quantifica l'errore locale :

$$NMSE = \frac{\overline{(C_p - C_m)^2}}{\overline{C_p C_m}}$$

- lo scarto geometrico medio MG : quando i valori misurati e simulati riguardano diversi ordini di grandezza, i parametri FB e NMSE dipendono più dai valori più elevati rispetto ai valori più bassi. Per compensare questo effetto, può essere vantaggioso utilizzare le impostazioni in base ai valori dei logaritmi. Lo scarto geometrico medio quantifica in questo modo l'errore sistematico del modello.

$$MG = \exp\left[\overline{\ln(C_p) - \ln(C_m)}\right]$$

- La varianza geometrica quadratica media VG: permette di quantificare l'errore locale per i dati con differenze di ordini di grandezza.

$$VG = \exp\left[\overline{(\ln(C_p) - \ln(C_m))^2}\right]$$

- La "frazione di un fattore 2" (FAC2) di dati quali $0.5 \leq C_{mes}/C_{mod} \leq 2$. Questo parametro indica la capacità del modello a non superare un errore limite.
- La "frazione di un fattore 10" (FAC10) di dati quali $0.1 \leq C_{mes}/C_{mod} \leq 10$.

Secondo i valori di riferimento proposti da Chang e Hanna (2004) ^[66] per la valutazione della qualità dei modelli di dispersione in atmosfera, i risultati di CAMx sono considerati abbastanza soddisfacenti o buoni anche per le concentrazioni orarie (Tabella 3.1.2.2. 3.2-1) perché i valori dei nostri indicatori sono tutti nel margine accettabile e pure vicini ai valori ideali. Il calcolo di questi criteri statistici (Tabella 3.1.2.2.3.2-1) si è basata sui risultati di tutti i siti di misura (vedi elenco allegato A).

⁶⁶ Chang, J.C., Hanna, S.R., 2004. Air quality model performance evaluation. Meteorol. Atmospheric Phys. 87, 167–196. doi:10.1007/s00703-003-0070-7

Tabella 3.1.2.3.2-1: Valutazione dei parametri statistici per i diversi periodi simulati : (calcoli basati sui risultati per tutte le stazioni).

Episodi	Inquinanti	AFB	NMSE	FAC2	FAC10	VG	MG
27/11/13 07/12/13	PM10	0.23	0.5	0.67	0.96	1.63	0.98
Accettabile – simulazione considerata « buona »		AFB ≤ 0.3	NMSE ≤ 1.5	0.5 ≤ FAC2	0.9 ≤ FAC10	VG ≤ 4	0.7 ≤ MG MG ≤ 1.3
Ideale - perfetto		0	0	1	1	1	1

3.1.2.3.3 Evoluzione giornaliera delle concentrazioni

Dopo aver confrontato i risultati del modello con le concentrazioni orarie misurate in diverse stazioni nella regione Rhône-Alpes (vedi Appendice A), valutiamo in questo paragrafo la sua capacità di riprodurre le concentrazioni medie giornaliere, confrontando risultati simulati con le misure di PM10 giornaliero nelle stesse stazioni di misura. Presentiamo in figura 3.1.2.3.3-1 il confronto delle concentrazioni giornaliere riprodotte dal modello CAMx e quelle misurate nelle stesse tre stazioni scelte in precedenza (Lione Centro, Costiera dell'Ain e Drôme rurale sud) .

Per confermare questi risultati, abbiamo continuato questo confronto, facendo la stessa analisi per altre stazioni di misura nella regione. Otteniamo gli andamenti presentati nell'allegato B per i diversi siti di campionamento. È importante notare che il metodo di misurazione del PM10 non è sempre lo stesso (gravimetrico, TEOM-FDMS ...). Le stazioni sono ben distribuite spazialmente e sono rappresentative dei diversi livelli di esposizione (urbani, valli montane, ed aree peri-urbane).

Le figure dell'allegato B mostrano che il modello riproduce correttamente le concentrazioni giornaliere in diversi luoghi della regione del Rhône-Alpes. Notiamo che i confronti delle medie giornaliere riflettono meglio le tendenze generali rispetto a quelli orari precedentemente illustrati nella figura 3.1.2.3.1-1. Il confronto dei risultati di CAMx su altri siti di campionamento (Appendice B) ci permette di confermare la sua affidabilità e la sua capacità nel riprodurre con precisione le concentrazioni medie giornaliere di PM10.

Questi confronti indicano un buon accordo tra il nostro modello ed i diversi dati sperimentali. Questo indica che il modello rappresenta correttamente tutti i processi fisici di trasporto e diffusione su un periodo giornaliero. Tuttavia, a volte osserviamo una sovrastima significativa delle misure durante il giorno 04/12/2013 per alcuni siti di misura.

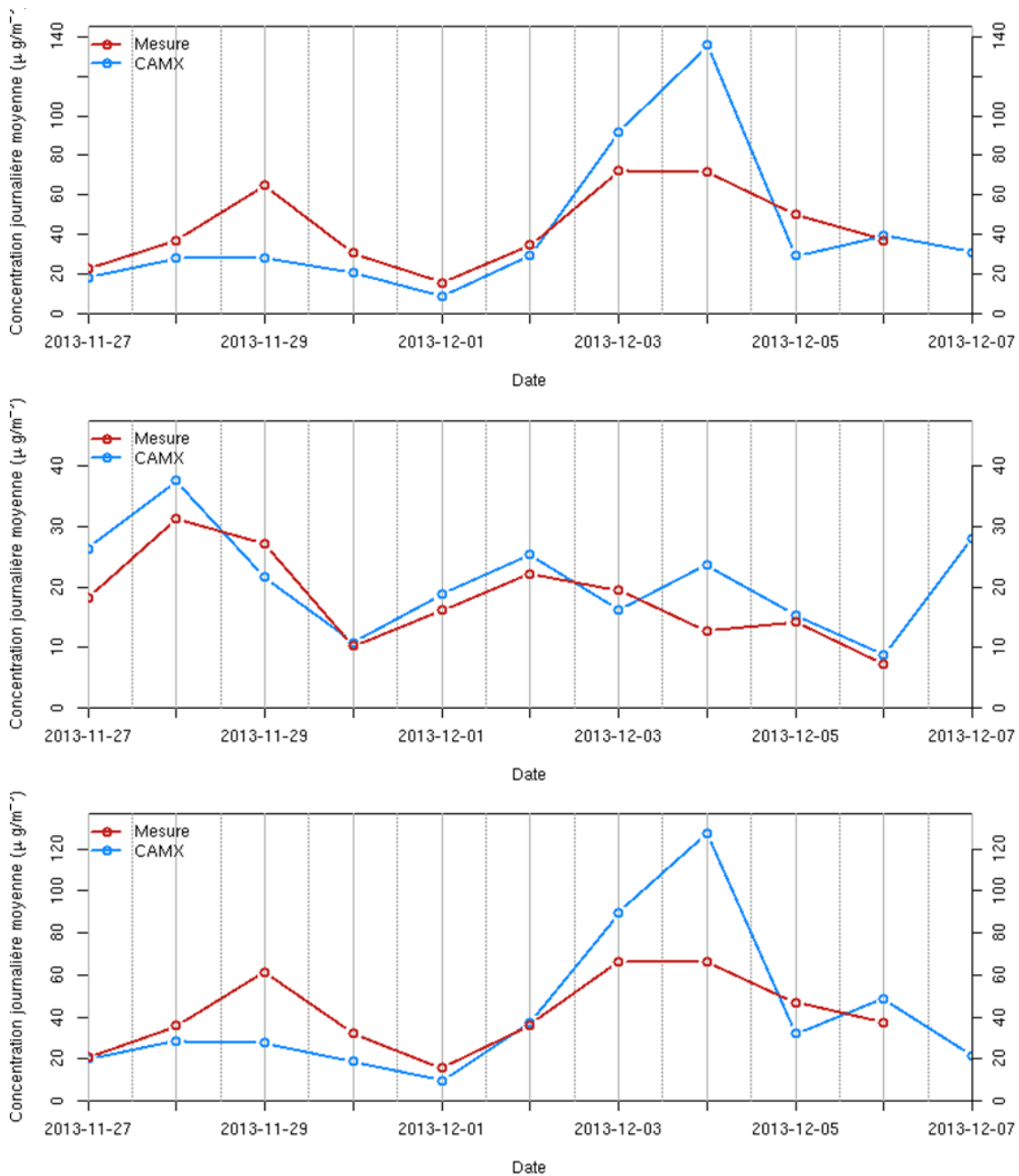


Figura 3.1.2.3.3-1 : Evoluzione giornaliera delle concentrazioni di PM10 nelle stazioni di misura : Lione Centro (in alto) – Drôme rurale Sud (nel mezzo) e Costiera dell'Ain (in basso) per il periodo 27/11/2013 – 07/12/2013. Confronto tra le misure (in rosso) e i risultati del modello CAMx (in blu).

3.1.2.3 Studio delle prestazioni di calcolo di CAMx

L'obiettivo di questa parte è lo studio delle prestazioni del modello CAMx su differenti clusters per il calcolo parallelo. Questo ci permette sia di ottimizzare i costi di calcolo sia di studiare la possibilità di usare questo strumento per applicazioni in tempo reale. Per fare questo, abbiamo tracciato i « benchmarks » per ogni server. Il nostro « benchmark » individua la misura delle prestazioni del modello CAMx per l'esecuzione di una serie di compiti. In questo studio, misureremo il tempo

totale di esecuzione di CAMx per simulare una sola ora sulla regione Rhône-Alpes. Tale tempo dipende dalle caratteristiche dei processori, dal linguaggio di programmazione del modello CAMx, dal compilatore e dal programma stesso.

3.1.2.3.1 I calcolatori utilizzati

3.1.2.3.1.1 Server di calcolo di Air Rhône-Alpes

Questo server (Figura 3.1.2.3.1.1-1) è costruito su una architettura Xeon. È dotato di 28 processori di tipo Xeon E5-2697 v3 @2.6GHz 14C (56 core) e 128 Go di memoria.



Figura 3.1.2.3.1.1-1: Macchina di Air Rhône-Alpes.

3.1.2.3.1.2 Supercalcolatore « CRIANN » (cluster esterno)

« Il calcolatore CRIANN (Figura 3.1.2.3.1.2-1) e le Centre de Données Régional si trovano nel comune di Saint-Étienne du Rouvray, a sud dell'agglomerato di Rouen. Questi organismi propongono agli utilizzatori l'accesso a due risorse di calcolo distinte. La principale è un supercalcolatore denominato 'Antares' di tipo a grappolo x86-64, della gamma IBM iDataPlex. La messa in produzione è cominciata alla fine del 2010, e contiene attualmente 328 server (3048 core) di calcolo, ai quali si aggiungono 51 server (624 core) di proprietà della Ecole Centrale de Nantes. Un server Power, 'Atlas', composto unicamente da 4 processori a 8 core è riservato per una piccola comunità di utilizzatori. Questi processori sono pochi ma alcuni codici traggono beneficio dalla sua architettura specifica»⁶⁷.

⁶⁷ <http://www.criann.fr/calcul-intensif/>



Figura 3.1.2.3.1.2-1: Supercalcolatore CRIANN (<http://www.criann.fr/>)

3.1.2.3.1.3 Supercalcolatore « Curie » di « TGCC » (cluster esterno)

« Il TGCC (Figura 3.1.2.3.1.3-1) è una nuova « infrastruttura verde » dedicata ai calcoli ad alte prestazioni, capace di contenere dei supercalcolatori che lavorano nell'ordine dei petaFlop. Il supercalcolatore Curie, di proprietà di Genci e ospitato nel TGCC del CEA (commissariato per l'energia atomica e per l'energia rinnovabile), è la prima macchina (Tier0) disponibile per gli scienziati europei nell'ambito della partecipazione francese alle infrastrutture di ricerca PRACE. CURIE propone 3 diversi tipi di risorse di calcolo basate su una architettura x86-64, pensata per affrontare una vasta gamma di sfide scientifiche, e che offre una potenza di calcolo di punta di 2Pflops »⁶⁸.

⁶⁸ <http://www-hpc.cea.fr/fr/complexe/tgcc-curie.htm>

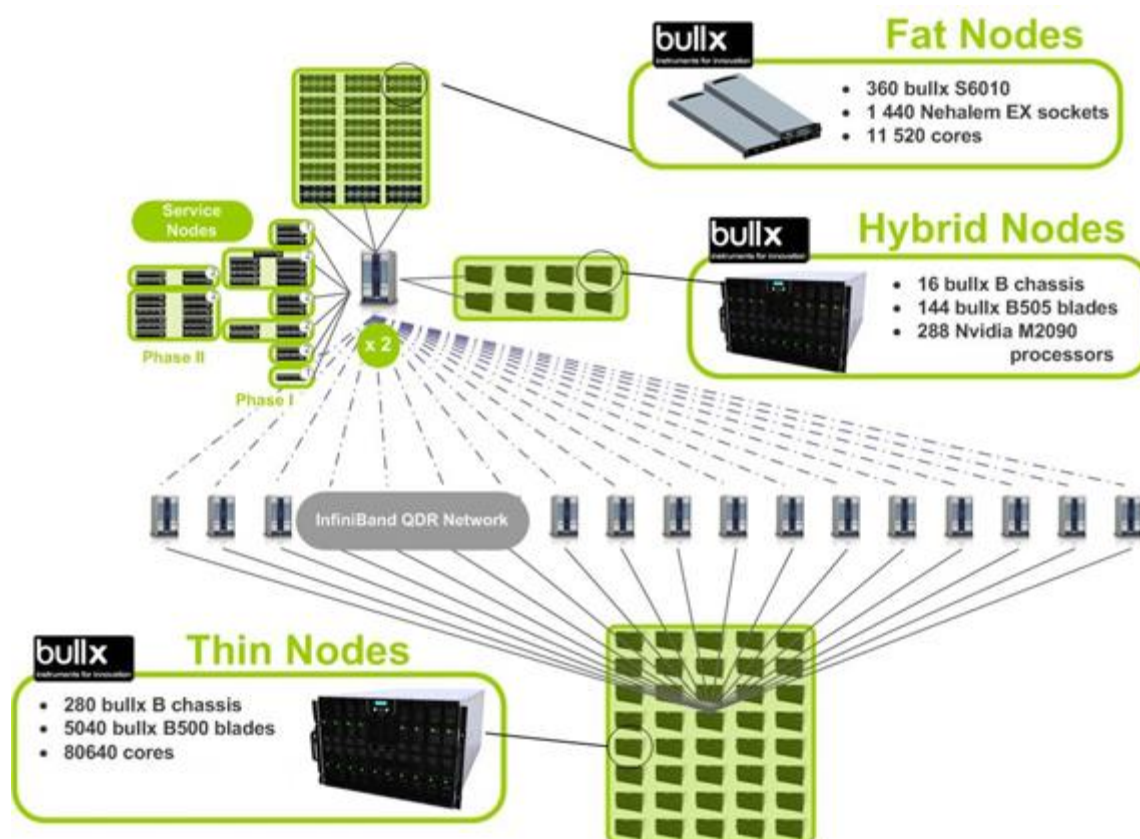


Figura 3.1.2.3.1.3-1: Schema di principio di Curie Fasi 1 e 2. (Source : <http://www-hpc.cea.fr/fr/complexe/tgcc-curie.htm>)

3.1.2.3.2 Risultati delle prestazioni

In questo paragrafo sono presentati i risultati più significativi ottenuti in questo studio di prestazioni. Nella figura 3.1.2.3.2-1 è mostrata la variazione del tempo totale di esecuzione del modello in funzione del numero di core utilizzati per ogni macchina di calcolo. Si osserva che le curve di evoluzione di questo parametro sono caratterizzate da due fasi diverse.

Come previsto, nella prima fase (evidenziata con un rettangolo) il tempo totale di esecuzione diminuisce quando il numero di core utilizzato sulle 3 macchine aumenta. Ma osservando le diverse curve, si constata che c'è una seconda fase che comincia a partire da un punto critico in cui la tendenza della curva cambia. Per esempio, si osserva che l'evoluzione del tempo totale di esecuzione diventa quasi-stazionario sui supercalcolatori (CRIANN et TGCC) a partire rispettivamente da 30 e 50 core e aumenta sulla macchina locale di Air Rhône-Alpes a partire da 20 core. Questa crescita può essere collegata alla limitazione delle risorse su questo nodo di calcolo. In effetti, sui supercalcolatori è utilizzata una memoria dedicata mentre sulla macchina di Air Rhône-Alpes si usa una memoria condivisa (128Go/30~4Go). Questo conferma che la simulazione effettuata per il progetto almeno di 4Go/core.

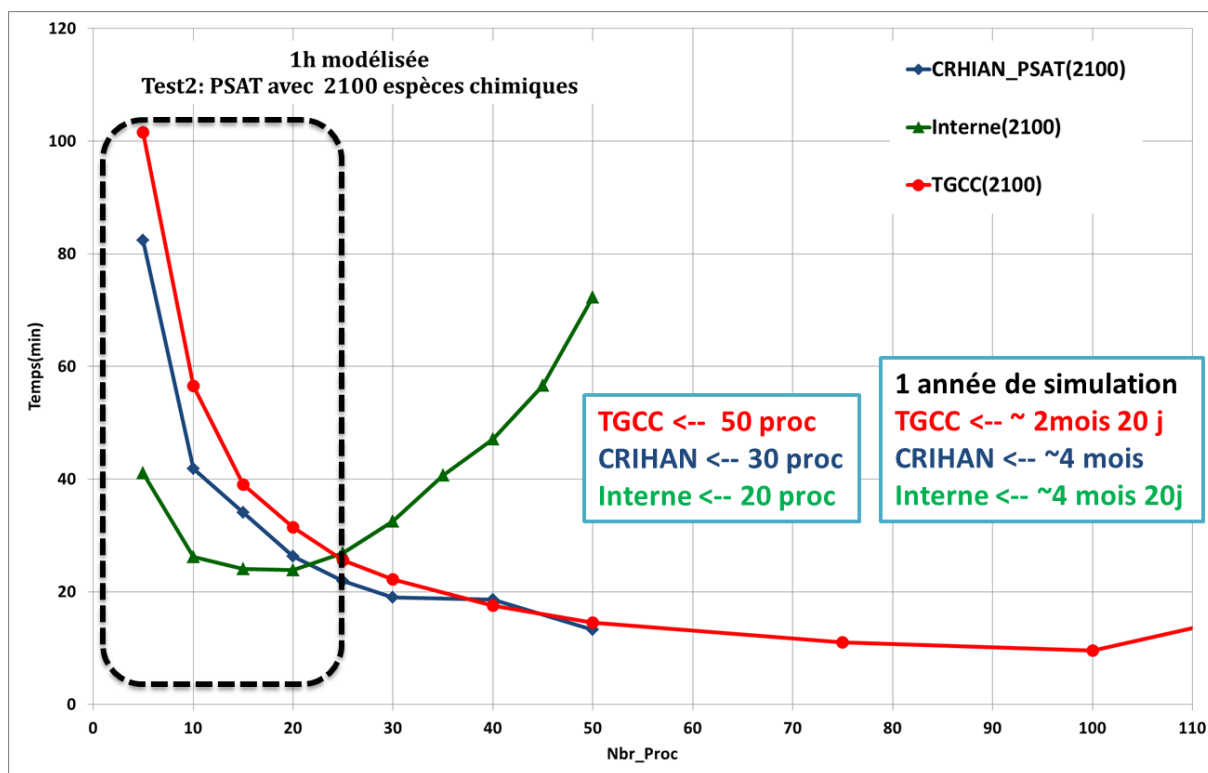


Figura 3.1.2.3.2-1: Evoluzione del tempo totale d'esecuzione in funzione del numero di core utilizzati.

Per meglio studiare questo strano comportamento, è stata tracciata sulla figura 3.1.2.3.2-1 la variazione dell'accelerazione in funzione del numero di processori.

$$A(p) = \frac{T(\text{simulazione in seq.})}{T(\text{simulazione in } p \text{ proc.})}$$

L'accelerazione è definita dal guadagno di tempo ottenuta con la parallelizzazione del programma sequenziale. Permette di focalizzare lo studio sul guadagno di tempo determinato dall'allocazione e utilizzo di ogni core supplementare. La retta (X=Y), in nero in figura 3.1.2.3.2-2, corrisponde ad una accelerazione perfetta, cioè un guadagno di tempo pari al numero dei core allocati (il rendimento dei processori è al 100%). Sfortunatamente tale figura mostra che le accelerazioni su tutte le macchine sono al di sotto di questa retta. Abbiamo dunque un tasso di attività dei processori inferiore al 100%. Questo si può spiegare con un costo di comunicazione molto elevato tra i diversi processori utilizzati per il calcolo.

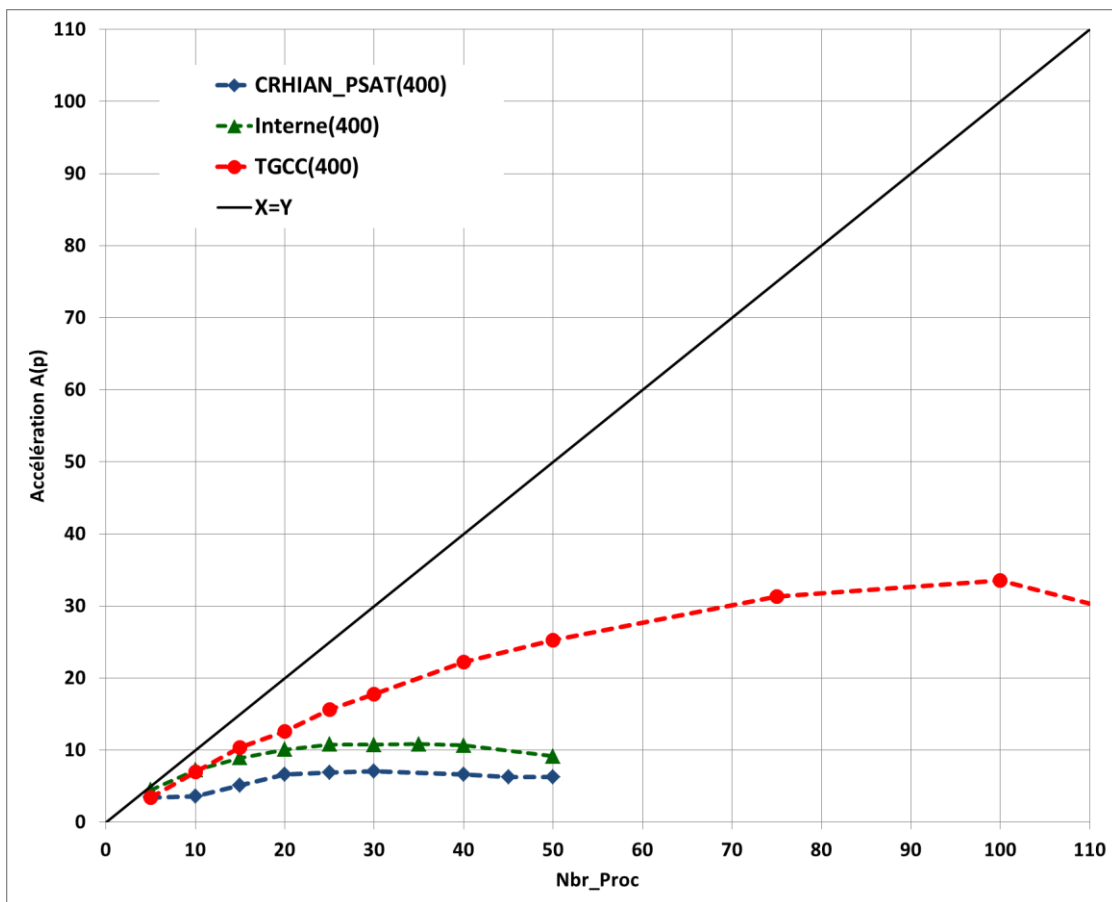


Figura 3.1.2.3.2-2: Evoluzione dell'accelerazione in funzione del numero dei processori utilizzati.

3.1.2.4 Gli scenari test per FARM in Piemonte et Valle d'Aosta

I sistemi modellistici basati su FARM sono stati implementati ormai da alcuni anni in ARPA Piemonte ed in ARPA Valle d'Aosta. Tali sistemi sono operativi sia in modalità previsionale sia in modalità diagnostica a breve e lungo termine (analisi del giorno precedente o simulazioni annuali) ma sono configurati per essere alimentati con dati di ingresso ed utilizzare domini di calcolo differenti da quelli previsti nel progetto SH 'AIR. Pertanto nell'ambito delle attività progettuali sono state sviluppate e testate le configurazioni e le necessarie procedure di calcolo ed elaborazione dati che integrano i sistemi esistenti permettendone il funzionamento con i nuovi dati a disposizione. E' stato sviluppato innanzitutto il modulo di interfacciamento tra WRF e FARM. Il modulo si compone di quattro parti: una procedura « ncl » (NCAR Command Language) che elabora i dati grezzi di WRF producendo le variabili meteo standard, una procedura python che riformatta i files netCDF del punto precedente per renderli compatibili con i successivi moduli di interpolazione e di turbolenza (modello SurfPRO). Il modello SurfPRO fa parte (al pari del modulo di interpolazione) dell'abituale sistema modellistico di FARM e provvede al calcolo dei parametri di nube, dei parametri di turbolenza, delle velocità di deposizione, dei coefficienti di diffusività, oltre ad integrare il modello MEGAN per le emissioni biogeniche. Per quanto riguarda il calcolo dei parametri di turbolenza e dei coefficienti di diffusività si è preferito utilizzare l'approccio diagnostico, testato e validato in molte applicazioni, piuttosto che direttamente i campi turbolenti prodotti da WRF. E' stato inoltre

adattato il modulo per le condizioni al contorno. Nelle versioni implementate operativamente FARM utilizza già i campi prodotti su scala continentale dal modello CHIMERE e distribuiti da Prev'Air, ma con un diverso formato da quelli messi a disposizione nel progetto.

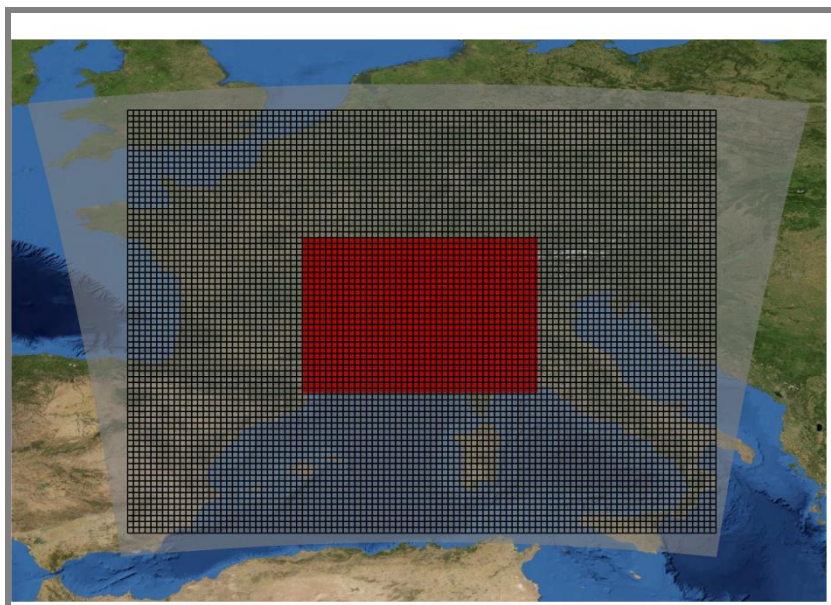


Figura 3.1.2.4-1 : Domini di simulazione di FARM (in nero dominio continentale con risoluzione 0.2° , in rosso quello ALCOTRA con risoluzione 0.065°) con, in grigio, i domini dei dati esterni WRF utilizzati nel progetto.

Il sistema è stato applicato, in modalità two-way nesting ai domini di simulazioni riportati in Figura 3.1.2.4-1 : si tratta dei domini definiti nel progetto, un primo dominio a scala continentale ed un secondo dominio sul territorio ALCOTRA, ma adattati alla proiezione geografica (EPSG 4326) supportata da FARM ; le risoluzioni sono rispettivamente 0.2° per il dominio continentale e 0.065° per quello ALCOTRA (corrispondenti a circa 18 chilometri la prima e circa 6 chilometri la seconda). Tutti i dati territoriali in ingresso al modulo SurfPRO ed al modulo delle emissioni EMMA derivano dal CORINE LAND COVER 2006 integrati con informazioni sul territorio svizzero (ESA Regional GLOBCOVER), opportunamente elaborati sui domini di calcolo.

A valle della predisposizione o aggiornamento dei moduli e delle procedure, Il sistema è stato testato sul periodo invernale in esame nel progetto (20 novembre 2013-20 dicembre 2013) utilizzando, per quanto possibile, le configurazioni e le parametrizzazioni fisico-chimiche adottate operativamente dai partner italiani.

Per la chimica in fase gassosa è stata utilizzata una versione aggiornata dello schema SAPRC-99 (Carter et al, 2000) che include anche gli IPA (idrocarburi policiclici aromatici) ed il mercurio ; la chimica del mercurio è derivata dallo schema adottato in CAMx (Yarwood et al., 2003). Gli aerosols sono rappresentati con un modulo denominato AERO3 derivato da quello implementato nel modello CMAQ (Community Multiscale Air Quality, Binkowski et al., 1999), aggiornato per considerare i processi di adsorbimento/assorbimento degli IPA; AERO3 utilizza un approccio modale, gli aerosols sono rappresentati come sovapposizione di tre differenti distribuzioni log-normali (Aitken, accumulazione e grossolana), tiene conto dei processi dinamici di nucleazione,

condensazione e coagulazione, e del traferimento di massa gas/aerosol (ISORROPIA -Fountoukis et al, 2007 - per le componenti inorganiche e Schell et al., 2001 per quelle organiche). Come solutore delle equazioni differenziali che descrivono i meccanismi chimici è stato utilizzato Rosenbrock (Sandu et al. 2003), mentre l'avvezione-diffusione orizzontale è risolta con uno schema agli elementi finiti (Yamartino, 1993), la diffusione verticale con uno schema Crank-Nicholson semi implicito (Yamartino et al., 1992). Per quanto riguarda i tassi di fotolisi, a differenza di quanto avviene operativamente, non è stato utilizzato, per problemi di stabilità numerica, il modulo TUV ma delle look-up tables in cui i tassi di fotolisi sono calcolati con formule empiriche in base all'angolo locale di zenith.

Nel caso test sono state anche definite le configurazioni sui sistemi HPC a CINECA: le simulazioni (sia quelle test, sia quelle del caso base, sia le simulazioni di sensitività) sono state condotte in modalità ibrida con 16 processori per la parallelizzazione OpenMP e 48 processori per la parallelizzazione MPI. I risultati del caso test sono stati confrontati con le simulazioni effettuate operativamente sul Piemonte per l'anno 2013, con una risoluzione orizzontale di quattro chilometri, utilizzando una meteorologia diagnostica prodotta con il modello mass-consistent MINERVE.

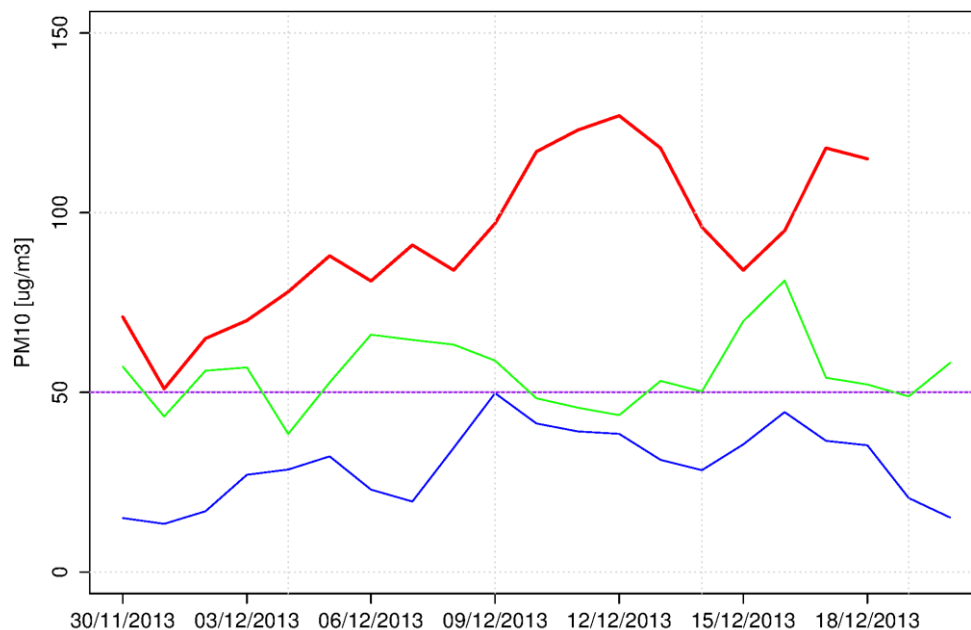


Figura 3.1.2.4-2 : Confronto fra gli andamenti di PM10 osservato (in rosso), simulati con FARM nel caso test per il progetto SHAIR (in blu) e simulati con FARM nella versione operativa in ARPA Piemonte (in verde) sulla stazione di Torino Lingotto per il periodo 30/11-20/12/2013

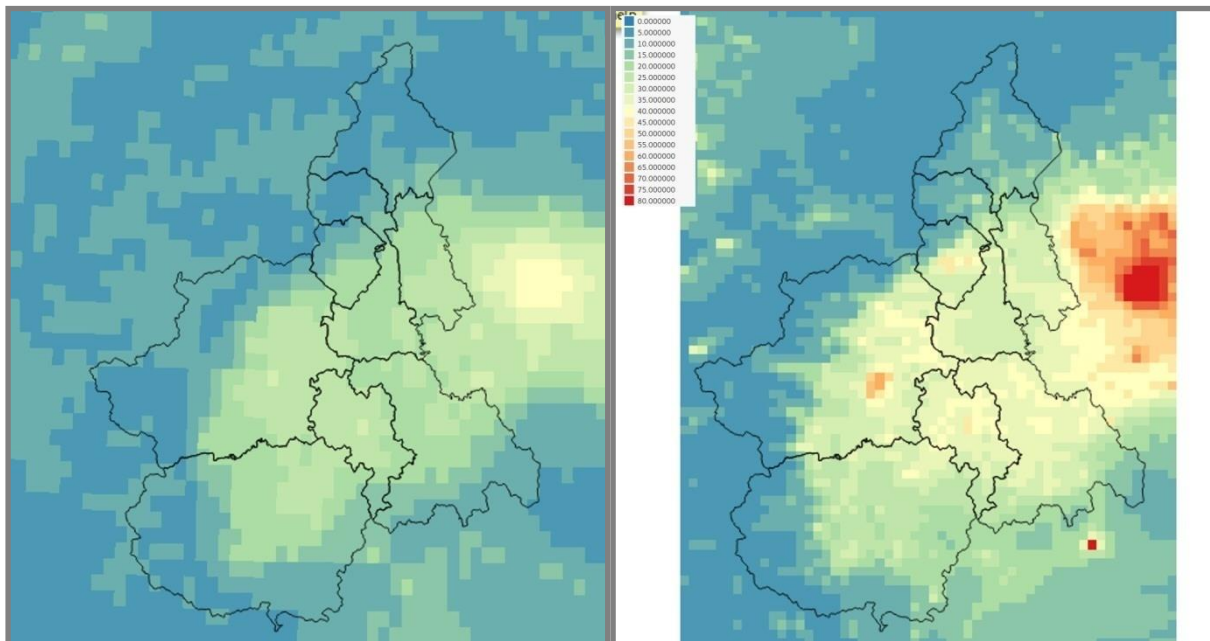


Figura 3.1.2.4-3: Campo di concentrazione media di PM10 per il periodo invernale simulato con FARM nel caso test per il progetto SHAIR (a sinistra) e simulati con FARM nella versione operativa in ARPA Piemonte (a destra).

I risultati ottenuti mostrano coerenza tra loro, l'accordo tra le distribuzioni spaziali delle concentrazioni è soddisfacente, tuttavia le simulazioni prodotte nell'ambito del progetto SH'AIR risultano maggiormente sottostimate, specie per il particolato PM10. Tale comportamento è da imputare probabilmente a tre fattori:

- la differente risoluzione : sei chilometri non paiono sufficienti per descrivere correttamente un territorio a morfologia complessa come il Piemonte (a maggior ragione la Valle d'Aosta) ;
- i dati meteorologici di un modello prognostico come WRF (si veda il capitolo specifico) notoriamente sovrastimano la velocità del vento al suolo rispetto ad un modello mass-consistent come MINERVE e quindi provocano una maggiore dispersione ;
- differenze nei dati di inventario delle emissioni : nelle simulazioni operative è stato utilizzato l'inventario regionale aggiornato al 2007 per il macrosettore traffico su strada.

Oltre al sistema modellistico è stato necessario anche testare il comportamento del modulo di *source apportionment* BFM. I test sono stati condotti in due fasi : la prima nelle attività di implementazione e sviluppo del codice, in accordo con ARIANET, la seconda dopo il collaudo e la messa in operatività del sistema. I due test, ed in particolare il secondo effettuato sul territorio della Valle d'Aosta alla risoluzione di un chilometro per la durata di un anno di simulazione, hanno permesso sia di verificare il corretto funzionamento del modulo, sia di predisporre tutte le procedure di post-elaborazione dei risultati e successivamente utilizzate nel progetto. Nella successive Figura 3.1.2.4-4 e Figura 3.1.2.4-5 sono riportati alcuni esempi dei risultati sulla Valle d'Aosta.

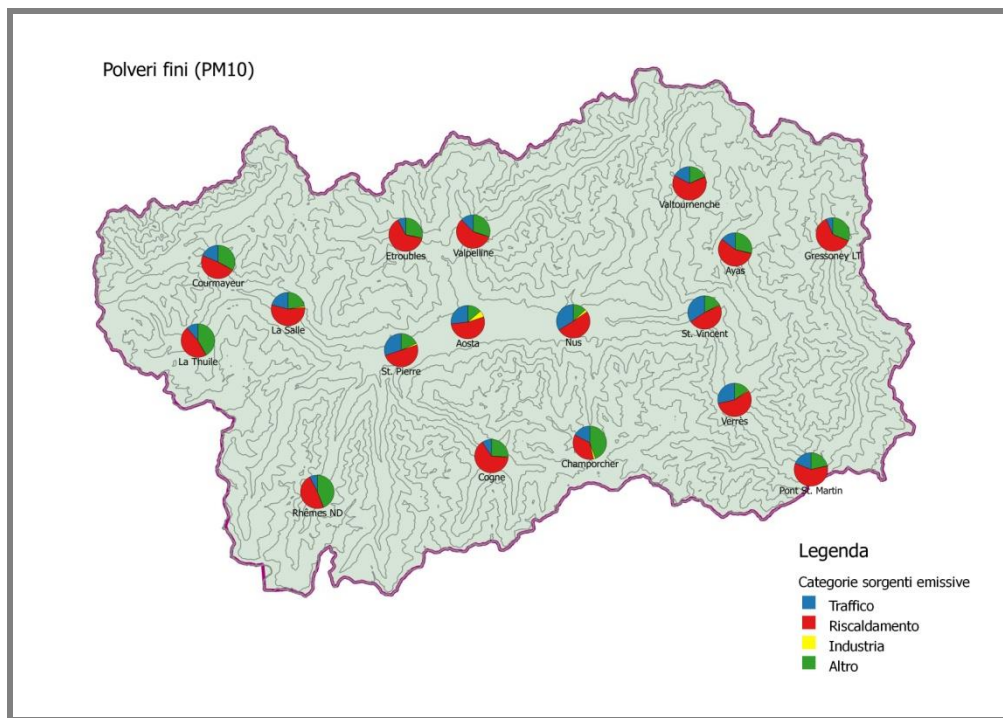


Figura 3.1.2.4-4 : Risultati del source apportionment con BFM per il caso test applicato alla Valle D'Aosta. Contributi percentuali sui singoli recettori per il PM10.

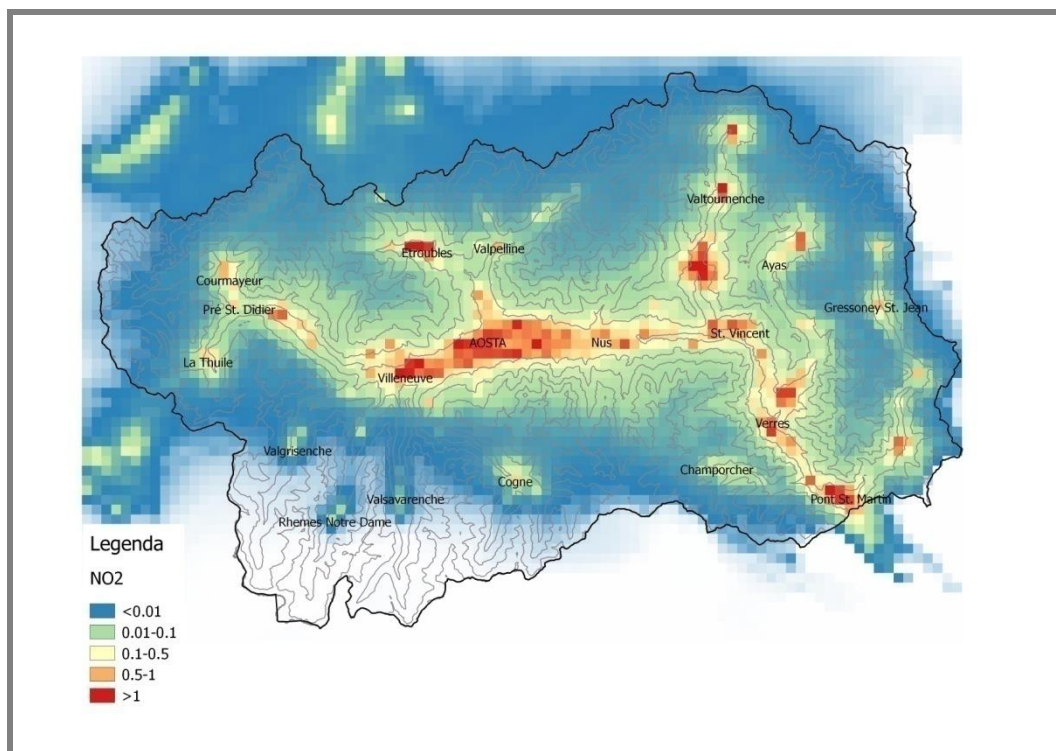


Figura 3.1.2.4-5 : Risultati del source apportionment con BFM per il caso test applicato alla Valle D'Aosta. Cartografia del contributo percentuale del settore riscaldamento domestico alla media annuale del biossido di azoto.

3.1.3 Sintesi dell'azione

Nell'ambito dell'Azione 3.1, sono stati sviluppati due sistemi basati sui modelli numerici di qualità dell'aria per calcolare le concentrazioni di particolato e stimare i contributi delle fonti di emissione per le regioni PACA, Piemonte, Rhône-Alpes e Valle d'Aosta. Questi sistemi integrano tutte le procedure necessarie per l'esecuzione dei calcoli, dalla preparazione dei dati di input fino all'analisi dei risultati.

I partner francesi hanno orientato la loro scelta al modello "open-source" CAMx, sviluppato da Ramboll-Around. Questo modello integra un modulo speciale per il calcolo dei contributi delle fonti emissive alle concentrazioni di particolato, chiamato PSAT (PM Source Apportionment Technology). Tale modello utilizza dei traccianti reattivi associati a ciascuna fonte di inquinamento. Questi traccianti sono in grado di seguire le particelle primarie, le particelle gassose precursori del particolato e le particelle secondarie che si formano da reazioni chimiche lungo tutto il periodo della simulazione. Questo metodo di calcolo consente una rigorosa conservazione della massa tra le concentrazioni totali e quelle dei contributi.

Nell'ambito del progetto SH'AIR, il sistema di calcolo basato sul modello CAMx è stato testato dai due partners francesi nelle loro rispettive regioni. Il suo funzionamento tecnico è stato poi valutato in base al completamento di entrambi i test. I risultati ottenuti hanno contribuito ad assicurare la coerenza delle varie fasi della catena di calcolo sviluppata.

I partner italiani hanno nel frattempo orientato la loro scelta verso il modello FARM sviluppato da ARIANET. Questa scelta è stata condizionata dal fatto che FARM è il modello di riferimento operante sul territorio italiano. Nell'ambito del progetto, è stato sviluppato un modulo specifico di analisi di sensibilità, basata su un approccio BFM (Brute Force Method). Questo metodo permette la valutazione del contributo di una sorgente analizzando la risposta del modello al variare della sua emissione. Lo sviluppo realizzato ha permesso di integrare direttamente tale modulo a quello di preparazione delle emissioni ed al codice di calcolo FARM per una gestione diretta delle simulazioni di sensibilità e dei risultati.

Questo sistema di calcolo è stato applicato dai partner italiani nel dominio ALCOTRA. I risultati ottenuti a partire dalle simulazioni base e dalle simulazioni di sensibilità hanno permesso di convalidare il funzionamento di ciascun componente della catena dei moduli di calcolo.

3.2. Preparazione delle emissioni sulle 4 regioni partner

3.2.1 Presentazione degli inventari/catastri delle emissioni

Gli inventari delle regioni Piemonte e Valle d'Aosta e i cadastre delle regioni PACA e Rhône-Alpes stimano per ciascun anno di riferimento – sulla base di indicatori statistici e di variabili proxy – le quantità emesse dalle diverse tipologie di sorgente: **sorgenti puntuali** (singoli impianti industriali, in Figura 3.2.1-1), **sorgenti lineari** (strade e autostrade, in Figura 3.2.1-2) e **sorgenti areali** (fonti di emissione diffuse sul territorio). Nel caso delle sorgenti areali, i dati emissivi possono essere associati ai territori comunali (**inventari**) o alle maglie di una griglia regolare (**cadastre**), come rappresentato in Figura 3.2.1-3.

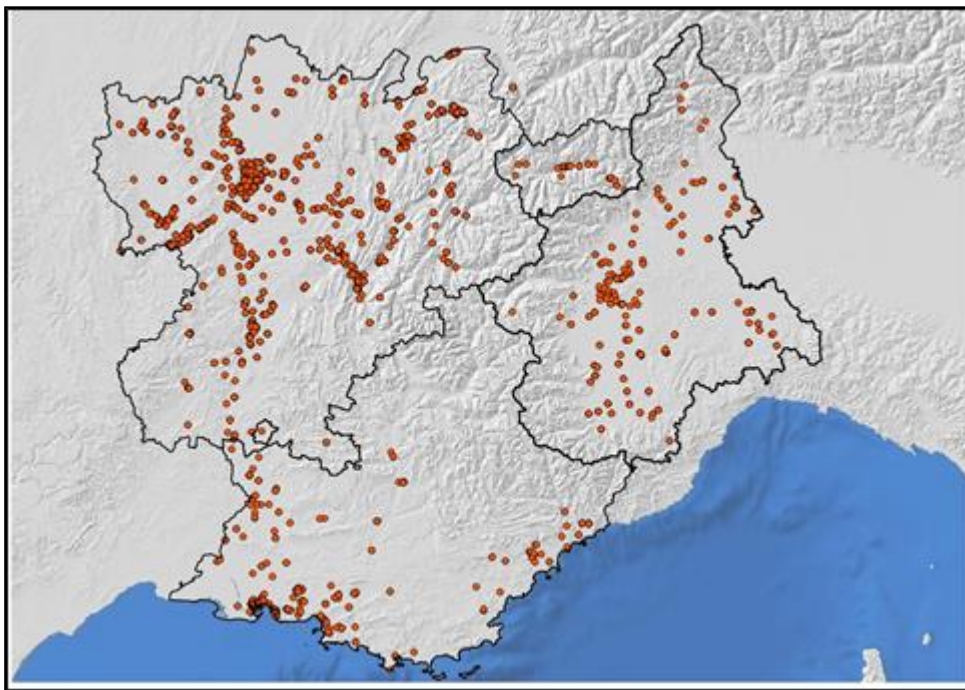


Figura 3.2.1-1: Sorgenti puntuali sul territorio ALCOTRA

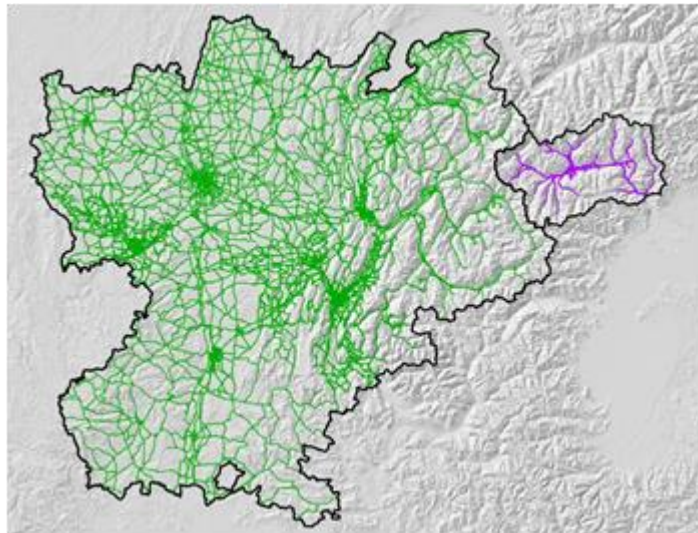


Figura 3.2.1-2: Sorgenti lineari sulle regioni Rhône-Alpes e Valle d'Aosta

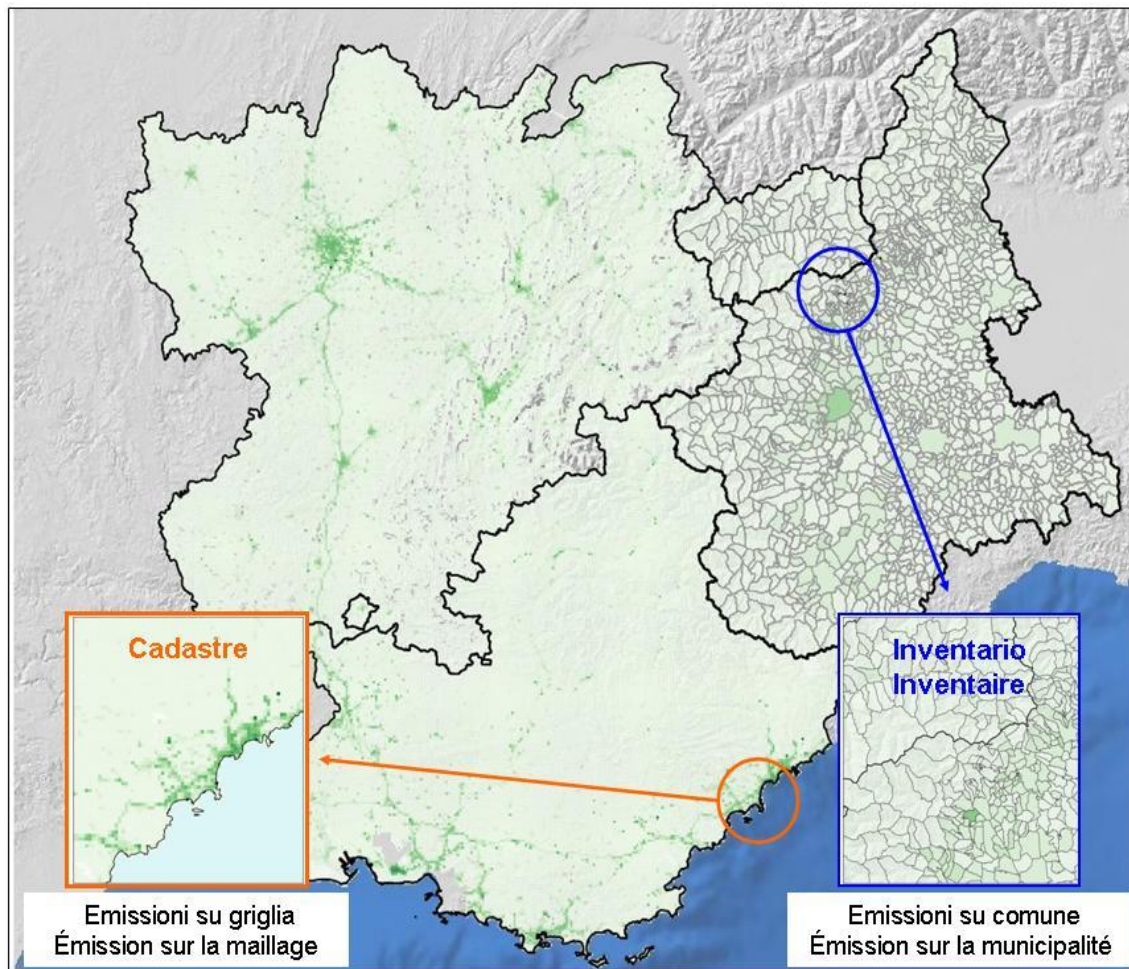


Figura 3.2.1-3: Sorgenti areali sul territorio ALCOTRA

I dati emissivi riferiti alle diverse attività antropiche e naturali – sia nel caso degli inventari regionali che nel caso dei cadastre – sono classificati con un codice a tre cifre (macrosettore, settore e

attività) secondo la **nomenclatura SNAP** (*Selected Nomenclature for Air Pollution*), come previsto dalla metodologia EMEP-CORINAIR adottata a livello europeo. I macrosettori sono i seguenti:

- Macrosettore 1: Combustione - Energia e industria di trasformazione
- Macrosettore 2: Combustione - Non industriale
- Macrosettore 3: Combustione - Industria
- Macrosettore 4: Processi Produttivi
- Macrosettore 5: Estrazione, distribuzione combustibili fossili/geotermico
- Macrosettore 6: Uso di solventi
- Macrosettore 7: Trasporti Stradali
- Macrosettore 8: Altre Sorgenti Mobili
- Macrosettore 9: Trattamento e Smaltimento Rifiuti
- Macrosettore 10: Agricoltura
- Macrosettore 11: Altre sorgenti di Emissione ed Assorbimenti

Oltre ai tre livelli di classificazione SNAP, gli inventari/cadastre forniscono anche l'informazione di dettaglio relativa al combustibile associato alle varie attività emmissive, secondo la **nomenclatura NAPFUE** (*Nomenclature for Air Pollution Fuel*).

Ciascun partner ha messo a disposizione la versione più aggiornata dei propri dati emissivi nei diversi formati:

- **Piemonte:** Inventario Regionale delle Emissioni **anno 2010** legato ai **territori comunali** nel sistema di riferimento WGS84 UTM32N;
- **Valle d'Aosta:** Inventario Regionale delle Emissioni **anno 2013** legato ai **territori comunali** nel sistema di riferimento WGS84 UTM32N;
- **PACA:** cadastre regionale **anno 2010** su **griglia regolare 1 km x 1 km** nel sistema di riferimento RGF93-Lambert93;
- **Rhône-Alpes:** cadastre regionale **anno 2013** su **griglia regolare 1 km x 1 km** nel sistema di riferimento RGF93-Lambert93.

Essendo stato individuato come periodo di studio per le attività progettuali - sia per le simulazioni modellistiche che per il confronto con i risultati analitici del precedente progetto PART'AERA - l'anno 2013, è stata concordata una metodologia di "evoluzione" dei dati emissivi per i partner che non disponevano dell'aggiornamento a tale anno (Arpa Piemonte e Air PACA).

3.2.1.1 Calcolo dell'inventario in PACA

L'Inventario regionale delle emissioni in atmosfera nella regione Provenza-Alpi-Costa Azzurra (PACA) è realizzato all'interno dell'osservatorio regionale della qualità dell'aria (Air PACA). I metodi di calcolo sono conformi alle raccomandazioni della guida metodologica del Polo di Coordinazione nazionale degli Inventari Territoriali (PCIT), che si basa su approcci metodologici e dati costitutivi

omogenei e condivisi a scala nazionale (Guida PCIT, 2012 [69]). L'insieme delle attività emissive sono censite e classificate secondo la nomenclatura SNAP 97c (Selected Nomenclature for Air Pollution), risultato del Progetto Europeo CORINAIR. La nomenclatura NAPFUE 94c (Nomenclature for Air Pollution of FUEls) è utilizzata per la descrizione dei combustibili.

L'inventario è realizzato a scala comunale sulla base dei dati di attività e dei fattori di emissione. In totale vengono considerati 35 inquinanti tra cui il particolato (TSP, PM10, PM2.5), i gas a effetto serra (CO₂, CH₄, N₂O), gli inquinanti fotochimici (SO₂, NO_x, CO, COVNM, HCl, HF, NH₃), i composti organici cancerogeni (C₆H₆, IPA (BaP, BaA, BbF, ...)) e i metalli pesanti (As, Cd, Cr, Cu, Hg, ...).

Nell'ambito del progetto SH'AIR, l'inventario è stato proiettato su una griglia regolare in Lambert 93 pari a 1x1 km e successivamente esportato in un formato utilizzabile per l'input di EMMA, descritto nella parte 3.2.5.2. Le emissioni sono calcolati per l'anno di riferimento il 2010, il settore del traffico stradale è stato aggiornato al 2013 a partire da un'evoluzione delle emissioni che tiene conto dell'evoluzione del parco auto, e il settore del riscaldamento residenziale sulla base dell'evoluzione dei Gradi Giorno Unificati (DJU).

3.2.1.2 Calcolo dell'Inventario in RA

Dopo quasi 15 anni, Air Rhône-Alpes sviluppa e arricchisce con continuità un inventario regionale delle emissioni atmosferiche. Sviluppato originariamente per alimentare i modelli di simulazione della qualità dell'aria, l'inventario delle emissioni si è poco a poco imposto come uno strumento che permette di fornire una diagnosi ambientale del territorio, mettendo in rilievo i settori di attività che emettono maggiormente. Oltre all'analisi della situazione attuale, lo strumento permette, sulla base di ipotesi, una proiezione nel futuro, valutando quello che produrranno sulle emissioni di inquinanti le future politiche pubbliche.

I dati messi a disposizione per il progetto Sh'Air riguardano l'anno:

- 2013 per CO, COVNM, NH₃, NO_x, SO₂, PM10 et PM2.5;

2012 per BaP e 2010 per BkF, BbF et IP: le emissioni 2013 di IPA, infatti, non erano ancora operative al momento della condivisione degli inventari delle emissioni tra partner.

Per ragioni di riservatezza, le emissioni dei siti industriali vincolate da segreto statistico non sono state fornite come stabilimenti, ma sono state integrate nelle emissioni areali.

3.2.1.3 Calcolo dell'inventario in Piemonte

L'Inventario delle Emissioni del Piemonte è realizzato con il sistema INEMAR (INventario EMissioni ARia), progettato per stimare le emissioni a livello comunale dei principali macroinquinanti (SO₂, NO_x, COVNM, CH₄, CO, CO₂, N₂O, NH₃, PM2.5, PM10 e PTS), delle frazioni carboniose del particolato (EC, OC), degli idrocarburi policiclici aromatici (BaP, BbF, BkF, IcdP, IPA-CLTRP), dei metalli pesanti

69 Pôle National de Coordination des Inventaires Territoriaux. 2012. Guide méthodologique pour l'élaboration des inventaires territoriaux des émissions atmosphériques (polluants de l'air et gaz à effet de serre). Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, DGEC, Bureau de la Qualité de l'Air. Novembre 2012.

(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) e degli inquinanti aggregati (CO₂eq, precursori dell'ozono e sostanze acidificanti), per ogni attività della classificazione CORINAIR e per tipo di combustibile. Le informazioni raccolte nel sistema INEMAR sono le variabili necessarie per la stima delle emissioni: indicatori di attività (consumo di combustibili, consumo di vernici, quantità incenerita, e, in generale, qualsiasi parametro in grado di tracciare l'attività dell'emissione), fattori di emissione, dati statistici necessari per la disaggregazione spaziale e temporale delle emissioni.

Non disponendo dei dati di emissione riferiti all'anno 2013, per armonizzare il livello di aggiornamento dell'input emissivo con quello degli altri partner, Arpa Piemonte ha applicato alle emissioni relative al macrosettore 2 ("Combustione non industriale") e al macrosettore 7 ("Trasporti stradali") dei coefficienti evolutivi specifici per il proprio territorio: i dati di riscaldamento 2010 sono stati "corretti" sulla base dei gradi-giorno relativi all'anno 2013, mentre i dati di traffico sono stati aggiornati al 2013 sulla base dei trend forniti dal modello GAINS Italy70.

3.2.1.4 Calcolo dell'Inventario in Valle d'Aosta

L'Inventario delle Emissioni della Valle d'Aosta è nato nel 1998 e viene aggiornato con cadenza annuale.

I fattori di emissione generalmente utilizzati sono quelli riportati nel Atmospheric Emission Inventory Guidebook redatto nell'ambito del progetto EMEP-CORINAIR. La metodologia di calcolo varia a seconda del settore di emissione:

- sorgenti industriali: utilizzo dei valori di emissione ricavati dagli autocontrolli delle stesse;
- traffico stradale: utilizzo del software "TREFIC" per la valutazione delle emissioni per tratto stradale in base ai flussi di traffico ed al parco veicolare;
- discariche di rifiuti: utilizzo del software EPA denominato "Landgem";
- per tutte le altre tipologie di sorgenti viene elaborato il calcolo in base ai fattori di emissione.

Gli inquinanti considerati nell'inventario delle emissioni della Valle d'Aosta sono:

- macroinquinanti: particolato (PM₁₀, PM_{2.5}), ossidi di azoto (NO_x), monossido di carbonio (CO), biossido di zolfo (SO₂), composti organici volatili non metanici (COVNM), benzene (C₆H₆), ammoniaca (NH₃);
- gas climalteranti: anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), protossido di azoto (N₂O);
- microinquinanti: arsenico (As), piombo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr), rame (Cu), mercurio (Hg), nichel (Ni), selenio (Se), zinco (Zn), idrocarburi policiclici aromatici (IPA).

3.2.2 Armonizzazione dei dati emissivi

I dati emissivi disponibili per la zona di cooperazione transfrontaliera non risultano sempre coerenti: tutti i partner adottano la classificazione SNAP per le attività emissive e la classificazione NAPFUE per i combustibili, ma con livelli di dettaglio spesso differenti e con alcune specificità di carattere regionale.

Per lavorare su una base dati emissiva comune, si è concordato di armonizzare i dati emissivi forniti da ciascun partner sia per quanto riguarda le **categorie SNAP** (macrosettore, settore e attività), sia per quanto riguarda i combustibili (**codici NAPFUE**).

E' stato conservato il massimo livello di dettaglio nella suddivisione delle emissioni - livello di attività per la maggior parte dei codici SNAP, livello di settore nei casi in cui era presente un dettaglio inferiore in alcune regioni partner - in modo da differenziare il più possibile le successive parametrizzazioni dell'input modellistico associate a ciascun dato emissivo (profili di speciazione del PM10 e degli NMVOC, cfr par. 3.2.5; profili di modulazione temporale, cfr par. 3.2.3).

Per quanto riguarda la classificazione NAPFUE, in carenza di informazioni legate ad alcune categorie emissive, si è deciso di utilizzare unicamente una suddivisione in due tipologie di combustibile: **combustibile legna** e **combustibile indifferenziato**.

3.2.3 Armonizzazione dei profili di evoluzione temporale

I dati emissivi negli inventari/cadastre sono forniti come sommatoria annuale (tonnellate/anno); nella predisposizione dell'input emissivo ai modelli di dispersione tale sommatoria va frazionata su base oraria, sulla base di profili di modulazione temporale (**giornalieri, settimanali e annuali**) specifici per categoria emissiva.

Per uniformare il più possibile l'input modellistico emissivo è stata concordata un'armonizzazione dei profili di evoluzione temporale. E' stata prioritariamente effettuata l'analisi di tutti i profili di evoluzione temporale adottati dai differenti partner, associati alle varie attività emissive; successivamente in alcuni casi sono stati individuati - per ciascuna SNAP - dei **profili temporali comuni** (Figura 3.2.3-1), cercando di scegliere profili "medi" rispetto ai vari profili regionali disponibili; in altri casi (ad es. per i profili temporali annuali del macrosettore "combustione non industriale" e del macrosettore "agricoltura"), sono stati mantenuti dei **profili temporali regionali**, in modo da conservarne l'effettiva specificità territoriale, legata a zone climatiche differenti e alle diverse tipologie culturali.

I profili di modulazione temporale individuati come profili comuni e la loro descrizione sono disponibili nell'Allegato C.

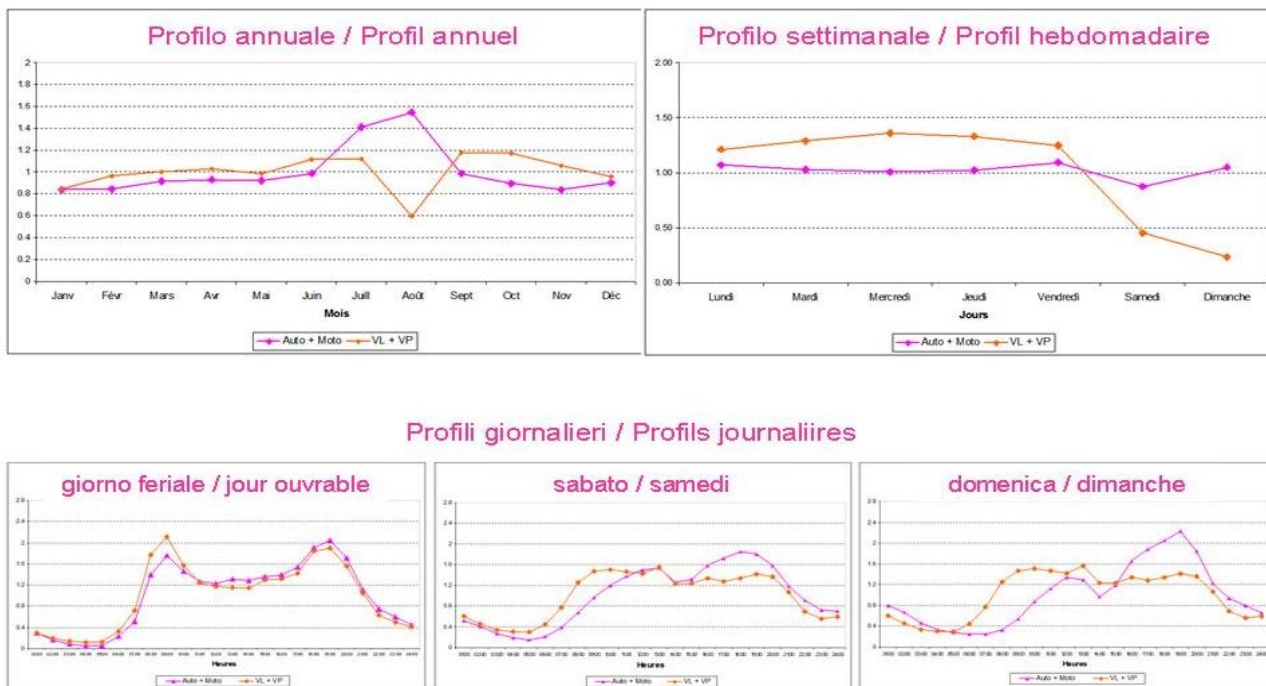


Figura 3.2.3-1: Esempio di profili temporali comuni annuali, settimanali e giornalieri

3.2.4 Calcolo del catasto sulla zona ALCOTRA

A fronte dell'esperienza precedente con lo stesso partenariato acquisita nell'ambito del progetto AERA, per facilitare lo scambio di dati emissivi tra partner e per uniformare la predisposizione dell'input emissivo, è stato predisposto un cadastre comune per tutto il territorio ALCOTRA – a partire dalle sorgenti lineari e areali appartenenti alle regioni partner - nel sistema di riferimento RGF93-Lambert93. Anche le sorgenti puntuali presenti in ciascuna regione sono state georiferite nel sistema RGF93-Lambert93 e raggruppate in un unico input emissivo per il territorio ALCOTRA.

A partire dai dati di inventario/cadastre – disponibili su poligono comunale per la parte italiana (sistema WGS84 UTM32N) o su celle di un grigliato per la parte francese (sistema RGF93-Lambert93) – le emissioni prodotte dalle diverse sorgenti sono state attribuite in modo differenziato ad un grigliato transfrontaliero ALCOTRA (celle 1 km x 1 km, nel sistema di riferimento RGF93-Lambert93), sulla base di specifici tematismi (cartografie relative all'uso del suolo, all'edificato residenziale, alle aree industriali, alla vegetazione, alle colture agricole, ecc...).

Il processo è stato realizzato, nell'ambito del sistema modellistico in uso presso Arpa Piemonte, dalla suite modellistica EMMA⁷¹ (par. 3.2.5.2) appositamente implementata nell'ambito del progetto per elaborare un input emissivo suddiviso in categorie SNAP, in diversi sistemi di riferimento (UTM, Lambert93, latitudine/longitudine) nel formato netCDF (Figura 3.2.4-1).

71 Arianet srl (<http://www.aria-net.it/front/IT/codici/suite.php>)

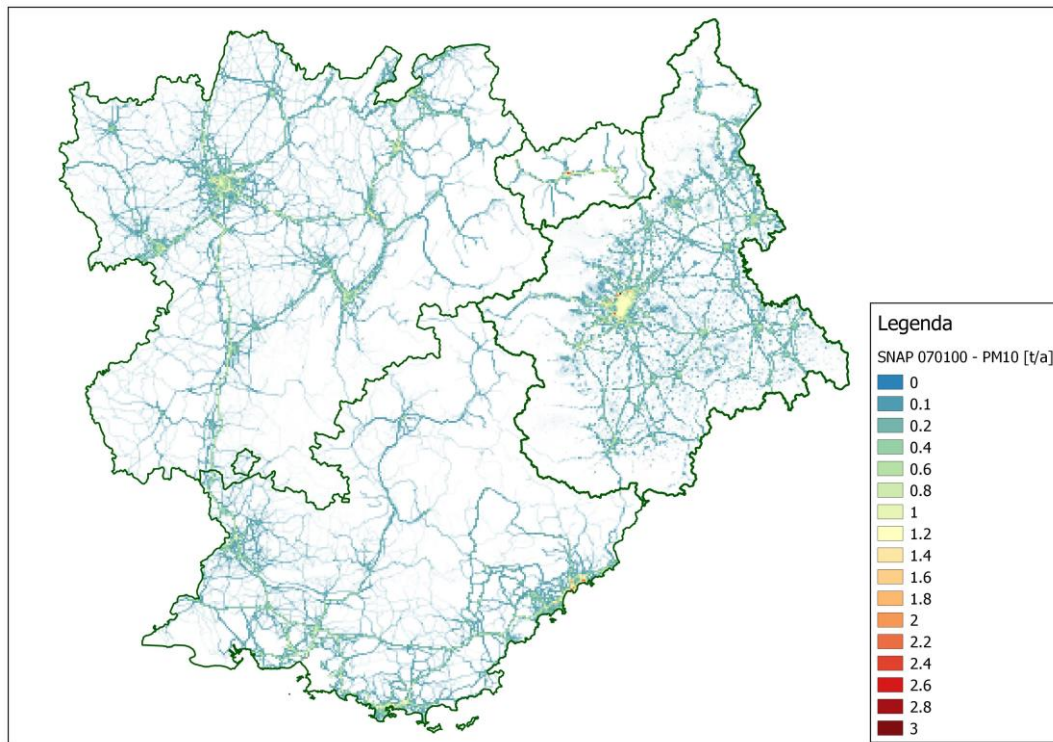


Figura 3.2.4-1: Esempio di cadastre emissivo comune sul territorio ALCOTRA –PM10 da traffico di automobili

3.2.5 Integrazione dei cadastres nei modelli fotochimici

3.2.5.1 Preparazione del cadastre per CAMx

La preparazione delle emissioni per lanciare il calcolo con il modello CAMx prevede la realizzazione di più fasi successive. La prima di queste fasi è la redistribuzione delle emissioni - grigliate su maglie da 1 km in uscita dal modulo EMMA - nella griglia di calcolo di CAMx con una risoluzione di 6 km e con un diverso sistema di proiezione geografica. La Figura 3.2.5.1 -1 rappresenta sia l'area del cadastre iniziale di EMMA sia la griglia di calcolo di CAMx nella quale le emissioni sono state ridistribuite.

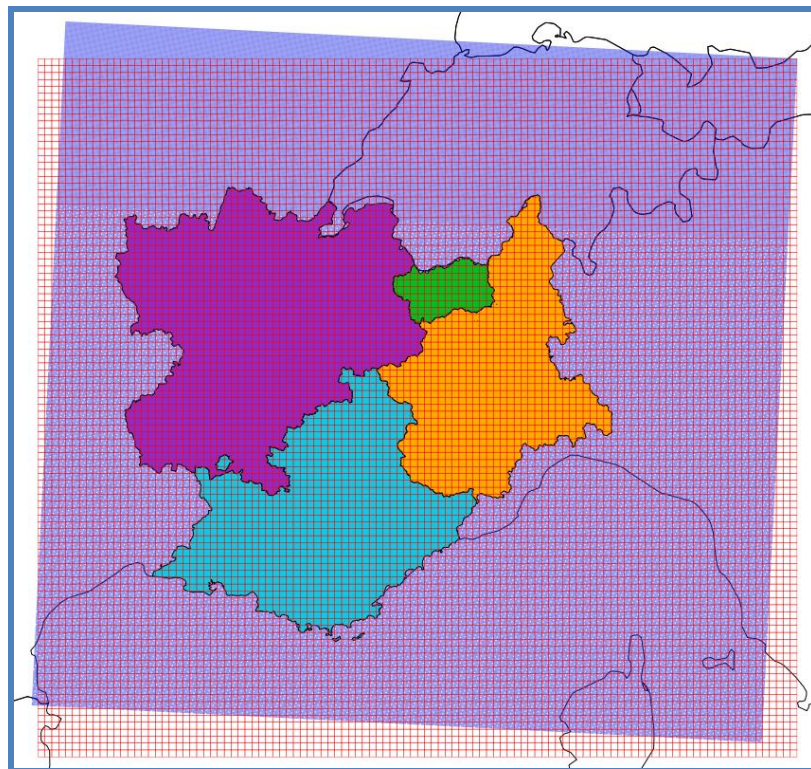


Figura 3.2.5.1-1: Rappresentazione della griglia di cadastre EMMA a 1 km (blu) e della griglia di calcolo di CAMx a 6 km (rosso)

La seconda fase consiste nel disaggregare le emissioni annuali in emissioni orarie sulla base dei profili temporali armonizzati descritti nella parte 3.2.3, per ciascuno dei 320 codici SNAP differenziati. Le emissioni vengono quindi espresse in [g/h/cella].

La terza fase, chiamata speciazione delle specie, permette di convertire le specie generiche presenti nel cadastre in specie specifiche in modo di essere trattate dal modello di chimica e trasporto. Questa fase riguarda tre categorie di inquinanti: gli NO_x (ossidi di azoto), i COV (composti organici volatili) e il PM_{2.5}. A ciascuna delle diverse attività emissive è associato un profilo di speciazione. La speciazione viene definita per le specie integrate nel modello di chimica e trasporto CHIMERE, per cui risulta necessario definire una relazione tra queste specie e le specie di CAMx. Le emissioni sono espresse in [mole/h/cella] per i gas e in [g/h/cella] per il particolato. Le emissioni antropiche esterne alle 4 regioni partner provengono dall'inventario EMEP per l'anno di riferimento 2010, con una risoluzione spaziale iniziale di 50x50km: vengono poi ridistribuite sulle maglie del dominio di simulazione a una risoluzione di 6 km in funzione dell'uso del suolo. Le emissioni naturali (biogeniche, terrigene e marine) sono calcolate - sull'intero dominio per ciascuna ora in funzione delle condizioni meteorologiche simulate - dai moduli MEGAN e "diagbio" integrati nel preprocessore CHIMERE. Una tappa di conversione delle specie si è resa allo stesso modo necessaria per integrare anche le emissioni naturali in CAMx.

Le emissioni delle diverse attività antropiche e delle emissioni naturali sono state successivamente raggruppate in 5 settori di attività, definiti nella parte 3.2.5.

L'insieme dei dati di emissione trattati è stato infine convertito in formato binario per rispettare le convenzioni di formato richieste da CAMx. Un trattamento simile è stato realizzato per l'insieme delle sorgenti di emissione puntuali.

3.2.5.2 Preparazione del cadastre per FARM

Nell'ambito delle catene modellistiche in uso presso Arpa Piemonte, i dati emissivi – sorgenti puntuali, lineari e areali – vengono trattati da una sottocatena specifica per la modellizzazione delle emissioni (EMMA, Arianet srl), che prevede 3 livelli principali di processamento:

- la disaggregazione spaziale;
- la modulazione temporale;
- la speciazione chimica.

Per quanto riguarda la disaggregazione spaziale, poiché il modello fotochimico FARM può lavorare sia in coordinate WGS84 UTM32N che in coordinate RGF93-Lambert93 oppure direttamente in coordinate geografiche (latitudine-longitudine), si è scelto di predisporre l'input emissivo in coordinate geografiche per evitare eventuali distorsioni derivanti dalle proiezioni negli altri due sistemi di coordinate. Per la predisposizione dell'input di FARM è stato quindi applicato il processo descritto nel paragrafo 3.2.4 (spazializzazione delle emissioni con la suite modellistica EMMA), attribuendo però le emissioni ad un grigliato transfrontaliero ALCOTRA con celle 6 km x 6 km – risoluzione concordata per la simulazione dispersiva - in coordinate geografiche WGS84.

Nell'input emissivo per FARM sono stati inseriti anche i dati emissivi di EMEP 2010⁷² per i territori confinanti compresi nel dominio di simulazione ALCOTRA (altre regioni italiane e francesi, altri stati europei nonché le emissioni legate alle zone marine) e nel dominio transfrontaliero di background.

A causa di un errore nell'esportazione iniziale del cadastre di PACA, le emissioni inquinanti e la relativa cartografia erano assenti sul comune di Marsiglia. Il modulo EMMA di preparazione delle emissioni per il modello FARM ha rimpiazzato automaticamente questa assenza di dati con le emissioni EMEP (le stesse emissioni utilizzate all'esterno del dominio ALCOTRA), che sovrastimano le emissioni legate al settore industriale. L'errore nella esportazione delle emissioni sul comune di Marsiglia è stata invece corretta nei dati di ingresso della catena di calcolo del modello CAMx.

Per la disaggregazione temporale sono stati applicati i profili temporali comuni alla zona ALCOTRA e quelli specifici regionali (paragrafo 3.2.3).

Infine, seguendo il meccanismo chimico SAPRC99 e lo schema per gli aerosol AERO3 adottati dal modello di chimica e trasporto, un modulo specifico di EMMA riproduce – sulla base di profili di speciazione e dimensionali specifici per ogni categoria emissiva - la speciazione chimica dei composti organici volatili non metanici (nei principali composti organici appartenenti alla famiglia dei NMVOC: alcani, aldeidi, chetoni, aromatici, olefine, terpeni, ecc...), la ripartizione granulometrica del particolato e la ripartizione chimica degli ossidi di azoto in monossido e biossido.

72 http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/webdab_emepdatabase/emissions_emepmodels/
SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

Il risultato finale – output del modello EMMA e input per FARM - è la produzione di ratei orari di emissione sulla griglia di simulazione per tutte le specie chimiche trattate dal modello di chimica e trasporto.

3.2.6 Sintesi dell'azione

Per uniformare il più possibile l'input emissivo, si è deciso sia di predisporre una base dati emissiva comune – relativa all'anno 2013 - sia di armonizzare le parametrizzazioni delle emissioni previste per i modelli di dispersione.

A partire dai dati emissivi di ciascun partner – disponibili per anni differenti (2010 Piemonte e PACA, 2013 Valle d'Aosta e Rhône-Alpes) e con diversa attribuzione territoriale (emissioni su comune per quanto riguarda le regioni italiane e emissioni su celle di un grigliato regolare per quanto riguarda le regioni francesi) – si è innanzitutto uniformato il livello di aggiornamento, concordando una metodologia di “evoluzione” dei dati emissivi per i partner che non disponevano dell'aggiornamento all'anno 2013 (Arpa Piemonte e Air PACA). Inoltre sono stati armonizzati i dati emissivi forniti da ciascun partner sia per quanto riguarda le **categorie SNAP** (macrosettore, settore e attività), sia per quanto riguarda i combustibili (**codici NAPFUE**).

Per quanto riguarda l'input modellistico emissivo è stata poi concordata un'armonizzazione dei profili di evoluzione temporale, previa analisi di tutti i profili temporali adottati dai differenti partner, associati alle varie attività emissive: in alcuni casi sono stati individuati - per ciascuna SNAP - dei **profili temporali comuni**, in altri sono stati mantenuti dei **profili temporali regionali**, in modo da conservare l'effettiva specificità territoriale.

Infine, a partire dai dati di inventario/cadastre – disponibili su poligono comunale per la parte italiana (sistema WGS84 UTM32N) o su celle di un grigliato per la parte francese (sistema RGF93-Lambert93) – le emissioni prodotte dalle diverse sorgenti sono state attribuite in modo differenziato ad un grigliato transfrontaliero ALCOTRA (celle 1 km x 1 km, nel sistema di riferimento RGF93-Lambert93), sulla base di specifici tematismi (cartografie relative all'uso del suolo, all'edificato residenziale, alle aree industriali, alla vegetazione, alle colture agricole, ecc...).

Il processo è stato realizzato da una suite modellistica specifica per le emissioni (EMMA⁷³), appositamente implementata nell'ambito del progetto per elaborare un input emissivo suddiviso in categorie SNAP, in diversi sistemi di riferimento (UTM, Lambert93, latitudine/longitudine) nel formato netCDF (Figura 3.2.4-1).

73 Arianet srl (<http://www.aria-net.it/front/IT/codici/suite.php>)

3.3. Valutazione dei risultati modellistici

La validazione dei risultati prodotti dai modelli di trasporto e dispersione CAMx e FARM (descritti ampiamente nel capitolo 3.1) utilizzati per il calcolo dei campi di concentrazione di particolato deve essere fatta confrontando i risultati ottenuti dalle simulazioni con le osservazioni disponibili sul territorio oggetto di studio.

3.3.1 Le misure di concentrazione e di speciazione del particolato

3.3.1.1 Analisi dei dati di concentrazione del particolato

3.3.1.1.1 I riferimenti normativi

Per quanto concerne i valori limite sulle concentrazioni di particolato in aria, la normativa attualmente in vigore a livello europeo è la Direttiva 2008/50/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 21 maggio 2008, relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa, recepita in Francia con il Decreto n° 2010-1250 del 21 ottobre 2010 ed in Italia con il Decreto Legislativo 155/2010 del 13 agosto 2010.

Tale direttiva stabilisce per il particolato i valori limite riportati nella tabella seguente.

Tabella 3.3.1.1.1-1 : Riferimenti normativi per le concentrazioni di particolato in aria (direttiva 2008/50/CE)

	Valore limite per la protezione della salute umana
PM10	40 µg/m ³ per la media annua
	50 µg/m ³ per la media giornaliera da non superare più di 35 giorni all'anno
PM2.5	25 µg/m ³ per la media annua

3.3.1.1.2 Le misure nella zona ALCOTRA

Nell'insieme del dominio ALCOTRA sono presenti 88 stazioni per la misura del PM10 e 34 stazioni per la misura del PM2.5, le cui caratteristiche sono descritte dettagliatamente nell'allegato D.

Nelle mappe seguenti sono riportati i valori di concentrazione di PM10 e di PM2.5 misurati nelle stazioni.

Nel periodo estivo (dal 22/07/2013 al 21/08/2013) i valori medi di concentrazione di PM10 sono generalmente inferiori a 20 µg/m³, anche se in alcune stazioni si raggiungono i 30-35 µg/m³ (figura 3.3.1.1-1).

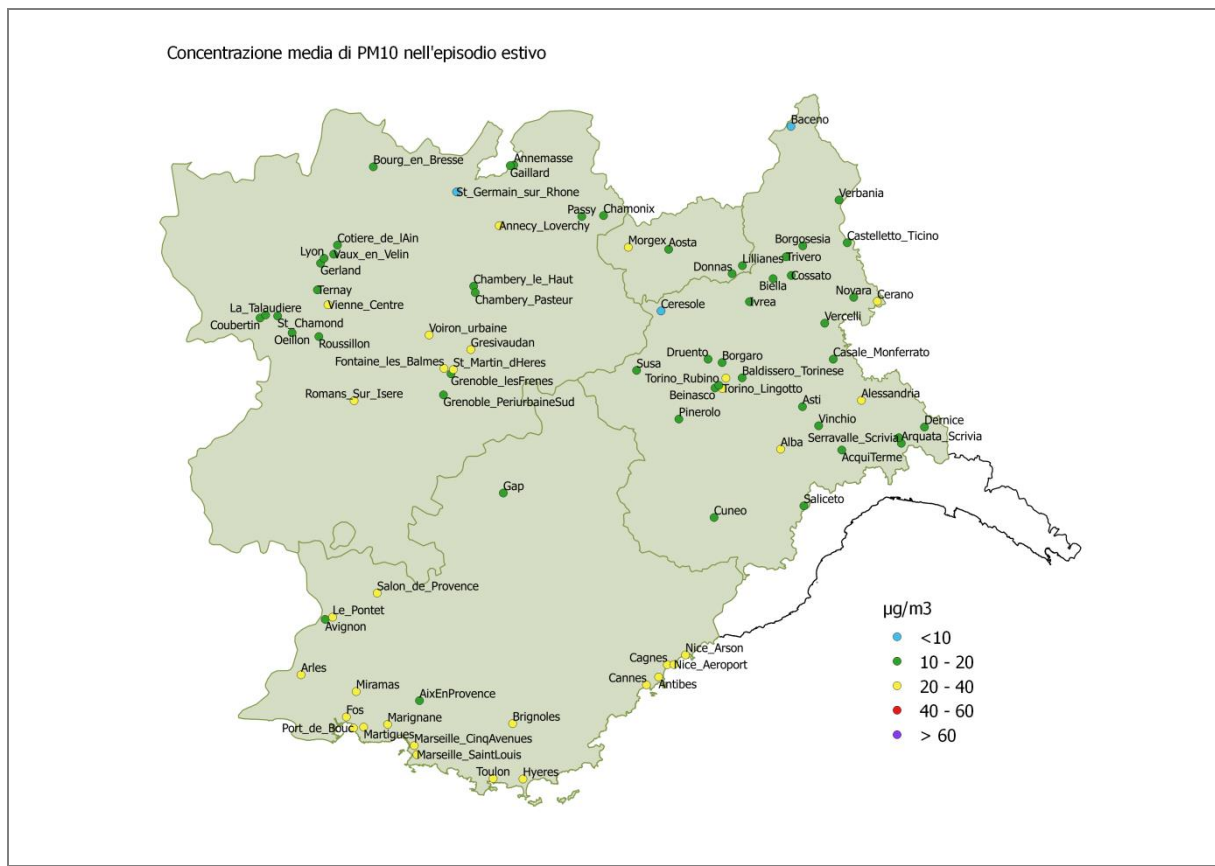


Figura 3.3.1.1.2-1: Concentrazioni medie di PM10 misurate durante l'episodio estivo nel territorio ALCOTRA.

La media del PM10 nel periodo invernale (dal 20/11/2013 al 20/12/2013) risulta piuttosto elevata in molte stazioni, in particolare in Piemonte, Rhône-Alpes e Valle d'Aosta (figura 3.3.1.1-2).

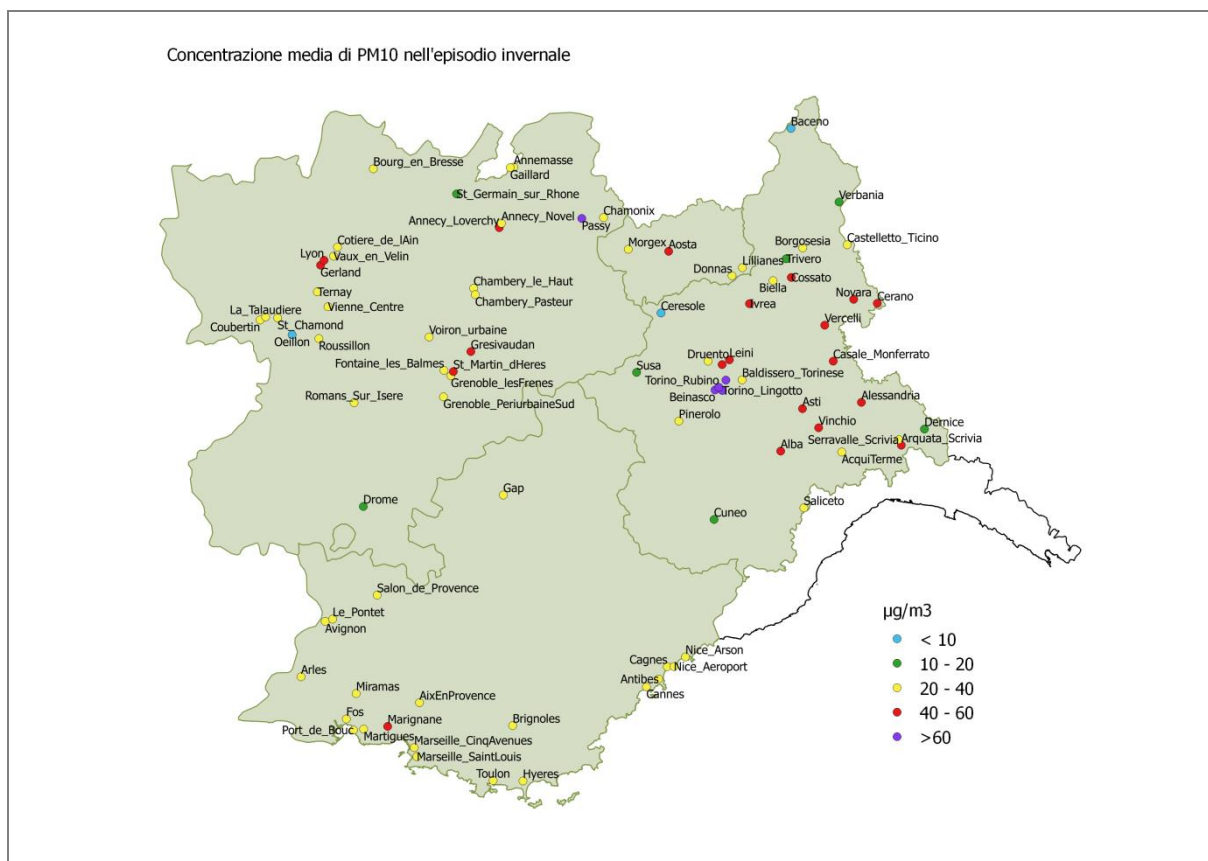


Figura 3.3.1.1.2-2: Concentrazioni medie di PM10 misurate durante l'episodio invernale nel territorio ALCOTRA.

Un parametro molto interessante è il numero di superamenti del valore di 50 µg/m³ sulla media giornaliera: nel periodo invernale, in alcune stazioni del Piemonte vi sono più di 20 giorni di superamento e sono molte le località della zona ALCOTRA che contano più di 10 superamenti (figura 3.3.1.1.2-3), mentre nel periodo estivo non si registrano superamenti di tale valore.

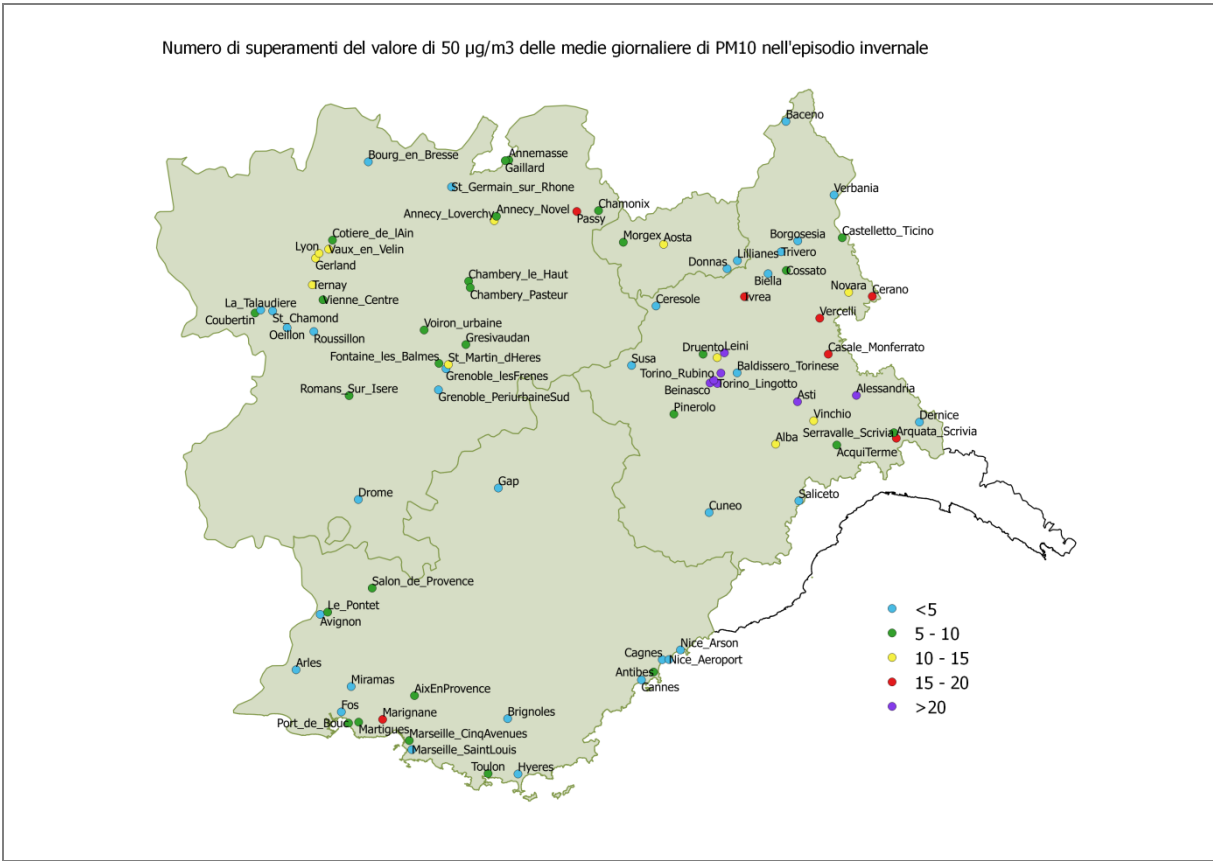


Figura 3.3.1.1.2-3: Numero di superamenti del valore limite giornaliero di 50 µg/m³ per il PM10 durante l'episodio invernale nel territorio ALCOTRA.

Le concentrazioni misurate di PM2.5 hanno la stessa distribuzione spaziale, con valori particolarmente elevati sul Piemonte nel periodo invernale e valori abbastanza uniformi (inferiori a 15 µg/m³) nel periodo estivo.

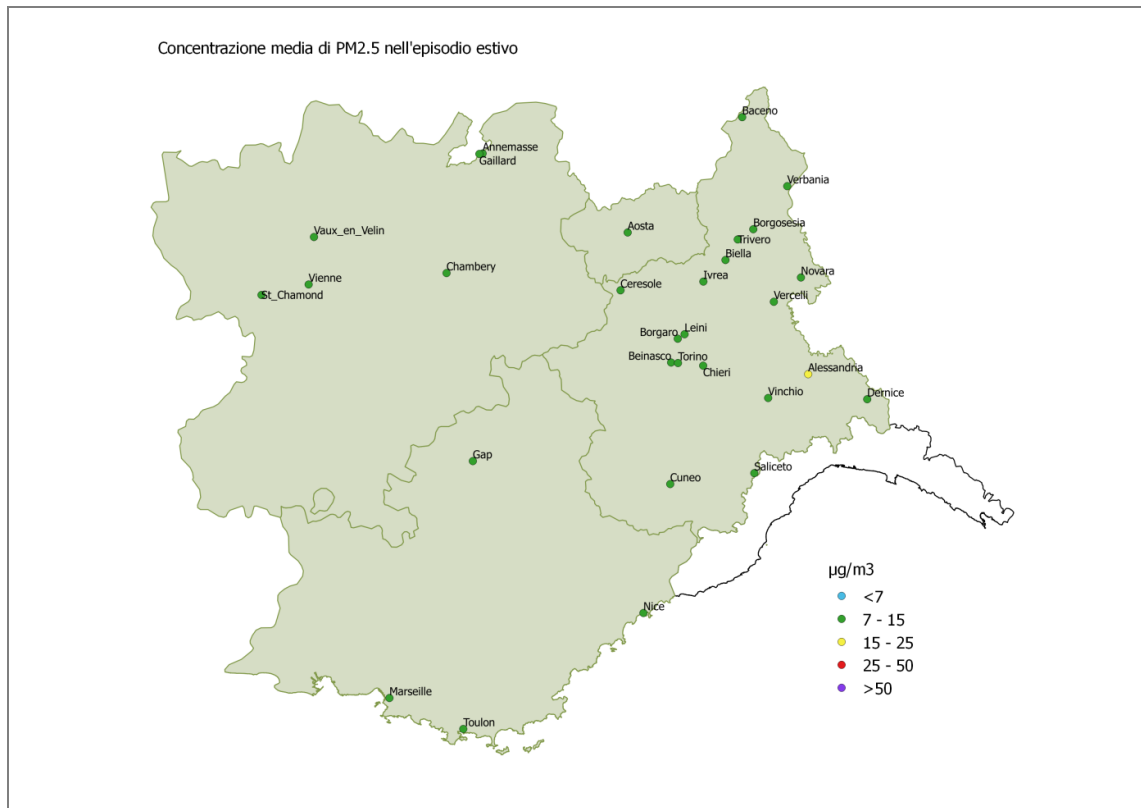


Figura 3.3.1.1.2-4: Concentrazioni medie di PM2.5 misurate durante l'episodio estivo nel territorio ALCOTRA.

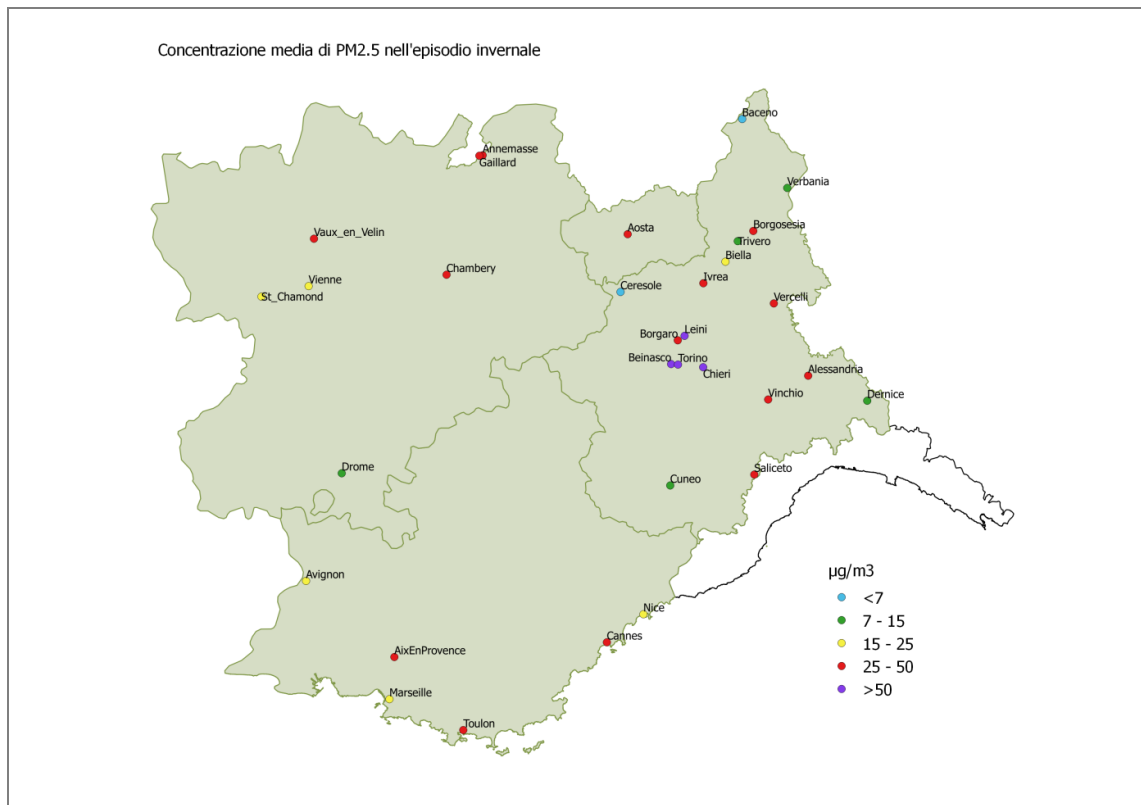


Figura 3.3.1.1.2-5: Concentrazioni medie di PM2.5 misurate durante l'episodio invernale nel territorio ALCOTRA.

3.3.1.2 Analisi dei dati di speciazione

3.3.1.2.1 Localizzazione dei siti di misura

Sono stati presi in considerazione i dati di speciazione del particolato PM10 disponibili nelle quattro regioni del territorio ALCOTRA oggetto dello studio. A tale scopo sono stati utilizzati i risultati delle campagne di monitoraggio svolte nell'ambito del progetto INTERREG ALCOTRA "PARTAERA", svolte durante il periodo luglio 2013 - agosto 2014, e i risultati di campagne di monitoraggio e speciazione chimica effettuate in diversi siti della regione Valle d'Aosta e nella città di Lione.

Nella tabella seguente si riporta l'elenco delle stazioni di misura considerate e le loro caratteristiche.

Tabella 3.3.1.2.1-1 : Elenco delle stazioni di misura considerate per i dati di speciazione

	Nazione regione	Indirizzo	Quota (m)	Tipo stazione	Tipo zona	Emissioni principali
Marnaz	Francia RA	Marnaz, Rue du Vieux Port	501	Fondo	Suburbana	Riscaldamento
Aix Ecole d'Art	Francia PACA	Aix-En-Provence, Rue Emile Tavan	188	Fondo	Urbana	Riscaldamento, traffico
Torino Rubino	Italia Piemonte	Torino, Parco Rubino	257	Fondo	Urbana	Riscaldamento, traffico
Lyon centre	Francia RA	Lyon, Rue du lac	160	Fondo	Urbana	Riscaldamento, traffico
Aosta Via I Maggio	Italia VDA	Aosta, Via I Maggio	566	Industriale	Suburbana	Riscaldamento, traffico, industriali
Donnas	Italia VDA	Donnas, loc. Montey	341	Fondo	Rurale	Riscaldamento, agricoltura
Lillianes	Italia VDA	Lillianes, loc. Fey	650	Fondo	Rurale	Riscaldamento

Nel progetto PARTAERA ogni partner aveva scelto una stazione per la quale il monitoraggio avesse significato ai fini di una migliore comprensione di fenomeni ricorrenti in alcune aree specifiche del territorio.

Nella regione PACA (Provence-Alpes-Côte d'Azur), le aree urbanizzate con una struttura industrializzata significativa rilevano problemi connessi al particolato atmosferico; tra queste è stata scelta come campione significativo Aix-en-Provence, situata in una delle zone maggiormente industrializzate della Regione vicino a Marsiglia.

Nella regione Piemonte è stato invece deciso di monitorare le zone urbane densamente popolate. Per tale motivo è stato scelto il sito di Torino Rubino, una stazione di fondo urbano, installata all'interno di un parco urbano in una zona periferica di tipo residenziale, nella quale vi sono alcune importati vie di scorrimento urbano, a circa 1 km dallo stabilimento industriale FIAT. Più in generale il sito è collocato nella città capoluogo dell'Agglomerato di Torino che presenta criticità rilevanti per quanto riguarda l'inquinamento da particolato ed è considerata come "zona di risanamento".

Nella regione Rhône-Alpes, molte valli alpine sono problematiche dal punto di vista della qualità dell'aria, soprattutto nel periodo invernale, a causa delle dinamiche di dispersione locali e della concentrazione delle emissioni nelle zone di fondovalle (industriali, da traffico, da riscaldamento – soprattutto se alimentato a combustibile legnoso). Un sito rappresentativo di questa realtà è Marnaz, una tipica cittadina di un fondovalle mediamente urbanizzato (5000 abitanti); il sito scelto per le misure è una stazione di fondo suburbano, in cui le emissioni preponderanti sono quelle da riscaldamento e da traffico. La città di Marnaz si trova nella valle dell'Arve, zona sottoposta a un Piano di Protezione dell'Atmosfera (PPA).

Nella regione Rhône-Alpes sono stati analizzati anche i dati relativi alla stazione Lyon centre di cui sono disponibili i dati delle misure di speciazione effettuate nell'inverno 2013.

Nella regione Valle d'Aosta sono state considerate le stazioni per le quali, nei due periodi di studio scelti (estate 2013 e inverno 2013), erano disponibili dati di speciazione sul particolato PM10.

La stazione di Aosta Via I Maggio è un sito di tipo industriale situato in prossimità di una acciaieria (produzione di acciai speciali) presente nella città di Aosta, che è l'area del territorio regionale con maggiore presenza e densità di sorgenti di emissioni inquinanti in atmosfera (traffico, riscaldamento, industria). La stazione di Donnass è invece una stazione rurale, situata in una zona di fondovalle percorsa dalle principali vie di traffico al confine con il Piemonte: le principali emissioni di inquinanti derivano da traffico, riscaldamento, attività agricole e si ipotizza la presenza di un contributo proveniente dal confinante territorio piemontese. Il sito di Lillianes è stato invece scelto per ottenere informazioni sulla qualità dell'aria in un piccolo borgo montano di circa 400 abitanti in una valle laterale, in cui le emissioni derivano principalmente dagli impianti di riscaldamento; il sito è d'interesse per valutare eventuali fenomeni di trasporto di sostanze inquinanti provenienti da altre zone, principalmente dalla valle centrale.

3.3.1.2.2 Dettaglio delle specie indagate

Il particolato atmosferico è formato da diverse specie chimiche, le cui proporzioni variano a seconda del sito e della stagione. Alcune specie sono caratteristiche di sorgenti d'emissione specifiche (ad esempio NaCl per l'aerosol marino, levoglucosano per la combustione della biomassa): la conoscenza della composizione del particolato è dunque importante per l'individuazione delle sorgenti.

Il 70% - 80% del particolato è in generale composto dalle specie ioniche e da quelle carboniose.

Le specie ioniche sono:

- Nitrati (NO_3^-)

Si formano per ossidazione di NO_2 , NO , N_2O e NO_3 , emessi in forma gassosa soprattutto da sorgenti antropiche, quali i processi di combustione. Vengono generati sia nella chimica diurna, in competizione con i processi di formazione dell'ozono, sia nella chimica notturna, via radicale nitrico. Sono tra i più importanti componenti secondari del $\text{PM}_{2.5}$.

- Solfati (SO_4^{2-})

I solfati si formano per ossidazione dell' SO_2 in forma gassosa, emesso in quantità elevate sia da fonti naturali, quali i vulcani, i mari e gli oceani, sia come inquinante prodotto da processi di combustione di carbone, dalla raffinazione e dalla combustione del petrolio e dei suoi derivati, dalle centrali termoelettriche e dalle fonderie; nell'aria viene poi ossidato ad acido solforico, H_2SO_4 , e solfati in un periodo variabile da ore a giorni.

- Ammonio (NH_4^+)

Deriva per lo più dalla salificazione dell'ammoniaca biogenica con acido solforico e nitrico, ma può essere dovuto anche all'uso di fertilizzanti a base di ammonio e a sorgenti industriali.

Le specie carboniose sono:

- Carbonio elementare (EC)

Costituisce la frazione di particolato carbonioso resistente all'ossidazione ad una temperatura al di sotto dei $400\text{ }^\circ\text{C}$. Viene anche definito Black Carbon, in base alle sue proprietà ottiche: possiede infatti una colorazione nera ed ha un forte potere assorbente della luce. E' costituito da particelle carboniose di origine primaria con struttura grafitica esagonale. Oltre al carbonio elementare in senso stretto, comprende di norma organici non volatili ad alto peso molecolare e di colore nero tipo catrame, sostanze biogeniche e coke. Le particelle, generate durante l'incompleta combustione di fossili e carburanti, tendono ad agglomerarsi in catene che possono a loro volta adsorbire altre specie. Le particelle carboniose rivestite superficialmente da sostanze organiche semivolatili prendono il nome di soot. Le fonti principali sono le combustioni sia fisse (centrali termoelettriche, industrie, riscaldamento) che mobili (traffico). Carbone, legna e motori diesel danno, a parità di combustibile bruciato, le emissioni maggiori.

- Carbonio organico (OC o ORGC)

Si tratta della frazione carboniosa dell'aerosol organico presente e rappresenta circa il 60-80% del carbonio presente ed è costituito da una miscela di idrocarburi e da composti ossigenati, quali ad esempio gli IPA e le diossine. L'aerosol organico ha sia un'origine primaria che secondaria; nel primo caso viene formato durante i processi di combustione ed emesso principalmente come particelle sub-microniche; nel secondo caso può avere origine dalla condensazione di composti organici volatili o da contributi secondari da reazioni di precursori in atmosfera. In particolare, si identificano tre meccanismi di formazione di particolato organico fine secondario: condensazione di prodotti finali di reazioni di ossidazioni fotochimiche, adsorbimento di organici, tipicamente gli

idrocarburi policiclici aromatici, su particelle solide e dissoluzione di gas solubili in grado di reagire nelle particelle.

- Levoglucosano (1,6-anidro-β-D-glucopiranosio)

Si tratta di uno zucchero anidro che deriva dalla pirolisi della cellulosa ed è pertanto utilizzato come marker specifico dei processi di combustione della biomassa. La sua incidenza percentuale sul PM10 è comunque molto inferiore a quella dei componenti sopra illustrati.

Il levoglucosano si trova esclusivamente nel particolato fine e presenta una buona stabilità fotochimica in atmosfera e in fase liquida.

La sua concentrazione misurata in aree diverse è molto variabile e ciò è dovuto alle differenze nel tipo di legna utilizzata, ai diversi tipi di impianti di combustione e alla diversa natura del particolato stesso campionato in aria ambiente.

3.3.1.2.3 Analisi dei risultati

I risultati delle misure di speciazione sul particolato sono presentati di seguito utilizzando dei grafici a torta in corrispondenza dei punti di misura riportati sulla mappa. Le percentuali sono state calcolate rispetto al valore medio del periodo considerato.

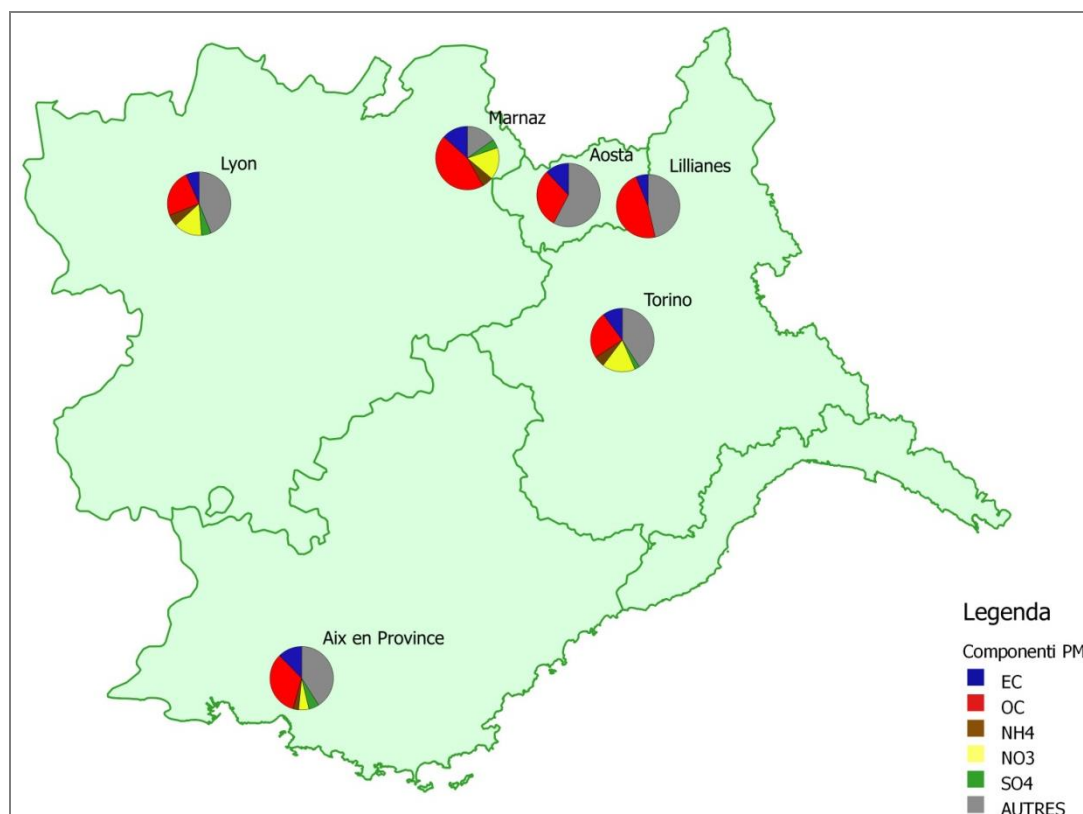


Figura 3.3.1.2.3-1: Composizione percentuale media del particolato PM10 nell'episodio invernale sulla base delle misure

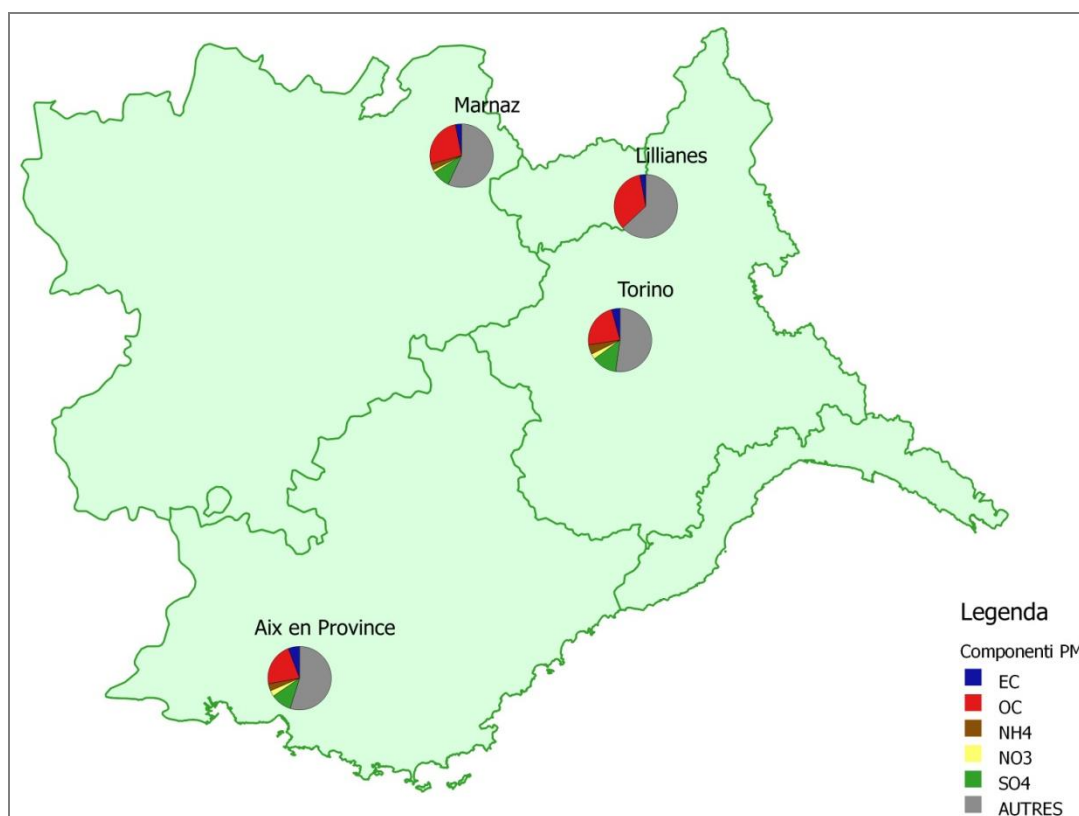


Figura 3.3.1.2.3-2: Composizione percentuale media del particolato PM10 nell'episodio estivo sulla base delle misure

Si evidenziano valori decisamente più elevati per il periodo invernale per i nitrati, probabilmente a causa delle maggiori concentrazioni di NOx, attribuibili soprattutto al riscaldamento domestico.

Le altre specie ioniche (NH₄, SO₄) mostrano invece valori più bassi nel periodo invernale, probabilmente perché i processi secondari di ossidazione sono potenzialmente minori in inverno a causa della diminuzione dell'intensità della radiazione solare e delle temperature rispetto al periodo estivo.

I valori massimi delle specie carboniose (in particolare la sua frazione organica) nel periodo invernale possono essere spiegati, in parte, con il consumo importante di biomassa (soprattutto legnosa) e di combustibili fossili per il riscaldamento delle abitazioni. Tale contributo nelle vallate alpine (si vedano i valori rilevati nei siti di Marnaz e Lillianes) può arrivare a rappresentare più del 50% della massa totale del particolato. Tali risultati sono confermati anche dalle indicazioni che è possibile ricavare dalle determinazioni di levoglucosano sul particolato atmosferico. Come detto in precedenza, il levoglucosano viene utilizzato come tracciante specifico della combustione della biomassa, essendo un prodotto della pirolisi della cellulosa. I dati di concentrazione di levoglucosano rilevati nei siti delle campagne di misura permettono il calcolo della quota della componente organica derivante dalla combustione della biomassa legnosa, in base ad un fattore di emissione di levoglucosano medio (in tale lavoro si è scelto il valore di 10,7 (Schmidl C., et al, 2008

[⁷⁴]). Tale contributo, rapportato alle concentrazioni medie rilevate nei due episodi indagati (Figura 3.3.1.2.3-3), conferma che il contributo della combustione della biomassa in inverno è particolarmente elevato e nelle vallate alpine raggiunge valori significativi (superiori al 70%); nelle vallate alpine tale contributo non è trascurabile nemmeno nel periodo estivo ed è probabilmente dovuto alle pratiche di abbruciamento dei residui vegetali, prassi consolidata in tali territori.

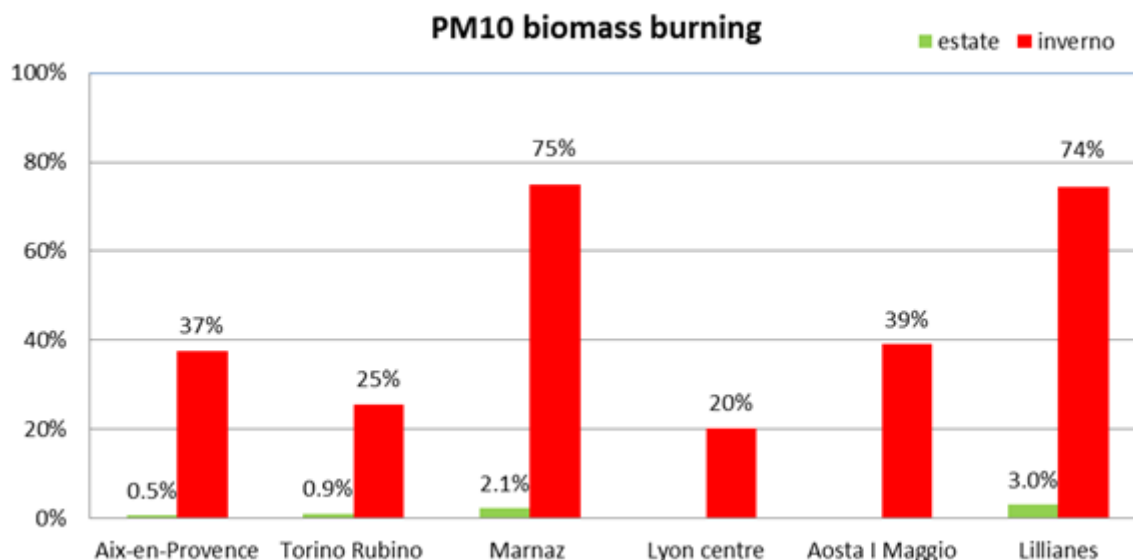


Figura 3.3.1.2.3-3: Contributo medio della combustione della biomassa al PM10 totale nei periodi estivo ed invernale

3.3.2 Calcolo dei campi meteorologici

Tutti i modelli numerici di chimica e trasporto, compresi i modelli CAMx e FARM come descritto nel capitolo 3.1, richiedono la disponibilità in ingresso dei campi tridimensionali delle principali variabili termiche e dinamiche dell'atmosfera, nonché dei parametri di scala della turbolenza. Nell'ambito delle attività progettuali è stato implementato il modello WRF (Weather Research and Forecasting model, [⁷⁵]) con il quale sono state condotte le simulazioni meteorologiche sull'area di studio per i periodi di interesse. I risultati ottenuti per le principali variabili meteorologiche (vento e temperatura) sono stati poi confrontati con le osservazioni (al suolo ed in quota) disponibili sul territorio ALCOTRA al fine di valutare la qualità delle simulazioni effettuate.

3.3.2.1 Il modello WRF: presentazione generale.

WRF è un sistema di simulazione atmosferica creato per la ricerca e la previsione meteorologica. Il modello, tra i più avanzati attualmente esistenti, è nato dalla collaborazione tra alcuni dei principali centri di ricerca internazionali nell'ambito della fisica dell'atmosfera (tra questi il National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, il National Centers for Environmental Prediction NCEP, ed

⁷⁴ Schmidl C., et al, (2008). Chemical characterisation of fine particle emissions from wood stove combustion of common woods growing in mid-European Alpine regions. Atmospheric Environment, Vol. 42, 126-141.

⁷⁵ Weather Research and Forecasting model: <http://www.wrf-model.org/index.php>

il National Center for Atmospheric Research, NCAR) e, essendo open-source, è stato sviluppato nel corso degli anni grazie all'apporto di una vasta e valida comunità scientifica. WRF è un modello totalmente compressibile e non-idrostatico che può lavorare su una vasta gamma di applicazioni a diversa scala, dalla scala sinottica (su uno spazio di migliaia di chilometri) fino alla scala locale (su uno spazio di pochi chilometri o poche centinaia di metri). I dati necessari al funzionamento di WRF sono essenzialmente costituiti dai dati fisiografici del territorio di studio (orografia, uso del suolo, parametri del terreno, etc) e dai dati meteorologici tridimensionali ai bordi del dominio di simulazione. WRF è un modello efficiente per il calcolo parallelo, potendo utilizzare la parallelizzazione a memoria distribuita (paradigma MPI), a memoria condivisa (paradigma OpenMP), o entrambe (parallelizzazione ibrida) e può quindi essere utilizzato ed installato su sistemi di calcolo ad alte prestazioni (sistemi HPC, High Parallel Computing).

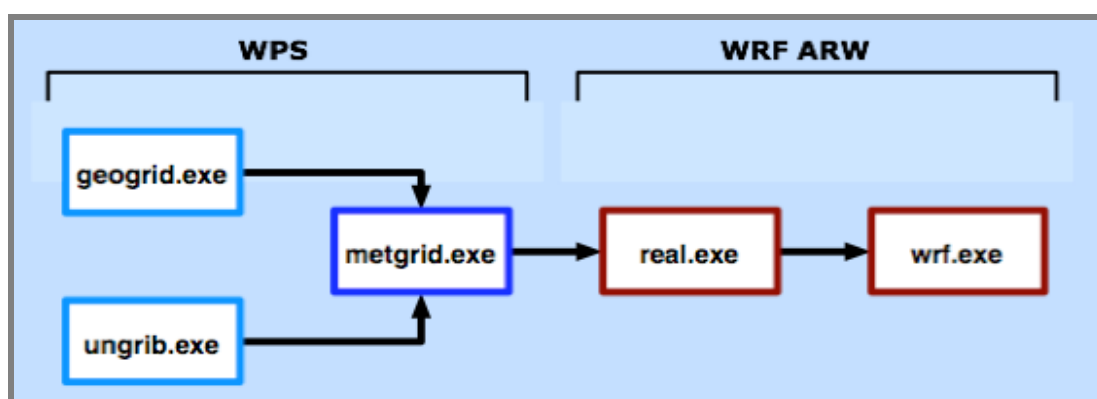


Figura 3.3.2.1-1 : Schematizzazione del sistema di calcolo di WRF, con indicati i differenti moduli che lo costituiscono.

Il sistema di simulazione di WRF, schematizzato in figura 3.3.2.1-1, si compone di due moduli principali: un modulo di pre-processing (WRF Preprocessing System, WPS), che prepara i dati di ingresso necessari alla simulazione, e dal modello WRF ARW (Advanced Research WRF) che effettua propriamente la simulazione meteorologica. Il pre-processor WPS è a sua volta costituito da tre distinti moduli:

- *geogrid*, che definisce il dominio di simulazione ed il sistema di griglie (numero di griglie, proiezione, numero di punti, risoluzione della cella) che si vuole adottare, interpolando su queste le basi dei dati fisiografici statici (ossia invariati nel periodo di simulazione);
- *ungrib*, che elabora i campi meteorologici provenienti da modelli ad area globale, necessari per la costruzione delle condizioni al contorno;
- *metgrid*, che interpola orizzontalmente i campi meteorologici estratti da ungrib sulle griglie definite da geogrid.

Il modello WRF-ARW è composto invece da:

- *real*, modulo che effettua l'interpolazione verticale dei campi meteorologici sui livelli del modello e crea le condizioni iniziali e al contorno sulle griglie di simulazione (solitamente la griglia più esterna);
- *wrf*, il cuore del sistema che effettua la simulazione meteorologica.

WRF può lavorare contemporaneamente con più griglie a differente risoluzione, utilizzando un sistema di innesti in cui la griglia meno risolta (dominio «genitore») contiene la/le griglia/e di dettaglio (dominio/i «figlio/i») con due differenti modalità: *one-way nesting*, in cui lo scambio di informazioni avviene tra il dominio genitore e il dominio figlio in maniera univoca, ossia dalla griglia meno risolta a quella più risolta, e il *two-way nesting*, in cui lo scambio di informazioni è biunivoco, ossia il dominio genitore fornisce le condizioni al contorno al dominio figlio ma è allo stesso tempo influenzato dal dominio figlio mediante un'azione detta feedback.

I parametri in ingresso ai moduli di WPS, che definiscono i domini di simulazione, le griglie e la proiezione di riferimento, sono specificati in un file di configurazione (*namelist.wps*), mentre quelli legati alla metodologia di interpolazione ed alla decodifica dei campi meteorologici delle condizioni al contorno sono forniti mediante opportune tabelle. Tutti i parametri necessari al funzionamento di *real/wrf* (in particolare le opzioni di fisica/dinamica/microfisica, il periodo di simulazione, le modalità di integrazione, etc) sono definiti in un apposito file di configurazione (*namelist.input*).

3.3.2.2 Principali parametrizzazioni e configurazioni utilizzate.

Nell'ambito delle attività progettuali è stata utilizzata la versione 3.5 di WRF e sono state sviluppate le apposite procedure (in linguaggio python) atte alla gestione dei dati, all'esecuzione ed al controllo delle simulazioni; tutte le simulazioni sono state realizzate in modalità parallela su un cluster di calcolo HPC (High Performance Computing) presso il centro di supercalcolo CINECA ^[76]; si è utilizzato il MPI con quattro nodi di calcolo con otto processori ciascuno, per un totale di 32 processori.

Le simulazioni sono state condotte sui domini descritti in dettaglio nel successivo paragrafo 3.3.2.2.1 per tutto il periodo di studio, con risoluzione temporale oraria, organizzate su base giornaliera per limitare la dimensione dei files di output (1 file giornaliero con 25 ore di simulazione, dalle 00 UTC - Coordinated Universal Time - del giorno fino alle 00 UTC del giorno successivo). Per garantire la continuità delle simulazioni, ciascun giorno è stato inizializzato con l'ultima ora del giorno precedente e, per evitare fenomeni di instabilità all'inizio di ognuno dei due periodi di simulazione, è stato adottato un tempo di rilassamento iniziale di 6 giorni (ovvero le simulazioni partono dalle 00 UTC del 14 novembre 2013 per il periodo invernale ed dalle 00 UTC del 16 luglio 2013 per il periodo estivo).

Sono stati utilizzati come dati di ingresso al sistema WRF:

- le basi dei dati fisiografici e geografici integrate nella distribuzione del modulo WPS alla risoluzione di 30" (circa 1 chilometro);

76 Consorzio INtEruniversitario per il Calcolo Automatico, <http://www.cineca.it/en>

- i campi meteorologici tridimensionali di analisi prodotti a scala continentale dal modello IFS (Integrated Forecasting System) di ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecast) [77] con le caratteristiche descritte in dettaglio nella successiva tabella 3.3.2.2-1

Tabella 3.3.2.2-1 : Caratteristiche principali dei dati IFS utilizzati come condizioni iniziali ed al contorno a WRF.

Dominio :	Continentale, da [-15°,30°] a [35°,60°]
Risoluzione orizzontale :	0.25°
Griglia verticale :	In pressione, 22 livelli da 1000hPa fino a 2hPa
Variabili :	Tutte le variabili richieste da WRF, comprese temperatura del mare , umidità e temperatura del suolo
Risoluzione temporale:	Analisi esaorarie alla 00,06,12,18 UTC

3.3.2.2.1 Descrizione dei domini

Le simulazioni sono state condotte su due domini innestati, un dominio più esterno a scala continentale e bassa risoluzione ed e un dominio interno più risoluto che contiene completamente il territorio ALCOTRA, come mostrato in figura 3.3.2.2.1-1. I domini adottano entrambi la proiezione *Lambert Conformal Conic*, sono collegati tra loro in modalità two-way nesting, ed hanno un rapporto di raffinamento tra “genitore” e “figlio” pari a tre. La griglia verticale è descritta in coordinate di massa, dette anche coordinate eta, che seguono il terreno e sono definite in funzione della pressione idrostatica: sono stati adottati 37 livelli verticali eta, infittendo i livelli inizialmente previsti dal modello negli strati più prossimi al suolo ai fini di ottenere una migliore descrizione dei bassi strati atmosferici, quelli che maggiormente influenzano la dispersione degli inquinanti (Bacer, 2012 [78]).

77 <http://www.ecmwf.int/en/research/modelling-and-prediction>

78 Bacer S., Studio dello strato limite atmosferico tramite simulazioni numeriche ad alta risoluzione, *Tesi di Laurea Università degli Studi di Trieste*, 2012.

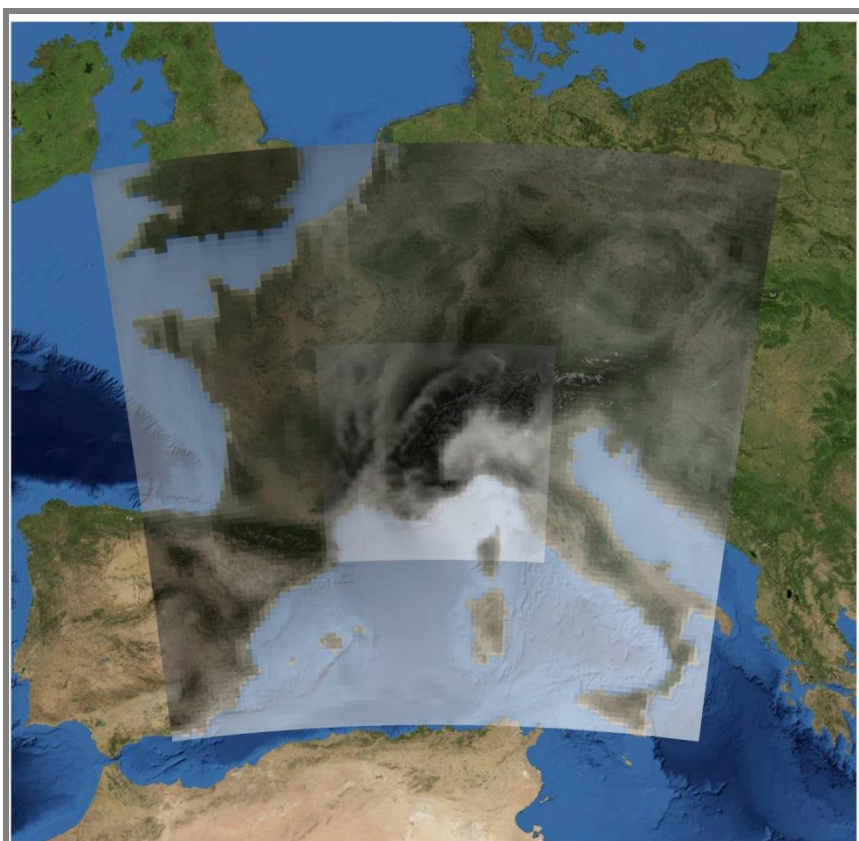


Figura 3.3.2.2.1-1: domini di simulazione di WRF: d1, dominio continentale europeo, d2 dominio ALCOTRA.

Nella successiva tabella 3.3.2.2.1-1 sono riportate in dettaglio tutte le caratteristiche dei domini di simulazione.

Tabella 3.3.2.2.1-1: Caratteristiche principali dei domini di simulazione.

	Dominio continentale d1	Dominio alcotra d2
Risoluzione	18 chilometri	6 chilometri
Estensione	SO~[-3.2°, 36.6°];NE~[20.4°, 52.2°]	SO~[2.8°, 41.9°]; NE~[11.7°, 47.9°]
Numero di punti	NX=104 ; NY=100	NX=118;NY=112
Posizione reciproca dei domini	1start=1;jstart=1	istart=32;jstart=33
Numero livelli verticali :	37	37
Livelli eta :	1,0.998,0.996,0.993,0.990,0.987,0.984,0.980,0.975,0.970,0.954,0.934,0.909,0.880,0.836,0.792,0.748,0.704,0.627,0.557,0.493,0.434,0.380,0.331,0.287,0.247,0.210,0.177,0.148,0.121,0.097,0.076,0.057,0.039,0.0249,0.011,0	
Proiezione	+proj=lcc +lat_1=45 +lat_2=45 +lat_0=45 +lon_0=7 +x_0=0 +y_0=0 +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +units=m	

3.3.2.2.2 Descrizione delle namelist

Come descritto in precedenza, WRF possiede numerose opzioni di controllo dei dati di ingresso/uscita e, soprattutto, molteplici possibilità di configurazione per quanto riguarda gli schemi e le parametrizzazione della fisica e della dinamica atmosferica. A tale proposito nel SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

progetto SHAIR sono state adottate le configurazioni più adatte alle dimensioni ed alle caratteristiche del dominio di studio, sia seguendo quanto consigliato dal manuale utente [79], sia soprattutto sulla base dell'esperienza maturata dai partner che avevano avuto modo di utilizzare WRF per precedenti proprie applicazioni locali. Nella successiva tabella 3.3.2.2-1 sono sinteticamente descritte, come specificate nel file di controllo *namelist.input*, alcune delle principali variabili di configurazione adottate.

Tabella 3.3.2.2-1: Valore e significato delle principali variabili di controllo configurabili nel file *namelist.input*. Si rimanda alla User Guide del modello WRF per una esaustiva spiegazione del loro significato.

Sezione time_controls	
interval_seconds=21600	Risoluzione temporale (secondi) dei dati a scala continentale di ECMWF
input_from_file=.true.	Condizioni iniziali sul dominio figlio prodotte dal dominio padre
restart=.true.	Opzione di restart, ogni simulazione è inizializzata con la precedente
restart_interval=1440	Intervallo tra due restart successivi (in minuti, 1 giorno)
Sezione domains (oltre a quanto riportato in tabella 3.3.2.2.1-1)	
time_step=72	Passo temporale di integrazione
feedback=1	Simulazioni in two-way nesting
smooth_option=1	Attivazione procedura di smooth nel nesting per il dominio padre
Sezione physics	
mp_physics=2	Schema di Lin et al. per la microfisica
ra_lw_physics=1;	Schema Rapid Radiative Transfer Model per la radiazione ad onda lunga
ra_sw_physics=1	Schema Dudhia per la radiazione ad onda corta
swint_opt=1	interpolazione della radiazione ad onda corta attiva
radt=9	Intervallo (minuti) tra le chiamate di fisica alla radiazione
sf_sfclay_physics=1	Schema rivisto MM5/Monin-Obukhov per il surface layer
sf_surface_physics=2	Modello unificato land-surface di Noah
sf_urban_physics=1	Schema single-layer per la canopy urbana
bl_pbl_physics=1;	Schema YSU per il boundary layer
topo_wind=0	Metodo di Jimenez per correzione vento su superficie topografica
cu_physics=3	schema Grell-Freitas nell'opzione di parametrizzazione dei cumuli
ishallow=1	convezione superficiale attiva
isfflx=1	calcolo dei flussi di calore latente e sensibile dalla superficie
sst_update=1	utilizzo di SST, ghiaccio del mare, frazione della vegetazione e albedo variabili nel tempo
Sezione dynamics	
rk_order=3	schema di integrazione temporale Runge-Kutta al 3° ordine
km_opt=4	Chiusura al primo ordine di Smagorinsky per la diffusività orizzontale
non_hydrostatic=true	opzione per modello non idrostatico attiva

3.3.2.3 Confronti con le osservazioni

I campi meteorologici prodotti da WRF sono stati confrontati con un insieme di osservazioni selezionate tra quelle disponibili in ciascuna delle quattro regioni del territorio ALCOTRA. L'attività di confronto non aveva la pretesa di validare il modello (scopo esulante dalle attività progettuali), ma bensì di fornire una valutazione della qualità delle simulazioni nell'ottica della dispersione degli inquinanti atmosferici. Pertanto sono stati analizzati e confrontati i valori di temperatura, velocità e

79 National Center for Atmospheric Research, WRF/ARW Version 3 Modeling System, *User's Guide*, 2015

direzione del vento e (in alcuni casi) precipitazione calcolati dal modello sul dominio ALCOTRA con i valori misurati presso le stazioni meteorologiche al suolo; è stato inoltre effettuato (solo in pianura padana) il confronto tra i profili verticali di temperatura. Nel seguito vengono descritti i risultati ottenuti per le differenti regioni.

3.3.2.3.1 Confronto dai dati meteorologici simulati-osservati in PACA

Dall'insieme delle stazioni di osservazione della rete nazionale di Météo-France nella regione PACA, sono state selezionate 3 stazioni per valutare la qualità delle simulazioni effettuate con WRF. Queste stazioni rientrano nella classificazione delle stazioni sinottiche e consentono di rappresentare diversi ambienti caratteristici della regione PACA. La loro posizione è rappresentata nella figura 3.3.2.3.1-1. La stazione di Marignane si trova a Nord-Ovest di Marsiglia ed è sottoposta regolarmente all'influenza del Mistral, un vento da Nord intenso incanalato tra il Massiccio Centrale e le Alpi, che formano la Valle del Rodano. La stazione di Nizza si trova sul litorale della Costa Azzurra ed è influenzata dalla circolazione di brezza terra-mare. Infine, la stazione di Embrun si trova nel Nord della regione PACA ed è rappresentativa delle condizioni climatiche delle zone montuose della regione. I grafici di confronto sono forniti come Allegato E a questo rapporto per ognuno dei periodi di simulazione.

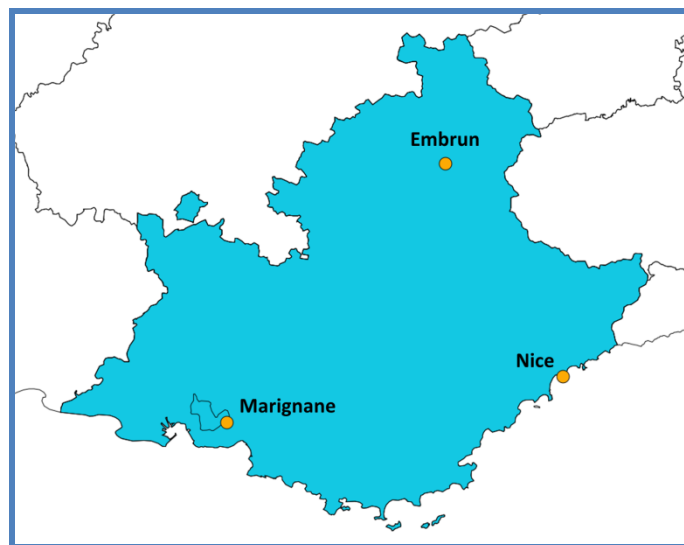


Figura 3.3.2.3.1-1 : Localizzazione delle stazioni Météo-France utilizzate per il confronto misure-modelli nella regione PACA.

I principali episodi di precipitazione sono riprodotti dal modello ma i totali cumulati sono generalmente sottostimati. Questa tendenza si osserva in entrambi i periodi di simulazione.

I campi di temperatura media sono ben riprodotti sulle diverse stazioni ma gli estremi difficilmente vengono raggiunti. In effetti, i massimi durante il periodo estivo sono sotto-stimati diveramente dal periodo invernale in cui le minime sono sovrastimate. Questo fatto è già stato osservato in diversi studi che hanno utilizzato WRF.

I campi di vento, che determinano la parte di trasporto e dispersione dei modelli CTM, sembrano essere sovrastimati, soprattutto nelle situazioni di calma. Anche se le principali direzioni del vento SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

sembrano essere correttamente identificate dal modello, appaiono delle differenze significative sulle direzioni secondarie. Quest'ultima osservazione però non può prescindere dal fatto che la risoluzione spaziale del modello (36km²) non permette di riprodurre i fenomeni alle scale spaziali inferiori.

3.3.2.3.2 Confronto dai dati meteorologici misurati-osservati in Piemonte e Valle d'Aosta.

I confronti sono stati effettuati su una selezione delle stazioni più rappresentative della rete meteoidrografica di ARPA Piemonte, rete utilizzata operativamente ai fini della previsione e prevenzione del rischio idro-geologico e meteorologico. In figura 3.3.2.3.2.-1 è mostrata la localizzazione delle stazioni utilizzate: in tutto 71 tra Piemonte e Valle d'Aosta in prevalenza collocate in zone pianeggianti ,collinari o fondovalle.

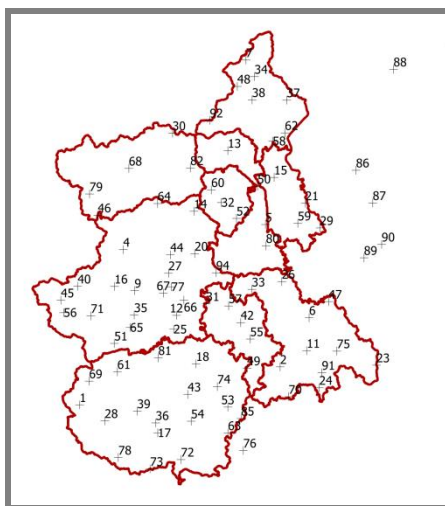


Figura 3.3.2.3.2-1: distribuzione spaziale dei punti di misura utilizzati nel confronto; si noti che sono state utilizzate anche alcune stazioni fuori dal territorio Alcotra, in Lombardia.

L'analisi è stata effettuata per ciascuno dei due periodi di simulazione, sia calcolando su ogni stazione i principali indicatori statistici di prestazione (descritti in dettaglio nel paragrafo 3.3.3 e riassunti in tabella 3.3.2.3.2-1), sia mediante confronto tra le serie storiche e rose del vento. Tutte le elaborazioni sono state realizzate con il software OpenAir [⁸⁰]

80 Carslaw, D. C. and K. Ropkins, (2012) openair --- an R package for air quality data analysis. Environmental Modelling & Software. Volume 27-28, 52-61

Tabella 3.3.2.3.2-1 : Indicatori statistici di prestazione utilizzati per il confronto osservato simulato. Gli stessi indicatori sono descritti in dettaglio nel paragrafo 3.3

Indice	Descrizione
MB	Mean Bias : differenza tra il valore medio dei dati simulati ed osservati ; indicatore della tendenza alla sovrastima o sottostima (valore ottimale 0)
NMB	Normalised Mean Bias: MB normalizzato rispetto alla concentrazione media osservata (valore ottimale 0)
RMSE	Root mean square error : stima della differenze tra valori simulati ed osservati (valore ottimale 0)
R	Pearson correlation coefficient : esprime il grado di correlazione linerare tra i dati simulati ed osservati (valore ottimale 1)
FAC2	<i>fraction of prediction within a factor of two</i> : indica la frazione dei dati in cui il rapporto tra valore simulato e valore misurato è compresa tra [0,5, 2]; varia tra il valore 0, se nessun dato rientra nell'intervallo, e 1 se tutti i dati sono nell'intervallo.

In figura 3.3.2.3.2-2 ed in figura 3.3.2.3.2-3 sono mostrate le distribuzioni degli indicatori statistici rispettivamente per temperatura e velocità del vento al suolo. La temperatura è ottimamente riprodotta nell'episodio estivo (FAC2=1, NMB≈0, r≈0.9) e piuttosto ben riprodotta nell'episodio invernale (FAC2≈4, NMB≈0, r≈0.75), mentre per la velocità del vento l'accordo tra osservato è simulato è meno soddisfacente e non si evidenziano differenze significative tra i due episodi.

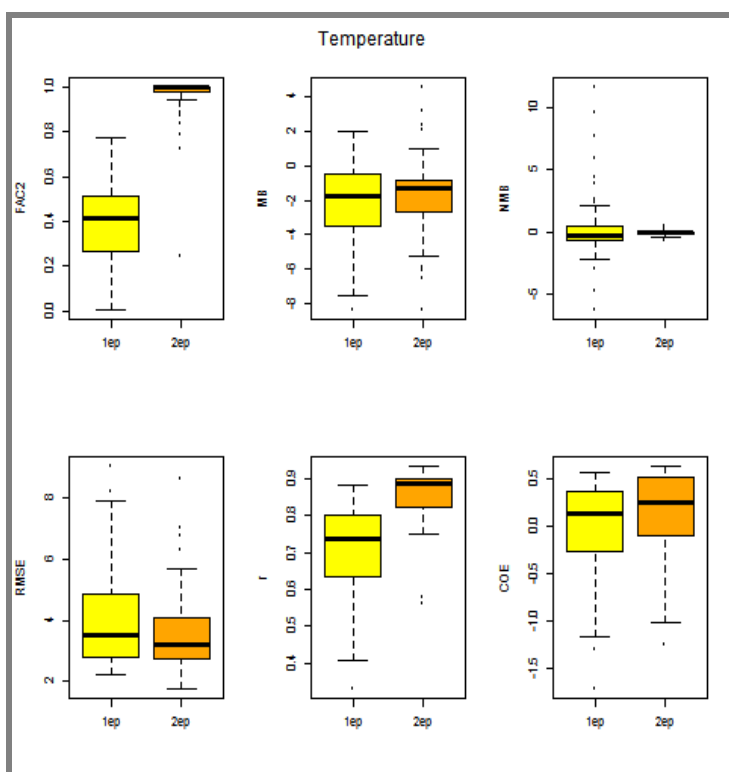


Figura 3.3.2.3.2-2: boxplot delle distribuzioni degli indici statistici per la temperatura al suolo. Con 1ep si indica il periodo invernale di simulazione (in giallo), con 2ep quello estivo (arancione).

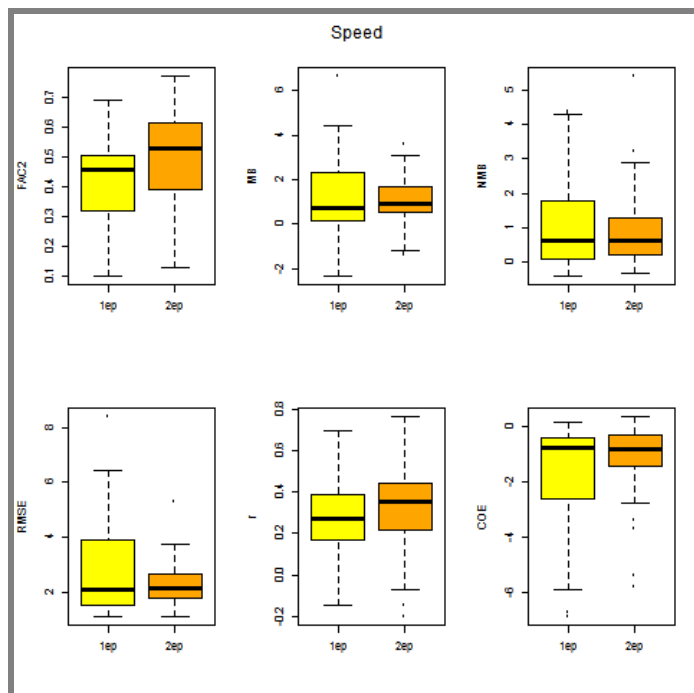


Figura 3.3.2.3.2-3: boxplot delle distribuzioni degli indici statistici per la velocità del vento al suolo. Con 1ep si indica il periodo invernale di simulazione (in giallo), con 2ep quello estivo (in arancione).

Il confronto tra le serie storiche della temperatura mostra un ottimo accordo tra osservato e simulato per il periodo estivo sulla quasi totalità delle stazioni; per il periodo invernale l'andamento temporale è ben riprodotto nelle stazioni di collina e pianura, mentre si osservano maggiori differenze per le stazioni in alta montagna. Nella riproduzione del ciclo giornaliero si nota inoltre una generale tendenza alla sottostima dei valori più alti ed alla sovrastima di quelli più bassi. Nelle successive figure si riportano, a titolo di esempio, alcuni risultati relativi alla stazione di Carmagnola, stazione di pianura (232 m s.l.m) non distante da Torino e alla stazione di Colle della Lombarda, stazione di montagna (2305 m) al confine tra Italia e Francia.

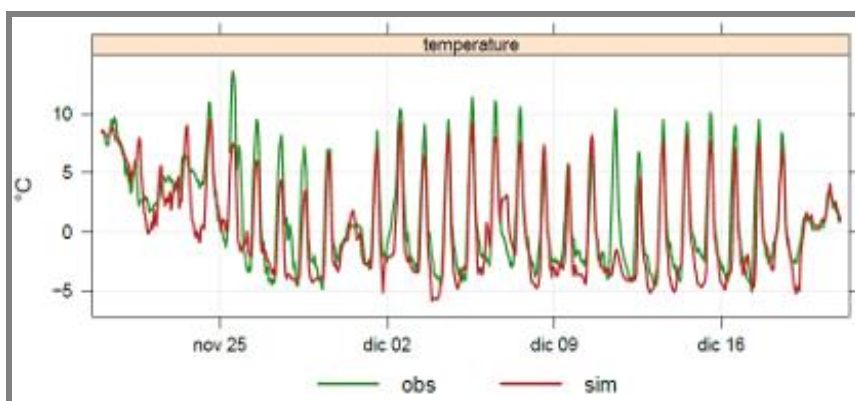


Figura 3.3.2.3.2-4: confronto fra la serie storica simulata (in rosso) ed osservata (in verde) per il periodo invernale nelle stazione di Carmagnola.

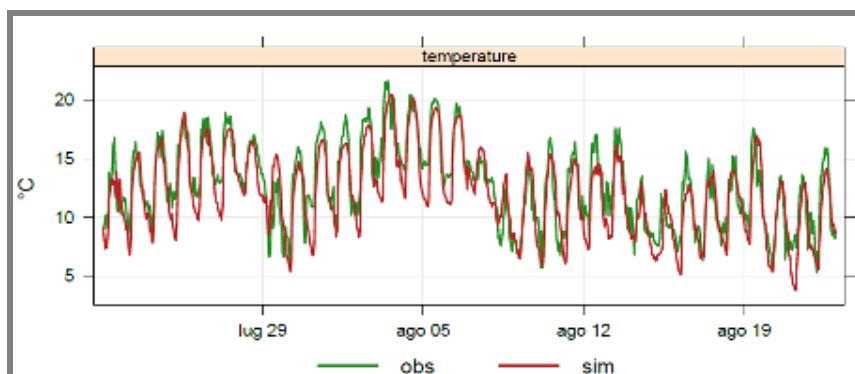


Figura 3.3.2.3.2-5: confronto fra la serie storica simulata (in rosso) ed osservata (in verde) per il periodo estivo nelle stazioni di Col della Lombarda.

Per quanto riguarda la velocità e la direzione del vento (figura 3.3.2.3.2-6), non si osservano differenze sostanziali tra i due periodi di simulazione ma emerge una chiara tendenza alla sovrastima della velocità, specie nelle stazioni di pianura. E' importante osservare come questo sia un comportamento tipico dei modelli meteorologici ad area limitata non idrostatici (come WRF). La direzione principale è generalmente ben riprodotta, tranne per alcune stazioni collocate in piccole valli alpine o appenniniche, mentre sono meno ben riprodotte le direzioni secondarie. Questo risultato, come già sottolineato nel precedente paragrafo relativo alla regione PACA, è imputabile alla risoluzione adottata nelle simulazioni (sei chilometri), non sufficiente a riprodurre le dinamiche tipiche dei territori ad orografia complessa.

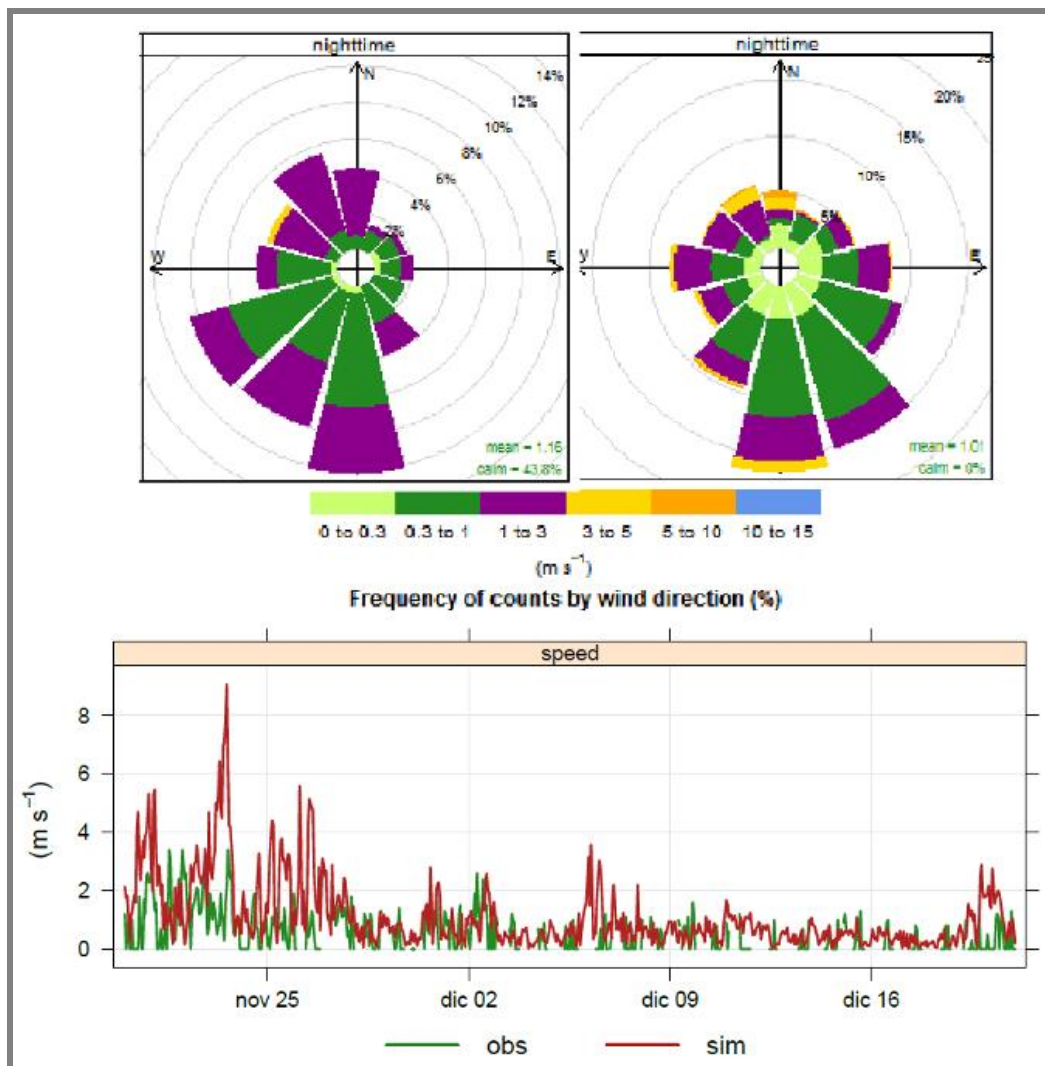


Figura 3.3.2.3.2-6: velocità e direzione del vento nella stazione di Carmagnola per il periodo invernale. In basso confronto osservato/simulato tra gli andamenti delle velocità del vento, in alto tra le rose del vento notturne.

3.3.2.3.3 Confronto fra i profili verticali di temperatura simulati ed osservati.

I profili verticali di temperatura simulati da WRF sono stati confrontati con le misure ottenute dai radiosondaggi verticali con palloni sonda effettuati presso l'aeroporto di Cuneo Levaldigi (in Piemonte, tra le città di Torino e Cuneo) e l'aeroporto di Milano Linate (nei pressi della città di Milano), due volte al giorno, alle 00 ed alle 12 UTC. Quest'ultimo, pur essendo ai bordi del dominio ALCOTRA, è rappresentativo delle condizioni di tutta la pianura piemontese. L'analisi svolta mostra come il modello riproduca molto bene i profili verticali di temperatura, specie nei bassi strati atmosferici, anche in presenza di condizioni di inversione termica.

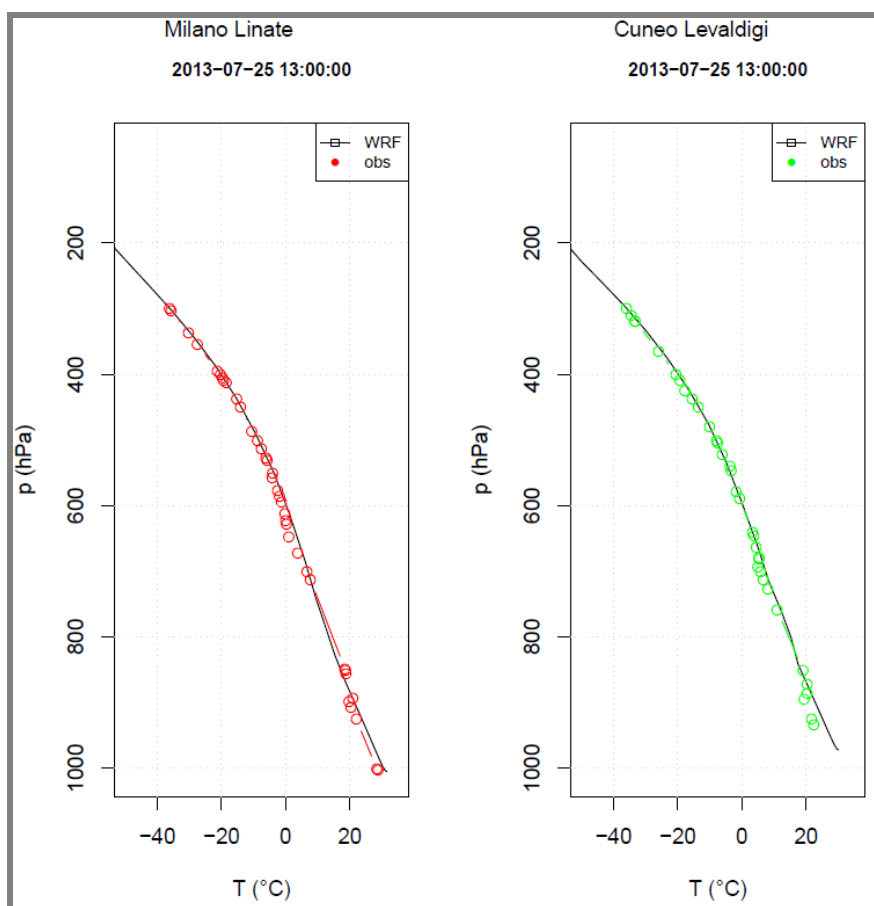


Figura 3.3.2.3.3-1: esempio di confronto tra i profili verticali di temperatura simulati (linea continua) ed osservati (in pallini verdi per il radiosondaggio di Cuneo, rossi per quello di Milano) alle 12 UTC del 25 luglio 2013 (periodo estivo).

3.3.3 Analisi dei campi di concentrazione calcolati con i modelli

In questo paragrafo sono presentati i risultati delle simulazioni effettuate utilizzando mappe di concentrazione, indici statistici, grafici e confronti puntuali con i valori misurati in alcune stazioni.

Gli indici statistici maggiormente utilizzati per la validazione dei modelli sono⁸¹:

- FAC2 (fraction of predictions within a factor of two): rappresenta la frazione dei valori calcolati dal modello per i quali $0.5 \leq \frac{M_i}{O_i} \leq 2$; se il modello fosse perfetto FAC2=1;
- MB (Mean Bias): fornisce una buona indicazione della sovrastima o della sottostima del modello e si calcola come $MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)$;
- NMB (Normalised Mean Bias): è sostanzialmente il MB diviso per la concentrazione misurata $NMB = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i}$ ed è utile per confrontare inquinanti con diversi livelli di concentrazione;

⁸¹ M_i : modeled, valori calcolati dal modello – O_i : observed, valori misurati
SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

- RMSE (Root Mean Squared Error): è una misura dell'errore medio pesata con il quadrato dell'errore e fornisce una indicazione sulla grandezza (più si avvicina a 0, migliore è il modello) $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{N}}$;
- r (correlation coefficient): $r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{M_i - \bar{M}}{\sigma_M} \right) \left(\frac{O_i - \bar{O}}{\sigma_O} \right)$ è una misura della linearità della relazione tra due variabili (per $r = \pm 1$ la correlazione è lineare, per $r = 0$ non c'è correlazione tra le variabili).

Nello specifico, questi indici sono stati calcolati, per ogni modello, prima sull'insieme di tutte le stazioni e poi separando le stazioni per regione geografica.

La correlazione tra due variabili può essere analizzata anche utilizzando lo scatter plot, un grafico in cui i dati sono visualizzati come un insieme di punti le cui coordinate sono definite dalle due variabili (una riportata sull'asse orizzontale e l'altra sull'asse verticale). Nei grafici utilizzati in questo rapporto, allo scatter plot sono state aggiunte tre rette: la linea continua rappresenta la relazione 1:1 tra le due variabili, mentre le linee tratteggiate le relazioni 1:0.5 e 1:2. Queste linee consentono di visualizzare quanto un gruppo di punti si avvicina alla relazione 1:1 e anche quanti punti rientrano nell'insieme FAC2.

3.3.3.1 I risultati delle simulazioni effettuate con FARM

3.3.3.1.1 PM10

Nelle figure seguenti vi sono le mappe delle concentrazioni medie di PM10 risultanti dalle simulazioni effettuate con il modello FARM nei due periodi. Appare evidente come nell'episodio estivo i valori sono decisamente bassi, mentre nell'episodio invernale i livelli più elevati sono stati misurati nella zona pianeggiante del Piemonte, nell'area intorno alla città di Lione e nella zona di Marsiglia.

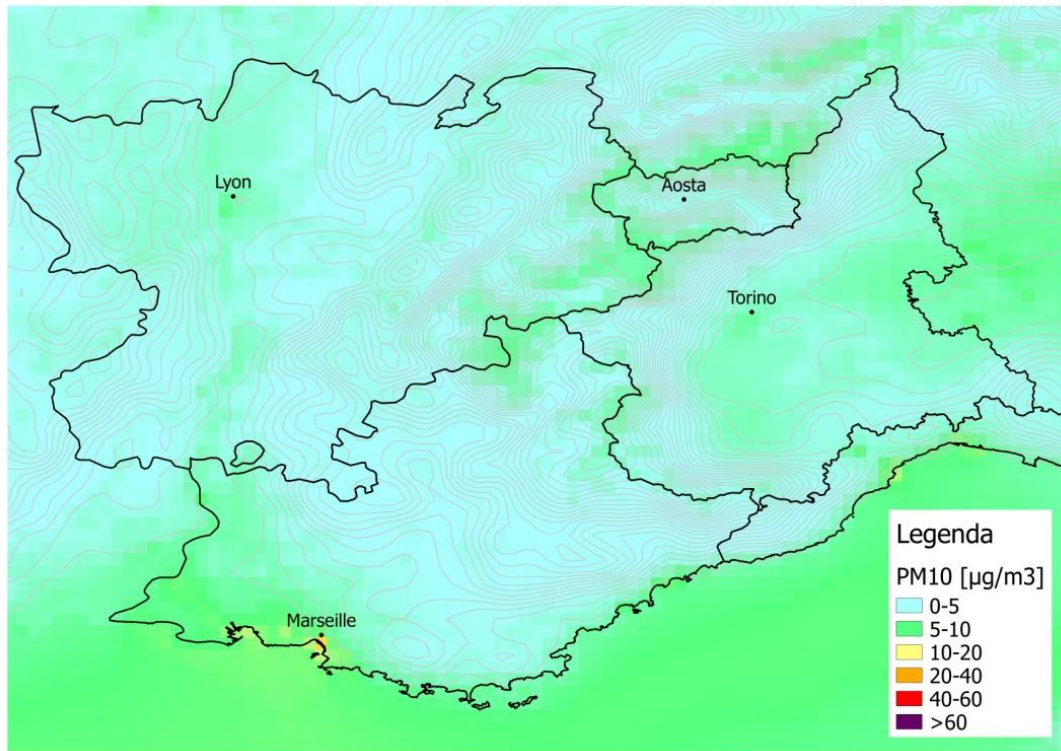


Figura 3.3.3.1.1-1: Concentrazioni medie di PM10 simulate con FARM - episodio estivo.

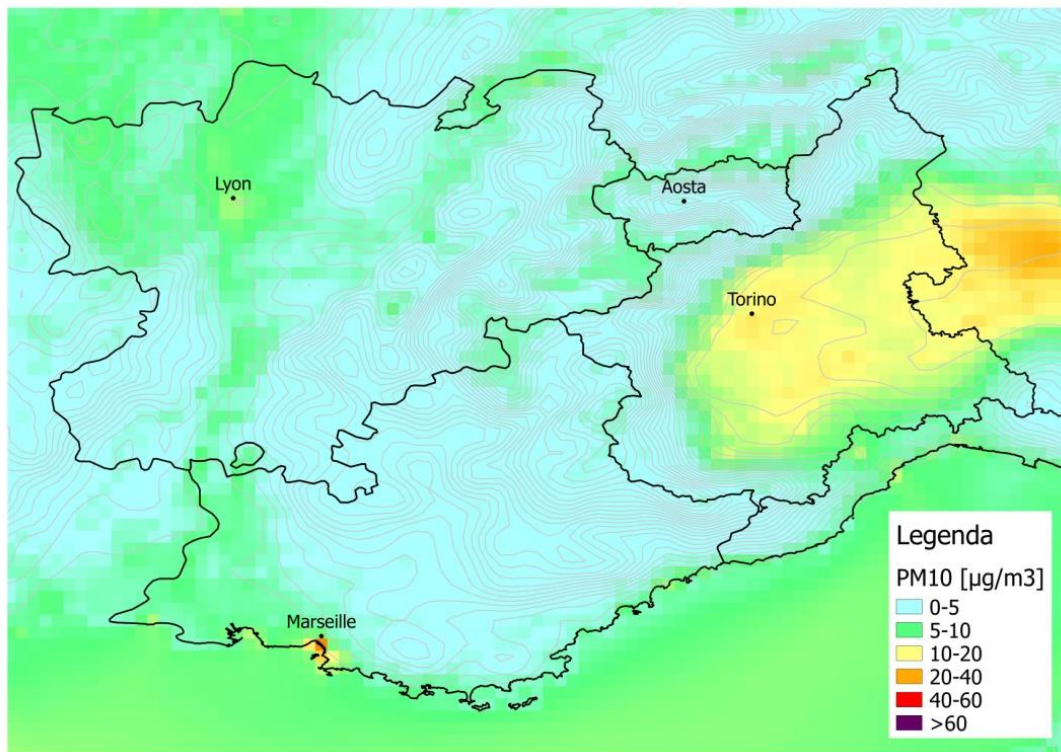


Figura 3.3.3.1.1-2: Concentrazioni medie di PM10 simulate con FARM - episodio invernale.

Nella tabella seguente sono riportati i valori dei principali indici statistici calcolati considerando tutte le stazioni di cui erano disponibili i dati delle misure. Gli indici MB e NMB negativi indicano la sottostima del modello; il valore del coefficiente di correlazione r su tutta la zona ALCOTRA e su PACA e Piemonte è accettabile, mentre è molto basso su RA e VDA; nell'episodio invernale i valori dell'errore quadratico medio sono sempre più elevati, quasi il doppio rispetto al caso estivo.

Tabella 3.3.3.1.1-1 : Indici statistici per il modello FARM – PM10

PM10 - FARM		FAC2	MB	NMB	RMSE	r
zona ALCOTRA	estate	0.3	-11.5	-0.6	13.7	0.6
	inverno	0.3	-23.3	-0.7	30.8	0.6
regione Provence-Alpes-Côte d'Azur	estate	0.2	-16.5	-0.6	17.8	0.6
	inverno	0.2	-21.7	-0.7	26.9	0.4
regione Piemonte	estate	0.3	-10.0	-0.6	12.4	0.5
	inverno	0.4	-22.8	-0.6	32.0	0.7
regione Rhône-Alpes	estate	0.2	-9.9	-0.6	11.7	0.3
	inverno	0.2	-24.2	-0.7	31.6	0.3
regione Valle d'Aosta	estate	0.3	-9.8	-0.6	12.1	0.5
	inverno	0.0	-28.1	-0.9	33.2	0.0

Lo scatter plot costruito con le concentrazioni medie di PM10 calcolate con FARM e misurate conferma la sottostima del modello.

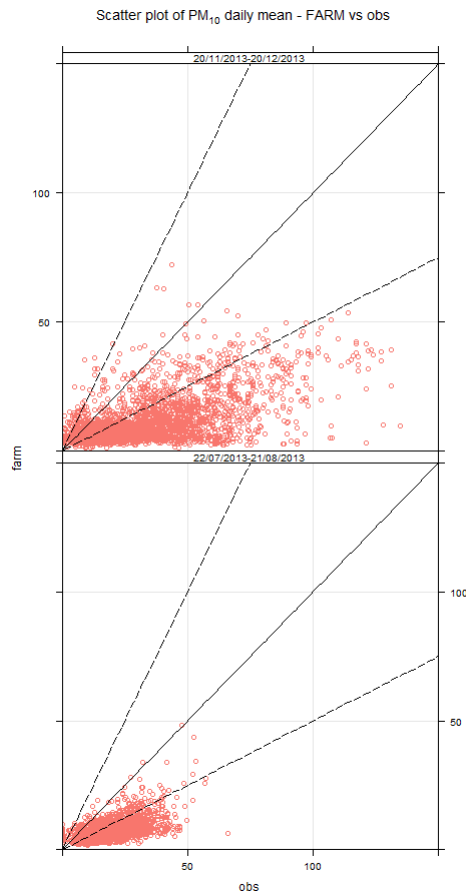


Figura 3.3.3.1.1-3: Scatter plot delle concentrazioni medie di PM₁₀ simulate con FARM rispetto a quelle misurate

3.3.3.1.2 PM_{2.5}

Nelle figure seguenti vi sono le mappe delle medie calcolate sui due periodi delle concentrazioni di PM_{2.5} risultanti dalle simulazioni effettuate con il modello FARM: la distribuzione spaziale del PM_{2.5} ricalca quella del PM₁₀, con valori generalmente bassi nel periodo estivo e valori più elevati nel periodo invernale in particolare nella zona pianeggiante del Piemonte, nell'area intorno alla città di Lione e nella zona di Marsiglia.

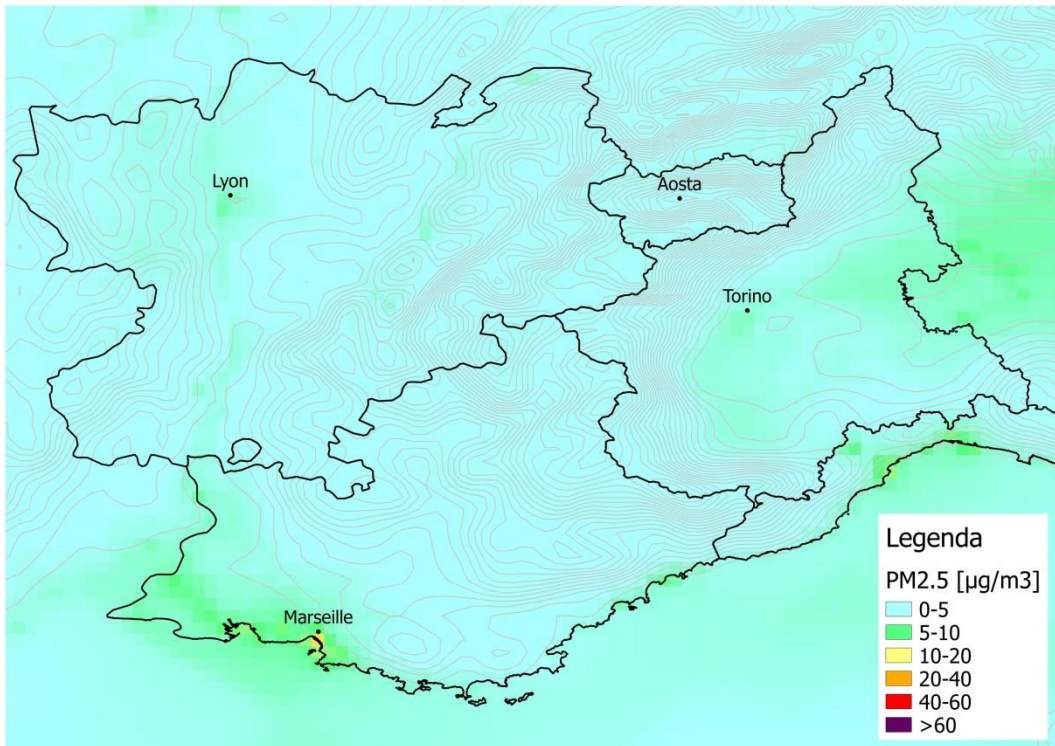


Figura 3.3.3.1.2-1: Concentrazioni medie di PM2.5 simulate con FARM - episodio estivo.

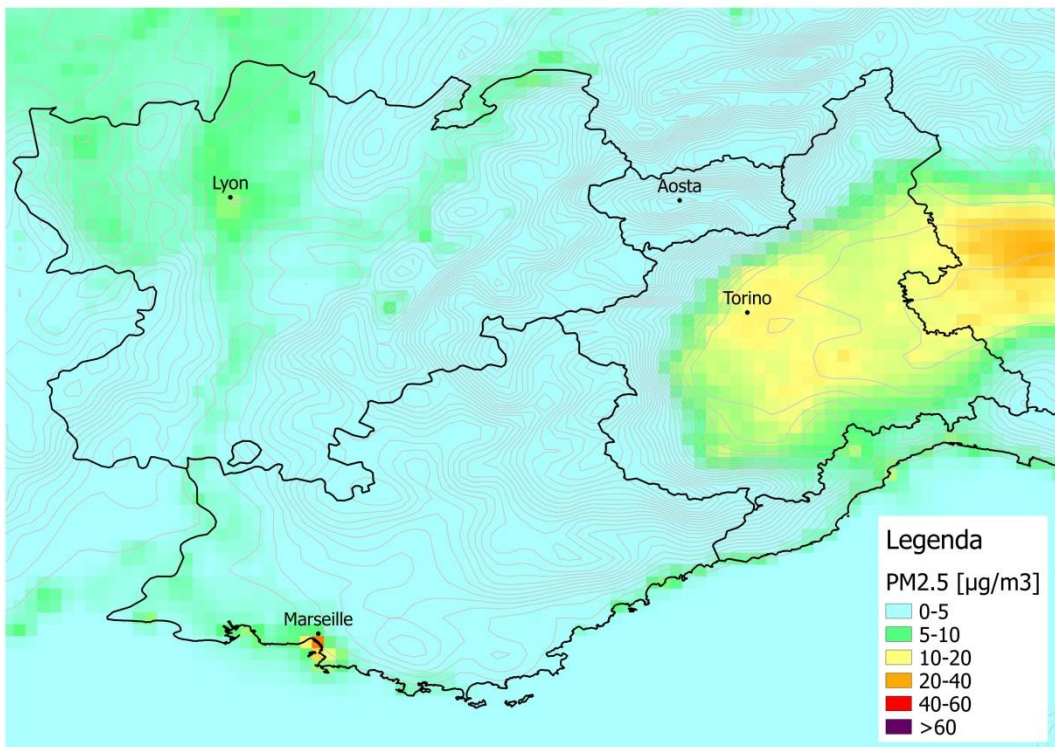


Figura 3.3.3.1.2-2: Concentrazioni medie di PM2.5 simulate con FARM - episodio invernale.

Anche nel caso delle concentrazioni di PM_{2.5}, gli indici statistici evidenziano una sottostima dei modelli, più marcata nell'episodio invernale.

Tabella 3.3.3.1.2-1 : Score per il modello FARM – PM_{2.5}

PM _{2.5} - FARM		FAC2	MB	NMB	RMSE	r
zona ALCOTRA	estate	0.6	-4.8	-0.4	6.6	0.5
	inverno	0.3	-16.4	-0.6	23.9	0.7
regione Provence-Alpes-Côte d'Azur	estate	0.6	-5.0	-0.4	6.8	0.6
	inverno	0.3	-14.8	-0.6	19.3	0.3
regione Piemonte	estate	0.6	-5.0	-0.5	6.8	0.5
	inverno	0.4	-16.2	-0.5	25.4	0.8
regione Rhône-Alpes	estate	0.7	-4.2	-0.4	5.7	0.3
	inverno	0.3	-16.9	-0.7	22.5	0.5
regione Valle d'Aosta	estate	0.6	-4.1	-0.5	5.4	0.7
	inverno	0.0	-26.2	-0.9	29.1	0.0

Lo scatter plot costruito con le concentrazioni medie di PM_{2.5} calcolate con FARM e misurate conferma la sottostima del modello.

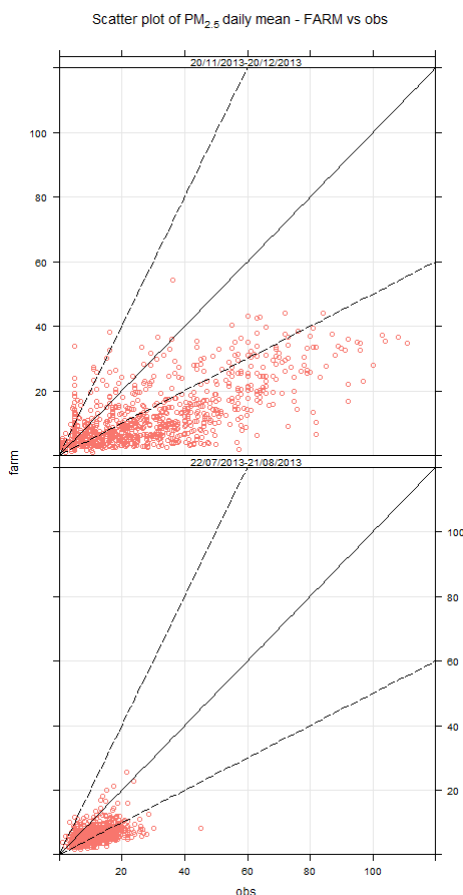


Figura 3.3.3.1.2-2: Scatter plot delle concentrazioni medie di PM_{2.5} simulate con FARM rispetto a quelle misurate

3.3.3.2 I risultati delle simulazioni effettuate con CAMx

3.3.3.2.1 PM10

Nelle figure seguenti vi sono le mappe delle medie calcolate sui due periodi delle concentrazioni di PM10 risultanti dalle simulazioni effettuate con il modello CAMx. Nel periodo estivo i valori più elevati raggiungono i $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nella zona di Torino, vicino a Lione e a Nizza, mentre nel resto del territorio i livelli sono più bassi. Nel periodo invernale il modello prevede valori di concentrazione anche elevati, superiori a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nella zona pianeggiante del Piemonte e intorno a Lione.

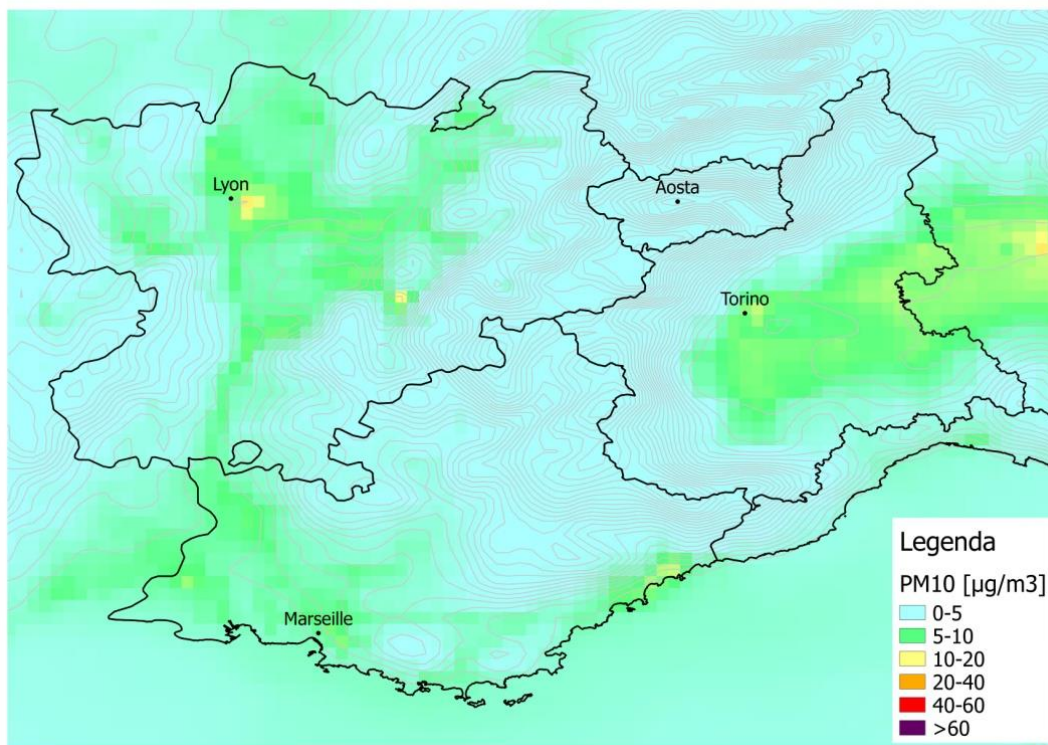


Figura 3.3.3.2.1-1: Concentrazioni medie di PM10 simulate con CAMx - episodio estivo.

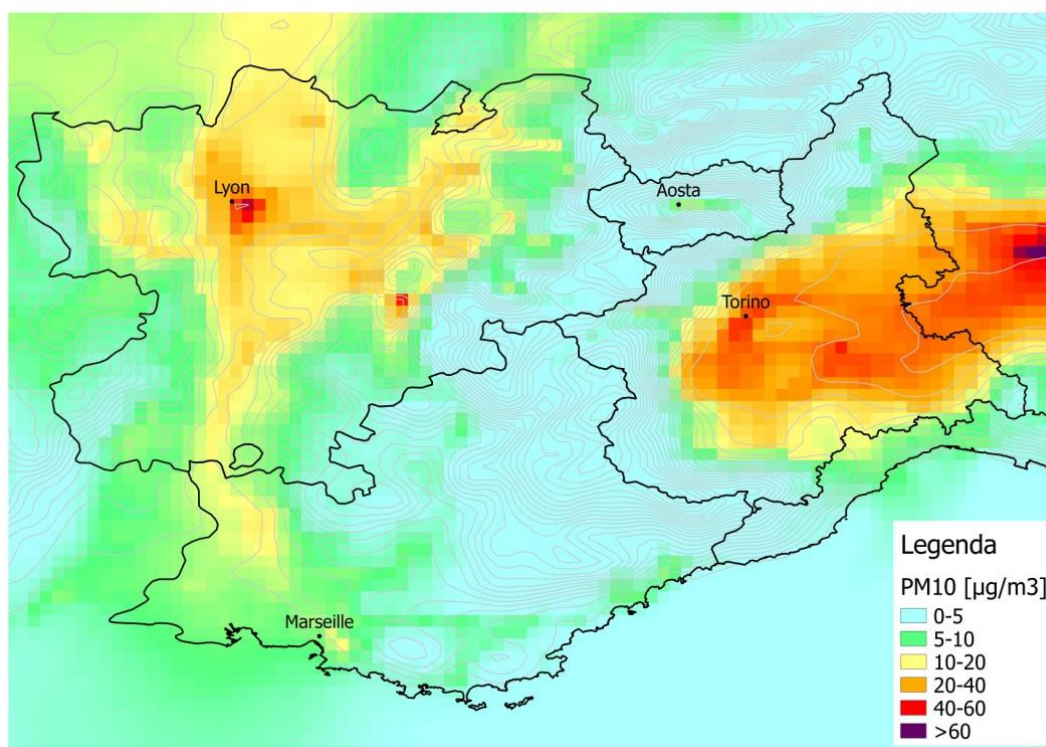


Figura 3.3.3.2.1-2: Concentrazioni medie di PM10 simulate con CAMx - episodio invernale.

Anche per il modello CAMx, dagli indici statistici si evidenzia una sottostima del modello, in particolare considerando le stazioni delle regioni PACA e Valle d'Aosta.

Tabella 3.3.3.2.1-1 : Score per il modello CAMx– PM10

PM10 - CAMx		FAC2	MB	NMB	RMSE	r
zona ALCOTRA	estate	0.4	-9.8	-0.5	13.0	0.4
	inverno	0.6	-9.7	-0.3	23.1	0.6
regione Provence-Alpes-Côte d'Azur	estate	0.2	-16.5	-0.6	18.1	0.5
	inverno	0.3	-20.8	-0.6	26.2	0.4
regione Piemonte	estate	0.5	-8.6	-0.5	11.4	0.4
	inverno	0.8	-7.9	-0.2	18.8	0.8
regione Rhône-Alpes	estate	0.6	-6.0	-0.4	9.4	0.3
	inverno	0.7	-2.1	-0.1	24.1	0.4
regione Valle d'Aosta	estate	0.1	-11.9	-0.8	14.2	0.3
	inverno	0.1	-26.2	-0.8	31.3	0.2

Lo scatter plot costruito con le concentrazioni medie di PM10 calcolate con CAMx e misurate conferma la sottostima del modello nel periodo estivo mentre nel periodo invernale i valori calcolati sono meglio riprodotti ed in alcuni casi vi è addirittura una sovrastima di CAMx.

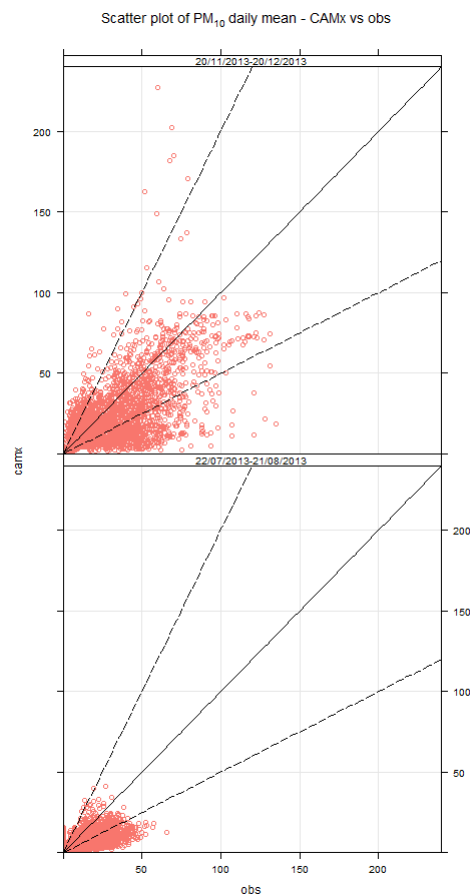


Figura 3.3.3.2.1-3: Scatter plot delle concentrazioni medie di PM10 simulate con CAMx rispetto a quelle misurate

3.3.3.2.2 PM2.5

Nelle figure seguenti vi sono le mappe delle medie calcolate sui due periodi delle concentrazioni di PM2.5 risultanti dalle simulazioni effettuate con il modello CAMx: la distribuzione spaziale del PM2.5 ricalca quella del PM10.

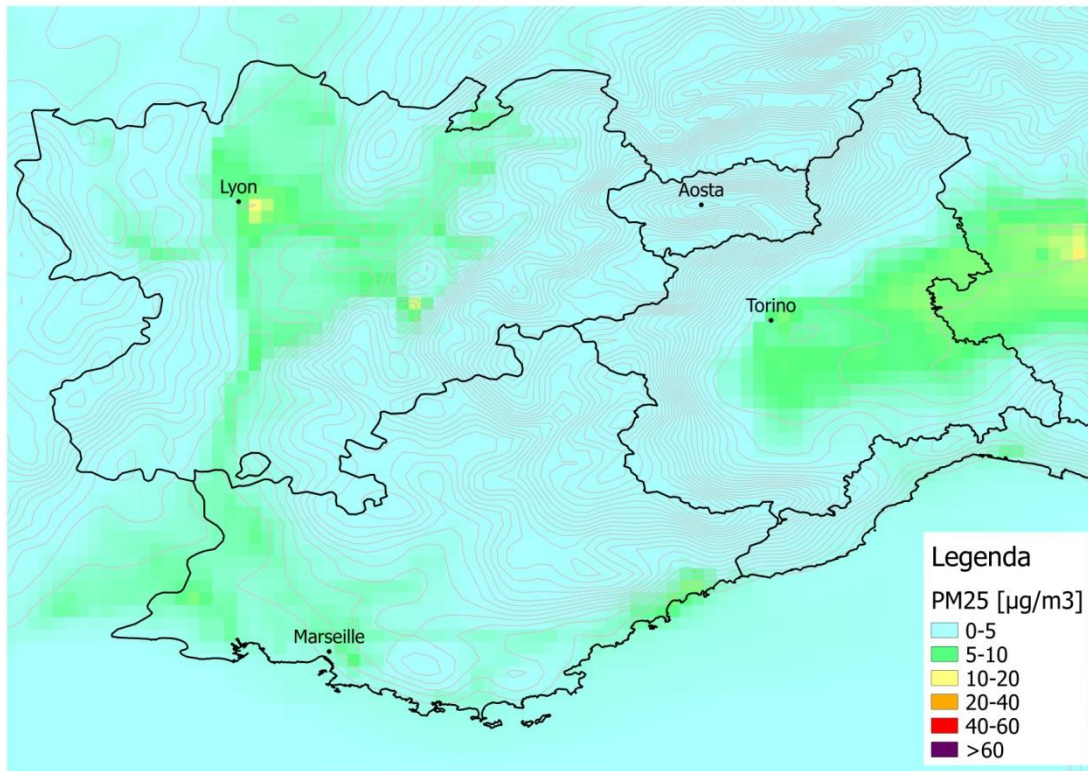


Figura 3.3.3.2.2-1: Concentrazioni medie di PM2.5 simulate con CAMx - episodio estivo.

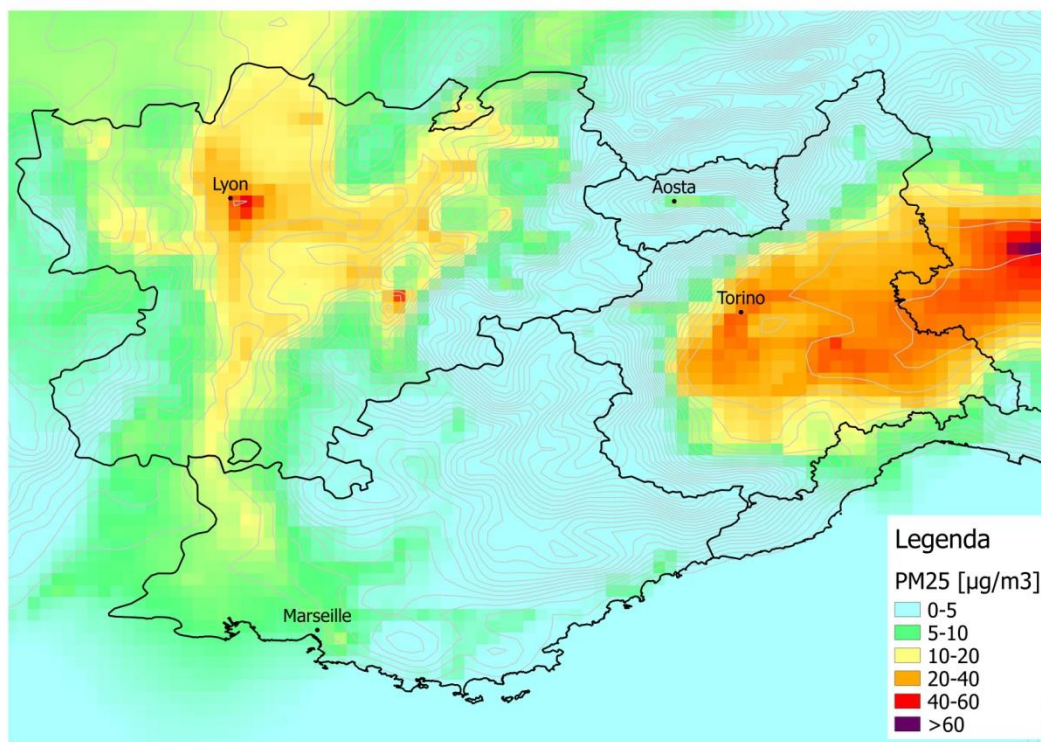


Figura 3.3.3.2.2-2: Concentrazioni medie di PM2.5 simulate con CAMx - episodio invernale.

Tabella 3.3.3.2.2-1: Score per il modello CAMx – PM2.5

PM2.5 - CAMx		FAC2	MB	NMB	RMSE	r
zona ALCOTRA	estate	0.6	-3.2	-0.3	6.3	0.3
	inverno	0.6	-4.2	-0.1	18.0	0.7
regione Provence-Alpes-Côte d'Azur	estate	0.6	-4.6	-0.4	6.3	0.6
	inverno	0.3	-13.9	-0.6	18.5	0.3
regione Piemonte	estate	0.6	-3.8	-0.4	6.3	0.4
	inverno	0.7	-3.9	-0.1	14.9	0.8
regione Rhône-Alpes	estate	0.8	0.3	0.0	6.3	0.1
	inverno	0.7	5.6	0.2	22.9	0.5
regione Valle d'Aosta	estate	0.4	-5.7	-0.6	7.1	0.5
	inverno	0.2	-21.3	-0.7	24.6	0.2

Lo scatter plot costruito con le concentrazioni medie di PM2.5 calcolate con CAMx e misurate mostrano un comportamento migliore del modello per l'episodio estivo, mentre, come per il PM10, si osservano nell'episodio invernale alcuni casi di sovrastima del modello.

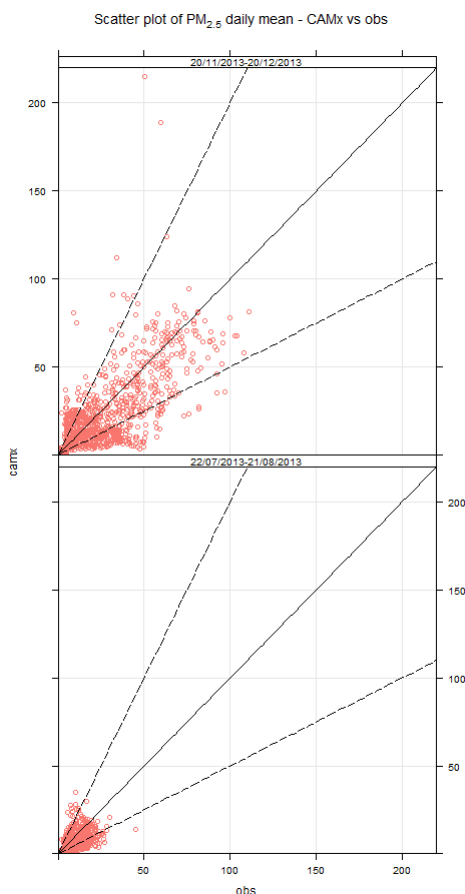


Figura 3.3.3.2.2-3: Scatter plot delle concentrazioni medie di PM2.5 simulate con CAMx rispetto a quelle misurate

3.3.3.3 Confronto dei modelli FARM e CAMx

Confrontando i risultati ottenuti con i due modelli si possono fare le seguenti osservazioni:

- gli indici statistici calcolati indicano sostanzialmente lo stesso comportamento dei due modelli sia per il PM10 sia per il PM2.5, nel senso che entrambi sottostimano le misure di particolato su tutta la zona ALCOTRA, soprattutto durante l'episodio invernale, con prestazioni "migliori" per il modello CAMx;
- dalle mappe di concentrazione si evince che entrambi i modelli stimano per il periodo invernale i livelli di PM10 e di PM2.5 più elevati nella zona pianeggiante del Piemonte e in Rhône-Alpes;
- nel periodo estivo i valori previsti da FARM sono bassi su tutto il dominio, mentre CAMx prevede valori un po' più alti sulla zona pianeggiante del Piemonte e in Rhône-Alpes;
- la distribuzione spaziale del PM10 e del PM2.5 è la stessa.

Nelle figure seguenti sono riportate le mappe costruite come media tra i campi di concentrazione calcolati con CAMx e con FARM.

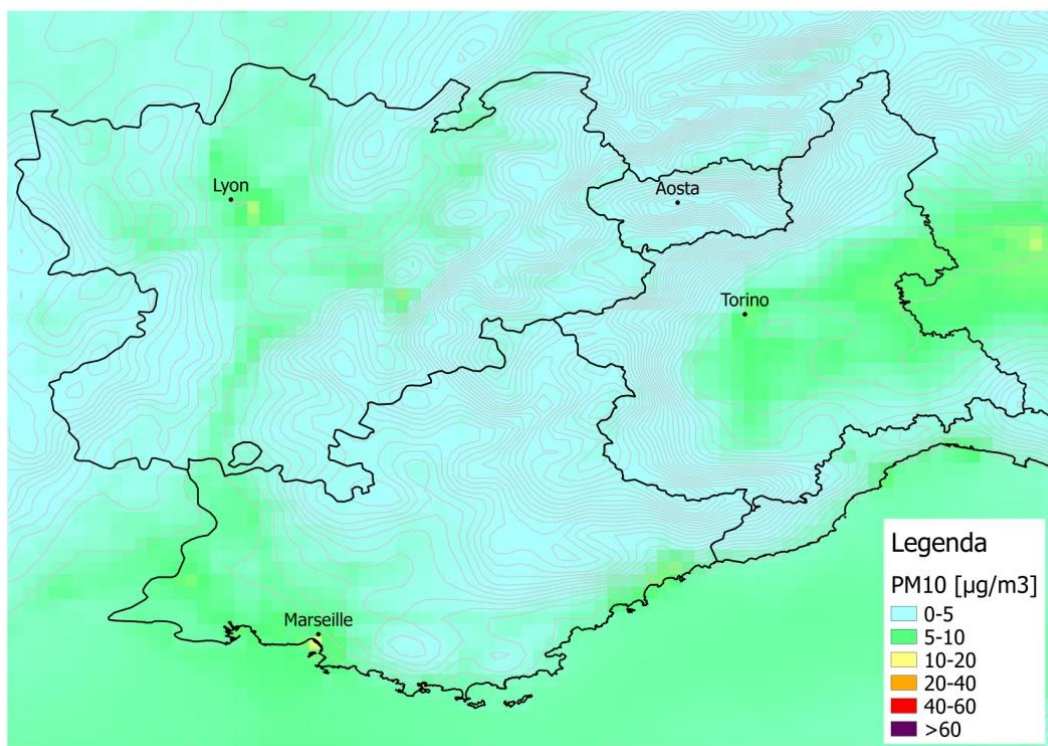


Figura 3.3.3.3-1: Media tra le concentrazioni di PM10 simulate con CAMx e quelle simulate con FARM - episodio estivo.

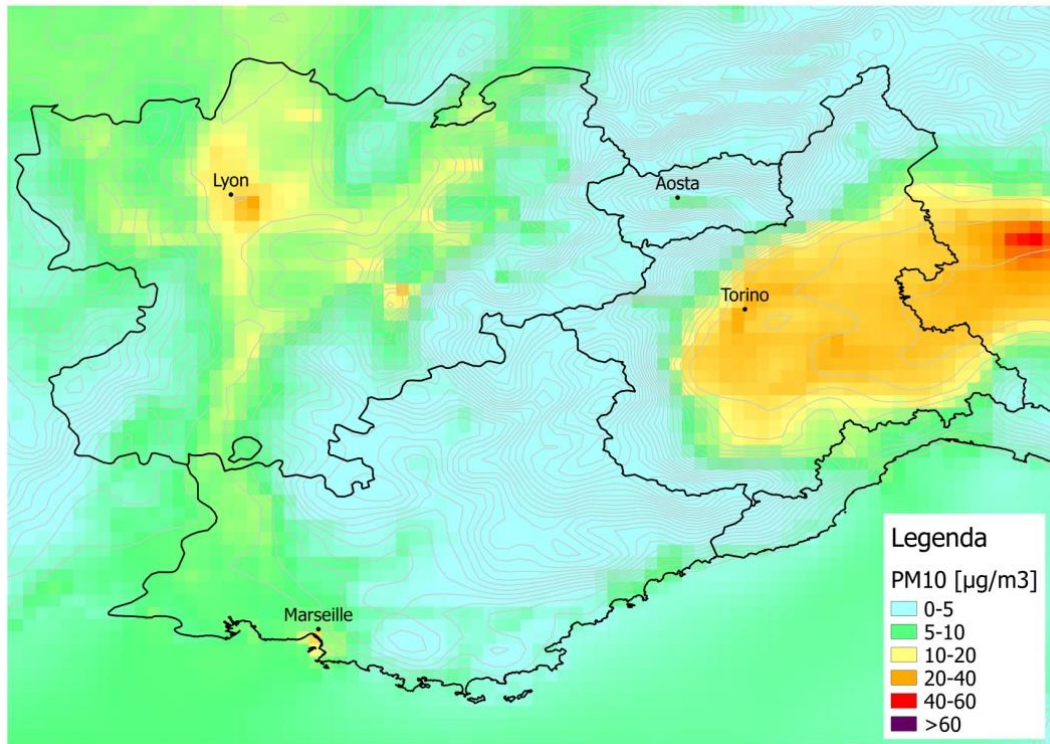


Figura 3.3.3-2: Media tra le concentrazioni di PM10 simulate con CAMx e quelle simulate con FARM - episodio invernale.

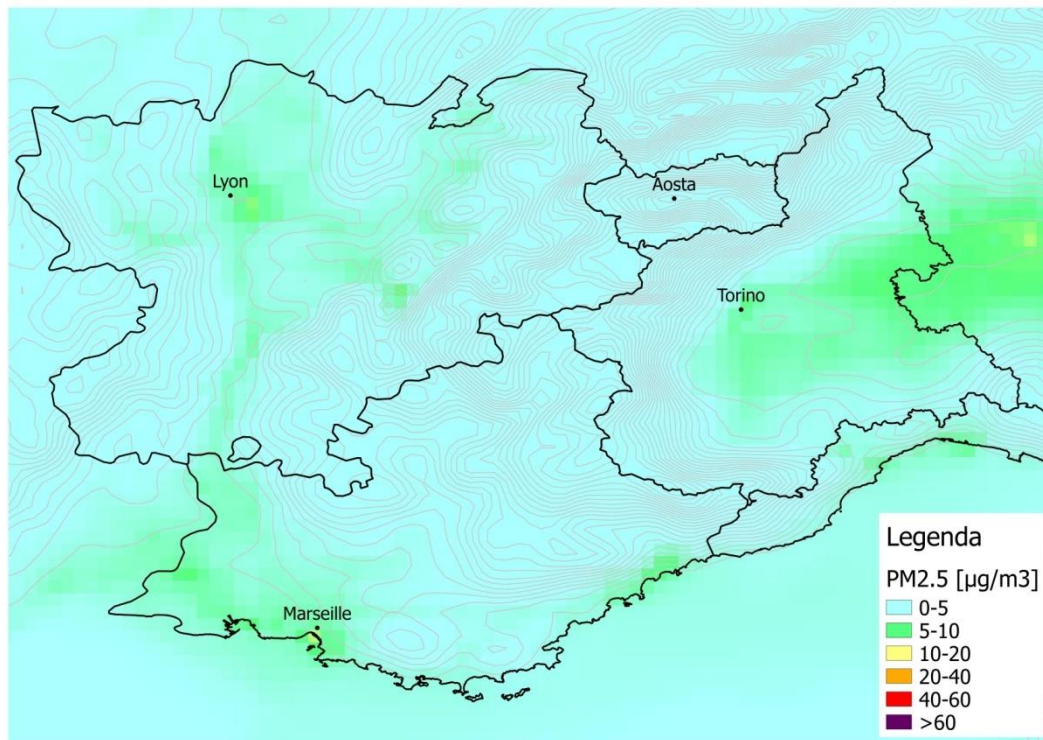


Figura 3.3.3-3: Media tra le concentrazioni di PM2.5 simulate con CAMx e quelle simulate con FARM - episodio estivo.

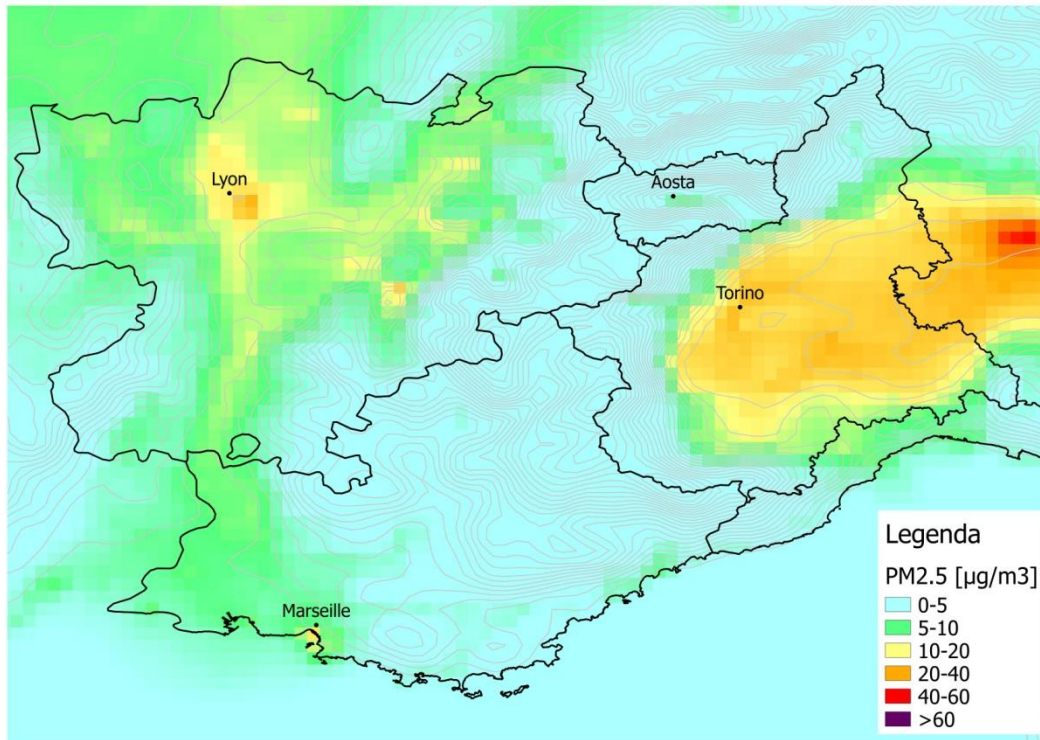


Figura 3.3.3.3-4: Media tra le concentrazioni di PM2.5 simulate con CAMx e quelle simulate con FARM - episodio invernale.

Nelle figure seguenti sono rappresentati i grafici del confronto degli andamenti delle concentrazioni medie giornaliere di PM10 osservate e calcolate con i modelli per 4 stazioni, una per ogni regione: Nice – Arson in Provence-Alpes-Côte d’Azur, Torino – Rubino in Piemonte, Grenoble – Les Frens in ô-Alpes e Aosta – Piazza Plouves in Valle d’Aosta. Nell’allegato 2 sono riportati i grafici delle stazioni ritenute significative in ogni regione.

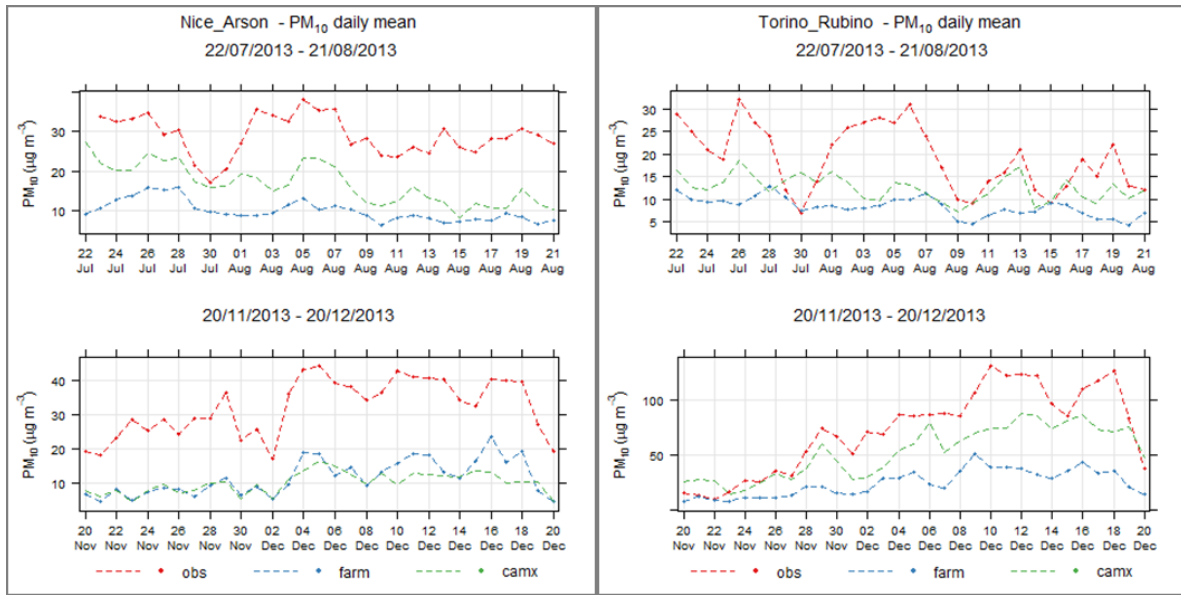


Figura 3.3.3.3-5 : Confronto dei valori misurati e simulati in concentrazione per la stazione Nice-Arson (sinistra) e la stazione Torino-Rubino (destra).

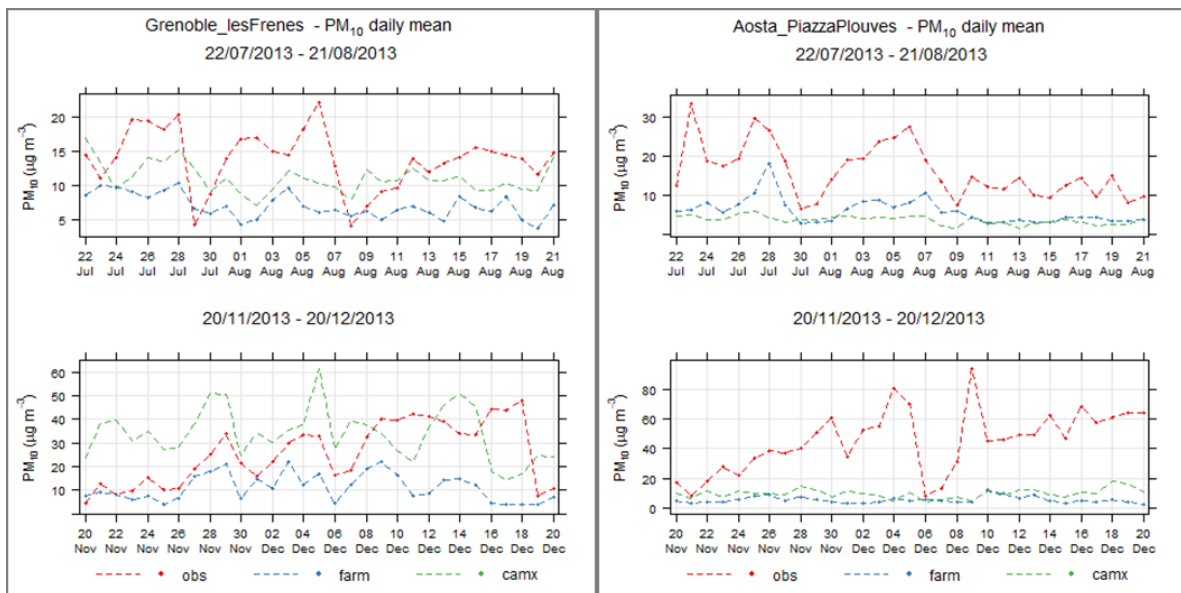


Figura 3.3.3.3-6 : Confronto dei valori misurati e simulati in concentrazione per la stazione Grenoble-les Frenes (sinistra) e la stazione Aoste-Piazza Plouves (destra).

3.3.4 Analisi della speciazione calcolata con i modelli

Si riporta nelle figure seguenti il confronto per le componenti del PM10 fatto tra le specie chimiche risultanti dalle analisi sui campioni di particolato atmosferico (colonna “obs”) e le corrispondenti specie calcolate dai profili di speciazione utilizzati dai due modelli FARM (colonna “sim FARM”) e CAMX (“sim CAMX”), sia in termini di concentrazioni in massa sia in termini di percentuali, nei due periodi estivo ed invernale analizzati.

Per i siti in Valle d'Aosta (Lillianes, Donnas, Aosta) il confronto è stato fatto per le sole componenti carboniose, in quanto le specie ioniche non sono state oggetto di indagine; pertanto la categoria "altre specie" comprende anche le specie ioniche, prese invece in esame negli altri siti monitorati.

Per le specie carboniose si è scelto in tale lavoro di considerare l'OC per la frazione organica: FARM considera la specie AORG che coincide con il carbonio organico (Antropogenic secondary organic mass [AORA] + Primary organic mass [AORPA] + Biogenic secondary organic mass [AORB]), mentre CAMx considera la specie OA che corrisponde all'aerosol organico nel suo complesso, comprendendo quindi anche gli atomi diversi dal carbonio legati al carbonio stesso e pertanto l'OA in uscita da CAMx è stato diviso per il fattore 1,6 (A. Detournay et al.(2015)^[82]).

Regione PACA

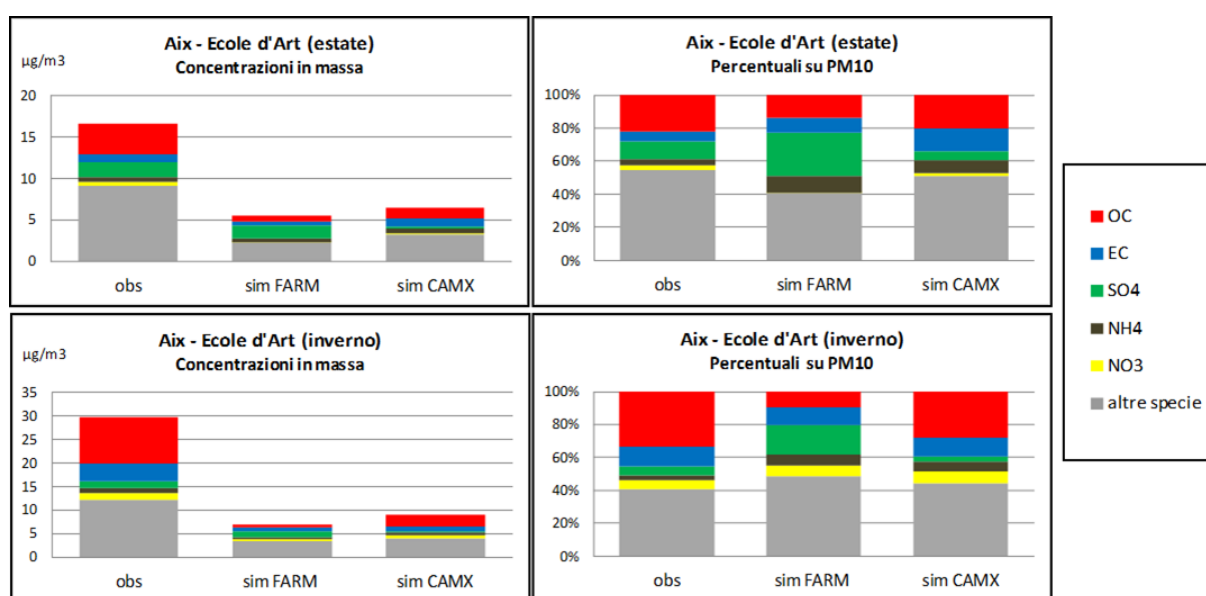


Figura 3.3.3.4-1: Confronto dei valori misurati (obs) e simulati (sim FARM e sim CAMX) delle componenti del PM10 per la stazione di Aix-en-Provence – Ecole d'Art nei periodi estivo ed invernale

⁸² A. Detournay et al.(2012) - Intercomparison campaign (WP3.4): *final Report APICE Project*

Regione Rhône-Alpes

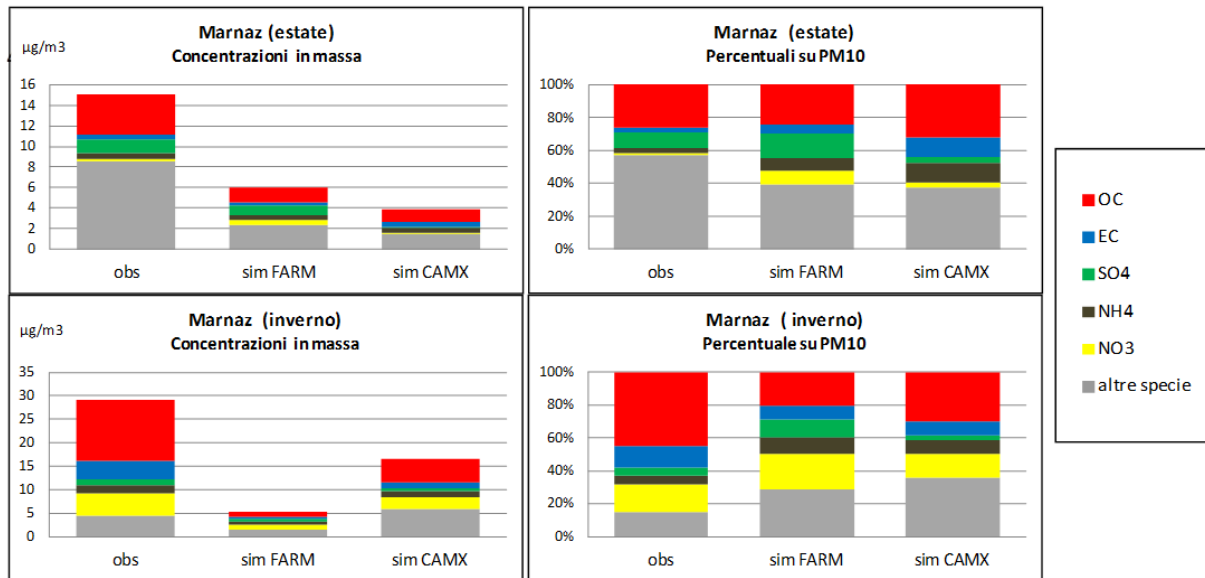


Figura 3.3.3.4-2: Confronto dei valori misurati (obs) e simulati (sim FARM e sim CAMX) in concentrazione in massa e in percentuale delle componenti del PM10 per la stazione di Marnaz nei periodi estivo ed invernale

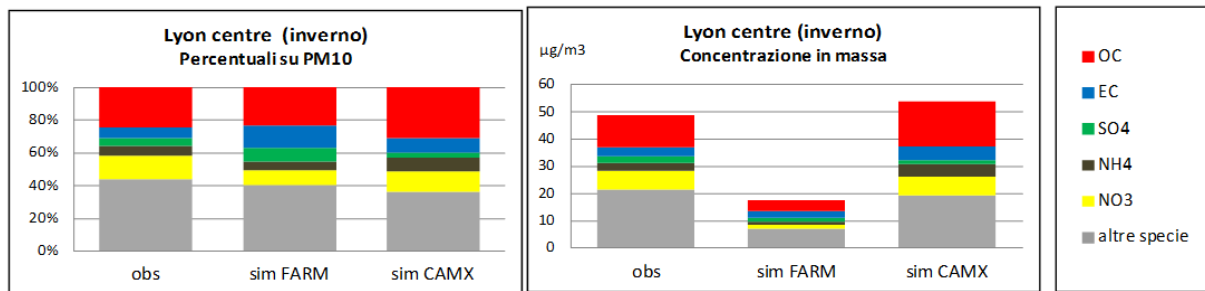


Figura 3.3.3.4-3: Confronto dei valori misurati (obs) e simulati (sim FARM e sim CAMX) in concentrazione in massa e in percentuale delle componenti del PM10 per la stazione di Lyon centre nel periodo invernale

Regione Valle d'Aosta

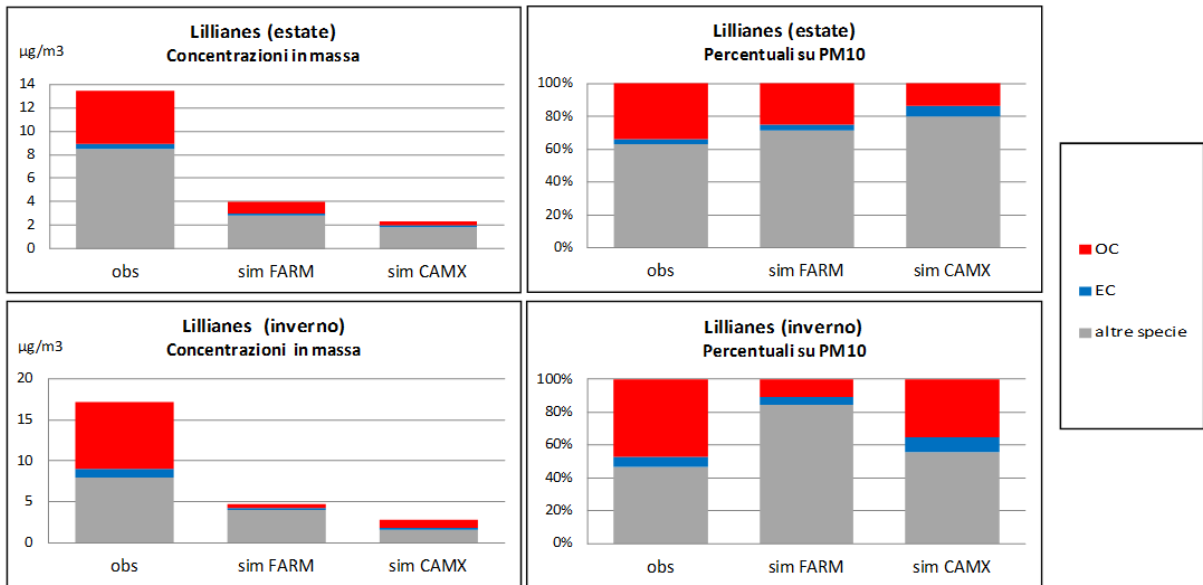


Figura 3.3.3.4-4 : Confronto dei valori misurati (obs) e simulati (sim FARM e sim CAMX) in concentrazione in massa e in percentuale delle componenti del PM10 per la stazione di Lillianes nei periodi estivo e invernale

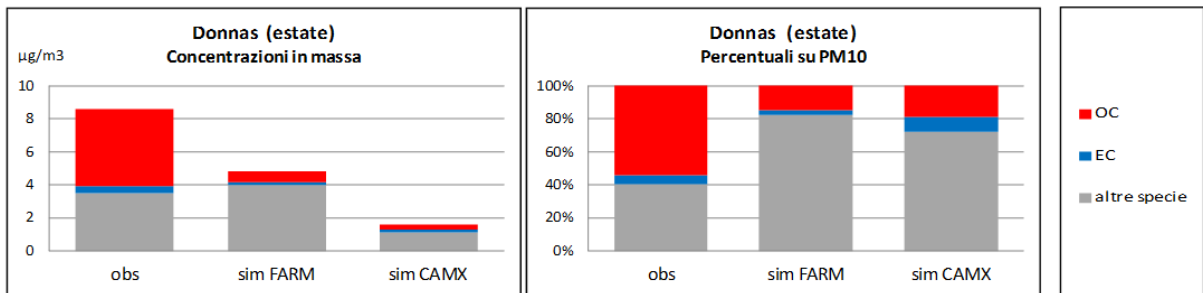


Figura 3.3.3.4-5 : Confronto dei valori misurati (obs) e simulati (sim FARM e sim CAMX) in concentrazione in massa e in percentuale delle componenti del PM10 per la stazione di Donnas nel periodo estivo

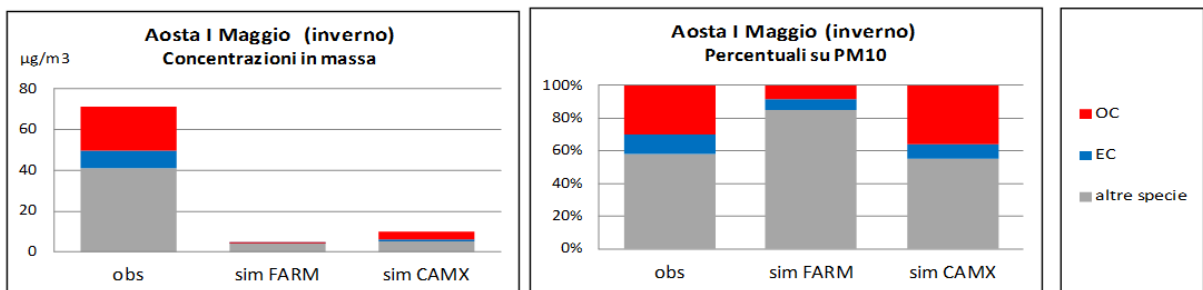


Figura 3.3.3.4-6 : Confronto dei valori misurati (obs) e simulati (sim FARM e sim CAMX) in concentrazione in massa e in percentuale delle componenti del PM10 per la stazione di Aosta Via I Maggio nel periodo invernale

Regione Piemonte

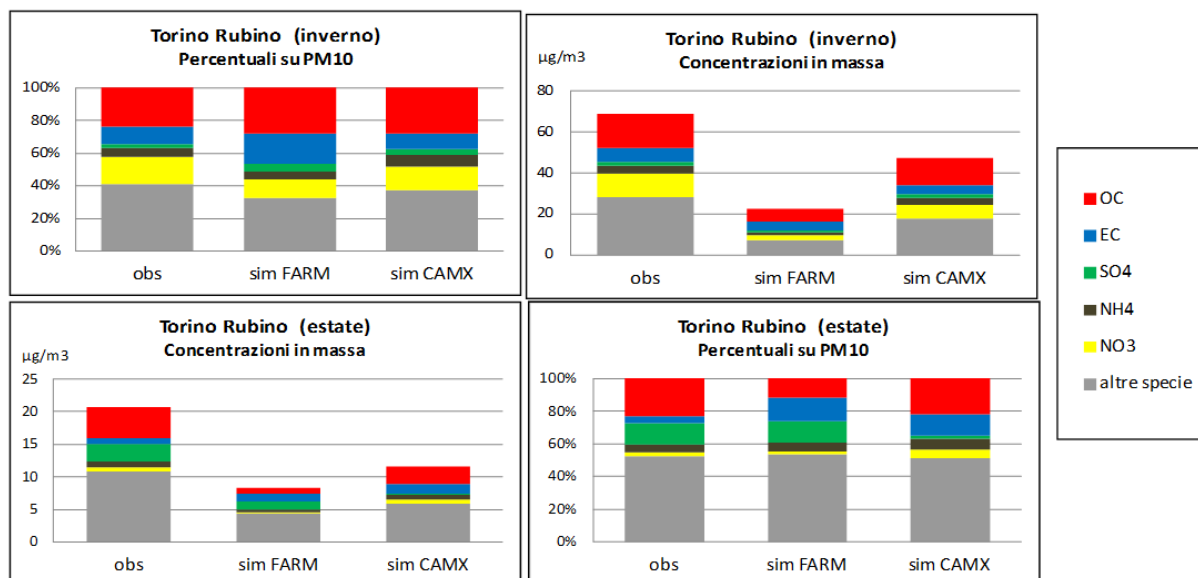


Figura 3.3.3.4-7 : Confronto dei valori misurati (obs) e simulati (sim FARM e sim CAMX) in concentrazione in massa e in percentuale delle componenti del PM10 per la stazione di Torino Rubino nel periodo estivo e invernale

In generale si evidenzia, come illustrato nei precedenti paragrafi, la comune sottostima dei due modelli studiati nella valutazione del PM10 totale rispetto ai valori misurati, soprattutto nel periodo invernale. La sottostima è da imputarsi sia alla impossibilità di conoscere perfettamente il totale delle emissioni di particolato sul dominio di studio (si pensi ad esempio agli effetti di risospensione) sia alla risoluzione adottata per le simulazioni (celle di 6km di lato) che, soprattutto nei siti caratterizzati da orografia complessa, non consente di riprodurre correttamente i fenomeni locali di dispersione degli inquinanti.

Tuttavia i modelli di trasporto e trasformazione chimica degli inquinanti in atmosfera riproducono abbastanza bene la composizione delle particelle (in percentuale), anche se con lievi differenze da sito a sito; in questo contesto CAMX sembra rispondere meglio; generalmente il modello FARM sottostima la frazione organica e sovrastima l'EC nei siti urbani.

3.3.5 Sintesi

L'obiettivo dell'azione 3.3 è stato quello di analizzare i risultati delle simulazioni effettuate con i modelli di trasporto e dispersione CAMx e FARM al fine di valutare la capacità di questi modelli di riprodurre i livelli di inquinamento da particolato sul territorio ALCOTRA.

La prima attività è stata quella di analizzare le misure di particolato disponibili nel dominio di studio, sia in termini di valori di concentrazione in aria sia di speciazione. Le misure di concentrazione di PM10 e PM2.5 hanno rilevato una situazione di criticità in molte aree della zona ALCOTRA nel periodo invernale. Le misure di speciazione hanno evidenziato l'importanza del contributo della combustione della biomassa all'inquinamento da particolato nel periodo invernale.

Nell'ambito di questa azione è stata effettuata anche la validazione dell'input meteorologico necessario per i modelli di dispersione, costruito utilizzando il modello WRF (Weather Research Forecast) che ha fornito i campi meteorologici con una risoluzione orizzontale di 6 km.

La valutazione dei risultati modellistici è stata fatta utilizzando mappe di concentrazione, indici statistici, grafici e confronti puntuali con i valori misurati in alcune stazioni. Le mappe di concentrazione consentono di avere una visione della distribuzione dei valori di concentrazione nell'area di interesse. Entrambi i modelli, anche se con qualche differenza, in generale sottostimano i valori di PM10 e PM2.5.

L'analisi dei risultati della speciazione del particolato stimata con gli strumenti modellistici è stata fatta confrontando tali valori con le misure disponibili, effettuate sia livello locale sia all'interno del progetto INTERREG ALCOTRA PARTAERA.

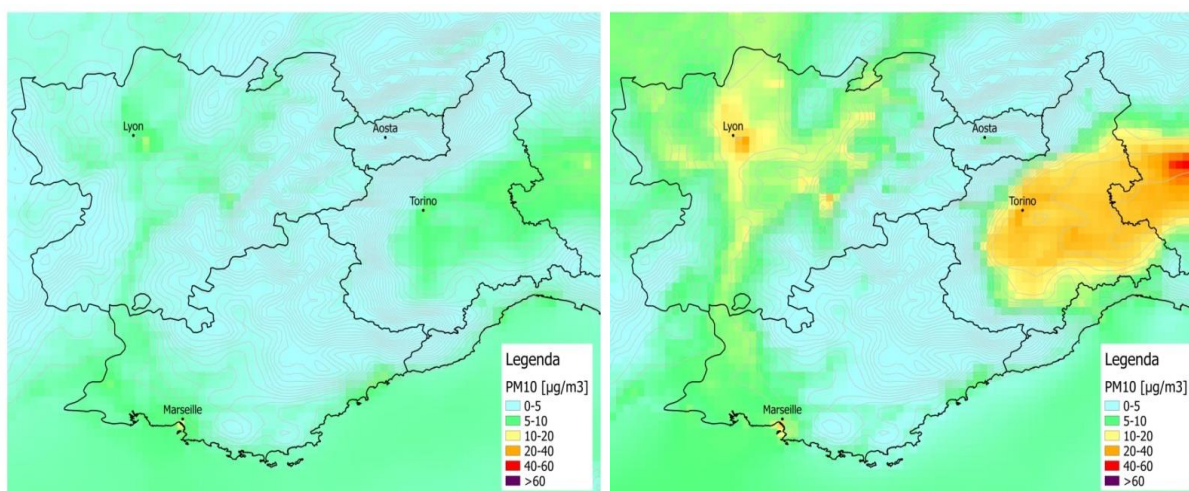


Figura 3.3.5-1: Media tra le concentrazioni di PM10 simulate con CAMx e quelle simulate con FARM - episodi estivo ed invernale

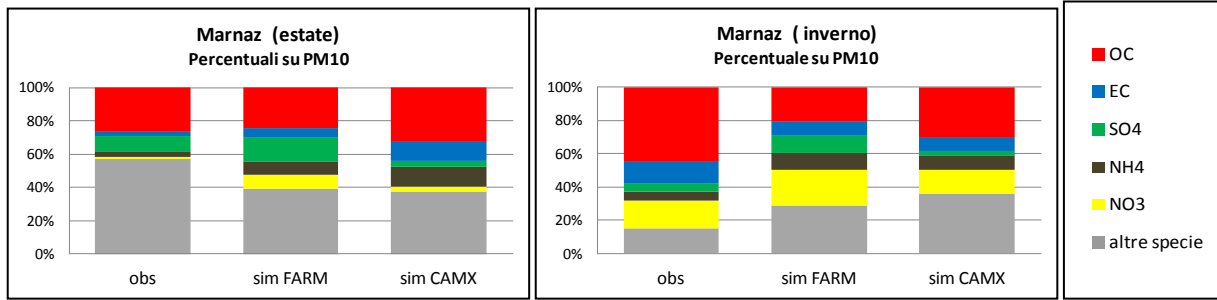


Figura 3.3.5-2: Confronto dei valori misurati (obs) e simulati (sim FARM e sim CAMX) in in percentuale delle componenti del PM10 per la stazione di Marnaz nei periodi estivo ed invernale

3.4. Scenari: calcolo dei contributi

L'obiettivo principale di questa sezione é di approfondire e di armonizzare le conoscenze sull'origine dell'inquinamento dovuto al particolato fine nelle quattro regioni della zona Alcotra (Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Piemonte e Valle d'Aosta). Questa analisi permette di fornire informazioni utili ai decisori politici per scegliere ed attivare i provvedimenti più efficaci per meglio gestire gli episodi di inquinamento da polveri sottili.

Questo studio é diviso in due parti simili tra loro: la prima parte consiste nel calcolo dei contributi delle sorgenti per settore di attività, mentre la seconda si occupa del calcolo dei contributi delle sorgenti per zona geografica di emissione riferita alle quattro Regioni partners. Come detto precedentemente (cf. 3.1), abbiamo utilizzato in questa analisi i due modelli di dispersione in atmosfera CAMx e FARM per rispondere a questi obiettivi. La predisposizione delle due piattaforme di modellistica é stata illustrata nel capitolo 3.1 ed ha permesso di fornire delle parametrizzazioni coerenti ed omogenee tra i nostri codici sull'insieme della zona Alcotra. Le simulazioni numeriche sono state realizzate su un periodo invernale (20/11/2013-20/12/2013) che si caratterizza da molteplici superamenti rilevati da tutte le regioni partners ed un'altro estivo (22/07/2013-22/08/2013) che ci permette di studiare l'origine delle polveri fini secondarie associate all'inquinamento fotochimico. Questi due periodi ci consentono di meglio studiare i contributi delle sorgenti tenendo conto della stagionalità degli inquinanti. Per ogni periodo é stato effettuato uno studio di confronto sui risultati dei contributi delle sorgenti degli inquinanti calcolati dai due modelli FARM et CAMX.

3.4.1 Definizione dei settori emissivi

3.4.1.1 I settori emissivi (Generale - cfr. 3.2.4)

L'utilizzo della nomenclatura SNAP97 nella elaborazione dell'inventario delle emissioni permette di differenziare le attività emissive degli inquinanti in atmosfera e di stabilire delle tabelle di corrispondenza comuni per raggrupparle per tipo di attività (cfr. 3.2.5.1- Definizione dei settori di attività). I 5 raggruppamenti di attività considerati in questa analisi sono: le emissioni dovute alla combustione del legno, il traffico stradale, le attività industriali, l'agricoltura e le attività rimanenti.

3.4.1.2 Le aree geografiche

Per analizzare gli scambi interregionali tra le diverse regioni dell'area Alcotra, abbiamo suddiviso l'area di studio in cinque aree geografiche: quattro zone geografiche sono definite dai confini amministrativi di ciascuna regione partner ed una quinta regione è situata all'esterno del dominio Alcotra (figura 3.0.3-1).

3.4.2 Risultati dei contributi per settore emissivo

Siamo interessati in questa parte alla quantificazione dei contributi delle fonti di inquinamento da parte dei settori emissivi. Tutti i risultati sono presentati come percentuali sul PM10 totale e non in $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.4.2.1 Risultati dei contributi in tutte le regioni

La figura 3.4-1 mostra le quote dei contributi di origine per settore di attività sul territorio Alcotra durante i due periodi: invernale (a destra) ed estivo (a sinistra). Nei grafici ogni colonna rappresenta la quota percentuale di contributo proveniente da ogni fonte emissiva in una regione dell'area di studio. Si ricorda che la nostra analisi settoriale dei dati di ingresso delle emissioni viene effettuata utilizzando il codice di classificazione SNAP (Selected Nomenclature for Air Pollution), come descritto nella parte 3.2.

Nella figura 3.4.1 l'interconfronto dei risultati sui contributi mostra un ottimo accordo tra i due strumenti modellistici in estate (figure 3.4.1a e 3.4.1c) e una minore corrispondenza dei due modelli nel periodo invernale (figure 3.4.1b e 3.4.1d).

In estate, entrambi i modelli mostrano contributi derivanti dalla combustione di biomassa molto inferiori, mentre quelli da traffico stradale danno maggiori contributi nelle quattro regioni (figure 3.4.1a e 3.4.1c). Si nota anche un contributo abbastanza rilevante del settore agricolo nelle regioni Valle d'Aosta e Piemonte.

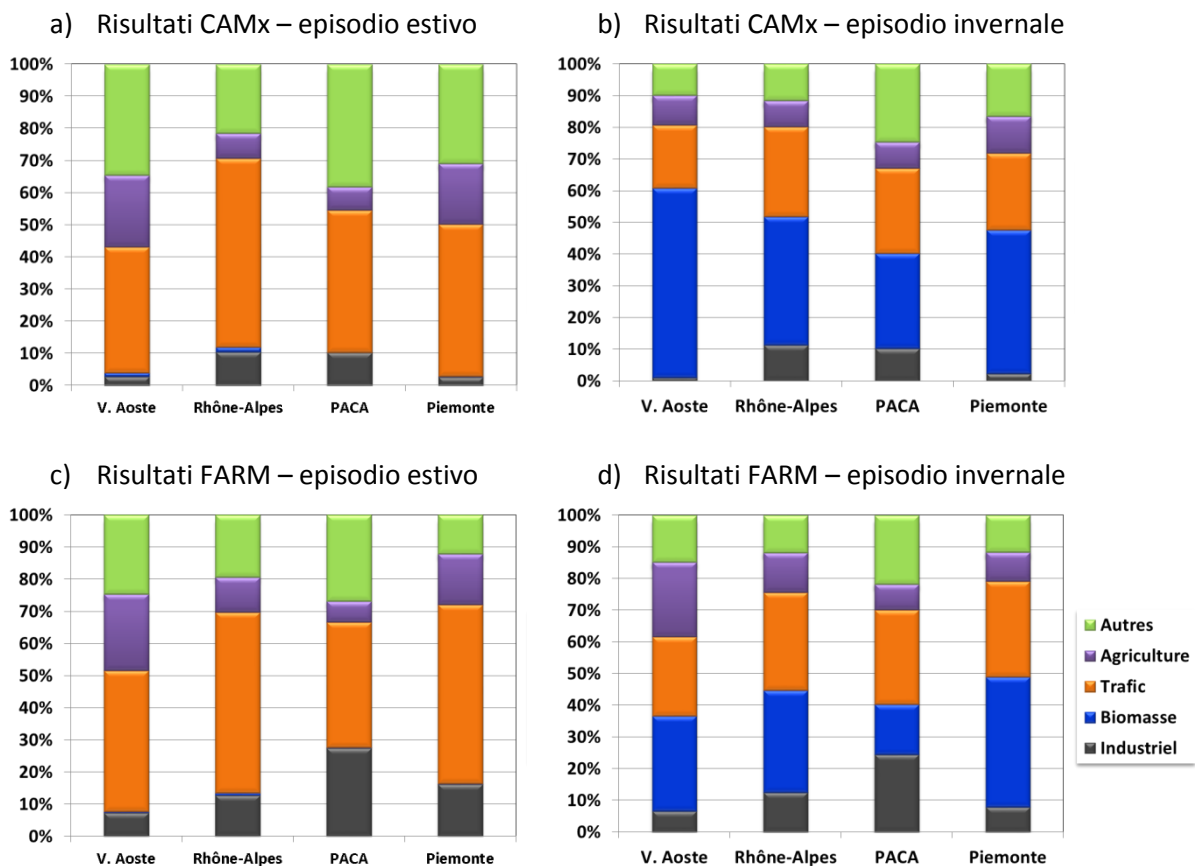


Figura 3.4.1: Confronti dei contributi delle sorgenti per settore di attività sulle regioni della zona ALCOTRA : risultati dei modelli CAMx (a e b) e FARM (c e d).

3.4.2.2 Risultati dei contributi nei siti di misura

Dopo aver studiato il contributo delle fonti di inquinamento per le emissioni di polveri sottili in ogni territorio, in questa sezione sono analizzati i risultati di entrambi i modelli FARM e CAMx in corrispondenza di diversi siti di misura di ogni regione.

I siti di misura selezionati per questa analisi si trovano in zone e grandi centri abitati che sono spesso caratterizzati dalle più alte concentrazioni nella regione. Questi siti, non trovandosi reciprocamente nelle immediate vicinanze, sono rappresentativi anche di aree simili (come raccomandato dalla Direttiva Europea 2000/69).

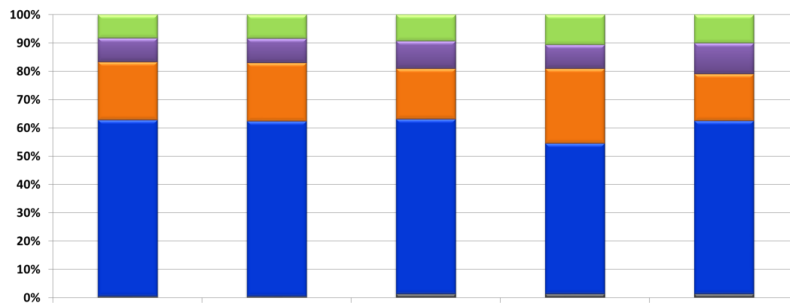
Le figure 3.4-2, 3.4-3, 3.4-4 e 3.4-5 presentano i risultati del confronto tra i modelli CAMx e FARM. In ciascuno di questi grafici sono riportati i risultati dei contributi stimati in diverse stazioni di qualità dell'aria per ogni singola regione. I grafici 3.4-2a e 3.4-2b illustrano l'impatto delle fonti di emissione per settore in alcune località della regione Valle d'Aosta, calcolato, rispettivamente, dai modelli FARM e CAMx durante il periodo invernale, mentre le figure 3.4-2c e 3.4-2d corrispondono al periodo estivo.

Questa analisi dimostra che i risultati di CAMx e FARM sono molto simili in corrispondenza della maggior parte dei siti di misura e per le diverse regioni di studio. Infatti, i valori dei contributi stimati per i due modelli sono qualitativamente molto prossimi sia in inverno che in estate. Questa corrispondenza può essere spiegata con il lavoro svolto a monte per armonizzare i dati di ingresso (emissioni, meteorologia, ...) per entrambi i modelli. Si noti che i risultati di FARM e CAMx sono quasi identici nelle varie stazioni della Valle d'Aosta durante l'estate (figure 3.4-2c e 3.4-2d). Tuttavia, abbiamo alcune differenze tra i due modelli su alcuni siti come la stazione "Drome rurale sud" della regione Rhône-Alpes (vedi figure 3.4-3c e 3.4-3d).

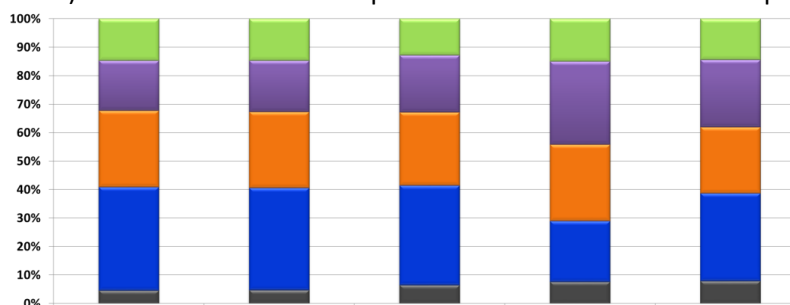
Come previsto nella nostra analisi dei dati sulle emissioni (par. 3.2), i risultati numerici (forniti da entrambi i modelli) in estate sono molto diversi da quelli calcolati in inverno. Infatti, la quota di contributo connesso alla combustione di biomassa presso ciascuna stazione di misura è quasi nullo nel periodo estivo.

Le figure dei contributi delle sorgenti per settore di attività (figura da 3.4-2 a 3.4-5) dimostrano che vi è una grande variabilità spaziale dei contributi delle fonti nei diversi territori. Tuttavia, la combustione di legna è il principale responsabile delle concentrazioni di PM10 sulla maggior parte del territorio Alcotra durante il periodo invernale mentre il traffico è il principale responsabile in estate. Osserviamo anche che il contributo dei settori rimanenti (indicato con "Altro") è relativamente alto. Infatti, un quarto della quantità totale di polveri fini misurata nei siti è spesso associata a settori non identificati ai fini di questo studio.

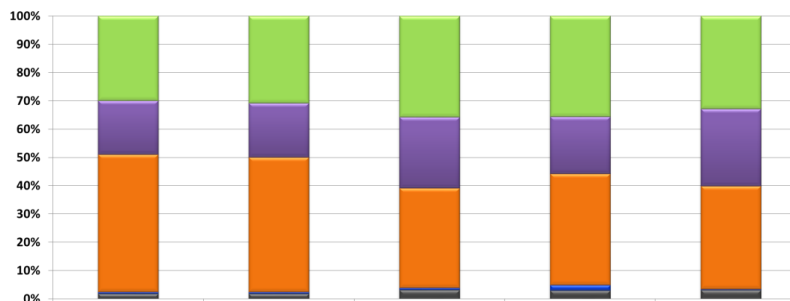
a) Risultati dei contributi prodotti con il modello CAMx – episodio invernale



b) Risultati dei contributi prodotti con il modello FARM – episodio invernale



c) Risultati dei contributi prodotti con il modello CAMx – episodio estivo



d) Risultati dei contributi prodotti con il modello FARM – episodio estivo

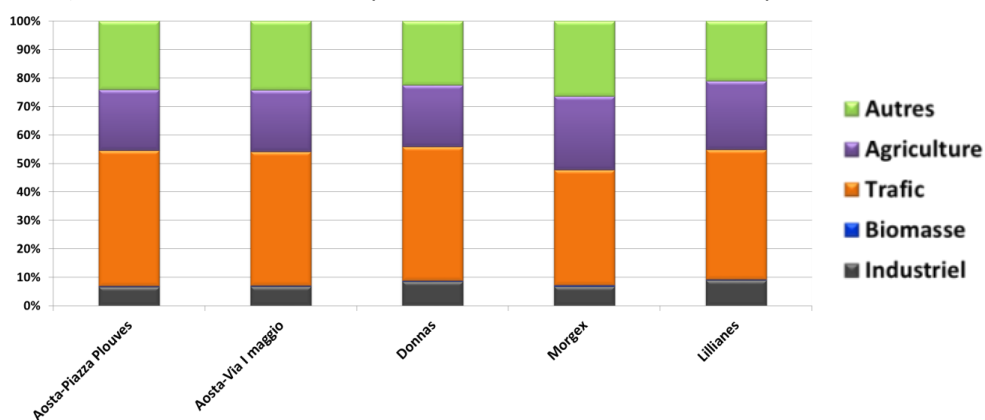
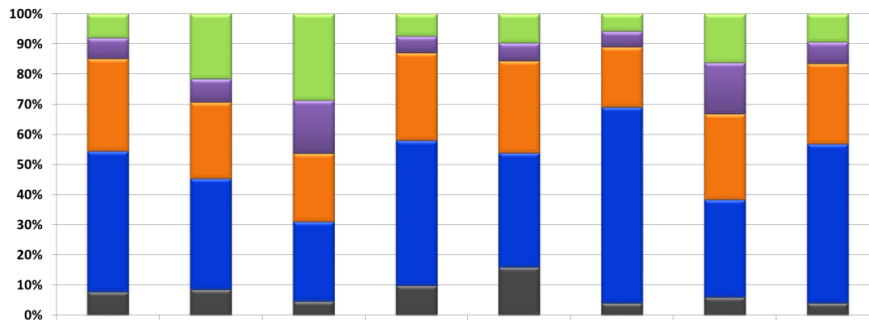
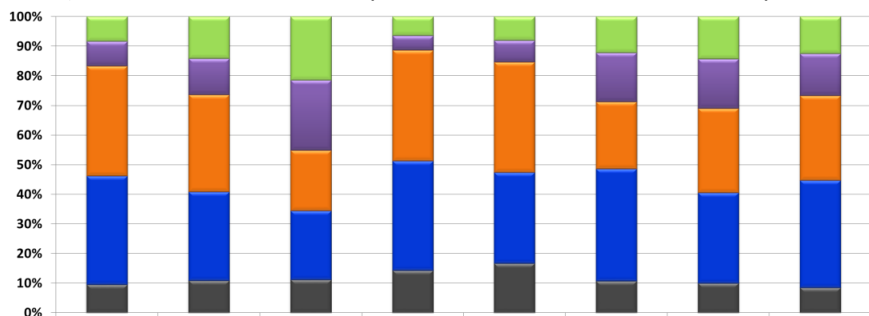


Figura 3.4-2: Contributi percentuali di ogni settore di attività per le stazioni della regione Valle d'Aosta.

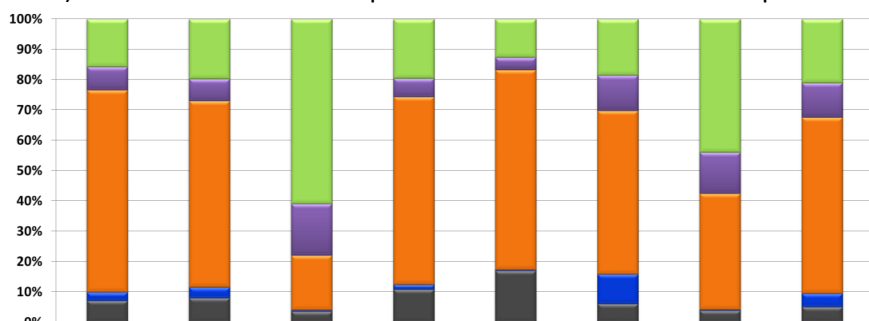
a) Risultati dei contributi prodotti con il modello CAMx – episodio invernale



b) Risultati dei contributi prodotti con il modello FARM – episodio invernale



c) Risultati dei contributi prodotti con il modello CAMx – episodio estivo



d) Risultati dei contributi prodotti con il modello FARM – episodio estivo

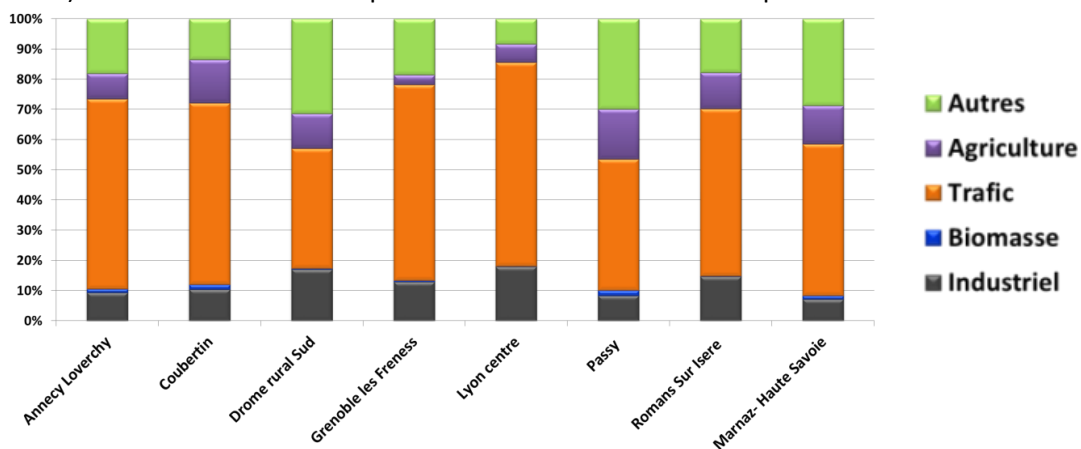
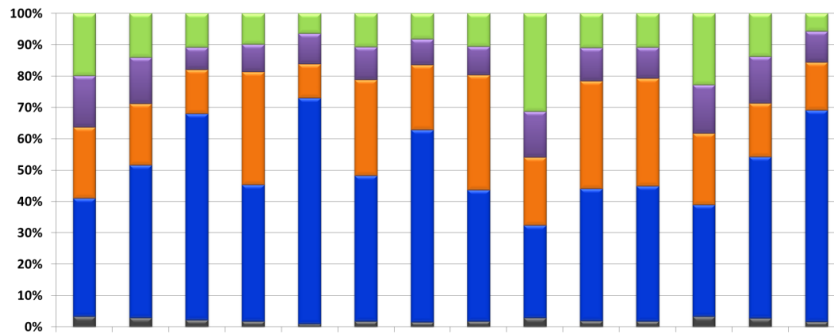
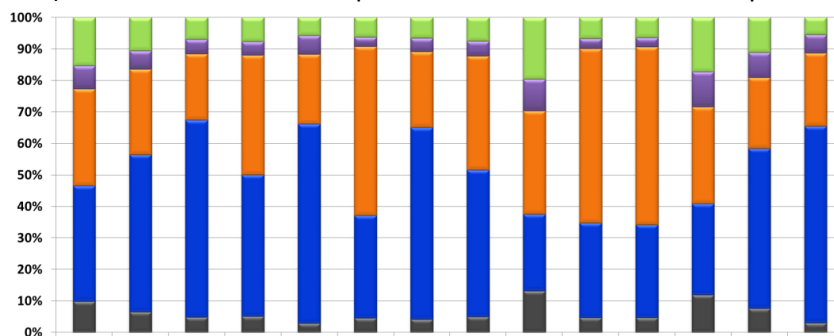


Figura 3.4-3: Contributi percentuali di ogni settore di attività per le stazioni della regione Rhône-Alpes.

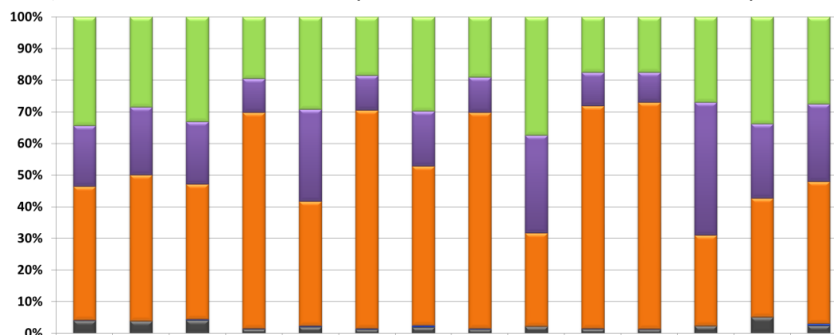
a) Risultati dei contributi prodotti con il modello CAMx – episodio invernale



b) Risultati dei contributi prodotti con il modello FARM – episodio invernale



c) Risultati dei contributi prodotti con il modello CAMx – episodio estivo



d) Risultati dei contributi prodotti con il modello FARM – episodio estivo

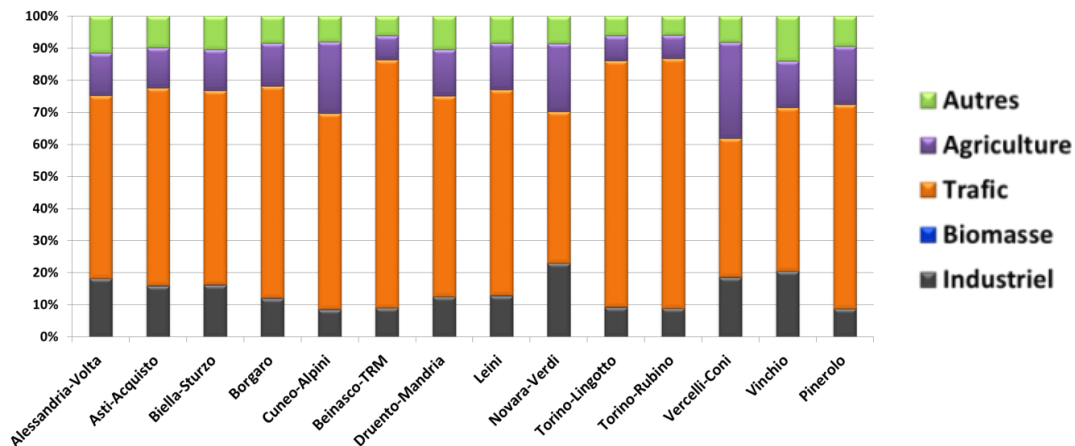


Figura 3.4-4: Contributi percentuali di ogni settore di attività per le stazioni della regione Piemonte.

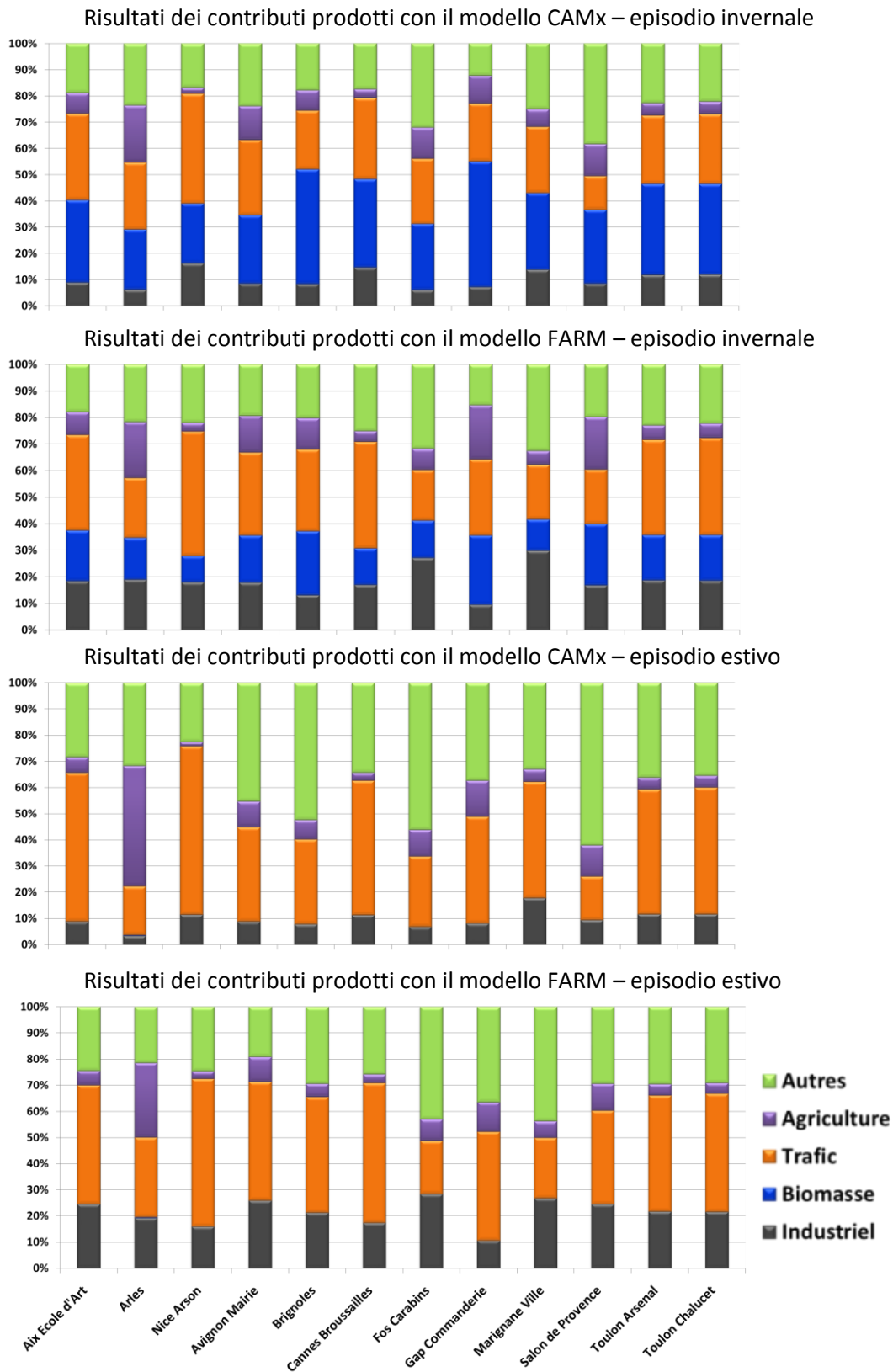


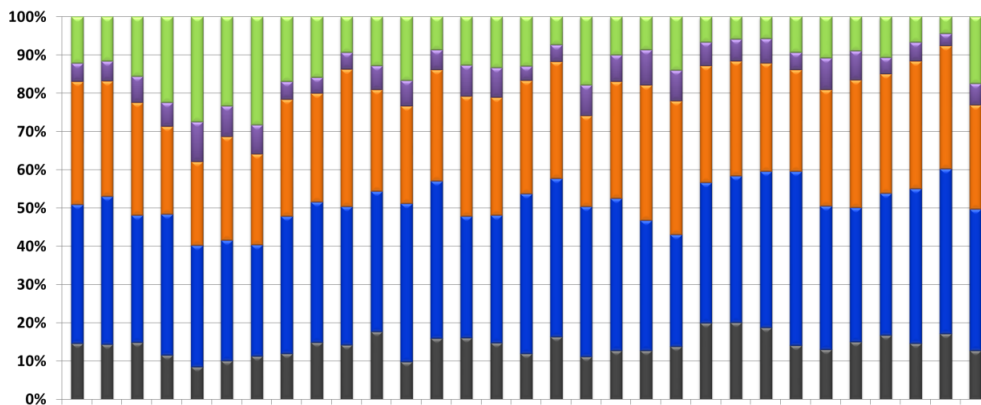
Figura 3.4-5: Contributi percentuali di ogni settore di attività per le stazioni della regione Provence-Alpes-Côte d'Azur.

3.4.2.3 Variazioni temporali giornaliere dei contributi di ogni settore emissivo

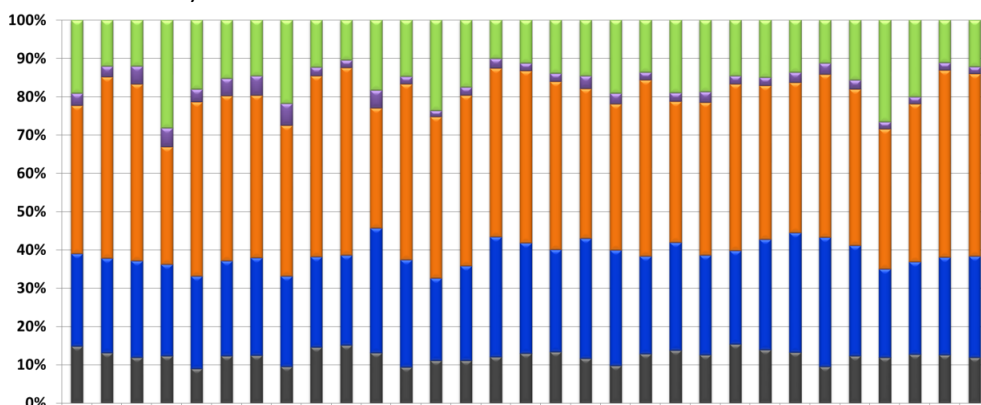
Per completare l'analisi precedente, abbiamo inserito nella figura 3.4-6 gli andamenti giornalieri dei contributi delle fonti in corrispondenza di quattro siti di misura per tutto l'episodio invernale. Le figure 3.4-6a, 3.4-6b, 3.4-6c e 3.4-6d corrispondono rispettivamente alle stazioni di Lione Centro per la regione Rhône-Alpes, Nizza – aeroporto per la regione PACA, Torino - Parco Rubino per il Piemonte ed Aosta - Piazza Plouves per la regione Valle d'Aosta. L'evoluzione temporale delle quote di contributo in questi siti di misura sono caratterizzati da una bassa variabilità nelle 24 ore. Ciò può essere dovuto alla bassa variabilità temporale presente nell'inventario delle emissioni per questo episodio invernale.

Questi dati confermano che la combustione di biomassa è il principale responsabile delle concentrazioni di PM10 nel periodo invernale nei diversi territori dell'area Alcotra. Questo risultato è particolarmente marcato in corrispondenza della stazione di Aosta-Piazza Plouves della Valle d'Aosta (figura 3.4-6d). Si rileva inoltre che il contributo del traffico stradale è relativamente importante nei grandi agglomerati (Lione, Nizza e Torino).

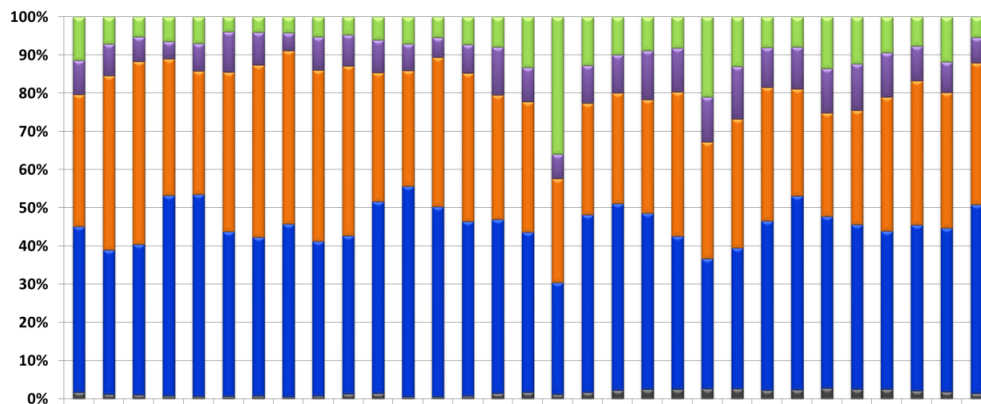
a) Variazione giornaliera dei contributi nella stazione di Lione Centro (Rhône-Alpes)



b) Variazione giornaliera dei contributi nella stazione di Nizza Aeroporto (Provence Alpes Côte d'Azure)



c) Variazione giornaliera dei contributi nella stazione di Torino - Parco Rubuno (Piemonte)



d) Variazione giornaliera dei contributi nella stazione di Aosta-Piazza Plouves (Vallée d'Aoste)

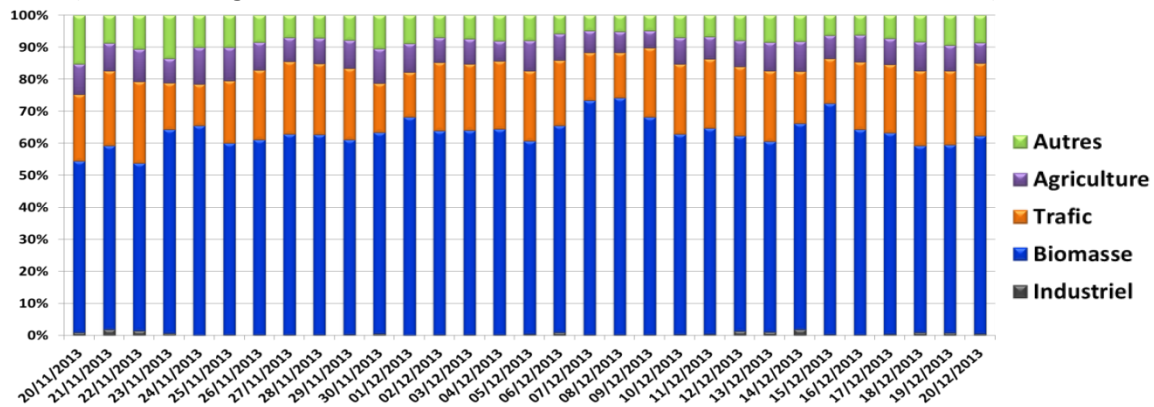


Figura 3.4-6: Evoluzione giornaliera dei contributi delle sorgenti per settore di attività durante il periodo invernale in 4 stazioni del territorio ALCOTRA .

3.4.2.4 Variabilità spaziale delle percentuali di contributo per settore di attività nell'area di studio

Dopo aver analizzato i risultati dei due modelli in alcune stazioni di misura rappresentative di ciascuna regione, mostriamo ora l'utilità dei nostri strumenti per scopi operativi. Le figure 3.4-7, 3.4-8, 3.4-9 e 3.4-10 mostrano la variabilità spaziale delle percentuali di contributo dei vari settori di attività nei due periodi di simulazione: invernale (20/11/2013 – 20/12/2013) e estivo (22/07/2013 – 22/08/2013). Questo tipo di mappe di contributo permette di analizzare ed identificare le fonti di inquinamento che contribuiscono maggiormente al superamento del limite del PM10 in qualsiasi punto delle nostre regioni. In effetti, queste mappe permettono di valorizzare visivamente e con rapidità i contributi nel territorio dei vari settori rispetto alle mappe dei superamenti dei valori normativi di polveri sottili.

Confrontando i prodotti dei due modelli FARM e CAMx nelle figure 3.4-7, 3.4-8, 3.4-9 e 3.4-10, si nota che i risultati di questi due strumenti sono spazialmente più coerenti all'interno dell'area Alcotra che all'esterno di essa. La differenza dei risultati prodotti dai due modelli all'esterno del dominio Alcotra può essere spiegata con il diverso trattamento delle emissioni EMEP: in CAMx si SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

considerano tutte le emissioni EMEP facenti parte della categoria “Altro”, cioè non identificate nei settori scelti, mentre in FARM le emissioni EMEP sono state suddivise in settori come all’interno del dominio Alcotra. Inoltre, il settore “Altro” è associato sia alle emissioni antropiche non differenziate e alle emissioni naturali. Inoltre, si osserva che il modello FARM sottostima i contributi del settore combustione di biomassa e sovrastima il contributo dell'agricoltura rispetto ai risultati di CAMx. Vediamo, inoltre, che l'agricoltura si presenta come un settore significativo in determinati territori, in particolare nella regione Piemonte e in Camargue (Sud-Ovest della regione Provence-Alpes-Côte d’Azure).

I contributi di biomassa alle concentrazioni di particolato sono più marcati nelle aree prealpine e alpine, mentre quelli del traffico stradale sono più significativi, o addirittura preponderanti, nei centri urbani e nelle pianure attraversate dalle autostrade. La figura 3.4-7 mostra come questo forte contributo da traffico stradale sia soprattutto localizzato in corrispondenza delle principali vie di traffico nelle zone extraurbane. Questo risultato è coerente con la variazione spaziale delle emissioni associate alla circolazione stradale nell’inventario. I risultati di entrambi i modelli CAMx e FARM confermano che il traffico stradale è uno dei principali responsabili delle concentrazioni di PM10 durante l'estate (figure 3.4-7 e 3.4-8 –Contributi da Traffico). Ad esempio, a Nizza ed a Torino oltre il 70% delle concentrazioni di PM10 sono dovute alle emissioni prodotte dal traffico stradale.

Da ultimo, si nota come il contributo delle attività industriali sia molto simile tra estate ed inverno. Tuttavia, l'industria ha un contributo significativo e rimarchevole solo nei pressi delle maggiori aree industriali. Si osserva inoltre che il modello FARM prevede contributi derivanti dalle attività industriali decisamente maggiori di quelli previsti da CAMx.

I contributi del settore industriale nella città di Marsiglia ottenuti con le simulazioni di FARM (figure 3.4-8 e 3.4-10) sono molto sovrastimati a causa del problema sui dati di ingresso menzionati in 3.2.52 e per tale motivo i risultati sono stati invalidati su Marsiglia. Lo stesso discorso deve essere fatto per i contributi derivanti dal “dominio esterno” nelle figure 3.4-18 e 3.4-20.

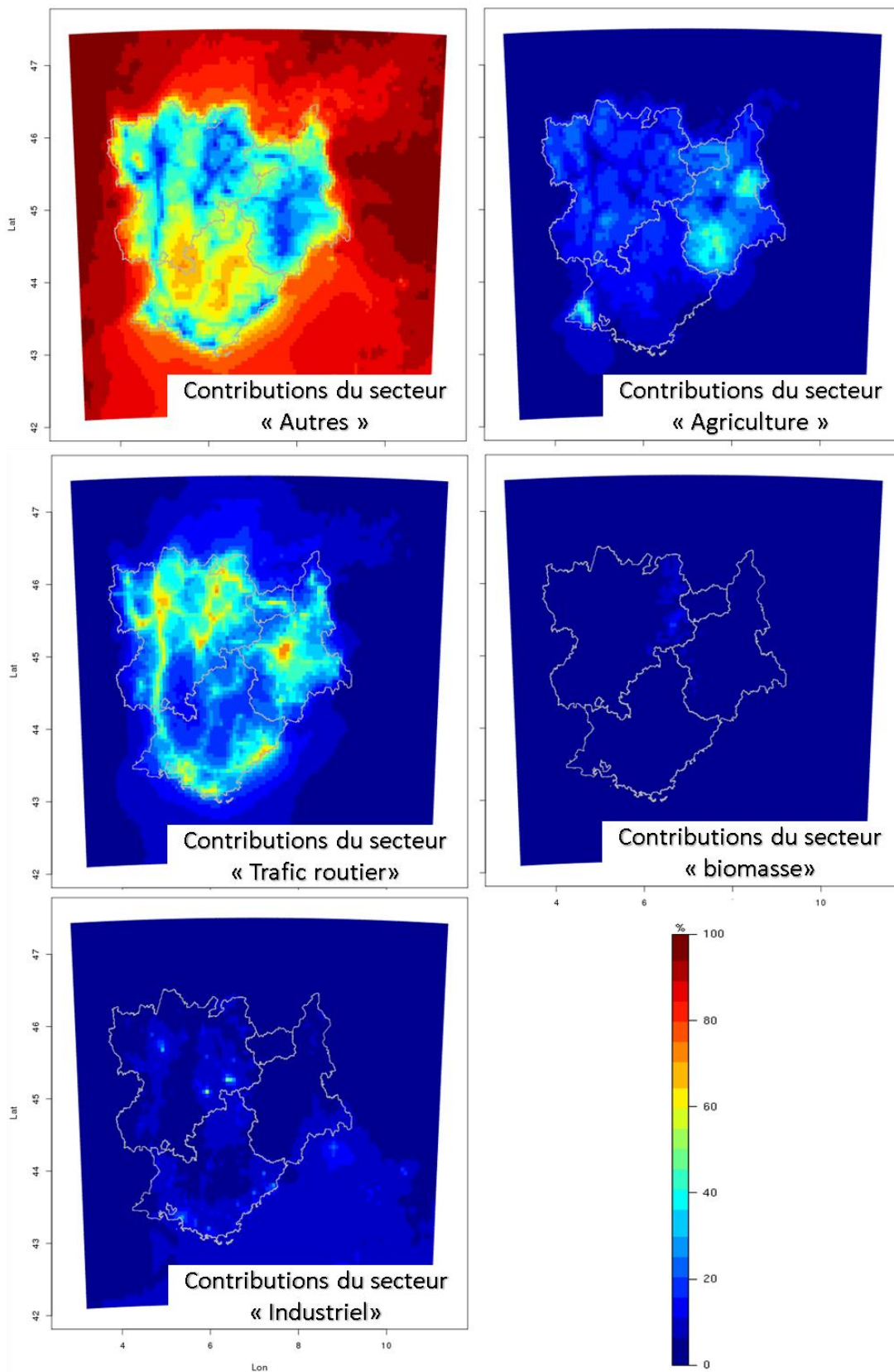


Figura 3.4-7: Mappe dei contributi delle sorgenti per settore di attività nell'episodio estivo: Risultati del modello CAMx

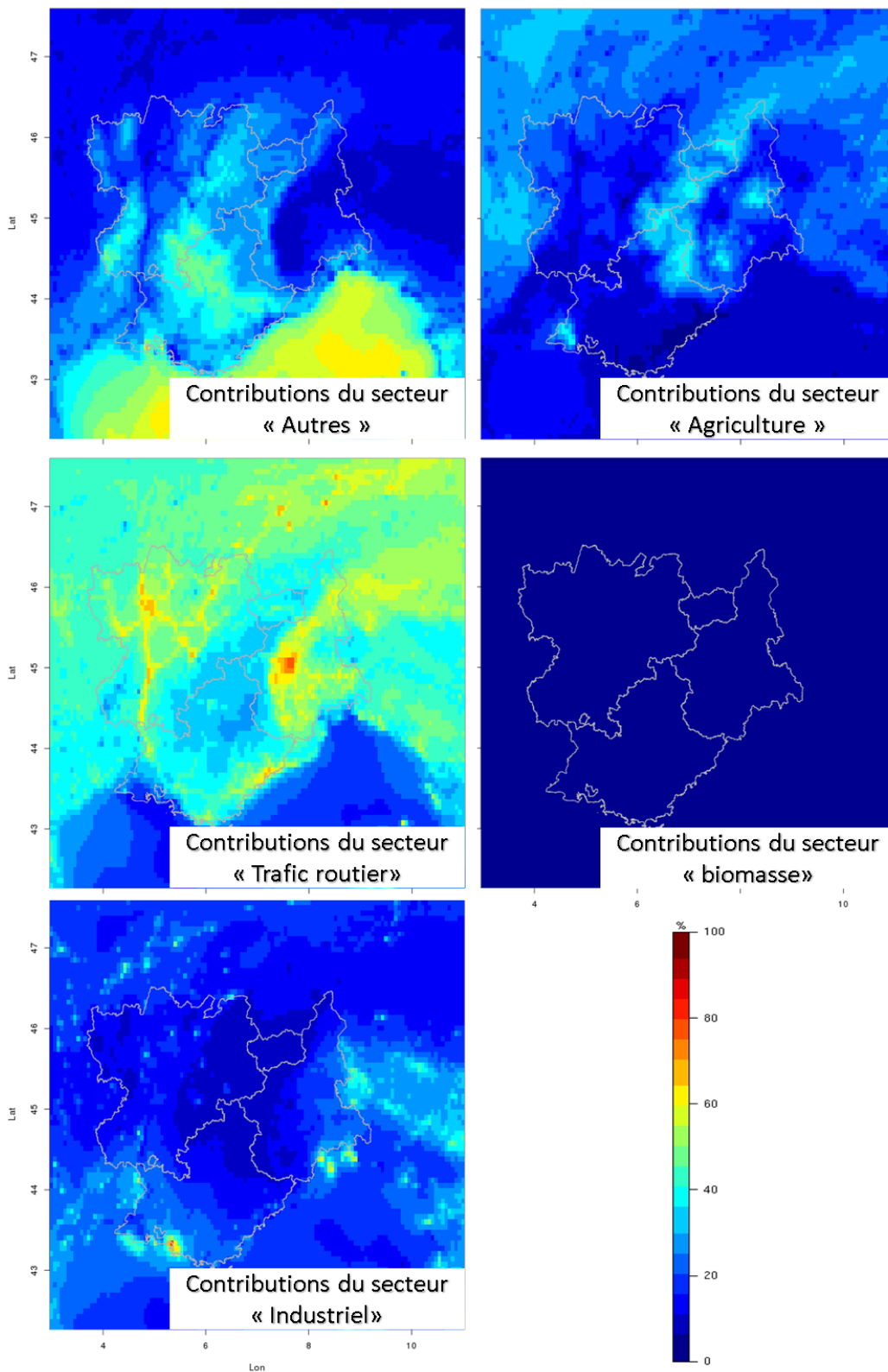


Figura 3.4-8: Mappe dei contributi delle sorgenti per settore di attività nell'episodio estivo: Risultati del modello FARM (invalidati i risultati su Marsiglia)

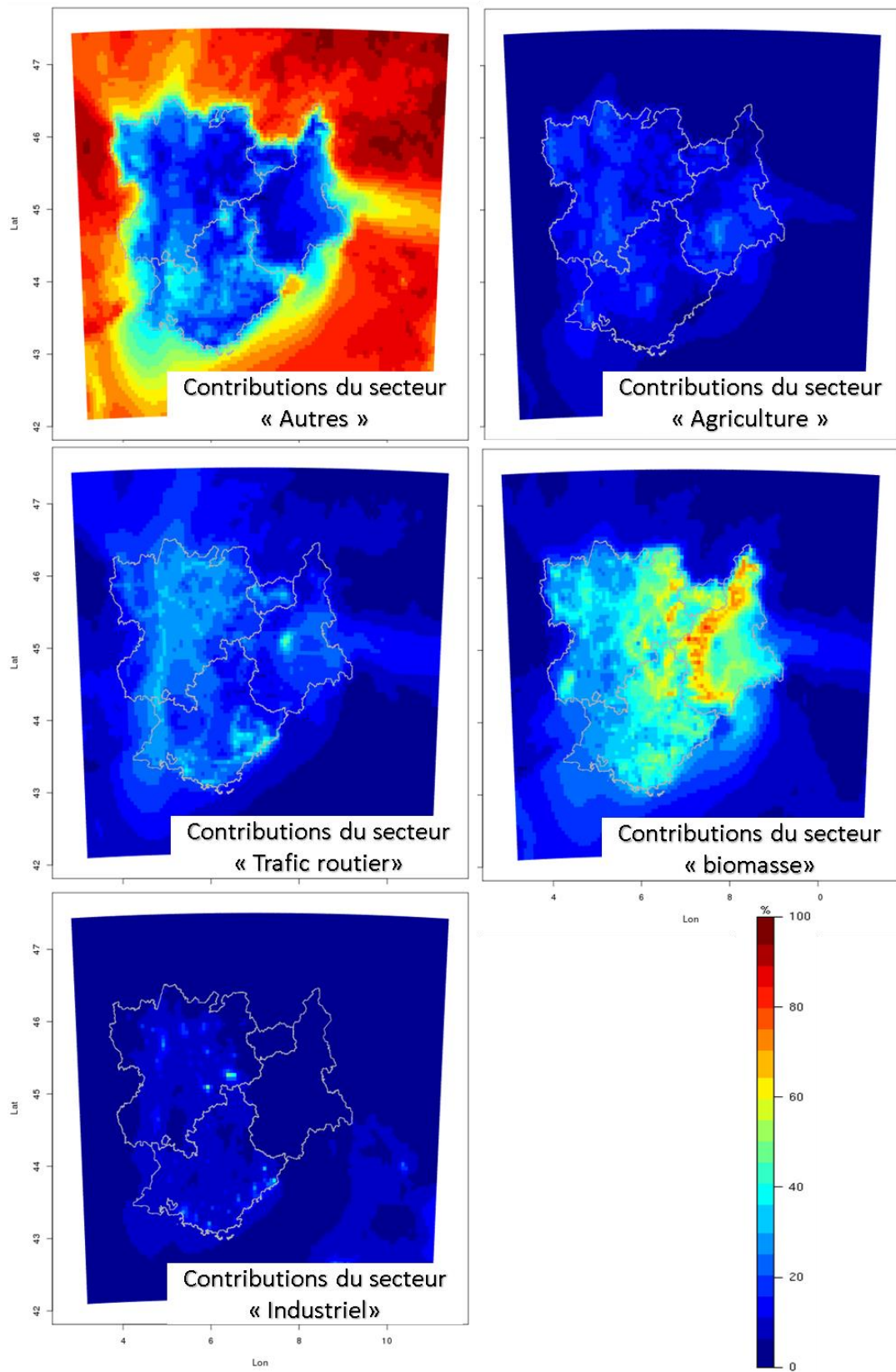


Figura 3.4-9: Mappe dei contributi delle sorgenti per settore di attività nell'episodio invernale: Risultati del modello CAMx

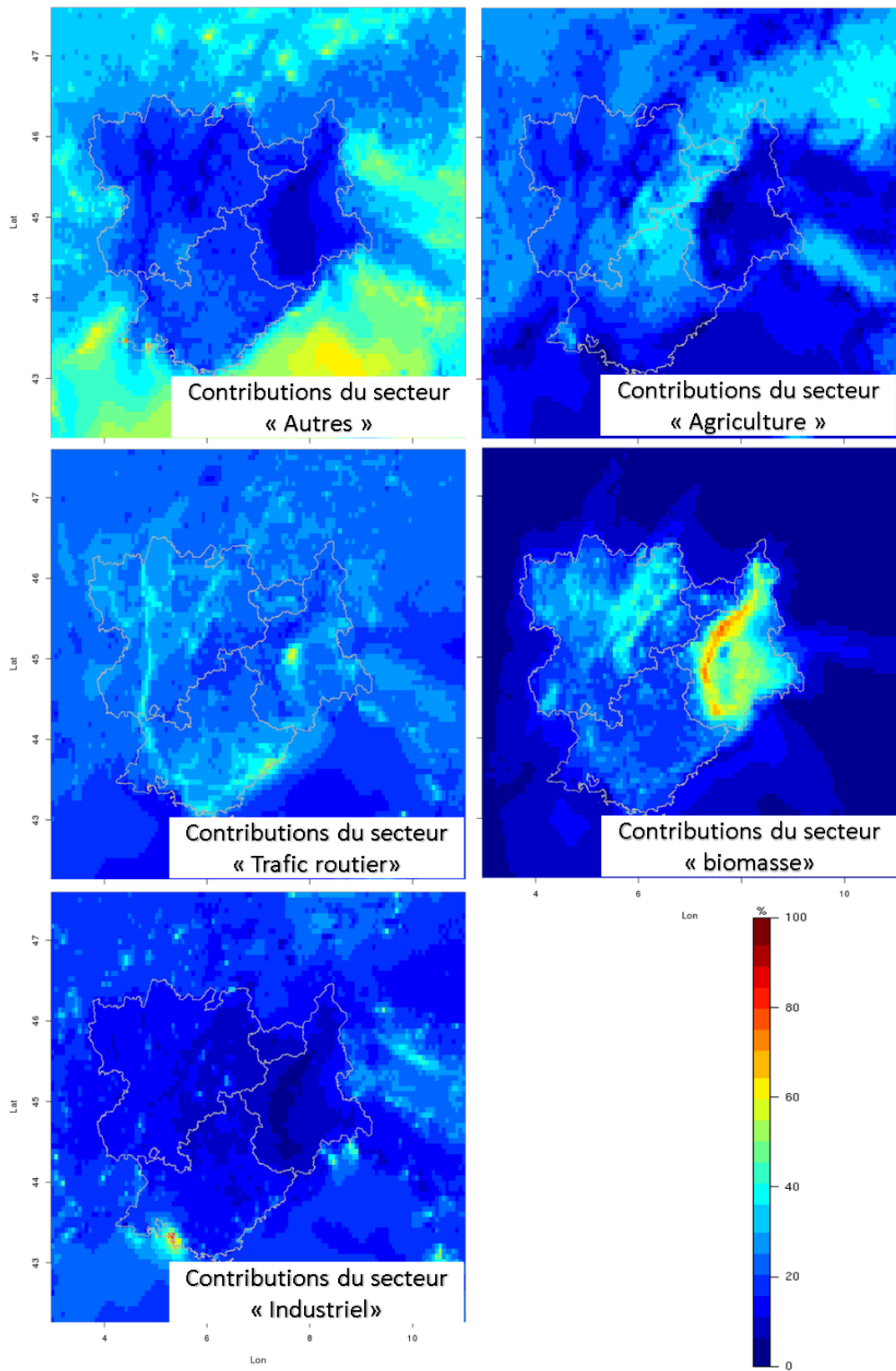


Figura 3.4-10: Mappe dei contributi delle sorgenti per settore di attività nell'episodio invernale: Risultati del modello FARM (risultati invalidati su Marsiglia)

3.4.3 Risultati dei contributi per regione

Ci occuperemo in questa parte di quantificare il contributo delle fonti di inquinamento per area geografica, come definito in 3.4.1.2. In questa sezione, i risultati sono presentati come percentuale relativa al PM10 totale e non in $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.4.3.1 Risultati dei contributi in tutte le regioni

La figura 3.4-11 fornisce una stima delle quote di PM10 importate durante i due episodi nei diversi territori del nostro dominio Alcotra. Sono rappresentate le quote di contributo calcolate dai due modelli CAMx (figure 3.4-11a e 3.4-11b) e FARM (figure 3.4-11c e 3.4-11d). Ogni colonna di queste quattro figure rappresenta i contributi percentuali delle sorgenti di emissione in base all'area geografica di origine in ogni regione dell'area di studio.

I risultati di contributo percentuale mostrati nella figura 3.4-11 evidenziano un minore accordo tra i modelli, se confrontati con i risultati dei contributi dovuti ai settori emissivi. Nelle diverse regioni, l'impatto delle emissioni locali sul proprio territorio è tra il 45% e il 95%. Allo stesso modo osserviamo sui diversi grafici della figura 3.4-11 che una parte importante delle concentrazioni di PM10 è dovuta a fattori al di fuori della zona Alcotra (le porzioni in grigio in ogni colonna). Ad esempio, si nota per il periodo estivo che circa un terzo delle concentrazioni di PM10 nelle diverse regioni può essere spiegato dalle emissioni esterne alla zona Alcotra.

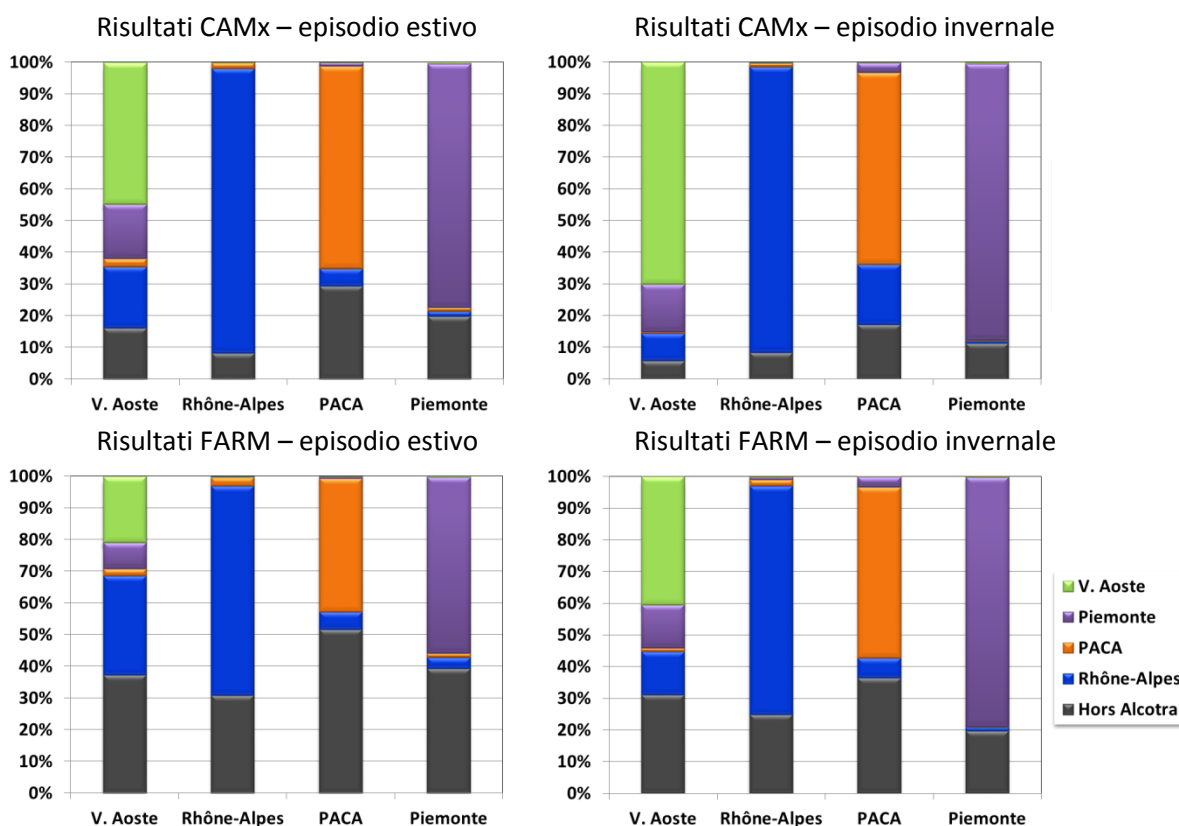


Figura 3.4-11: Contributi delle sorgenti inquinanti per settore geografico nelle 4 regioni : risultati CAMx (a e b) e FARM (c e d).

3.4.3.2 Risultati dei contributi nei siti di misura

Per identificare meglio gli scambi di inquinamento tra queste quattro regioni, abbiamo calcolato le quote di contributi in corrispondenza di diverse stazioni di misura in ogni territorio. Sono state scelte per ogni regione le stazioni più significative, considerando la loro tipologia, la loro posizione (vicinanza alle reciproche frontiere, stazioni nelle vallate comuni) per poter studiare al meglio il trasporto transfrontaliero nel nostro dominio di studio, i valori di concentrazione misurati in modo da avere informazioni sui valori maggiorie minori in ogni regione. Sono state escluse tutte le stazioni da traffico.

Le figure seguenti (4.12-4.15) riassumono i contributi di emissioni provenienti da ogni regione alle concentrazioni in corrispondenza di stazioni fisse selezionate. Si ricorda che i contributi indicati in percentuale non sono rappresentativi di tutto l'anno 2013, in quanto abbiamo esaminato solo due episodi molto speciali di quest'anno (un episodio invernale ed uno estivo).

Le figure 3.4-12 e 3.4-15 mostrano che i risultati del contributo dei due modelli FARM e CAMx non sono molto coerenti per le due regioni della Valle d'Aosta e del PACA. Ad esempio, nella regione Valle d'Aosta i contributi derivati dall'esterno calcolati da FARM sono spesso superiori al 20% mentre quelle stimate da CAMx sono generalmente inferiori al 20%.

Le figure 3.4-12, 3.4-13, 3.4-14 e 3.4-15 confermano che le concentrazioni di PM10 in tutti i territori risultano legate alle emissioni locali. Infatti, in tutte le regioni studiate, le concentrazioni sono dovute principalmente ad una quota molto significativa di emissioni locali (tra il 50% ed il 90%). Nella maggior parte dei casi, i contributi più elevati provengono dalle emissioni della regione in cui la stazione si trova.

Le figure seguenti mostrano anche una forte variabilità spaziale dei risultati di contributo percentuale. Infatti, le quote in corrispondenza delle stazioni variano in base alle loro posizioni geografiche perché l'impatto delle emissioni da una regione esterna tende logicamente a diminuire in funzione della distanza dai confini regionali.

Le emissioni provenienti dalle regioni Rhône-Alpes e Piemonte influenzano fortemente le concentrazioni di PM10 sugli altri territori. Le emissioni della regione Piemonte, difatti, rappresentano oltre il 30% delle concentrazioni nella località valdostana di Donnas. Allo stesso modo, la stazione di Morgex che si trova sul territorio della Valle d'Aosta subisce un forte apporto dalla regione Rhône-Alpes (circa il 30%).

Osserviamo che in tutte le figure i contributi delle emissioni locali in ogni territorio sono relativamente inferiori in estate rispetto all'inverno e che i contributi della zona esterna all'area Alcotra sono spesso più rilevanti in estate. Questo può essere spiegato principalmente in base alle condizioni meteorologiche del periodo invernale scelto, caratterizzato da un'atmosfera stabile per molti giorni che ha favorito quindi l'accumulo di inquinamento. Infatti, quando i movimenti dell'atmosfera sono limitati a causa di condizioni anticicloniche, come durante i periodi invernali definiti "stabili", le masse d'aria vengono caricate nel tempo dagli inquinanti emessi negli strati inferiori. In assenza di vento per la dispersione, le concentrazioni aumenteranno in seguito alla stagnazione delle emissioni. Poi, quando il tempo diventa perturbato (in determinate condizioni SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

meteorologiche), le masse d'aria inizieranno a muoversi, ma l'intensità di questi movimenti dipenderà dalla dimensione delle pianure, dei rilievi e delle zone attraversate.

Entrambe le figure 3.4-13 e 3.4-15 mostrano che i contributi di PACA verso Rhône-Alpes aumentano quando quelli di Rhône-Alpes su PACA diminuiscono e viceversa. Questo anti-correlazione è fortemente dipendente dalla direzione del vento: se il vento viene da Nord, i contributi di Rhône-Alpes su PACA aumentano. In caso di venti da sud, le importazioni da Rhône-Alpes verso la Costa Azzurra sono molto basse, mentre i contributi del PACA sono in rapido aumento. Questo fenomeno di "ribaltamento" degli scambi tra le due regioni in base alla direzione del vento è visibile anche nelle figure 3.4-16b e 3.4-16d che rappresentano l'evoluzione quotidiana dei contributi in due stazioni di queste regioni. I risultati di CAMx mostrano che l'importazione dalla regione Rhône-Alpes in territorio PACA sembra essere importante in diverse stazioni di questa regione in inverno (figura 3.4-15a). Tale fenomeno può essere spiegato con la direzione del vento prevalente in questo periodo (da Nord a Sud). L'impatto delle emissioni della regione PACA, invece, è relativamente importante in corrispondenza di alcune stazioni della regione Rhône-Alpes durante il periodo estivo, come nel caso del sito rurale di Drôme (figura 3.4-13). Questo fenomeno può essere spiegato da un vento da sud prevalente durante l'episodio estivo.

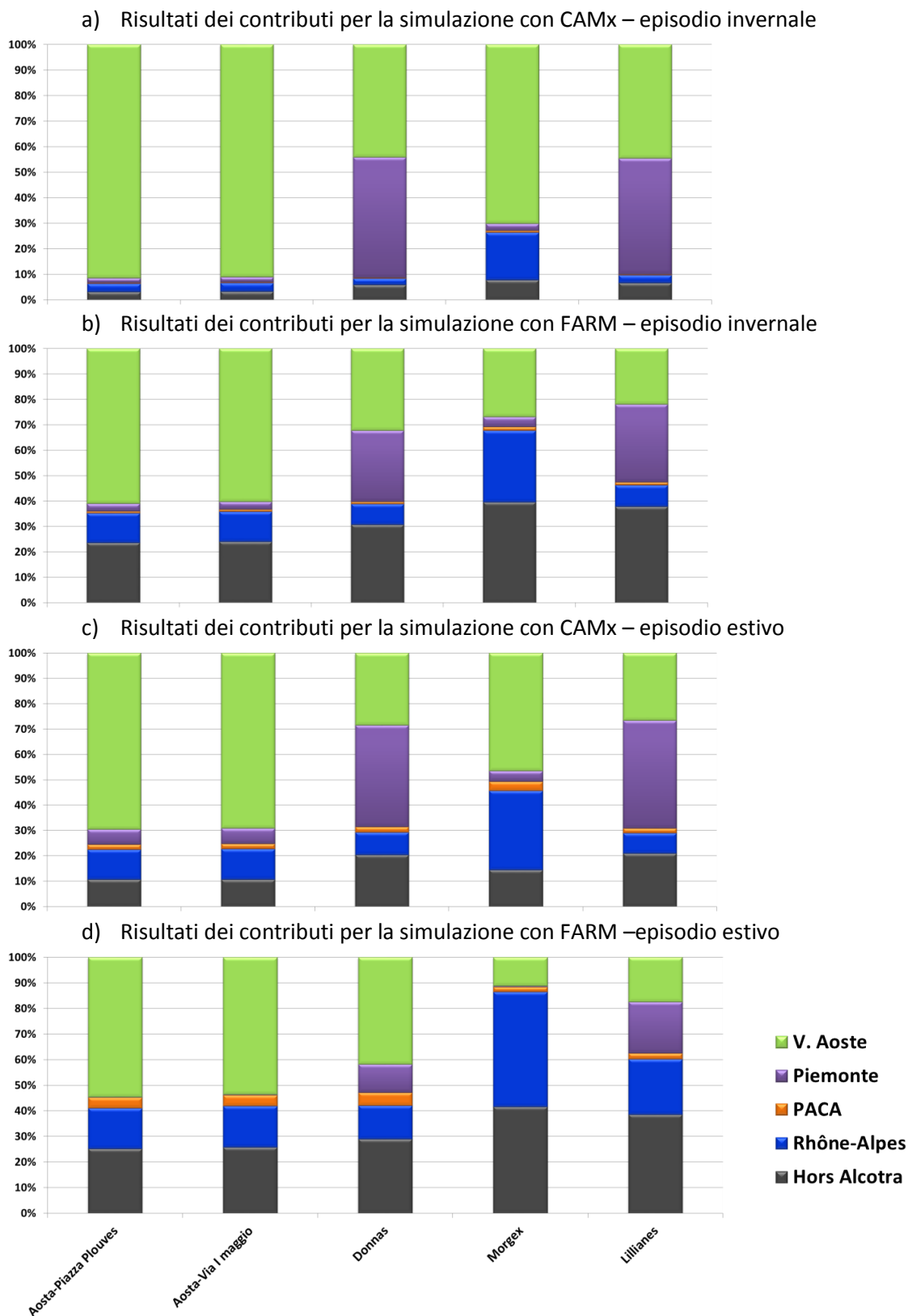


Figura 3.4-12 : Contributi percentuali di ogni regione in corrispondenza delle stazioni della regione Valle d'Aosta.

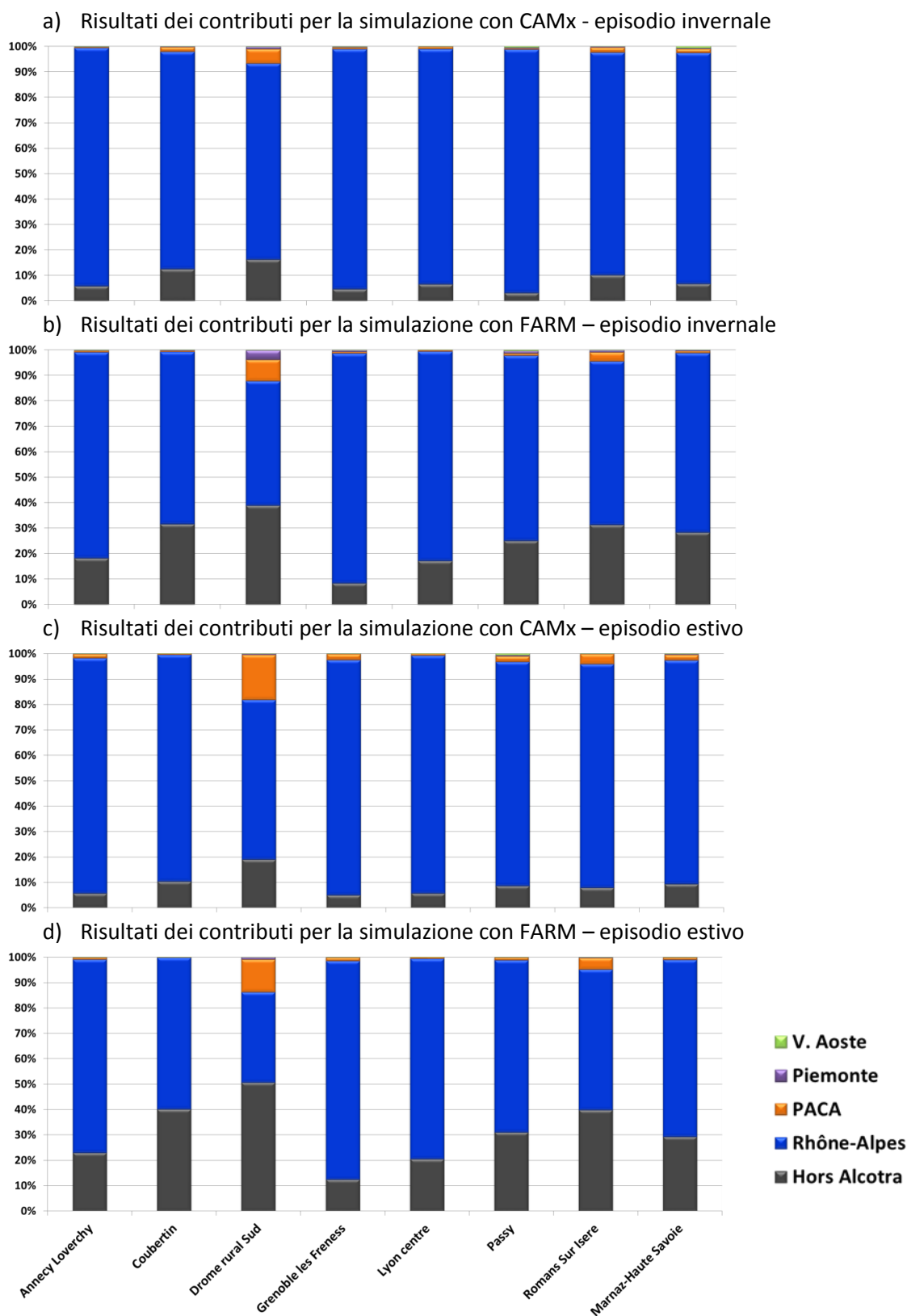


Figura 3.4-13: Contributi percentuali di ogni regione in corrispondenza delle stazioni della regione Rhône-Alpes.

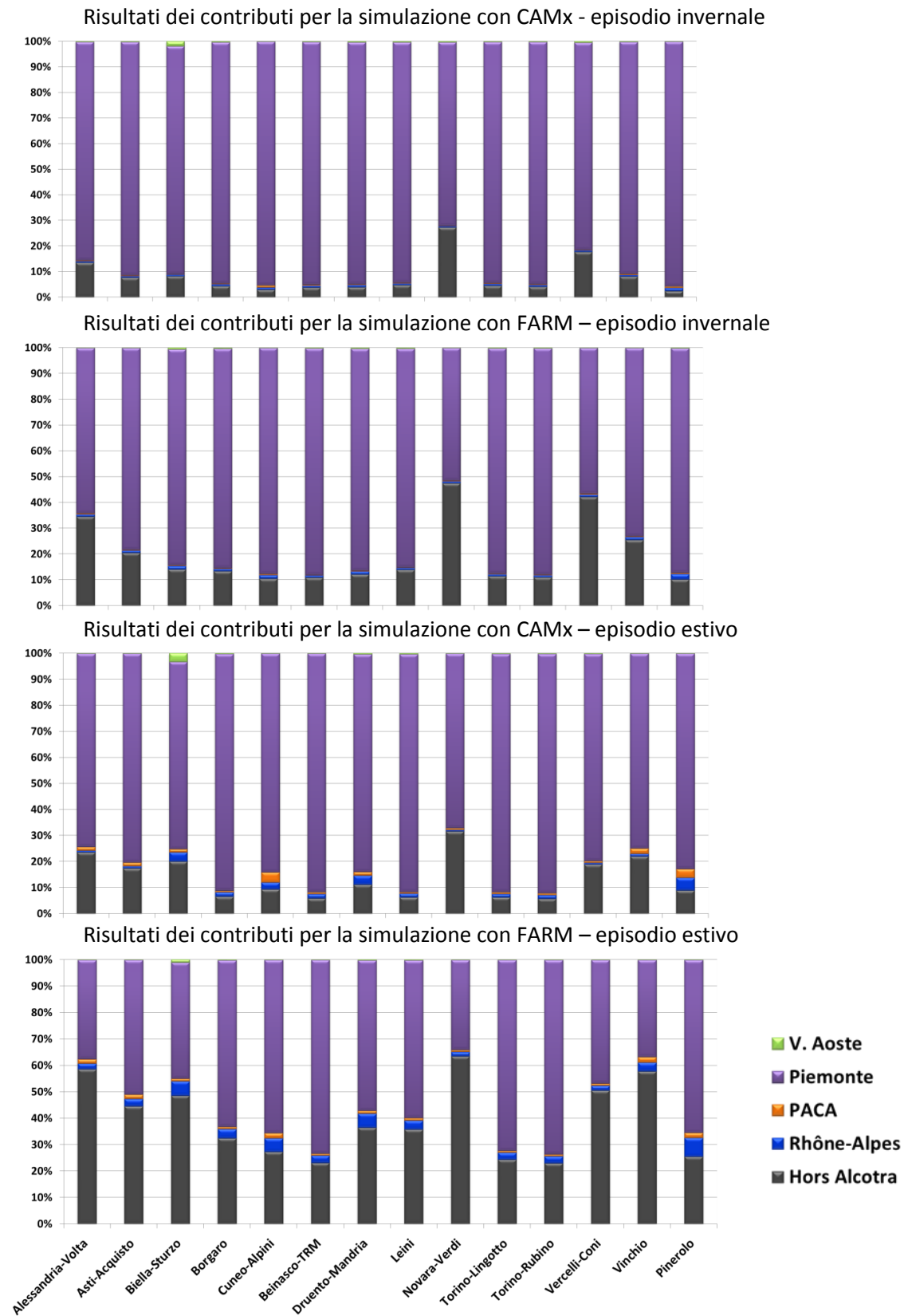


Figura 3.4-14: Contributi percentuali di ogni regione in corrispondenza delle stazioni della regione Piemonte.

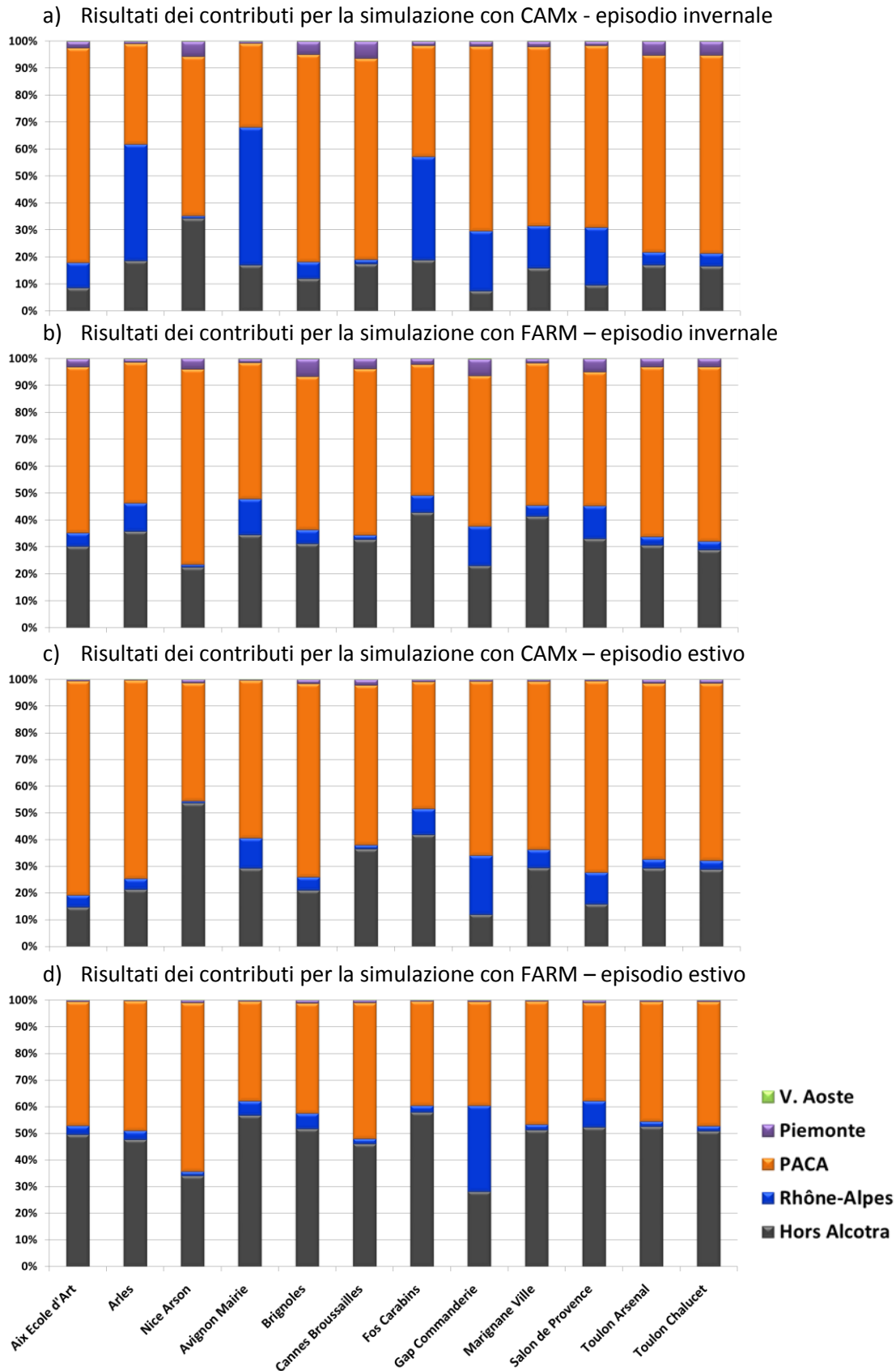


Figura 3.4-15: Contributi percentuali di ogni regione in corrispondenza delle stazioni della regione PACA.

3.4.3.3 Variazioni temporali (giornaliere) dei contributi di ogni regione

L'impatto di ciascuna regione varia sia geograficamente che temporalmente. Determinati periodi ed alcune condizioni meteorologiche risultano maggiormente favorevoli al trasporto interregionale dell'inquinamento. Si nota tale fenomeno nel grafico seguente (figura 3.4-16) in cui è rappresentata l'evoluzione quotidiana dei contributi delle emissioni per area geografica nel periodo invernale in corrispondenza di 4 stazioni di monitoraggio dell'area Alcotra. La quota maggiore dei contributi è associata alle emissioni prodotte all'interno della regione stessa.

Per alcune giornate le concentrazioni di PM10 a Torino - Parco Rubino e ad Aosta - Piazza Plouves sono dovute, in ognuna delle due regioni, unicamente alle emissioni locali. Questo è il caso ad esempio del periodo 25 -29/11/2013 durante il quale tutti i contributi delle altre regioni sono quasi nulli (figure 3.4-16c e 3.4-16d).

In periodi differenti, invece, i contributi provenienti dalle altre regioni possono essere relativamente importanti. Questo è illustrato ad esempio nella figura 3.4-16b, nella quale i contributi della regione Piemonte in corrispondenza della stazione di Nizza-Aeroporto in PACA risultano notevoli nel periodo 22-27/11/2013. L'analisi di questi casi è di particolare interesse proprio perché illustra bene la complessità dei possibili scambi tra le diverse regioni. In effetti, a volte ad un solo giorno di distanza, la distribuzione geografica dei contributi può essere completamente diversa a causa della continua variabilità della meteorologia e, soprattutto, dei flussi d'aria che trasportano l'inquinamento atmosferico.

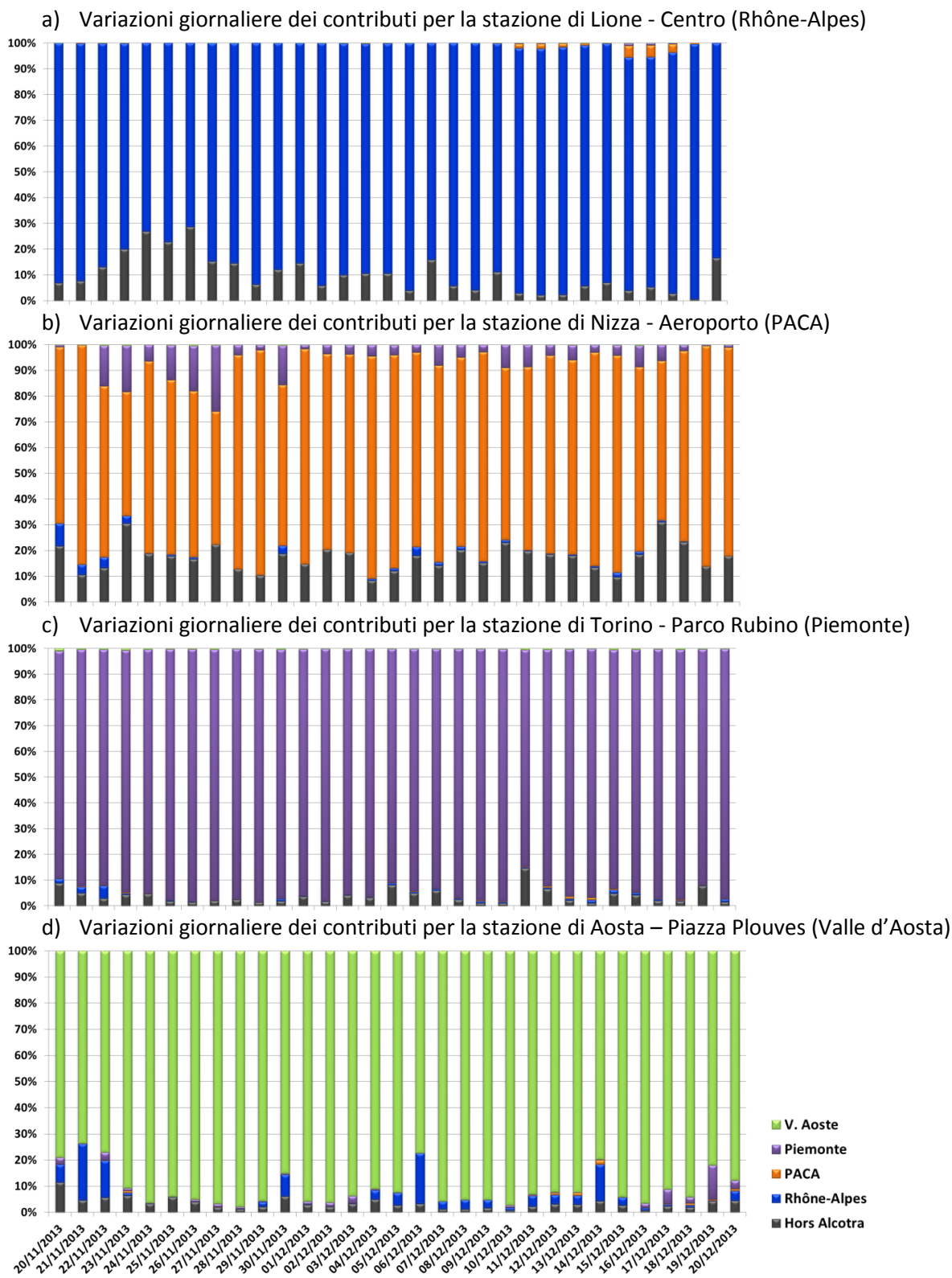


Figura 3.4-16: Andamenti giornalieri dei contributi per settore geografico di provenienza durante il periodo invernale per 4 stazioni dell’area ALCOTRA.

3.4.3.4 Cartografia dei contributi spaziali dei settori geografici

La metodologia sviluppata permette di quantificare per ogni stazione di monitoraggio il contributo di ciascuna regione ed inoltre di poter visualizzare su mappa l'impatto di una singola regione sugli altri territori.

Questi risultati sono illustrati nelle figure 3.4-17, 3.4-18, 3.4-19 e 3.4-20. Ogni figura rappresenta l'impatto delle emissioni da una regione al resto dei territori adiacenti all'interno dell'area Alcotra.

- **Contributo della regione Rhône-Alpes**

Gli scambi avvengono in maggioranza con la regione Provence-Alpes-Côte d'Azur. Ad esempio in inverno, quando si verificano episodi di venti da Nord, le emissioni della regione Rhône-Alpes hanno un'influenza significativa sui territori situati alla foce della Valle del Rodano (Avignone, Arles). Infatti, la presenza di perturbazioni nel Nord Europa come sul Golfo di Genova crea un "fattore di richiamo" sul versante occidentale della zona e provoca un flusso di masse d'aria settentrionali verso Sud. Questo flusso si incanala tra i profili del Massiccio Centrale e delle Alpi, che formano la valle del Rodano, e porta ad una accelerazione del flusso. Al termine della valle, le masse d'aria si spostano ad est per andare a dirigersi verso la depressione nel Golfo di Genova. La conformazione geografica delle regioni PACA e Rhône-Alpes favorisce gli scambi atmosferici attraverso la valle del Rodano. Tuttavia, questa particolare situazione meteorologica è spesso associata a venti ntensi (Mistral) che favoriscono la dispersione degli inquinanti e limitano gli episodi di inquinamento.

La Valle d'Aosta è saltuariamente influenzata dalle emissioni della regione Rhône-Alpes. Ai confini più del 20% delle concentrazioni della Valle d'Aosta si riferiscono alle emissioni della regione Rhône-Alpes. L'impatto medio sul Piemonte è inferiore, con un contributo di circa il 5% che si limita ai confini.

- **Contributo della regione PACA**

L'impatto delle emissioni della regione Provence-Alpes-Côte d'Azur sulla regione del Rhône-Alpes é focalizzata a Sud e sulla Valle del Rodano. Vicino al confine con Rhône-Alpes, l'impatto delle emissioni del PACA supera il 10% sulla media durante l'estate. L'impatto di questa regione sulla Valle d'Aosta è quasi nullo, e riguarda soltanto i confini con i territori di Piemonte e Rhône-Alpes.

- **Contributo della regione Piemonte**

Quasi tutto il territorio della Valle d'Aosta è sotto l'influenza delle emissioni provenienti dalla regione Piemonte. Il contributo ai confini arriva a circa il 20%. L'impatto sulle regioni francesi è minore, ma resta comunque significativo in particolare alle frontiere (10%). La grande maggioranza del territorio del PACA è sotto l'influenza debole, ma comunque presente, del Piemonte. Infatti, in inverno, le figure 3.4-18 e 3.4-19 mostrano come, in determinate condizioni atmosferiche, le emissioni provenienti dalla regione Piemonte possano riguardare a sud la regione Liguria e raggiungere la costa orientale della regione PACA. Allo stesso modo altri scambi possono avvenire tra le due regioni, soprattutto attraverso la zona costiera. In determinate condizioni sinottiche, le

masse d'aria provenienti dalla valle del Po scendono verso la costa e si snodano verso ovest fino a dirigersi verso le regioni costiere del PACA. In assenza di pioggia che possa dilavare gli inquinanti sospesi nell'atmosfera, queste condizioni possono causare uno spostamento di masse d'aria inquinate ai territori confinanti. In alcuni casi, le masse d'aria possono anche risalire da Sud verso Nord. Questo fenomeno è spesso associato a masse d'aria calda provenienti dall'area nordafricana.

- ***Contributo della regione Valle d'Aosta***

L'impatto delle emissioni dalla Valle d'Aosta si concentra principalmente all'interno del proprio territorio ed è molto limitato verso altre regioni (solo il 5%). In effetti, i rilievi esistenti che circondano questa regione determinano la direzione percorsa dalle masse d'aria. Le Alpi creano in tal modo una barriera naturale tra le regioni francesi e quelle italiane.

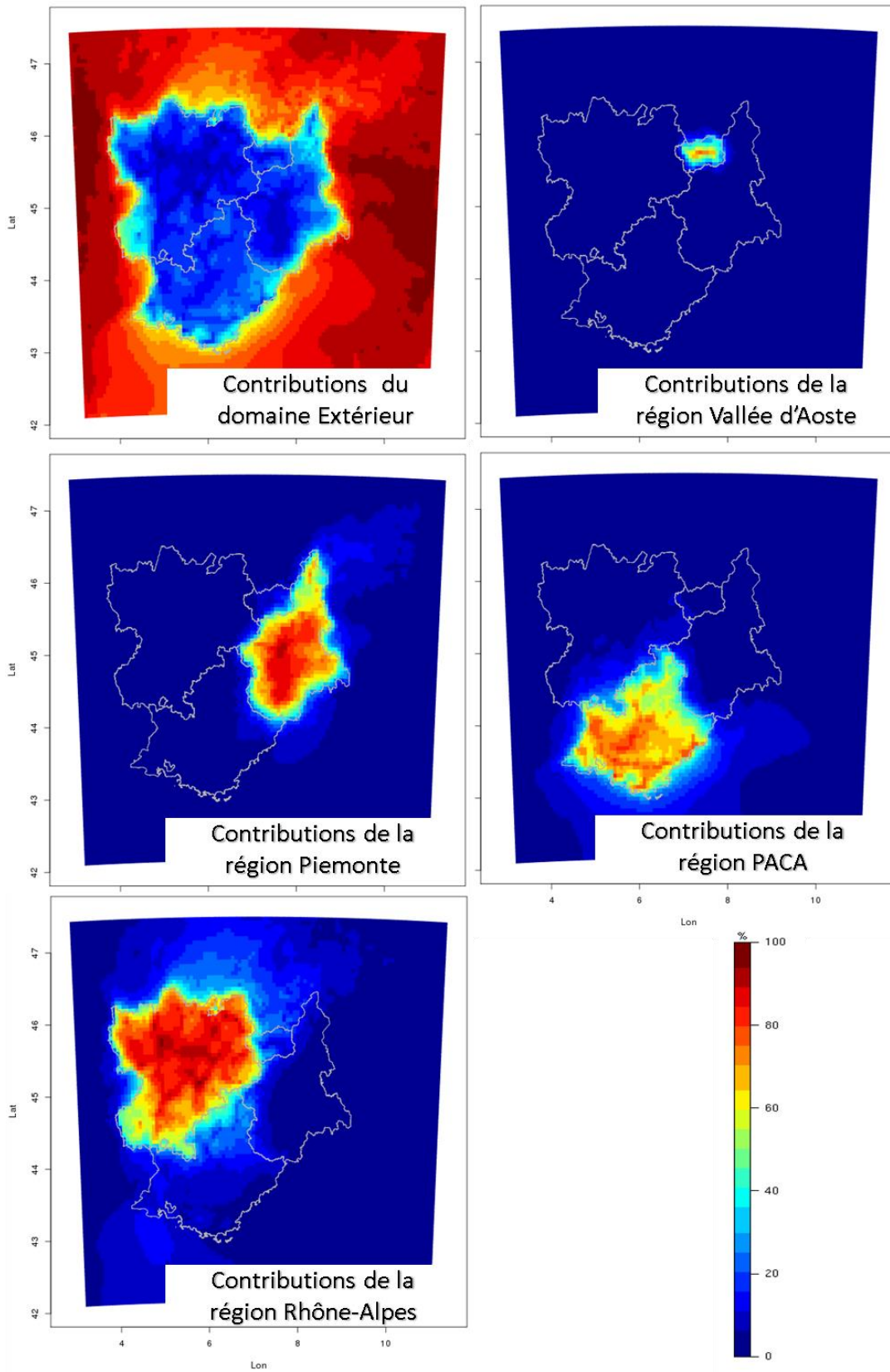


Figura 3.4-17: Mappe dei contributi di PM10 originati da ogni regione sugli altri territori – risultati calcolati da CAMx per l'episodio estivo.

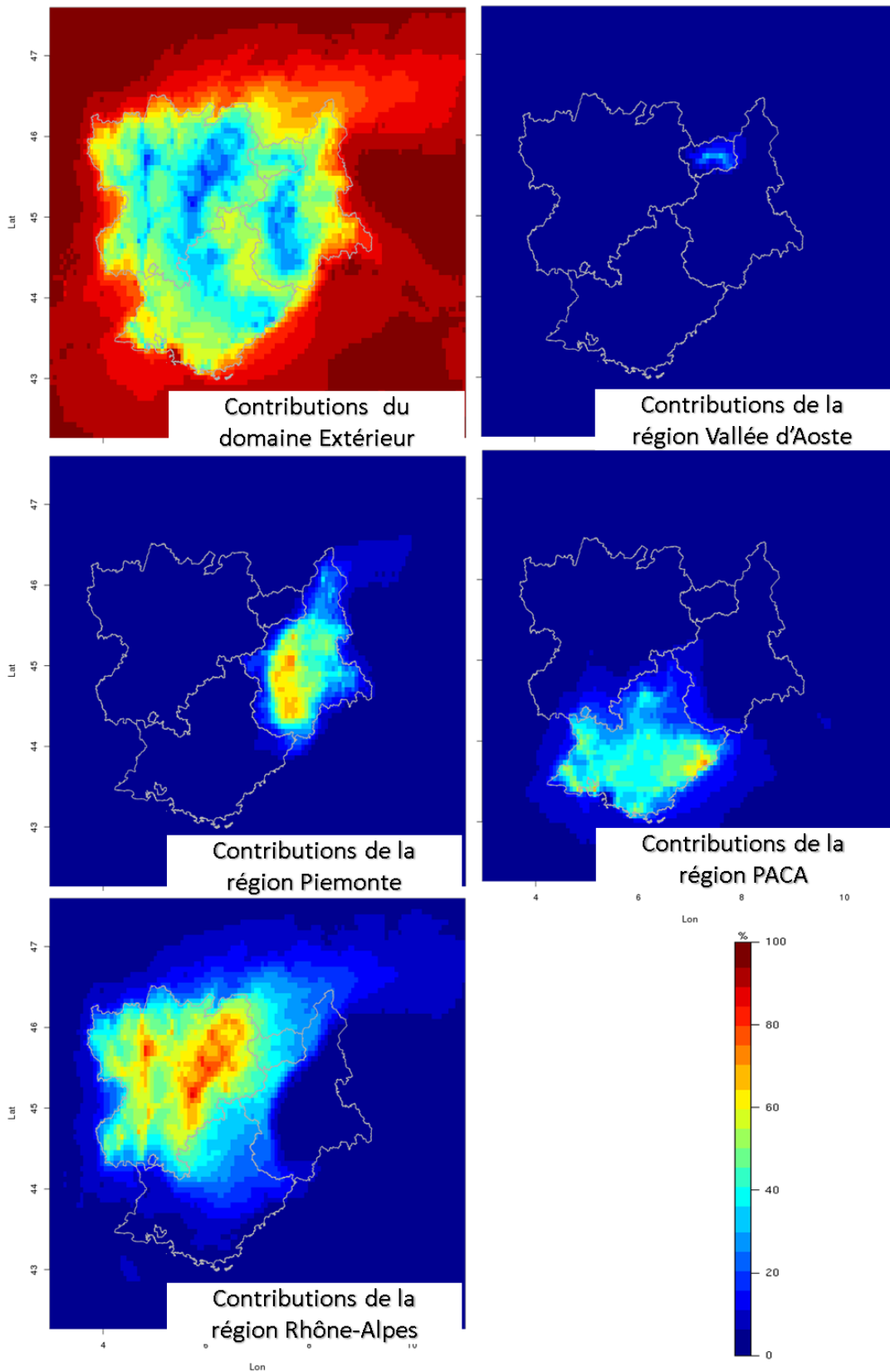


Figura 3.4-18: Mappe dei contributi di PM10 originati da ogni regione sugli altri territori – risultati calcolati da FARM per l'episodio estivo.

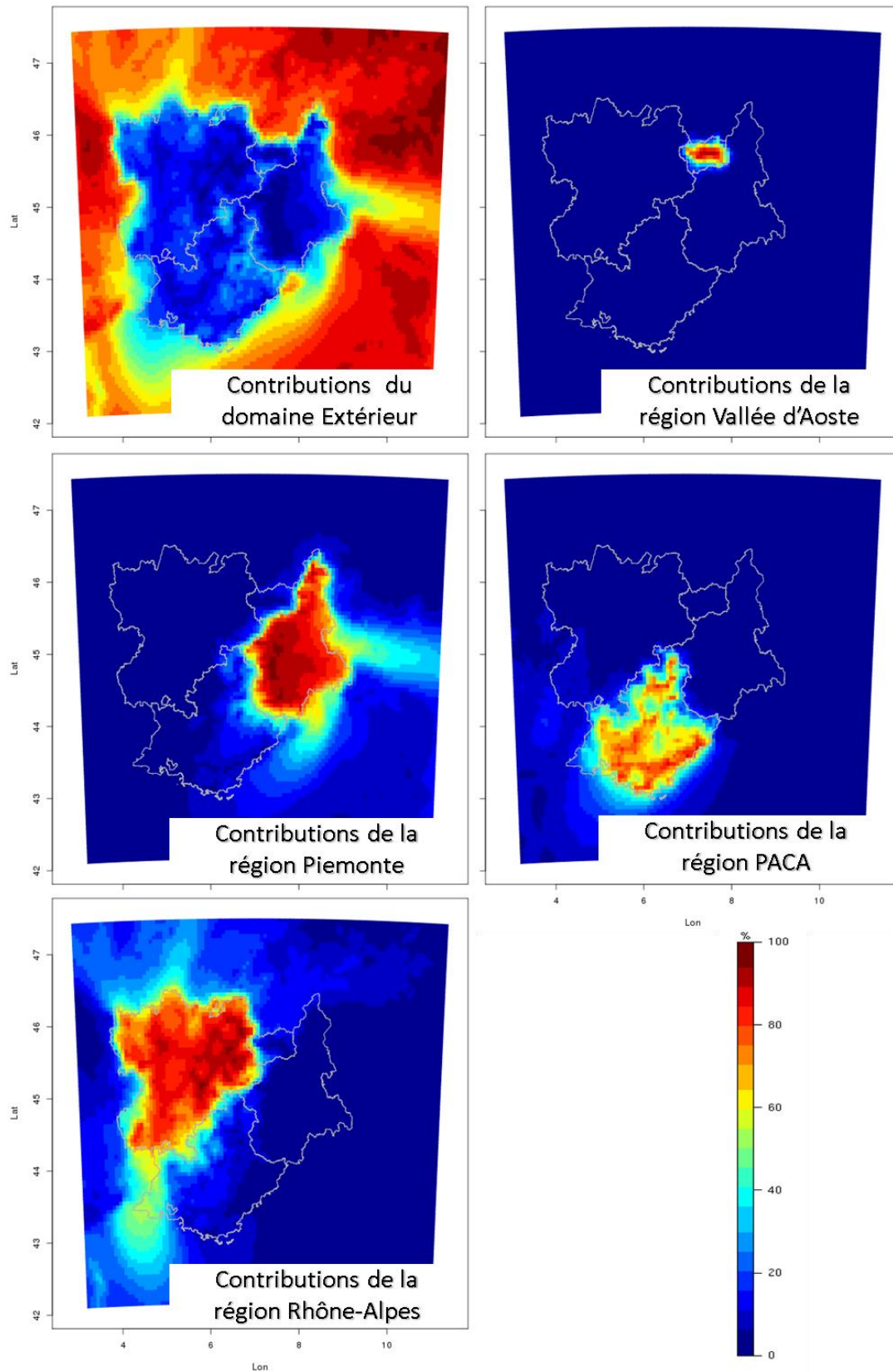


Figura 3.4-19: Mappe dei contributi di PM10 originati da ogni regione sugli altri territori – risultati calcolati da CAMx per l'episodio invernale.

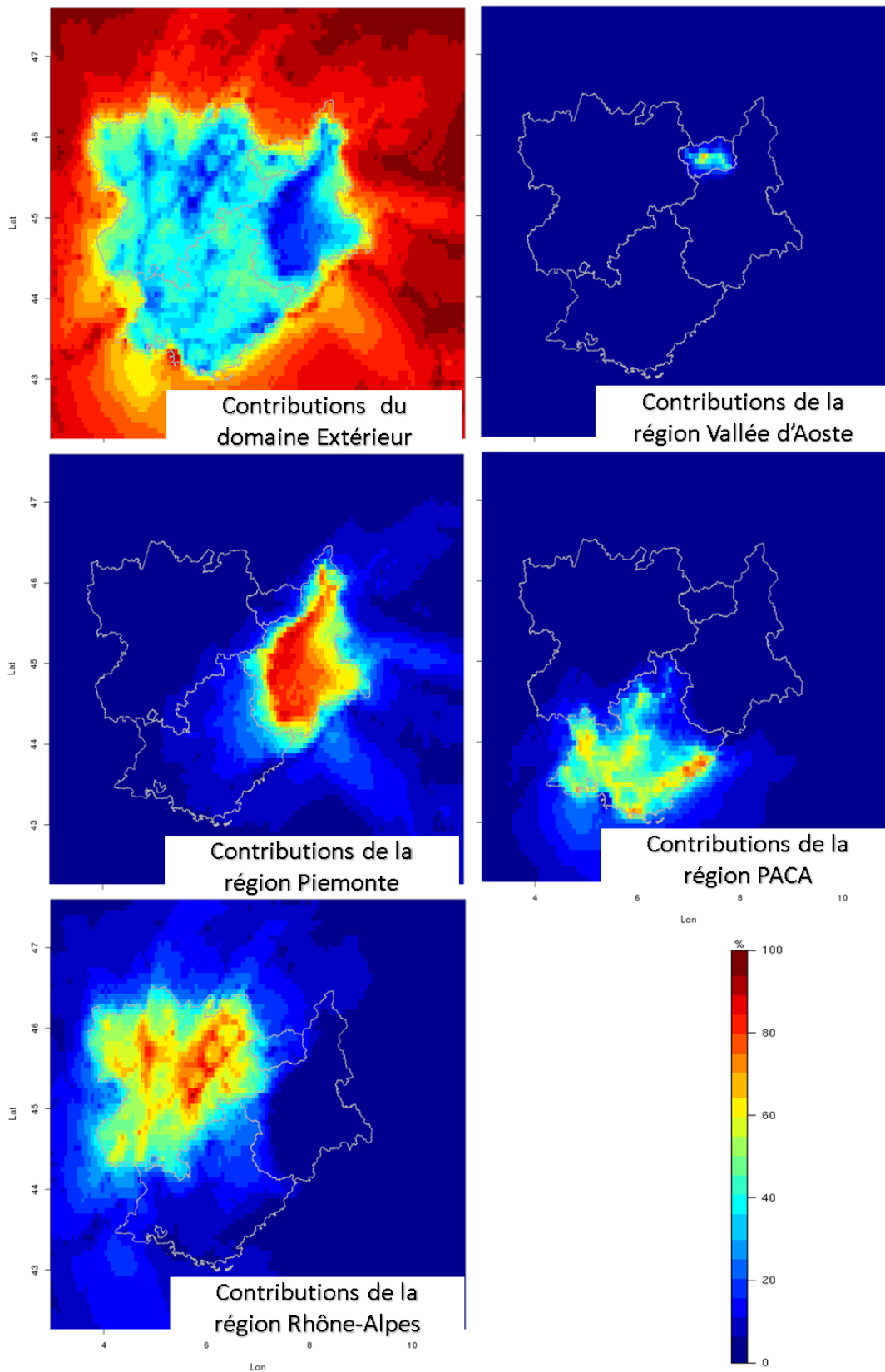


Figura 3.4-20: Mappe dei contributi di PM10 originati da ogni regione sugli altri territori – risultati calcolati da FARM per l'episodio invernale.

3.4.4 Conclusioni

Al giorno d'oggi, tutta la regione alpina franco-italiana è sottoposta ad un inquinamento legato al particolato che è tra i più importanti e ricorrenti in Europa.

La terza azione del progetto Sh'air è stata focalizzata sull'identificazione delle fonti e il ruolo del trasporto esogeno di questo inquinamento nella zona ALCOTRA. Nel contesto dei contenziosi all'interno dell'Unione Europea, la questione della responsabilità è fondamentale e dovrebbe essere la base per la definizione dei provvedimenti più efficaci per ridurre l'inquinamento.

Per identificare queste responsabilità, è stata istituita una nuova piattaforma di modellazione digitale in base a due diversi modelli di chimica-trasporto FARM e CAMx. Questi strumenti sono stati utilizzati inizialmente per quantificare i contributi di PM10 per settore di attività emissiva in corrispondenza di ciascuna stazione di misura. In un secondo tempo, questo studio ha permesso di stimare l'impatto dell'inquinamento originato da ogni regione sugli altri territori della zona Alcotra.

Si possono evidenziare diverse conclusioni ottenute grazie a questo lavoro:

- i risultati dello studio di interconfronto dei contributi per sorgente di attività ed area geografica indicano globalmente un buon accordo tra i due strumenti modellistici;
- la combustione di biomassa rimane il principale responsabile delle concentrazioni di PM10 sulla maggior parte della zona Alcotra durante il periodo invernale. Questo risultato è particolarmente evidente nelle zone prealpine ed alpine;
- il traffico stradale è il settore che contribuisce maggiormente alle concentrazioni di PM10 durante l'estate, in particolare nei grandi centri urbani della zona Alcotra (Lione in Rhone-Alpes, Torino in Piemonte, Nizza in PACA);
- in ogni regione i maggiori contributi per l'inquinamento di particolato derivano dalle emissioni locali;
- i trasferimenti interregionali di inquinamento dipendono principalmente dalle condizioni climatiche ed orografiche (montagne, valli, ...),
- in generale, per ciascuna regione partner le importazioni dall'esterno sono maggiori in estate che in inverno, sia tra le regioni Alcotra sia con il dominio esterno.

E' importante notare, tuttavia, che lo studio condotto in questo progetto si è incentrato su due periodi di tempo con particolari condizioni meteorologiche e specifici livelli di inquinamento: molto bassi in estate e molto alti in inverno.

Inoltre, quasi un quarto del totale del particolato fine nei siti di misura deriva da settori di attività che non sono stati analizzati nello studio in questione; il contributo derivante dal dominio esterno è significativo.

Sembra quindi indispensabile proseguire il lavoro analizzando altri periodi di misurazione caratterizzati da altre configurazioni meteorologiche e identificando con maggiore precisione i SH'AIR – Action 3 : Recherche de sources et responsabilités dans la pollution particulaire

contributi giunti al di fuori della regione Alcotra (Svizzera, Nord Africa ...) ed i settori non considerati in questo studio.

La piena comprensione di tutti questi processi richiede ancora molto lavoro per capire meglio la complessità dei fenomeni e stabilire dei risultati generali.

3.4.5 Sintesi

I sistemi di modellistica sviluppati hanno permesso di valutare quali siano i diversi responsabili dell'inquinamento di particolato sul territorio ALCOTRA. Con il loro utilizzo è stato possibile quantificare le sorgenti di inquinamento sulle concentrazioni di PM10 in base al settore di attività e l'impatto dell'inquinamento generato da ogni regione sugli altri territori dell'area di studio. Il confronto dei risultati indica un buon accordo tra i codici di calcolo utilizzati.

La combustione della biomassa è il principale contribuente delle concentrazioni di PM10 su gran parte dell'area ALCOTRA durante il periodo invernale. Questo risultato è più marcato nelle zone pre-alpine ed alpine (Figura 1). Durante questo periodo anche il contributo del traffico stradale è importante, in particolare in corrispondenza delle grandi città e degli assi autostradali.

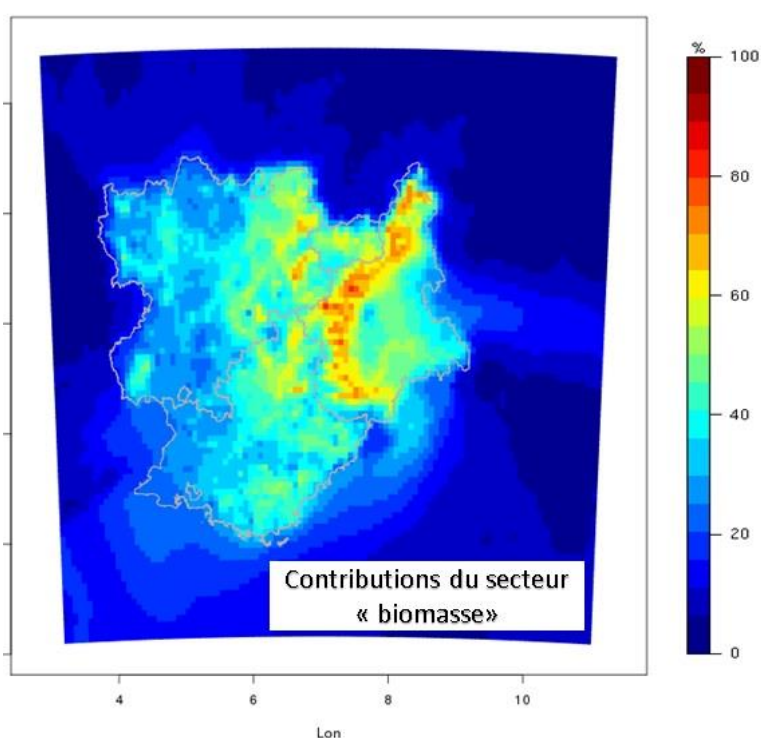


Figura 3.4.5-1: Mappa dei contributi relativi alla combustione di legna durante il periodo invernale.

Nel periodo estivo, il traffico risulta essere il maggiore contributo concentrazioni di polveri, indipendentemente dalla zona di studio (Figura 2). Nelle grandi città come Torino, Nizza o Lione, il contributo medio è vicino al 70%. Nel complesso del territorio ALCOTRA quasi un quarto delle particelle fini è associato a settori non illustrati in questo studio.

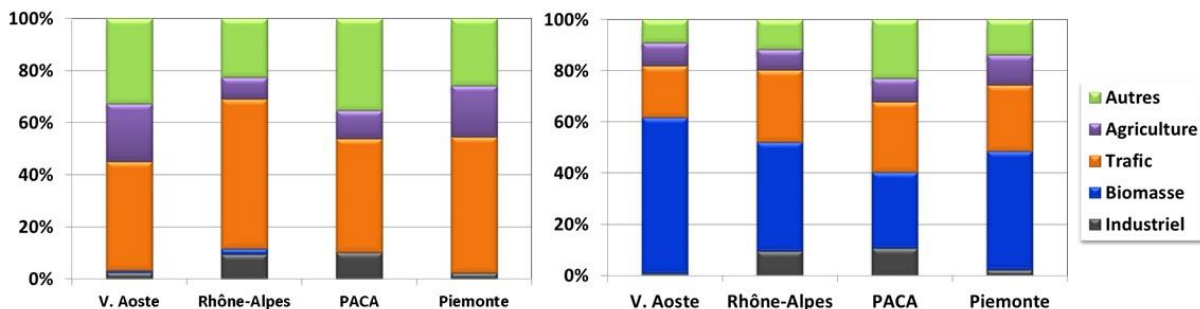


Figura 3.4.5.2: Contributi percentuali per settore di attività nelle regioni partners nel periodo estivo (a sinistra) ed in quello invernale (a destra).

A livello geografico, i maggiori contributi alla polveri sottili in ogni regione provengono dalle emissioni locali (figura 3). I trasferimenti interregionali di inquinamento dipendono principalmente dalle condizioni meteo e dell'orografia, che possono bloccare o canalizzare il trasporto di masse d'aria (figura 4). Le importazioni dalle regioni esterne alla zona ALCOTRA sono maggiori in estate che in inverno per ogni regione partner. Gli scambi tra le diverse regioni della zona ALCOTRA risultano generalmente bassi, ma possono essere significativi per episodi di trasporto particolari legati alla meteo.

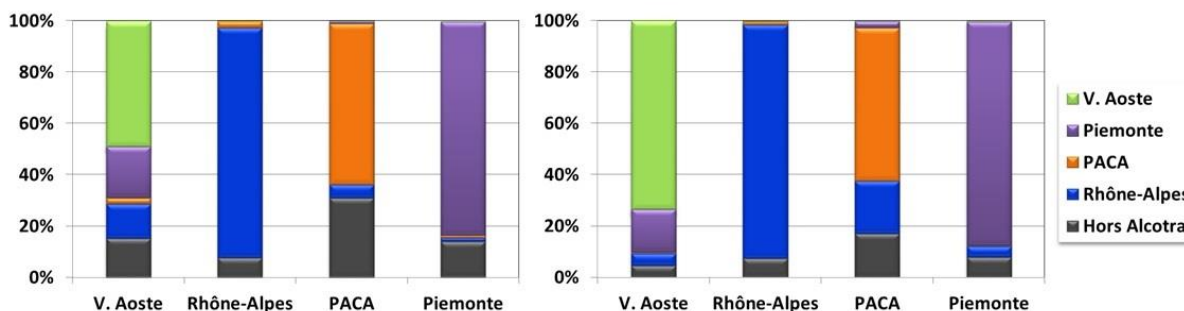


Figura 3.4.5-3: Contributi percentuali per settore geografico di provenienza nelle 4 regioni durante il periodo estivo (a sinistra) ed invernale (a destra).

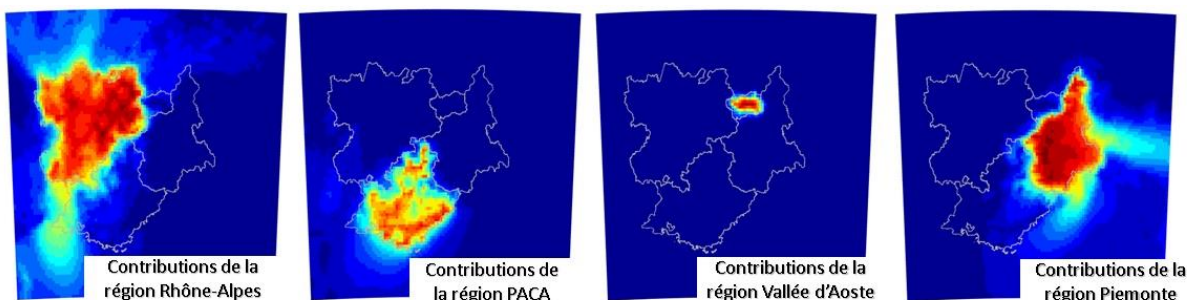


Figura 3.4.5-4: Mappa dei contributi provenienti da ogni regione sulle concentrazioni di PM10 durante il periodo invernale.



ANNEXES

ALLEGATI

ANNEXE A / ALLEGATO A

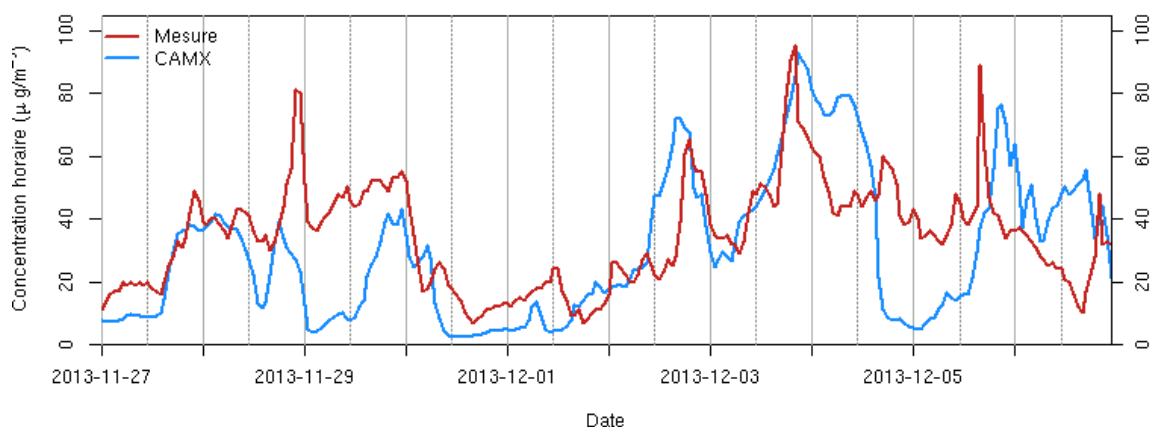
Evolution temporelle horaire de la concentration en PM10 aux différentes stations de la région Rhône-Alpes pour la période 27/11/2013 – 07/12/2013.

Comparaison entre les mesures (en rouge) et les résultats du modèle CAMx (en bleu).

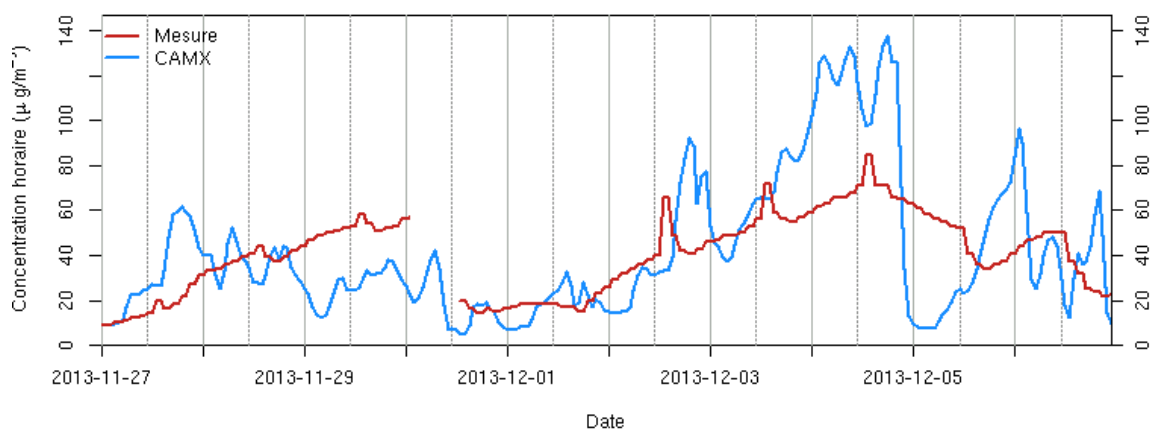
Evoluzione temporale oraria delle concentrazioni di PM10 nelle diverse stazioni della regione Rhône-Alpes per il periodo 27/11/2013 – 07/12/2013.

Confronto tra le misure (in rosso) e i risultati del modello CAMx (in blu).

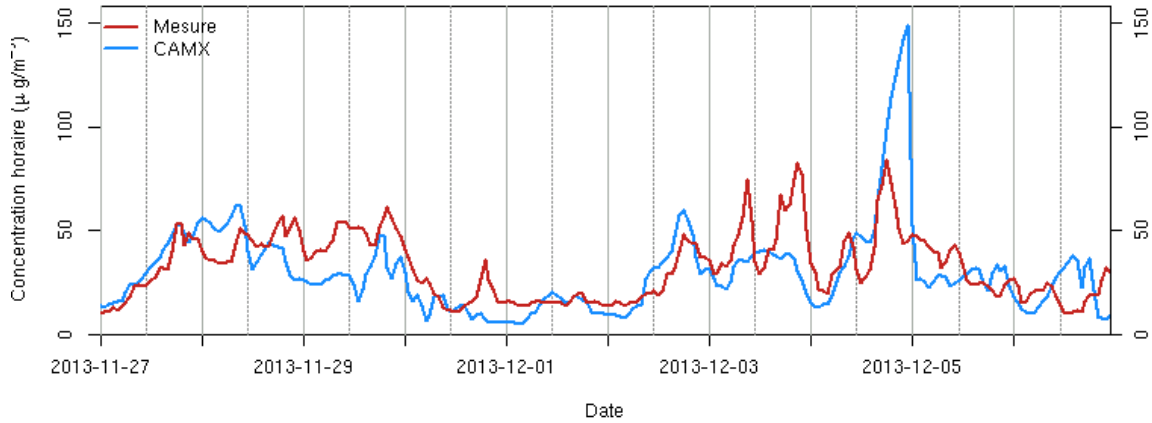
Station/stazione Bourg en Bresse



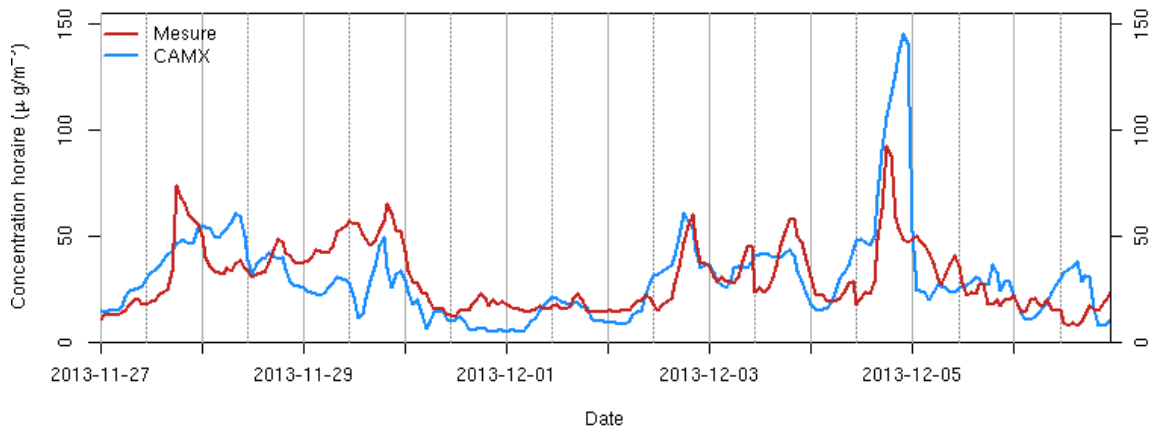
Station/stazione Bourgoin-Jallieu



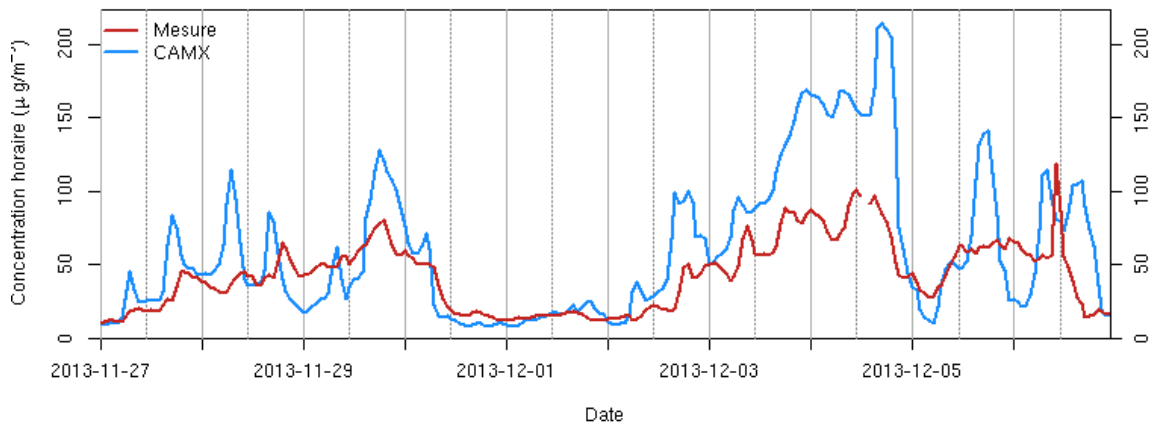
Station/stazione Coubertin



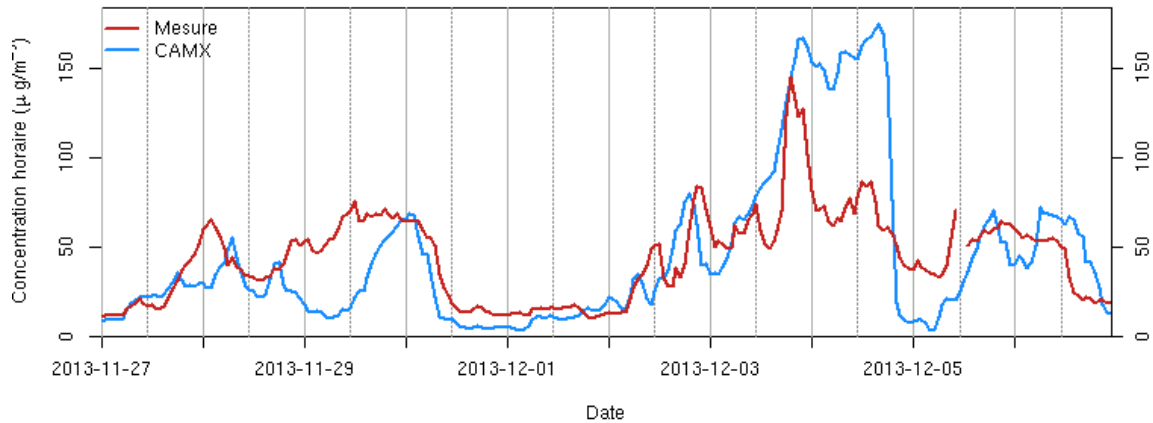
Station/stazione La Talaudière



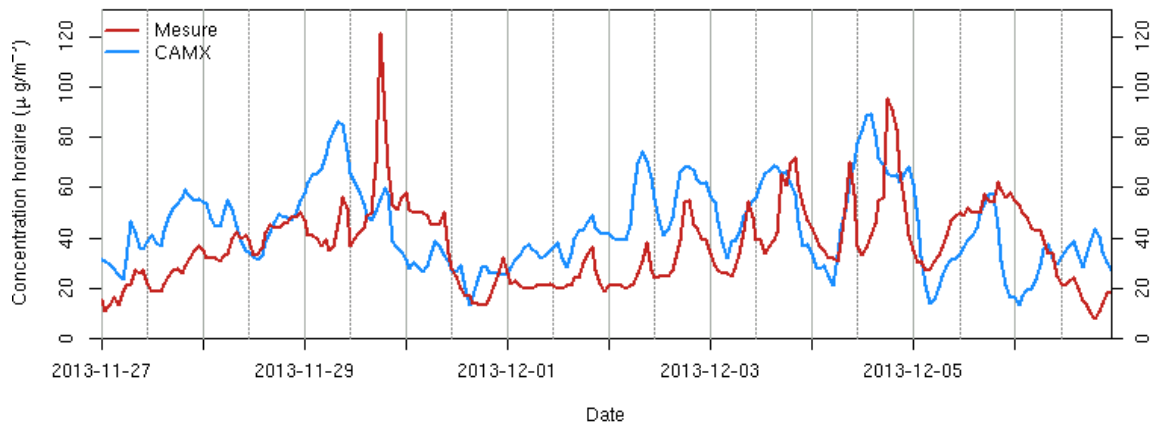
Station/stazione Ternay



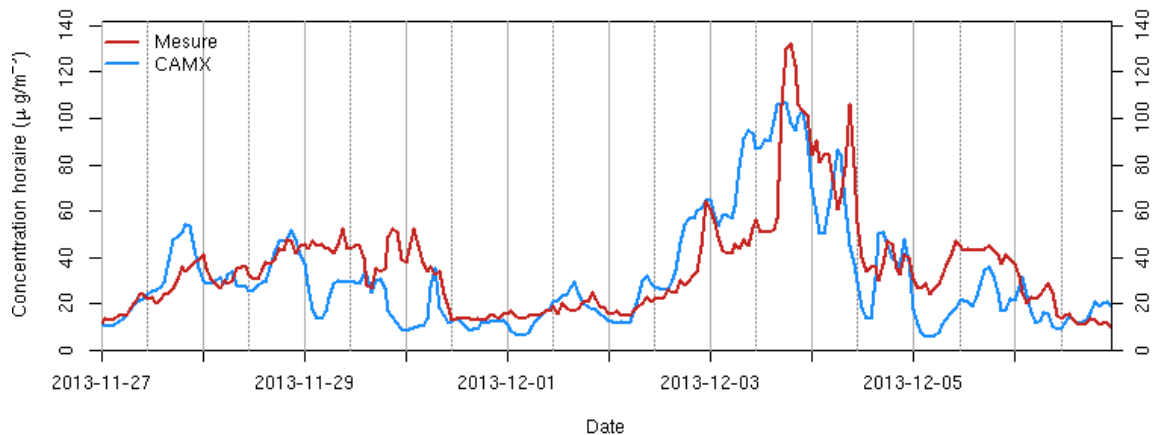
Station/stazione Vaulx en Velin



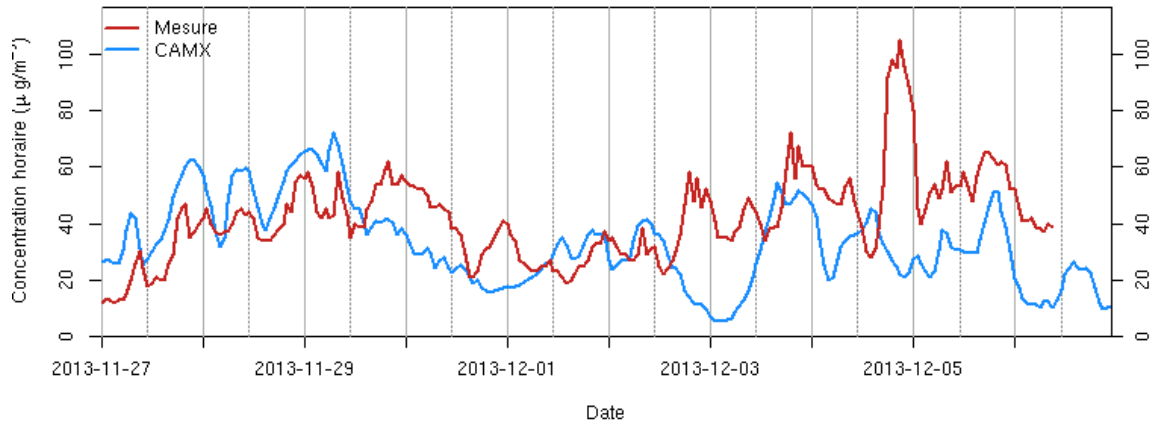
Station/stazione Voiron urbain



Station/stazione Romans Sur Isère



Station/stazione Saint Martin d'Hères



ANNEXE B / ALLEGATO B

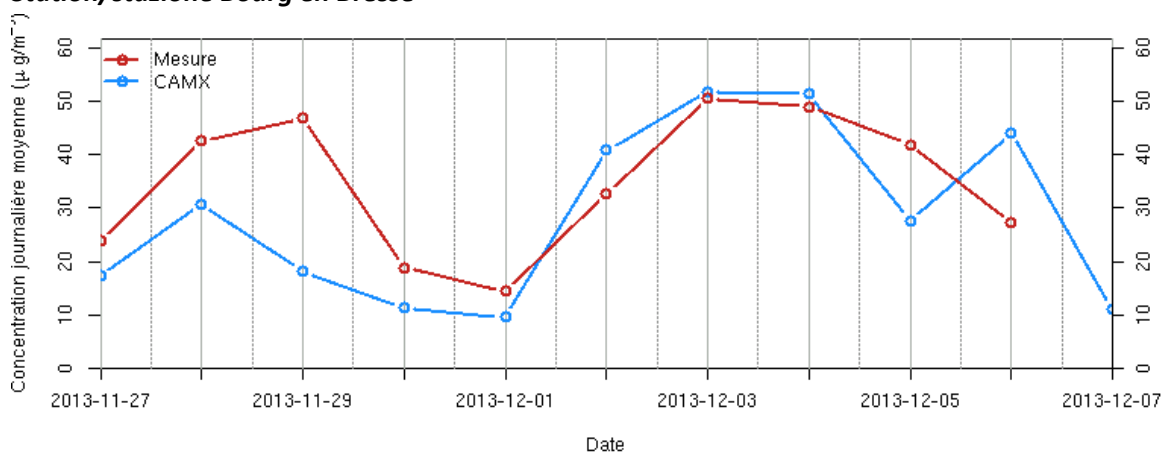
Evolution temporelle journalière de la concentration en PM10 aux différentes stations de la région Rhône-Alpes pour la période 27/11/2013 – 07/12/2013.

Comparaison entre les mesures (en rouge) et les résultats du modèle CAMx (en bleu).

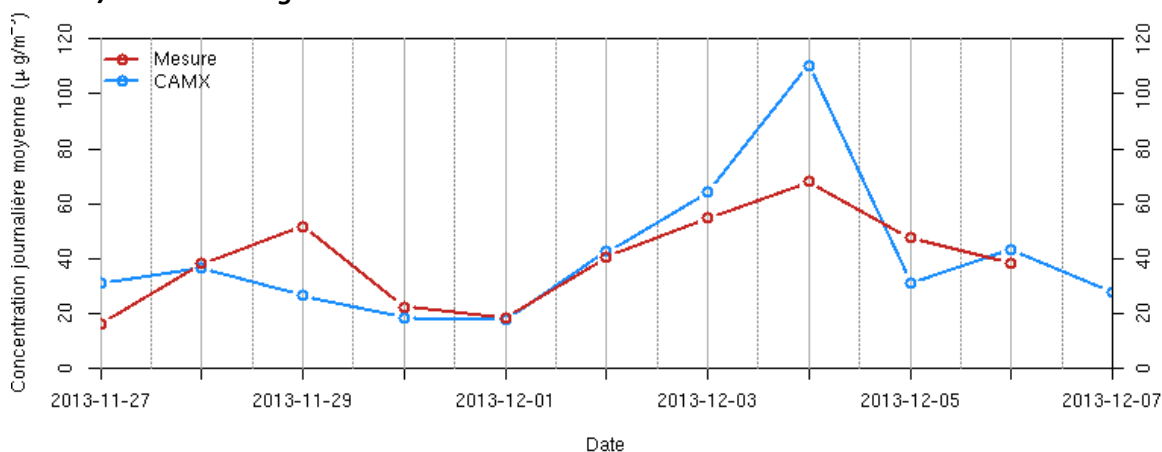
Evoluzione temporale giornaliera delle concentrazioni di PM10 nelle diverse stazioni della regione Rhône-Alpes per il periodo 27/11/2013 – 07/12/2013.

Confronto tra le misure (in rosso) e i risultati del modello CAMx (in blu).

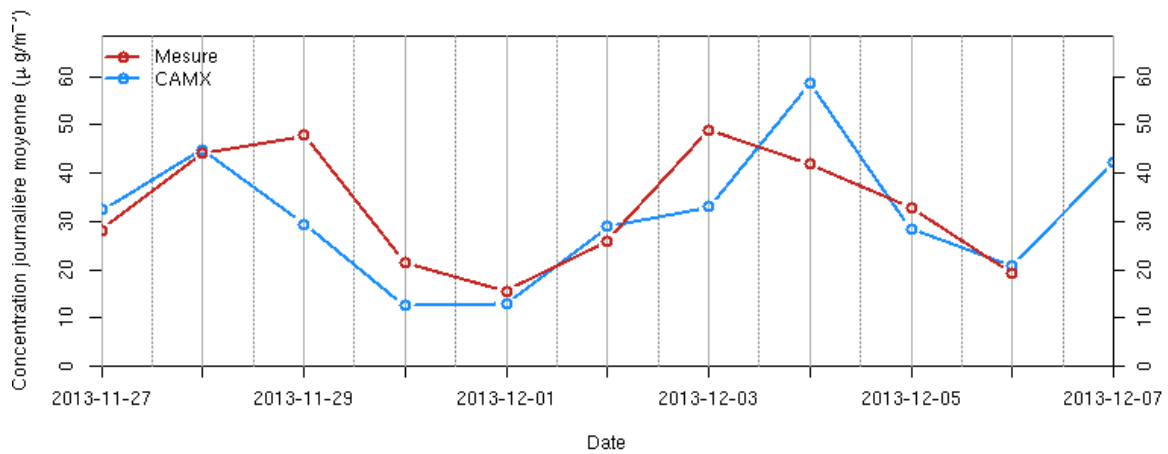
Station/stazione Bourg en Bresse



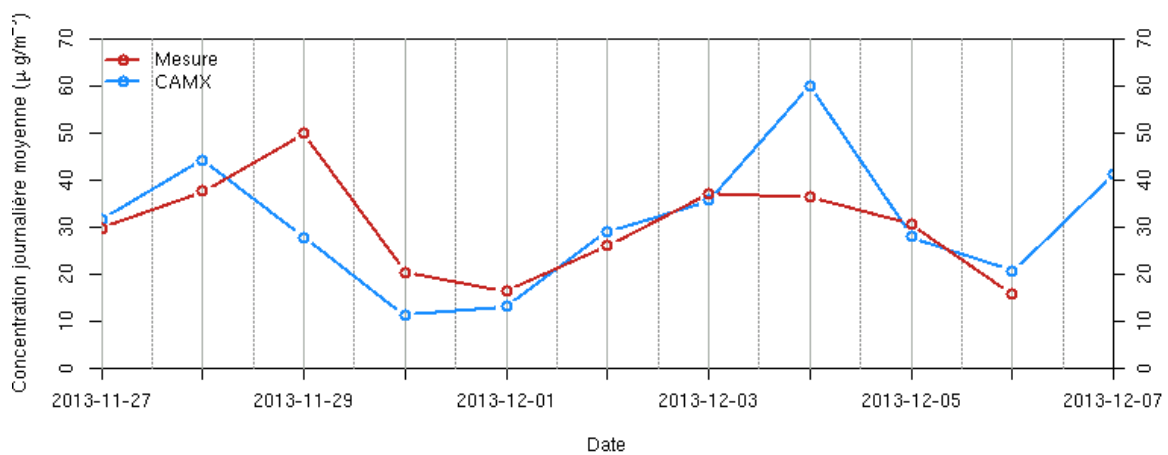
Station/stazione Bourgoin-Jallieu



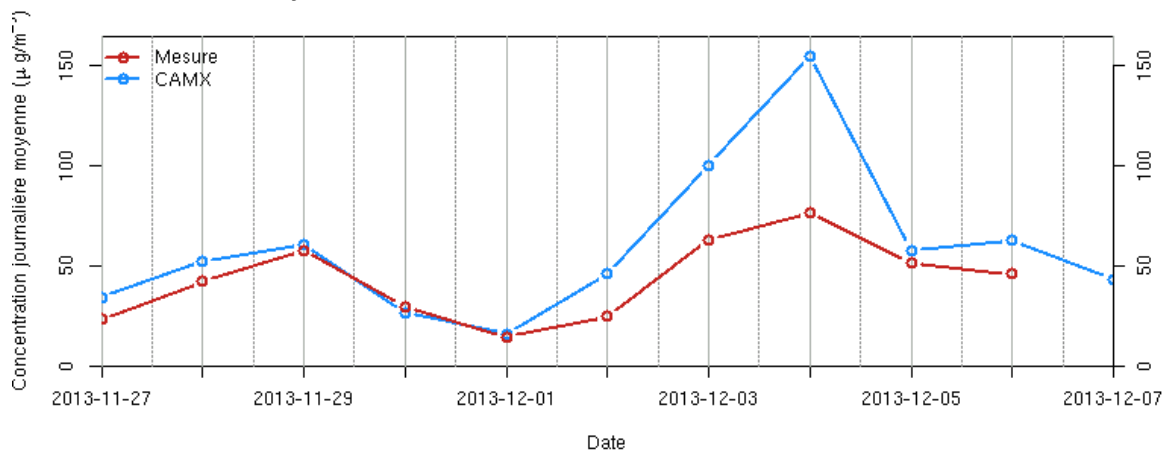
Station/stazione Coubertin



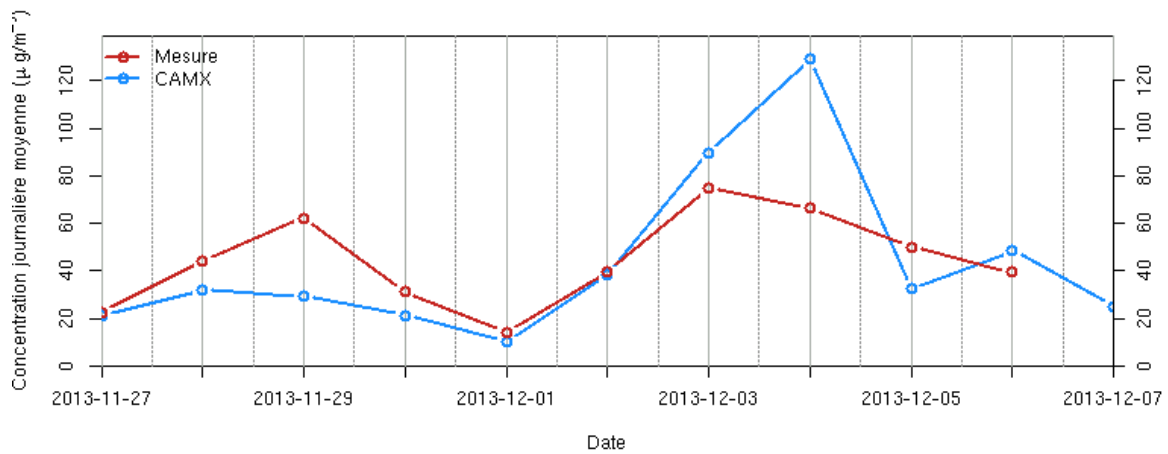
Station/stazione La Talaudière



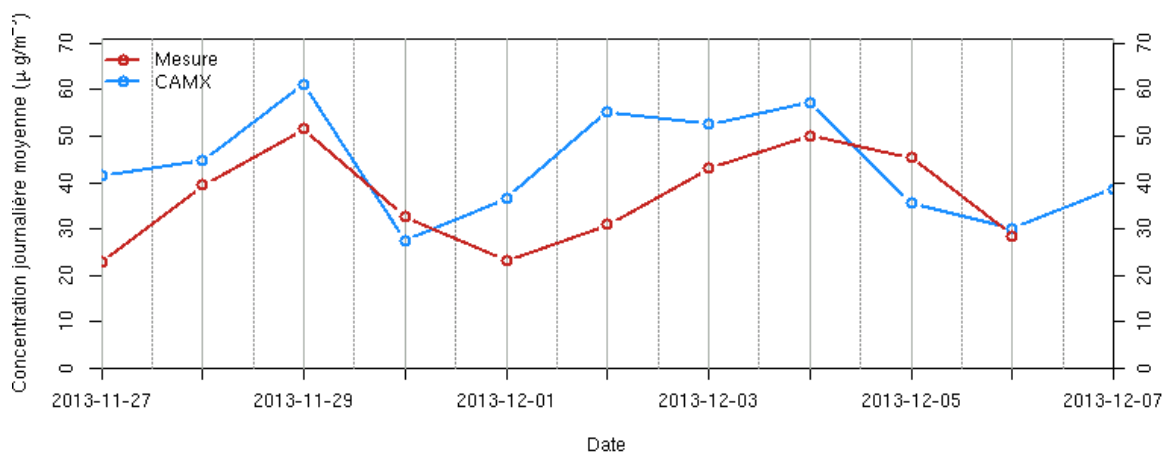
Station/stazione Ternay



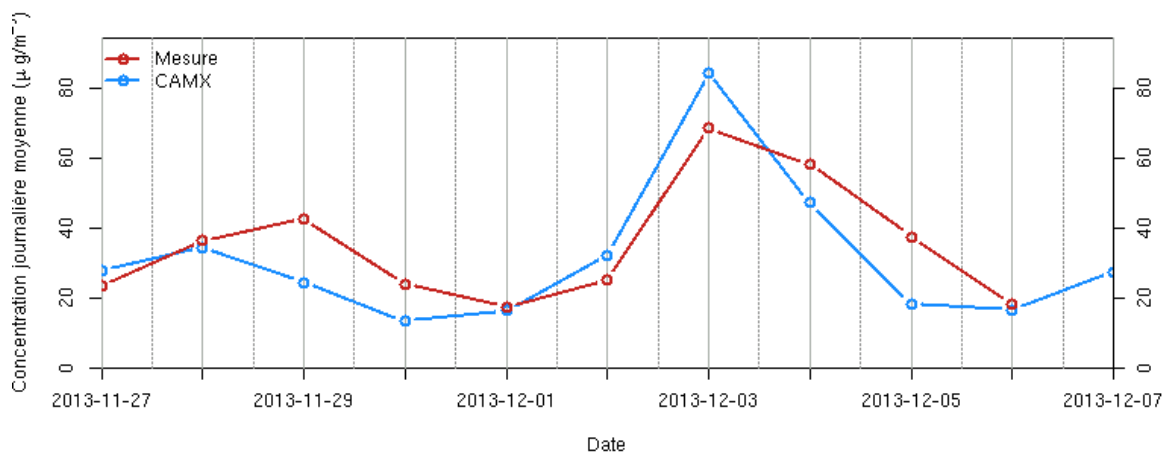
Station/stazione Vaulx en Velin



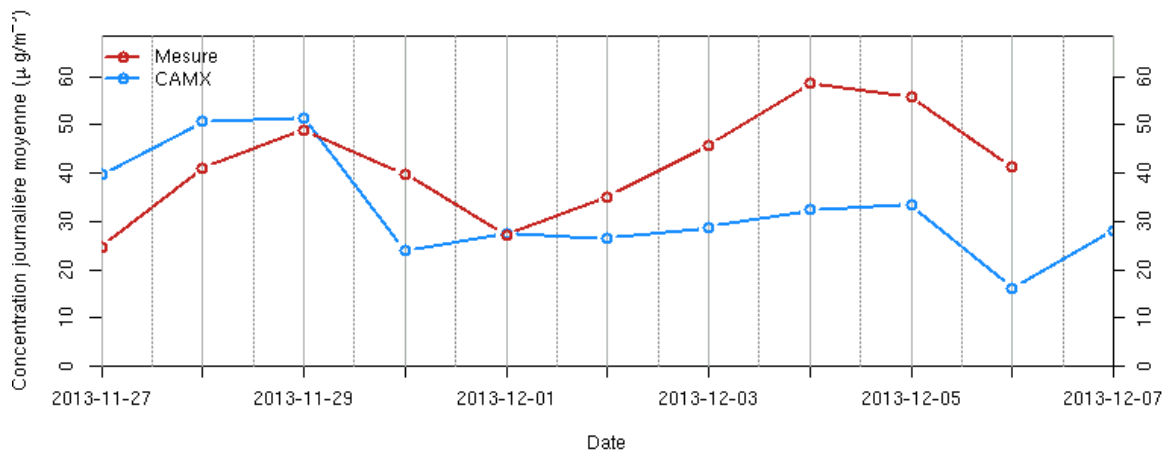
Station/stazione Voiron urbain



Station/stazione Romans Sur Isère



Station/stazione Saint Martin d'Hères



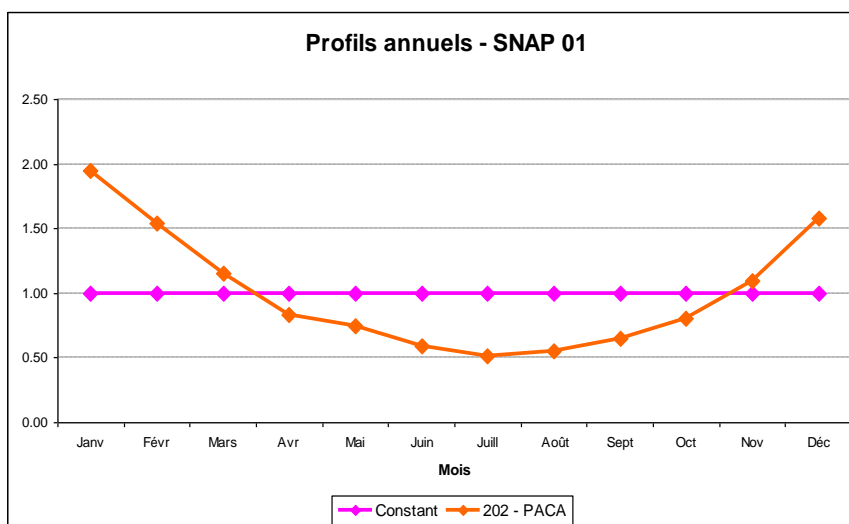
ANNEXE C / ALLEGATO C

SNAP01

« Combustion: industries de l'énergie et de la transformation de l'énergie » / « Combustione: Energia e Industria di Trasformazione »

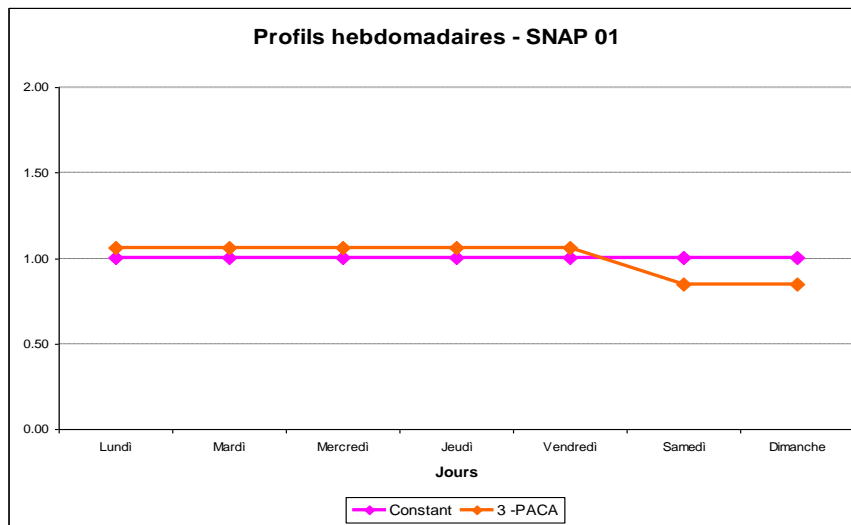
Choix profils / Scelta profili :

- « 202 – PACA » pour les secteurs de la « Production d'électricité » et « Chauffage urbain », position intermédiaire / "202 - PACA" per i settori di "Produzione di energia elettrica" e "Teleriscaldamento" essendo il profilo che si attesta in posizione intermedia;
- « Constant » pour les autres secteurs / "Costante" per gli altri settori.



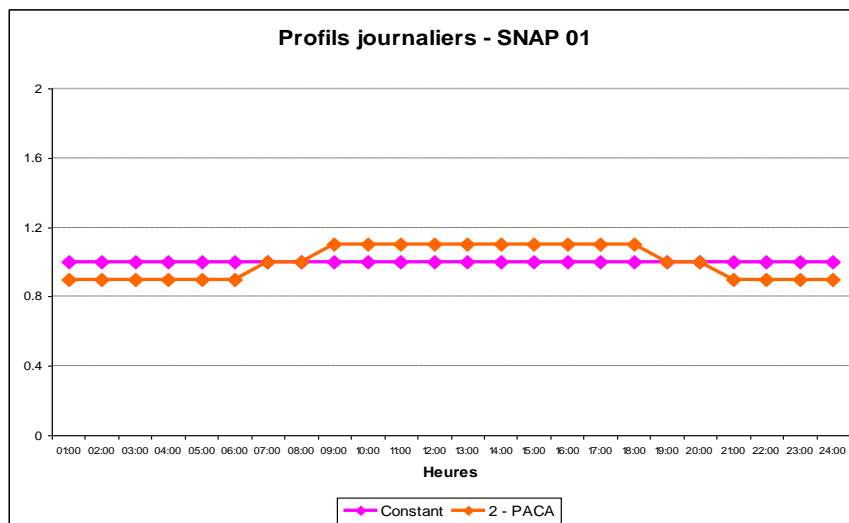
Choix profils / Scelta profili:

- « 3 – PACA » pour les secteurs de la « Production d'électricité » et « Chauffage urbain », position intermédiaire / "3 - PACA" per i settori di "Produzione di energia elettrica" e "Teleriscaldamento" essendo il profilo che si attesta in posizione intermedia;
- « Constant » pour les autres secteurs / "Costante" per gli altri settori



Choix profils / Scelta profili:

- « 2 – PACA » pour les secteurs de la « Production d'électricité » et « Chauffage urbain », position intermédiaire / "2 - PACA" per i settori di "Produzione di energia elettrica" e "Teleriscaldamento" essendo il profilo che si attesta in posizione intermedia;
- « Constant » pour les autres secteurs / "Costante" per gli altri settori.



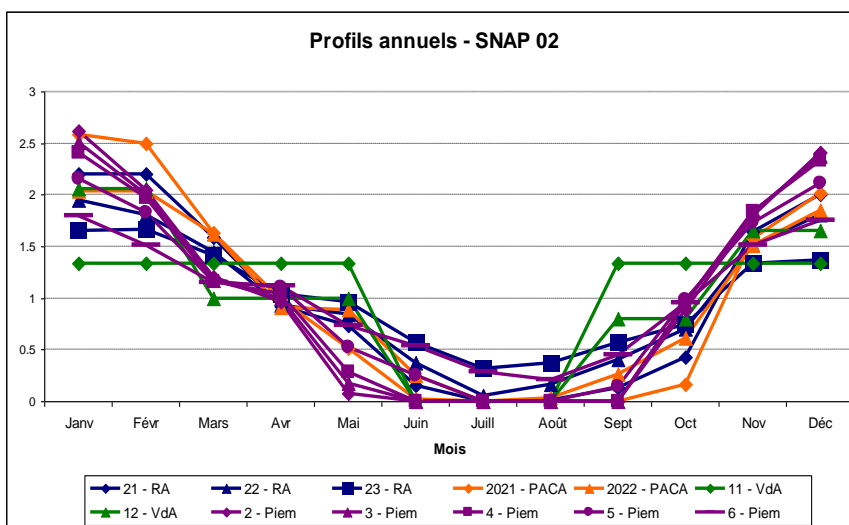
SNAP02

«Combustion hors industrie» / «Combustione non industriale»

Choix profils / Scelta profili:

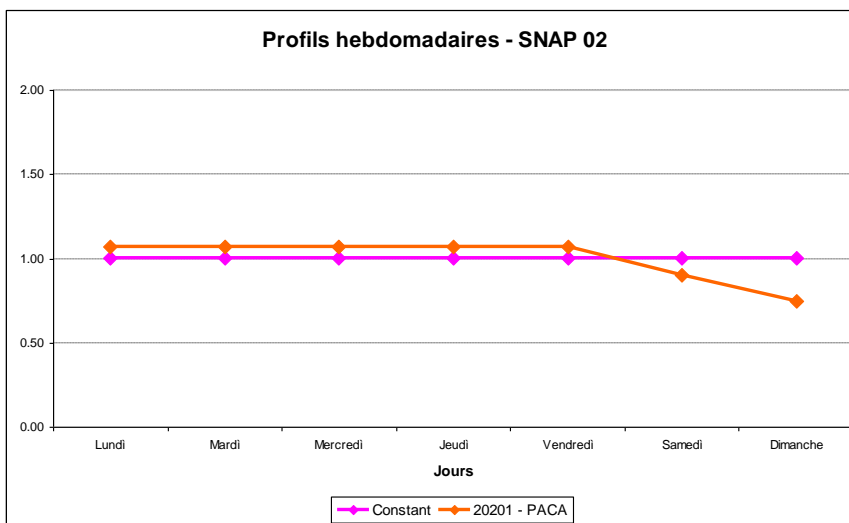
Utilisation de différents profils annuels pour chaque partenaire reliés aux différentes zones climatiques / Verranno utilizzati diversi profili annuali specifici per ciascun partner a seconda della zona climatica in cui è ubicato il comune :

- RA: 3 profils / profili;
- PACA: 2 profils / profili;
- VdA: 2 profils / profili;
- Piem: 5 profils / profili.



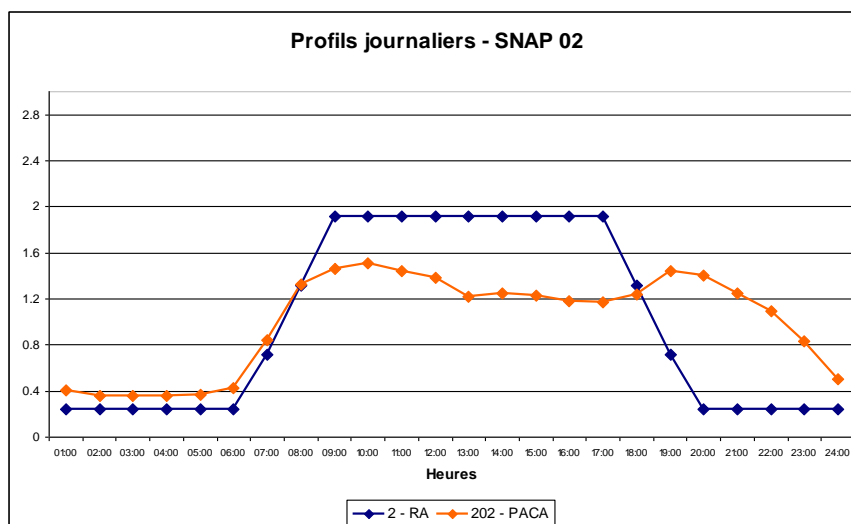
Choix profils / Scelta profili:

- « 20201 – PACA » pour le secteur « Commercial et institutionnel », position intermédiaire / “20201 - PACA” per il settore “Impianti commerciali ed istituzionali” essendo il profilo che si attesta
- « Constant » pour les autres secteurs / “Costante” per gli altri settori.



Choix profils / Scelta profili:

- « 2 – RA » pour les secteurs "Commercial et institutionnel" et "Agriculture, sylviculture et aquaculture", meilleure description des jours ouvrables / "2 - RA" per i settori "Impianti commerciali ed istituzionali" e "Impianti in agricoltura silvicoltura e acquacoltura" essendo il profilo che meglio descrive la giornata lavorativa;
- « 202 – PACA » pour le secteur « Résidentiel », position intermédiaire / "202 - PACA" per il settore "Impianti residenziali" in quanto si attesta in posizione intermedia.



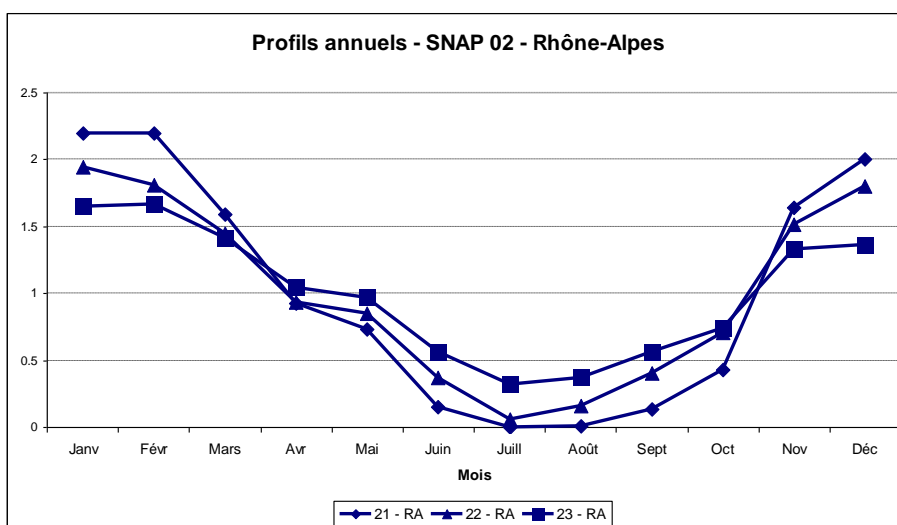
SNAP02

« Combustion hors industrie » / « Combustione non industriale »

Profils annuels: Rhône-Alpes et PACA / Profili annules: Rhône-Alpes e PACA

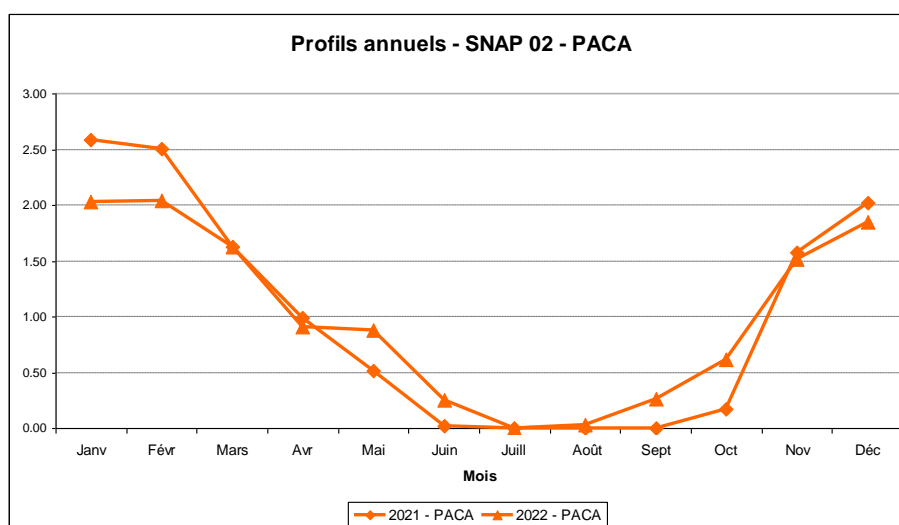
Profils annuels différents pour zone climatique / Profili annuali differenziati per zona climatica:

- « 21 – RA » profil annuel lié à la zone climatique « plaine » / "21 - RA" modulazione annuale legata alla zona di pianura
- « 22 – RA » profil annuel lié à la zone climatique « moyenne montagne » / "22 – RA" modulazione annuelle legata alla zona di media montagna
- « 23 – RA » profil annuel lié à la zone climatique « haute montagne » / "23 – RA" modulazione annuelle legata alla zona di alta montagna.



Profils annuels différents par zone climatique / Profili annuali differenziati per zona climatica:

- « 2021 – PACA » profil annuel lié à la zone climatique « plaine » / “2021 - PACA” modulazione annuale legata alla zona di pianura
- « 2022 – PACA » profil annuel lié à la zone climatique « montagne » / “2022 – PACA” modulazione annuale legata alla zona di montagna



SNAP02

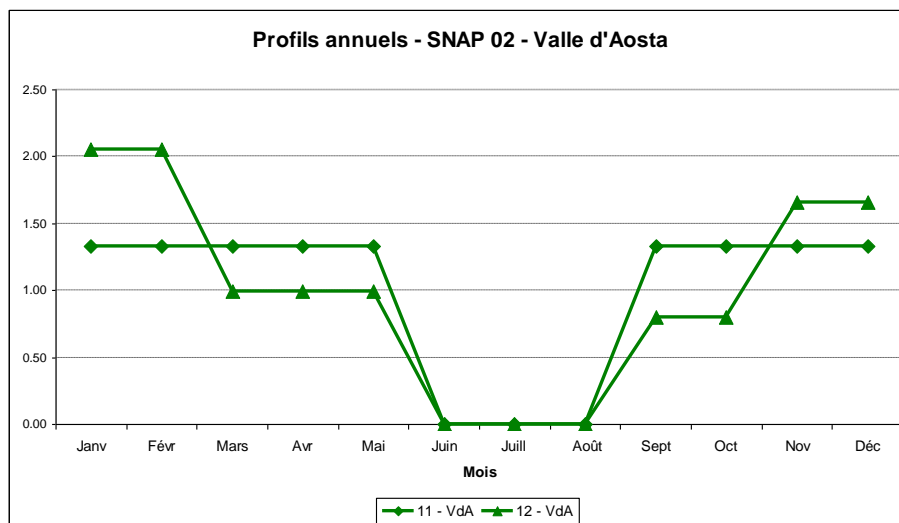
« Combustion hors industrie » / « Combustione non industriale »

Profils annuels: Vallée d'Aosta et Piemonte / Profili annules: Valle d'Aosta e Piemonte

Profils annuels différents pour zone climatique / Profili annuali differenziati per zona climatica:

« 11 – VdA » profil annuel lié à la zone climatique « basse montagne » / “11 - VdA” modulazione annuale legata alla zona di bassa montagna

« 12 – VdA » profil annuel lié à la zone climatique « haute montagne » / “12 – VdA” modulazione annuale legata alla zona di alta montagna.



Profils annuels différents pour zone climatique / Profili annuali differenziati per zona climatica:

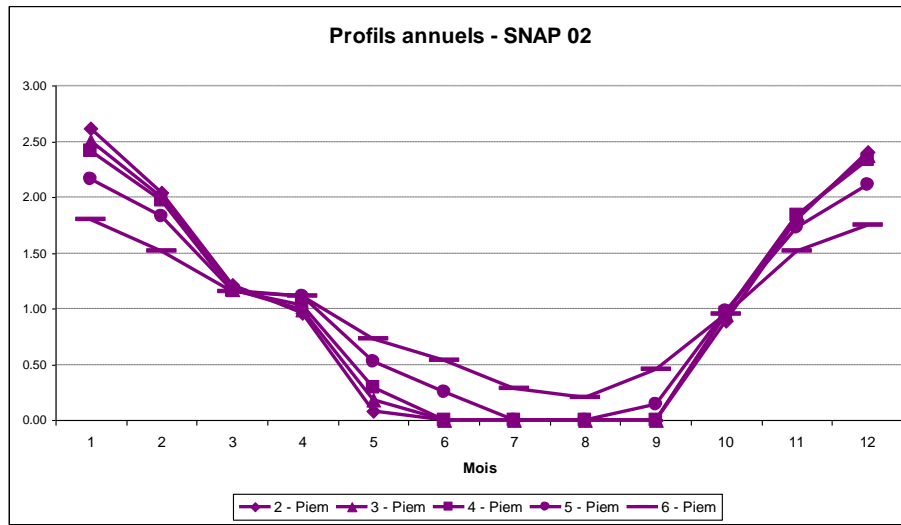
« 2 – Piem » profil annuel lié à la zone climatique à 0 - 150 m d'altitude / “2 - Piem” modulazione annuale legata alla zona climatica a quota 0 - 150 m

« 3 – Piem » profil annuel lié à la zone climatique à 150 - 300 m d'altitude / “3 - Piem” modulazione annuale legata alla zona climatica a quota 150 - 300 m

« 4 – Piem » profil annuel lié à la zone climatique à 300 – 500 m d'altitude / “4 - Piem” modulazione annuale legata alla zona climatica a quota 300 - 500 m

« 5 – Piem » profil annuel lié à la zone climatique à 500 - 1000 m d'altitude / “5 - Piem” modulazione annuale legata alla zona climatica a quota 500 - 1000 m

« 6 – Piem » profil annuel lié à la zone climatique à 1000 - 2000 m d'altitude / “6 - Piem” modulazione annuale legata alla zona climatica a quota 1000 - 2000 m

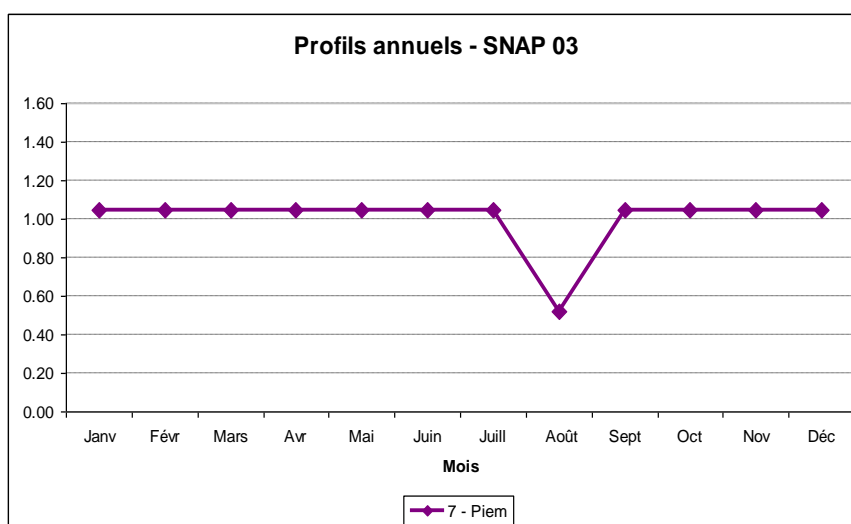


SNAP03

« Combustion dans les industries » / « Combustione nell'industria »

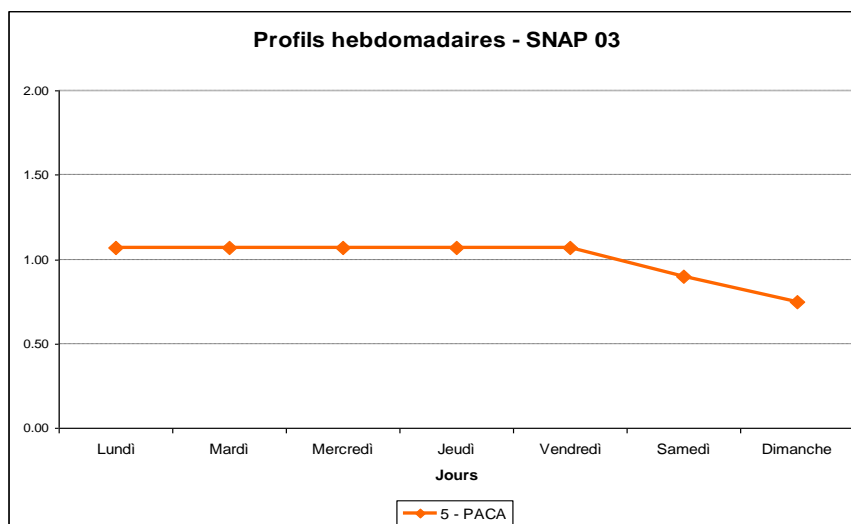
Choix profils / Scelta profili:

- « 7 – Piem » pour tous les secteurs, position intermédiaire / “7 - Piem” per tutti i settori essendo il profilo che si attesta in posizione intermedia.



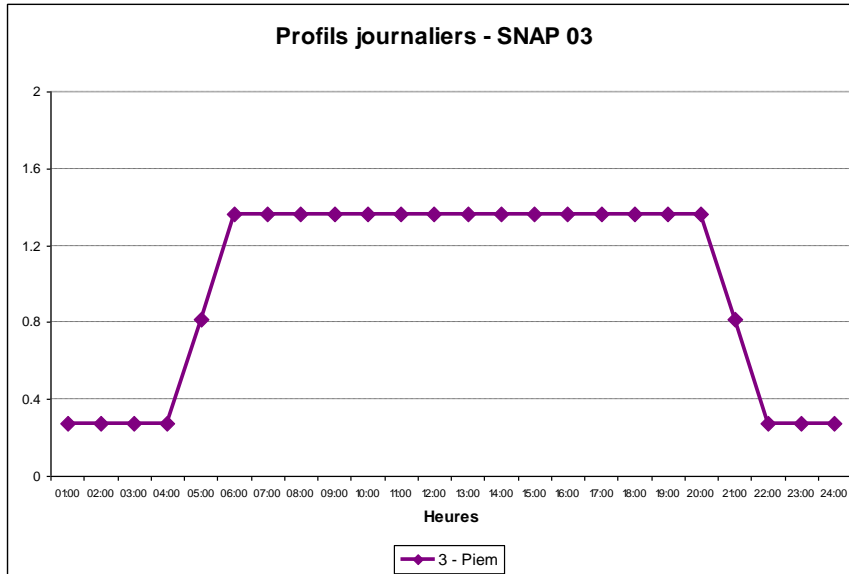
Choix profils / Scelta profili:

- « 5 – PACA » pour tous les secteurs, position intermédiaire / “5 - PACA” per tutti i settori essendo il profilo che si attesta in posizione intermedia.



Choix profils / Scelta profili:

- « 3 – Piem », position intermédiaire / "3 - Piem" essendo il profilo che si attesta in posizione intermedia.

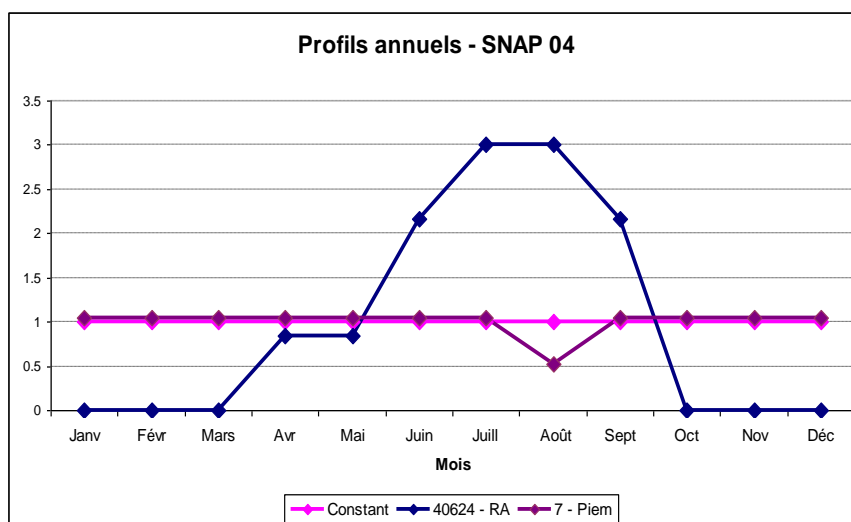


SNAP04

«Procédés de production» / “Processi produttivi”

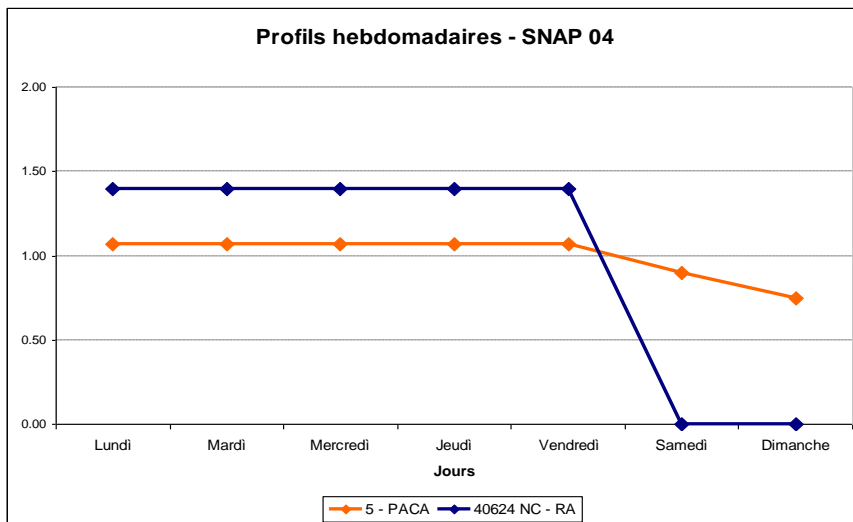
Choix profils / Scelta profili:

- « Constant » pour les secteurs « Procédés de l'industrie pétrolière » et « Procédés de la sidérurgie et des houillères », profil partagé par les partenaires / "Costante" per i settori "Processi nell'industria petrolifera" e "Processi nelle industrie del ferro e dell'acciaio e nelle miniere di carbone" poiché è il profilo condiviso dai partner;
- profil spécifique « 40626 – RA » pour l'activité 040656 (« Chantier et BTP ») / - profilo specifico "40626 - RA" per l'attività 040656 ("Chantier et BTP");
- « 7 - Piem » pour les autres secteurs (profil intermédiaire) / - "7 - Piem" per gli altri settori, (profilo intermedio).



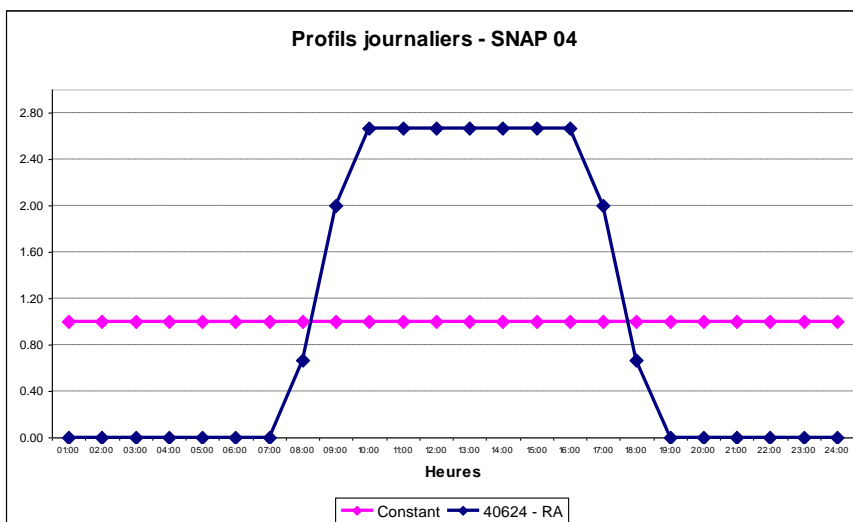
Choix profils / Scelta profili:

- profil spécifique « 40626 – RA » pour l'activité 040656 (« Chantier et BTP ») / profilo specifico "40626 - RA" per l'attività 040656 ("Chantier et BTP")
- « 5 – PACA » pour les secteurs de la « Production d'électricité » et « Chauffage urbain », position intermédiaire / "5 - PACA" per tutti gli altri settori essendo il profilo che si attesta in posizione intermedia.



Choix profils / Scelta profili:

- profil spécifique « 40626 – RA » pour l'activité 040656 (« Chantier et BTP ») / profilo specifico "40626 - RA" per l'attività 040656 ("Chantier et BTP")
- « Constant » pour tous les autres secteurs, profil partagé par tous les partenaires sauf la VdA / "Costante" per tutti gli altri settori, poichè è il profilo condiviso da tutti i partner a parte la VdA.

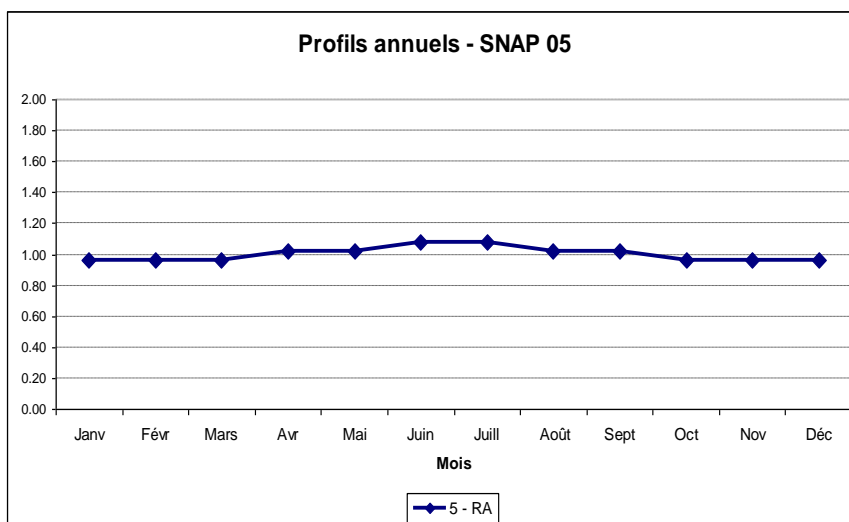


SNAP05

«Extraction et distribution de combustibles fossiles/énergie géothermique» / «Estrazione e distribuzione dei combustibili fossili»

Choix profils / Scelta profili:

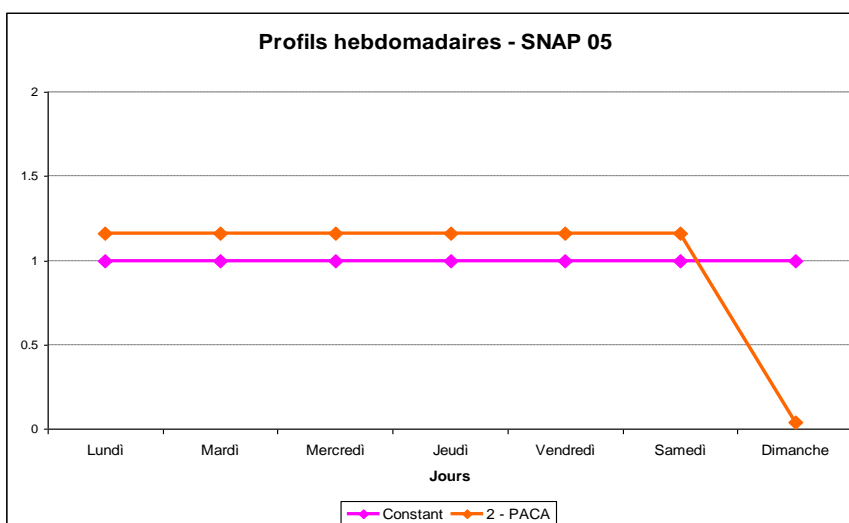
- « 5 – RA » pour tous les secteurs, position intermédiaire / "5 - RA" per tutti i settori, essendo il profilo che si attesta in posizione intermedia.



Choix profils / Scelta profili:

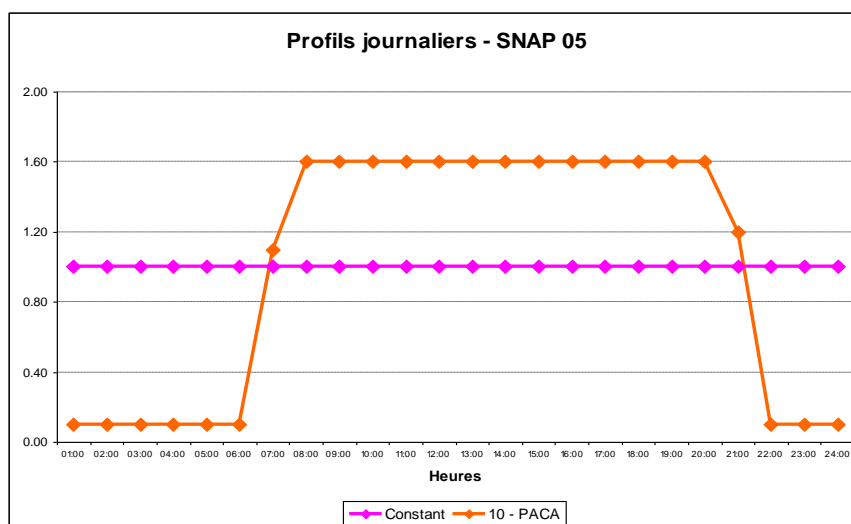
- profil spécifique « 2 – PACA » pour les activités 050501 et 050503 (« Station d'expédition en raffinerie» » et « Stations service (y compris refoulement des réservoirs) ») / profilo specifico "2 - PACA" per l'attività 050501 e 050503 ("Stazione di distribuzione delle raffinerie" e "Stazioni di servizio (incluso il rifornimento di veicoli)");

- « Constant » pour les autres secteurs / - "Costante" per tutti gli altri settori.



Choix profils / Scelta profili:

- profil spécifique « 10 – PACA » pour les activités 050501 et 050503 (« Station d'expédition en raffinerie« » et « Stations service (y compris refoulement des réservoirs) ») / profilo specifico "10 - PACA" per l'attività 050501 e 050503 ("Stazione di distribuzione delle raffinerie" e "Stazioni di servizio (incluso il rifornimento di veicoli)");
- « Constant » pour les autres secteurs / "Costante" per gli altri settori.

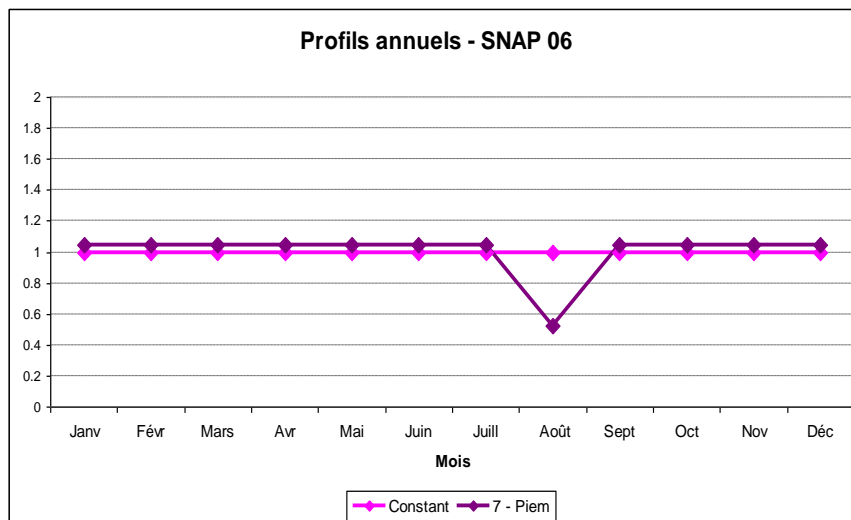


SNAP06

«Utilisation solvants et autres produits» / «Uso solventi e altri prodotti»

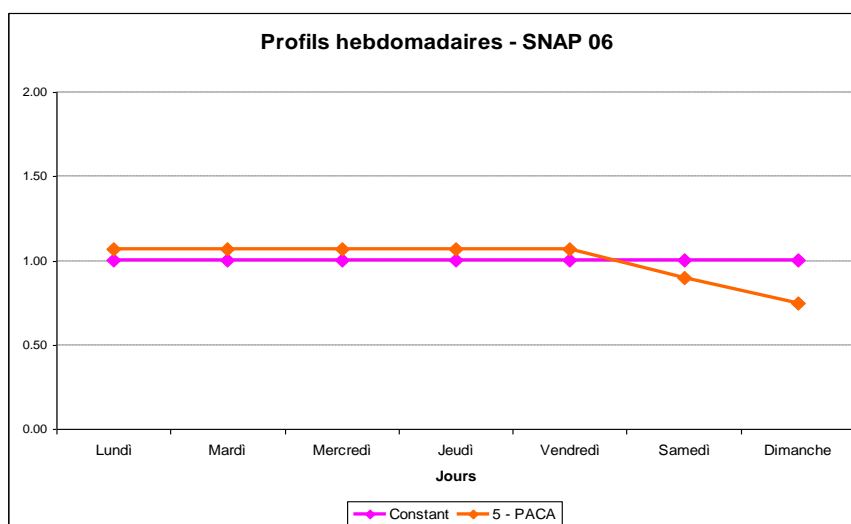
Choix profils / Scelta profili:

- « 7 - Piem » pour tous les secteurs », position intermédiaire / "7 - Piem" per tutti i settori, essendo il profilo che si attesta in posizione intermedia;
- « Constant » pour le secteur 060600 « Autres » et ses activités et pour l'activité 060501 « Anesthésie » / "Costante" per il settore 060600 "Altro" e le sue attività e per l'attività 060501 "Anestesia".



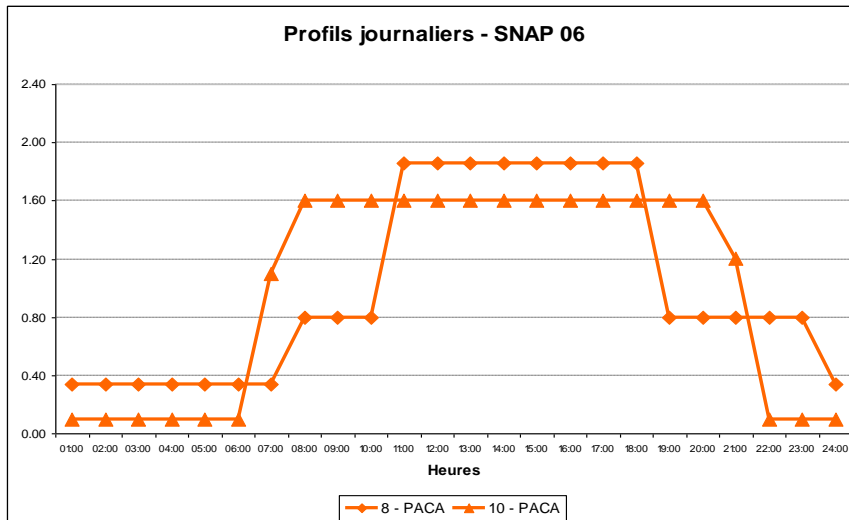
Choix profils / Scelta profili:

- « 5 - PACA » pour tous les secteurs », position intermédiaire / "5 - PACA" per tutti i settori, essendo il profilo che si attesta in posizione intermedia;
- « Constant » pour le secteur 060600 « Autres » et ses activités / "Costante" per il settore 060600 "Altro" e le sue attività.



Choix profils / Scelta profili:

- « 8 – PACA » pour les secteurs liés à une activité plus d'artisanat / "8 - PACA" per i settori legati ad un'attività maggiormente artigianale e non industriale;
- « 10 – PACA » pour tous les autres secteurs », position intermédiaire / "10 - PACA" per tutti gli altri settori, essendo il profilo che si attesta in posizione intermedia.

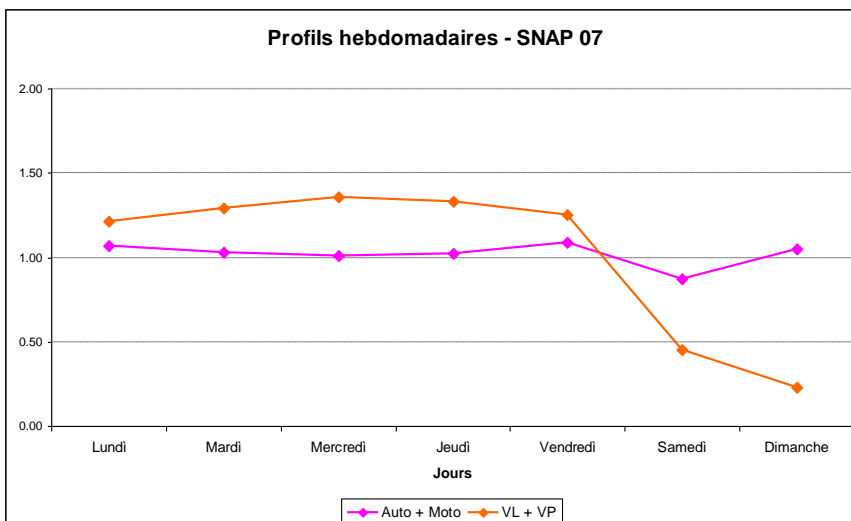
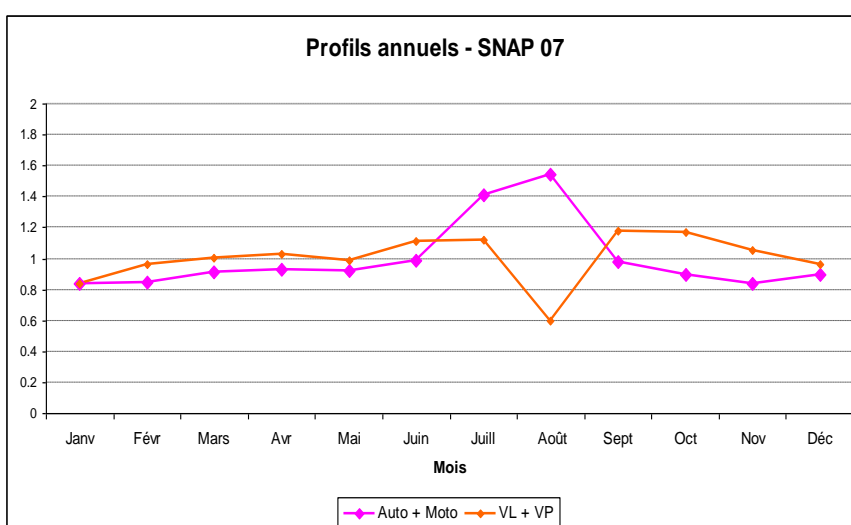


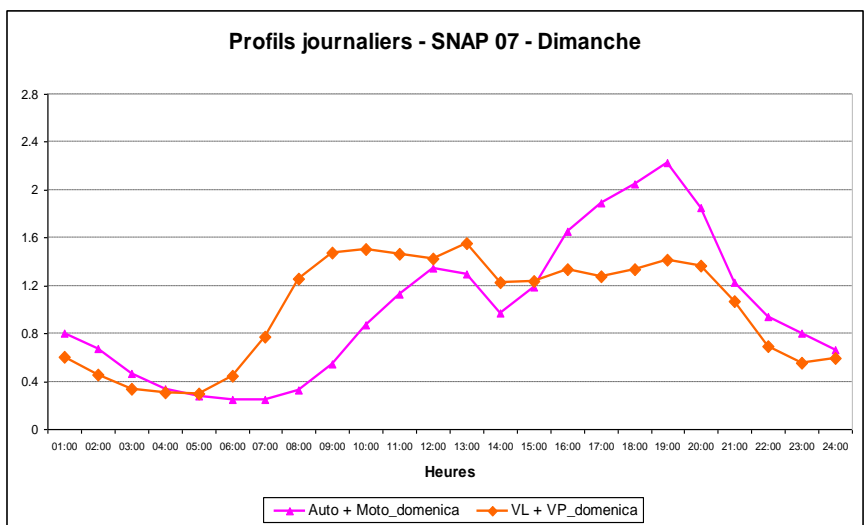
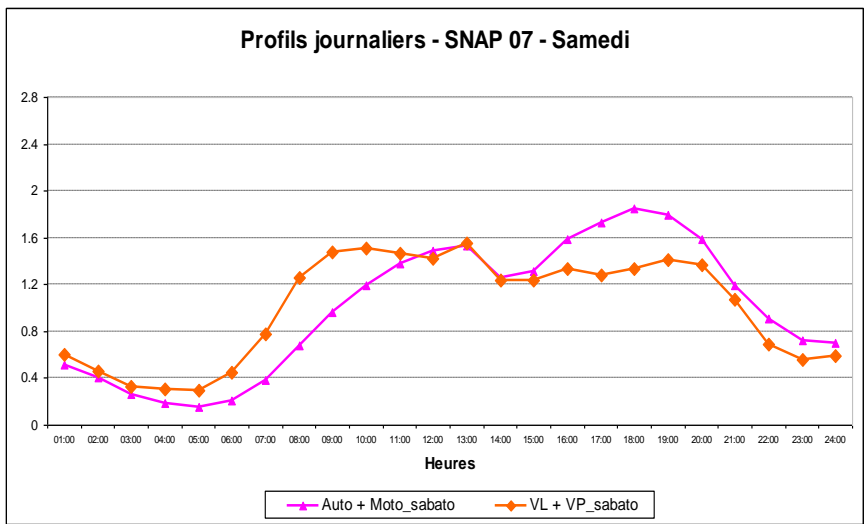
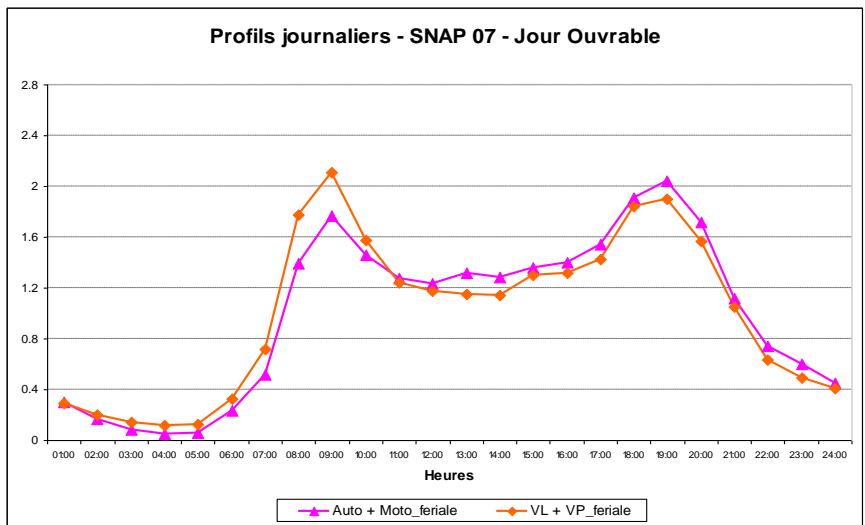
SNAP07

«Trafic routier» / «Trasporto su strada»

Choix profils / Scelta profili:

Un profil annuel, un profil hebdomadaire et trois profils journaliers (jour ouvrable, samedi et dimanche) pour Voitures/Moto et un profil annuel, un profil hebdomadaire et trois profils journaliers (jour ouvrable, samedi et dimanche) pour poids lourds/véhicules légers. / Un profilo annuale, un profilo settimanale e tre profili giornalieri (giorno feriale, sabato e domenica) per Automobili/Motocicli e un profilo annuale, un profilo settimanale e tre profili giornalieri (giorno feriale, sabato e domenica) per Veicoli Pesanti/Veicoli Leggeri



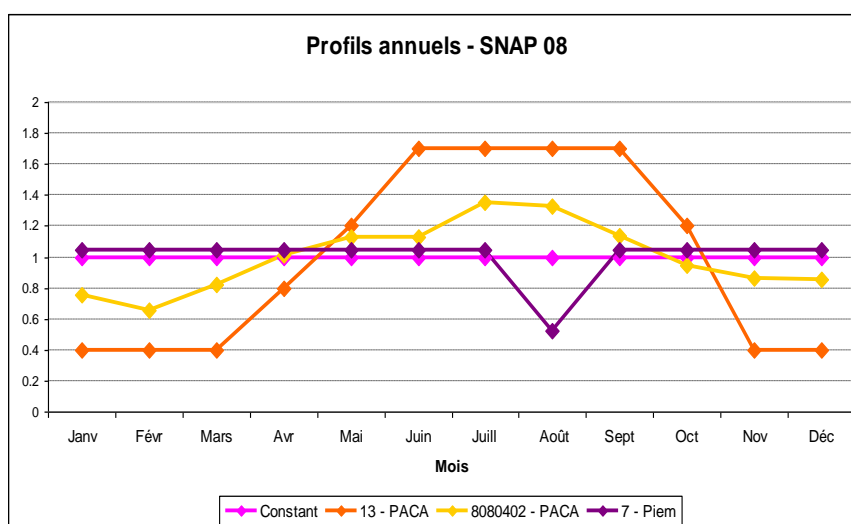


SNAP08

«Autres sources mobiles et machines» / «Altre sorgenti mobili e macchinari»

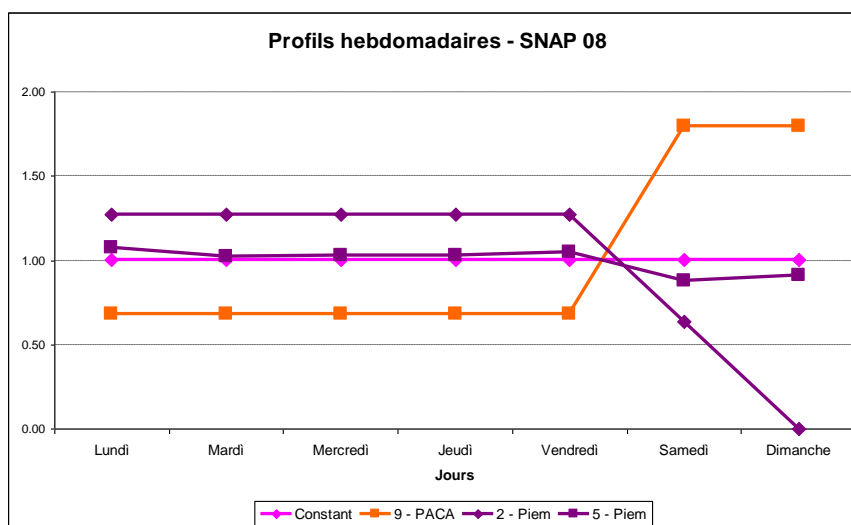
Choix profils / Scelta profili:

- profil spécifique « 8080402 – PACA » pour l'activité 080402 (« Trafic maritime national dans la zone EMEP ») / profilo specifico "8080402 - PACA" per l'attività 080402 ("Traffico marittimo nazionale")
- le profil spécifique « 7 - Piem » pour le secteur 080800 (« Engins spéciaux – Industrie ») / profilo "7 - Piem" per il settore 080800 ("industria")
- le profil « 13 – PACA » pour le secteur 080900 (« Engins spéciaux - Loisirs / jardinage ») / profilo "13 - PACA" per il settore 080900 ("Giardinaggio e altre attività domestiche")
- le profil « Constant » pour les autres secteurs, profil partagé par tous les partenaires / "Costante" per tutti gli altri settori, poiché è il profilo condiviso da tutti i partner.



Choix profils / Scelta profili:

- « 5 –Piem » pour le secteur 080500 (« Trafic aérien ») / "5 - Piem" per il settore 080500 ("Traffico aereo");
- « 2 - Piem » pour le secteur 080800 (« Engins spéciaux – Industrie ») / "2 - Piem" per l'attività 080800 ("industria");
- « 9 – PACA » pour le secteur 080900 (« Engins spéciaux - Loisirs / jardinage ») / "9 - PACA" per l'attività 080900 ("Giardinaggio e altre attività domestiche");
- « Constant » pour les autres secteurs, profil partagé par tous les partenaires / "Costante" per tutti gli altri settori, poiché è il profilo condiviso da tutti i partner.



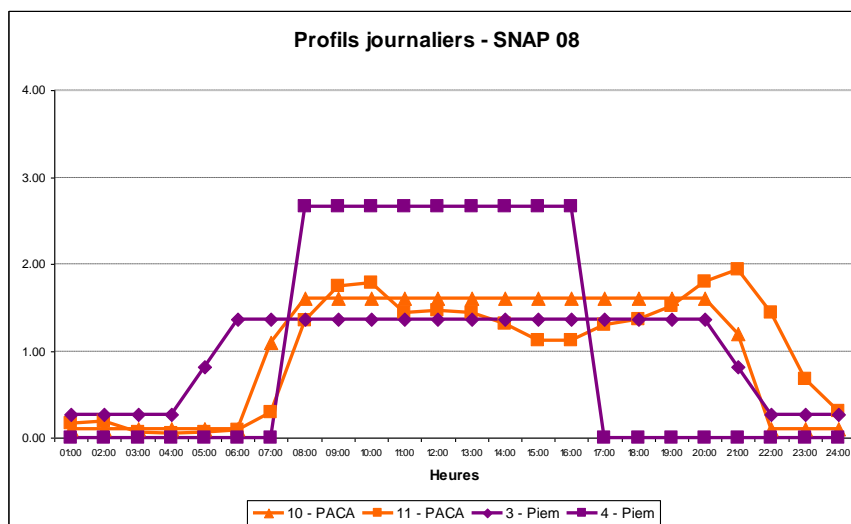
Choix profils / Scelta profili:

«11 - PACA» pour le secteur 080500 («Trafic aérien») / "11 - PACA" per il settore 080500 ("Traffico aereo");

« 3 - Piem » pour le secteur 080800 («Industrie») / "3 - Piem" per l'attività 080800 ("industria");

« 4 - Piem » pour les secteurs 080100 («Activités militaires»), 080600 («Agriculture»), 0807000 («Engins spéciaux – Sylviculture») et 080900 («Engins spéciaux - Loisirs / jardinage») / "4 - Piem" pour les secteurs 080100 ("Activités militaires"), 080600 ("Engins spéciaux - Agriculture"), 0807000 ("Engins spéciaux - Sylviculture") et 080900 ("Engins spéciaux - Loisirs / jardinage");

« 10 - PACA » pour les autres secteurs (profil intermédiaire) / "10 - PACA" per gli altri settori (profilo intermedio).

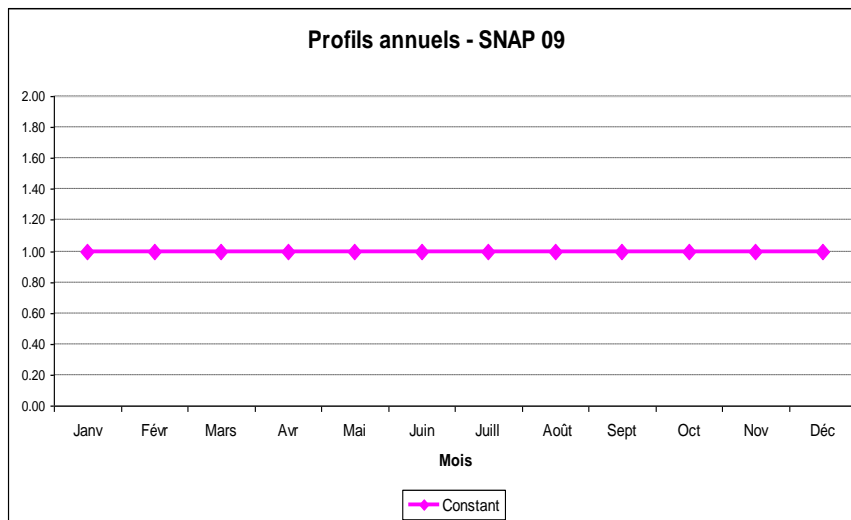


SNAP09

«Traitement et élimination des déchets» / « Trattamento e smaltimento rifiuti »

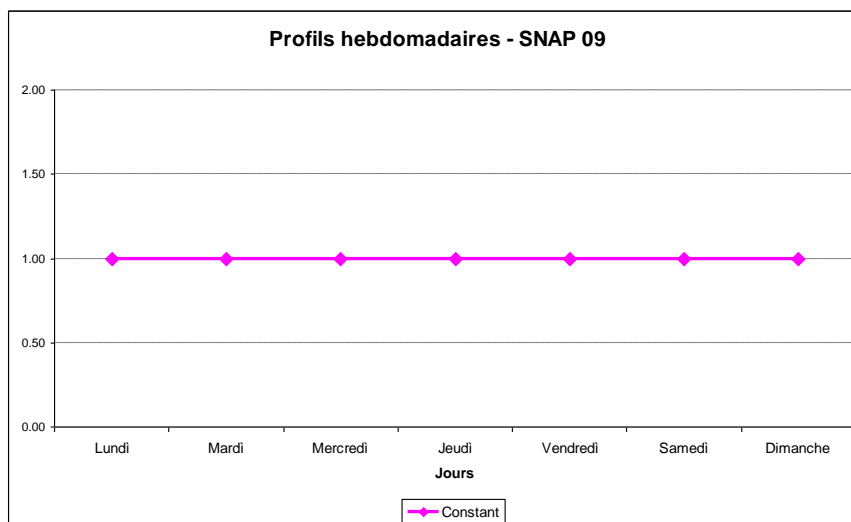
Choix profils / Scelta profili:

- « Constant » pour tous les secteurs / "Costante" per tutti i settori.



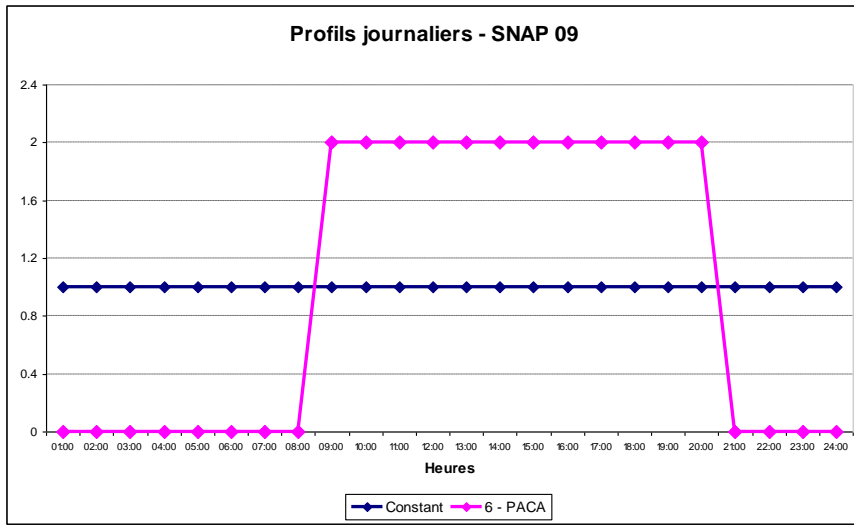
Choix profils / Scelta profili:

- « Constant » pour tous les secteurs / "Costante" per tutti i settori.



Choix profils / Scelta profili:

- « 6 – PACA » pour les secteurs 090700 «Feux ouverts de déchets agricoles et verts (sauf écobuage 10.03) » et 090900 « Crémation » étant activités reliées à un jour ouvrable / "6 - PACA" per i settori 090700 "Incenerimento di rifiuti agricoli (eccetto 10.3.0)" e 090900 "Cremazione" essendo attività legate ad un ciclo lavorativo diurno;
- « Constant » pour tous les autres secteurs / "Costante" per gli altri settori.



SNAP10

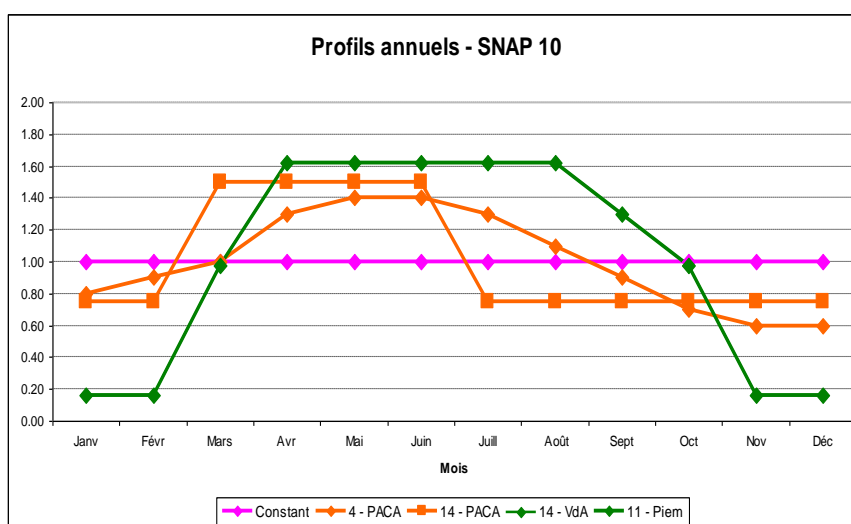
«Agriculture» / « Agricoltura »

Choix profils / Scelta profili:

Pour chaque partenaire on utilise les différents profils annuel reliées aux différentes cultures présentes dans les régions / Per ciascun partner verranno utilizzati i diversi profili annuali collegati alle differenti colture presenti nelle regioni;

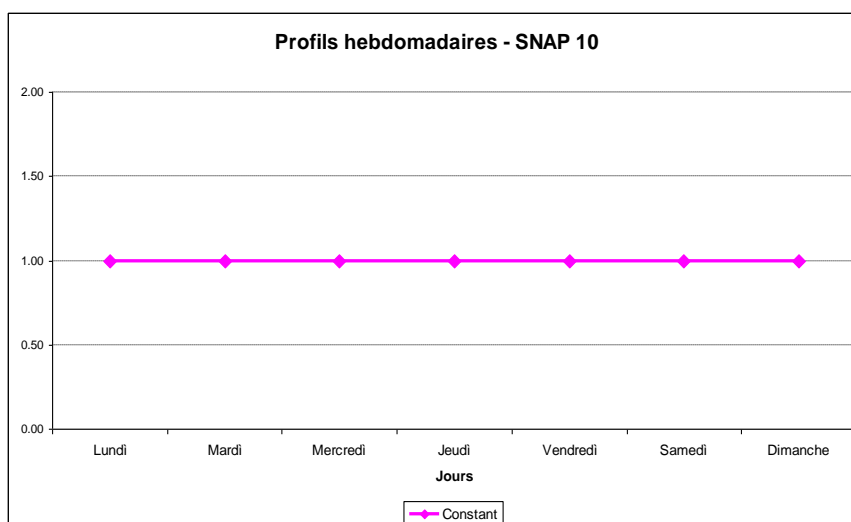
- « 14 – PACA » pour le secteur 100600 (« Utilisation de pesticides et de calcaire ») / "14 - PACA" per il settore 100600 "Uso fitofarmaci";

- « Constant » pour les autres secteurs, profils partagés par tous les partenaires / "Costante" per tutti gli altri settori, poiché è il profilo condiviso da tutti i partner.



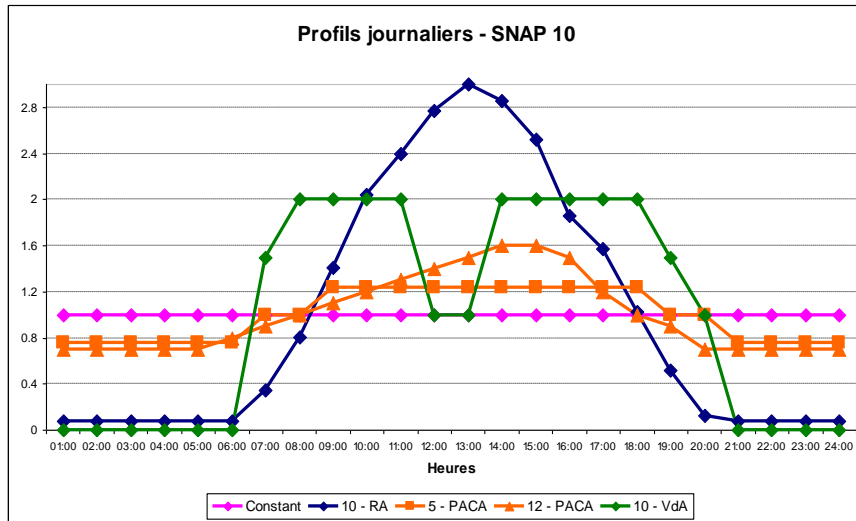
Choix profils / Scelta profili:

« Constant » pour tous les secteurs / "Costante" per tutti i settori.



Choix profils / Scelta profili:

Pour chaque partenaire on utilise les différents profils horaires reliés aux différentes cultures présentes dans les régions / Per ciascun partner verranno utilizzati i diversi profili annuali collegati alle differenti colture presenti nelle regioni.

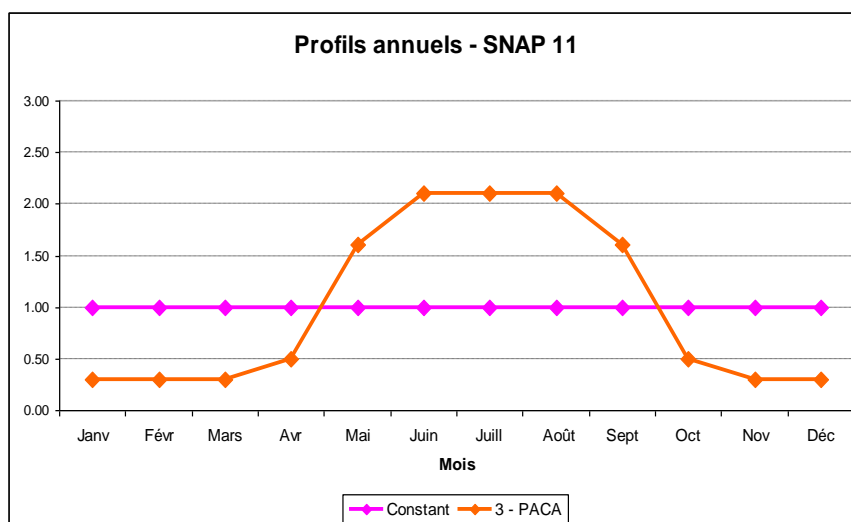


SNAP11

«Autres sources et puits» / «Altre sorgenti e assorbimenti»

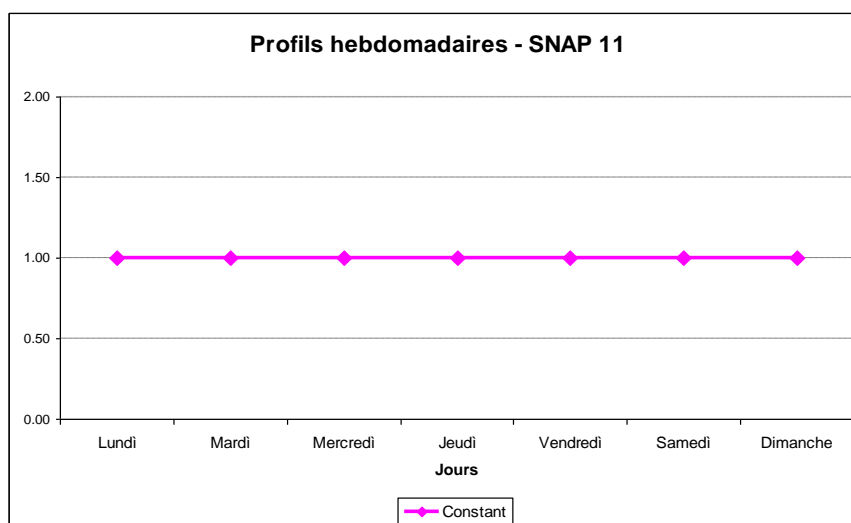
Choix profils / Scelta profili:

- « 3 – PACA » pour tous les secteurs, position intermédiaire / "3 - PACA" per tutti i settori, essendo il profilo che si attesta in posizione intermedia;
 - «Constant» pour les secteurs 112500 «Autres», 113100 « UTCF : Forêt », 113200 « UTCF : Terre cultivée », 113300 « UTCF : Prairie », 113400 « UTCF : Terre humide », 113500 « UTCF : Zone urbanisée » et 113600 « UTCF : Autre terre » / « Costante » per i settori 112500 "Altro", 113100 "Foreste - assorbimenti", 113200 "Coltivazioni - assorbimenti", 113300 "Praterie - assorbimenti", 113400 "Zone umide - assorbimenti", 113500 "Insediamenti urbani - assorbimenti" 113600 "Altri terreni".



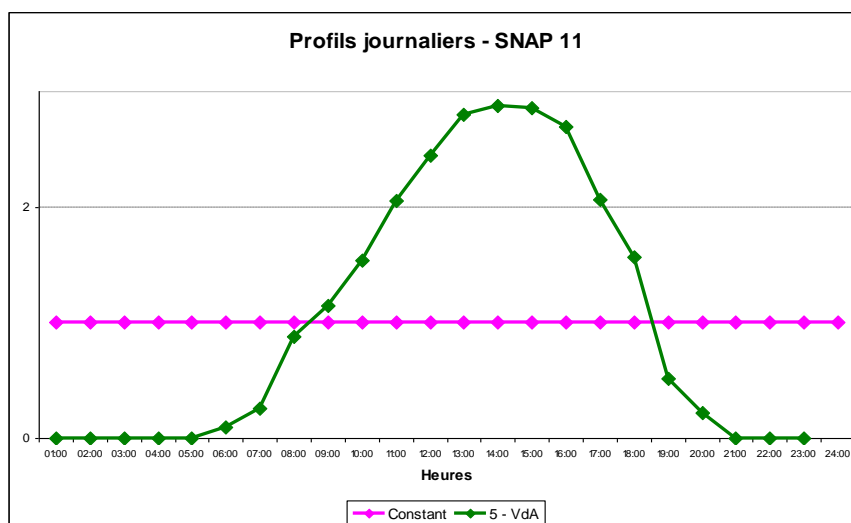
Choix profils / Scelta profili:

« Constant » pour tous les secteurs sauf pour l'activité 112510 « Utilisation de feux d'artifice » / "Costante" per tutti i settori tranne che per l'attività 112510 "Uso dei fuochi d'artificio".



Choix profils / Scelta profili:

- « Constant » pour les secteurs 112500 «Autres», 113100 « UTCF : Forêt », 113200 « UTCF : Terre cultivée », 113300 « UTCF : Prairie », 113400 « UTCF : Terre humide », 113500 « UTCF : Zone urbanisée » et 113600 « UTCF : Autre terre ». / "Costante" per i settori 112500 "Altro", 113100 "Foreste - assorbimenti", 113200 "Coltivazioni - assorbimenti", 113300 "Praterie - assorbimenti", 113400 "Zone umide - assorbimenti", 113500 "Insediamenti urbani - assorbimenti" 113600 "Altri terreni" ;
- « 5 – VdA » pour tous les autres secteurs, position intermédiaire, sauf pour l'activité 112510 « Utilisation de feux d'artifice » / "5 - VdA" per tutti gli altri settori, essendo il profilo che si attesta in posizione intermedia tranne che per l'attività 112510 "Uso dei fuochi d'artificio".



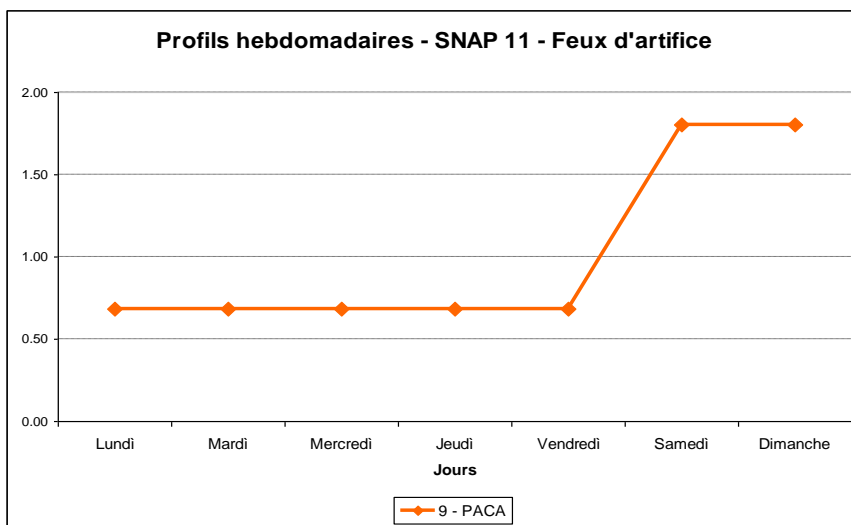
SNAP11

«Autres sources et puits» / «Altre sorgenti e assorbimenti»

Profils pour l'activité « Feux d'artifice » / « fuochi d'artificio »

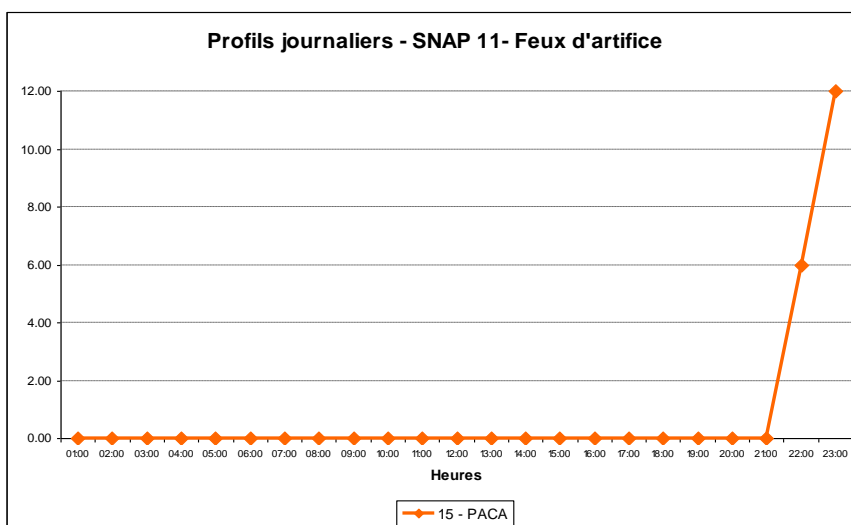
Choix profils / Scelta profili:

- « 9 - PACA » pour l'activité 112510 « Utilisation de feux d'artifice » / “9 – PACA” per l'attività 112510 "Uso dei fuochi d'artificio".



Choix profils / Scelta profili:

- « 15 - PACA » pour l'activité 112510 « Utilisation de feux d'artifice » / “15 – PACA” per l'attività 112510 "Uso dei fuochi d'artificio".



ANNEXE D / ALLEGATO D

Stations de mesures des particules / Stazioni di misura del particolato

88 stations de mesure des PM10 et 34 stations de mesure des PM2.5 sont réparties sur le domaine d'étude. La figure suivante montre leur emplacement sur le territoire des 4 régions partenaires.

Nell'insieme del dominio utilizzato per lo studio del contributo all'inquinamento del particolato sono presenti 88 stazioni per la misura del PM10 e 34 stazioni per la misura del PM2.5.

Nelle figure seguenti è riportata la localizzazione delle stazioni sul territorio delle 4 regioni.

Stazioni di misura del PM10 sul territorio ALCOTRA



Stazioni di misura del PM2.5 sul territorio ALCOTRA



La table suivante présente les principales caractéristiques des stations de mesures par région

Nelle tabelle seguenti sono riportate le principali caratteristiche delle stazioni di misura suddivise per regione.

Région / Regione Provence-Alpes-Côte d'Azur	Typologie / Tipologia	Altitude / Quota	PM10	PM2.5
Aix - Ecole d'Art	Urbaine / Urbana	188	√	√
Antibes Jean Moulin	Périurbaine / Suburbana	77	√	
Arles	Urbaine / Urbana	10	√	
Avignon - Mairie	Urbaine / Urbana	16	√	√
Brignoles	Périurbaine / Suburbana	274	√	
Cagnes - Ladoumègue	Urbaine / Urbana	21	√	
Cannes - Broussailles	Urbaine / Urbana	79	√	√
Fos Carabins	Urbaine / Urbana	4	√	
Gap - Commanderie	Urbaine / Urbana	743	√	√
Hyères	Urbaine / Urbana	33	√	
Le Pontet	Périurbaine / Suburbana	22	√	
Marignane - Ville	Urbaine / Urbana	8	√	

Marseille - Cinq Avenues	Urbaine / Urbana	64	√	√
Marseille - Saint Louis	Urbaine / Urbana	64	√	
Martigues Ile	Urbaine / Urbana	103	√	
Miramas - Ville	Urbaine / Urbana	0	√	
Nice - Aéroport	Observation / Osservazione	2	√	
Nice - Arson	Urbaine / Urbana	0	√	√
Port de Bouc - La Lèque	Urbaine / Urbana	5	√	
Salon de Provence	Urbaine / Urbana	71	√	
Toulon - Chalucet	Urbaine / Urbana	15	√	√

Région / Regione Rhône-Alpes	Typologie / Tipologia	Altitude / Quota	PM10	PM2.5
Anancy – Loverchy	Urbaine / Urbana	453	√	
Anancy – Novel	Urbaine / Urbana	461	√	
Annemasse	Urbaine / Urbana	436	√	√
Bourg-en-Bresse	Urbaine / Urbana	223	√	
Chambéry-le-Haut	Urbaine / Urbana	383	√	
Chambéry – Pasteur	Urbaine / Urbana	274	√	√
Chamonix	Urbaine / Urbana	1040	√	
Côtière de l'Ain	Périurbaine / Suburbana	180	√	
Coubertin	Périurbaine / Suburbana	480	√	
Drome - rural Sud	Rurale	460	√	√
Fontaine - les Balmes	Urbaine / Urbana	210	√	
Gaillard	Urbaine / Urbana	426	√	√
Gerland	Urbaine / Urbana	172	√	
Grenoble - les Frères	Urbaine / Urbana	219	√	
Grenoble - Périurbaine Sud	Périurbaine / Suburbana	310	√	
Grésivaudan	Périurbaine / Suburbana	260	√	
La Talaudière	Périurbaine / Suburbana	520	√	
Lyon – centre	Urbaine / Urbana	160	√	
Marnaz	Périurbaine / Suburbana	501	√	
Oeillon	Rurale	1230	√	
Passy	Urbaine / Urbana	588	√	
Romans-Sur-Isère	Urbaine / Urbana	150	√	
Roussillon	Urbaine / Urbana	157	√	
Saint-Chamond	Urbaine / Urbana	390	√	√
Saint-Germain-sur-Rhône	Rurale	477	√	
Saint-Martin-d'Hères	Urbaine / Urbana	219	√	
Ternay	Périurbaine / Suburbana	235	√	
Vaulx-en-Velin	Urbaine / Urbana	156	√	√
Vienne - Centre	Urbaine / Urbana	160	√	√
Voiron -urbaine	Urbaine / Urbana	280	√	

Région / Regione Piemonte	Typologie / Tipologia	Altitude / Quota	PM10	PM2.5
AcquiTerme	Urbaine / Urbana	157	✓	
Alba	Urbaine / Urbana	164	✓	
Alessandria - Volta	Urbaine / Urbana	91	✓	✓
ArquataScivia	Périurbaine / Suburbana	242	✓	
Asti - Acquisto	Urbaine / Urbana	149	✓	
Baceno - AlpeDevero	Rurale	1637	✓	✓
BaldisseroTorinese	Rurale	541	✓	
Beinasco - TRM	Urbaine / Urbana	262	✓	✓
Biella - Sturzo	Urbaine / Urbana	406	✓	✓
Borgaro	Périurbaine / Suburbana	257	✓	✓
Borgosesia	Urbaine / Urbana	345	✓	✓
CasaleMonferrato	Urbaine / Urbana	118	✓	
CastellettoTicino	Rurale	214	✓	
Cerano	Périurbaine / Suburbana	124	✓	
Ceresole	Rurale	1620	✓	✓
Chieri	Urbaine / Urbana	276		✓
Cossato	Urbaine / Urbana	271	✓	
Cuneo - Alpini	Urbaine / Urbana	551	✓	✓
Dernice	Rurale	580	✓	✓
Druento - Mandria	Rurale	335	✓	
Ivrea	Périurbaine / Suburbana	238	✓	✓
Leini	Périurbaine / Suburbana	245	✓	✓
Novara - Verdi	Urbaine / Urbana	154	✓	✓
Pinerolo	Urbaine / Urbana	374	✓	
Saliceto	Rurale	388	✓	✓
SerravalleScivia	Périurbaine / Suburbana	226	✓	
Susa	Périurbaine / Suburbana	494	✓	
Torino - Consolata	Urbaine (trafic) / Urbana (traffico)	243	✓	
Torino - Lingotto	Urbaine / Urbana	243	✓	✓
Torino - Rubino	Urbaine / Urbana	257	✓	
Treccate	Urbaine / Urbana	135		✓
Trivero	Périurbaine / Suburbana	716	✓	✓
Verbania	Urbaine / Urbana	201	✓	✓
Vercelli - Coni	Périurbaine / Suburbana	134	✓	✓

Région / Regione Valle d'Aosta	Typologie / Tipologia	Altitude / Quota	PM10	PM2.5
Aosta – Piazza Plouves	Urbaine / Urbana	581	✓	✓
Aosta – Via I Maggio	Périurbaine (industrielle) / Suburbana (industriale)	577	✓	
Donnas	Rurale	341	✓	
Lillianes	Rurale	650	✓	
Morgex	Périurbaine (trafic) / Suburbana (traffico)	924	✓	

ANNEXE E / ALLEGATO E

Les graphiques suivants présentes une comparaison des principaux paramètres météorologiques observés sur 3 stations de la région PACA avec les résultats de simulation issus du modèle WRF.

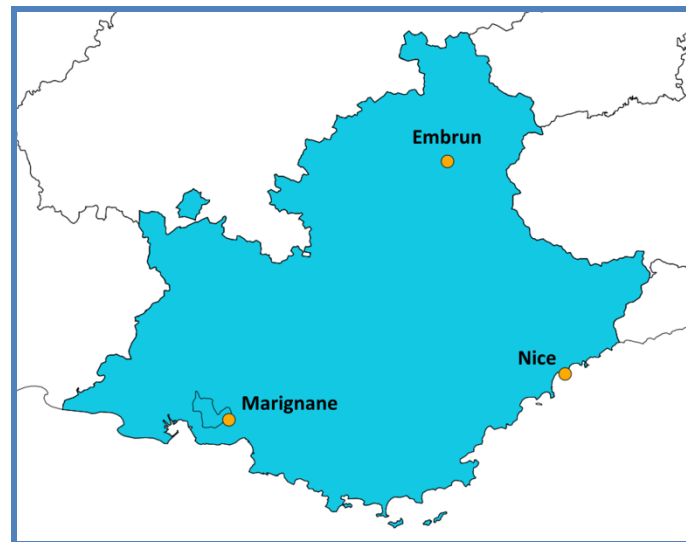


Figure F-1 : Localisation des stations Météo-France retenues pour la comparaison mesure-modèle en région PACA / Localizzazione delle stazioni Météo-France utilizzate per il confronto misure-modelli nella regione PACA.

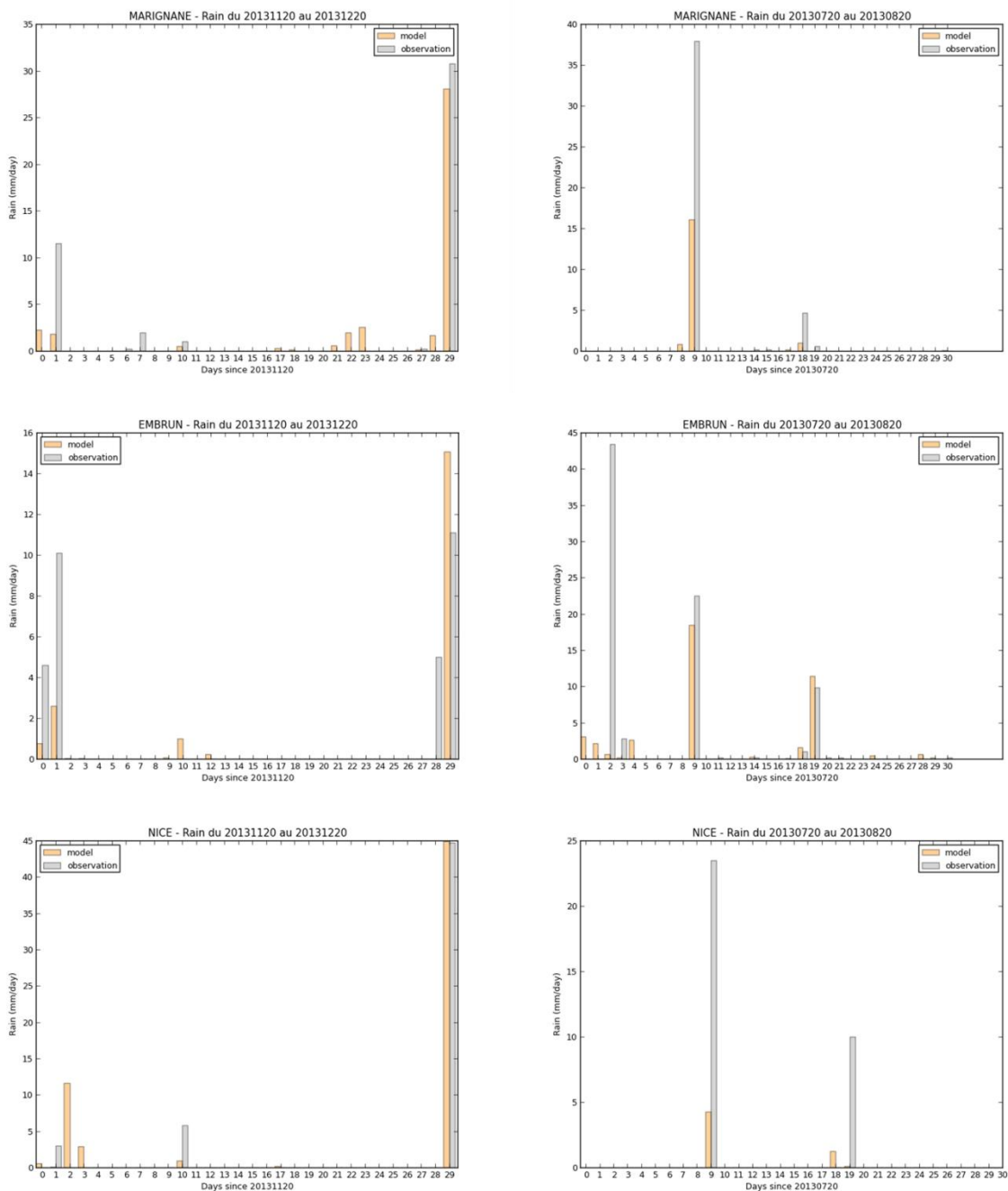


Figure F-2 : Comparaison des précipitations journalières observées (gris) et simulées (orange) au cours de la période hivernale (gauche) et estivale (droite) sur les stations de Marignane (haut), Embrun (milieu) et Nice (bas) / Confronto fra la serie storica simulata (in arancione) ed osservata (in grigio) per i precipitazioni per il periodo invernale (sinistra) e per il periodo estivo (destra) nelle stazioni di Marignane (alto), Embrun (mezzo) e Nizza (basso)

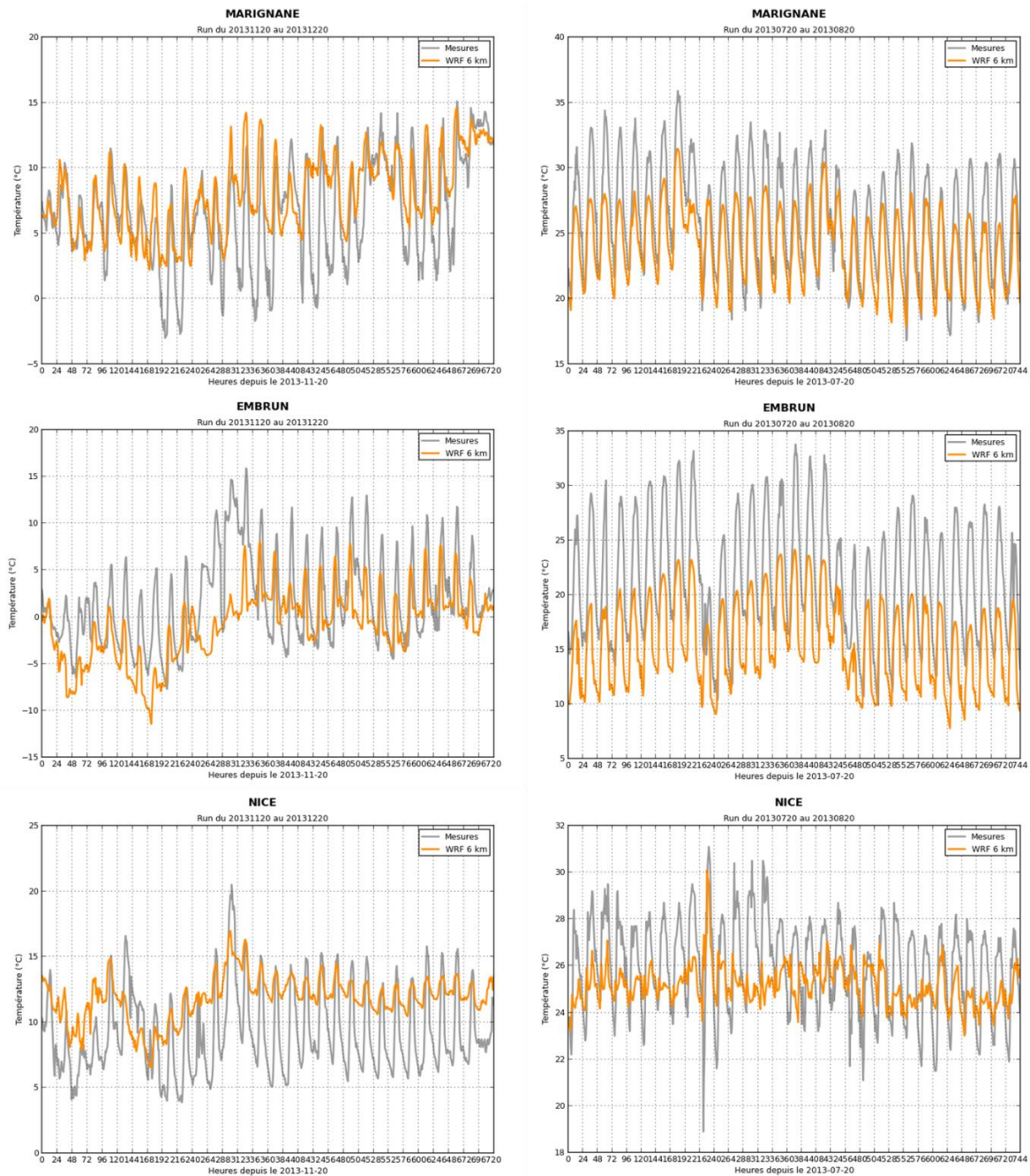


Figure F-3 : Comparaison des températures horaires à 2m observées (gris) et simulées (orange) au cours de la période hivernale (gauche) et estivale (droite) sur les stations de Marignane (haut), Embrun (milieu) et Nice (bas) / Confronto fra la serie storica simulata (in arancione) ed osservata (in grigio) per i temperature per il periodo invernale (sinistra) e per il periodo estivo (destra) nelle stazioni di Marignane (alto), Embrun (mezzo) e Nizza (basso)



Figure F-4 : Comparaison des intensités de vent horaires à 10m observées (gris) et simulées (orange) au cours de la période hivernale (gauche) et estivale (droite) sur les stations de Marignane (haut), Embrun (milieu) et Nice (bas) / Confronto fra la serie storica simulata (in arancione) ed osservata (in grigio) per la velocità del vento per il periodo invernale (sinistra) e per il periodo estivo (destra) nelle stazioni di Marignane (alto), Embrun (mezzo) e Nizza (basso)

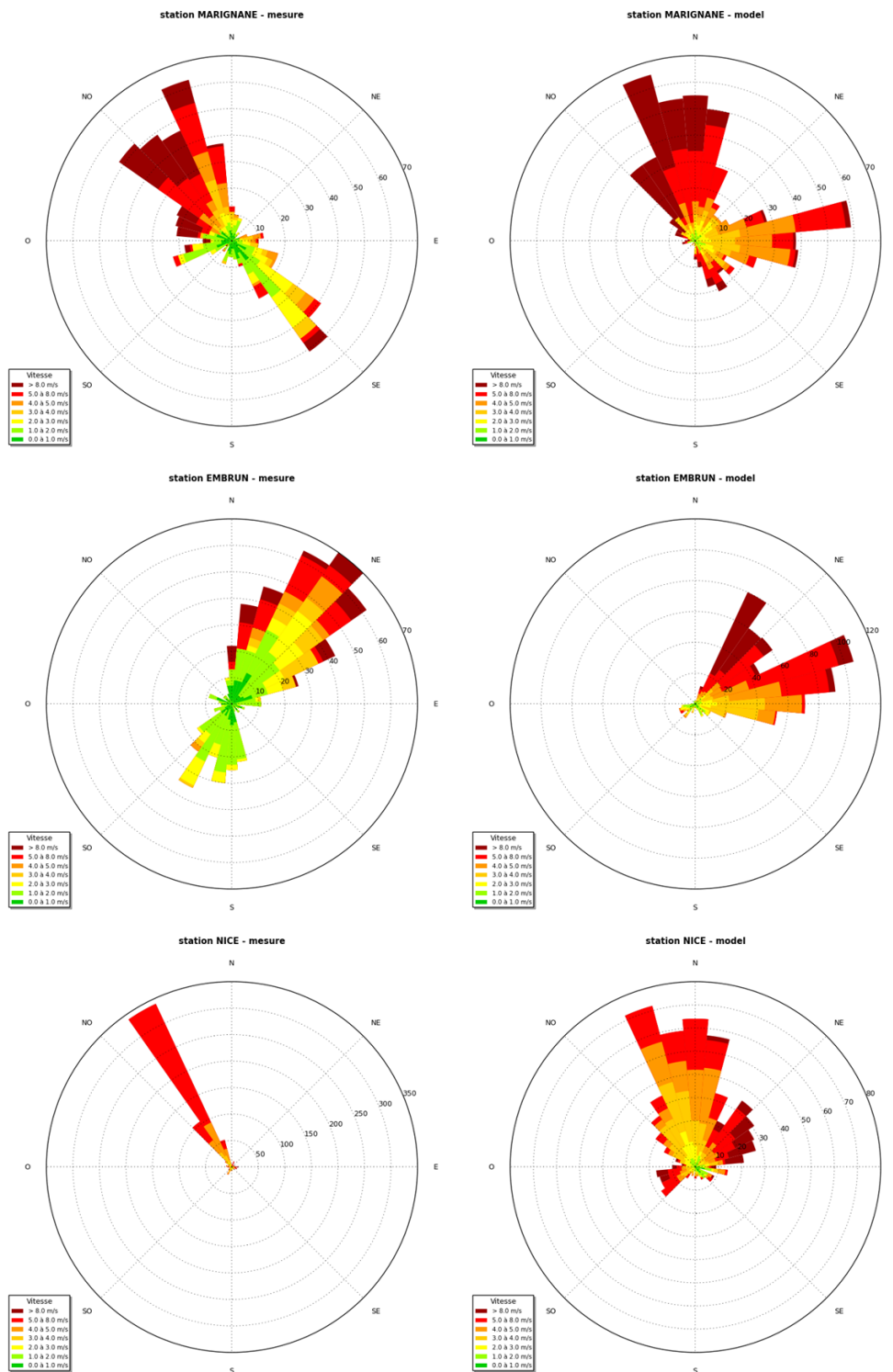


Figure F-5 : Comparaison des roses des vents observées (gauche) et simulées (droite) au cours de la période hivernale sur les stations de Marignane (haut), Embrun (milieu) et Nice (bas) / Velocità e direzione del vento simulata (sinistra) ed osservata (destra) per il periodo invernale nelle stazioni di Marignane (alto), Embrun (mezzo) e Nizza (basso)

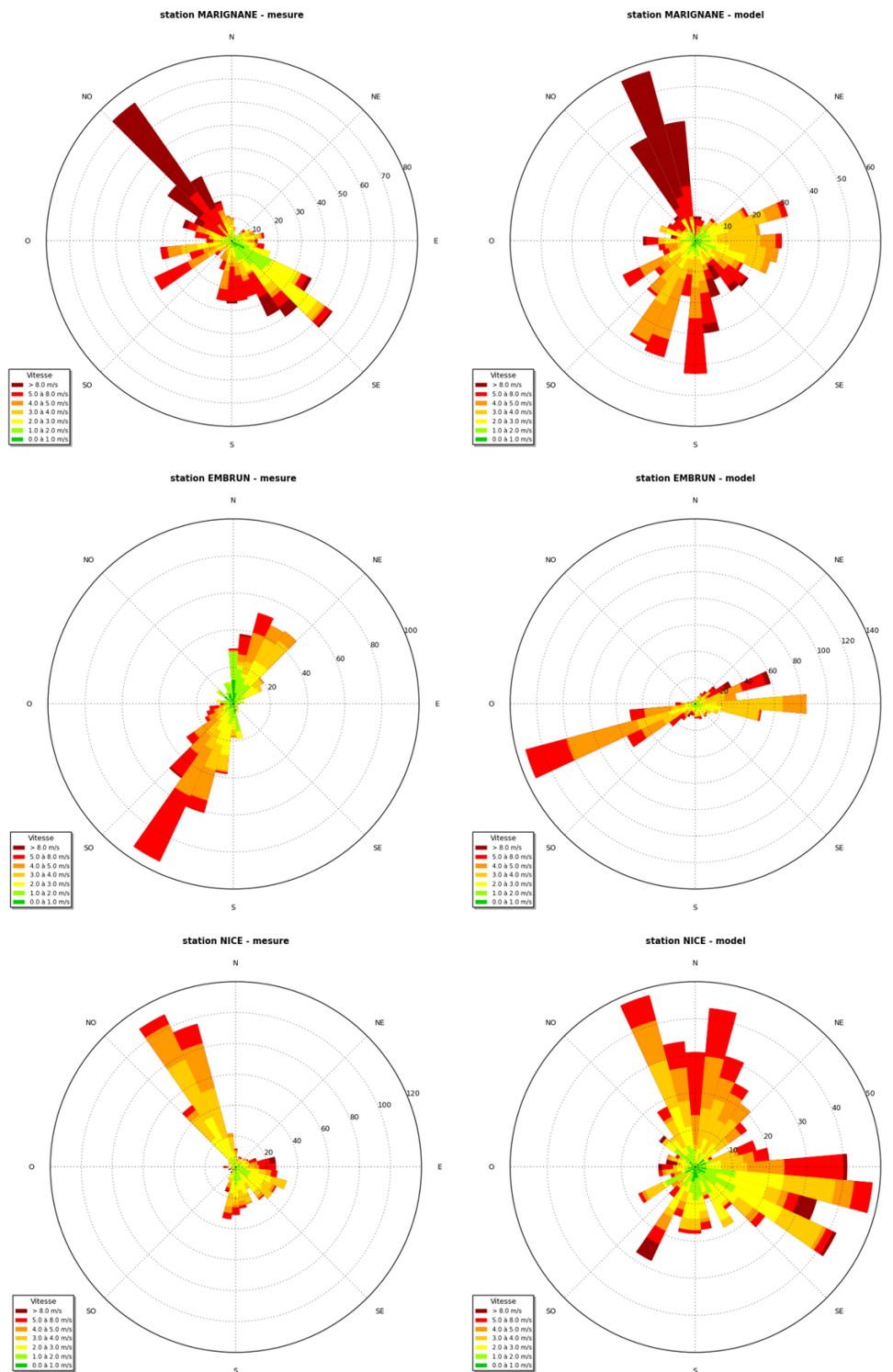


Figure F-6 : Comparaison des roses des vents observées (gauche) et simulées (droite) au cours de la période estivale sur les stations de Marignane (haut), Embrun (milieu) et Nice (bas) / Velocità e direzione del vento simulata (sinistra) ed osservata (destra) per il periodo estivo nelle stazioni di Marignane (alto), Embrun (mezzo) e Nizza (basso)

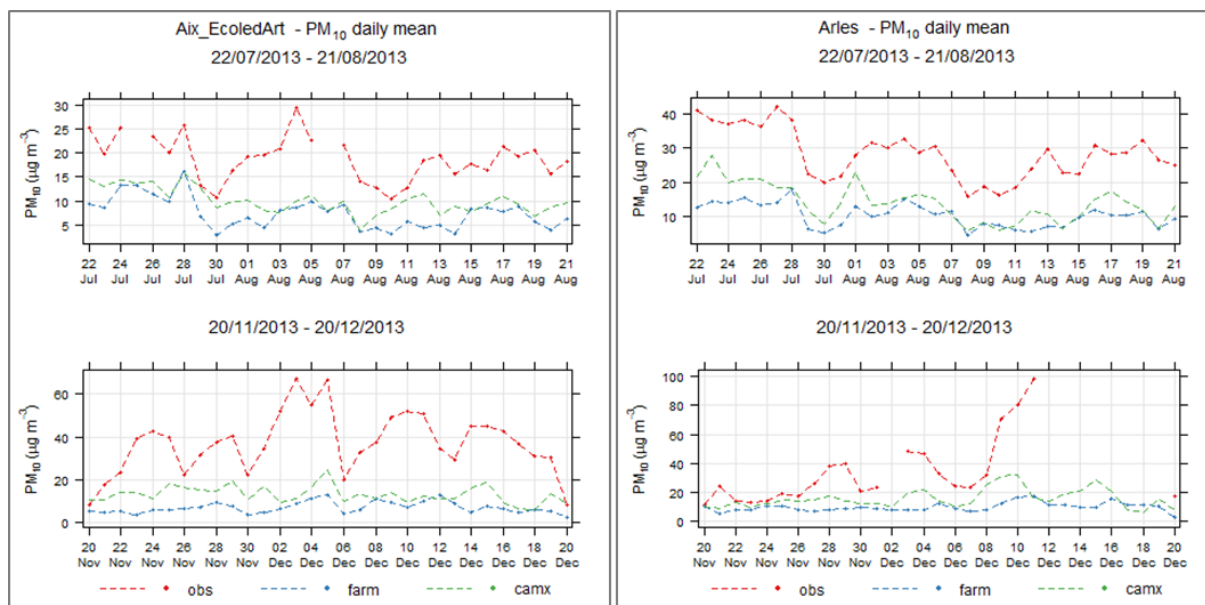
ANNEXE F / ALLEGATO F

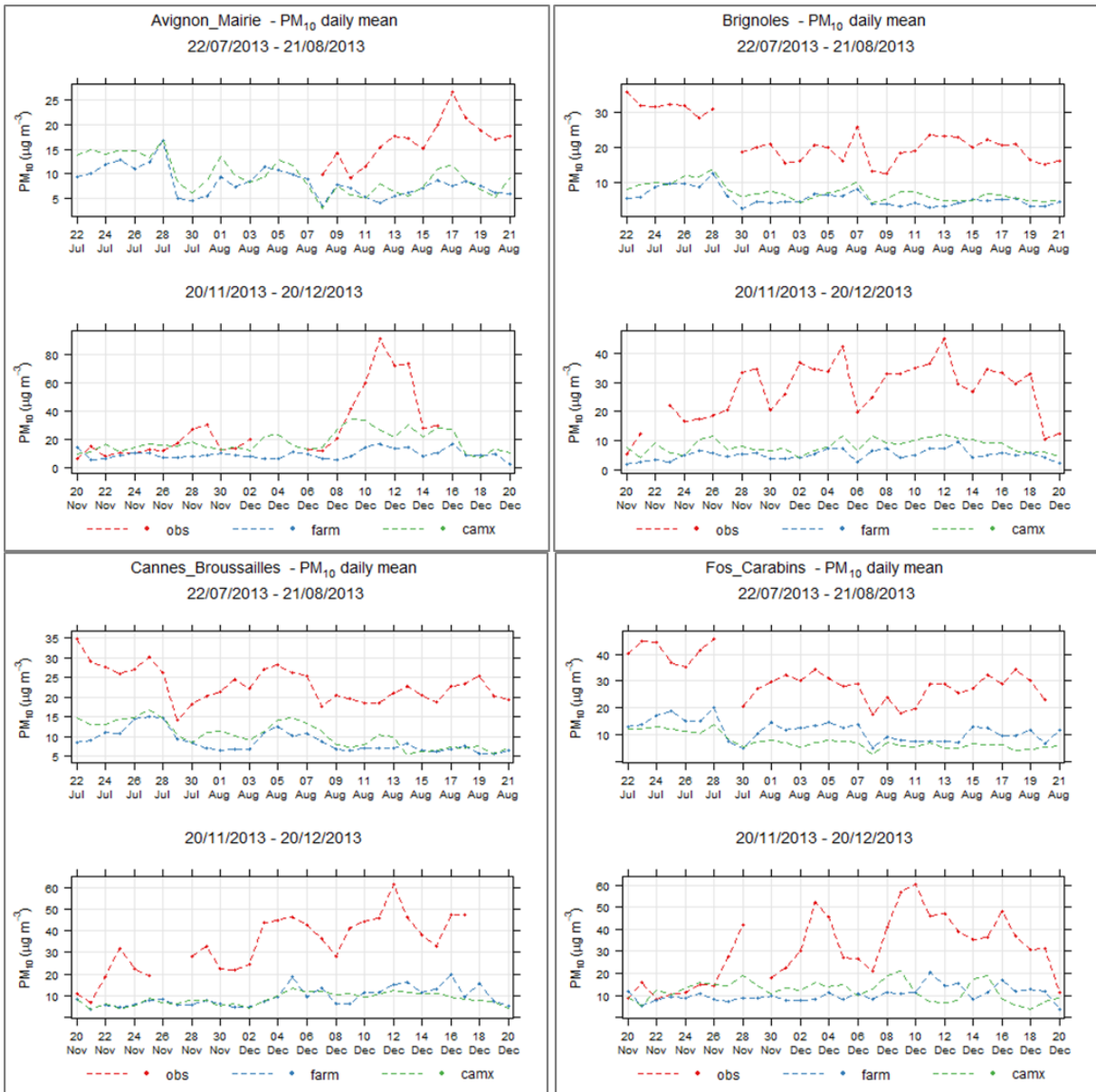
Les graphiques suivants présentes une comparaison détaillées des observations et des résultats de simulation pour différentes stations sur le domaine d'étude.

Nell'insieme del dominio utilizzato per lo studio del contributo all'inquinamento del particolato sono state selezionate alcune stazioni particolarmente significative per le quali si presentano i grafici del confronto puntuale.

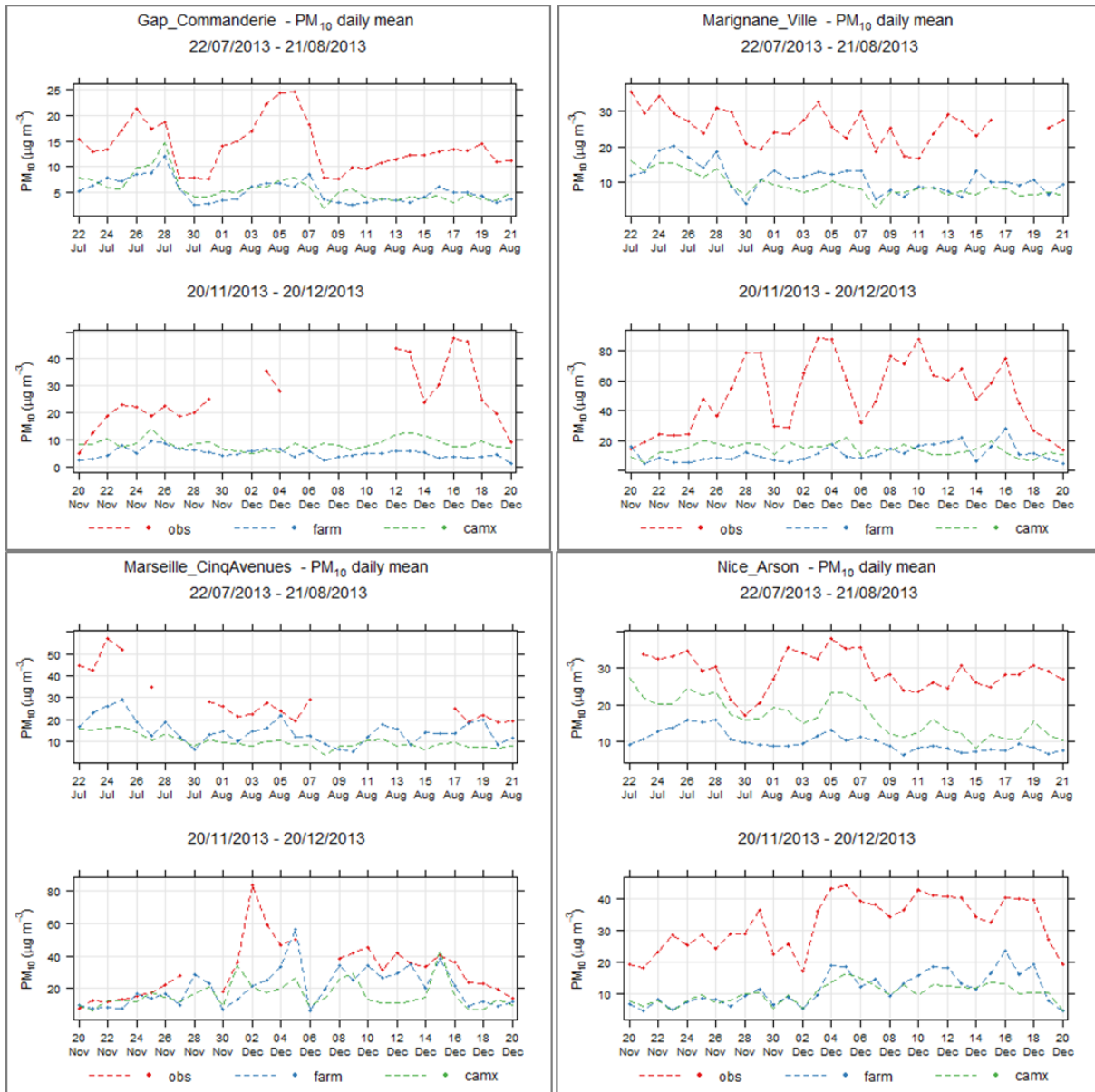
PM10

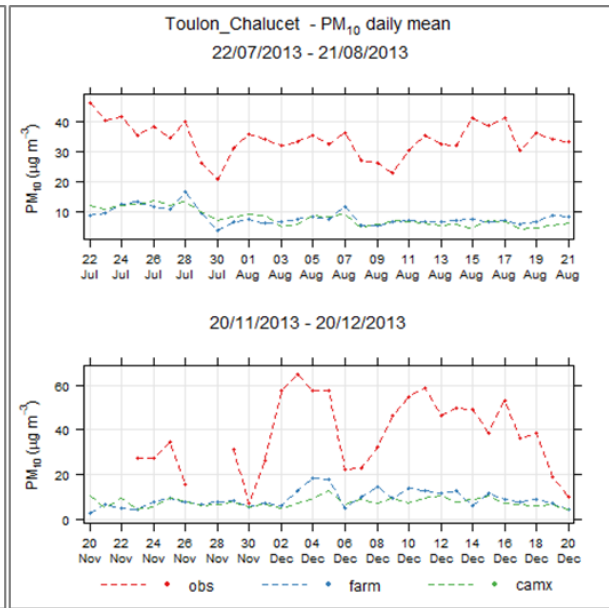
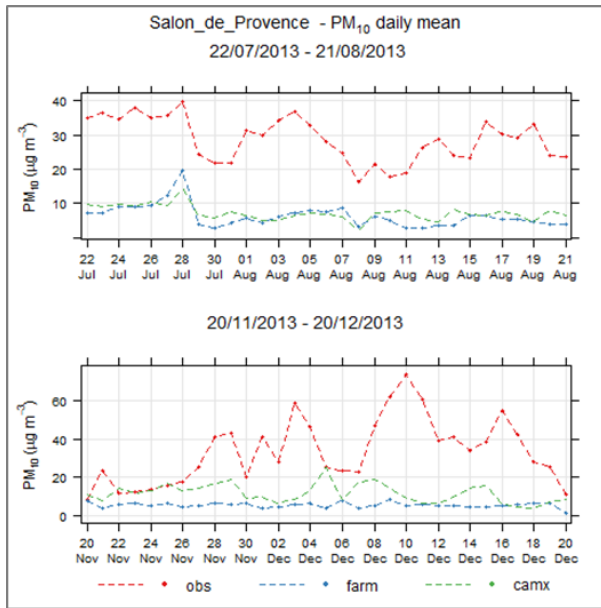
Provence-Alpes-Cote d'Azur



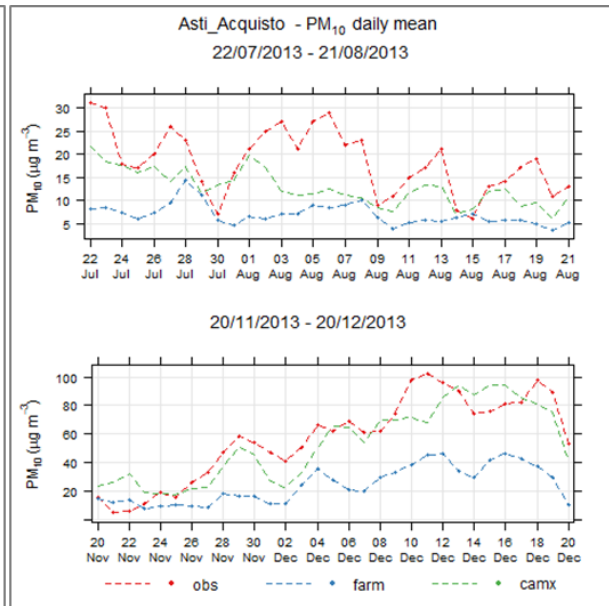
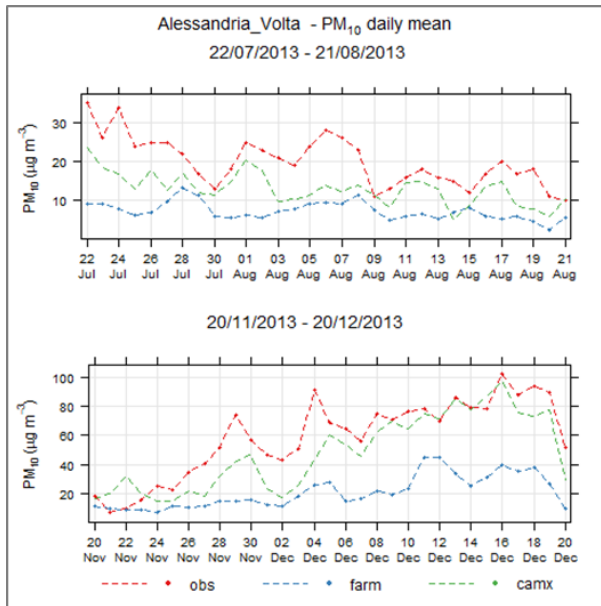


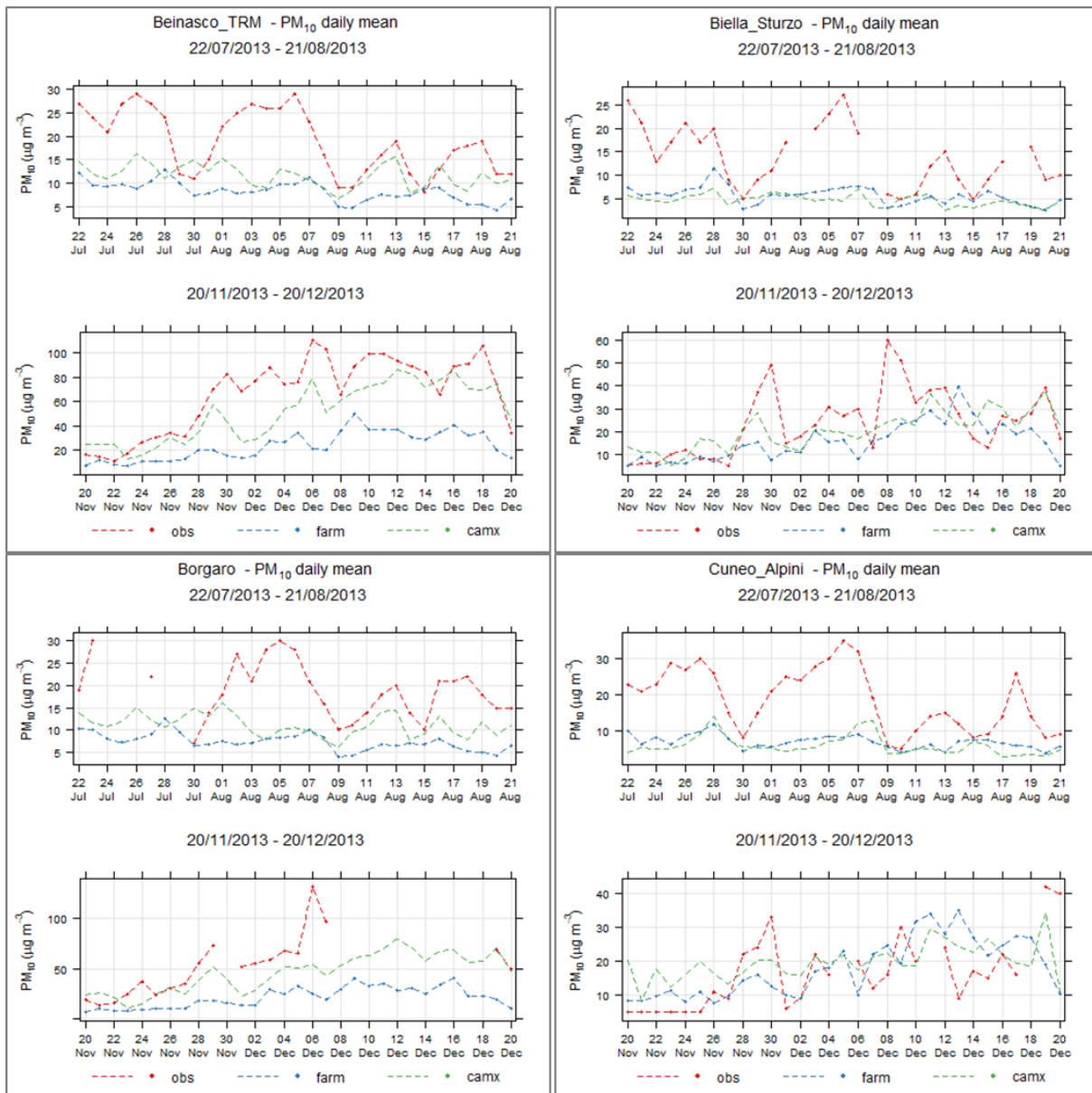
SYSTEME D'ECHANGE ATMOSPHERIQUE INTER REGIONAL SUR LA ZONE ALCOTRA : SH'AIR

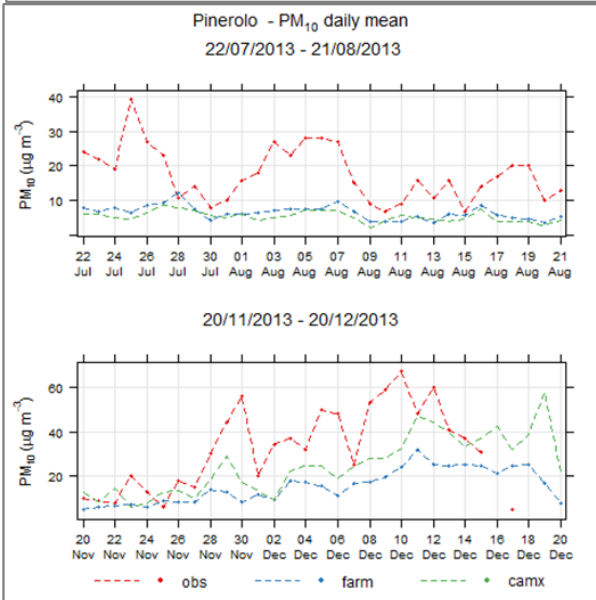
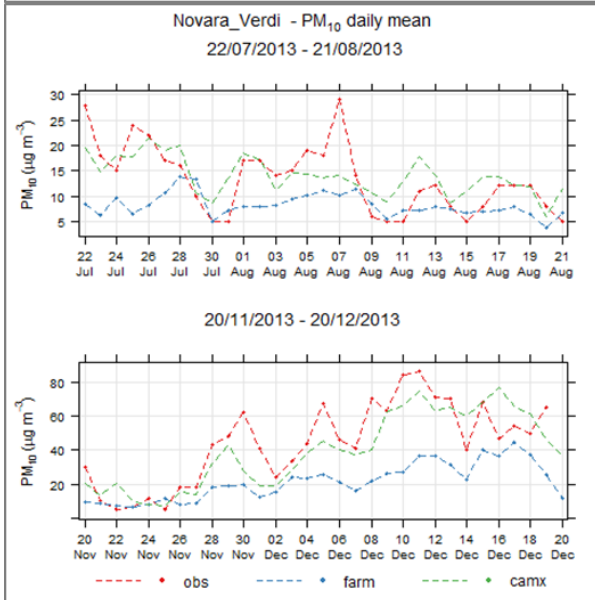
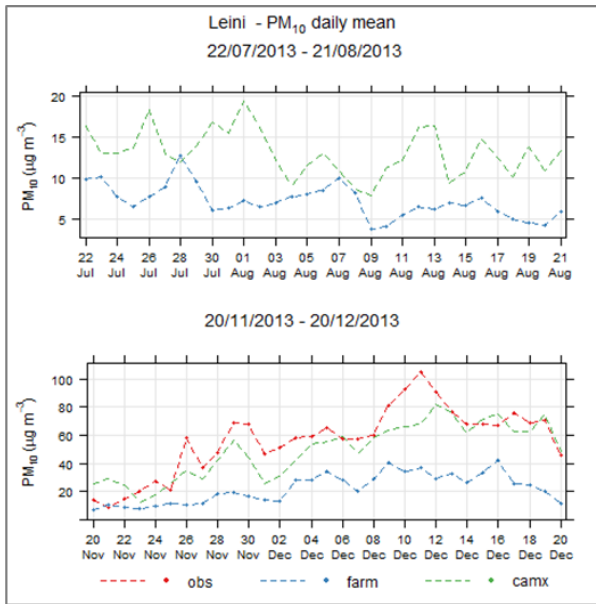
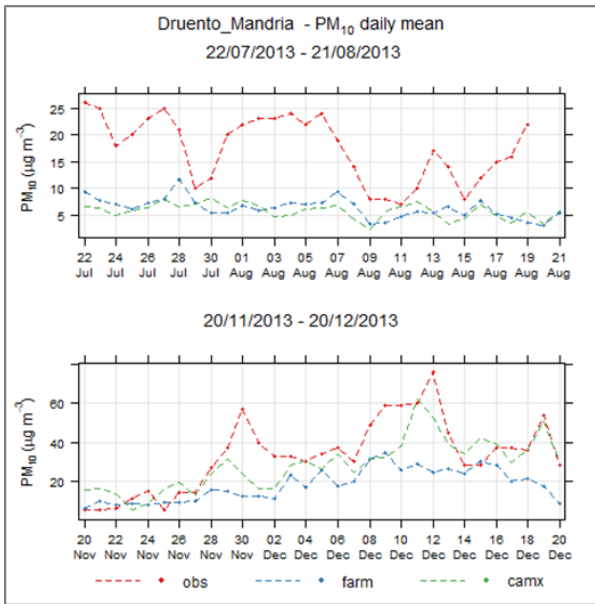


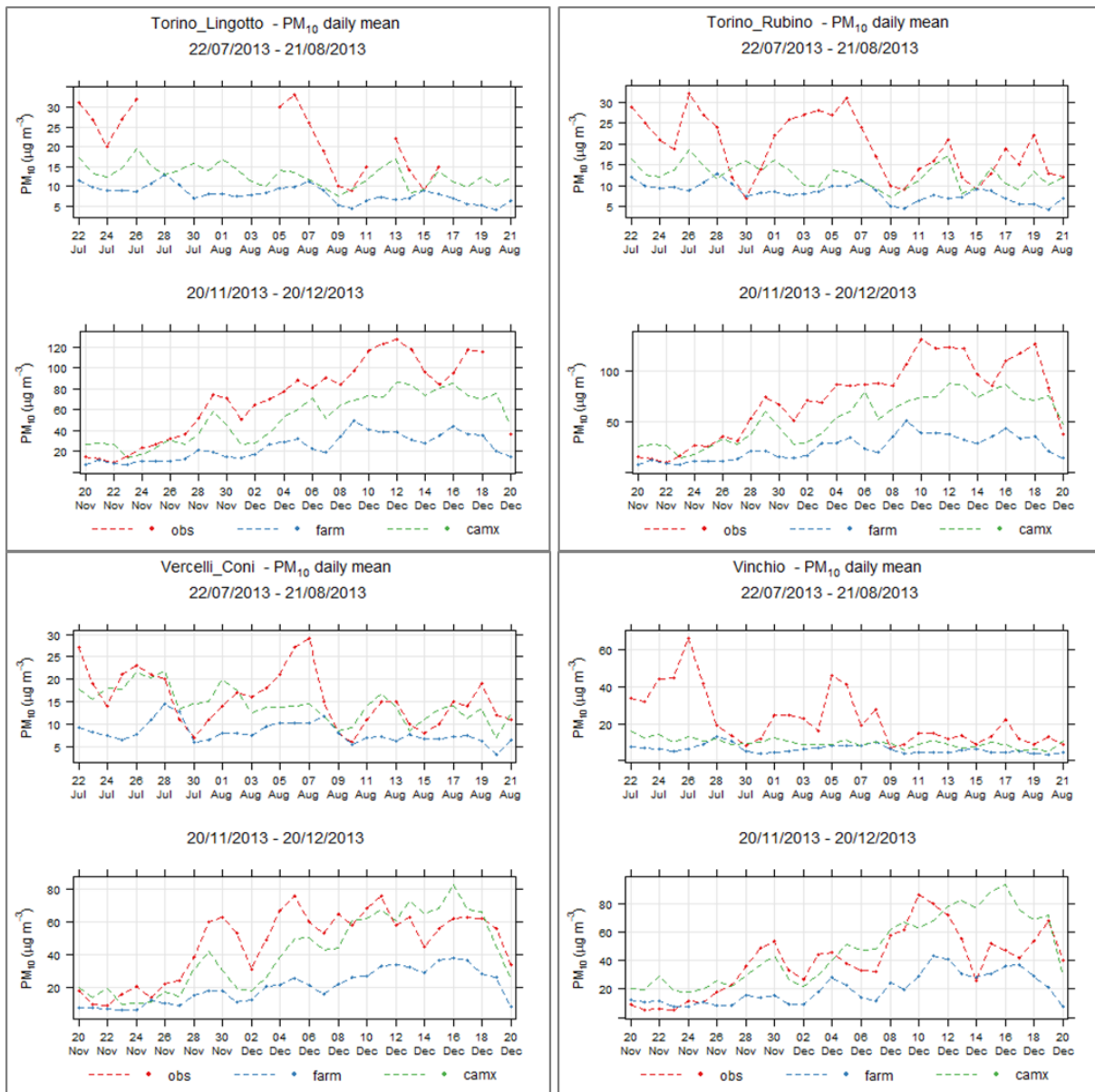


Piemonte

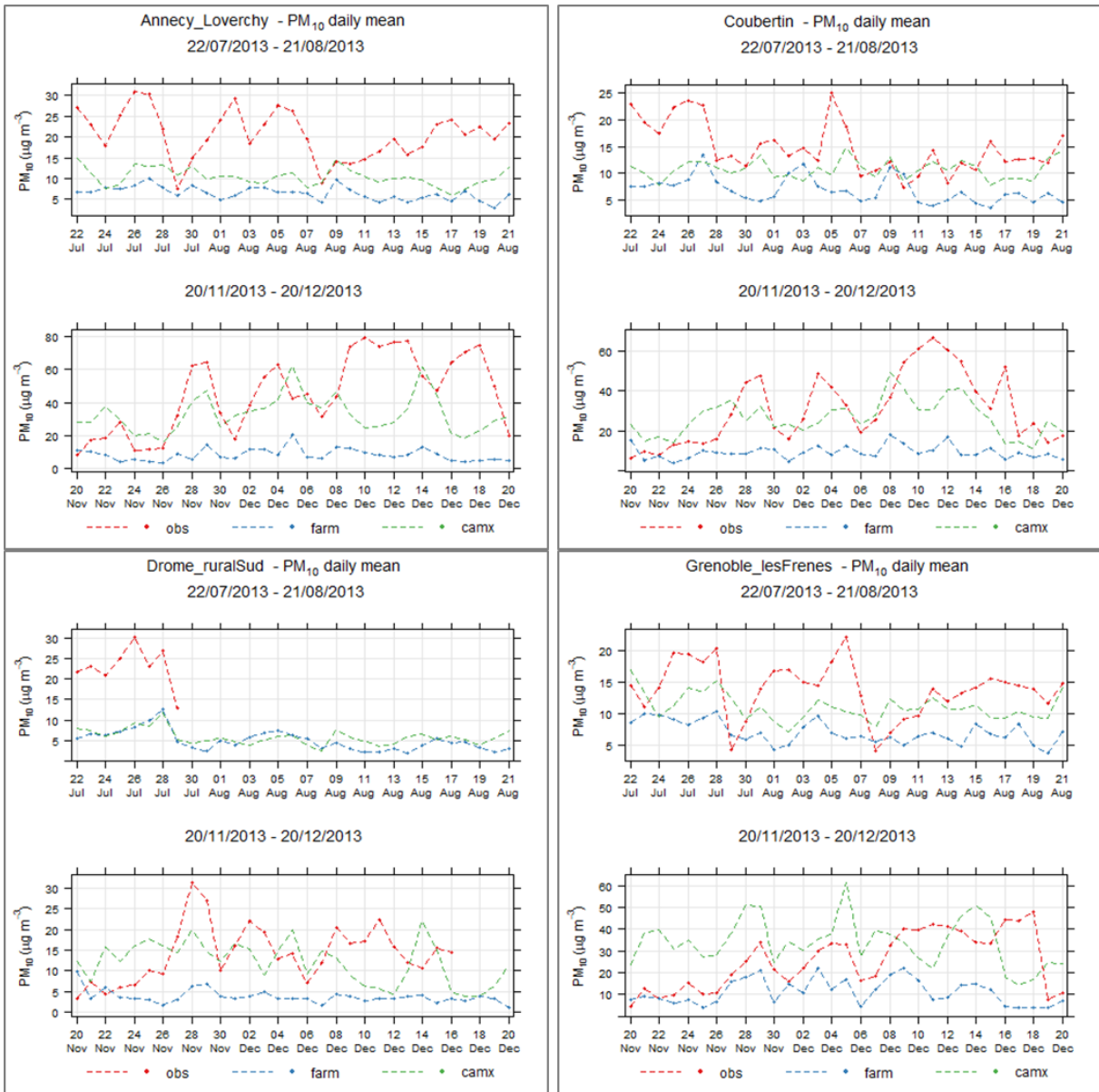


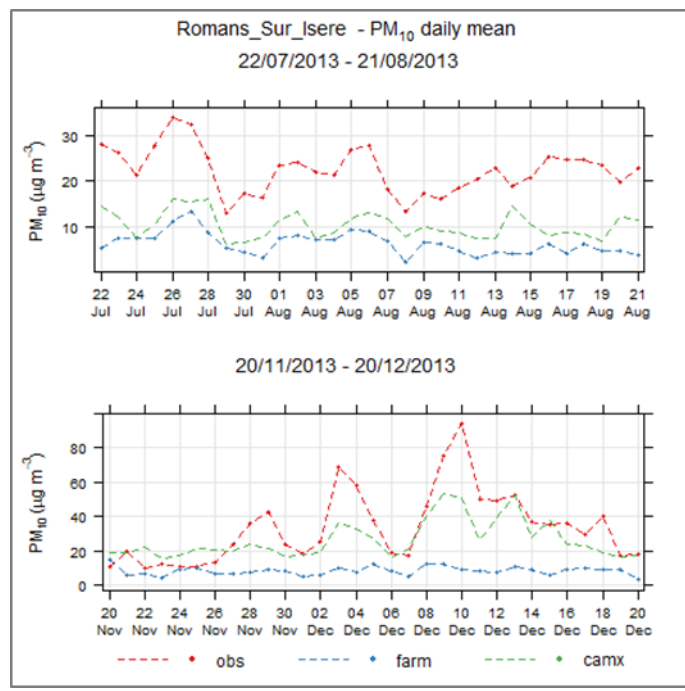
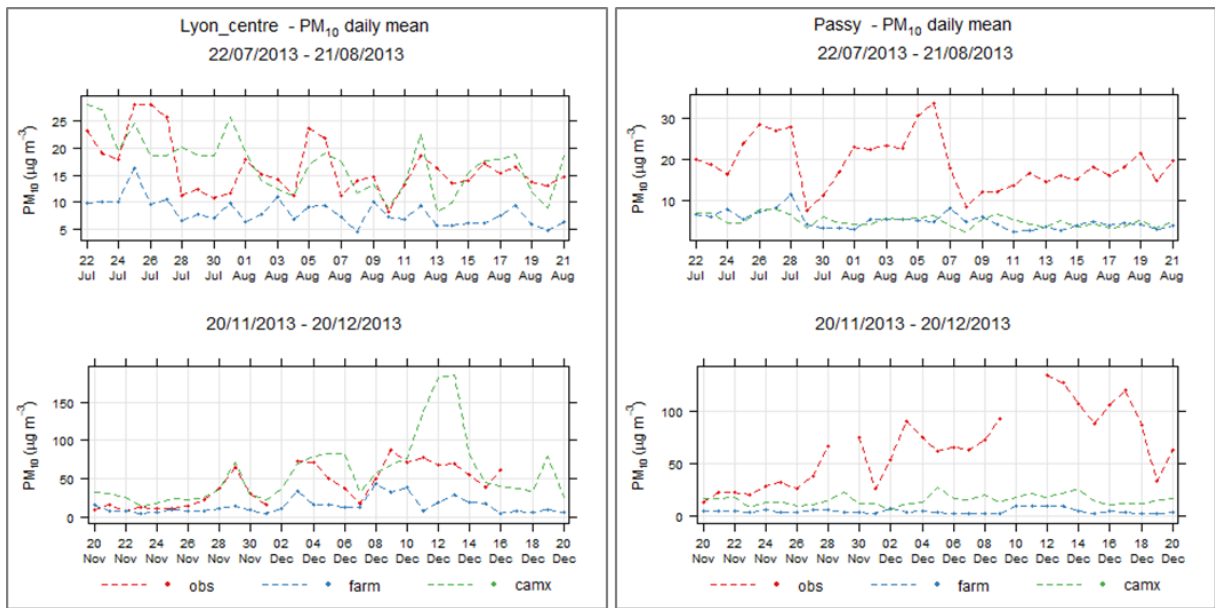




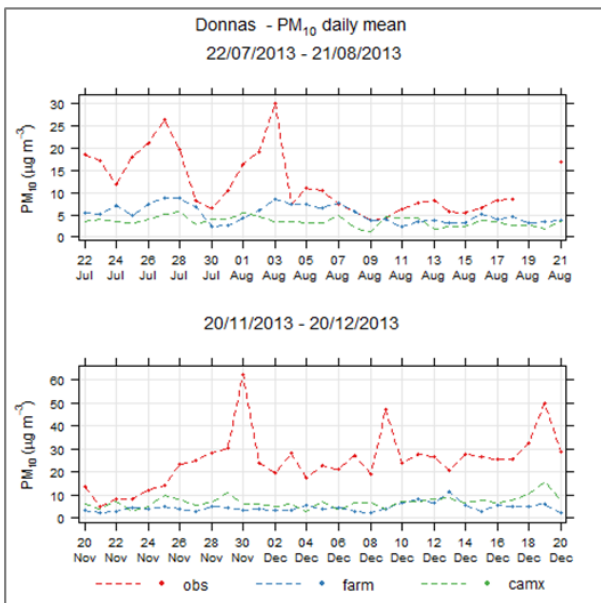
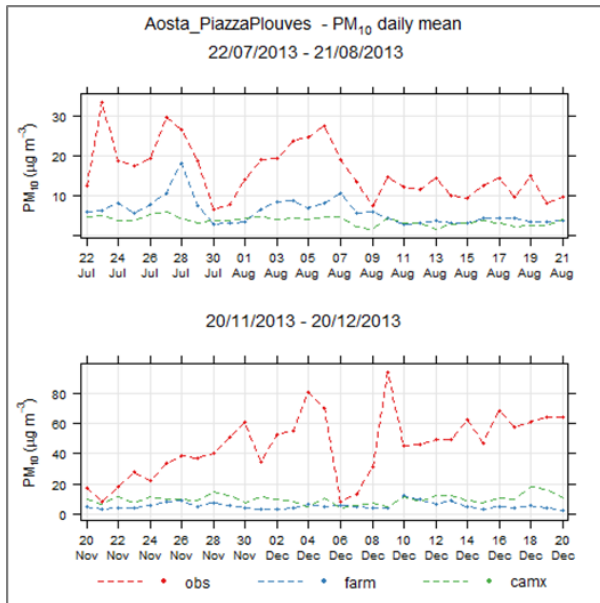


Rhône-Alpes



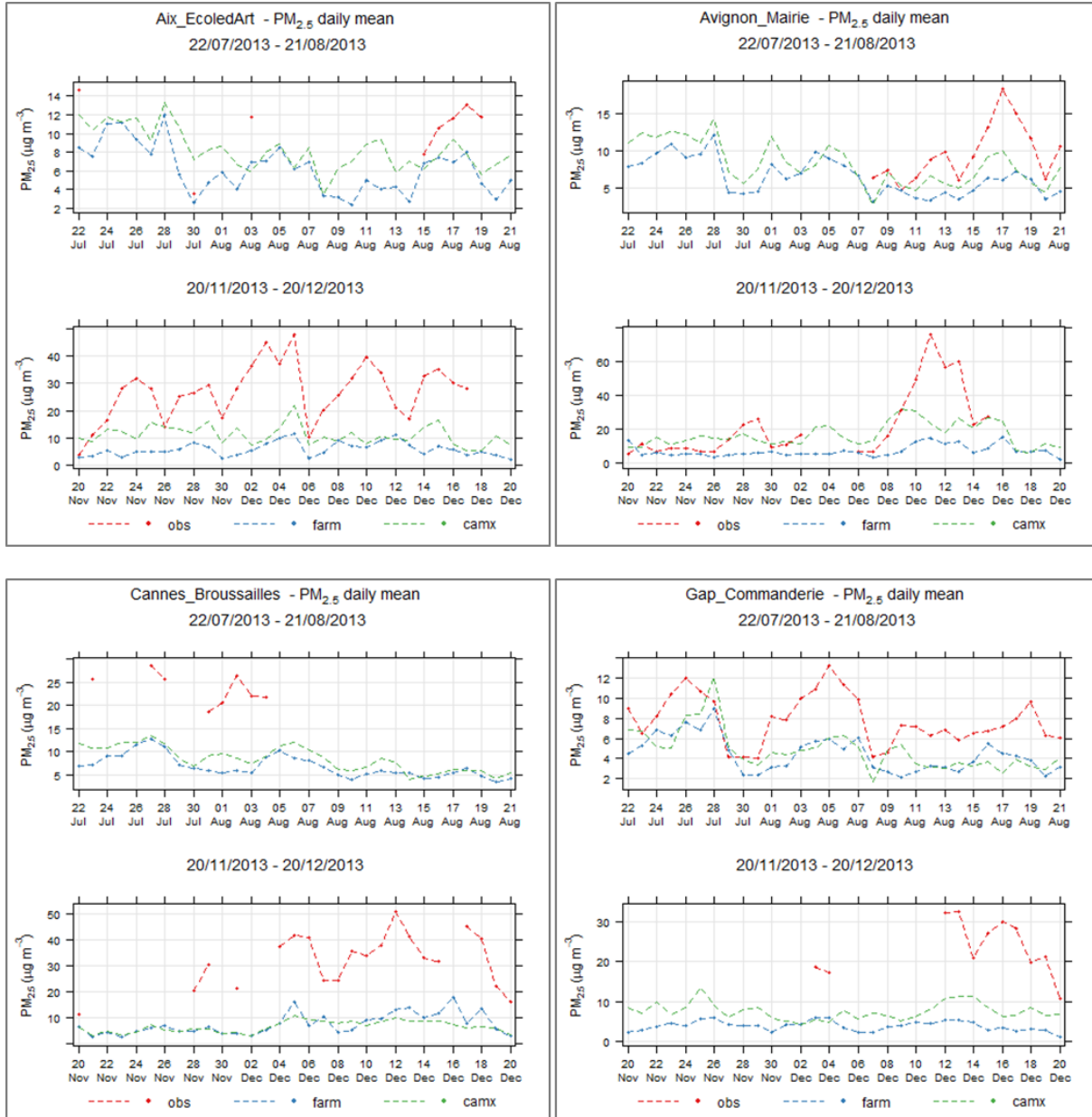


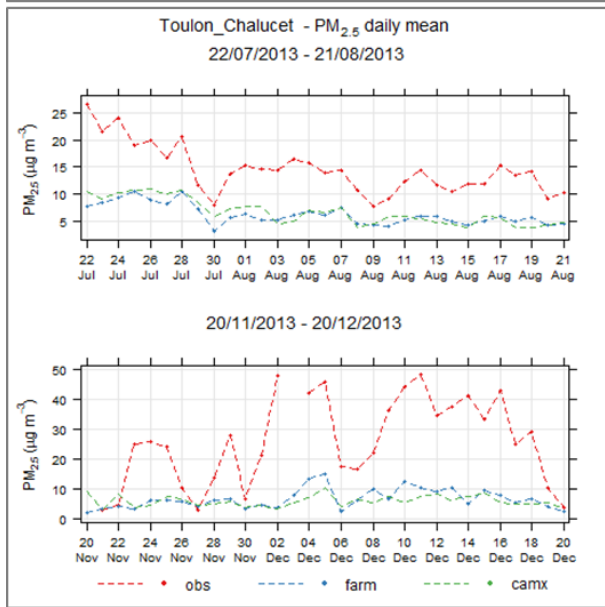
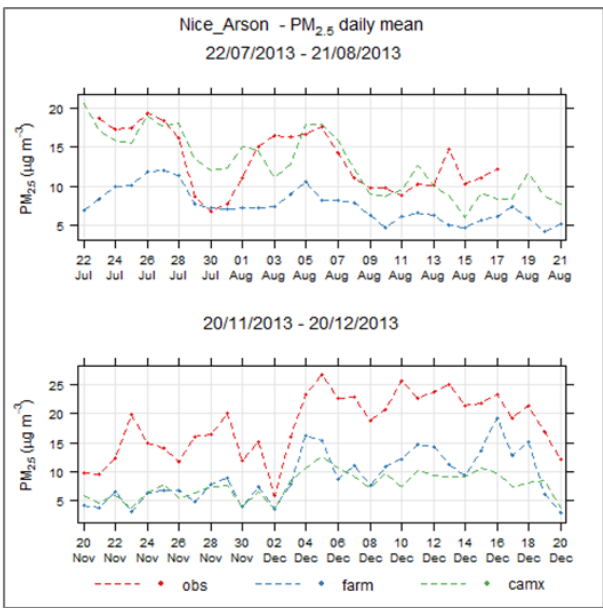
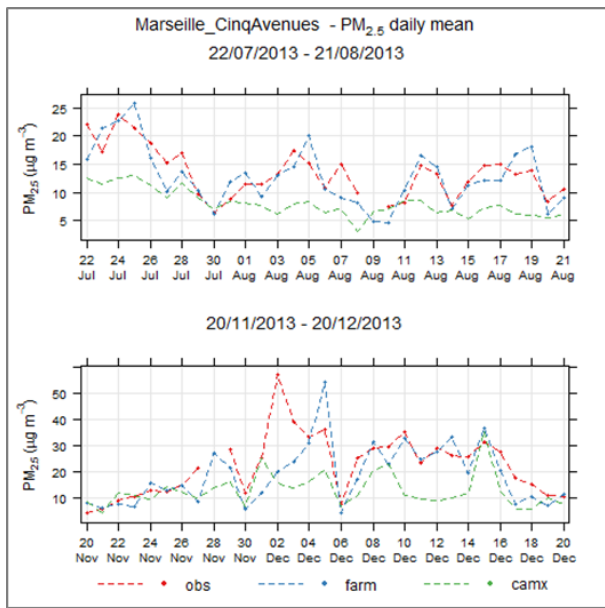
Vallée d'Aosta



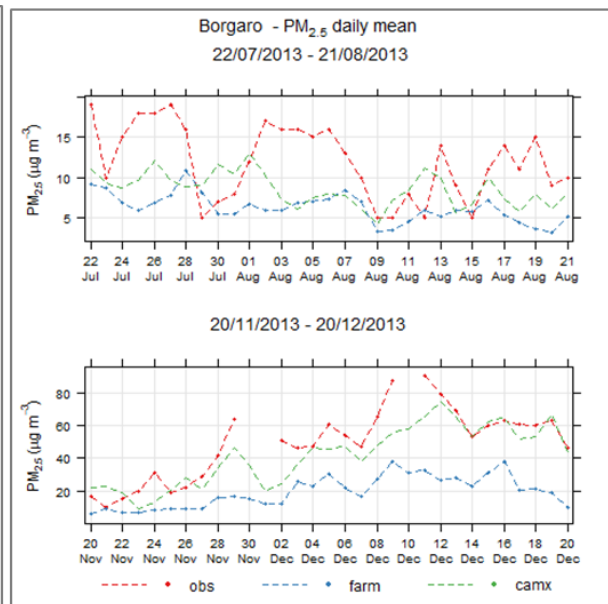
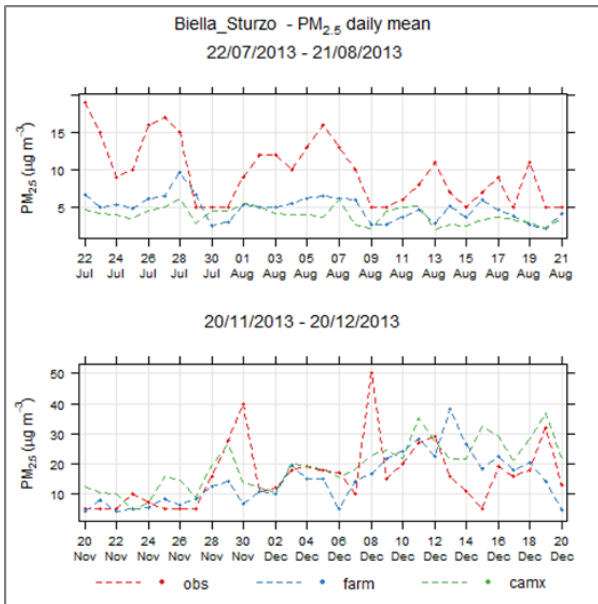
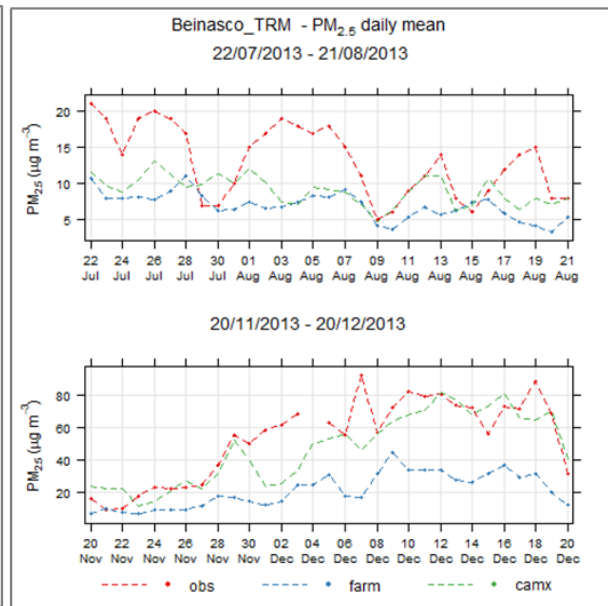
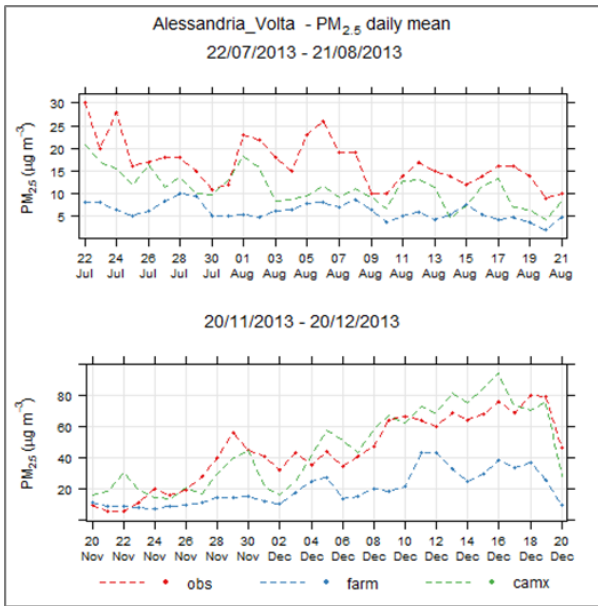
PM2.5

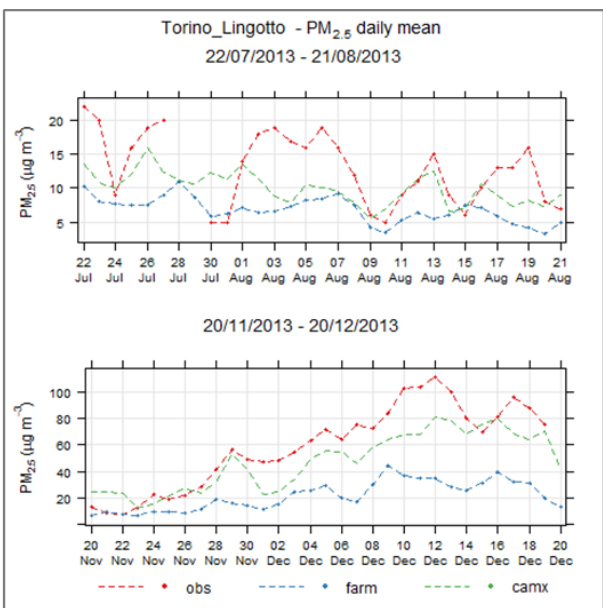
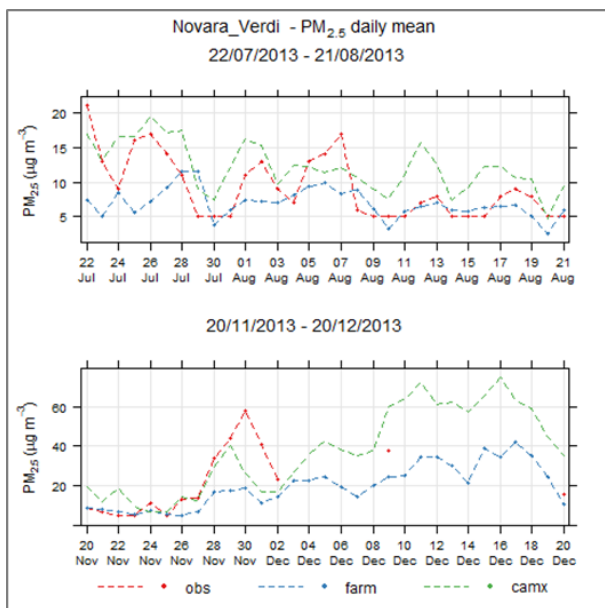
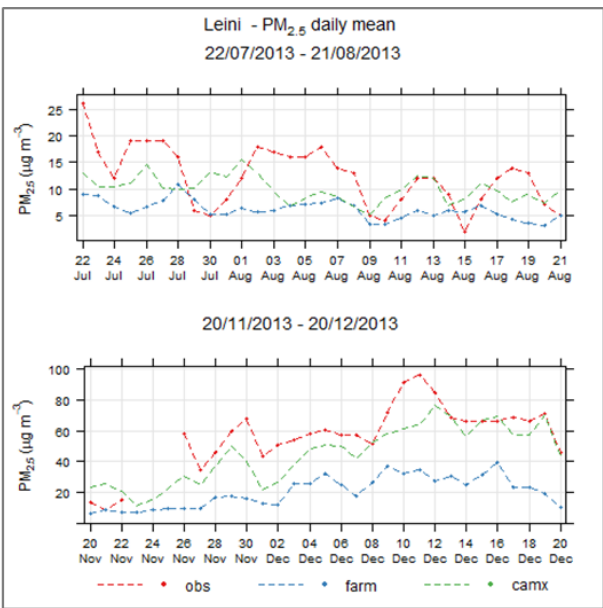
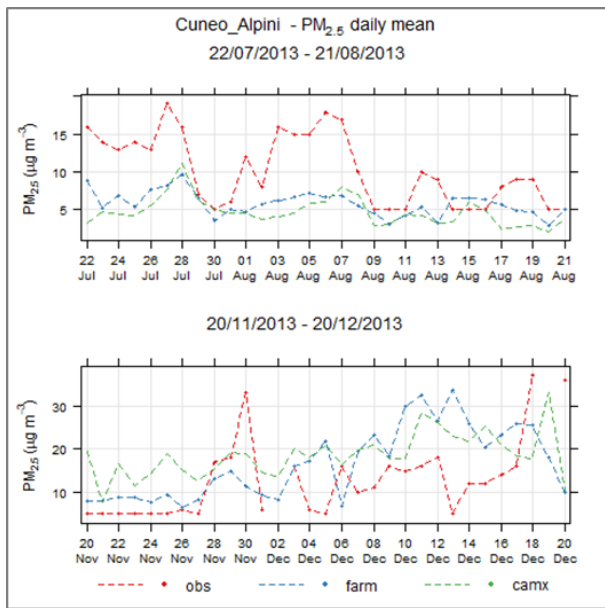
Provence-Alpes-Côte d'Azur

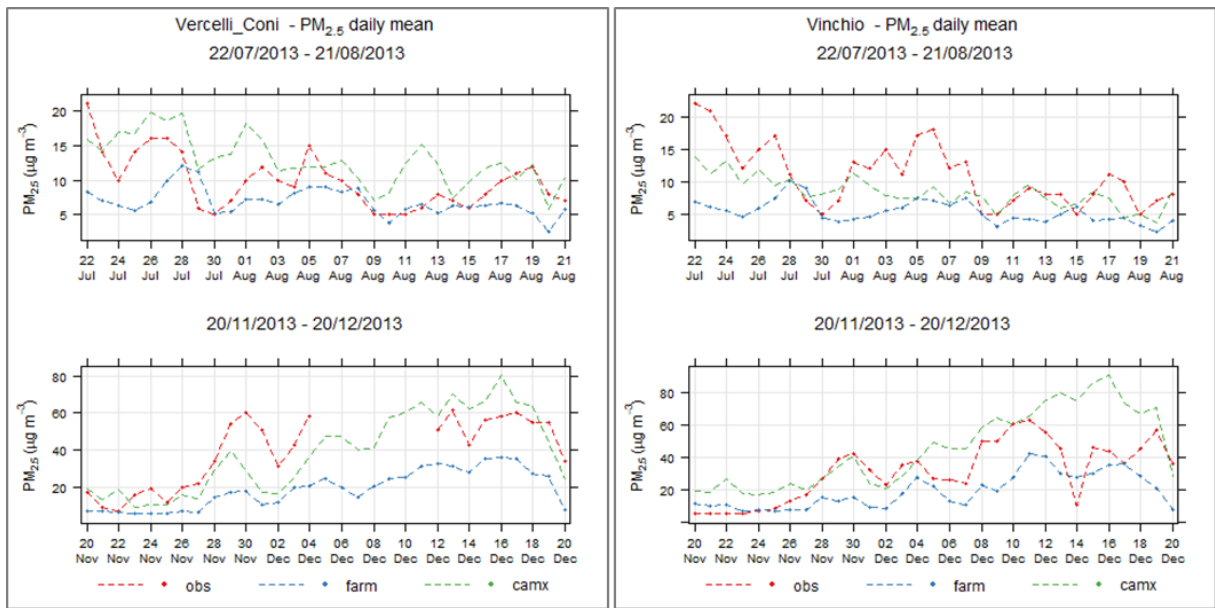




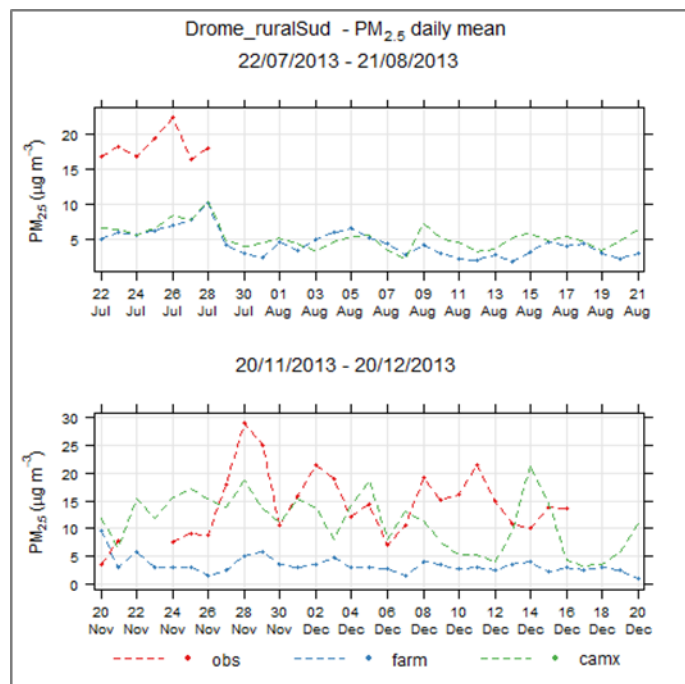
Piemonte







Rhône-Alpes



Vallée d'Aosta

