

Influence des pratiques de viabilité hivernale sur les concentrations de PM10



APPROCHES METROLOGIQUE ET PAR MODELISATION - 2012

www.air-rhonealpes.fr



Diffusion : Mars 2013

Siège social : 3 allée des Sorbiers – 69500 BRON

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

contact@air-rhonealpes.fr







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

CONDITIONS DE DIFFUSION

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

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

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

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

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Air Rhône-Alpes. Toute utilisation partielle ou totale de ce document (extrait de texte, graphiques, tableaux, ...) doit faire référence à l'observatoire dans les termes suivants : « Air Rhône-Alpes (2013) - Influence des pratiques de viabilité hivernale sur les concentrations de PM10 ».

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

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

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

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

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

Cette étude a reçu le concours financier de la DREAL Rhône-Alpes et du LCSQA.

Air Rhône-Alpes remercie les gestionnaires des routes pour leur collaboration dans cette étude, tout particulièrement l'ATMB et la DIR Centre-Est.

Version éditée le 5 mars 2013

Crédits photo page de couverture : lilufoto@Fotolia.com



Sommaire



1. Contexte et objectifs	11
2. Méthodologie.....	12
2.1. Dispositif métrologique	12
2.1.1. Les sites de mesures.....	12
2.1.2. Les périodes de mesures	13
2.1.3. Le matériel de mesures	13
2.1.4. Les analyses.....	13
2.2. Estimation des émissions.....	13
2.3. Modélisation.....	17
2.3.1. Le modèle SIRANE	17
2.3.2. Conditions de simulations	18
3. Résultats	19
3.1. Estimation de la part de sel dans les concentrations de PM10 et impact sur les valeurs limites– Approche métrologique	19
3.1.1. Contexte météorologique	19
3.1.2. Calcul de la part du sel dans les PM10	20
3.1.3. Evolution et facteurs d’influence sur les concentrations de sel ?	27
3.1.4. Impact sur les dépassements de valeur limite journalière.....	31
3.2. Estimation de la part de sel dans les concentrations de PM10 et impact sur les valeurs limites– Approche par modélisation	37
3.2.1. Calcul du facteur d’émissions.....	37
3.2.2. Modélisation- estimation des dépassements	47
4. Conclusions et perspectives	53

Annexes

ANNEXE 1 : IMPLANTATION DE LA STATION CHAMONIX ROUTE BLANCHE	56
ANNEXE 2 : IMPLANTATION DE LA STATION GRENOBLE ROCADE SUD.....	57
ANNEXE 3 : OCCURRENCE NEIGE.....	59



Table des illustrations



FIGURE 1 : SCHEMA GENERAL DE CALCUL DES EMISSIONS DE POLLUANTS	14
FIGURE 2 : EMISSIONS 2008 DE NOX ET DE PM10 PAR SECTEUR D'ACTIVITE SUR LA REGION RHONE-ALPES SOURCE : AIR RHONE-ALPES – VERSION 2011-1	14
FIGURE 3 REPARTITION DES EMISSIONS 2010 DE PM ₁₀ ET PM _{2.5} EN RHONE-ALPES	15
FIGURE 4 FACTEUR DE RESUSPENSION EN FONCTION DU TYPE DE VEHICULES ET EXEMPLE DE MODULATION DU FACTEUR	16
FIGURE 5 : PRINCIPE DE MODELISATION SIRANE.....	17
FIGURE 6 : ROSE DES VENTS POUR LA SIMULATION A CHAMONIX (A GAUCHE) ET A GRENOBLE (A DROITE).....	18
FIGURE 7 EVOLUTION DE LA TEMPERATURE JOURNALIERE (EN °C) DE NOVEMBRE 2011 A AVRIL 2012	19
FIGURE 8 EVOLUTION DU CUMUL DE PRECIPITATIONS JOURNALIER (EN MM) DE NOVEMBRE 2011 A AVRIL 2012	19
FIGURE 9 SALAGE PAR CLASSES D'INTENSITE DE NOVEMBRE 2011 A AVRIL 2012.....	20
FIGURE 10 ESTIMATION DE LA CONCENTRATION DE SEL PENDANT LA PERIODE DE MESURES PAR LA METHODE 1	22
FIGURE 11 ECARTS ABSOLUS ET RELATIFS ENTRE LES METHODES 3 ET 4 POUR L'ESTIMATION DES CONCENTRATIONS DE SEL.....	24
FIGURE 12 ECARTS ABSOLUS ET RELATIFS ENTRE LES METHODES 5 ET 1	25
FIGURE 13 ECARTS EN $\mu\text{G}\cdot\text{M}^{-3}$ SUR L'ESTIMATION DE LA CONCENTRATION DE SEL ENTRE LA METHODE 1BIS ET LES METHODES 5 ET 1 SUR LE SITE DU RONDEAU	26
FIGURE 14 EVOLUTION DU RATIO Cl^-/Na^+ SUR LES 3 SITES DE MESURE	26
FIGURE 15 EVOLUTION DE LA CONTRIBUTION DU SEL AUX CONCENTRATIONS JOURNALIERES DE PM ₁₀	27
FIGURE 16 CROISEMENT DES CONCENTRATIONS DE SEL DANS L'AIR AVEC LE PLANNING DE SALAGE	28
FIGURE 17 CROISEMENT DES CONCENTRATIONS DE SEL DANS L'AIR AVEC LE PLANNING DE SALAGE SUR LA ROUTE BLANCHE.....	28
FIGURE 18 CONCENTRATIONS DE SEL ET PLANNING DE SALAGE PENDANT LES MESURES SUR LA ROCADE SUD DE GRENOBLE (A GAUCHE) ET SUR L'AUTOROUTE BLANCHE (A DROITE)	28
FIGURE 19 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE PM ₁₀ ET DES CONCENTRATIONS DE SEL JOURNALIERES	29
FIGURE 20 COMPARAISON DES CONCENTRATIONS TOTALES DE PM ₁₀ AVEC LES ESTIMATIONS DE CONCENTRATIONS SANS LA PART DE SEL	29
FIGURE 21 CONCENTRATIONS DE PM ₁₀ EN FONCTION DE LA VITESSE ET DE LA DIRECTION DU VENT LES 6 ET 8 FEVRIER.....	30
FIGURE 22 CONCENTRATIONS DE PM ₁₀ EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DU SOL LES 6 ET 8 FEVRIER.....	30
FIGURE 23 EVOLUTION DE LA CONCENTRATION DE PM ₁₀ ET DES TEMPERATURE DE L'AIR ET DU SOL DU 5 AU 14 FEVRIER 2012	31
FIGURE 24 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE PM ₁₀ ET DE LA PART DE SEL SUR LE SITE DES FRENES A GRENOBLE.....	32
FIGURE 25 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE PM ₁₀ ET DE LA PART DE SEL SUR LE SITE DE LA ROCADE SUD A GRENOBLE.....	32
FIGURE 26 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE PM ₁₀ ET DE LA PART DE SEL SUR LE SITE DE LA ROUTE BLANCHE.....	34
FIGURE 27 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS JOURNALIERES DE PM ₁₀ SUR LE SITE DE LA ROCADE SUD DE GRENOBLE.....	35
FIGURE 28 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS JOURNALIERES DE PM ₁₀ SUR LE SITE DE LA ROUTE BLANCHE ...	36
FIGURE 29 CERCLE DES CORRELATIONS	38
FIGURE 30 COMPARAISON DES TAUX DE DETECTIONS DES JOURS DE SALAGE PAR LE MODELE STATISTIQUE	39



FIGURE 31 DISTRIBUTION DES P-VALUE POUR CHAQUE VARIABLE	42
FIGURE 32 COMPARAISON DES CONCENTRATIONS DE SEL ESTIMEES ET MESUREES SUR LE SITE DE LA ROCADE SUD A GRENOBLE	44
FIGURE 33 COMPARAISON DES CONCENTRATIONS DE SEL ESTIMEES ET MESUREES SUR LE SITE DE LA ROUTE BLANCHE.....	44
FIGURE 34 EMISSIONS DE PM10 ET DE SEL SUR LA ROCADE SUD EN G.KM ⁻¹	45
FIGURE 35 EMISSIONS DE PM10 ET DE SEL SUR LA ROUTE BLANCHE EN G.KM ⁻¹	46
FIGURE 36 EMISSIONS DE PM10 CUMULEES DE NOVEMBRE 2011 A AVRIL 2012.....	46
FIGURE 37 : COMPARAISONS ENTRE LES CONCENTRATIONS MESUREES ET SIMULEES SUR LA ROCADE SUD ET LA ROUTE BLANCHE AVEC ET SANS SEL DANS LES EMISSIONS, REPARTIES SUR 24H (COLONNE DE GAUCHE) OU EN POURCENTAGE DE TRAFIC (COLONNE DE DROITE).	48
FIGURE 38 : EVOLUTIONS TEMPORELLES DES CONCENTRATIONS MESUREES ET SIMULEES SUR LA ROCADE SUD AVEC ET SANS SEL POUR UNE REPARTITION DU SEL SUR L'ENSEMBLE DE LA JOURNEE ET EN FONCTION DU TRAFIC	49
FIGURE 39 : EVOLUTIONS TEMPORELLES DES CONCENTRATIONS MESUREES ET SIMULEES SUR LA ROUTE BLANCHE AVEC ET SANS SEL POUR UNE REPARTITION DU SEL SUR L'ENSEMBLE DE LA JOURNEE ET EN FONCTION DU TRAFIC	50
FIGURE 40 : DISPERSION AUTOUR DE LA ROUTE AU RONDEAU ET AUX BOSSONS : CONCENTRATION MOYENNE JOURNALIERE SIMULEE AVEC ET SANS SEL.	51
FIGURE 41 : COMPARAISON SIMULATION/MESURE LORS DES JOURNEES DE DEPASSEMENT DE 50 µG.M ⁻³ ENTRE LE 1 ^{ER} DECEMBRE 2011 ET FIN AVRIL 2012	52





Résumé



La région Rhône-Alpes connaît de nombreux dépassements de la valeur limite journalière pour les particules PM10. La mise en œuvre de pratiques de viabilité hivernale étant courante dans la région et susceptible d'augmenter les concentrations de ces particules fines, il devient essentiel de pouvoir déterminer quelle est la part de dépassements attribuable au salage/sablage des routes. La directive européenne 2008/50/CE permet de retrancher des dépassements réglementaires attribuables au salage/sablage si les preuves appropriées sont apportées. L'objectif de ce travail est d'améliorer ou développer les outils d'estimation de la contribution du salage/sablage dans les dépassements de PM10. En suivant cet objectif, une première évaluation de cette contribution sur les sites de Rhône-Alpes sera également approchée.

Suite à une enquête auprès des principaux exploitants des routes de Rhône-Alpes, il s'avère que le sablage des routes est peu, voire pas pratiqué, en Rhône-Alpes. Cette étude s'est donc entièrement consacrée à la thématique du salage.

La méthodologie générale de l'étude est fondée sur deux approches : l'une métrologique, l'autre par modélisation. Dans un premier temps, des mesures ont été réalisées sur trois secteurs afin d'estimer la part de sel dans les dépassements de poussières PM10 :

- 1 station de proximité trafic en bordure de la Rocade Sud à Grenoble
- 1 station urbaine de comparaison à Grenoble – Les Frênes
- 1 station de proximité trafic en bordure de la Route Blanche (N205) près de Chamonix.

Les concentrations de sel journalières ont été évaluées sur une période de deux mois environ (février-mars 2012) à partir de l'analyse des ions (chlorure, sodium, calcium). Elaborée avec le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) et le Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement (LGGE), cette approche métrologique a permis de définir et d'évaluer différentes méthodologies d'estimation, puis de retenir la plus précise possible sans la surestimer, conformément aux recommandations du guide européen.

Les mesures réalisées ont permis d'estimer la contribution du sel dans la part des PM10 sur 3 secteurs de la région. Les concentrations de sel sont faibles sur le site urbain des Frênes et modérées en proximité de la Rocade Sud à Grenoble (quelques microgrammes par mètre cube). En revanche, les concentrations de sel peuvent atteindre plusieurs dizaines de $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en proximité de la route Blanche près de Chamonix. La contribution des sels de route peut ainsi représenter plus de 50% des particules PM10 sur le site de la Route Blanche alors qu'elle est limitée à 10% environ sur le secteur de la Rocade Sud à Grenoble.

Sur les secteurs de proximité automobile étudiés, le salage des routes contribue effectivement certains jours aux dépassements de la valeur limite pour les PM10. Cette contribution est faible sur le secteur de la Rocade Sud (3 à 6 dépassements attribuables sur 48 pendant l'hiver 2011-2012), elle est beaucoup plus importante sur le site de la Route Blanche (7 à 9 dépassements attribuables sur 15 pendant la période). Les informations recueillies ne sont pas suffisantes pour extrapoler ces résultats de manière quantitative aux autres stations de surveillance de la région mais soulèvent la nécessité de poursuivre les investigations afin d'évaluer cette contribution sur les autres secteurs en dépassement réglementaire.

Dans un deuxième temps, les données recueillies ont servi au développement des outils de modélisation (calcul des émissions – modélisation de la dispersion).



L'objectif de cette seconde partie était de raffiner le facteur de remise en suspension des PM10 selon la remise en suspension attendue du sel. La méthodologie envisagée pour l'estimation des émissions était d'une part bibliographique, d'autre part à partir des données recueillies dans le cadre de l'étude. En l'absence de références bibliographiques pour l'estimation de ce facteur, l'estimation a été basée à partir des seules données de concentrations de sel mesurées dans l'étude. Ces données ont permis d'évaluer les émissions de PM10 liées à la resuspension du sel sur les secteurs étudiés à l'aide dans un premier temps d'un modèle statistique pour reconstituer les concentrations de sel en dehors des périodes de mesures (Hiver 2011-2012) et dans un second temps de la recherche d'un facteur de conversion Concentrations à Emissions. Toutefois l'extrapolation du modèle à d'autres axes routiers de la région comme prévu initialement n'est pas possible avec les seules données disponibles. En effet, un modèle par site a été construit.

Les modèles statistiques obtenus sur les deux secteurs de proximité automobile ont des difficultés à prévoir les pics de sel mais donnent toutefois des résultats satisfaisants sur la période étudiée. Pour poursuivre l'estimation des émissions de sel selon cette méthodologie, des données supplémentaires seraient nécessaires afin de proposer une meilleure paramétrisation du modèle statistique lié aux concentrations. Une analyse complémentaire des résultats du modèle statistique est par ailleurs nécessaire et pour cela, la récupération précise non seulement des jours de salage mais également des quantités de sel épandues sur les axes routiers étudiés est à envisager.

L'estimation des émissions montre que le sel remis en suspension peut représenter sur la période hivernale entre 15% et près de 80% des émissions de PM10 d'un axe routier.

Les simulations de la dispersion des émissions pour les tronçons de route aux abords de chaque station de mesure (Grenoble Rocade Sud et Chamonix Route Blanche) ont été réalisées pour la période d'étude avec le modèle SIRANE. Les concentrations simulées avec et sans sel ont été comparées aux mesures. Les évaluations faites en termes de moyennes journalières ont également montré que la répartition horaire du sel dans les émissions journalières n'a pas d'influence significative sur les concentrations simulées. Les résultats ont montré qu'il est indispensable d'utiliser des émissions intégrant la part de sel notamment à Chamonix Route Blanche si l'on veut reproduire au mieux les journées de dépassement du seuil.

Cette première étude sur l'influence des pratiques de viabilité hivernale sur les concentrations de PM10 en Rhône-Alpes a montré que la part de la resuspension du sel dans les émissions et les concentrations de PM10 pouvait être importante, notamment dans la vallée de l'Arve, territoire impliqué dans le contentieux européen. Par conséquent, de nouvelles mesures seront réalisées en 2013 dans le secteur de Passy afin d'évaluer la contribution du salage sur ce secteur. En parallèle, il conviendrait de développer les connaissances sur les quantités de sel épandues sur les différents axes du territoire rhônalpin ainsi que sur les phénomènes de resuspension du sel en fonction des différents facteurs influents.



1. Contexte et objectifs

Pour les particules PM10, la situation rhônalpine est particulièrement préoccupante vis-à-vis des valeurs limites. En effet, plus d'un tiers des habitants de la région est exposé à des dépassements de cette valeur réglementaire. Cette pollution aux particules est principalement localisée dans les principales agglomérations de la région, hormis l'agglomération stéphanoise qui reste préservée. Elle est également importante sur l'axe Saône-Rhône, sous influence des autoroutes A6 et A7. Enfin, les vallées alpines, notamment la vallée de l'Arve, sont particulièrement impactées en raison de leur enclavement couplé à une utilisation importante du chauffage individuel au bois, fortement émetteur de particules.

La France fait l'objet d'un contentieux européen, dans lequel sont impliqués les dépassements réglementaires observés en Rhône-Alpes. La Commission poursuit la France devant la Cour européenne de justice pour non-respect des valeurs limites applicables aux particules fines (PM10) depuis leur entrée en vigueur le 1er janvier 2005.

Les pratiques de salage/sablage sont courantes en période hivernale en Rhône-Alpes et susceptibles d'augmenter les concentrations de particules fines PM10. Compte tenu des nombreux dépassements hivernaux de particules PM10 enregistrées dans la région, il devient essentiel de pouvoir déterminer quelle est la part de dépassements attribuable au salage/sablage des routes. La directive 2008/50/CE dans son article 21, les décrets et arrêtés français du 21 octobre 2010, prévoient en effet de pouvoir retrancher des dépassements réglementaires attribuables au salage/sablage si les preuves appropriées sont apportées.

Le travail réalisé s'inscrit dans l'axe 3 d'amélioration des connaissances du Plan Régional de Surveillance de la Qualité de l'Air de Rhône-Alpes. L'objectif est d'améliorer ou développer les outils d'estimation de la contribution du salage/sablage dans les dépassements de PM10. En suivant cet objectif, une première évaluation de cette contribution sur les sites de Rhône-Alpes sera également approchée. Cette étude a reçu le soutien scientifique du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA), du Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement (LGGE) de Grenoble et du Laboratoire de Chimie Moléculaire et Environnement (LCME) de Chambéry pour l'établissement de la méthodologie et l'interprétation des résultats de mesures.

Le présent rapport est constitué de deux grandes parties que sont la présentation de la méthodologie puis les résultats.

2. Méthodologie

Suite à une enquête auprès des principaux exploitants des routes de Rhône-Alpes, il s'avère que le sablage des routes est peu, voire pas pratiqué, en Rhône-Alpes. Cette étude a donc restreint le champ « Pratiques de viabilité hivernale » à « Salage des routes ».

La méthodologie générale de l'étude est fondée sur deux approches : l'une métrologique, l'autre par modélisation. Dans un premier temps, des mesures ont été réalisées sur quelques sites afin d'estimer la part de sel dans les niveaux de poussières PM10, dans un deuxième temps, les données recueillies ont servi au développement des outils de modélisation (calcul des émissions – modélisation de la dispersion).

2.1. Dispositif métrologique

2.1.1. Les sites de mesures

Elaborée avec le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) et le Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement (LGGE), l'approche métrologique présentée ci-dessous a permis de définir et d'évaluer différentes méthodologies d'estimation de l'influence du salage sur les concentrations de PM10.

Les sites de mesures retenus sont des stations de surveillance de la qualité de l'air. Trois sites complémentaires ont été sélectionnés :

- 1 station de proximité trafic en bordure de la Rocade Sud à Grenoble
- 1 station urbaine de comparaison à Grenoble – Les Frênes
- 1 station de proximité trafic en bordure de la Route Blanche (N205) près de Chamonix.

A Grenoble, les deux stations dépassent la valeur limite européenne concernant les PM10, avec respectivement en 2011, 57 jours de dépassement en proximité de la Rocade et 40 jours aux Frênes (La valeur limite est de 35 jours).

En bordure de la Route Blanche, la valeur limite est respectée (12 jours de dépassement en 2011), toutefois cette zone a été retenue car elle est potentiellement plus exposée au salage des voies.

		
Station fixe Rocade Sud Grenoble	Station fixe Grenoble Les Frênes	Station fixe Chamonix Route Blanche
TMJA 2010 ¹ = 89 700 véhicules/j Concentration PM10 annuelle 2011 = 35 µg.m ⁻³ Nb de jours de dépassement de 50 µg.m ⁻³ = 57	Concentration PM10 annuelle 2011 = 28 µg.m ⁻³ Nb de jours de dépassement de 50 µg.m ⁻³ = 40	TMJA 2010 : 14 300 véhicules/jour Concentration PM10 annuelle 2011 = 22 µg.m ⁻³ Nb de jours de dépassement de 50 µg.m ⁻³ = 12

TABLEAU 1 DESCRIPTION DES SITES DE MESURES

¹ Trafic Moyen Journalier Annuel en 2010

2.1.2. Les périodes de mesures

Les mesures ont débuté le 31 janvier 2012 sur les stations de Grenoble et le 3 février 2012 sur la station de la route Blanche. Les mesures ont été réalisées tous les jours de minuit à minuit afin d'obtenir des valeurs journalières, période de référence pour la valeur limite en PM10.

2.1.3. Le matériel de mesures

Les mesures ont été réalisées par préleveur Digital DA80. Le préleveur aspire de l'air à un débit de 30 m³.h⁻¹. Les particules sont piégées sur un filtre quartz 150 mm. Le filtre est ensuite analysé en laboratoire pour déterminer la composition chimique des particules.



2.1.4. Les analyses

Les analyses ont été réalisées par le Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement de Grenoble. L'analyse de la fraction ionique des aérosols et des acides organiques légers a été réalisée sur la phase aqueuse par chromatographie ionique (modèle Dionex ICS 3000) avec une colonne CS16 pour l'analyse des cations et colonne AS11 HC pour l'analyse des anions. L'analyse des anions a permis la quantification des ions **chlorures, nitrates, sulfates**. L'analyse des cations a permis la quantification du **sodium, de l'ammonium, du potassium, du magnésium et du calcium**. La calibration est réalisée tous les jours à partir de solutions standards certifiées. Le protocole analytique (LGGE, 2012) est conforme au projet de Norme du Comité Européen de Normalisation. (FprCEN/TR 16 269, 2011).

2.2. Estimation des émissions

Air Rhône-Alpes développe et enrichit en continu depuis une dizaine d'années un inventaire régional des émissions atmosphériques qui s'appuie sur le référentiel français OMINEA (Organisation et Méthodes des Inventaires Nationaux des Emissions Atmosphériques en France) développé par le CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique). Les calculs se basent sur plus de 400 activités recensées au sein de la classification européenne SNAP (Selected Nomenclature for Air Pollution).

Les sources prises en compte sont classées en fonction de la nature de l'activité considérée :

- Sources fixes anthropiques : industries (Grandes Sources Ponctuelles (GSP), PMI/PME) ; secteurs résidentiel et tertiaire par usage (chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson...);
- Sources mobiles : transports routier, ferroviaire, aérien et fluvial ;
- Sources biogènes : agriculture, sylviculture et nature (sols, végétation).

Le schéma suivant synthétise la façon dont est calculé l'ensemble des émissions. Les données infracommunales sont privilégiées dans la mesure du possible pour améliorer la précision des bilans. Pour plus de précisions sur la méthode de calculs :

<http://www.air-rhonealpes.fr/site/media/telecharger/652831>.

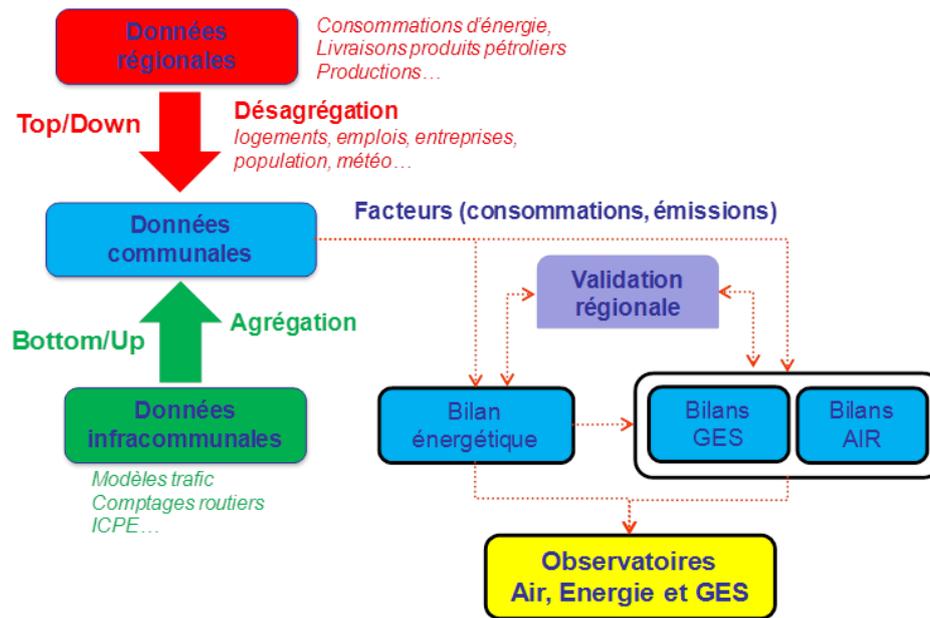


FIGURE 1 : SCHEMA GENERAL DE CALCUL DES EMISSIONS DE POLLUANTS

La Figure 2 présente la contribution des secteurs d'activités aux émissions 2008 à l'échelle de la région Rhône-Alpes pour les oxydes d'azote et les particules PM₁₀. On constate que le transport routier contribue pour près de deux tiers aux émissions d'oxydes d'azote et pour près d'un quart aux émissions de particules.

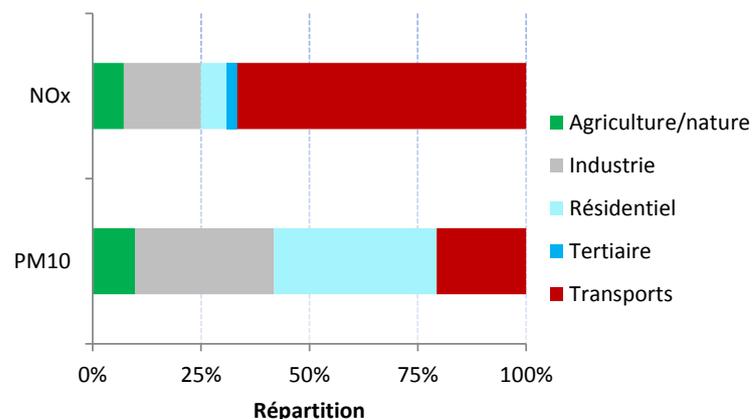


FIGURE 2 : ÉMISSIONS 2008 DE NOx ET DE PM10 PAR SECTEUR D'ACTIVITE SUR LA REGION RHONE-ALPES
SOURCE : AIR RHONE-ALPES – VERSION 2011-1

Le calcul des émissions routières repose sur la méthodologie européenne COPERT 4 (Computer Programme to Estimate Emissions from Road Transport). Cette méthode fournit pour plus de 200 types de véhicules une base de facteurs provenant majoritairement de mesures sur bancs à rouleau converties en fonctions mathématiques dépendant le plus souvent de la vitesse (pente + charge pour les véhicules lourds). Les variables dont dépendent ces facteurs d'émissions sont les suivantes :

Véhicules légers : $E_{VLi} = KM_{VLi} \times F_{VLi,Vi}$ Véhicules lourds : $E_{PLi} = KM_{PLi} \times F_{PLi,Vi,RAMPE,CHARGE}$

Avec :

E_{VLi} : émission de la catégorie i de VL ou PL

KM_{PLi} : distance parcourue par le VL ou PL i

F : facteur d'émission

$RAMPE$: rampe du tronçon routier (facteurs donnés pour des rampes allant jusqu'à 6%)

$CHARGE$: taux de charge utile d'un véhicule lourd (compris entre 0 et 100%)

Vi : vitesse du véhicule i (facteurs disponibles jusqu'à 130 pour les VL. Pour les PL, la vitesse maximale associée à ces facteurs dépendent de la rampe et de la charge. Par exemple, un PL chargé à 100% dans une rampe à 6% n'aura pas de facteurs d'émissions au-delà de 50 km/h).

Les émissions routières de particules proviennent de plusieurs sources :

- **Echappement** : émissions à chaud et à froid (vitesse dépendante)
- **Usure** : pneus, plaquettes de freins (vitesse dépendante) et routes (facteur par km parcouru)
- **Remise en suspension** : comprend les particules suivantes susceptibles de se déposer sur la chaussée (facteur par km parcouru) :
 - ➔ échappement
 - ➔ usure

A noter que la resuspension du sel/sable (et dans une moindre mesure des sources d'émissions non routières) n'est pas prise en compte dans ce facteur qui a été évalué en tunnel.

Avec la méthode de calcul actuelle, les émissions liées à la remise en suspension représentent environ 20% des émissions routières de PM10 en Rhône-Alpes (cf. Figure 3).

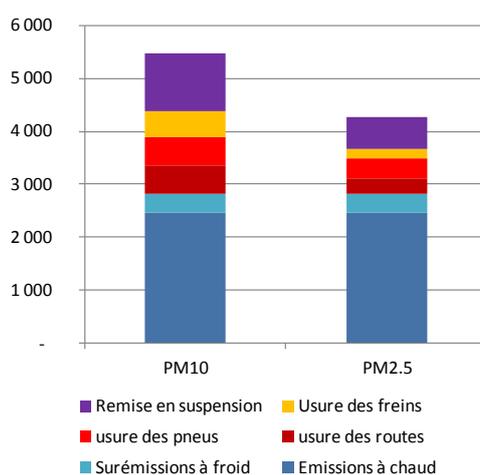


FIGURE 3 REPARTITION DES EMISSIONS 2010 DE PM₁₀ ET PM_{2.5} EN RHONE-ALPES

Le facteur de remise en suspension ainsi calculé n'est actuellement modulé ni dans l'année, ni selon la présence ou non de sel sur la chaussée.

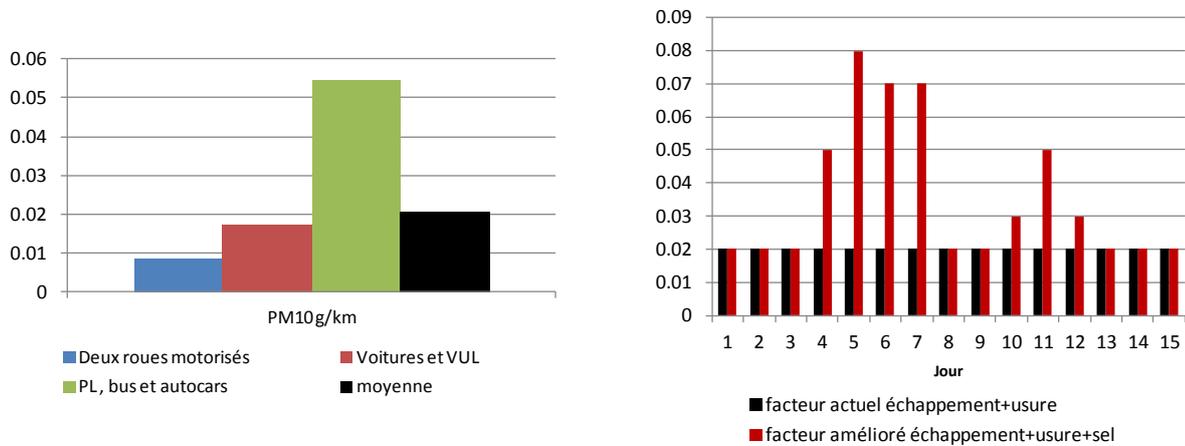


FIGURE 4 FACTEUR DE RESUSPENSION EN FONCTION DU TYPE DE VEHICULES ET EXEMPLE DE MODULATION DU FACTEUR

L'objectif de l'étude est de raffiner ce facteur au pas de temps journalier selon la remise en suspension attendue du sel.

En première approche, afin de raffiner ce facteur au pas de temps quotidien, il semble nécessaire de connaître :

→ Le lien entre **quantité de sel répandue et facteurs météo** afin d'identifier les journées concernées par le salage avec une distinction éventuelle entre salage faible/modéré/fort

→ Le lien entre la **décroissance de la quantité de sel sur la chaussée et d'autres facteurs (météo, trafic...)**

La méthodologie d'estimation des émissions se basera d'une part sur la bibliographie, d'autre part sur les données recueillies dans le cadre de l'étude.

2.3. Modélisation

2.3.1. Le modèle SIRANE

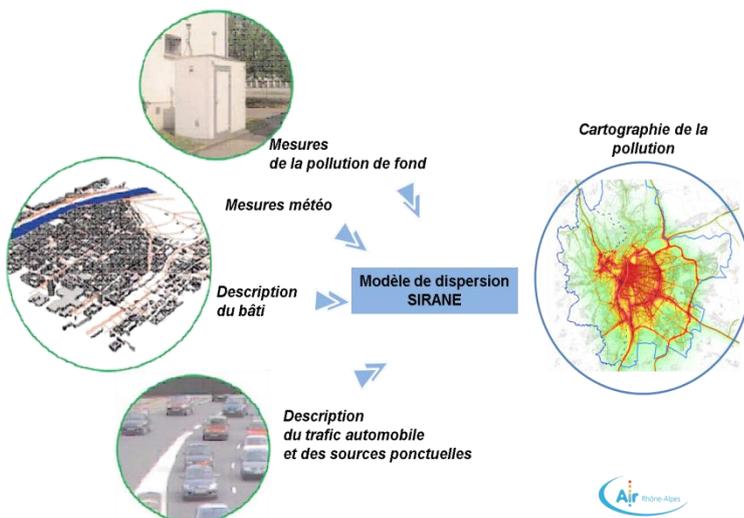
Le modèle SIRANE utilisé par Air Rhône-Alpes dans cette étude est développé par le laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique de l'Ecole Centrale de Lyon. C'est un modèle de dispersion atmosphérique en milieu urbain. Il permet de décrire les concentrations en polluants dans des zones constituées essentiellement de rues bordées de bâtiments. Le modèle SIRANE couvre une échelle spatiale située entre l'échelle de la rue, où l'on s'intéresse plutôt à la répartition des polluants à l'intérieur même de cette rue, et l'échelle de l'agglomération, où il n'est plus possible de modéliser explicitement l'effet de chaque bâtiment. Il permet donc de fournir une cartographie de la pollution à l'échelle d'un quartier. D'un point de vue temporel, le modèle SIRANE est adapté à des échelles caractéristiques de l'ordre de l'heure. Différents types d'émissions sont prises en compte à l'aide de sources linéiques (représentant par exemple une voie de circulation) et de sources ponctuelles (par exemple une cheminée).

Le modèle permet de prendre en compte les principaux effets qui agissent sur la dispersion des polluants à l'échelle d'un quartier :

- Phénomènes de rue-canyon (confinement des polluants entre les bâtiments) ;
- Echange des polluants au niveau des carrefours ;
- Transport des polluants au-dessus des toits ;
- Prise en compte des caractéristiques du vent extérieur (vitesse, direction, turbulence, stabilité thermique) ;
- Modélisation de transformations chimiques simples ;
- Modélisation de la dispersion ou encore du lessivage des particules par les précipitations.

Les applications du modèle concernent l'étude des conséquences de la pollution atmosphérique en milieu urbain :

- Cartographie de la pollution à l'échelle d'un quartier, en complément des mesures ;
- Détermination de la représentativité des capteurs ;
- Evaluation de l'exposition de la population ;
- Impact de nouveaux aménagements urbains, de plans de déplacements ou de politiques de réduction des émissions.



SIRANE est un outil « opérationnel », qui utilise des modèles théoriques et des formulations simplifiées des différents phénomènes physico-chimiques de l'atmosphère. Ce modèle est adapté au traitement d'un grand nombre de rues dans un temps de calcul limité. Il est validé par comparaisons avec les mesures du réseau de surveillance annuellement depuis 2003 ou encore via des campagnes de mesures spécifiques.

FIGURE 5 : PRINCIPE DE MODELISATION SIRANE

2.3.2. Conditions de simulations

Les simulations ont été réalisées pour chaque heure à savoir du 1^{er} novembre 2011 au 30 avril 2012 afin de représenter d'une part les périodes de mesures, d'autre part une période test incluant l'ensemble des mois potentiellement concernés par la viabilité hivernale.

Pour fonctionner, les données d'entrée du modèle sont de type :

- géométrique décrivant les routes ;
- météorologique : vent, température, nébulosité, pression de la période étudiée ;
- émissions liées au trafic automobile (dans la zone étudiée) issues du cadastre des émissions et variables suivant les scénarii ;
- pollution de fond représentant les émissions provenant du trafic à l'extérieur de la zone étudiée ou d'autres sources de pollution complémentaires au trafic automobile (chauffage, industrie, agriculture...).

Seul le tronçon de route aux abords de chaque station de mesure (Grenoble Rocade Sud et Chamonix Route Blanche) a été représenté. Les mesures météorologiques de Pont de Claix et de Chamonix (température, vent et nébulosité) mesurées au cours de la période on été utilisées pour respectivement la Rocade Sud et la Route Blanche. Le vent est majoritairement Nord-Sud et l'ensemble des secteurs de direction du vent est représenté au cours de l'année (Figure 6).

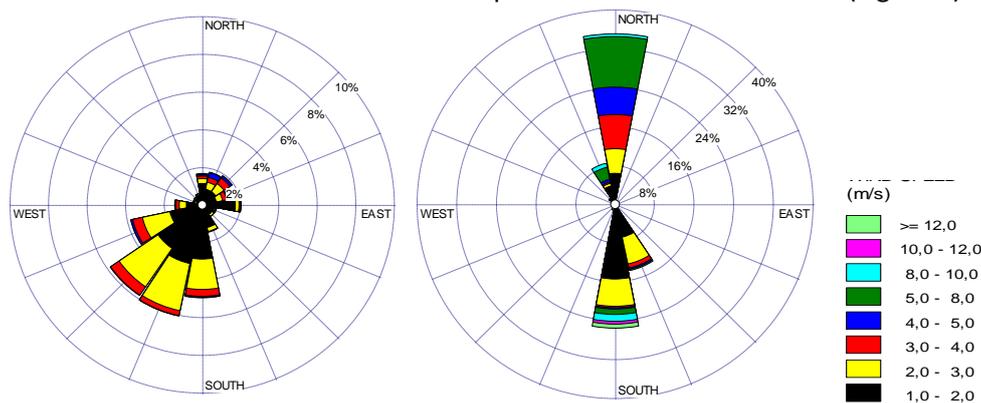


FIGURE 6 : ROSE DES VENTS POUR LA SIMULATION A CHAMONIX (A GAUCHE) ET A GRENOBLE (A DROITE)

Pour les deux sites, différentes simulations ont été réalisées. Elles ne diffèrent entre elles qu'au niveau des émissions représentatives du trafic automobile. Le Tableau ci-après synthétise les différents intitulés de simulation qui seront utilisés dans la suite du document.

Intitulé de la simulation	Caractéristique des émissions
<i>Sans sel</i>	Cadastre sans sel
<i>24h</i>	Répartition des émissions de sel homogène sur l'ensemble de la journée
<i>Pourcenttrafic</i>	Répartition des émissions de sel en fonction de la répartition du trafic dans chaque journée

L'objectif de ces différentes simulations est d'évaluer la performance du modèle pour reconstituer la part du sel dans les PM10.

3. Résultats

3.1. Estimation de la part de sel dans les concentrations de PM10 et impact sur les valeurs limites – Approche métrologique

3.1.1. Contexte météorologique

Les conditions météorologiques ont un impact direct sur les concentrations de PM10. En effet, une fois émis par une source dans l'atmosphère, un polluant va se disperser plus ou moins facilement dans l'air selon les conditions météorologiques.

Ces conditions peuvent avoir également un impact indirect, par exemple les températures basses induiront une augmentation des émissions de poussières dues au chauffage. Bien évidemment, les émissions de particules de sel dues aux pratiques de viabilité hivernale seront également liées aux quantités de sel épandues et donc aux conditions météorologiques de l'hiver.

Les figures suivantes présentent pour chacun des deux secteurs d'étude l'évolution de la température journalière et des précipitations de novembre 2011 à avril 2012.

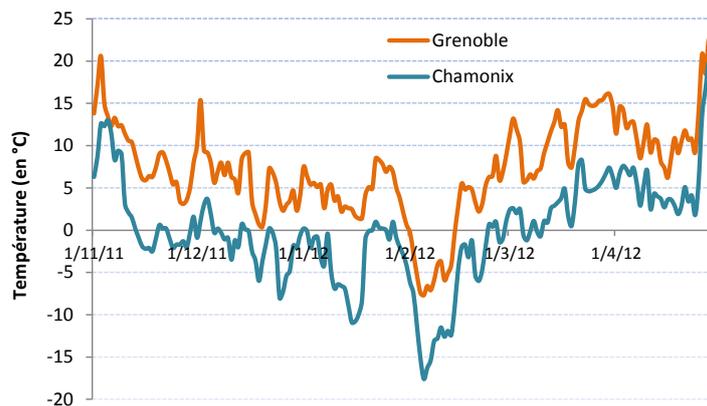


FIGURE 7 EVOLUTION DE LA TEMPERATURE JOURNALIERE (EN °C) DE NOVEMBRE 2011 A AVRIL 2012

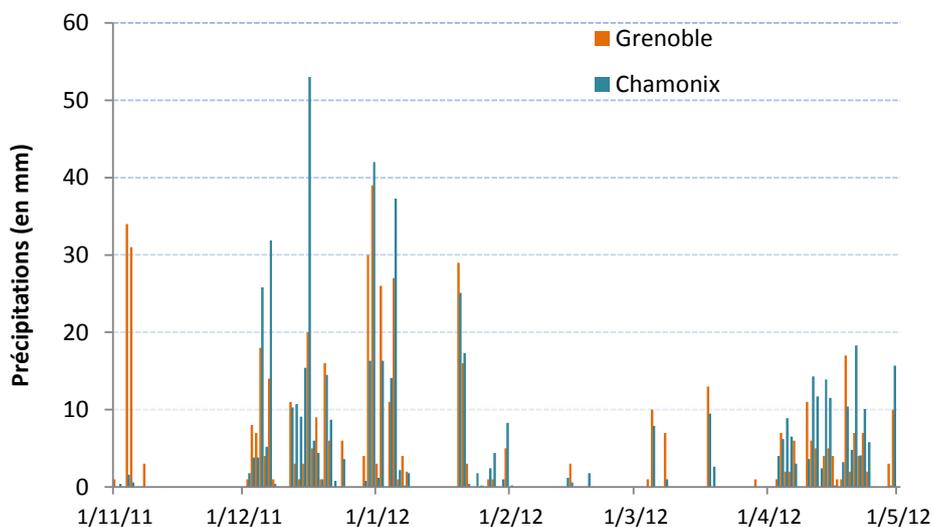


FIGURE 8 EVOLUTION DU CUMUL DE PRECIPITATIONS JOURNALIER (EN MM) DE NOVEMBRE 2011 A AVRIL 2012

L'hiver 2011-2012 a été marqué par une vague de froid de fin janvier à mi-février sur l'ensemble de la région. Le reste de l'hiver a été assez doux, anticyclonique et peu neigeux. Ces conditions sont favorables à l'accumulation des poussières PM10 dans l'air, en revanche les quantités de sel les plus importantes ont été épandues pendant les principaux épisodes neigeux, qui ont eu lieu du 15 au 20 décembre, le 20 janvier et du 27 au 31 janvier.

La figure suivante représente l'évolution au cours de l'hiver du salage des deux axes proches des sites de mesure. Les jours ont été répartis par classe d'intensité de salage, en fonction des quantités journalières de sel épandues en tonnes, fournies par les exploitants des routes.

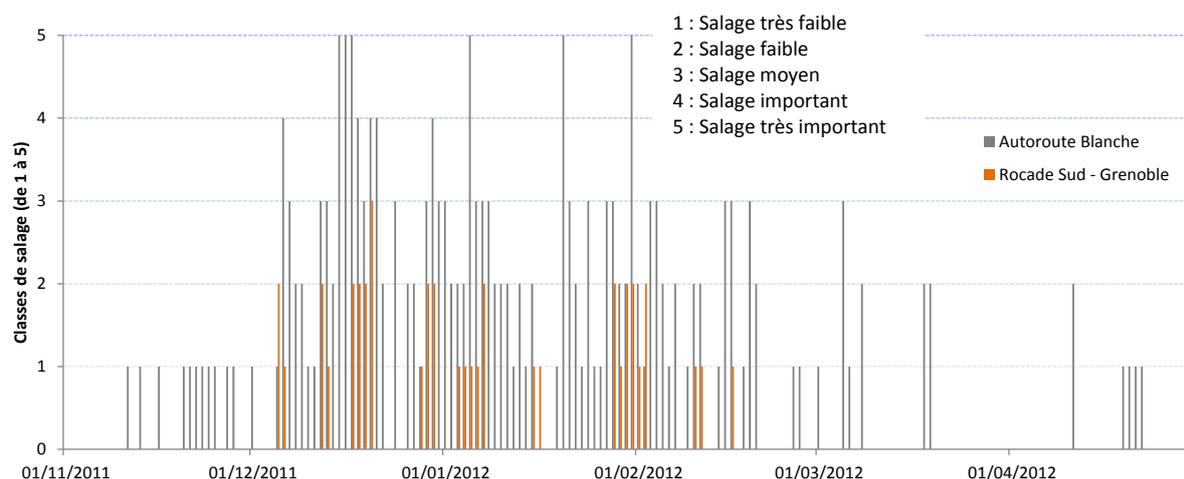


FIGURE 9 SALAGE PAR CLASSES D'INTENSITE DE NOVEMBRE 2011 A AVRIL 2012

Comme attendu, la fréquence et l'intensité du salage sont plus importantes en proximité de la route Blanche (située à 1044 m d'altitude) et supportant un trafic poids lourd important (13% du total des véhicules). Compte tenu de ces spécificités, ce secteur représente probablement une situation élevée concernant les pratiques de salage en Rhône-Alpes.

Le site en proximité de l'A48 se situe dans l'agglomération grenobloise. En l'absence des plannings et quantités de sel sur les autres axes routiers de la région, il est difficile de conclure précisément quant à la représentativité de ce site par rapport aux autres sites de surveillance de la qualité de l'air. Toutefois, on peut estimer que les sites en proximité routière de l'A7 (A7 Sud lyonnais, A7 Nord-Isère et A7 Valence) présentent des pratiques de salage relativement similaires. Les sites de l'A47 et de la N88 à Saint Etienne sont potentiellement un peu plus exposés au salage.

Il conviendrait d'obtenir les données précises de quantités de sel épandues sur chaque axe afin d'évaluer l'influence potentielle des pratiques de viabilité hivernale sur les concentrations de PM10 des autres secteurs.

3.1.2. Calcul de la part du sel dans les PM10

La part de sel dans les PM10 peut être estimée selon différentes méthodes à partir des résultats des analyses chimiques.

Dans le cadre de l'application de la Directive 2008/50/CE et du rapportage des données, la commission européenne a commandité l'élaboration d'un guide méthodologique (EC, 2011) pour le calcul de ces contributions.

Ce guide préconise de :

- Collecter les informations sur les propriétés chimiques du sel épandu sur les routes à côté du site de mesures ;

- Réaliser l'analyse chimique du chlorure, ou des autres composés chimiques pertinents correspondant au sel épandu, dans les échantillons de PM10 ;
- S'assurer que les concentrations élevées de ces composés ne proviennent pas d'autres sources ;
- Soustraire la fraction de sel ainsi calculée de la concentration de PM10.

Le cas échéant, la part de sel marin doit être identifiée séparément. La région Rhône-Alpes de par sa localisation est peu exposée au sel d'origine marine. Les résultats de l'étude Particulair (ADEME, 2011) montrent une décroissance nette de cette contribution d'ouest en est de la France. En Rhône-Alpes, la part de sel marin semble pouvoir être négligée.

i. Etat de l'Art des différentes méthodes de calcul

Le paragraphe suivant est issu du rapport du Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement de Grenoble qui a réalisé les analyses chimiques dans le cadre de l'étude et synthétisé l'état de l'art sur le calcul des teneurs en sels (LGGE, 2012).

Les méthodes recensées concernent plus particulièrement le calcul des contributions des sels d'origine marine plutôt que l'estimation des sels de route.

Trois méthodes différentes sont proposées dans la littérature pour obtenir la teneur en sels marins des aérosols. Pour appliquer ces méthodes, l'hypothèse est faite que le sodium et le chlorure proviennent uniquement des émissions de sels marins. La première méthode, proposée par Chan et al. (1997) et proposée comme méthode simple en Europe dans Marelli (2007), est la suivante :

$$\boxed{[sea\ salt] = [Na^+] \times 2,54} \quad \text{METHODE 1}$$

avec $[Na^+]$: concentration en sodium

Le facteur 2,54 est le ratio entre la masse molaire du chlorure de sodium et la masse molaire du sodium. Cette méthode est basée sur l'hypothèse que les sels marins sont constitués majoritairement de chlorure de sodium. Les autres composés sont alors négligés.

La même hypothèse est également faite dans l'exemple donné dans le guide européen (EC, 2011) sur le calcul des sels de route. Bien qu'en théorie, le chlorure pourrait également être utilisé pour estimer la concentration de sel, l'usage du sodium comme référence est préférable compte tenu de la perte en chlorure possible par réaction chimique (Marelli, 2007).

La seconde méthode, utilisée en Europe par Putaud et al. (2010) et proposée auparavant par Eriksson (1957), prend en compte les autres ions formant les sels marins et la composition chimique de référence de l'eau de mer. La formule est la suivante :

$$\boxed{[sea\ salt] = [Na^+] \times \left(1 + \left(\frac{K^+}{Na^+} \right)_{sw} + \left(\frac{Mg^{2+}}{Na^+} \right)_{sw} + \left(\frac{Ca^{2+}}{Na^+} \right)_{sw} + \left(\frac{Cl^-}{Na^+} \right)_{sw} + \left(\frac{SO_4^{2-}}{Na^+} \right)_{sw} \right)}$$

$$\Leftrightarrow [sea\ salt] = [Na^+] \times 3,25$$

METHODE 2

avec $[Na^+]$: concentration en sodium mesurée
 et les ratios de concentrations massiques de l'eau de mer : $(K^+/Na^+)_{sw}$, $(Mg^{2+}/Na^+)_{sw}$, $(Ca^{2+}/Na^+)_{sw}$, $(Cl^-/Na^+)_{sw}$, $(SO_4^{2-}/Na^+)_{sw}$

Dans le document guide de Marelli, il est proposé de faire la somme des concentrations des ions majoritaires de l'eau de mer (K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} et Ca^{2+}). La part des concentrations de ces espèces attribuables au sel de mer étant calculée par l'intermédiaire de la composition chimique de l'eau de mer, ce qui revient au même facteur que ci-dessus.

Cependant, ces deux premières méthodes ne prennent pas en compte la perte en chlorure pouvant avoir lieu lors du prélèvement des aérosols, et qui peut affecter une très grande fraction de cet ion (Jaffrezo, 1987). Putaud et al. (2010) proposent donc une méthode prenant en compte la concentration en chlorure mesurée. Ainsi, la troisième méthode, proposée par Putaud et al. (2010) s'appuie sur la composition chimique de référence de l'eau de mer et les concentrations en sodium et en chlorure mesurées. La formule utilisée est la suivante :

$$[sea\ salt] = [Cl^-] + [Na^+] \times \left(1 + \left(\frac{K^+}{Na^+} \right)_{sw} + \left(\frac{Mg^{2+}}{Na^+} \right)_{sw} + \left(\frac{Ca^{2+}}{Na^+} \right)_{sw} + \left(\frac{SO_4^{2-}}{Na^+} \right)_{sw} \right)$$

$$\Leftrightarrow [sea\ salt] = [Cl^-] + [Na^+] \times 1,47$$

METHODE 3

avec $[Cl^-]$: concentration en chlorure mesurée
 $[Na^+]$: concentration en sodium mesurée
 et les ratios de concentrations de l'eau de mer : $(K^+/Na^+)_{sw}$, $(Mg^{2+}/Na^+)_{sw}$, $(Ca^{2+}/Na^+)_{sw}$, $(SO_4^{2-}/Na^+)_{sw}$

Ces 3 méthodes font l'hypothèse commune que la totalité du sodium présent dans l'air est attribuable à la source « Sel », ce qui peut entraîner une surestimation. Par ailleurs, les deux premières méthodes ne prennent pas en compte la perte en chlorure ce qui peut également tendre à une surestimation de la contribution attribuable au sel.

ii Estimation de la contribution des sels de route

Le document de la Commission Européenne recommande d'utiliser la méthode permettant la meilleure estimation sans surestimer.

Dans un premier temps, la concentration de sel a été estimée avec la formule la plus simple (Méthode 1) afin de donner une première représentation de l'évolution des concentrations en sel.

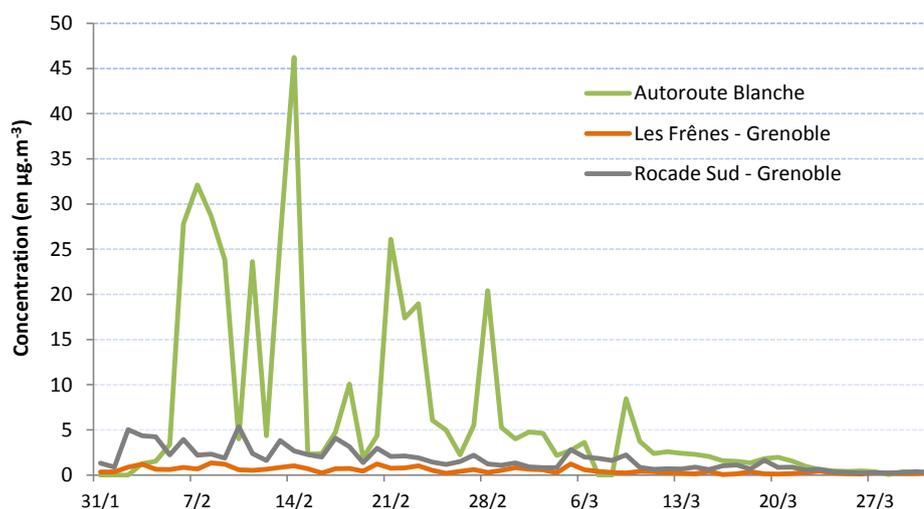


FIGURE 10 ESTIMATION DE LA CONCENTRATION DE SEL PENDANT LA PERIODE DE MESURES PAR LA METHODE 1

La figure 10 montre l'évolution des concentrations de sel par la méthode 1. Cette estimation qui sera améliorée par la suite permet de donner une première représentation des niveaux observés et de leur évolution.

On peut observer que :

- les concentrations de sel estimées dans les poussières PM10 sur le site urbain de Grenoble Les Frênes sont faibles avec un maximum de $1,4 \mu\text{g.m}^{-3}$;
- en proximité de la Rocade Sud à Grenoble, les concentrations de sel dans les PM10 atteignent $5 \mu\text{g.m}^{-3}$ en février ;
- les concentrations de sel estimées dans l'air sont très supérieures en proximité de la route Blanche où elles atteignent jusqu'à $45 \mu\text{g.m}^{-3}$. Ces concentrations présentent une variabilité importante. L'analyse de ces variabilités en fonction des quantités de sel épandues et des conditions météorologiques sera étudiée ultérieurement.

Suite à cette première estimation, trois points ont été étudiés afin de l'améliorer :

- Travail sur la composition réelle du sel épandu en comparaison de la composition théorique du sel de mer
- Estimation de la part de sodium non attribuable au sel mais à la remise en suspension de poussières crustales²
- Estimation de la part de sodium provenant d'autres sources (poussières crustales et autres)
- *Travail sur la composition réelle du sel épandu*

Dans le cadre de l'étude, les exploitants des routes proches des sites de mesure ont accepté de fournir un échantillon de sel qui a pu être analysé afin de le comparer à la composition théorique du sel de mer.

Les concentrations en ions dans les deux sels de route sont très semblables pour la majorité des composés, excepté quelques différences observées pour le sodium, le sulfate et l'ammonium. De plus, les concentrations en ions dans ces sels de route sont du même ordre de grandeur que celles du sel de mer pour les ions suivants : Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , et Br^- . La composition chimique des sels de route se distingue cependant nettement de celle du sel de mer par des concentrations en sulfate, magnésium et potassium plus faibles et la présence de nitrate et d'ammonium, deux espèces absentes de la composition du sel de mer. L'hypothèse peut être faite que ces différences résultent de réactions du sel de route exposé à l'atmosphère. Notons finalement que, bien que les sels de route soient enrichis en hexacyanoferrate de potassium (additif ajouté comme anti mottant), la concentration en potassium dans ces sels est inférieure à celle du sel de mer.

Enfin, il est notable que la somme des ions mesurés (dans les deux sels comme dans le profil de sel de mer d'ailleurs) est légèrement supérieure à 1000mg.g^{-1} (respectivement 1044, 1018 et 1037mg.g^{-1}), ce qui laisse perplexé le laboratoire d'analyse. Ces ions, auxquels il faut ajouter les carbonates, constituent l'ensemble des ions importants (en masse) dans ces échantillons.

Composés	Concentrations en $\text{mg.g}^{-1}_{\text{sel}}$		
	Sels route		Sel mer
	Echantillon 1	Echantillon 2	(littérature)
Cl^-	586,8	590,0	573,1
Na^+	386,7	371,8	319,4
SO_4^{2-}	29,1	19,6	80,3
Ca^{2+}	13,1	12,2	12,3
Mg^{2+}	2,2	1,5	38,0
NO_3^-	17,3	15,4	<0,001
NH_4^+	4,4	2,4	<0,001
Br^-	3,6	2,9	2,0
K^+	1,1	1,9	11,7

TABLEAU 2 CONCENTRATIONS EN IONS (EN $\text{MG.G}^{-1}_{\text{SEL}}$) DANS LES SELS DE ROUTE ET LE SEL DE MER (DOE, 1994).

² Issues de l'érosion des sols

La connaissance de la composition des sels épandus permet d'affiner la formule de calcul de la méthode 3. La méthode proposée pour calculer la concentration de sel de route (« roadsalt ») devient donc la suivante (méthode 4) :

$$[road\ salt] = [Na^+] \times \left(1 + \left(\frac{K^+}{Na^+} \right)_{RS} + \left(\frac{Mg^{2+}}{Na^+} \right)_{RS} + \left(\frac{Ca^{2+}}{Na^+} \right)_{RS} + \left(\frac{SO_4^{2-}}{Na^+} \right)_{RS} + \left(\frac{NO_3^-}{Na^+} \right)_{RS} + \left(\frac{NH_4^+}{Na^+} \right)_{RS} + \left(\frac{Br^-}{Na^+} \right)_{RS} \right) + [Cl^-]$$

$$\Leftrightarrow [road\ salt] = [Na^+] \times 1,167 + [Cl^-]$$

METHODE 4

avec $[Na^+]$: concentration en sodium mesurée
 $[Cl^-]$: concentration en chlorure mesurée
 $(\frac{K^+}{Na^+})_{RS}$, $(\frac{Mg^{2+}}{Na^+})_{RS}$, $(\frac{Ca^{2+}}{Na^+})_{RS}$, $(\frac{SO_4^{2-}}{Na^+})_{RS}$, $(\frac{NO_3^-}{Na^+})_{RS}$,
 $(\frac{NH_4^+}{Na^+})_{RS}$, $(\frac{Br^-}{Na^+})_{RS}$: ratios de concentrations du sel de route (mesurées lors de cette étude).

Dans le cadre d'une étude future, on peut estimer l'impact de l'utilisation de la méthode 4 par rapport à la 3 afin d'évaluer la nécessité d'analyser un échantillon du sel épandu.

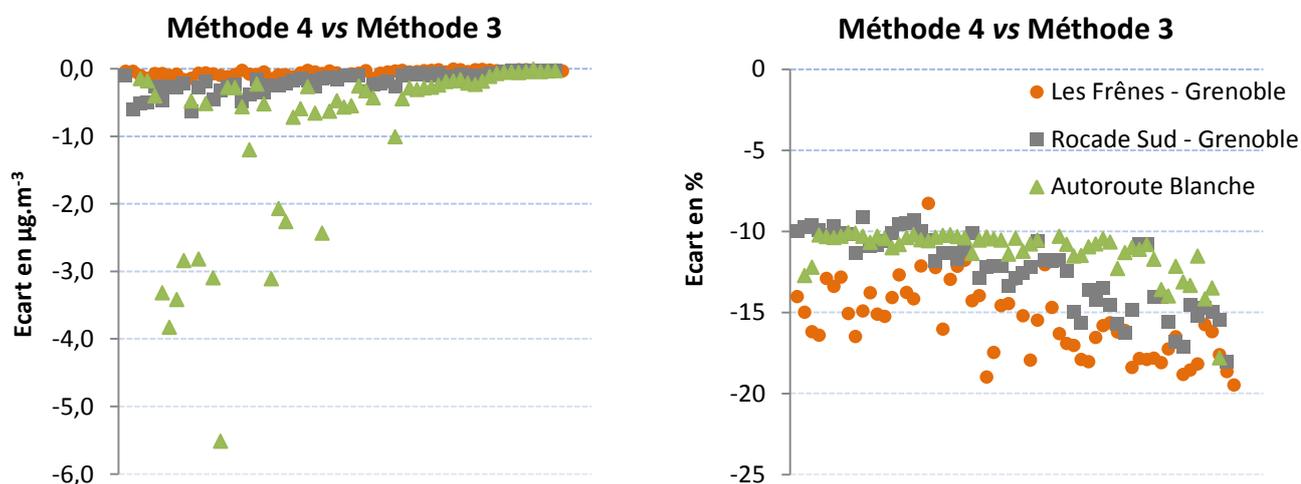


FIGURE 11 ECARTS ABSOLUS ET RELATIFS ENTRE LES METHODES 3 ET 4 POUR L'ESTIMATION DES CONCENTRATIONS DE SEL

Compte tenu de la formule de calcul, la méthode 4 donne des résultats inférieurs à la méthode 3. Toutefois, la différence observée est inférieure à $1 \mu\text{g.m}^{-3}$ dans la très grande majorité des cas. L'écart en relatif dépend du ratio $[Na^+/Cl^-]$ qui est quasiment constant sur le site de la Route Blanche sur l'ensemble de la période.

→ Estimation de la part de sodium attribuable à la remise en suspension de poussières crustales

Afin d'améliorer l'estimation, la possibilité de retirer une part du sodium mesuré correspondant à une fraction provenant des poussières crustales (« dust ») est proposée par le LGGE.

Pour estimer cette part du Na^+ mesuré provenant des poussières crustales, l'hypothèse est faite que le calcium mesuré est en très grande partie d'origine crustale. Les ratios Ca^{2+}/Na^+ des Frênes et de Rocade Sud sont en moyenne 103 et 76 fois plus élevés que le ratio observé dans les sels de route étudiés, indiquant que cette hypothèse peut être considérée comme valide.

Ensuite, le ratio $(Na^+/Ca^{2+})_{dust}$ est considéré comme le plus représentatif du site sur la moyenne des mesures entre le 12 mars et la fin du mois, période à laquelle la resuspension du sel de route est

manifestement plus faible, conduisant à une valeur de 0,204 pour le site de la Rocade Sud. Les mêmes ratios sont calculés pour les autres sites. Ainsi, en postulant que ce ratio $(Na^+/Ca^{2+})_{dust}$ reste constant sur l'ensemble de la période, la fraction $Na_{non\ dust}$ (attribuée entièrement aux sels de route) est calculée, et permet d'en déduire une contribution du sel de route, avec la formule suivante :

$$[road\ salt\ non\ dust] = \left([Na^+] - \left([Ca^{2+}] \times \left(Na^+ / Ca^{2+} \right)_{site} \right) \right) \times 1,167 + [Cl^-]$$

METHODE 5

avec $(Na^+/Ca^{2+})_{site}$: ratio de concentrations pour chaque site
 (0,15 pour les Frênes ; 0,20 pour Rocade Sud ; 0,29 pour Route Blanche)

Il serait intéressant dans le cadre d'un travail global de confronter ces dernières valeurs avec des données de la littérature. Le calcul du ratio $(Na^+/Ca^{2+})_{dust}$ nécessite de disposer d'une période de mesure où il n'y a pas de remise en suspension du sel de route dans l'air. Cette période est identifiable sur les sites des Frênes et de Rocade Sud, l'estimation sur la route Blanche est plus délicate et le ratio calculé est probablement trop élevé.

Les figures suivantes présentent l'écart entre la méthode 5 et la méthode 1 qui est la méthode la plus simple. Les écarts en $\mu g.m^{-3}$ entre ces deux méthodes sont faibles ($<1,5 \mu g.m^{-3}$), même sur le site de la route Blanche où les concentrations de sel prennent des valeurs pouvant aller jusqu'à $45 \mu g.m^{-3}$ (cf. Figure 12). Sur les mesures effectuées, la part de sodium provenant des poussières crustales n'excède pas $1,4 \mu g.m^{-3}$, la soustraction de cette part a donc un effet limité. La conservation de cet élément dans la formule permettra toutefois d'identifier le cas échéant une part plus importante des poussières crustales.

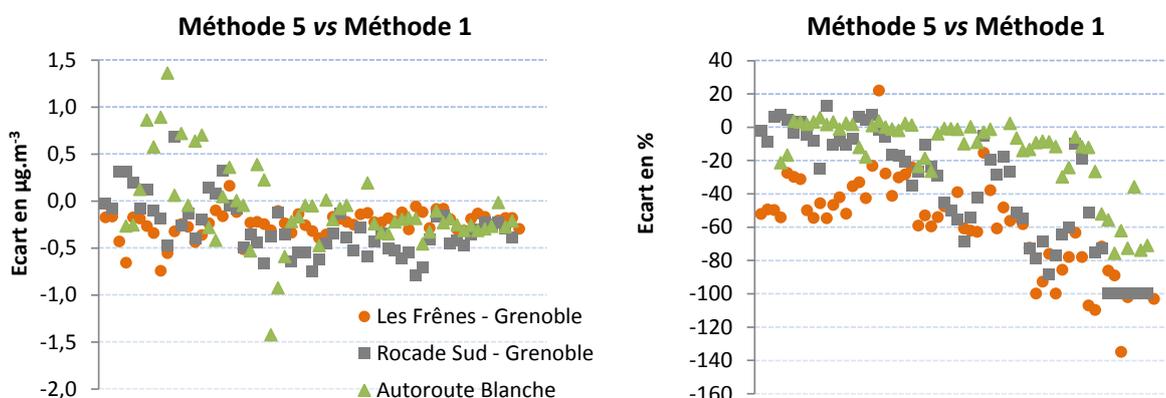


FIGURE 12 ECARTS ABSOLUS ET RELATIFS ENTRE LES METHODES 5 ET 1

→ Estimation de la part de sodium provenant d'autres sources

Le sodium mesuré dans l'air peut provenir de la remise en suspension du sel de route, mais il peut provenir également d'autres sources, dont les poussières crustales vues précédemment.

Afin d'évaluer l'influence du sodium provenant d'autres sources sur le calcul de la teneur en sel de route, on peut faire l'hypothèse que le sel de route est absent des poussières PM10 mesurées dans l'air sur le site urbain des Frênes et considérer par conséquent que tout le sodium mesuré sur ce site provient d'autres sources que le sel de route.

Cette hypothèse permettrait de ne pas surestimer la concentration de sel de route dans les PM10 comme cela est demandé dans le document de la Commission Européenne.

Ensuite, la valeur $[Na^+_{(Rocade\ sud)} - Na^+_{(Frènes)}]$ (en lieu et place de $[Na^+]$) peut être utilisée dans les formules des méthodes 1, 2, 3 et 4 (Méthodes bis).

La Figure 13 présente les écarts obtenus sur l'estimation de la concentration de sel sur le site du Rondeau entre la méthode proposée par le laboratoire (Méthode 5) et la méthode simplifiée de la Commission Européenne en prenant une estimation minorante de Na^+ (Méthode 1bis) et entre les méthodes 1 et 1 bis.

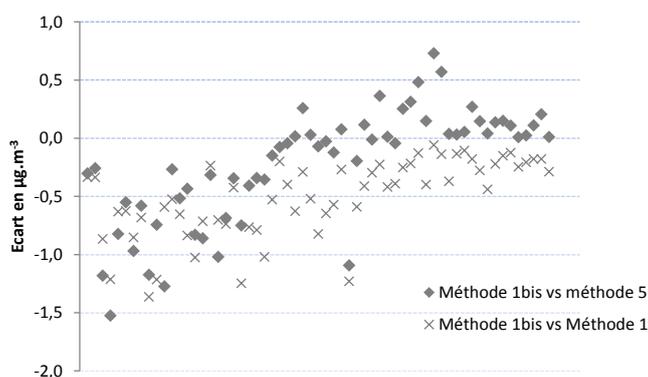


FIGURE 13 ECARTS EN $\mu\text{G.M}^{-3}$ SUR L'ESTIMATION DE LA CONCENTRATION DE SEL ENTRE LA METHODE 1BIS ET LES METHODES 5 ET 1 SUR LE SITE DU RONDEAU

La méthode 1bis donne des résultats en moyenne inférieurs aux deux autres méthodes ($-0,5 \mu\text{g.m}^{-3}$ par rapport à la méthode 1 ; $-0,2 \mu\text{g.m}^{-3}$ par rapport à la méthode 5) mais qui peuvent également être supérieurs. Par ailleurs, ces méthodes *bis* présentent l'inconvénient majeur pour leur mise en œuvre d'une mesure simultanée sur deux sites. De ce fait, l'investissement supplémentaire semble justifié uniquement si les autres méthodes d'estimation fondées sur les mesures sur un seul site ne sont pas satisfaisantes.

Au vu des résultats proches, il semble que l'utilisation du ratio Cl^-/Na^+ sur le site pourrait permettre de donner une indication qualitative sur l'attribution des concentrations de Na^+ et Cl^- à du sel par rapport à d'autres sources. En fonction de la proximité du rapport mesuré dans le prélèvement au rapport théorique Na^+/Cl^- de la composition du sel, on peut évaluer l'attribution à la source *Sel de route*.

La figure suivante présente l'évolution des ratios Cl^-/Na^+ sur chacun des 3 sites pendant la période de mesures.

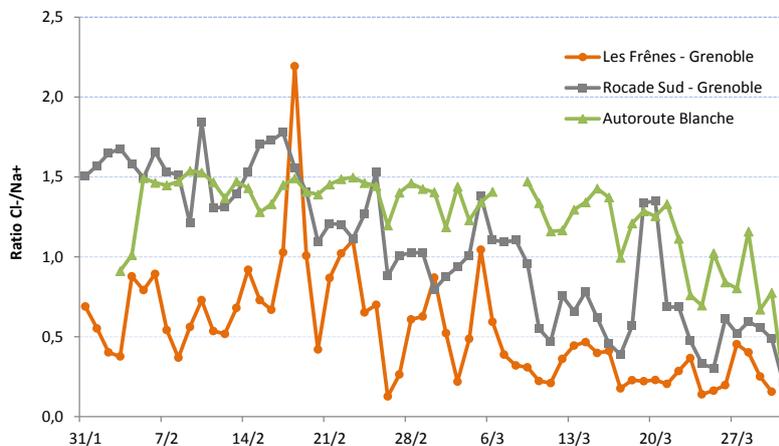


FIGURE 14 EVOLUTION DU RATIO Cl^-/Na^+ SUR LE S 3 SITES DE MESURE

Ces rapports sont à comparer à la valeur de $1,55 \pm 0,04$ mesurée dans les échantillons de sel de route. Les valeurs du ratio sont très proches de la valeur des sels de route sur quasiment l'ensemble de la période pour le site de la route Blanche ; elles en sont proches sur la première période (jusqu'au 19 Février), puis déclinent lentement sur le site de la Rocade Sud ; a contrario, elles sont toujours nettement plus basses sur le site des Frênes. Ces évolutions traduisent nettement des influences différentes de la remise en suspension des sels de route, ainsi que la perte en chlorures augmentant avec le temps.

Les différentes méthodes d'estimation testées donnent des résultats relativement proches sur les échantillons de données des 3 sites de mesures. La méthode 5 est retenue pour la suite de l'étude étant donné qu'elle représente l'estimation la plus fine, toutefois on peut noter qu'en première approche, la méthode 1 donne une estimation correcte.

Avec la méthode d'estimation retenue (5), la contribution des sels de route à la concentration totale de PM10 peut être estimée. Si elle peut atteindre plus de 50% sur le site de la Route Blanche, elle est limitée à 10% environ sur le secteur de la Rocade Sud à Grenoble (cf. Figure 15).

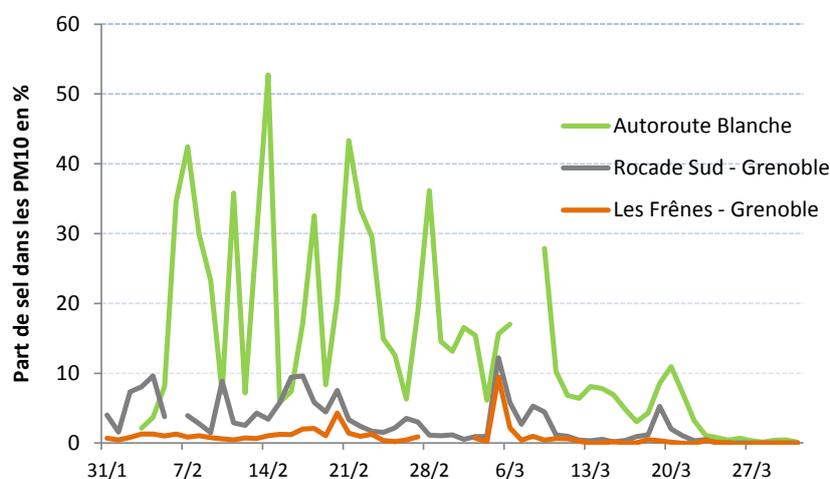


FIGURE 15 EVOLUTION DE LA CONTRIBUTION DU SEL AUX CONCENTRATIONS JOURNALIERES DE PM10

3.1.3. Evolution et facteurs d'influence sur les concentrations de sel ?

Le paragraphe précédent a permis d'obtenir une estimation des concentrations de sel dans les PM10. Celle-ci montre que sur le site de la route Blanche, la contribution du sel peut atteindre plus de 50% de la concentration journalière de poussières PM10. Dès lors, il est intéressant de mettre en relation les concentrations de sel mesurées avec le planning de salage des routes et d'autres facteurs pouvant avoir une influence, comme les conditions météorologiques.

Les figures suivantes permettent de donner un premier aperçu du croisement entre l'intensité du salage et les concentrations de sel mesurées. Les Figure 16 et Figure 17 permettent de bien situer les mesures par rapport au planning de salage de l'hiver. Les deux courbes montrent une décroissance nette au mois de mars, montrant l'influence a priori des périodes de salage avant le début de l'étude, et une potentielle accumulation du sel sur la route.

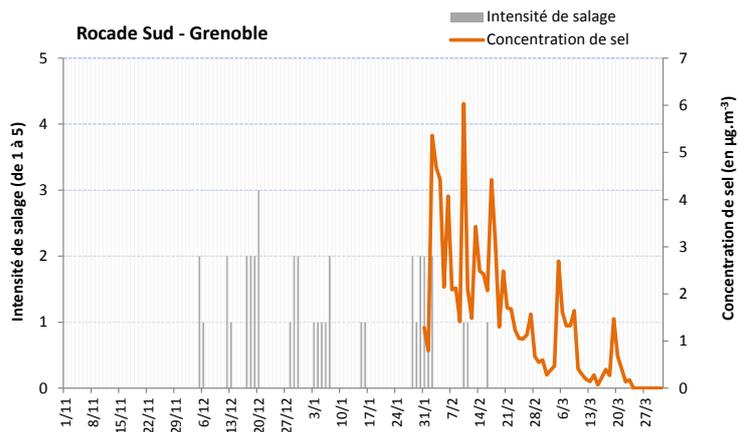


FIGURE 16 CROISEMENT DES CONCENTRATIONS DE SEL DANS L’AIR AVEC LE PLANNING DE SALAGE SUR LE SITE DE LA ROCADE SUD A GRENoble

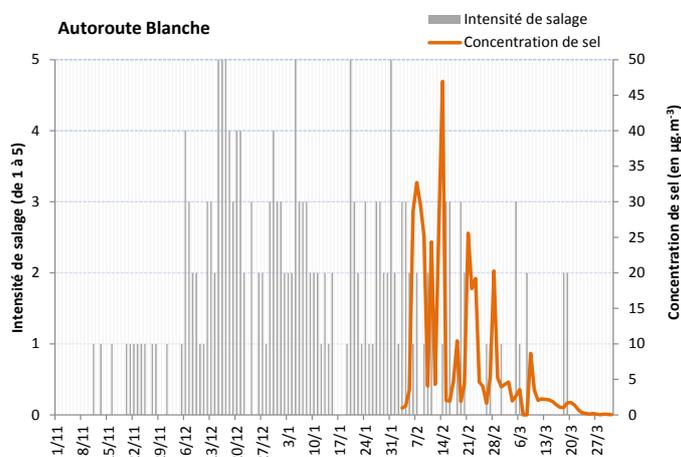


FIGURE 17 CROISEMENT DES CONCENTRATIONS DE SEL DANS L’AIR AVEC LE PLANNING DE SALAGE SUR LA ROUTE BLANCHE

En se focalisant sur les périodes d’étude, les graphes de la Figure 18 montrent clairement que les jours avec une forte intensité de salage ne correspondent pas forcément aux plus fortes concentrations de sel. En effet, ces jours avec des conditions météorologiques perturbées sont généralement propices à de faibles concentrations de PM10 dans l’air, y compris en bordure de chaussée.

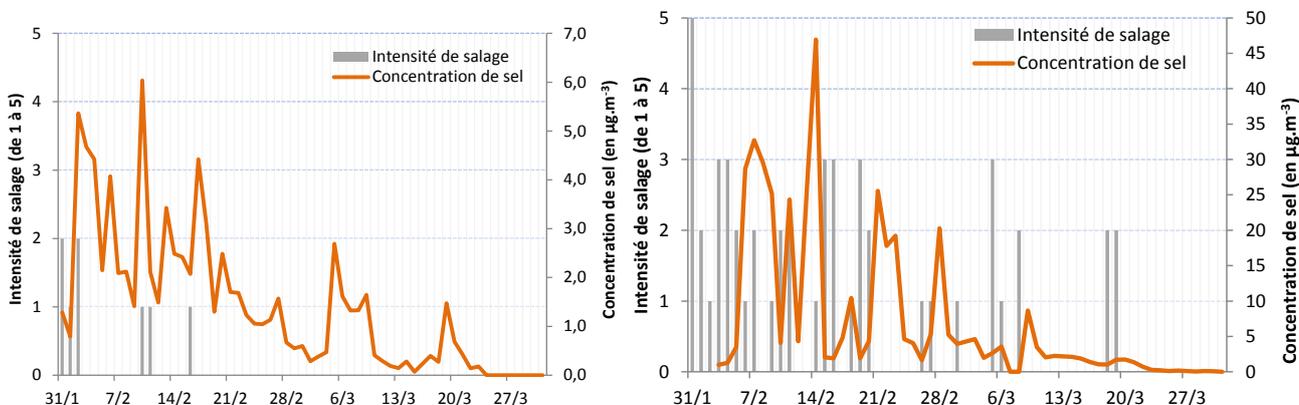


FIGURE 18 CONCENTRATIONS DE SEL ET PLANNING DE SALAGE PENDANT LES MESURES SUR LA ROCADE SUD DE GRENoble (A GAUCHE) ET SUR L’AUTOROUTE BLANCHE (A DROITE)

Sur le site de la Route Blanche qui présente des concentrations de sel élevées, notamment au mois de février, l'analyse des variations horaires des concentrations de PM10 est intéressante. Celle-ci montre des pics importants de PM10 simultanés aux concentrations de sel élevées (cf. Figure 19).

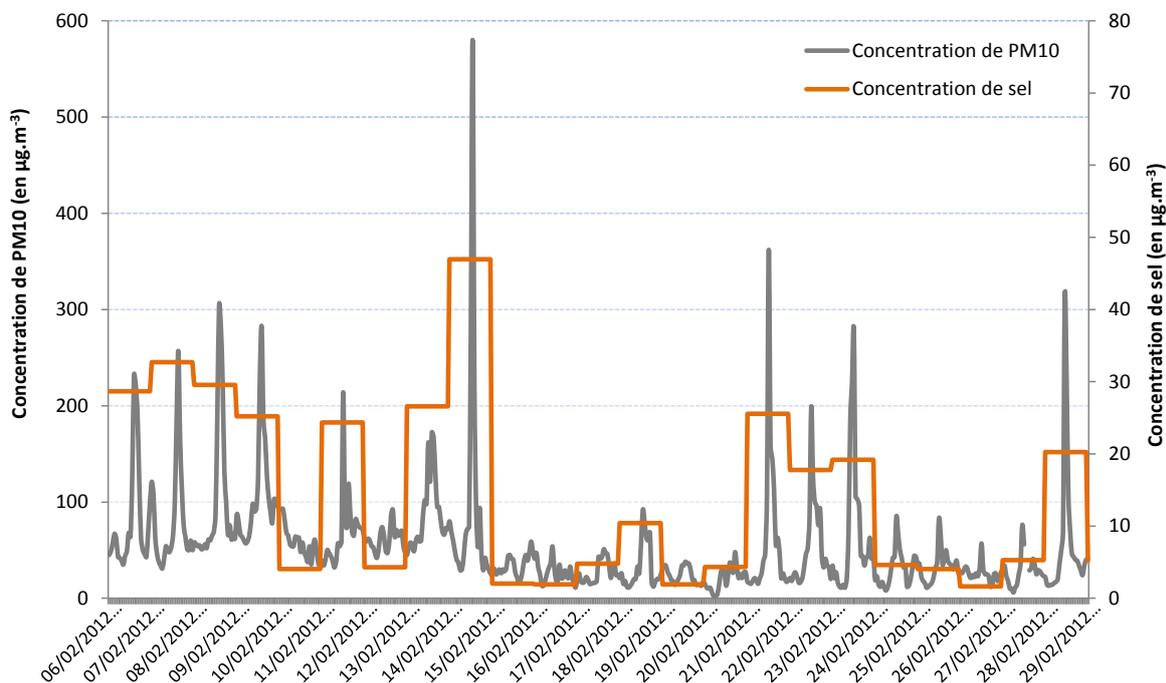


FIGURE 19 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE PM10 ET DES CONCENTRATIONS DE SEL JOURNALIERES

Afin de vérifier si le « pic » observé pourrait correspondre à une forte remise en suspension du sel, on peut comparer la concentration de PM10 à laquelle on a soustrait la part de sel à la concentration de PM10, en excluant les heures associées au pic de concentration. Ces deux valeurs sont très proches, ce qui tendrait à confirmer que c'est bien un « pic de sel » (cf. Figure 20). Ainsi, la remise en suspension serait très variable dans la journée.

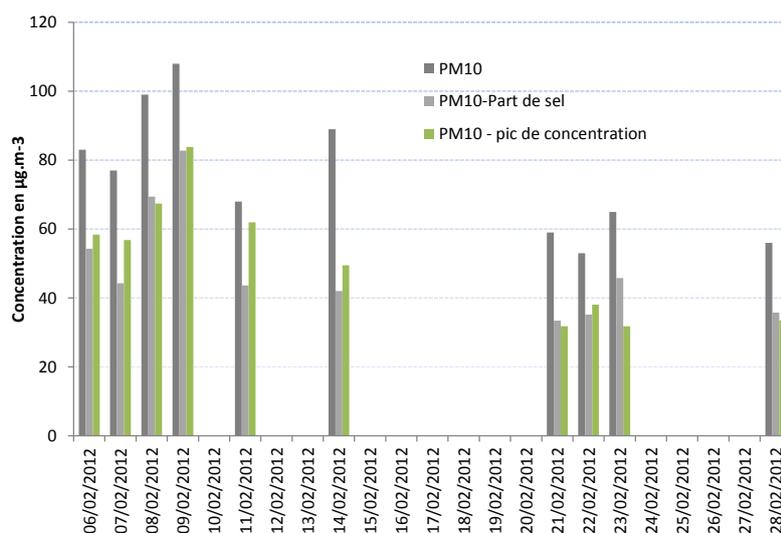


FIGURE 20 COMPARAISON DES CONCENTRATIONS TOTALES DE PM10 AVEC LES ESTIMATIONS DE CONCENTRATIONS SANS LA PART DE SEL

Les pics de concentration de PM10 interviennent régulièrement de 12 à 17h environ. Cette situation est inhabituelle en référence aux conditions météorologiques. Le monoxyde d'azote, polluant automobile, présente les concentrations les plus fortes en matinée sur la station de la Route Blanche. Les émissions de sel augmentent donc en début d'après-midi. Les températures du sol et de l'air sont plus élevées dans cette tranche horaire, ce qui laisse à supposer que des phénomènes sur la chaussée (séchage, ...) engendreraient une remise en suspension plus importante. La vitesse des véhicules ainsi que le trafic horaire qui sont susceptibles d'augmenter la remise en suspension des particules de chaussée ne sont pas supérieures sur ce créneau horaire.

Les figures suivantes montrent l'évolution des concentrations de PM10 en fonction des vitesses et direction du vent et de la température du sol les 6 et 8 février 2012.

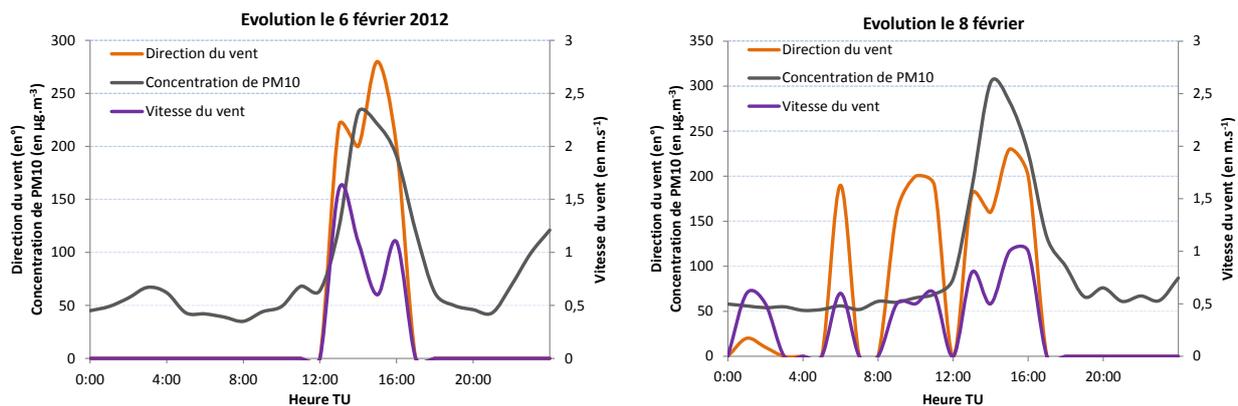


FIGURE 21 CONCENTRATIONS DE PM10 EN FONCTION DE LA VITESSE ET DE LA DIRECTION DU VENT LES 6 ET 8 FEVRIER

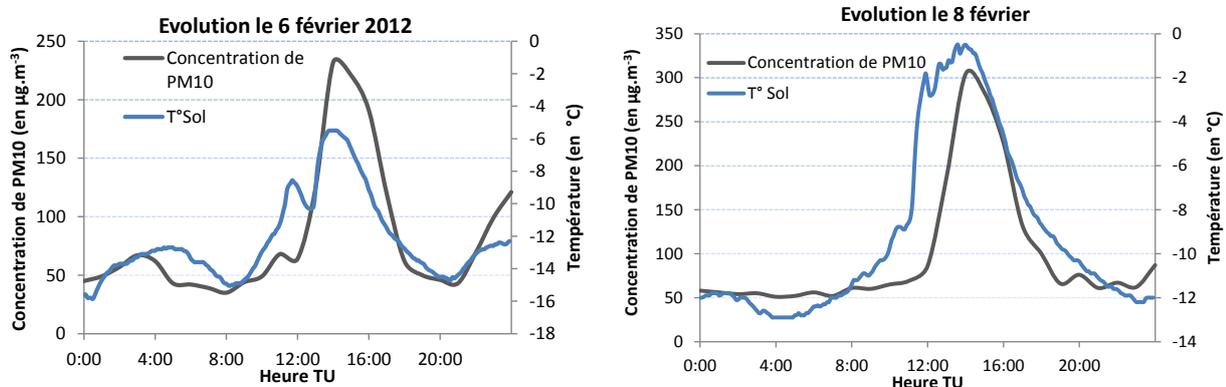


FIGURE 22 CONCENTRATIONS DE PM10 EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DU SOL LES 6 ET 8 FEVRIER

Ces figures montrent que la température du sol semble avoir une importance prépondérante sur les émissions de sel. Toutefois, certains jours comme le 10 et le 12 février, les conditions de température semblent être réunies et les concentrations de sel sont moindres et le pic de PM10 non observé (cf. Figure 23). Cela souligne la complexité des phénomènes de remise en suspension des particules de sel.

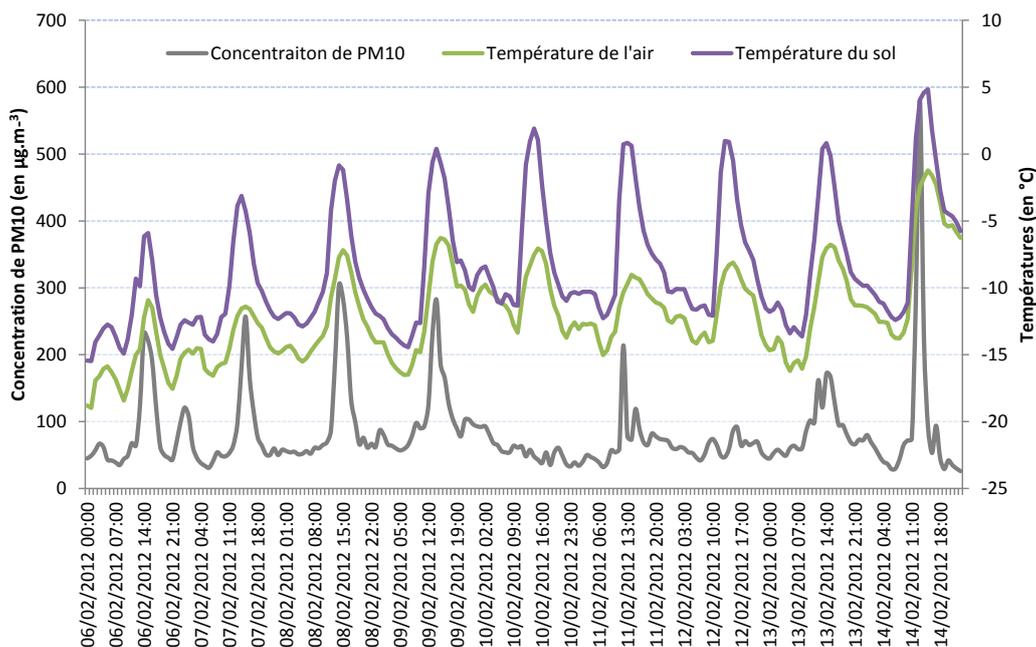


FIGURE 23 EVOLUTION DE LA CONCENTRATION DE PM10 ET DES TEMPERATURE DE L'AIR ET DU SOL DU 5 AU 14 FEVRIER 2012

Cette analyse permet de documenter potentiellement la cinétique de la remise en suspension mais les mesures effectuées sont journalières et ne permettent pas de confirmer cette hypothèse. Avec les données dont nous disposons, il est difficile de réaliser une analyse plus poussée.

3.1.4. Impact sur les dépassements de valeur limite journalière

Le paragraphe précédent a permis d'estimer les concentrations de sel dans les PM10. Dans ce paragraphe, l'objectif est d'étudier si certains dépassements de la valeur limite journalière de $50\mu\text{g.m}^{-3}$ sont dus à la présence de sel de route dans l'air.

i. Bilan sur la période ?

Pour estimer l'impact sur les dépassements de valeur limite, la méthode 5 proposée par le LGGE est retenue. Une analyse de sensibilité sera effectuée avec les autres méthodes.

Dans un premier temps, pour chaque site de mesure, la concentration de sel estimée est soustraite à la concentration totale de PM10. Ensuite, les dépassements identifiés comme étant liés à une remise en suspension de sel de route sont analysés afin de valider l'attribution à cette source.

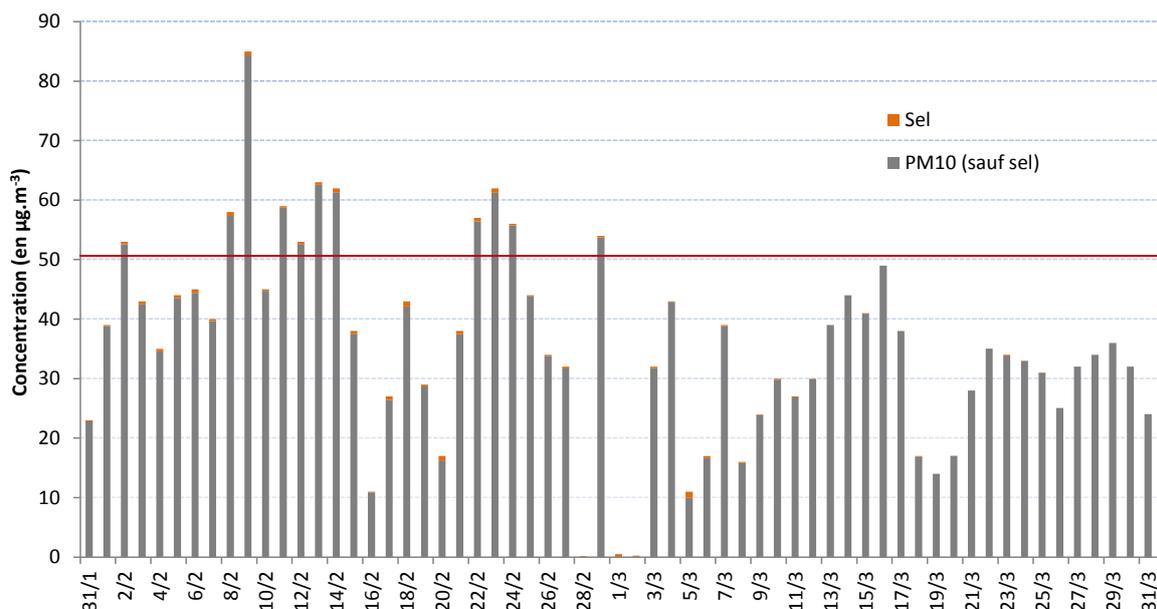


FIGURE 24 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE PM10 ET DE LA PART DE SEL SUR LE SITE DES FRÈNES A GRENOBLE

Sur le site urbain des Frènes à Grenoble, 11 dépassements de la valeur journalière de $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ sont observés pendant la période de mesure. Les concentrations de sel estimées sont faibles, **aucun dépassement n'est attribuable à cette source.**

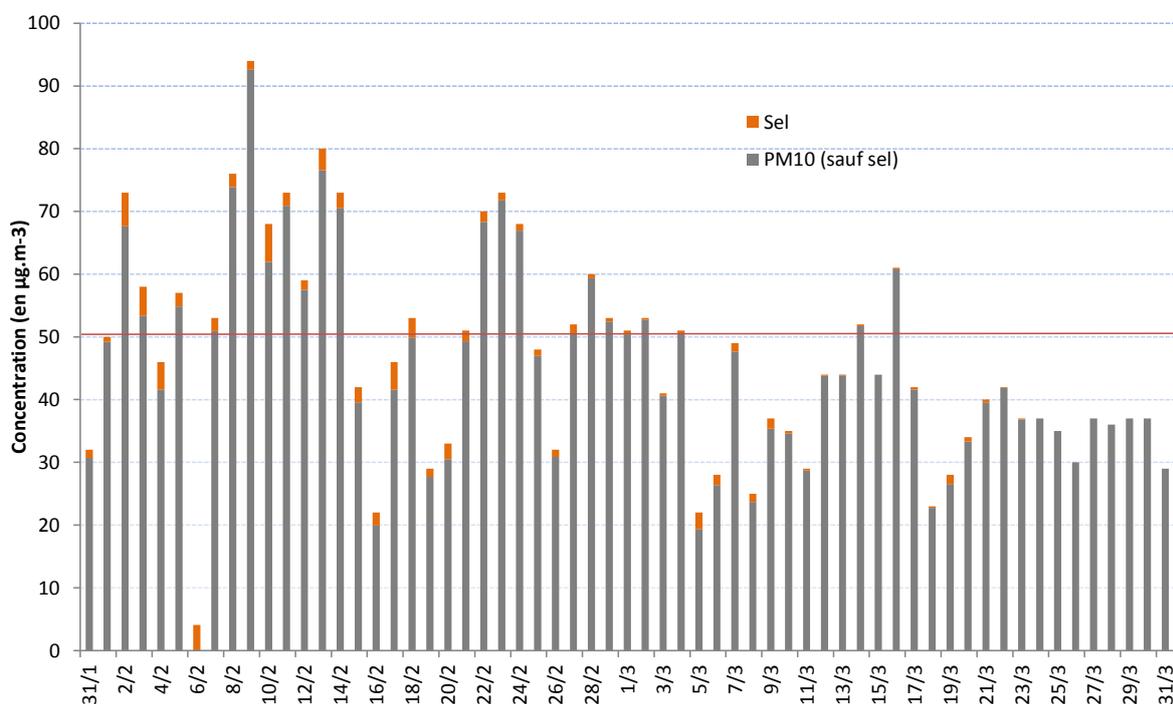


FIGURE 25 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE PM10 ET DE LA PART DE SEL SUR LE SITE DE LA ROCADÉ SUD A GRENOBLE

Sur le site de la Rocade Sud à Grenoble, 24 dépassements de la valeur limite journalière de $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ sont observés pour les PM10 sur la période de mesure. Après estimation de la concentration de sel et la soustraction de celle-ci aux concentrations totales de PM10, le nombre de dépassements est

égal à 20. Les jours concernés ne sont pas les jours où la concentration de sel dans les PM10 est la plus élevée

Les jours identifiés comme présentant un dépassement attribuable à la concentration de sel sont étudiés plus précisément pour valider l'attribution à cette source.

Date	PM10 totales (en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	PM10 Sans la part de sel estimé (en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Dernier jour de salage	Ratio Cl^-/Na^+	Sensibilité à la méthode d'estimation de la part de sel ?	Dépassement attribuable au sel ?
18/02/2012	53	50	16/02/12	1,56	Oui si méthode 1bis, le dépassement persiste (51)	OUI
21/02/12	51	49	16/02/12	1.21	Non	OUI
27/02/12	52	50	16/02/12	1,01	Non	OUI
01/03/12	51	50	16/02/12	0,79	Non	NON

TABLEAU 3 DEPASSEMENTS ATTRIBUABLES AU SALAGE SUR LE SITE DE LA ROCADE SUD DE GRENOBLE

Un seul des 4 jours identifiés comme présentant un dépassement attribuable au salage est sensible à la méthode d'estimation. Il s'agit du 18 février. En utilisant l'estimation minimaliste qui consiste à soustraire la valeur mesurée sur le site urbain des Frênes, la concentration de sel serait inférieure et la concentration de PM10 calculée sans cette part de sel toujours supérieure à $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Toutefois, compte tenu du rapport Cl^-/Na^+ de 1,56 ce jour qui est quasiment égale au rapport théorique Cl^-/Na^+ du sel épandu et de la proximité au dernier épandage (2 jours), il semble plus juste de prendre en compte la méthode 5 d'estimation.

Le 1^{er} mars, compte tenu du ratio Cl^-/Na^+ de l'éloignement au dernier jour de salage, le dépassement n'est pas attribué au salage.

Par ailleurs, pour 2 jours supplémentaires (7 février et 4 mars), une ou deux méthodes d'estimation entraîne une concentration journalière inférieure à $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Ce n'est pas le cas avec la méthode 5, retenue dans l'étude. Ces deux dépassements ne sont donc pas retenus.

Sur ce site, on peut remarquer que les jours où les dépassements sont soustraits, relativement à la part de sel ne sont pas ceux où la concentration de sel est la plus forte. Dans ces cas-là, la concentration de PM10 est également élevée et malgré la soustraction de la contribution du sel, les valeurs restent supérieures à $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Cette situation est également observée dans l'exemple autrichien, cité dans le guide méthodologique de la Commission Européenne.

Sur le site de la Route Blanche, 13 dépassements de la valeur limite journalière de $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ sont observés pour les PM10 pendant la période d'étude. La soustraction de la part de sel à ces concentrations diminue le nombre de dépassements à 6 (cf. Figure 26).

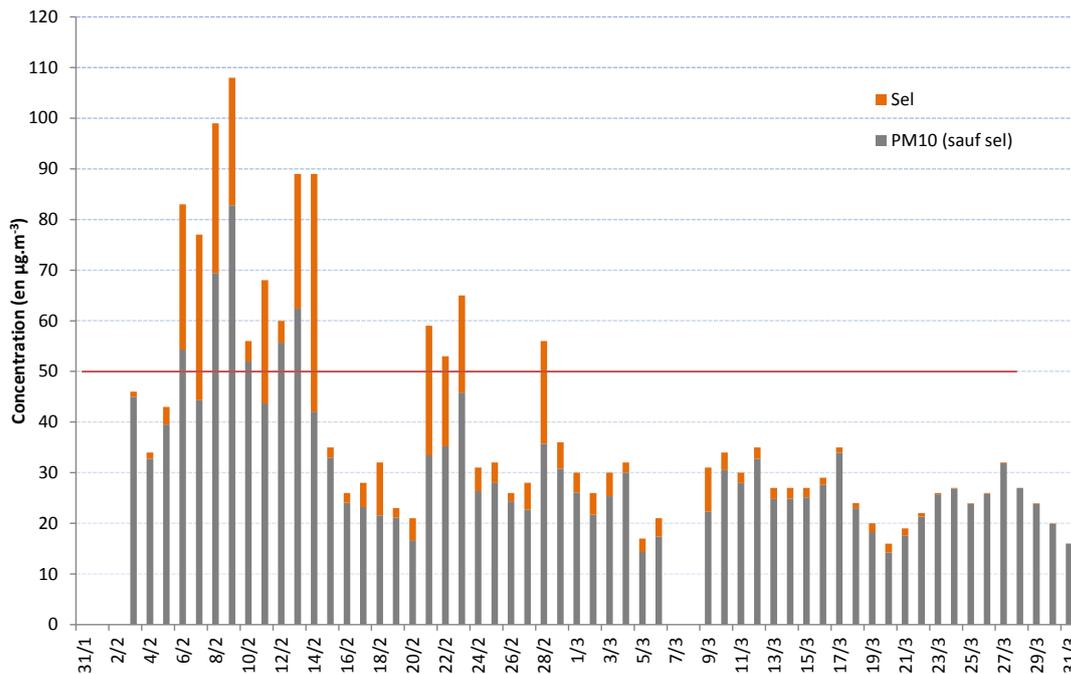


FIGURE 26 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE PM10 ET DE LA PART DE SEL SUR LE SITE DE LA ROUTE BLANCHE

Les jours identifiés comme présentant un dépassement attribuable à la concentration de sel sont étudiés plus précisément.

Date	PM10 totales (en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	PM10 Sans la part de sel estimé (en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Dernier jour de salage	Ratio Cl-/Na+	Sensibilité à la méthode d'estimation de la part de sel ?	Dépassement attribuable au sel ?
07/02/12	77	44	7/02/12	1,45	non	OUI
11/02/12	68	44	11/02/12	1,47	non	OUI
14/02/12	89	42	14/02/12	1,43	non	OUI
21/02/12	59	33	20/02/12	1,45	non	OUI
22/02/12	53	35	20/02/12	1,49	non	OUI
23/02/12	65	46	20/02/12	1,50	non	OUI
28/02/12	56	36	27/02/12	1,46	non	OUI

TABLEAU 4 DEPASSEMENTS ATTRIBUABLES AU SALAGE SUR LE SITE DE LA ROUTE BLANCHE

Sur ce site en proximité d'une voie rapide soumise à un salage fréquent et intense, la moitié des dépassements de la valeur journalière observés pendant la période de mesures sont attribuables à la présence de sel dans les poussières PM10.

Les 7 dépassements attribuables au sel ne sont pas dépendants de la méthode d'estimation. Le ratio Cl-/Na⁺ observé les jours correspondants atteste bien de la provenance du sodium.

Avec la méthode 2 ($[\text{Na}^+] \times 3,25$), un dépassement supplémentaire serait attribuable au sel le 6/02.

Par ailleurs, les 6, 8, 13 et 14 février, les concentrations de PM10 sur le site de la Route Blanche dépassent le seuil d'alerte des populations fixé par le dispositif préfectoral de Rhône-Alpes ($80\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Ces dépassements sont attribuables aux concentrations de sel qui représentent 30 à 50 % de la concentration totale de PM10 ces jours-là.

ii. Que dire sur le reste de l'hiver ?

Le paragraphe précédent a permis d'identifier sur la période de mesures les dépassements attribuables à la remise en suspension de sel sur les trois sites de mesures.

Afin d'évaluer l'influence potentielle des pratiques de salage sur une période plus longue, les concentrations de PM10 du 1^{er} novembre 2011 au 30 avril 2012 sont mises en regard du planning de salage.

Sur le site en proximité de la Rocade Sud, 48 dépassements de la valeur journalière de PM10 sont observés sur la période de l'hiver (cf. Figure 27). 17 jours de dépassement consécutifs du 15 novembre au 1^{er} décembre ont eu lieu lors d'un épisode de pollution régionale, cette période a eu lieu avant les premiers salages de l'hiver, aucun de ces dépassements n'est donc attribuable au sel. Du 12 au 15 janvier, des valeurs de PM10 supérieures à $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ sont observées, celles-ci interviennent après une période de salage, compte tenu des résultats obtenus lors de la période de mesures, on peut estimer qu'il y a une part de sel dans ces poussières. Trois de ces 4 dépassements pourraient être dus aux concentrations de sel, sans que cela soit possible de l'affirmer en l'absence de mesures.

Le 28 avril, la valeur limite de $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ est dépassée, compte tenu de l'estimation de la part de sel fin mars sur ce site, ce dépassement n'est probablement pas en lien avec une part de sel dans les poussières.

Par conséquent, sur le site de la Rocade Sud, le nombre de dépassements attribuables au sel se situe entre 3 et 6 sur un total de 48 pour l'hiver 2011-2012.

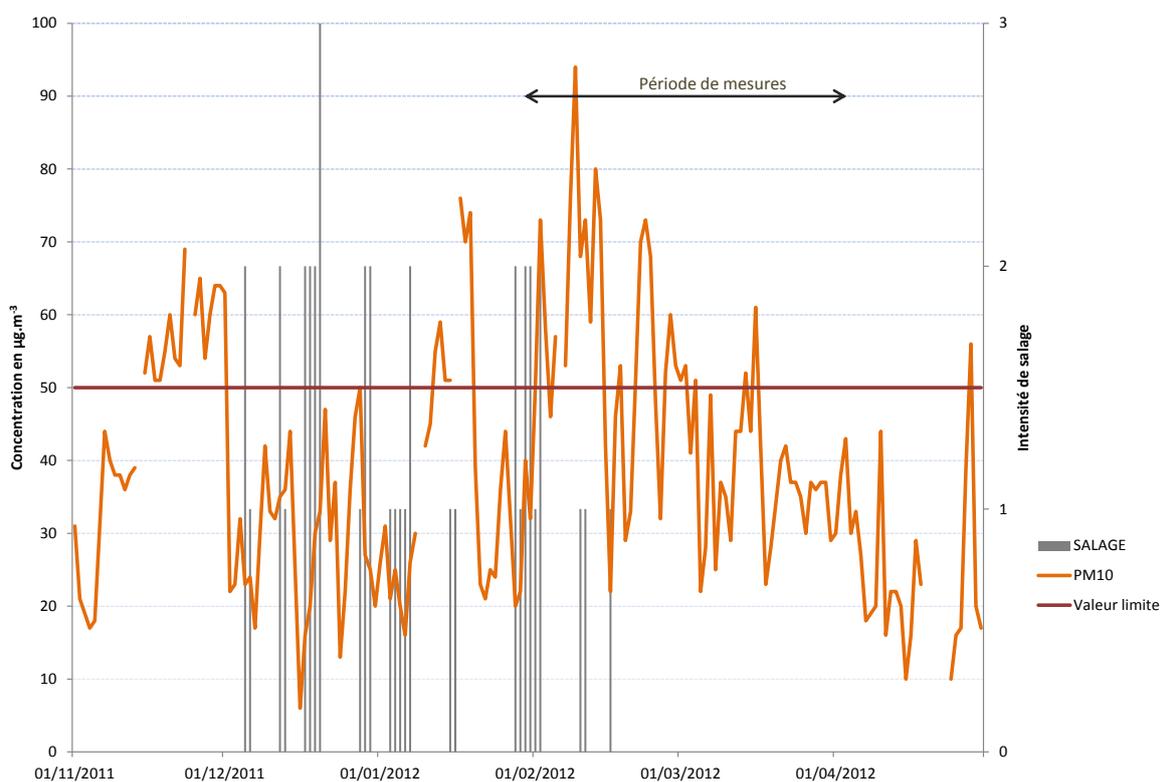


FIGURE 27 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS JOURNALIERES DE PM10 SUR LE SITE DE LA ROCADE SUD DE GRENOBLE

Sur le site en proximité de la Route Blanche, 15 dépassements de la valeur journalière de PM10 sont observés sur la période de l'hiver (cf. Figure 27), toutefois il faut noter qu'en raison d'un problème technique, il n'y a pas de données au mois de janvier.

Seuls deux dépassements ont eu lieu en dehors de la période de mesures : le 1^{er} février et le 28 avril. Dans les deux cas, la concentration de sel dans les poussières pourrait engendrer ce dépassement sans pouvoir l'affirmer en l'absence de mesures.

Par conséquent, sur le site de la Route Blanche, le nombre de dépassements attribuables au sel se situe entre 7 et 9 sur un total de 15 pour l'hiver 2011-2012 (hors absence de données de janvier).

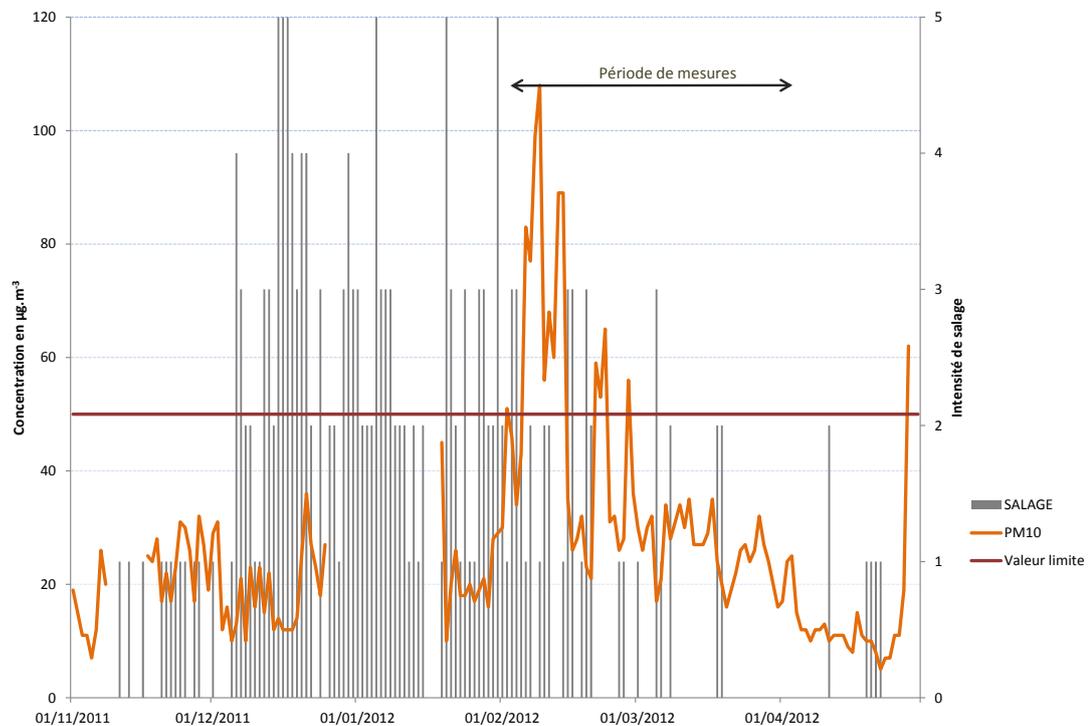


FIGURE 28 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS JOURNALIERES DE PM10 SUR LE SITE DE LA ROUTE BLANCHE

iii. Que dire sur les autres stations de surveillance de la région Rhône-Alpes ?

En l'absence des plannings et quantités de sel épandues sur les axes routiers proches des stations de mesures de la qualité de l'air, il n'est pas possible d'évaluer l'impact potentiel des pratiques de viabilité hivernale par extrapolation des résultats obtenus sur les deux sites de mesures.

3.2. Estimation de la part de sel dans les concentrations de PM10 et impact sur les valeurs limites– Approche par modélisation

La première partie de l'étude s'est attachée à l'estimation des concentrations de sel et de l'impact de ces contributions sur les dépassements de la valeur limite à l'aide d'une approche métrologique. Cette méthode permet d'aboutir à des résultats fiables mais est restreinte aux sites et périodes sur lesquels des mesures ont été effectuées. Compte tenu du coût élevé de la méthode par métrologie si elle devait être appliquée à tous les sites de mesures, ce chapitre s'intéresse à la faisabilité d'une approche par modélisation pour l'estimation des concentrations de sel et de leur impact sur les dépassements des valeurs limites journalières pour les poussières PM10.

La démarche envisagée initialement est la suivante :

- Estimation du facteur d'émission (en g/km/j) à partir de la bibliographie et des données recueillies,
 - o Dans un premier temps sur les axes proches des deux sites de mesure et pendant les périodes de mesures,
 - o Dans un deuxième temps sur le reste de l'hiver sur les deux sites de mesures et sur les autres axes de la région
- Modélisation de la dispersion atmosphérique et calcul des concentrations de sel en proximité des axes de la région pendant la période de mesures, puis sur le reste de l'hiver.

Au fur et à mesure, en fonction des résultats obtenus, les méthodes prévues initialement ont dû être ajustées.

3.2.1. Calcul du facteur d'émissions

En l'absence de données bibliographiques, l'estimation du facteur d'émissions se fondera uniquement sur les données de concentration recueillies pendant l'étude.

i. Première étape : Reconstitution du planning journalier de salage

Un premier volet de l'étude des émissions a consisté en la recherche d'un modèle statistique pour prévoir les jours de salage. Ce modèle aurait pour objectif d'estimer les jours de salage lorsque ceux-ci ne sont pas connus précisément. Sur les deux sites de mesures, les plannings de salage pendant les périodes de mesures ont été communiqués par les exploitants. Ce jeu de données a servi à l'étude statistique.

Lors de l'étude, plusieurs autres exploitants de routes de la région Rhône-Alpes ont été sollicités afin d'obtenir des plannings de salage complémentaires qui auraient permis d'avoir un jeu de données plus grand pour l'étude statistique, mais également d'avoir un jeu de données de validation indépendant. Malheureusement, ces données n'ont pas pu être récupérées.

Avant de commencer la modélisation statistique, il est important de mettre en évidence les paramètres météorologiques associés à un jour de salage. Pour ce faire, l'analyse statistique a porté sur 4 variables météo journalières : la température moyenne, le cumul des précipitations, l'humidité moyenne ainsi que la vitesse moyenne du vent. Ces variables météo ont été choisies car a priori ce sont des données disponibles régulièrement sur l'ensemble des sites de mesures.

Une ACP (Analyse en Composantes Principales) a été réalisée. Cette technique a pour but de mettre en évidence les relations qui existent entre chaque jour de l'étude et les différentes variables météo, ainsi qu'entre les variables météo elles-mêmes.

Le résultat principal est un cercle des corrélations qui souligne les corrélations entre les variables explicatives. Sur l'axe des abscisses, la température est corrélée négativement à l'humidité. Ainsi, les jours où il fait doux et où l'humidité relative est faible sont opposés aux jours où la température est plus basse avec une humidité relative plus importante. Les précipitations et la vitesse du vent sont des variables moins discriminantes : leurs flèches sont plus courtes et leur opposition est moindre lorsqu'on les projette sur l'axe des abscisses.

L'interprétation de ces corrélations est fortement liée à la distribution des jours de l'étude sur ce même type de graphique. Ainsi, le graphique de droite (cf. Figure 29) représente la distribution de chaque jour de l'étude selon les axes définis par le cercle de corrélation. Un code couleur permet de repérer les jours de salage (en rouge). En associant, ce graphe au cercle des corrélations, on se rend compte que (comme on le pressentait) les jours de salage sont plutôt caractérisés par des températures faibles et une humidité élevée.

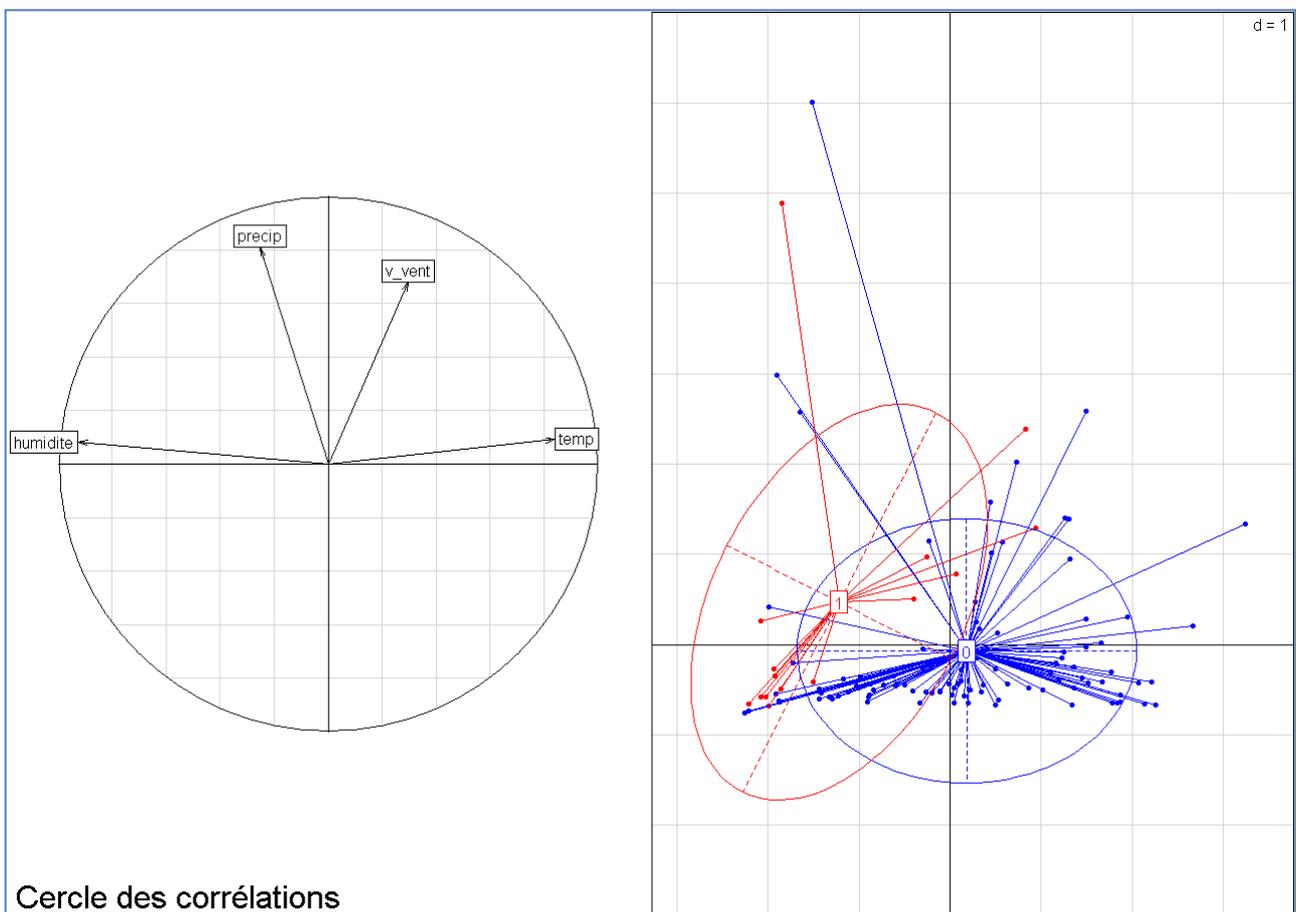


FIGURE 29 CERCLE DES CORRELATIONS

En partant de l'hypothèse que les plannings de salage ne sont pas connus, pour évaluer la concentration de sel dans les PM10, il faut déjà estimer les jours potentiels de salage. Ainsi, à partir des mêmes variables météo que précédemment, on met en œuvre une régression logistique. Cette technique statistique permet de calculer la probabilité de saler selon les conditions météorologiques. Dans le but d'avoir un modèle unique sur l'ensemble des sites, ce travail a été fait à partir des données des 2 sites.

Avant d'arriver à un modèle statistique correct, certaines étapes doivent être suivies :

- Vérification de la non-colinéarité des variables explicatives, en utilisant la matrice de corrélation, et des indices comme le VIF ou le BKW³
- Sélection des variables pour obtenir un modèle le plus explicatif possible avec un minimum de variables. Cette sélection se base sur une méthode « backward » (à partir du modèle le plus complexe, on supprime une à une les variables superflues) associé au critère de l'AIC qu'on cherche à minimiser.

Ainsi, trois variables sont retenues : la température, l'humidité et la vitesse du vent.

Equation du modèle :

$$Proba (salage) = -23.29 - 0.27 * temp + 0.23 * humidite + 1.41 * vitesse_vent$$

Le modèle fournit donc une probabilité de salage. En première approche, on considérera que si la probabilité est supérieure à 0.5 alors c'est un jour de salage (salage=1) sinon salage = 0. Ce critère pourrait être discuté.

Comme les jours de salage ne représentent que 28 jours sur l'ensemble de la période d'étude pour les 2 sites, l'échantillon n'a pas pu être divisé en 2 (échantillon d'apprentissage pour paramétrer le modèle et échantillon de test pour évaluer les performances du modèle). Ainsi, l'ensemble des données des 2 sites nous permet de paramétrer le modèle et de fournir les résultats suivants. Sur l'ensemble des 2 sites, le modèle est capable de prévoir seulement 60% des jours de salage. Ce résultat n'est guère satisfaisant puisque si le modèle était parfaitement calé, on devrait obtenir environ 90% des jours de salage.

En distinguant les 2 sites, le modèle est plus précis pour le site de la route Blanche (78% des jours de salage prévus par ce modèle ont effectivement eu lieu) contre seulement 1 jour de salage détecté sur 3 pour le site de la Rocade Sud. Cette différence s'explique tout simplement par le fait que les 22 jours de salage de la route Blanche ont une plus grande influence sur la paramétrisation du modèle que les 6 jours de salage sur la Rocade Sud.

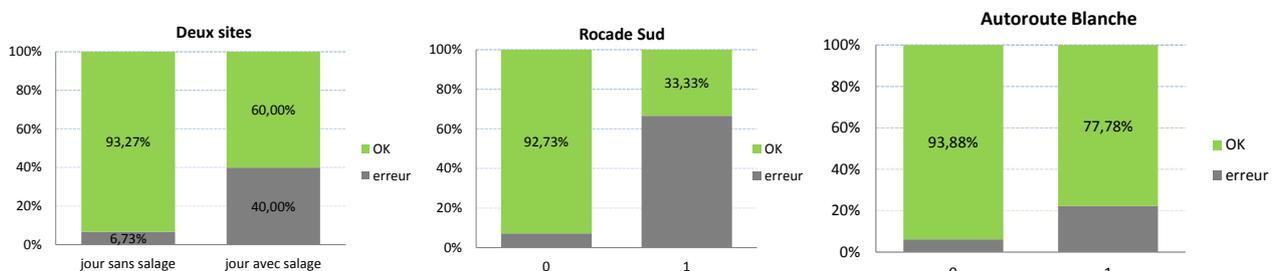


FIGURE 30 COMPARAISON DES TAUX DE DETECTIONS DES JOURS DE SALAGE PAR LE MODELE STATISTIQUE

Ainsi, on se rend compte que l'estimation de jours de salage à partir de données météorologiques est complexe, puisque le salage ne dépend pas seulement de la température ou des précipitations. Comme l'expliquent les gestionnaires des voiries, le déclenchement d'un salage sur une voirie relève également de l'appréciation des patrouilles sur le terrain, de la période de l'année (départ en vacances,...). La prévision à l'aide d'un modèle statistique simple se révèle donc très compliquée, même si on peut supposer que la faiblesse du nombre de données est également en cause sur la performance moyenne du modèle construit. L'extrapolation à d'autres axes est donc compromise au vu des résultats de l'étude statistique.

La récupération précise non seulement des jours de salage mais également des quantités de sel épandues ayant été possibles avec les exploitants des axes routiers concernés par l'étude, il semble que dans le cas d'un travail futur, cette piste soit à privilégier.

³ VIF = Variance Inflation Factor ; BKW : BELSLEY D.A., KUH E., WELSH R.E

ii. Deuxième étape : calcul statistique des concentrations de sel

Pour évaluer les dépassements de PM10 attribuables au sel, il faut pouvoir modéliser les concentrations de PM10 en prenant en compte les particules liées à la resuspension du sel. Actuellement, les concentrations en PM10 sont calculées à partir des émissions de PM10, elles-mêmes basées sur les facteurs COPERT qui ne prennent pas en compte la resuspension du sel. Ainsi, le but de cette étude est également d'obtenir un facteur d'émissions lié à la remise en suspension du sel, qui permettra d'ajuster les émissions de PM10, notamment en hiver pour les prochaines versions du cadastre.

Il n'existe pas dans la bibliographie de facteur ou de méthode d'estimation des émissions liées à la resuspension du sel. Dans le cadre de ce travail, les données d'émission ont donc dû être estimées à partir des seules données mesurées : les concentrations de sel. Une relation entre concentrations et émissions de PM10 a dû être recherchée.

Pour obtenir un maximum d'informations, la première partie de ce travail a consisté à établir un modèle statistique à partir des concentrations de sel mesurées pour estimer ces concentrations sur l'ensemble de l'hiver 2011/2012. Ensuite, une étude bibliographique a permis de déterminer une relation simple entre les concentrations et les émissions de PM10. Enfin, grâce à cette relation, les émissions de sel ont pu être évaluées quotidiennement sur tout l'hiver.

Pour estimer la concentration de sel dans les PM10 sur l'ensemble de l'hiver 2011/2012, on se base sur les données mesurées durant les campagnes de mesures. La concentration de sel remise en suspension dépend a priori de paramètres météorologiques (température de l'air, précipitations, vitesse et direction du vent, humidité,..) mais également du trafic (nombre de véhicules, part des PL). Afin de pouvoir appliquer le modèle obtenu à tous les axes routiers de la région Rhône-Alpes, un modèle unique a été recherché. Toutefois, les différentes tentatives n'ont pas mené à des résultats satisfaisants, les données explicatives et les données à expliquer étant trop disparates d'un site à l'autre (Concentrations de sel et volume de trafic notamment).

Pour chacun des deux sites, on a donc paramétré un modèle de régression linéaire multiple en se basant initialement sur le même ensemble de variables explicatives (données météo et relatives au trafic). Ensuite, une sélection de variables a permis d'identifier, pour chaque site, les variables qui influençaient le plus la concentration de sel. Comme l'échantillon n'était pas très conséquent, on a couplé cette sélection de variables avec une méthode d'échantillonnage, pour avoir une meilleure robustesse des modèles statistiques. Enfin, une évaluation des performances des modèles obtenus a été effectuée, à l'aide de validation croisée.

La méthode statistique va être décrite précisément pour le site de la Rocade sud ; pour la Route Blanche, on ne présentera que les résultats.

Le Tableau 5 présente les variables disponibles sur les deux sites

Type de variables	Description	Nom
Variable à expliquer	concentration journalière de sel <u>mesurée</u>	sel_LGGE
Variables météo	température moyenne journalière	temp
	cumul jour des précipitations	precip
	nombre de jours après les dernières précipitations	apres_precip
	humidité moyenne de l'air	humid_air
	humidité minimum de l'air	humid_min
	vitesse du vent moyenne	v_vent
	vitesse du vent maximum	v_vent_max
	direction du vent Ouest/Est	dir_vent_oe
	direction du vent Nord/Sud	dir_vent_ns
	Variables liées au salage	jour de salage (oui/non)
nombre de jours après le dernier salage		apres_salage
quantité de sel épandue (kg/km)		qte_sel
Variable liée au trafic	émissions journalières de NOx	emis_nox

TABLEAU 5 ENSEMBLE DES VARIABLES DISPONIBLES SUR LES DEUX SITES

D'autres variables auraient pu être intégrées dans cet ensemble, comme la température de la chaussée. Le problème résidait dans le fait que ces variables devaient d'une part être disponibles pour les 2 sites, pour pouvoir comparer les sites entre eux et d'autre part pouvoir être récupérables ultérieurement, ce qui n'était pas le cas.

Colinéarité des variables

Pour que le modèle statistique soit optimal, il faut vérifier que les variables explicatives ne soient pas colinéaires entre elles, autrement dit qu'elles n'apportent pas d'informations redondantes. On se base sur :

- la matrice de corrélation : le coefficient de corrélation entre 2 variables doit être inférieur à 0.8
- le VIF et l'indice BKW qui sont acceptés jusqu'à, respectivement, 5 et 20.

Ainsi, les seuils de tolérance de ces indicateurs entraînent la suppression de 4 variables (apres_salage, qte_sel, v_vent_max, humid_air). On considère donc que l'information apportée par ces variables se retrouve dans les variables explicatives restantes.

Sélection simple des variables

Pour la sélection de variable, on utilise une méthode backward : on part du modèle complet (avec l'ensemble des variables explicatives) pour supprimer une à une les variables superflues, grâce au critère de l'AIC, jusqu'à obtenir notre régression linéaire.

Pour la Rocade Sud, les concentrations de sel semblent principalement influencées par la température, les précipitations, l'humidité minimum de l'air, la vitesse moyenne du vent et les émissions de NOx. Ce premier modèle permet d'expliquer 79% de la variabilité de la concentration de sel.

Méthode d'échantillonnage

Cette méthode consiste à sélectionner aléatoirement seulement 80% des données de notre échantillon initial. Sur ce sous-échantillon, on effectue une sélection de variables comme précédemment. On note les variables sélectionnées ainsi que leur p-value dans le modèle linéaire. En répétant ces informations plusieurs fois (ici 1000 fois), on peut tracer les boxplots suivants :

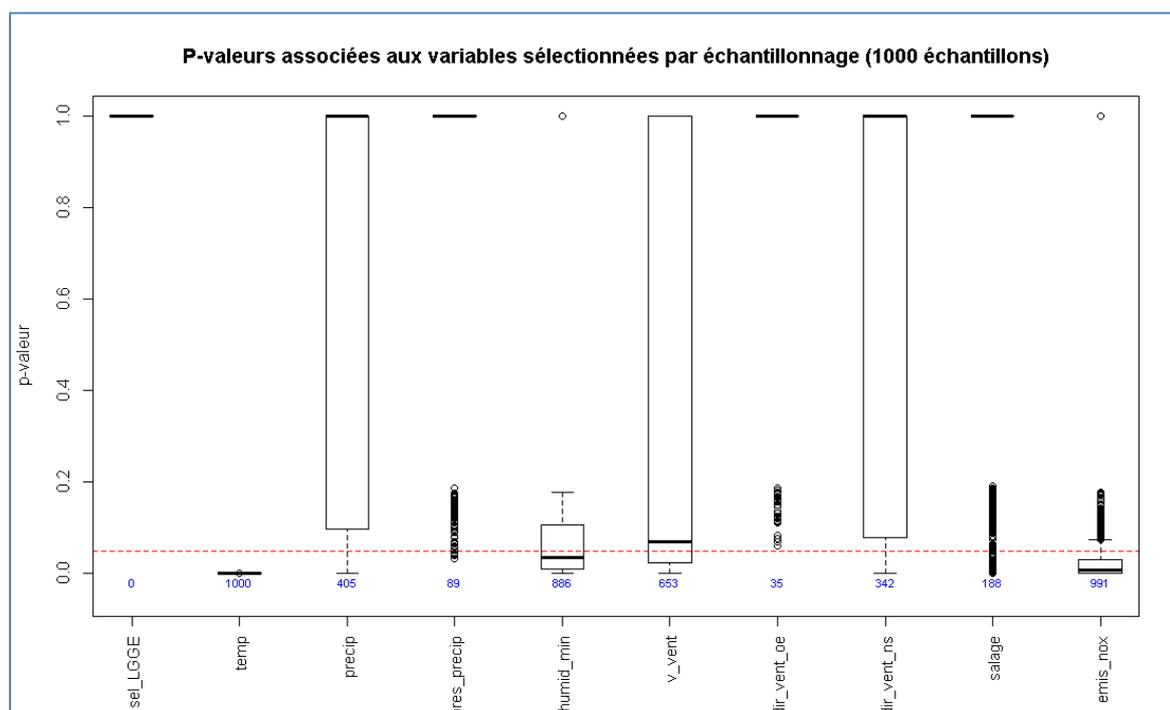


FIGURE 31 DISTRIBUTION DES P-VALUE POUR CHAQUE VARIABLE

Ce graphique représente la distribution des p-value, pour chaque variable, lorsque celle-ci est sélectionnée dans le modèle statistique. Le nombre sous chaque boxplot correspond au nombre de fois où la variable a été sélectionnée sur l'ensemble des 1000 échantillons effectués. Enfin, la ligne horizontale rouge est associée à une p-value égale à 0.05, seuil pour lequel si la p-value moyenne est inférieure, alors on peut considérer que cette variable est significative dans le modèle.

En combinant le nombre d'occurrences de la variable ainsi que la p-value moyenne, le modèle statistique de la Rocade Sud se compose des variables suivantes : la température, l'humidité minimum, la vitesse du vent et les émissions de NOx (comme lors de la première sélection simple).

Le modèle a pour équation :

$$\text{conc_sel} = -0.1188740 * \text{temp} + 0.01704418 * \text{humid_min} + 0.207347 * \text{v_vent} + 1.475808e^{-5} * \text{emis_nox}$$

Ce modèle permet donc d'estimer les concentrations de sel sur l'ensemble de l'hiver 2011/2012. La même méthode est appliquée pour les données de la Route Blanche. Pour ce site, le modèle est le suivant :

$$\text{conc_sel} = -1.2757756 * \text{temp} + 0.8147335 * \text{precip} - 0.00480188 * \text{qte_sel} + 4.55047e^{-4} * \text{emis_nox}$$

Ce modèle explique 70% de la variabilité de la concentration de sel.

On remarquera que les variables conservées pour les 2 modèles ne sont pas les mêmes, ce qui confirme la nécessité de faire une régression linéaire par site dans le cas présent. Toutefois, dans les deux modèles, il ressort une influence de l'état de la chaussée (température + humidité/précipitations) et les conditions de trafic (émissions de NOX) sur les concentrations de sel mesurées. A noter également que les deux sites étudiés représentent des situations très contrastées en termes de viabilité hivernale. Il n'est pas impossible que les modèles développés puissent être communs à plusieurs sites de même typologie. La disponibilité des plannings de salage sur d'autres secteurs aurait permis d'envisager de regrouper les différents secteurs par « typologie ». En l'état, un seul modèle pour l'ensemble de la région n'est pas envisageable et les deux modèles développés ne peuvent pas être appliqués à d'autres sites.

Validation du modèle

La dernière étape repose sur l'évaluation des performances du modèle à l'aide de la validation croisée. Le principe consiste à diviser notre échantillon en K (ici 10) sous-échantillons qui seront tour à tour échantillon d'apprentissage (sur lequel on estime les coefficients à partir des prédicteurs précédents) et échantillon de test (sur lequel on compare les prévisions aux vraies mesures). On répète ce processus 1000 fois, ensuite on regarde la distribution de différents indicateurs comme l'erreur quadratique et surtout l'erreur absolue moyenne.

Rocade Sud	Minimum	Médiane	Moyenne	Maximum	Ecart-type
Erreur quadratique	1.299	2.294	2.954	80.700	4.154307
Erreur absolue moyenne	0.7407	0.9914	1.0240	2.8870	0.1839051
Corrélation	0.3610	0.6099	0.6051	0.7424	0.06014299
Concentration de sel	0.0000	1.1320	1.4080	6.0360	1.450072

TABLEAU 6 RESULTATS DE LA VALIDATION CROISEE SUR LE SITE DE LA ROCADE SUD

Pour la Rocade Sud, l'erreur absolue moyenne nous indique que globalement le modèle se trompe de $1,02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ lors de l'estimation de la concentration de sel. Si on compare par rapport à la concentration moyenne mesurée, on voit que le modèle peut être jugé relativement satisfaisant. La corrélation à 0,6 confirme ce constat. L'amélioration de ces indicateurs n'est pas forcément aisée vu le faible échantillonnage disponible (61 données).

Route Blanche	Minimum	Médiane	Moyenne	Maximum	Ecart-type
Erreur quadratique	75.0	989.9	16340.0	1924000	79672.47
Erreur absolue moyenne	4.971	9.725	12.930	115.90	9.668037
Corrélation	0.2019	0.4924	0.4885	0.7360	0.0930456
Concentration de sel	0.0000	2.217	7.085	46.940	10.46999

TABLEAU 7 RESULTATS DE LA VALIDATION CROISEE SUR LE SITE DE LA ROUTE BLANCHE

Pour la Route Blanche, l'erreur absolue moyenne est plus élevée que pour le site de la Rocade Sud, mais par rapport aux concentrations de sel mesurées, on peut considérer que le modèle statistique donne des estimations satisfaisantes.

La comparaison graphique fournit également un bon aperçu des différents résultats et permet de mieux identifier les écarts des estimations.

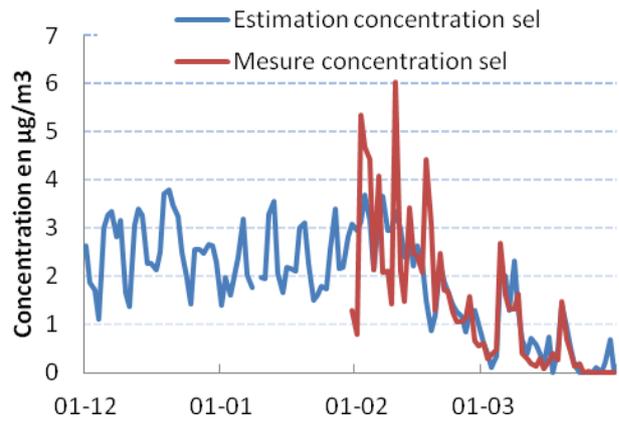
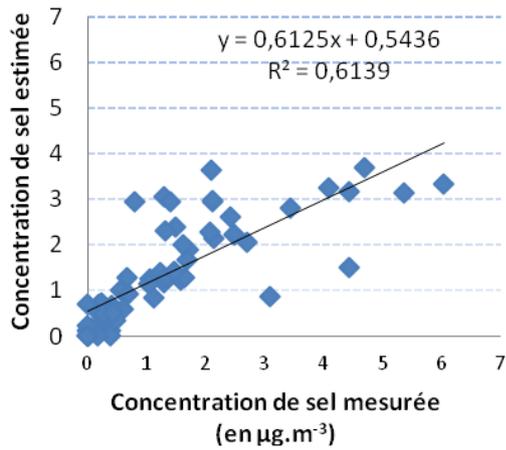


FIGURE 32 COMPARAISON DES CONCENTRATIONS DE SEL ESTIMÉES ET MESURÉES SUR LE SITE DE LA ROCADE SUD A GRENOBLE

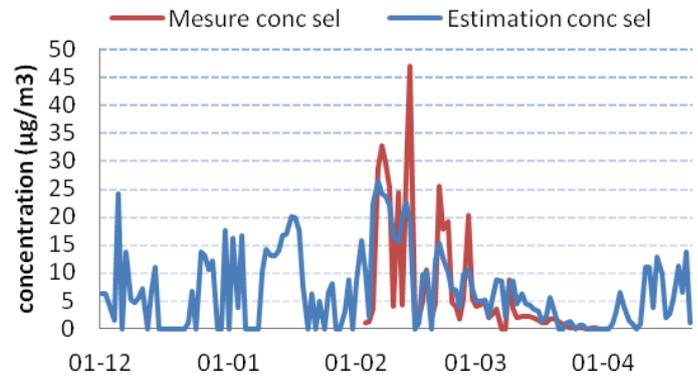
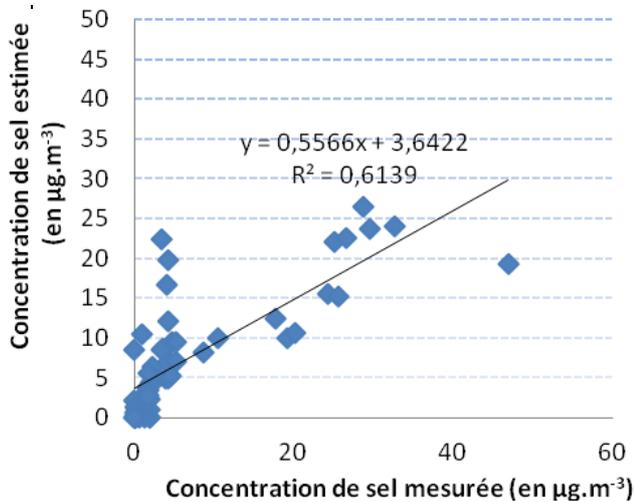


FIGURE 33 COMPARAISON DES CONCENTRATIONS DE SEL ESTIMÉES ET MESURÉES SUR LE SITE DE LA ROUTE BLANCHE

Globalement, les modèles statistiques ont des difficultés à prévoir les pics de sel. Ceci est dû au fait que, par construction, la régression linéaire est un modèle qui donne de bons résultats en moyenne, mais qui peine pour les valeurs extrêmes. De plus, comme il s'agit d'un calcul mathématique, il se peut que le modèle prédise des concentrations de sel négatives. De même, sur le site de la Rocade Sud, des concentrations non nulles sont calculées en novembre alors que les premiers salages sont intervenus le 6/12 : dans ces cas-là, on affecte des concentrations nulles.

En considérant que ces modèles statistiques donnent des résultats relativement satisfaisants, la prochaine étape est l'évaluation des émissions à partir des concentrations de sel mesurées ou estimées.

iii. Calcul du facteur de conversion Emissions <> concentrations

Plusieurs méthodes pour obtenir les émissions de sel à partir des concentrations de sel ont été testées, notamment une régression linéaire. Suite à une étude bibliographique, il semble qu'une méthode basée sur un ratio avec les NOx soit mise en évidence, notamment par Denby et al. (2012) dans leur modèle NORTRIP, et également par Gehrig et al. (2004), et Omstedt et al (2005). Cette méthode permet de convertir des concentrations en émissions, en s'aidant des concentrations et des émissions de NOx (calculée avec les facteurs COPERT). La formule est la suivante :

$$emis_PM10 = \frac{emis_nox}{conc_nox_trafic - conc_nox_fond} * conc_PM10$$

Avec : conc_nox_trafic : concentration de NOx mesurée sur la station trafic
 conc_nox_fond : concentration de NOx mesurée sur la station de fond
 emis_nox : émissions de NOx calculées sur le site trafic.

En pratique, pour la Rocade Sud, la station de fond utilisée est celle de Grenoble les Frênes. Le ratio final est calculé comme la médiane (moins sensible aux extrêmes que la moyenne) de l'ensemble des ratios journaliers calculés sur l'hiver 2011/2012. Ce ratio médian est ensuite appliqué, pour chaque jour, aux concentrations mesurées de sel si elles existent, sinon aux concentrations estimées de sel.

Pour la Rocade Sud, ce ratio est de 738. Pour la Route Blanche, il n'y a pas de station de fond associée à ce site de trafic, St Germain sur Rhône étant trop éloigné. Après des tentatives de calcul avec St Germain sur Rhône, Passy et Chamonix, aucun ratio ne donnait de résultats satisfaisants. Ainsi, comme le ratio de la Rocade Sud a été calculé entre une station trafic et son site de fond, il a été décidé d'appliquer ce ratio sur les données de la Route Blanche.

Le calcul des émissions est basé sur les données de comptages routiers fournies par les gestionnaires des voiries. Dans cette étude, les comptages horaires n'ont été récupérés qu'à partir du 1^{er} décembre 2012. Ainsi, en travaillant sur les données journalières, on obtient les graphiques suivants :

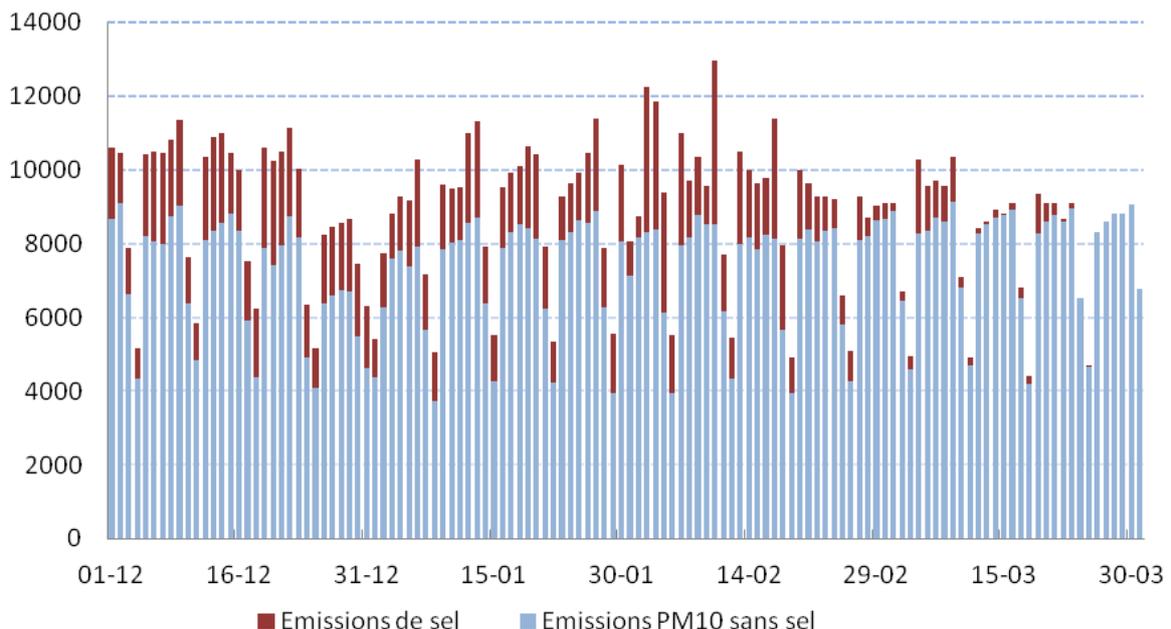


FIGURE 34 EMISSIONS DE PM10 ET DE SEL SUR LA ROCADE SUD EN G.KM⁻¹

Pour la Rocade Sud, les émissions journalières de sel estimées atteignent 4450 g/km avec une médiane de 1260 g/km. Ces émissions de sel représentent environ 15% du total des émissions de PM10 attribuées à l'axe routier.

Pour le site de l'Autoroute Blanche, les émissions de sel atteignent 34660 g/km avec une médiane de 2790 g/km. Ces émissions de sel représentent environ 54% du total des émissions de PM10.

La part des émissions de sel par rapport aux émissions de PM10 totales de l'axe est nettement plus importante sur le site de la Route Blanche. Ainsi, les émissions liées à la resuspension du sel peuvent être supérieures de plusieurs ordres de grandeur aux émissions issues de l'échappement et de l'usure.

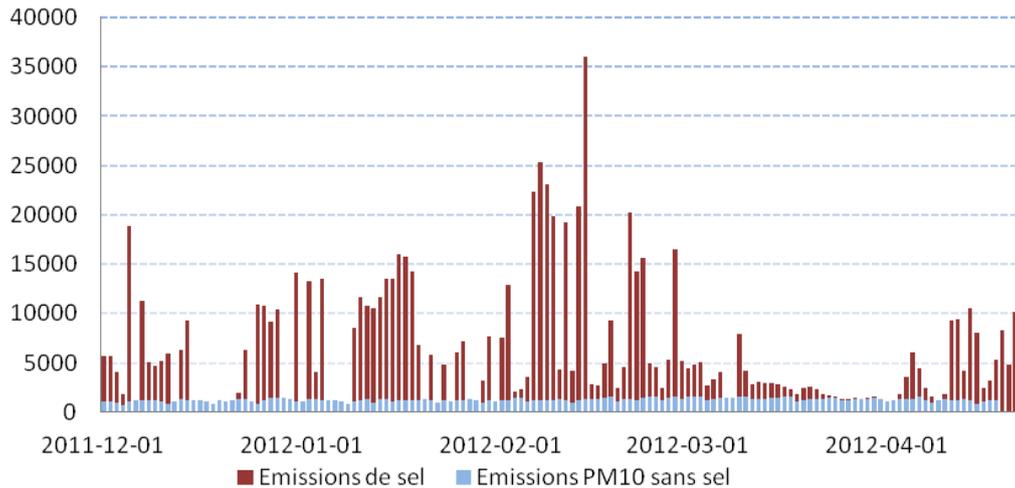


FIGURE 35 EMISSIONS DE PM10 ET DE SEL SUR LA ROUTE BLANCHE EN G.KM⁻¹

La figure suivante synthétise pour chacun des deux sites la contribution de chaque source d'émission dans les émissions routières sur la période hivernale. Ainsi, la part de la remise en suspension du sel dans les émissions routières totales varie de 15% sur la rocade Sud de Grenoble à 79% sur la Route Blanche ! En ne considérant que les émissions liées à la remise en suspension, le sel est minoritaire sur la Rocade Sud (42% de la resuspension) et très largement majoritaire sur la Route Blanche (94% de la resuspension).

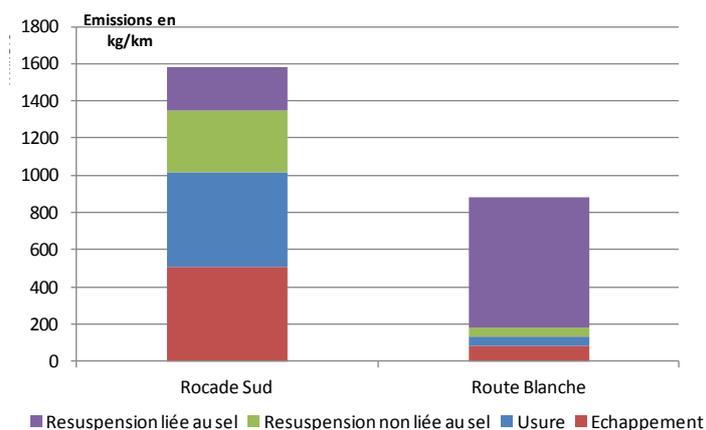


FIGURE 36 EMISSIONS DE PM10 CUMULEES DE NOVEMBRE 2011 A AVRIL 2012

Sur une journée, la contribution de la remise en suspension du sel peut atteindre jusqu'à 96% des émissions totales de PM10 de l'axe routier sur la Route Blanche, et 34% sur la Rocade Sud.

La remise en suspension liée au sel est trois fois plus élevée sur la Route Blanche que sur la Rocade Sud de Grenoble (**Ratio Sel**). A l'inverse, la remise en suspension non liée au sel est sept fois plus élevée sur la rocade sud de Grenoble que sur la Route Blanche (**Ratio Non Sel**), en lien avec un trafic beaucoup plus important et des vitesses pratiquées différentes. En ajustant **Ratio Sel** au moyen de **Ratio Non Sel**, afin de raisonner à conditions de trafic équivalentes entre les deux sites, on approche le ratio résultant des quantités de sel épandues sur la Route Blanche et sur la Rocade Sud, ce qui permet de valider les ordres de grandeur de calcul des émissions de sel.

Cette étape a permis d'avoir une estimation des émissions liées à la resuspension du sel. Ces estimations pourraient être améliorées par une augmentation du nombre de mesures de concentrations de sel afin de proposer une meilleure paramétrisation du modèle statistique lié aux concentrations. De plus, une troisième station de mesure serait utile pour évaluer la pertinence du choix du ratio de la Rocade Sud pour le calcul des émissions.

Pour servir de données d'entrée à la modélisation, les émissions journalières estimées précédemment sont fournies sur un pas de temps horaire. Deux méthodes ont été utilisées pour cette désagrégation temporelle :

- 24h : les émissions journalières de sel sont divisées par 24 pour avoir des émissions horaires homogènes sur l'ensemble de la journée,
- Pourcentage trafic : une analyse des variations horaires des trafics a permis de voir que 55% du trafic se répartit entre 6h et 10h et entre 16h et 20h. Ainsi, 55% des émissions vont être attribuées sur ces 10 heures, et 45% sur les heures restantes.

Ces deux choix vont être comparés, au niveau des concentrations, pour évaluer l'influence de la répartition temporelle des émissions.

3.2.2. Modélisation- estimation des dépassements

Comme détaillé au §2.3.2, les simulations ont été réalisées avec les trois cadastres d'émission pour les deux sites. Cela nous permet d'analyser les résultats sous différents angles :

- L'apport du « cadastre sel » ;
- La sensibilité des résultats à la répartition temporelle des émissions ;
- La dispersion des concentrations autour de la route ;
- L'estimation des dépassements sur les 2 sites sur l'ensemble de la période.

L'ensemble de ces résultats est détaillé ci-après.

Les figures suivantes montrent la comparaison des concentrations journalières des PM10 simulées et mesurées à l'emplacement de la station de mesure de la Rocade sud et celle de la Route Blanche pour les différents cadastres d'émissions. L'influence de la prise en compte du sel dans les concentrations sur la Rocade Sud n'est pas très marquée, les coefficients de corrélation sont dans chaque cas à 0,9 ce qui est très bon (Figure 37). Par contre, sur la route blanche, les résultats « avec sel » sont nettement meilleurs: les coefficients de corrélation mesure/simulation sont à 0,8 au lieu de 0,5. Les évolutions temporelles journalières présentées Figure 38 et Figure 39 montrent que les cycles journaliers sont assez bien représentés, seuls quelques maxima ou minima sont difficilement retrouvés. Avec ce type de représentation, la nécessité de la présence de sel dans les émissions apparaît clairement sur le site de la Route Blanche.

Que le sel soit réparti tout au long de la journée ou plus spécifiquement, les résultats ne diffèrent que de peu. Cela permet de montrer que la répartition journalière du sel dans les cadastres n'a pas d'influence significative.

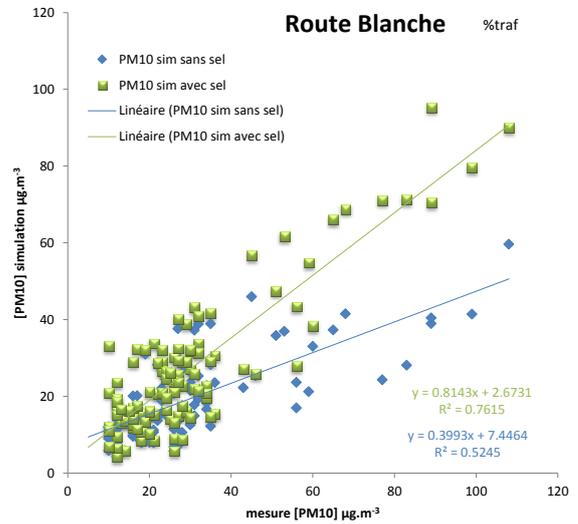
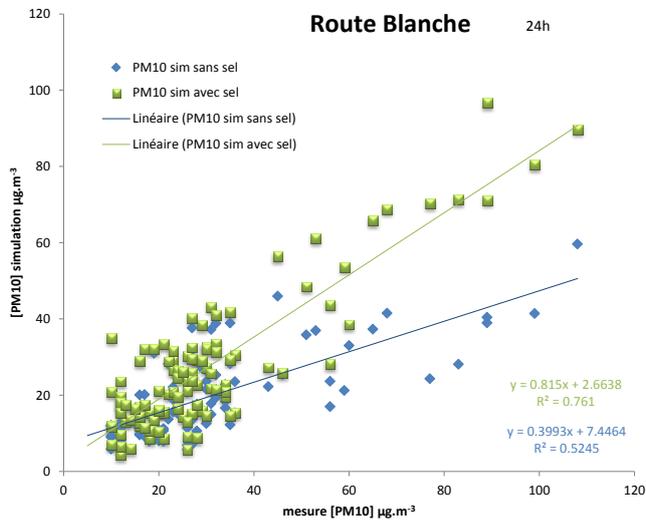
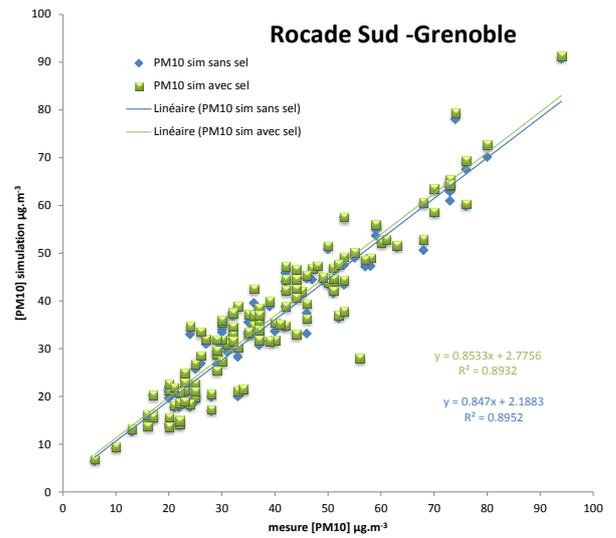
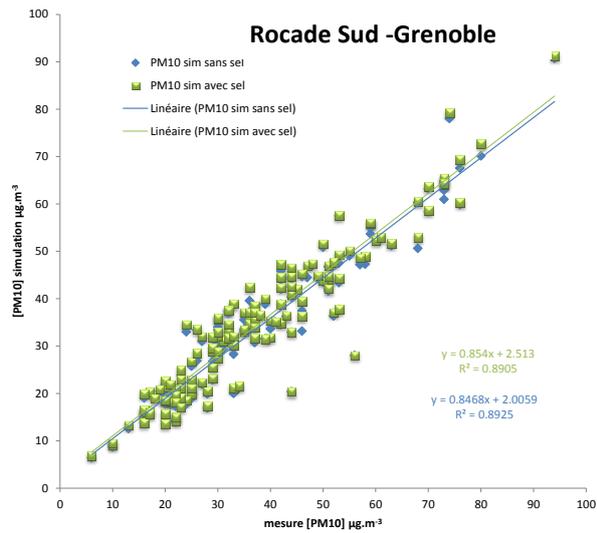


FIGURE 37 : COMPARAISONS ENTRE LES CONCENTRATIONS MESUREES ET SIMULEES SUR LA ROCADE SUD ET LA ROUTE BLANCHE AVEC ET SANS SEL DANS LES EMISSIONS, REPARTIES SUR 24H (COLONNE DE GAUCHE) OU EN POURCENTAGE DE TRAFIC (COLONNE DE DROITE).

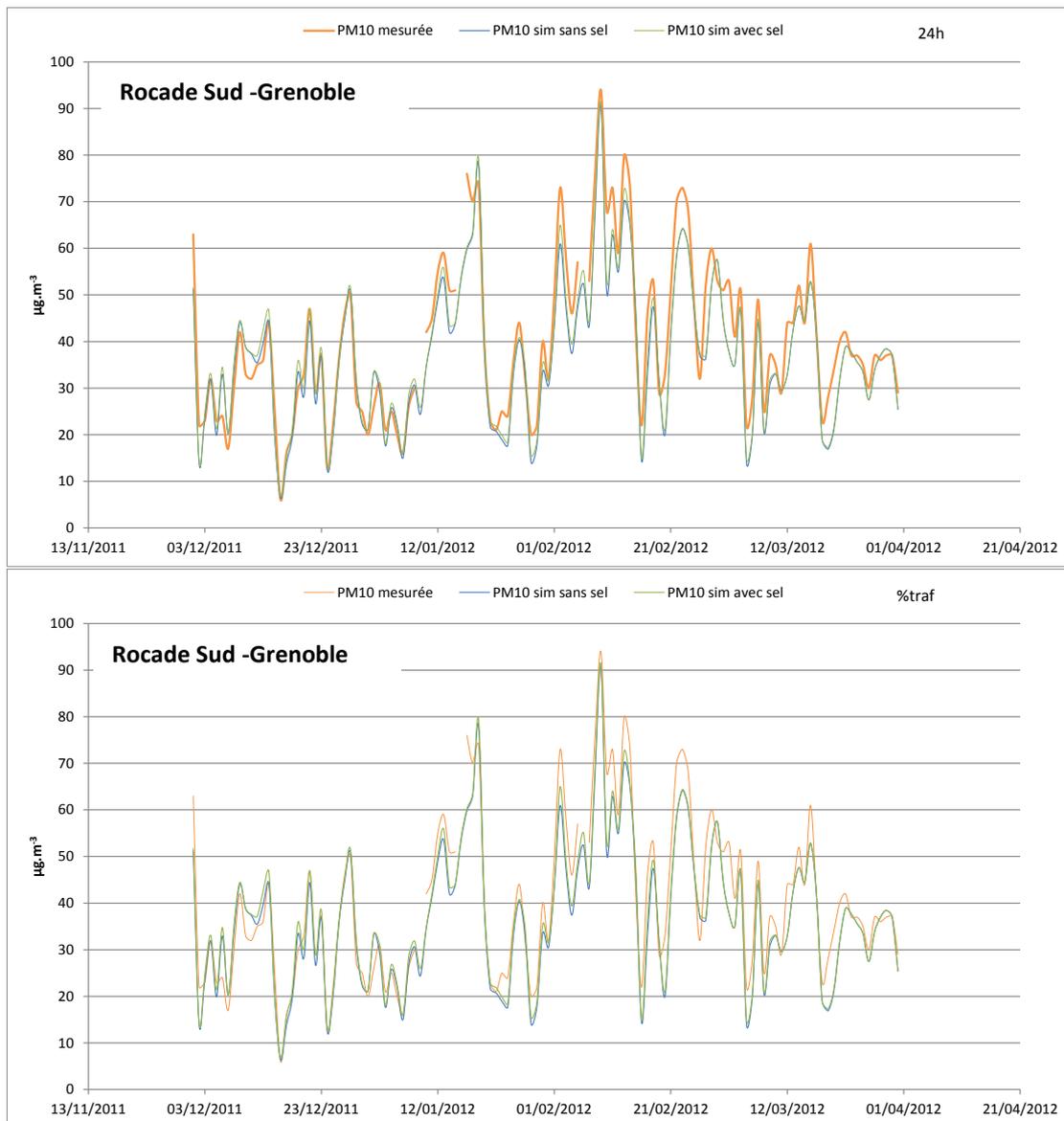


FIGURE 38 : EVOLUTIONS TEMPORELLES DES CONCENTRATIONS MESUREES ET SIMULEES SUR LA ROCADE SUD AVEC ET SANS SEL POUR UNE REPARTITION DU SEL SUR L'ENSEMBLE DE LA JOURNEE ET EN FONCTION DU TRAFIC

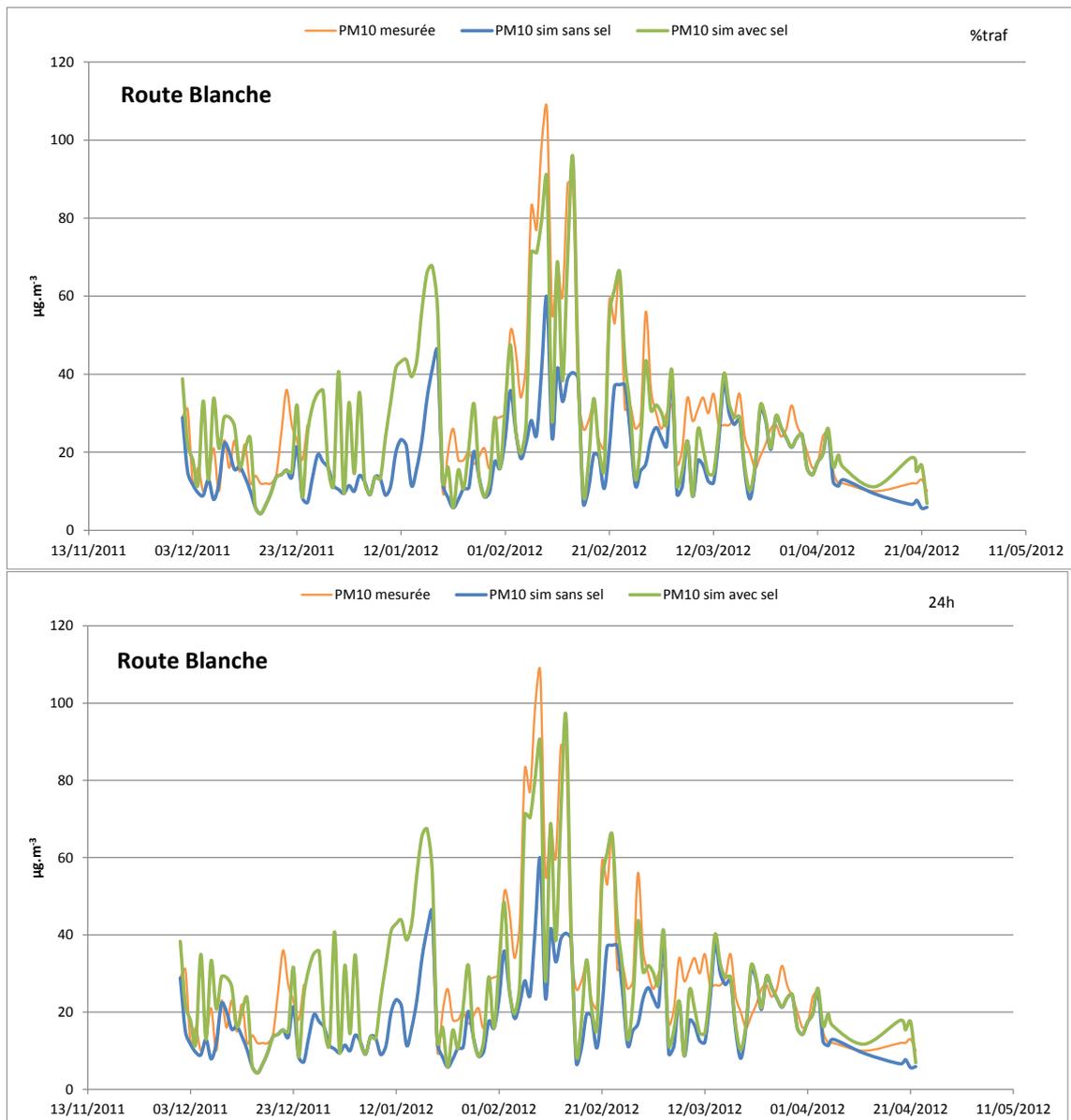


FIGURE 39 : ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DES CONCENTRATIONS MESURÉES ET SIMULÉES SUR LA ROUTE BLANCHE AVEC ET SANS SEL POUR UNE RÉPARTITION DU SEL SUR L'ENSEMBLE DE LA JOURNÉE ET EN FONCTION DU TRAFIC

La Figure 40 présente la concentration moyenne journalière des 9 février pour la Rocade Sud (Rondeau) et 11 février 2012 pour la Route Blanche (Bossons). Ces journées ont été choisies car il s'agit de journées au cours desquelles l'écart simulation/mesure est minimal. La dispersion de la concentration de PM10 de part et d'autre de l'axe de la route est influencée par le sens du vent. Par le biais de cette figure, la répartition de la part de sel dans la concentration totale de PM10 de part et d'autre de la route est représentée. Nous pouvons voir qu'elle est très importante aux Bossons et nettement moins au Rondeau, son étalement autour de la route en est également influencé et aux Bossons cela représente presque le double de distance qu'au Rondeau.

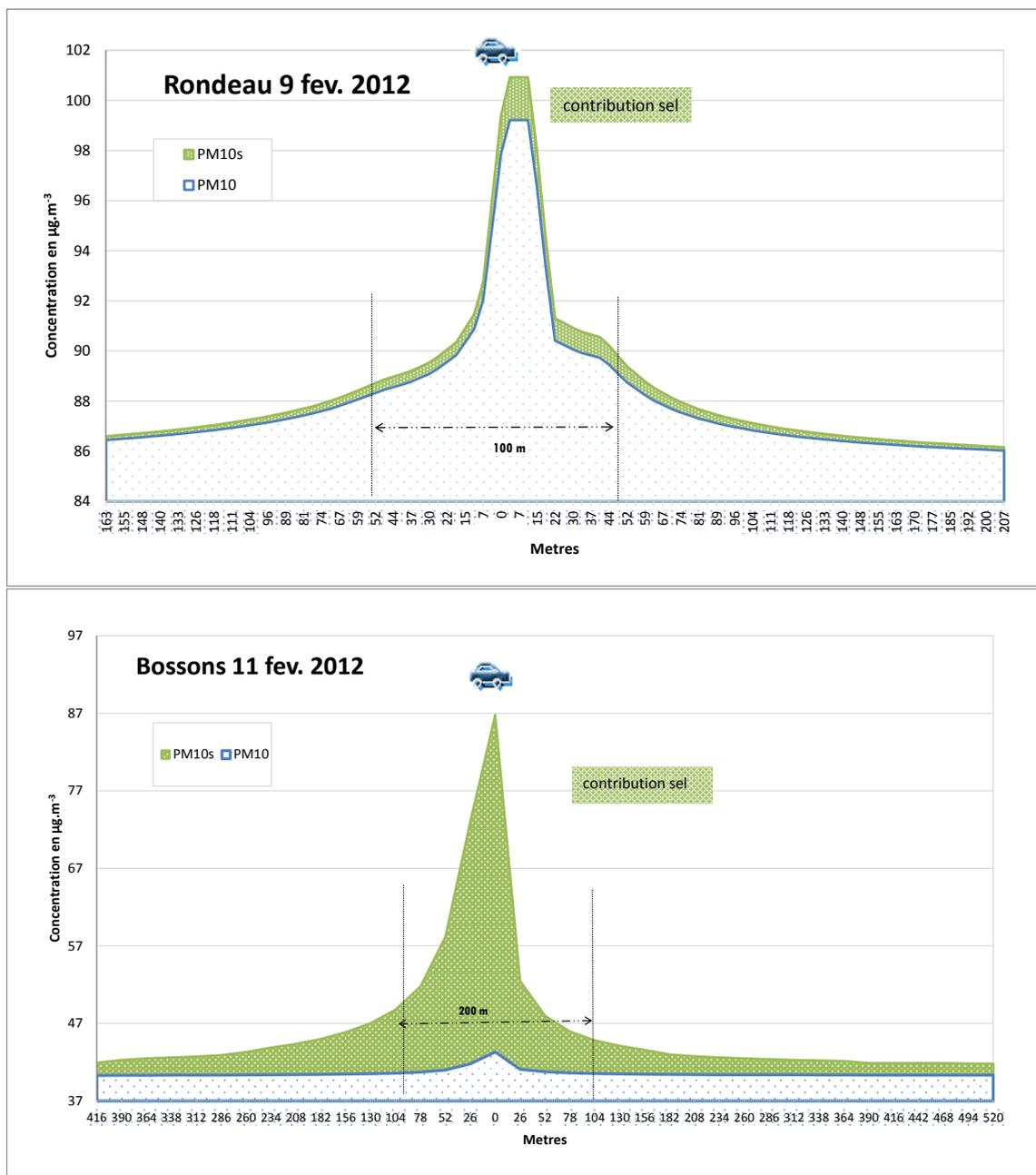


FIGURE 40 : DISPERSION AUTOUR DE LA ROUTE AU RONDEAU ET AUX BOSSONS : CONCENTRATION MOYENNE JOURNALIERE SIMULEE AVEC ET SANS SEL.

Si on focalise notre analyse sur les jours avec dépassement de $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en moyenne journalière à partir du 1^{er} décembre 2011, il y a eu 35 dépassements mesurés sur la Rocade Sud de Grenoble et 14 sur le site de la Route Blanche (cf. Tableau 8)). Utiliser le cadastre d'émission avec du sel permet d'approcher la simulation de ces scores (Figure 41) notamment sur la Route Blanche, mais il manque tout de même des journées. Les évolutions horaires (et non plus journalières) des concentrations modèle/mesures pendant ces journées (où le dépassement n'a pas été simulé) ont été analysées. Il s'avère que ce non dépassement est dû à une sous-estimation marquée des pics horaires au cours de ces journées. La présence de sel ou non ne permet pas d'expliquer cette sous-estimation dans la simulation qui semble donc dû à un effet local non représenté dans la simulation. Par ailleurs, pour les dépassements simulés, la synchronisation temporelle des dépassements mesurés et simulés est correcte aux deux sites. Il s'avère donc indispensable d'utiliser des émissions intégrant la part de sel dans les émissions.

	Nombre de jours mesurés	Nombre de jours simulés sans sel	Nombre de jours simulés avec sel
Rocade Sud	35	22	23
Route Blanche	15	1	14

TABLEAU 8 : NOMBRE DE JOURS DE DEPASSEMENT DE $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ EN MOYENNE JOURNALIERE ENTRE LE 1^{ER} DECEMBRE 2011 ET FIN AVRIL 2012

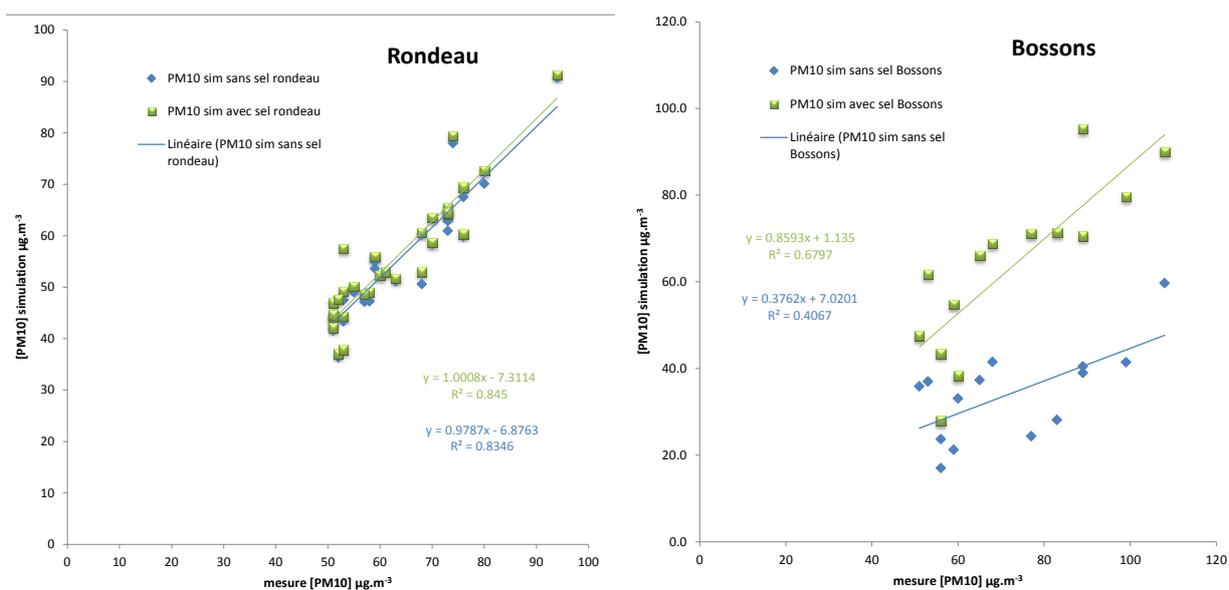


FIGURE 41 : COMPARAISON SIMULATION/MESURE LORS DES JOURNEES DE DEPASSEMENT DE $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ENTRE LE 1^{ER} DECEMBRE 2011 ET FIN AVRIL 2012

4. Conclusions et perspectives

La région Rhône-Alpes connaît de nombreux dépassements de la valeur limite journalière pour les particules PM10. La mise en œuvre de pratiques de viabilité hivernale étant courante dans la région et susceptible d'augmenter les concentrations de ces particules fines, l'objectif de ce travail était d'améliorer ou développer les outils d'estimation de la contribution de ces pratiques dans les dépassements de PM10. Le travail réalisé a permis d'apporter de nombreuses informations.

- Le sablage étant peu, voire pas, pratiqué dans la région, le travail a finalement porté uniquement sur la contribution du salage. Les mesures réalisées ont permis d'estimer la contribution du sel dans la part des PM10 sur 3 secteurs de la région. Les concentrations de sel sont faibles sur le site urbain des Frênes et modérées en proximité de la Rcade Sud à Grenoble (quelques microgrammes par mètre cube). En revanche, les concentrations de sel peuvent atteindre plusieurs dizaines de $\mu\text{g.m}^{-3}$ en proximité de la route Blanche près de Chamonix. La contribution des sels de route peut ainsi représenter plus de 50% des particules PM10 sur le site de la Route Blanche alors qu'elle est limitée à 10% environ sur le secteur de la Rcade Sud à Grenoble.
- Sur les secteurs de proximité automobile étudiés, le salage des routes contribue effectivement certains jours aux dépassements de la valeur limite pour les PM10. Cette contribution est faible sur le secteur de la Rcade Sud (3 à 6 dépassements attribuables sur 48 pendant l'hiver 2011-2012), elle est beaucoup plus importante sur le site de la Route Blanche (7 à 9 dépassements attribuables sur 15 pendant la période). Les informations recueillies ne sont pas suffisantes pour extrapoler ces résultats de manière quantitative aux autres stations de surveillance de la région mais soulèvent la nécessité de poursuivre les investigations afin d'évaluer cette contribution sur les autres secteurs en dépassement réglementaire.
- L'étude des variations des concentrations de sel a montré la complexité des phénomènes de remise en suspension des particules de sel, avec notamment l'influence probable de la température de la chaussée. Cette complexité a également été mise en évidence lors de la recherche d'un modèle statistique visant à reproduire les concentrations de sel.
- Les données recueillies ont permis d'évaluer les émissions de PM10 liées à la resuspension du sel sur les secteurs étudiés, toutefois l'extrapolation du modèle à d'autres axes routiers de la région comme prévu initialement n'est pas possible avec les seules données disponibles. Les modèles statistiques obtenus ont des difficultés à prévoir les pics de sel mais donnent toutefois des résultats satisfaisants sur la période étudiée. Pour poursuivre l'estimation des émissions de sel selon cette méthodologie, des données supplémentaires seraient nécessaires afin de proposer une meilleure paramétrisation du modèle statistique lié aux concentrations. L'estimation des émissions montre que le sel remis en suspension peut représenter sur la période hivernale entre 15% et près de 80% des émissions de PM10 d'un axe routier.
- Une analyse complémentaire des résultats du modèle statistique est nécessaire et pour cela, la récupération précise non seulement des jours de salage mais également des quantités de sel épandues est à soutenir.
- Les concentrations simulées avec et sans sel ont été comparées aux mesures. Les résultats ont montré qu'il est indispensable d'utiliser des émissions intégrant la part de sel à Chamonix Route Blanche si l'on veut reproduire au mieux les journées de dépassement du seuil.



L'étude a montré que la part de la resuspension du sel dans les émissions et les concentrations de PM10 pouvait être importante en proximité routière, notamment dans la vallée de l'Arve, territoire impliqué dans le contentieux européen. Par conséquent, de nouvelles mesures seront réalisées en 2013 dans le secteur de Passy afin d'évaluer la contribution du salage sur ce secteur. En parallèle, il conviendrait de développer les connaissances sur les quantités de sel épandues sur les différents axes du territoire rhônalpin ainsi que sur les phénomènes de resuspension du sel en fonction des différents facteurs influents.

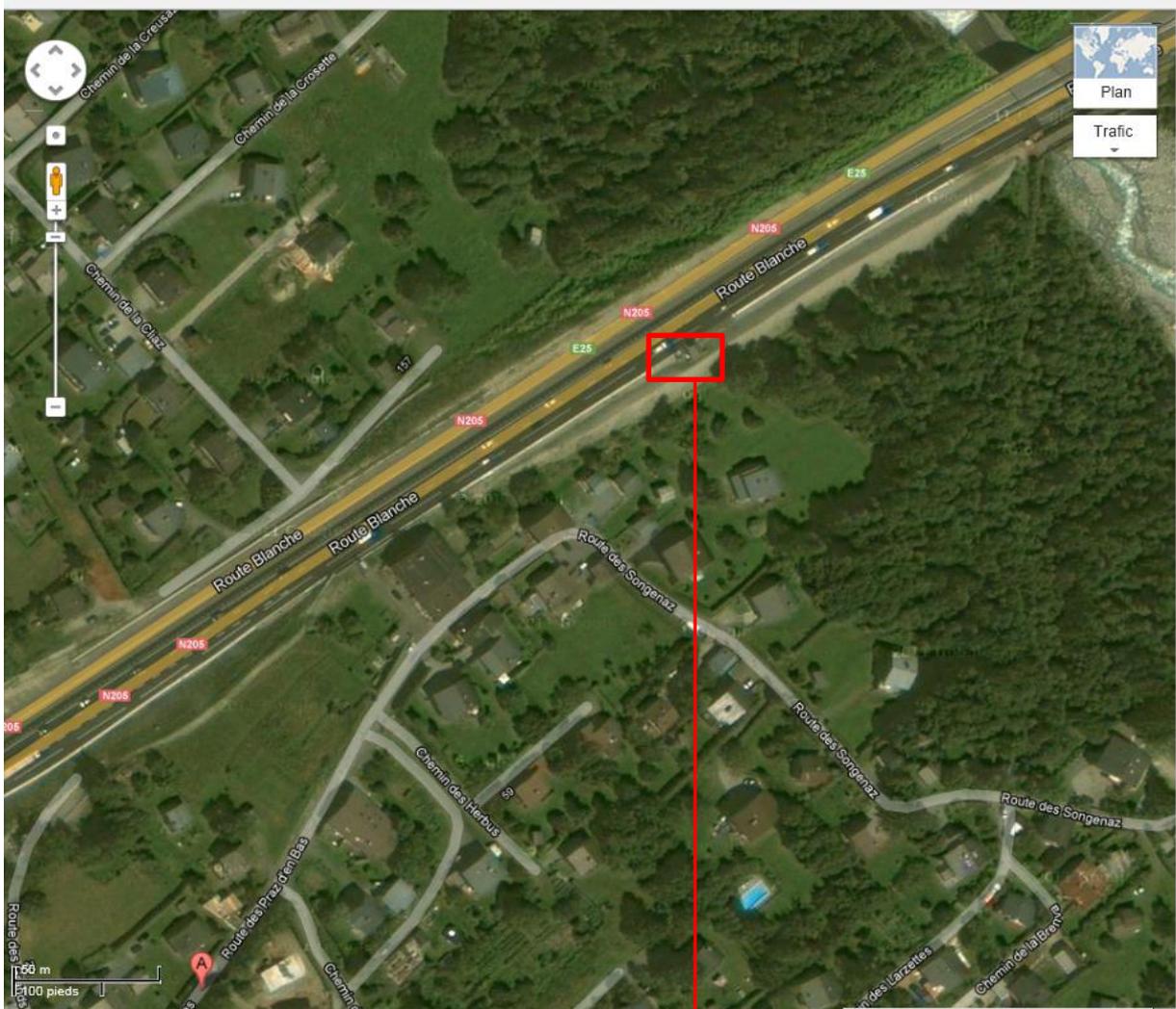


Bibliographie

- ADEME (2011)** PARTICULAIRE – Etude inter-régionale de la pollution particulaire en zone rurale
- Boulter P.G - TRL Limited (2006)** : A review of emission factors and models for road vehicle non exhaust particulate matter
- Chan, Y.C., Simpson, R.W., McTainsh, G.H., Vowles, P.D., Cohen, D.D., Bailey, G.M. (1997)** Characterisation of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Brisbane, Australia. *Atmospheric Environment* 31, 3773-3785.
- Denby, B.R., Sundvor, I. (2012)** NORTRIP model development and documentation: NON-exhaust Road TRaffic Induced Particle emission modelling
- DOE (1994)** Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water ; version 2, A. G. Dickson & C. Goyet, eds., ORNL/CDIAC-74.
- European Commission (2011)** COMMISSION STAFF WORKING PAPER establishing guidelines for determination of contributions from the re-suspension of particulates following winter sanding or salting of roads under the Directive 2008/50/EC. SEC2011 – 207 final
- Jaffrezo, J.L., 1987. Etude du lessivage des aérosols atmosphériques par les précipitations. Université Paris VII, p. 187.
- FprCEN/TR 16269:2011** Qualité de l'air ambiant – Guide pour le mesurage des anions et des cations dans la fraction PM_{2.5}, projet de rapport technique du CEN/TC 264, disponible auprès de l'AFNOR
- Gehrig, R., Hill, M., Buchmann, B. (2004)** Separate determination of PM₁₀ emission factors of road traffic for tailpipe emissions and emissions from abrasion and resuspension processes. *Int. J. Environment and Pollution*. 22, 312-325)
- LGGE (2012)** Influence du salage des routes en Rhône-Alpes. Rapport d'avancement. Juillet 2012.
- Marelli, L. (2007)** Contribution of natural sources to air pollution levels in the EU - a technical basis for the development of guidance for the Member States. European Commission (Joint Research Centre) EUR 22779 EN.
- Omstedt, G., Bringfelt, B., Johansson, C. (2005)** A model for vehicle-induced non-tailpipe emissions of particles along Swedish roads, *Atmospheric Environment*, (39), 6088-6097)
- Putaud, J.P., Van Dingenen, R., Dell'Acqua, A., Raes, F., Matta, E., Decesari, S., Facchini, M.C., Fuzzi, S. (2004)** Size-segregated aerosol mass closure and chemical composition in Monte Cimone (I) during MINATROC. *Atmospheric Chemistry and Physics* 4, 889-902.
- Putaud, J.P., Van Dingenen, R., Alastuey, A., Bauer, H., Birmili, W., Cyrys, J., Flentje, H., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hansson, H.C., Harrison, R.M., Herrmann, H., Hitenberger, R., Hüglin, C., Jones, A.M., Kasper-Giebl, A., Kiss, G., Kousa, A., Kuhlbusch, T.A.J., Löschau, G., Maenhaut, W., Molnar, A., Moreno, T., Pekkanen, J., Perrino, C., Pitz, M., Puxbaum, H., Querol, X., Rodriguez, S., Salma, I., Schwarz, J., Smolik, J., Schneider, J., Spindler, G., ten Brink, H., Tursic, J., Viana, M., Wiedensohler, A., Raes, F. (2010)** A European aerosol phenomenology - 3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe. *Atmospheric Environment* 44, 1308-1320.
- Gehrig, R., Hill, M., Buchmann, B. (2004)** Separate determination of PM₁₀ emission factors of road traffic for tailpipe emissions and emissions from abrasion and resuspension processes. *Int. J. Environment and Pollution*. 22, 312-325)

Annexes

ANNEXE 1 : Implantation de la station Chamonix Route Blanche

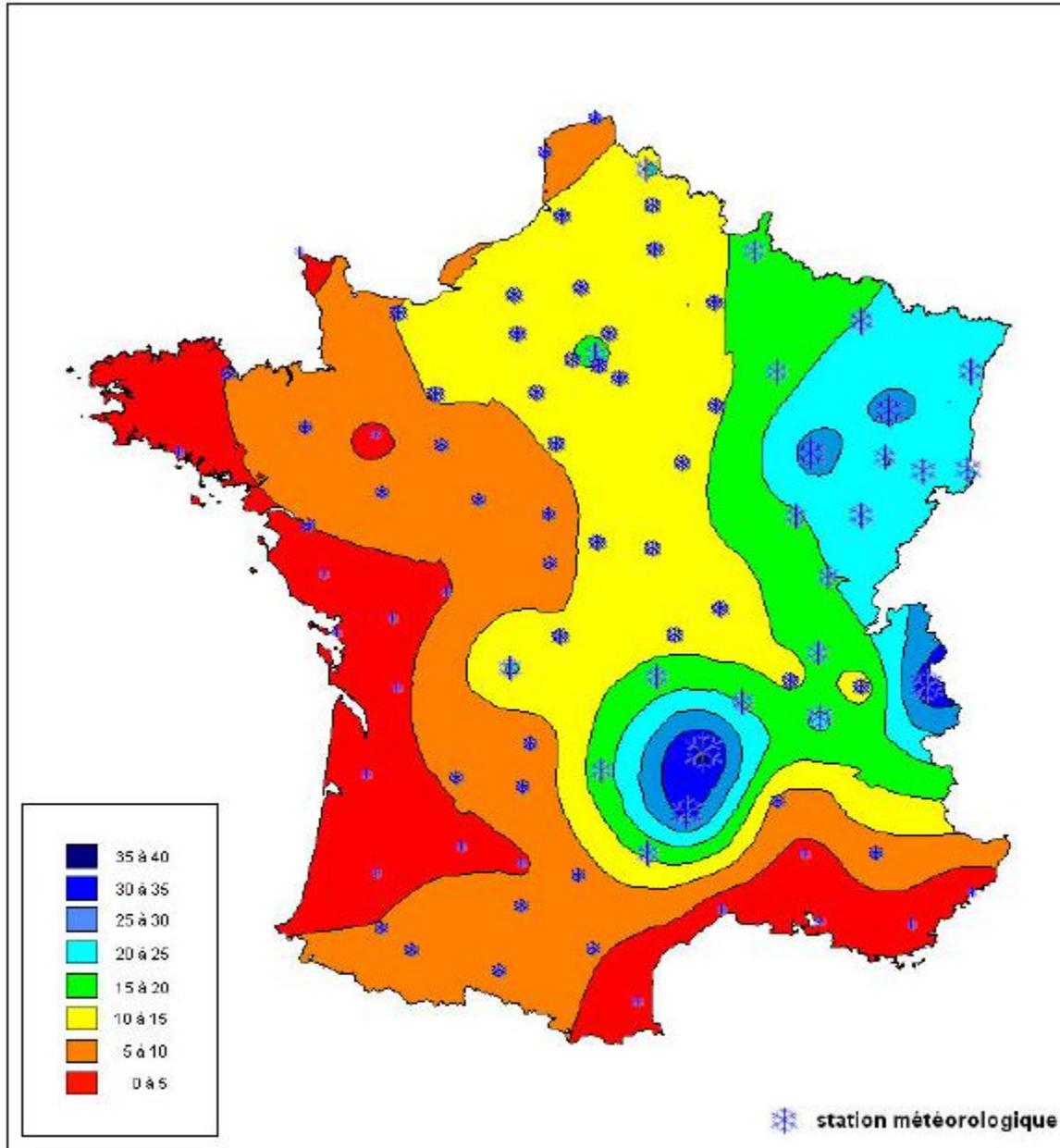


ANNEXE 2 : Implantation de la station Grenoble Rocade Sud



ANNEXE 3 : Occurrence Neige

Source : <http://www.viabilite-hivernale.developpement-durable.gouv.fr/>



Ces données d'occurrence de neige sont des données journalières (de 0 à 24h TU).
Une occurrence de neige positive correspond à une journée où il a neigé,
mais sans indication sur la quantité de neige
(la donnée sera positive qu'il ait neigé quelques minutes à plusieurs heures sans différenciation).