

Projet SELVERT

Etude d'un produit de traitement à effet 'séquestrant'
des particules sur les aménagements routiers

2016 - 2017



Credit photo : © Atmo / Ato

Diffusion : Juin 2019

Siège social :
3 allée des Sorbiers 69500 BRON
Tel. 09 72 26 48 90
contact@atmo-aura.fr



Conditions de diffusion

Dans le cadre de la réforme des régions introduite par la Nouvelle Organisation Territoriale de la République (loi NOTRe du 16 juillet 2015), les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air de l'Auvergne (ATMO Auvergne) et de Rhône-Alpes (Air Rhône-Alpes) ont fusionné le 1er juillet 2016 pour former Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est une association de type « loi 1901 » agréée par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (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.

Atmo Auvergne-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 les sites www.air-rhonealpes.fr et <http://www.atmoauvergne.asso.fr/>

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Atmo Auvergne-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 : © **Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (2019) Projet SELVERT - Etude d'un produit de traitement à effet 'séquestrant' des particules sur les aménagements routiers (2016-2017).**

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

Par ailleurs, Atmo Auvergne-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 Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

- depuis le [formulaire de contact](#)
- par mail : contact@atmo-aura.fr
- par téléphone : 09 72 26 48 90

Financement

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

Grenoble-Alpes Métropole

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



**ACTION INSCRITE DANS LE CADRE DE L'APPEL À PROJETS « VILLES RESPIRABLES EN 5 ANS »,
FINANCÉ PAR LE MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET SOLIDAIRE.**



Sommaire

1. Contexte et objectif de l'étude	5
2. Méthodologie	7
2.1. Zone d'étude et sites de mesure	7
2.2. Calendrier des mesures	9
2.3. Paramètres mesurés	11
3. Analyse des résultats	14
3.1. Analyse spatiale préliminaire.....	14
3.2. Analyse temporelle des données.....	16
3.3. Analyse statistique des données	18
3.3.1. Historique des mesures.....	18
3.3.2. Tests statistiques 'ANOVA'	20
3.3.3. Optimisation de la plage d'observation	22
3.3.4. Tests complémentaires.....	24
3.3.5. Reconstitution de données à partir d'une modélisation statistique.....	26
4. Conclusions	28

1. Contexte et objectif de l'étude

Dans le bassin Grenoblois, les niveaux de particules fines sont en baisse régulière depuis ces 10 dernières années, que ce soit en zone urbaine ou le long des axes de circulation. En moyenne annuelle, la valeur limite fixée à 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ est respectée depuis plusieurs années, mais les niveaux dépassent encore chaque année le seuil recommandé par l'OMS de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en particulier pour les zones proches des voiries.

Des actions de réductions des émissions sont donc nécessaires pour que les niveaux de particules respectent le seuil de l'OMS à court terme ([Bilan 2016 ATMO Auvergne-Rhône-Alpes](#))

En proximité routière, les particules issues du trafic routier peuvent être décomposées selon 3 types :

- Les particules primaires de combustion, émises directement à l'échappement des véhicules.
- Les particules primaires d'usure, issues des pneumatiques, des embrayages, des freins, ou de la route, et de la remise en suspension au passage des véhicules de particules déposées sur la chaussée.
- Les particules secondaires, particules ultrafines qui se forment dans l'air extérieur, à partir de gaz précurseurs émis à l'échappement des véhicules (diesel ou essence).

Les progrès technologiques réalisés par les constructeurs automobiles ont beaucoup contribué sur ces dernières années à la baisse des particules primaires, avec notamment la généralisation des filtres à particules à l'ensemble des véhicules neufs (diesel) à partir de 2011. Cependant, malgré l'effet d'amélioration de la qualité de l'air lié au renouvellement du parc automobile, la part des émissions des motorisations diesel non équipé de filtre à particules reste majoritaire. A contrario les motorisations essences, traditionnellement moins polluantes, voient leurs émissions de particules augmenter sous l'effet de l'arrivée de l'injection direct et se rapprocher de celles des diesels récents. Bien que le défi technologique de réduction des particules émises par l'automobile soit un objectif d'amélioration des motoristes (régis par l'évolution des normes Euro) des solutions alternatives « terrain » d'amélioration de la qualité de l'air sont fréquemment à l'étude.

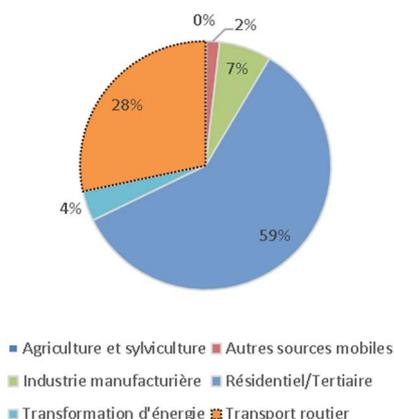
Ainsi, différentes solutions visant à réduire l'impact des émissions du trafic automobile ont été explorées, dont les écrans naturels du type haie végétale, les revêtements catalytiques sur la chaussée ou sur les murs, les abat-poussières, ... Ces aménagements mis en place aux abords des voiries visent à limiter la pollution liée au trafic routier notamment pour les particules ou les oxydes d'azote.

Toutes ces solutions ne peuvent pas à elles seules réduire efficacement la pollution atmosphérique, mais elles peuvent présenter un co-bénéfice intéressant sur l'amélioration de la qualité de l'air, sous réserves de vérifications préalables tenant compte des lieux fréquentés ou habités par les populations.

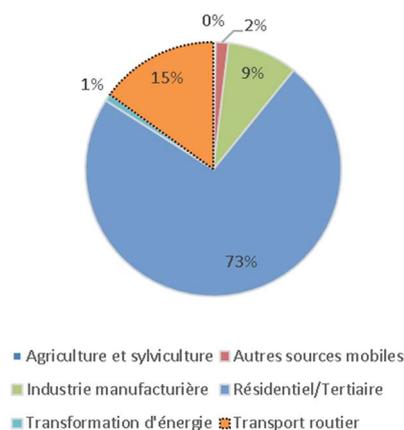
Depuis quelques années, ce contexte d'investigation est soutenu par l'Etat. Il accompagne les initiatives collectives via l'appel à projet « Villes respirables en 5 ans » lancées par le ministère chargé de l'écologie en juin 2015. Ce projet ambitionne de promouvoir des « villes laboratoires » volontaires pour faire émerger des actions concrètes, radicales et exemplaires pour améliorer la qualité de l'air. Grenoble Alpes Métropole fait partie des 20 territoires lauréats retenus au niveau national dont 5 sont situés en Région Auvergne-Rhône-Alpes.

La présente étude s'inscrit dans cet appel à projet national avec la mise en œuvre d'un test in situ d'un produit nommé « VairPur » fabriqué par la société Selvert. Il s'agit d'une proposition alternative à la réduction des particules dans l'air ambiant via un traitement à effet 'séquestrant' sur les aménagements routiers. L'effet attendu en bordure de voirie toucherait les 10% à 20% des particules remise en suspension par le trafic routier. Soit sur le territoire de la ville de Grenoble une part hypothétique comprise entre 3% et 5% de la totalité des particules émises. En effet, à l'échelle de la ville la part de la particule liée aux émissions du transport routier est de 28%. Elle reste toutefois sensiblement plus élevée dans les zones proches des voiries. Le choix de la zone de l'étude sur le territoire de la ville de Grenoble semblait donc le plus pertinent pour la réalisation du test in situ. En effet il présente la part des émissions de particules lié au transport routier la plus importante au sein du bassin de vie grenoblois (28% contre 15% ; cf. graphiques ci-après).

Répartition des émissions global SECTEN – 6 Classes - 2016



VILLE DE GRENOBLE



BASSIN DE VIE DE GRENOBLE (75 COMMUNES)

2. Méthodologie

L'étude vise à **évaluer in situ**, en période hivernale et dans les conditions d'usages réelles, l'efficacité du produit 'VAirPur' fabriqué par la société SELVERT.

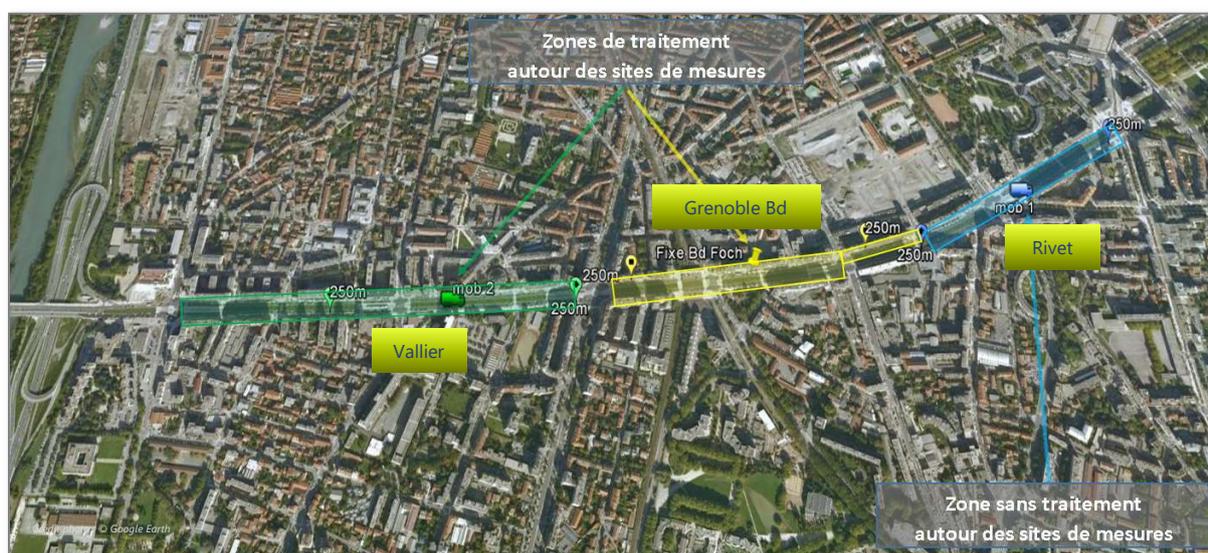
L'étude s'étend sur 3 boulevards grenoblois :

Bd Joseph Vallier, Bd Maréchal Foch et le Bd Maréchal Joffre.

Ils sont divisés en **3 zones distinctes** différenciant les zones de chaussée traitées et non traitées par le produit.

Les **mesures représentatives** ont été déployées selon un calendrier composé de 2 phases. Et les données associées ont été recueillies en vue d'**exploitations statistiques**.

2.1. Zone d'étude et sites de mesure



ZONES DE L'ETUDE DES GRANDS BOULEVARDS GRENOBLOIS

Détail des zones :

- Zone « verte » - Bd Joseph Vallier – Zone traitée
 - Début : intersection du Bd avec avenue Rhin et Danube / Rue Ampère.
 - Fin : intersection du Bd avec les cours de la libération et Général de Gaule / cours Jean Jaurès.
- Zone « Jaune » - Bd Maréchal Foch – Zone traitée
 - Début : intersection du Bd avec cours de la Libération et du Général de Gaule / cours Jean Jaurès
 - Fin : côté impair (sud) : intersection avec rue du général Ferrié / rue Marceau
 - Fin : côté pair (nord) : intersection avec rue Lazard Carnot (uniquement 1 côté de la chaussée)
- Zone « bleue » - Bd Maréchal Joffre – Zone non traitée
 - Début : intersection Bd Maréchal Foch / rue Robert Dubarle
 - Fin : intersection Bd Maréchal Joffre / place Paul Mistral

Le dispositif métrologique comprend 3 points de mesures, en proximité immédiate de la chaussée et au centre de chacune des 3 zones :

- **Le site 'Vallier'** (identifié en vert) au centre de la zone ouest, est un site temporaire, avec un laboratoire mobile implanté durant la toute la durée de l'étude.

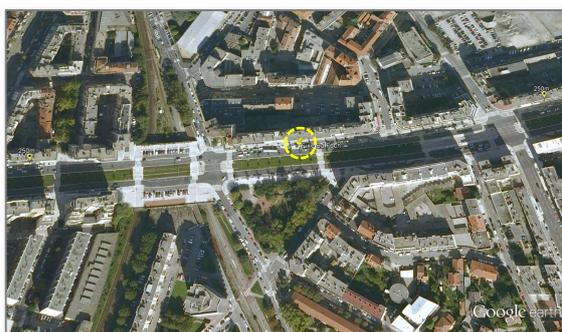


EMPLACEMENT LABORATOIRE MOBILE 'VALLIER'



PHOTO : LABORATOIRE MOBILE 'VALLIER'

- **Le site 'Grenoble Boulevard'** (identifié en jaune) au centre des 3 zones de l'étude, est un site permanent de l'observatoire Atmo Auvergne-Rhône-Alpes et dispose d'un historique de mesures continues depuis 2006.

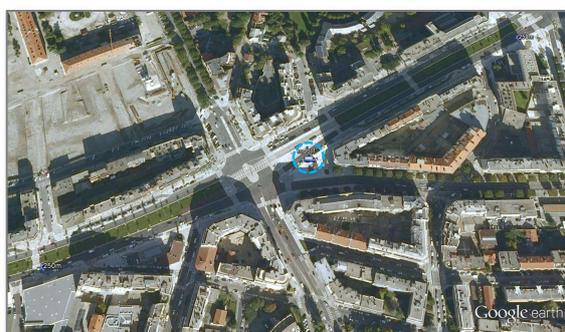


EMPLACEMENT FIXE 'GRENOBLE BD'



PHOTO : FIXE 'GRENOBLE BD'

- **Le site 'Rivet'** (identifié en bleu) au centre de la zone Est, est un site temporaire, avec un laboratoire mobile implanté durant toute la durée de l'étude.



EMPLACEMENT LABORATOIRE MOBILE 'RIVET'



PHOTO : LABORATOIRE MOBILE 'RIVET'

2.2. Calendrier des mesures

Le calendrier des mesures sur le terrain se déroule en 2 phases :

- La **1^{ère} phase** (de novembre 2016 à mi-décembre 2016) a pour objectif de recueillir des données sans traitement 'VAirPur' afin d'**étudier la corrélation vis-à-vis de la qualité de l'air entre les 3 sites**.
- La **2^{nde} phase** (de mi-décembre 2016 à fin mars 2017) a pour objectif de recueillir des données durant plusieurs périodes avec traitements et sans traitement 'VAirPur' afin d'**évaluer l'efficacité du produit 'VAirPur'**. Le protocole terrain alterne 2 semaines de traitements et 2 semaines de non traitement avec le produit 'VAirPur', d'abord sur la zone 'verte' (de décembre 2016 à janvier 2017) puis en incluant la zone 'jaune' (de février à mars 2017). La 3^{ième} zone 'bleue', la plus à l'Est des grands boulevards, est une zone « témoin » sans traitement. L'application du produit 'VAirPur' sur la chaussée est réalisée par les services techniques de la Ville de Grenoble en accord avec la Société SELVERT entre 4h et 4h30 du matin.

Le calendrier initialement prévu des traitement était le suivant :

novembre		décembre		janvier		février		mars	
Zones traitées		Zones traitées		Zones traitées		Zones traitées		Zones traitées	
mar 01	Démarrage des mesures Qualité de l'Air	jeu 01		dim 01		mer 01		mer 01	
mer 02		ven 02		lun 02		jeu 02		jeu 02	
jeu 03		sam 03		mar 03		ven 03		ven 03	
ven 04		dim 04		mer 04		sam 04		sam 04	
sam 05		lun 05		jeu 05		dim 05		dim 05	
dim 06		mar 06		ven 06		lun 06	■	lun 06	■
lun 07		mer 07		sam 07		mar 07	■	mar 07	■
mar 08		jeu 08		dim 08		mer 08	■	mer 08	■
mer 09		ven 09		lun 09	■	jeu 09		jeu 09	
jeu 10		sam 10	■	mar 10		ven 10	■	ven 10	■
ven 11		dim 11	■	mer 11	■	sam 11		sam 11	
sam 12		lun 12	■	jeu 12		dim 12		dim 12	
dim 13		mar 13		ven 13	■	lun 13	■	lun 13	■
lun 14		mer 14	■	sam 14		mar 14		mar 14	
mar 15	jeu 15	■	dim 15		mer 15	■	mer 15	■	
mer 16	ven 16	■	lun 16	■	jeu 16		jeu 16		
jeu 17	sam 17		mar 17		ven 17	■	ven 17	■	
ven 18	dim 18		mer 18	■	sam 18		sam 18		
sam 19	lun 19	■	jeu 19		dim 19		dim 19		
dim 20	mar 20		ven 20	■	lun 20		lun 20		
lun 21	mer 21	■	sam 21		mar 21		mar 21		
mar 22	jeu 22		dim 22		mer 22		mer 22		
mer 23	ven 23	■	lun 23		jeu 23		jeu 23		
jeu 24	sam 24		mar 24		ven 24		ven 24		
ven 25	dim 25		mer 25		sam 25		sam 25		
sam 26	lun 26		jeu 26		dim 26		dim 26		
dim 27	mar 27		ven 27		lun 27		lun 27		
lun 28	mer 28		sam 28		mar 28		mar 28		
mar 29	jeu 29		dim 29				mer 29		
mer 30	ven 30		lun 30				jeu 30	Fin des mesures	
	sam 31		mar 31				ven 31		

■ Traitement de la zone verte ■ Traitement de la zone jaune

CALENDRIER DES TRAITEMENTS INITIAL

Suite aux contraintes de terrain, des aménagements ont dû être apportés au calendrier initial, à l'initiative de la société SELVERT et/ou des services techniques de la Ville de Grenoble.

Le calendrier modifié est présenté ci-après :

novembre		décembre		janvier		février		mars	
Zones traitées		Zones traitées		Zones traitées		Zones traitées		Zones traitées	
mar 01	Démarage des mesures Qualité de l'Air	jeu 01		dim 01		mer 01		mer 01	(*4)
mer 02		ven 02		lun 02		jeu 02		jeu 02	
jeu 03		sam 03		mar 03		ven 03		ven 03	(*5)
ven 04		dim 04		mer 04		sam 04		sam 04	
sam 05		lun 05		jeu 05		dim 05		dim 05	
dim 06		mar 06		ven 06		lun 06		lun 06	
lun 07		mer 07		sam 07		mar 07		mar 07	
mar 08		jeu 08		dim 08		mer 08		mer 08	
mer 09		ven 09		lun 09		jeu 09		jeu 09	
jeu 10		sam 10	Début Phase 2	mar 10		ven 10		ven 10	
ven 11		dim 11		mer 11		sam 11		sam 11	
sam 12		lun 12		jeu 12		dim 12		dim 12	
dim 13		mar 13		ven 13	(*2)	lun 13		lun 13	(*6)
lun 14	mer 14		sam 14		mar 14		mar 14		
mar 15	jeu 15		dim 15		mer 15		mer 15		
mer 16	ven 16	(*1)	lun 16		jeu 16		jeu 16		
jeu 17	sam 17		mar 17		ven 17		ven 17		
ven 18	dim 18		mer 18		sam 18		sam 18		
sam 19	lun 19		jeu 19		dim 19		dim 19		
dim 20	mar 20		ven 20		lun 20		lun 20		
lun 21	mer 21		sam 21		mar 21		mar 21		
mar 22	jeu 22		dim 22		mer 22		mer 22		
mer 23	ven 23		lun 23		jeu 23		jeu 23		
jeu 24	sam 24		mar 24		ven 24		ven 24		
ven 25	dim 25		mer 25		sam 25		sam 25		
sam 26	lun 26		jeu 26		dim 26		dim 26		
dim 27	mar 27		ven 27		lun 27	(*3)	lun 27		
lun 28	mer 28		sam 28		mar 28		mar 28		
mar 29	jeu 29		dim 29				mer 29		
mer 30	ven 30		lun 30				jeu 30	Fin des mesures	
	sam 31		mar 31				ven 31		

Traitement de la zone verte
 Traitement de la zone jaune

CALENDRIER DES TRAITEMENTS REALISES

(*1) Traitement à moitié 1 voie sur 2 dans les 2 sens

(*2) Episode neigeux, arrêt des tests

(*3) Traitement à moitié 1 voie sur 2 dans les 2 sens,

(*4) Non-respect de la zone traité en plus de l'objectif

(*5) humidification de la chaussée avant traitement, (*6) Lavage de la chaussée avant traitement

Malgré ces aléas, les cycles alternants traitements et non traitement 'VAirPur' ont été suffisants pour quantifier l'efficacité du produit sur les 2 zones prévues initialement.

2.3. Paramètres mesurés

Les polluants mesurés sont ceux les plus pertinents pour tracer l'effet 'séquestrant', à savoir :

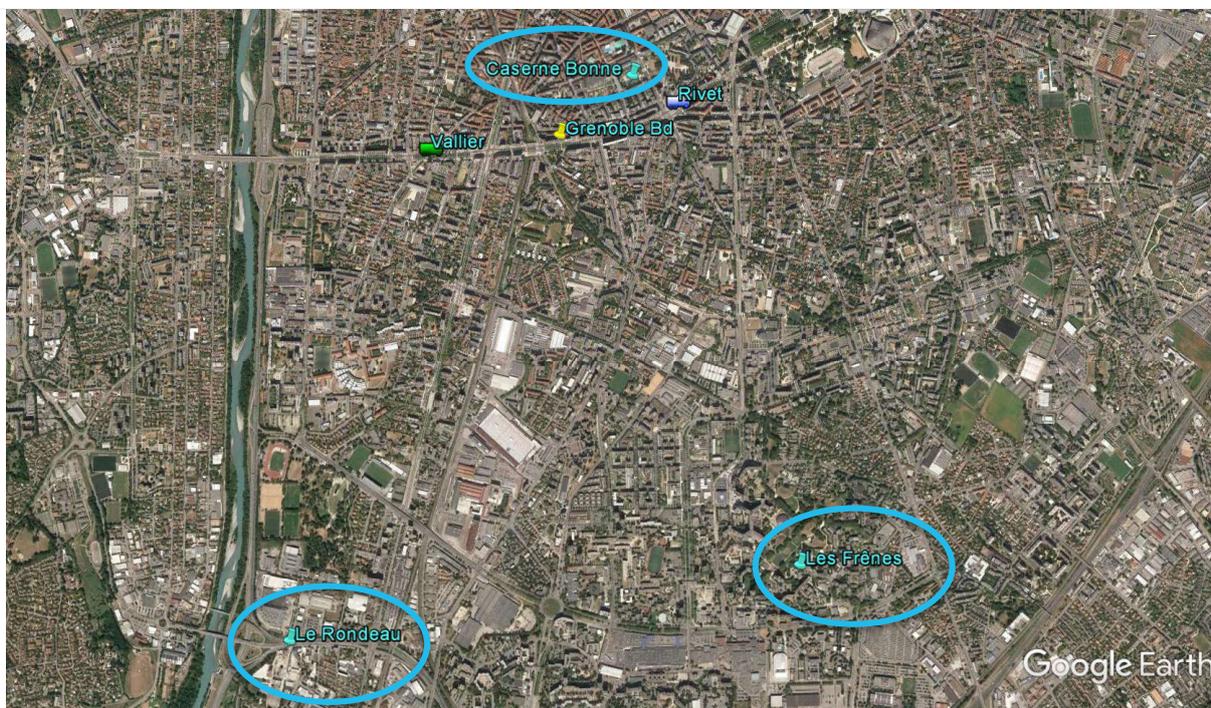
- Les **particules fines en suspensions (PM10)** qui présentent en proximité automobile une part importante lié au trafic automobile, dont une partie est potentiellement susceptible d'être affectée par l'effet des traitements 'VAirPur'.
- Les **oxydes d'azote (NO et NO₂)**, traceurs du trafic automobile, sont représentatifs de la fluctuation des émissions lié aux flux de circulation automobile. Leur évolution pourra servir de référence pour comparer celle des PM10 durant les phases avec et sans traitement puisque le produit séquestrant n'a aucun effet sur ces composés.

Les données de référence

Les données qualité de l'air recueillies sur les 2 sites de l'étude (Vallier et Rivet) sont comparées aux mesures **des stations fixes** de l'observatoire Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. Ces stations de références sont **représentatives de différents environnements** (ou typologies). De plus, ceci permet de prendre en compte l'influence spécifique des paramètres météorologiques sur les polluants suivis durant la période de mesure.

Les sites de référence choisis pour cette étude sont représentatifs des environnements suivants :

- **Trafic automobile**, en proximité des grands axes de circulations :
 - 'Le Rondeau', en proximité de l'A480 en périphérie de l'agglomération.
 - 'Grenoble Boulevard', en proximité des grands boulevards urbains (Bd Maréchal Foch) et dans la zone de l'étude.
- **Fond urbain**, sans influence de proximité :
 - 'Caserne de bonne', dans l'éco quartier du centre-ville de l'agglomération grenobloise.
 - 'Grenoble les frênes', dans le quartier de la Villeneuve de Grenoble.

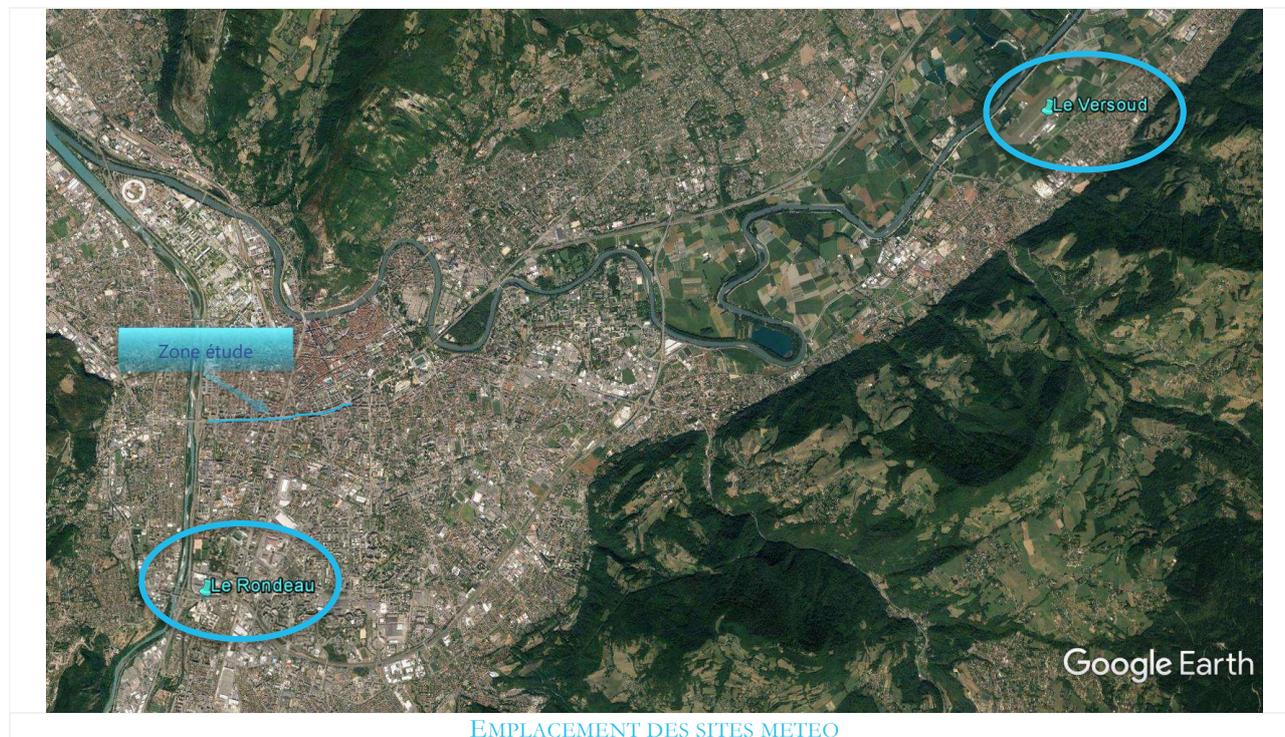


EMPLACEMENT DES SITES DE REFERENCES

A l'instar des mesures de qualité de l'air, les **conditions météorologiques durant la campagne de mesures** sont comparées à celles habituellement observées depuis 2015.

Les **stations météorologiques disponibles et représentatives** de l'agglomération grenobloise sont :

- 'Le Rondeau' : site de mesures de l'observatoire disposant de mesures météorologiques, au sud de l'agglomération.
- 'Le Versoud' : point de mesures Météo France à l'ouest dans la vallée du Grésivaudan.



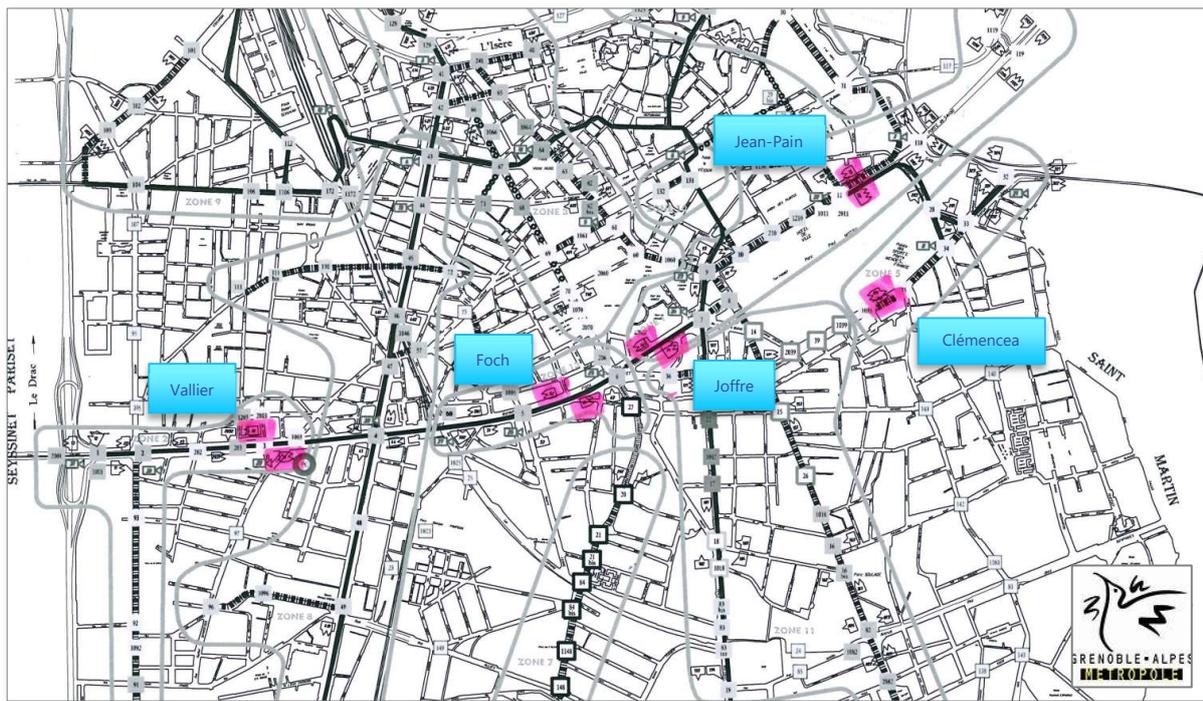
Historique des sites de références : 2015 à 2017

L'historique des données est étudié avec une profondeur de 2 ans afin de **vérifier la représentativité de la période hivernale 2016/17**.

Mesures de comptages de véhicules

Le dispositif d'étude a été complété avec des mesures de comptages de véhicules sur les grands boulevards mis à disposition par la Ville de Grenoble (cf. carte ci-après).

Ces données permettent d'enrichir l'exploitation des résultats en traçant plus finement l'influence du trafic automobile sur les 3 zones des grands boulevards de l'étude.



CARTE DES BOUCLES DE COMPTAGES VEHICULES DES GRANDS BD GRENOBLOIS

Les outils informatiques

En complément des outils habituellement mis en œuvre dans le cadre des exploitations des données de la qualité de l'air (bases de données et cartographies de modélisation), une exploitation statistique spécifique a été réalisée à l'aide du logiciel statistiques 'R'. Les résultats sont présentés ci-après.



3. Analyse des résultats

L'analyse des résultats vise à évaluer l'efficacité de l'effet séquestrant sur les particules du produit 'VAirPur' aux abords immédiats des grands boulevards. Elle a été réalisée à l'aide d'indicateurs quantifiables issus de mesures terrains, d'outils de modélisation ou de statistiques.

3.1. Analyse spatiale préliminaire

Les cartes de modélisation annuelle 2016 (cf. cartes ci-après) rendent compte des répartitions spatiales annuelles des polluants mesurés et permettent de mettre en évidence leurs spécificités :

- Le dioxyde d'azote (NO₂) a une grande variabilité spatiale avec de fortes concentrations au centre et aux abords immédiats des grands axes de circulation. Les concentrations diminuent ensuite assez rapidement pour atteindre le niveau de fond au-delà d'une certaine distance de part et d'autre de la chaussée (distance en général supérieure à 20-30 mètres).
- Les particules fines PM₁₀, contrairement au NO₂, présentent une variabilité spatiale plus faible. En effet, les émissions ou les origines des particules sont plus diversifiées et hétérogènes dans le temps (trafic automobile, source ponctuelle industrielle, chauffage : source majoritaire en hiver, activités agricoles, sources naturelles : sables, particules terrigènes ...).

Les spécificités de ces polluants impliquent donc, pour la mise en œuvre des mesures, de respecter des critères stricts d'implantations sur le terrain, notamment pour l'emplacement des moyens de mesures en proximité immédiate de la chaussée (à moins de 10 mètres).

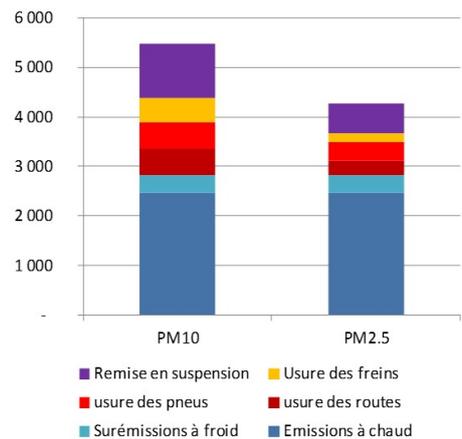
A noter également que l'exploitation et l'interprétation des résultats nécessite de connaître ou d'estimer :

- l'origine des sources des particules sur cette période de l'année (forte contribution du chauffage en comparaison du trafic automobile).

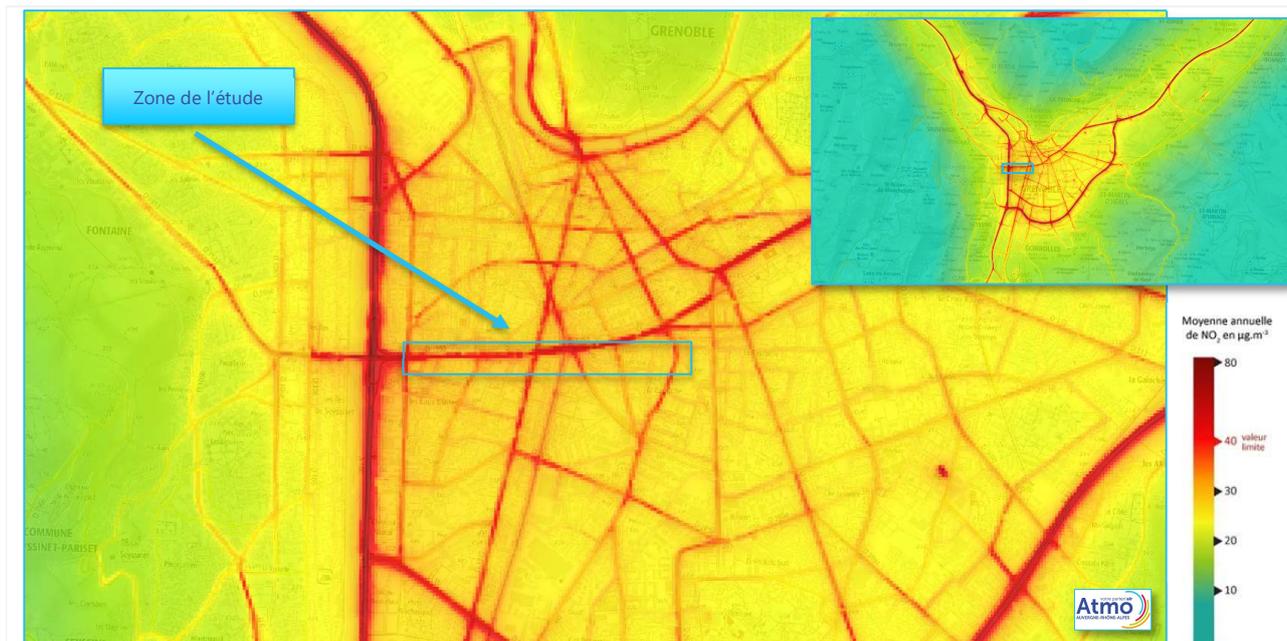
- la part des particules remises en suspension en bordure de chaussée en comparaison de la masse totale des particules (Cf. graphique ci-contre 'répartition des émissions routières').

L'objectif final étant d'évaluer l'effet séquestrant du traitement « VAirPur » en cohérence avec le dispositif métrologique mise en place via une méthodologie d'exploitation des données.

Répartition des émissions routières 2010 de PM₁₀ et PM_{2,5} en Rhône-Alpes



Cartes de modélisation fine échelle de l'agglomération grenobloise



CARTE DE MODELISATION 2016 DU NO₂ – MOYENNE ANNUELLE



CARTE DE MODELISATION 2016 DU PM₁₀ – MOYENNE ANNUELLE

L'exploitation des données dans la partie suivante présente l'analyse graphique de l'évolution temporelle des données horaires de particules, poursuivi par une analyse statistique de l'ensemble des données collectées.

3.2. Analyse temporelle des données

Objectif : vérifier par une analyse graphique une tendance ou un abattement des concentrations sur les zones traitées en comparaison des zones non traitées.

Les courbes d'évolutions des concentrations horaires des PM10 (cf. ci-après) montrent une forte variabilité des concentrations au cours de la journée et de la période d'étude. Les plus fortes concentrations sont observées pendant les mois de décembre et de janvier. Cette période correspond à un épisode de pollution d'une ampleur nationale et d'une durée remarquable avec des conditions météorologiques hivernales (cf. courbe 'Evolution de la météo – Le Versoud')

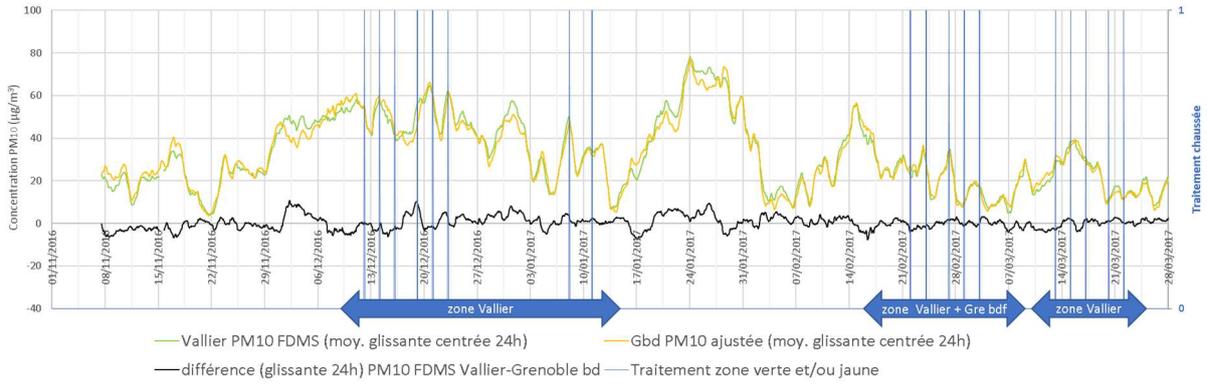
Le comportement des 3 sites semble très proche et similaire. La comparaison des graphes d'évolution des concentrations entre les zones extrêmes de l'étude 'Vallier vs Rivet' ou plus proche 'Vallier vs Grenoble boulevard' ne permettent pas de distinguer de période présentant un fort abattement des concentrations à la suite des différents traitements de la chaussée. Sur chacun des 2 graphiques, les courbes en noir (proches de zéro) représentent les écarts entre les mesures respectives et les traits verticaux en bleu indiquent les périodes avec traitements.

A ce stade, l'analyse graphique des résultats des PM10 ne permet donc pas de mettre en évidence un abattement des concentrations aux abords immédiats du trafic après l'application du produit sur la chaussée. Ce premier constat est assez conforme à la spécificité du polluant PM10 et aux cartes de modélisation précédentes : Les concentrations mesurées sur chacun des sites présente une forte homogénéité à l'échelle de l'agglomération.

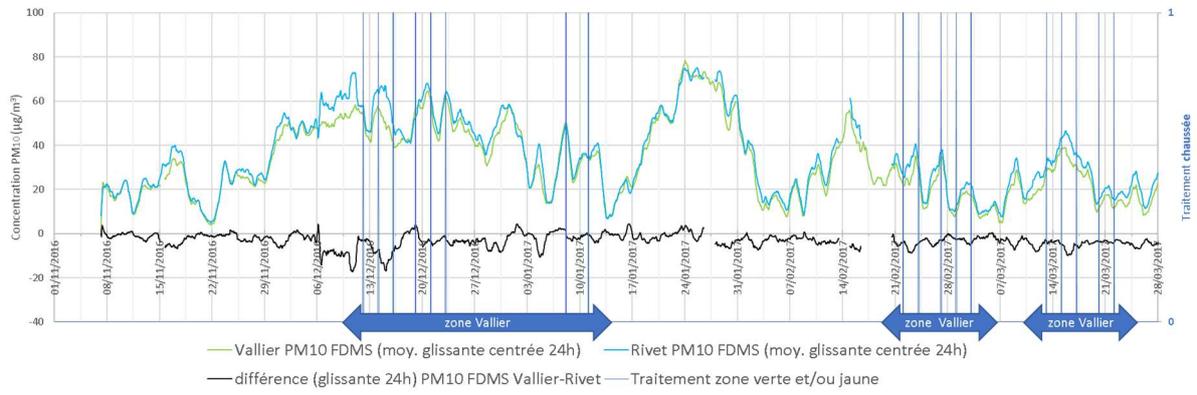
L'interprétation des données nécessite donc une analyse plus fine avec des traitements statistiques.

Evolution des particules fines PM10

Niveau de particules PM10 (moy. glissante 24H) - site 'Vallier' VS site 'Grenoble bd'



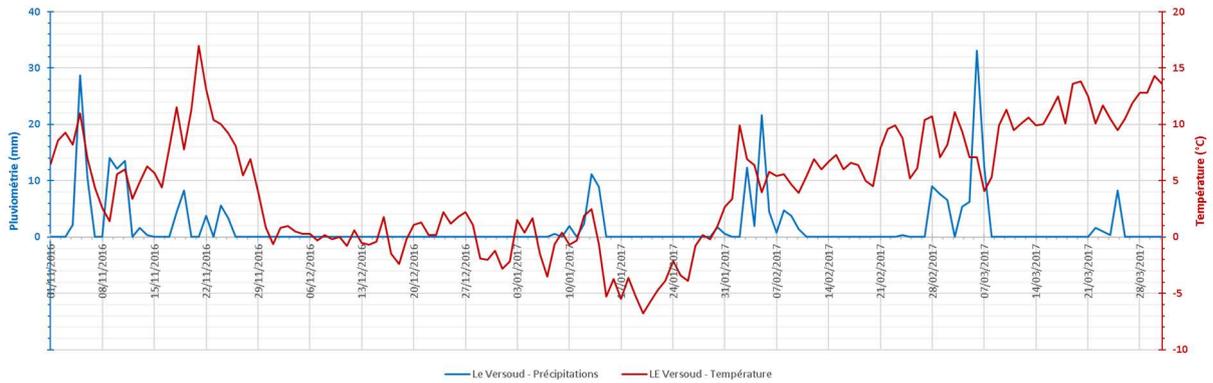
Niveaux de particules PM10 (moy. glissante 24H) site 'Vallier' VS 'Rivet'



EVOLUTION HORAIRE DES CONCENTRATIONS DES TROIS PM10 DE LA ZONE DE L'ETUDE

Evolution de la météo du site du Versoud

Météo - Le Versoud



EVOLUTION JOURNALIERE PLUVIOMETRIE ET TEMPERATURE – LE VERSOUD

3.3. Analyse statistique des données

Objectif : évaluer à l'aide d'une exploitation statistique des données un abattement des concentrations de PM₁₀ entre les périodes de traitement et de non traitement,

3.3.1. Historique des mesures

Objectif : **Vérifier s'il existe un lien statistique** entre les données mesurées durant l'étude (2016-17) et antérieures (2015-16) **susceptible de quantifier l'effet du produit séquestrant.**

Parmi les 3 stations de l'étude 2016-17, seule la station fixe de Grenoble boulevard était en place au cours de l'hiver 2015-16.

Les premières observations graphiques pourraient laisser croire que les 2 hivers sont globalement comparables au niveau métrologique pour les PM₁₀ ou météorologique pour la température et la pluviométrie. De plus, la baisse des teneurs enregistrées des PM₁₀ au cours du traitement de la chaussée en 2016-17 en comparaison de 2015-16, pourrait être à l'origine de l'effet séquestrant (période identifiée en gris ci-après 'Evolution journalière des PM₁₀ et de la météo').

Cependant, les traitements statistiques des données montrent que les séries sont significativement différentes sans homogénéité entre les 2 périodes. L'hiver 2015-16 est plus touché par la pollution en particules fines en comparaison de 2016-17. Concernant la météo, les épisodes pluvieux sont décalés entre les 2 hivers mais avec un cumul similaire et 2015-16 présente des températures partiellement plus douces.

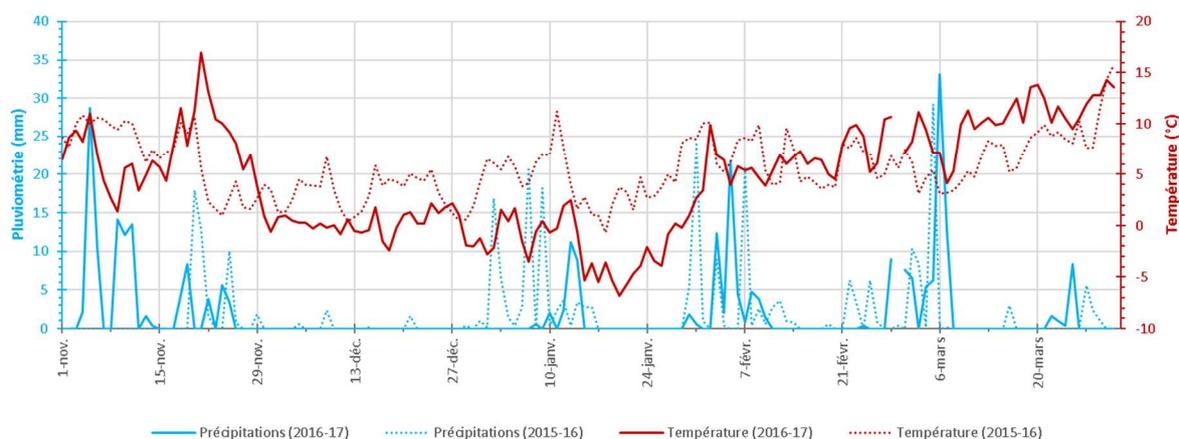
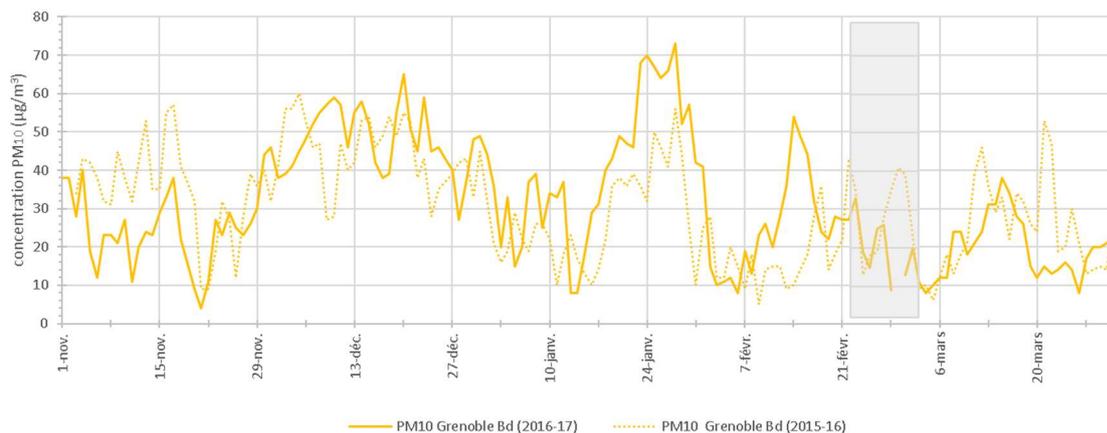
Ces observations sont corroborées par les tests statistiques des moyennes qui confirme le fait que les 2 hivers sont sensiblement différents (cf. tableau ci-après 'Comparaison des moyennes de 2015-16 et 2016-17').

Au vu de ces résultats, l'historique des mesures ne permet donc pas d'interpréter finement l'évolutions des concentrations des polluants de l'hiver 2016-17, car les 2 séries de données statistiques sont hétérogènes.

De ce fait, au cours de l'étude, seules les données de l'hiver 2016-17 seront utilisées pour évaluer l'efficacité du produit séquestrant.

L'analyse sera poursuivie par des tests sur la série de données de 2016-17 et débutera par un test d'influence.

Comparaisons des hivers 2015-16 et 2016-17



EVOLUTION JOURNALIERE DES PM10 ET DE LA METEO

Site	Mesure	Test
Rondeau	NO	1
	PM10	1
Boulevard	NO	2
	PM10	1
Frênes	NO	1
	PM10	0

Site	Mesure	Test
Rondeau	Vitesse Vent	2
	Direction Vent	1
	Température	1
Versoud	Vitesse Vent	2
	Direction Vent	1
	Température	1
	Pression	0
	Précipitation	0

Légende :

- 0 : moyenne similaire entre 2015-2016 et 2016-2017
- 1 : moyenne 2015-2016 significativement supérieur à 2016-2017
- 2 : moyenne 2015-2016 significativement inférieur à 2016-2017

COMPARAISON DES MOYENNES DE 2015-16 ET 2016-17

3.3.2. Tests statistiques 'ANOVA'

Objectif: L'analyse de la variance (ANOVA - Analyses of variance) est un test statistique utilisé pour comparer des moyennes d'échantillons. A partir d'un ensemble de variables explicatives constitué des données récoltées, il permet de démontrer leur influence sur la variable continue à expliquer. Cette analyse a pour but de **vérifier si les traitements de la chaussée peuvent être associés aux variations des concentrations de PM10.**

Les variables explicatives (prédictives) sont les données recueillies au cours de l'étude (hors PM10), à savoir :

- Les données météorologiques du Rondeau : vitesse et direction du vent, température ambiante.
- Les données météorologiques du Versoud : Pression ambiante, pluviométrie.
- Le planning des périodes de traitement et les durées d'efficacité théoriques du produit.
- Les comptages des véhicules sur les grands boulevards grenoblois.

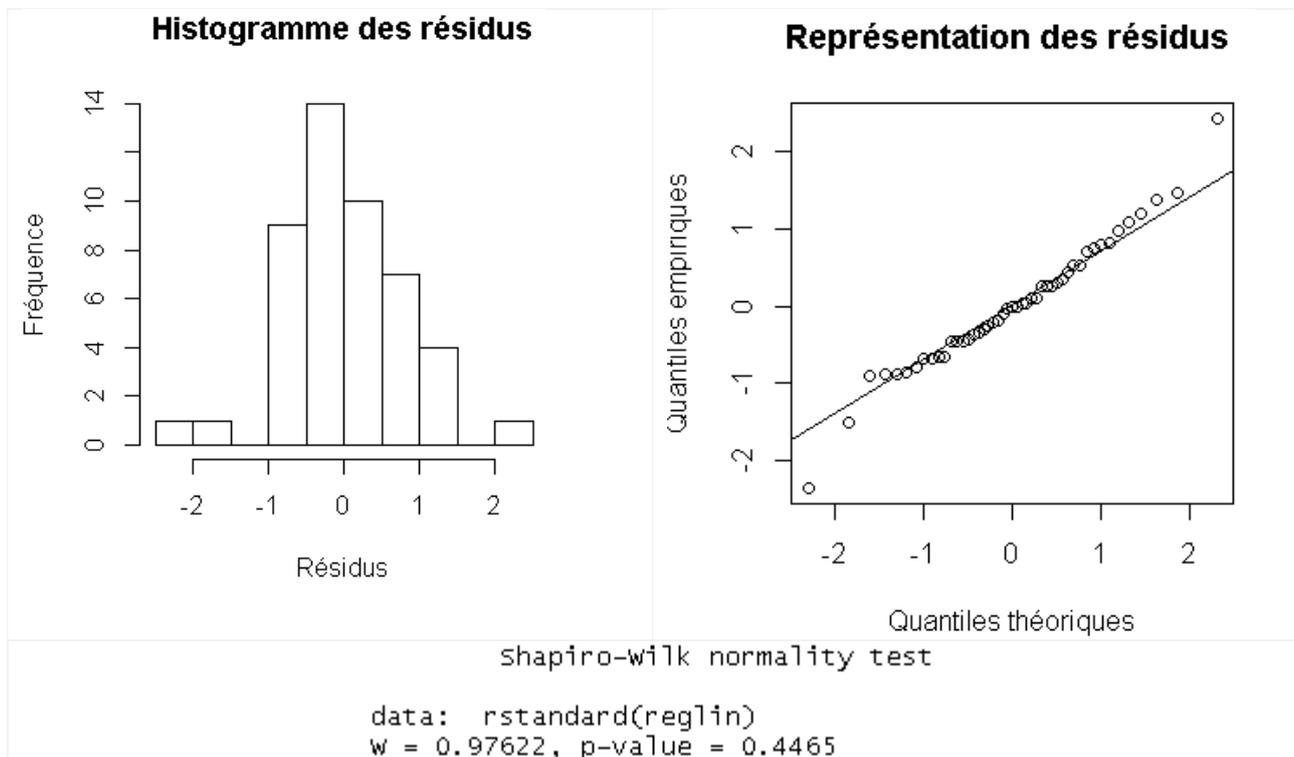
La variable continue à expliquer choisie est celle de la mesure de PM10 du site 'Vallier'. En effet, parmi les 2 sites traités, il est situé au centre de la zone ayant subie le plus grand nombre de traitement.

La période d'observation est la totalité de la durée de l'étude sans distinction du début à la fin.

Avant d'interpréter les résultats du test ANOVA, il est nécessaire de vérifier parmi les résultats du test les conditions suivantes :

- La quantité d'échantillon est-elle suffisante ? : oui, car les tailles de toutes les variables sont supérieures à 100.
- Les résidus suivent-ils une loi normale ? : oui, car le test Shapiro-Wilk est positif (p-value (0,4465) > alpha (5%) et les résidus suivent une loi normale (histogramme des résidus centré sur zéro).

Conditions du test ANOVA



HISTOGRAMME DES RESIDUS DU TEST NOVA ET TEST SHAPIRO-WILK

Les conditions de validité du test étant toutes remplies, la table 'ANOVA' est donc pertinente et exploitable.

L'extrait de la table (cf. ci-après) indique l'influence de chacune des variables explicatives sur la variable à expliquer 'PM10 – Vallier'. L'indicateur est représenté sous la forme d'étoile. Les variables les plus influentes sur la variable 'PM10 – Vallier' sont les variables météorologiques. A contrario, les variables 'traitement' ou 'comptage véhicules' présentent une influence très faible ou nulle.

Extrait de la table d'ANOVA

Analysis of Variance Table	
Response : Vallier - PM10	
	Influence
Le Rondeau - Vitesse du vent	***
Le Rondeau - Direction du vent	**
Rondeau Température	***
Le Versoud - Pression atmosphérique	***
Le Versoud - Précipitation	***
Indicateur traitement 'zone verte'	
Indicateur efficacité traitement ' zone Verte'	
Comptage véhicules 31	.
Comptage véhicules 32	
Rondeau Vitesse du vent /Rondeau Température	**
Residuals	

SYNTHESE DE LA TABLE ANOVA

Les résultats de ce test rejoignent donc les constats précédents de l'analyse graphique et les spécificités de ce polluant. En effet, les PM10 sont très hétérogènes dans le temps et présentent une forte dépendance aux conditions météorologiques influençant leurs dispersions et leurs concentrations. De plus au cours de l'étude, la part de la particule issue du trafic automobile est faible en comparaison de l'ensemble des autres sources.

Au vu de ces résultats, il est donc pertinent de **poursuivre l'analyse en réduisant la plage d'observation. Elles seront donc optimisées** aux périodes dont la contribution du trafic automobile est la plus importante.

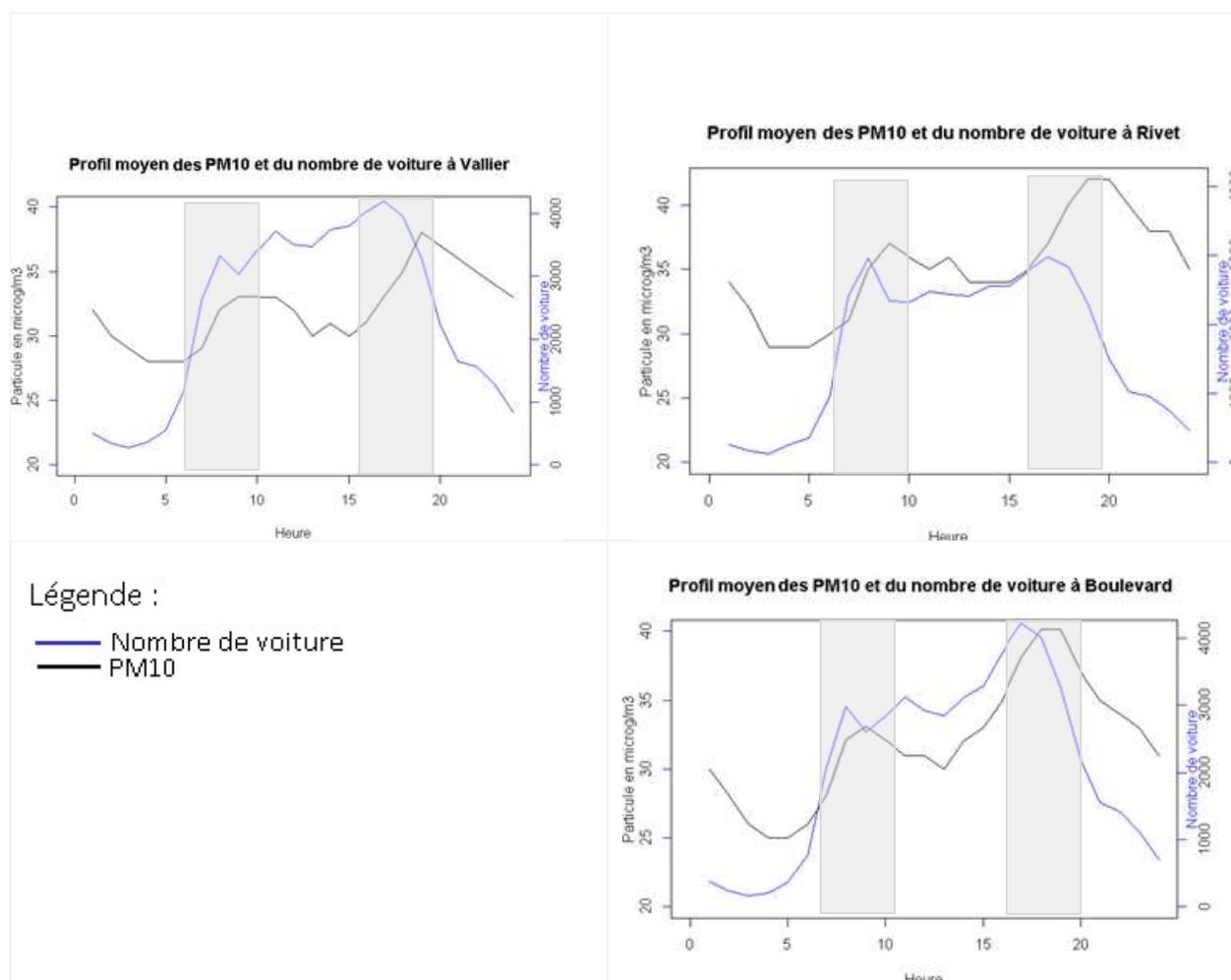
3.3.3. Optimisation de la plage d'observation

Objectif : Réduire la plage d'observation aux périodes de remise en suspension maximale des particules PM10 issue du trafic automobile.

Les **comparaisons des profils horaires moyens des PM10 et des comptages automobiles** montrent une évolution proche au cours de la journée :

- La 1^{ère} pointe de PM10 du matin est **assez bien corrélée** avec l'augmentation de la circulation, visible sur les 3 sites entre 6h et 10h.
- Concernant la 2^{ème} pointe, en fin de journée entre 16h et 20h, la corrélation **semble moins évidente** sur les 3 sites. En effet, elle est bien corrélée sur le site de 'Grenoble Boulevard' et légèrement décalé sur celui de 'Rivet' ou de 'Vallier'. Ces écarts sont liés aux **environnements immédiats des sites** qui ne sont pas rigoureusement identiques. En effet, concernant le site de 'Grenoble boulevard' **la hauteur des bâtiments** de part et d'autre du boulevard favorise l'accumulation des polluants. De plus **la proximité des feux de circulation et la pente du boulevard** augmentent les émissions du trafic automobile (valeurs pointes de PM10 et de NO les plus élevées). A contrario le site 'Vallier' est placé dans un environnement bénéficiant d'une **meilleure ventilation et d'une circulation plus fluide**. Il présente ainsi des valeurs pointes plus faibles. L'environnement du site 'Rivet' est intermédiaire. Il présente une meilleure ventilation en comparaison de 'Grenoble Boulevard'. Toutefois il est influencé par **l'apport supplémentaire du trafic automobile** lié à la proximité de la bifurcation avec l'avenue 1^{er} de Belgique. De ces faits, les valeurs pointes sont supérieures à celles de 'Vallier' et inférieures à celles de 'Grenoble Boulevard'.

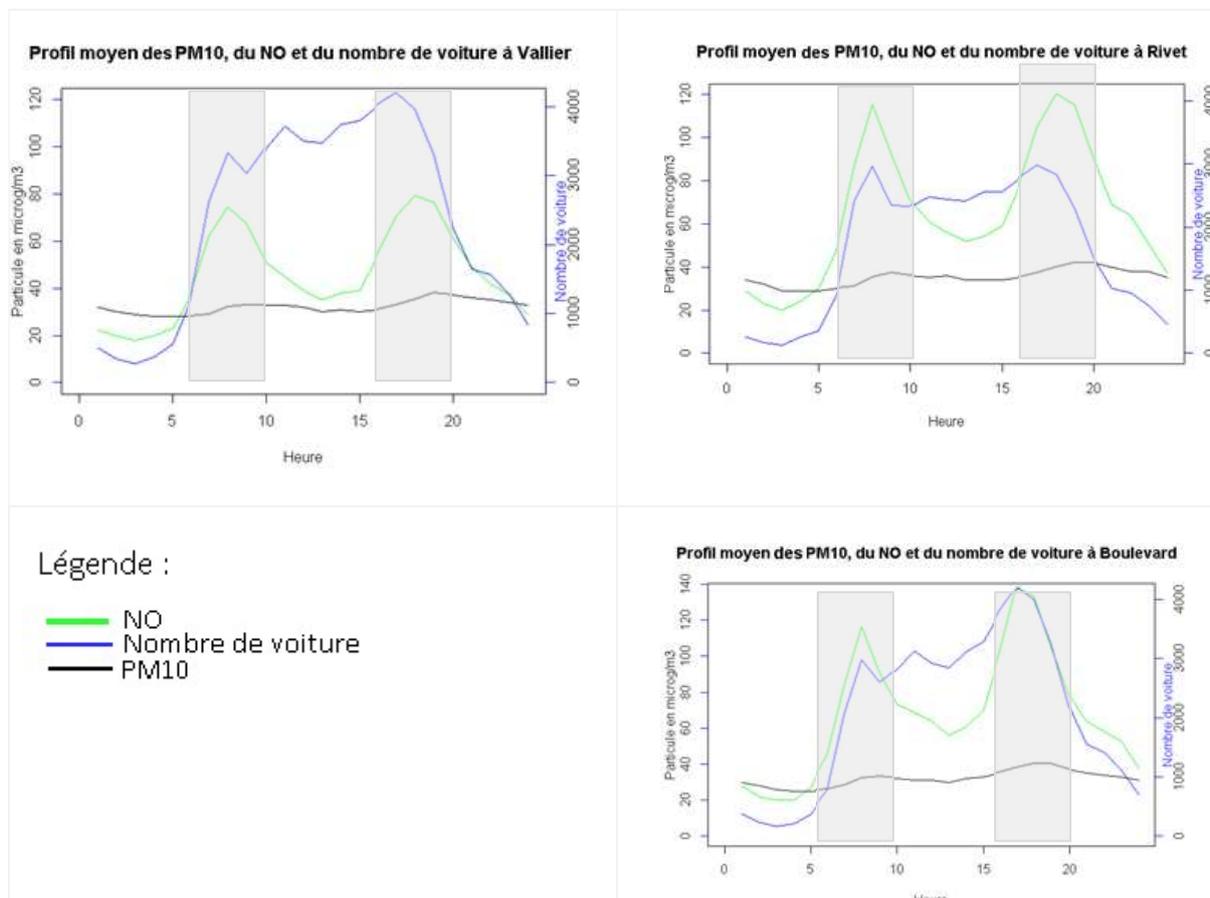
Profils moyens des PM10 vs comptage de véhicules



Au vu de ces constats, le site de Grenoble Boulevard présente donc la plus forte influence du trafic à cause de sa proximité immédiate. A contrario, les sites de 'Vallier' et de 'Rivet' semblent davantage touchés par une influence du chauffage proche de la moyenne de l'agglomération. **Cette particularité permet d'expliquer sur ces 2 sites le léger décalage de la pointe du soir.**

De plus, le choix de la plage d'observation est confirmé par le traceur du trafic automobile. En effet, les pointes du matin et du soir de NO sont parfaitement centrées sur les plages de 6h-10h et 16h-20h.

Profils moyens des PM10 vs comptage 'véhicules & NO'



A noter que la diminution des teneurs de PM10 en cours de journée est influencée par les conditions de dispersion liés à la météo (comme souligner précédemment par le test 'ANOVA'). Et concernant le NO, la diminution est fortement liée à sa transformation photochimique sous l'effet du rayonnement solaire et dans une moindre mesure à la fluctuation du flux de circulation.

En conclusion, l'analyse des profils moyens permet d'affiner la plage d'observation horaire en la réduisant aux périodes dont l'influence de la part trafic est la plus forte (remise en suspension de la particule automobile maximale). Cependant, lors des plus forts épisodes de pollution hivernaux, la part trafic de la particule peut diminuer jusqu'à 20% au détriment de la part chauffage pouvant parfois atteindre 80%.

Ainsi, pour le test statistique suivant 'corrélation', seules les données sur les plages de 4 heures de 6h-10h et de 16h-20h seront prises en compte (hors week-end).

3.3.4. Tests complémentaires

Objectif: Réaliser des tests complémentaires de corrélation pour **identifier finement l'efficacité** du produit séquestrant. Voir si l'abattement des concentrations de PM10 peut être quantifié à l'aide des variations du NO traceur du flux automobile.

Le test de corrélation est par conséquent construit avec l'association des données d'entrées selon plusieurs périodes de mesures différenciées par les plages d'horaires optimisées.

Les données d'entrée sont les mesures des 'PM10' (indicateur de l'efficacité de l'effet séquestrant des particules) et de 'NO' (indicateur des variations flux automobile). Elles permettent de **quantifier l'efficacité de l'effet séquestrant**. En effet, il se traduirait par une baisse relative du PM10 non observée sur le NO. A contrario, l'absence d'efficacité se traduirait par une évolution identique des concentrations des 'PM10' et du 'NO'.

La période des mesures de l'étude est divisée en 4 périodes distinctes : 2 périodes de traitement avec le produit séquestrant et 2 périodes sans traitement. De plus, les observations sont faites **pendant les plages horaires optimisées** de 6h à 10h et 16h à 20h (en semaine et hors week-end). Le site traité choisi est 'Rivet'.

Les tableaux des coefficients de corrélation de Pearson suivants **confirment la très bonne corrélation** entre les mesures des sites de l'étude en comparaison des autres mesures de référence (réf sup à 0.8). Les évolutions entre les mesures de NO ou de PM10 de l'étude sont donc très semblables car soumissent à des environnements et à un flux automobile semblables.

En conséquence, les fortes valeurs des coefficients de corrélation des PM10 **ne permettent pas de mettre en évidence l'efficacité** de l'effet séquestrant car ils sont presque identiques (cf. tableau ci-dessous).

Tableau des coefficients de corrélation entre les stations

	Rondeau	Boulevard	Frênes	Vallier	Rivet	Caserne
Rondeau	1,000	0,924	0,882	0,910	0,920	0,908
Boulevard		1,000	0,884	0,954	0,959	0,923
Frênes			1,000	0,887	0,915	0,944
Vallier				1,000	0,951	0,937
Rivet					1,000	0,965
Caserne						1,000

TABLEAU POUR NO

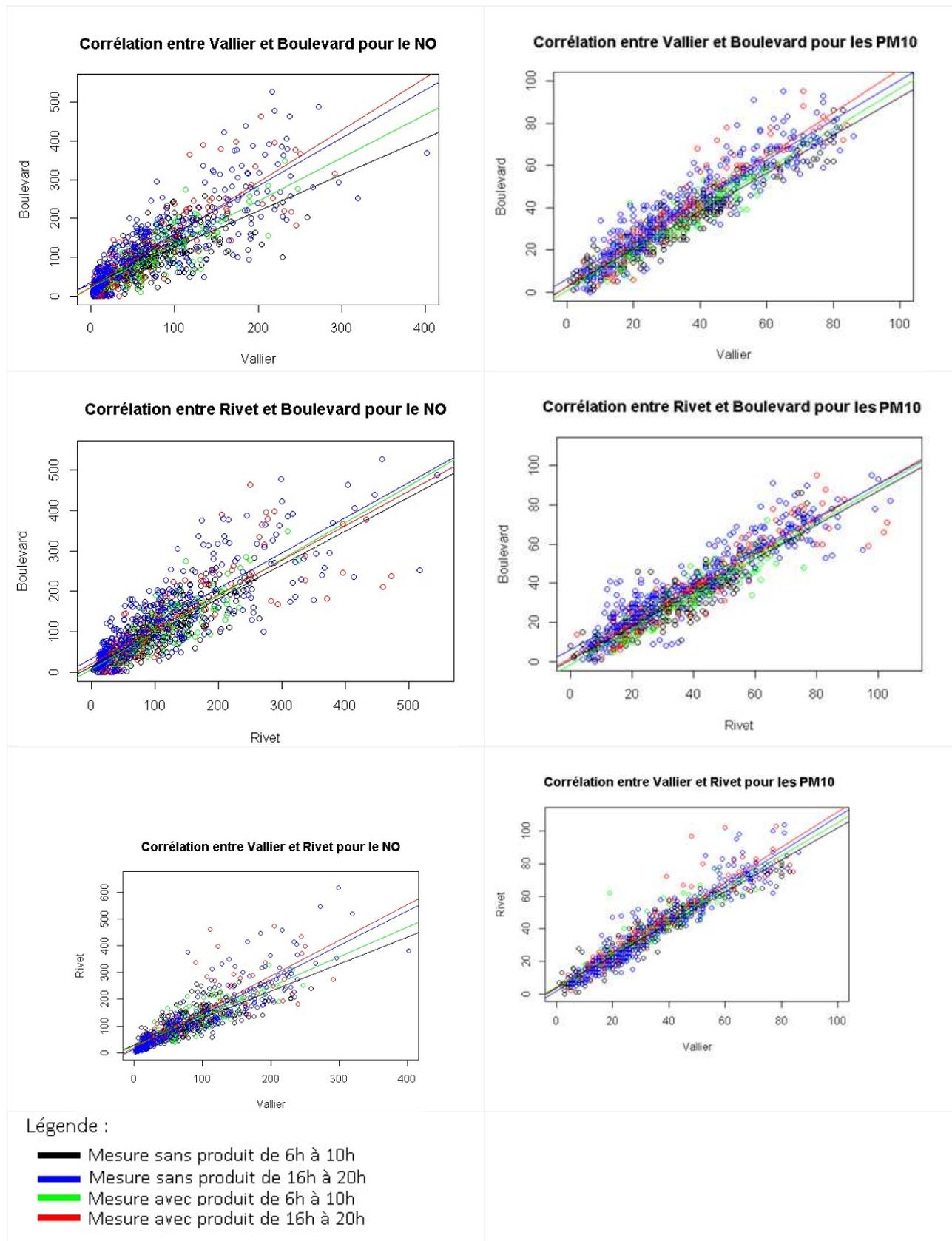
	Rondeau	Boulevard	Frênes	Vallier	Rivet	Caserne
Rondeau	1,000	0,941	0,946	0,959	0,948	0,930
Boulevard		1,000	0,966	0,984	0,983	0,956
Frênes			1,000	0,988	0,970	0,964
Vallier				1,000	0,985	0,969
Rivet					1,000	0,966
Caserne						1,000

TABLEAU POUR LE PM10

En complément de l'analyse de corrélation les lignes de régression linéaire confirment le résultat de ce test. Toutes les tendances de corrélation NO vs PM10 entre les sites sont identiques excluant tout constat d'abattement des concentrations de PM10 sur le site 'Rivet' ou pas de manière significative.

En effet, le rapport entre les valeurs des pentes des lignes de régression linéaire est identique pour chacune des comparaisons entre les sites NO vs PM10 (cf. graphique ci-après).

Graphique de corrélation entre les 3 sites de l'étude



3.3.5. Reconstitution de données à partir d'une modélisation statistique

*Objectif : Générer des **séries de données 'virtuelles'** avec un test de modélisation statistique dans l'objectif de les comparer aux séries 'terrain'. Se servir de **l'écart entre les séries 'virtuelle sans traitement' vs 'terrain avec traitement'** comme **indicateur de l'efficacité de l'effet séquestrant**.*

Les séries de données 'virtuelle' et 'terrain' sont construites avec les données d'entrées des mesures PM10 de 'Grenoble Boulevard' et de 'Vallier'. Les séries de données de sortie modélisées concerneront le site de mesure de 'Vallier'.

La modélisation des données est réalisée à l'aide d'une fonction affine du type $y = ax + b$. La variable 'y' est la donnée de sortie modélisée de la mesure 'virtuelle' PM10 de 'Vallier'. La variable 'X' est la donnée d'entrée de la mesure 'terrain' PM10 de 'Grenoble Boulevard'. Les données d'entrées sont sélectionnées durant les périodes sans traitement de la chaussée, afin de réaliser le comparatif entre les données 'virtuelles' sans traitement et 'terrains' avec ou sans.

De plus, afin d'établir **une série de données comparative sur un site témoin non traité**, les données de modélisation 'Rivet' sont générées selon la même méthodologie.

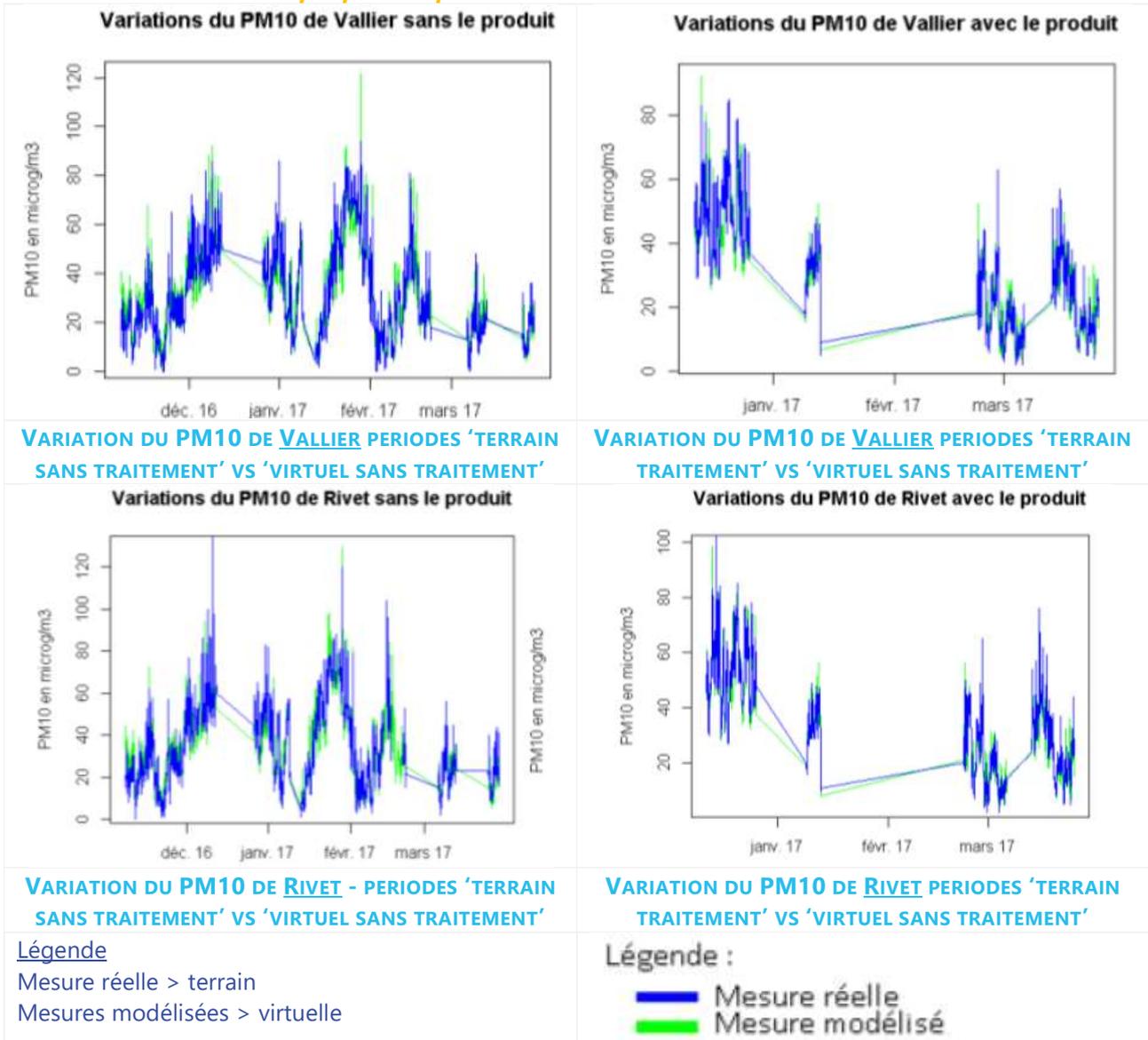
Les 2 séries de données 'Vallier et 'Rivet' du **'terrain vs virtuelle' sont présentées ci-après**. Les périodes 'avec traitement' ont été **volontairement retirées sur les graphiques** 'sans traitement' et inversement pour les périodes 'sans traitement' (ligne continue). Le graphique en haut à gauche montre les courbes des données 'terrains sans traitement' vs données 'virtuelles sans traitement' pour 'Vallier'. Le graphique en haut à droite montre la comparaison entre les données 'terrains avec traitement' vs données 'virtuelles sans traitement' pour 'Vallier'. Idem en dessous pour 'Rivet'.

L'évolution des courbes de données 'modélisées vs terrain' de la mesure PM10 du site de 'Vallier' est semblable dans les deux cas traités. Par conséquent, l'analyse graphique des évolutions horaires des séries de données, **ne semble donc pas montrer d'écart significatif entre les séries de données**. Le constat est identique pour la modélisation de 'Rivet' démontrant la justesse de la modélisation.

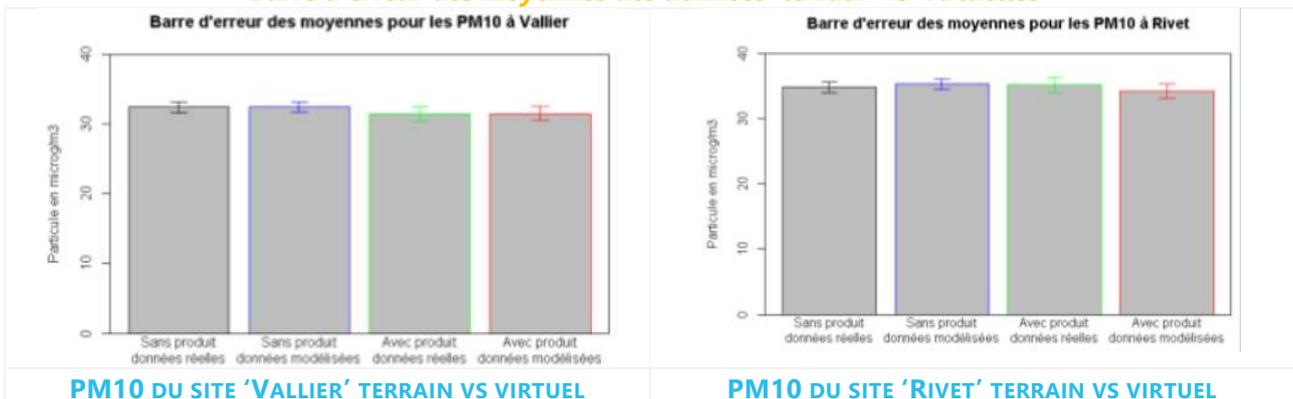
Plus finement, la confrontation des moyennes virtuelles 'non traité' aux moyennes terrain 'traité' ou 'non traité' conduit aux mêmes constats. Pour 'Vallier', les moyennes sont dans les 2 cas très proches. Concernant le site témoin 'Rivet', le constat est identique et confirme la justesse du modèle. Les moyennes restent proches malgré un léger écart lié probablement à l'environnement du site 'Rivet' (bifurcation bd avenue 1^{er} de Belgique). Cependant, les résultats restent compris entre les barres d'erreur. Les résultats sont donc pour les 2 sites fiables.

Comme précédemment, **ce dernier test ne met pas en évidence un abattement significatif** des concentrations suites aux traitements de la chaussée permettant de quantifier l'efficacité du produit séquestrant.

Graphiques temporels des données 'terrain' vs 'virtuelle'



Barre d'erreur des moyennes des données 'terrain' vs 'virtuelles'



4. Conclusions

Durant l'hiver 2015-16 **une étude d'innovation technologique** s'est déroulée sur les grands boulevards grenoblois. Elle était inscrite dans l'appel à projet national « Villes respirables en 5 ans » lancé par le ministère chargé de l'écologie en 2015. L'objectif était d'évaluer in situ un traitement expérimental à effet séquestrant de particules.

Le dispositif d'étude déployé avait associé :

- La métrologie avec des mesures de qualité de l'air suivie par ATMO Auvergne-Rhône-Alpes,
- La technique expérimentale de traitement de la chaussée assurés par la collaboration précieuse de la Société Serlvert, la Metro et la Ville de Grenoble.

Le dispositif a fourni des données permettant d'évaluer de manière rigoureuse l'effet sur la qualité de l'air du traitement expérimental. De plus, les résultats sont transposables sur tout autre aménagement routier comparable.

L'évaluation de l'effet séquestrant, vis-à-vis de la qualité de l'air, a été **réalisée conformément à la méthodologie initiale** avec quelques écarts non significatifs. En effet, les aléas « terrain » ont conduit à un léger recalage du calendrier de traitement initial de la chaussée. Toutefois la quantité des cycles « traitement » et « non traitement » a pu être préservée afin de garantir la représentativité du test. Concernant les contraintes métrologiques d'implantation des moyens mobiles, elles ont été résolues grâce à la bienveillance de la Métro et de la Ville de Grenoble

L'étude a été réalisée au cours d'une période hivernale présentant les plus fortes concentrations de particules issues du trafic routier ou d'épisodes de pollutions.

L'exploitation des données recueillis a permis de mettre en évidence la présence ou l'absence des corrélations entre les variations des concentrations de particules dans l'air et plusieurs variables.

Les variations des conditions météorologiques ont présenté les plus fortes influences. A contrario, les traitements de la chaussée ont présenté une influence très faible ou nulle.

Ainsi, l'influence de l'effet séquestrant du produit 'séquestrant' n'a pas été mise en évidence ou a été trop faible pour être détectée par le dispositif métrologique mis en œuvre. L'effet attendu sur l'amélioration de la qualité de l'air n'a donc pas été constaté au cours de l'étude.

Cependant, il est à noter que la part de particule remise en suspension en proximité du trafic est très faible (3 à 5% de la totalité des émissions à l'échelle de l'agglomération grenobloise).

Par conséquent, de par la faible quantité de particules remises en suspension en proximité trafic, **la « dépollution » de l'air par un produit à effet 'séquestrant' nécessiterait une efficacité exceptionnelle pour améliorer sensiblement la qualité de l'air en milieu urbain.**

Enfin, la considération des aspects environnementaux et de santé publique semble primordiale dans la mise en œuvre du traitement de la chaussée. Cependant, elle n'a pas été prise en compte dans ce rapport ATMO car elle ne faisait pas parti de la présente l'étude.