



Analyse comportementale des particules en suspension dans l'air en région Centre-Val de Loire : origines et caractérisation chimique

Action B-4
du PRSQA 2017-2021
Novembre 2017

Lig'Air

Surveillance de la qualité de l'air
en région Centre-Val de Loire

GLOSSAIRE

Abréviations :

Brgs : Bourges
Chtx : Châteauroux
Dir vent : Direction du vent
DOM : Département d'outre-mer
E : Est
N : Nord
NE : Nord-Est
NO : Nord-Ouest
O : Ouest
S : Sud
SE : Sud-Est
SO : Sud-Ouest
Tempe/T : Température
Vierz : Vierzon
Vit vent : Vitesse du vent

Acronymes :

AASQA : Association Agréée de la Surveillance de la Qualité de l'Air
CE : Commission Européenne
LAURE : Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
PRSQA : Programme Régional de Surveillance de la Qualité de l'Air

Particules :

COV : Composés Organiques Volatils
PM₁₀ : Particules de taille inférieure à 10 µm
PM_{2,5} : Particules de taille inférieure à 2,5 µm
TSP : Particules Totales en Suspension
Ca/Ca²⁺ : Calcium/Ion Calcium
Cl/Cl⁻ : Chlore/Ion Chlore
EC : Carbone Élémentaire
H₂SO₄/ SO₄²⁻ : Acide Sulfurique/Ion Sulfate
HAP : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
Mg/Mg²⁺ : Magnésium/Ion Magnésium
Na/Na⁺ : Sodium/Ion Sodium
NH₃/NH₄⁺ : Ammoniac/Ion Ammonium
NO₃ - : Ion nitrate
NO_x : Oxydes d'azote
nssSO₄²⁻ : Sulfate non marin (non sea salt sulfate)
OM : Matière Organique
PC : Poussières Crustales
SEA SALT : Sels marins
SO₂ : Dioxyde de Soufre
TEOM : Microbalance à Élément Conique Oscillant

Unités :

°C : Degré Celsius
µg/m³ : Microgramme par mètre cube
hPa : Hectopascal
Km/h : Kilomètre par heure
m/s : Mètre par seconde
mm/h : Millimètre par heure
ng/m³ : Nanogramme par mètre cube

TABLE DES MATIÈRES

GLOSSAIRE	2
TABLE DES MATIÈRES	3
Introduction.....	4
I. Prérequis: les particules en suspension.....	5
A. Définitions	5
B. Formation, comportement et classification	5
C. Sources et compositions des particules	6
D. Persistance des particules dans l'atmosphère et épisodes de pollution	8
E. Seuils réglementaires	9
F. Instrumentations	10
II. Comportement des PM₁₀	11
A. Influence des paramètres météorologiques sur la teneur en particules	11
B. Etude comportementale des particules en suspension PM ₁₀ en fonction des seuils réglementaires	16
a) Comportement des particules selon la moyenne annuelle	16
b) Comportement des particules selon le nombre de jours de dépassement	17
c) Comportement des particules selon la moyenne journalière	18
d) Corrélation entre les villes de la région	20
III. Composition et origines des particules	21
A. Composition moyenne annuelle des particules	21
B. Saisonnalité	23
C. Influence de l'origine globale des masses d'air	24
D. Composition chimique pendant les épisodes de pollution	25
Conclusion.....	28
BIBLIOGRAPHIE.....	30
ANNEXES	31
ANNEXE 1 : Appareil de mesure DIGITEL DA-80.	31
ANNEXE 2 : Concentrations en µg/m ³ (unité 50) en fonction des températures en °Celsius (unité 10)	32
ANNEXE 3 : Concentrations en µg/m ³ (unité 50) en fonction de la pression en hPa (unité 10)	32
ANNEXE 4 : Concentrations en µg/m ³ (unité 50) en fonction de la vitesse du vent en m/s (unité 5)	33
ANNEXE 5 : Répartition de la pollution régionale selon les villes de la région	33
ANNEXE 6 : Moyennes journalières des concentrations en PM ₁₀ supérieures à 50 µg/m ³	34
ANNEXE 7 : Exemple de données sur la composition des particules	34
ANNEXE 8 : Prédominance des composés selon la température	35
ANNEXE 9 : Origines du Sodium et du Magnésium, deux des trois sels marins	35

Introduction

Il est désormais connu que certaines molécules et particules contenues dans l'atmosphère ont un fort impact sanitaire (1) (2). En France, environ 48000 morts prématurées sont attribuées aux particules par an (3). La pollution particulaire a été classée cancérigène (groupe 1) pour l'homme par l'OMS.

En 1996 a été mise en place la Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (LAURE) qui vise à mener des actions contre la pollution atmosphérique (4). En Europe, les directives européennes 2008/50/CE (5) et 2004/107/CE (6) imposent la surveillance de 12 polluants atmosphériques, dont les particules en suspension. Ces surveillances se traduisent par la mise en place de valeurs réglementaires avec l'existence de valeurs limites relatives à l'exposition chronique de la population. Si celles-ci ne sont pas respectées, des procédures sont engagées par la Commission Européenne devant la Cour de Justice, ce qui a été le cas pour la France en 2011. Le Ministère de l'Ecologie confie la mission de surveillance de la qualité de l'air et d'information du public à des Associations Agréées de la Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) dont Lig'Air fait partie, en leur délivrant un agrément.

Tous les ans, la région Centre-Val de Loire est touchée par des épisodes de pollution aux particules en suspension en PM_{10} d'intensité et de durée variables. Ainsi, la population est fortement exposée au cours de ces situations. Il apparaît donc indispensable de mener des études pour comprendre le comportement de ces polluants à la fois localement mais également à l'échelle régionale. La détermination de la composition chimique permettra notamment d'estimer la contribution des principales sources d'émissions (internes ou externes à la région) afin d'orienter les décideurs à mener des actions pour réduire la concentration de ces polluants dans l'atmosphère et par conséquent l'exposition de la population. L'inventaire des émissions réalisé par Lig'Air de toutes les particules en suspension (TSP) de l'année 2010 dans la région a estimé les émissions à 37 201 tonnes, dont 17 219 et 11 279 tonnes respectivement dues aux fractions PM_{10} et $PM_{2,5}$.

L'étude suivante s'inscrit pleinement dans cette thématique et a pour but de mener une réflexion sur la caractérisation chimique des particules en suspension ainsi que leurs origines, pour comprendre leur comportement lorsqu'il y a ou non des épisodes de pollution, ainsi que d'étudier les différences qu'il peut exister entre les villes de la région. L'objectif est aussi de quantifier les PM_{10} spécifiques à la région Centre-Val de Loire, d'identifier les sources des épisodes de pollution à partir de l'évaluation de la composition chimique des particules.

Cette étude permet de répondre à une des actions du programme de surveillance de la qualité de l'air 2017-2021 sur la région Centre-Val de Loire : l'action B-4, « Participer aux programmes nationaux sur l'évaluation de la pollution à longue distance et sur la caractérisation chimique des particules ».

Ce rapport est issu du travail réalisé en partie par Clément POMMIER en 2016 dans le cadre de son mémoire effectué en vue de l'obtention du Master Mention Chimie des Molécules Bioactives 1ère année, spécialité Stratégie et Qualité en Chimie Analytique.

I. Prérequis: les particules en suspension

A. Définitions

Le terme particule est une expression générique qui désigne un mélange de polluants solides et/ou liquides en suspension dans un milieu gazeux (7). Les particules sont aussi appelées aérosols, notion incluant les particules et le gaz dans lequel elles se trouvent en suspension. On appelle poussières, les particules solides de dimensions et de provenances diverses pouvant rester un certain temps en suspension dans un gaz. Ce terme désigne en général les plus grosses d'entre elles (7).

B. Formation, comportement et classification

Il y a deux types de mécanismes de formation des aérosols : les processus physiques/mécaniques ($> 1 \mu\text{m}$) et les processus chimiques ($< 1 \mu\text{m}$). Parmi les processus chimiques, on a la nucléation, qui grâce à la condensation de vapeurs chaudes va former des particules ultrafines primaires (diamètre inférieur à $0,1 \mu\text{m}$) au cours de procédés de combustion à température élevée ou par nucléation homogène (7).

Le processus physique correspond à la sédimentation, qui contient des particules de tailles supérieures à $2 \mu\text{m}$, formées par des procédés mécaniques d'érosion, d'arrachements et d'abrasions liés aux phénomènes éoliens, de combustion ou de frottement (8). La nature des composés chimiques issus de ces processus est liée à la composition des substrats depuis lesquels les composés sont émis. L'autre processus physique est l'accumulation qui contient des particules entre $0,1$ et $2 \mu\text{m}$ de diamètre résultant de la coagulation de particules du mode nucléation (figure 1), les procédés d'élimination sont moins efficaces dans cette gamme de tailles (7). Les dépôts secs (action de la gravité) et humides (lessivage par les précipitations) sont les principaux processus par lesquels ces particules sont éliminées de l'atmosphère (9) et pouvant influencer les concentrations mesurées à la surface.

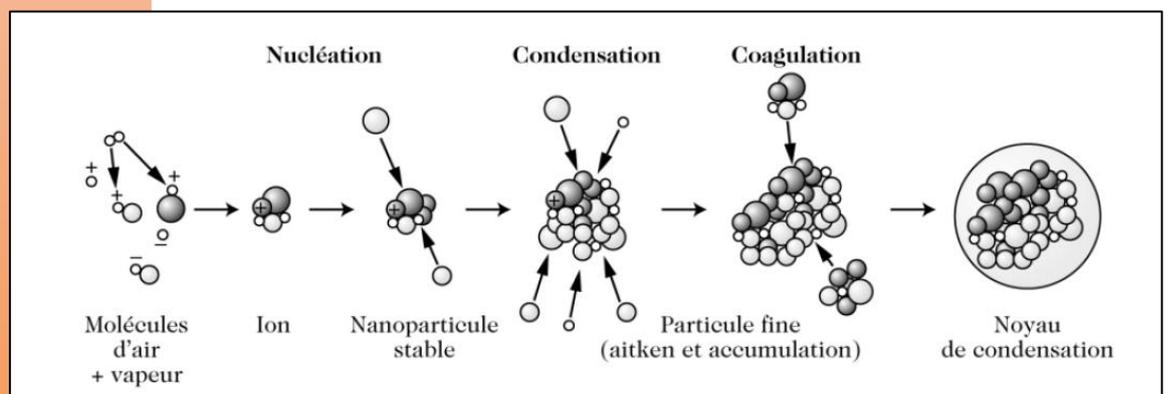


Figure 1 : Mécanismes de formation des aérosols (10)

Le diamètre des particules varie entre cent et quelques micromètres. Au-dessus de cette valeur, les particules ne sont plus maintenues en suspension à cause de leur faible résistance à l'air et chutent en

fonction de leur densité. Pour comprendre le comportement d'une particule, il faut connaître quelques caractéristiques mécaniques et physiques : la vitesse de chute sous l'effet de la gravité (vitesse de sédimentation), l'agitation thermique, la filtration/coagulation des particules entre elles.

L'agitation thermique est le mouvement irrégulier des particules qui résulte du bombardement par les atomes et les molécules de gaz, ce mouvement est beaucoup plus important pour des particules de petites tailles que pour des particules avec une taille plus importante (7). La coagulation est le processus d'adhésion des particules entre elles, elle résulte du mouvement de l'air qui amène des particules à entrer en collision, ce qui fait diminuer le nombre de particules dans l'aérosol et fait grossir les particules (7). Les particules les plus fines ne persistent pas dans les aérosols s'il n'y a pas une production continue, et la durée de vie est d'autant plus courte que la concentration est élevée (9).

En terme général, on parle de PM («Particulate Matter») pour les particules. On les distingue selon leur taille et chacune peut avoir un impact plus ou moins élevé sur la santé :

- PM_{10} : les particules en suspension dans l'air d'un diamètre inférieur à 10 μm atteignent uniquement les parties supérieures du système respiratoire.
- $PM_{2,5}$: les particules dont le diamètre est inférieur à 2,5 μm appelées particules fines qui représentent 70% des PM_{10} .
- PM_1 : les particules dont le diamètre est inférieur à 1 μm appelées particules très fines.

Les particules les plus fines (< 2,5 μm) sont les plus dangereuses. Capables de pénétrer au plus profond de l'appareil respiratoire, elles atteignent les voies aériennes terminales, se déposent par sédimentation ou pénètrent dans le système sanguin (9). Cependant, il faut ajouter que seules les particules inférieures à 10 μm peuvent pénétrer dans les bronches car elles ne sont pas bloquées par les voies aériennes que sont le nez et la bouche (7). Ces particules présentent une toxicité liée à leur petite taille, indépendante de la toxicité chimique de la molécule. Les particules comprises entre 2,5 et 10 μm sont plus d'origine naturelle, leur formation étant due à des procédés mécaniques comme l'érosion éolienne, alors qu'en dessous de 2,5 μm , les particules sont plus d'origine anthropique (provenant des activités humaines) via des mécanismes chimiques (7).

C. Sources et compositions des particules

Les particules proviennent de diverses sources que l'on peut classer en deux catégories principales : les sources naturelles et les sources anthropiques (figure 2).

- Les sources naturelles sont le volcanisme, l'érosion éolienne, les feux de forêts, la végétation et les océans.

- Les sources anthropiques sont le chauffage au bois, la combustion de biomasse, la combustion de combustibles fossiles dans les véhicules, le secteur industriel et les engrais agricoles. Les sources anthropiques sont catégorisées en 7 secteurs d'émissions que sont les secteurs résidentiel, tertiaire, les transports routiers, le secteur agricole, les autres transports (fluvial, ferroviaire), les industries et l'extraction/transformation de l'énergie.

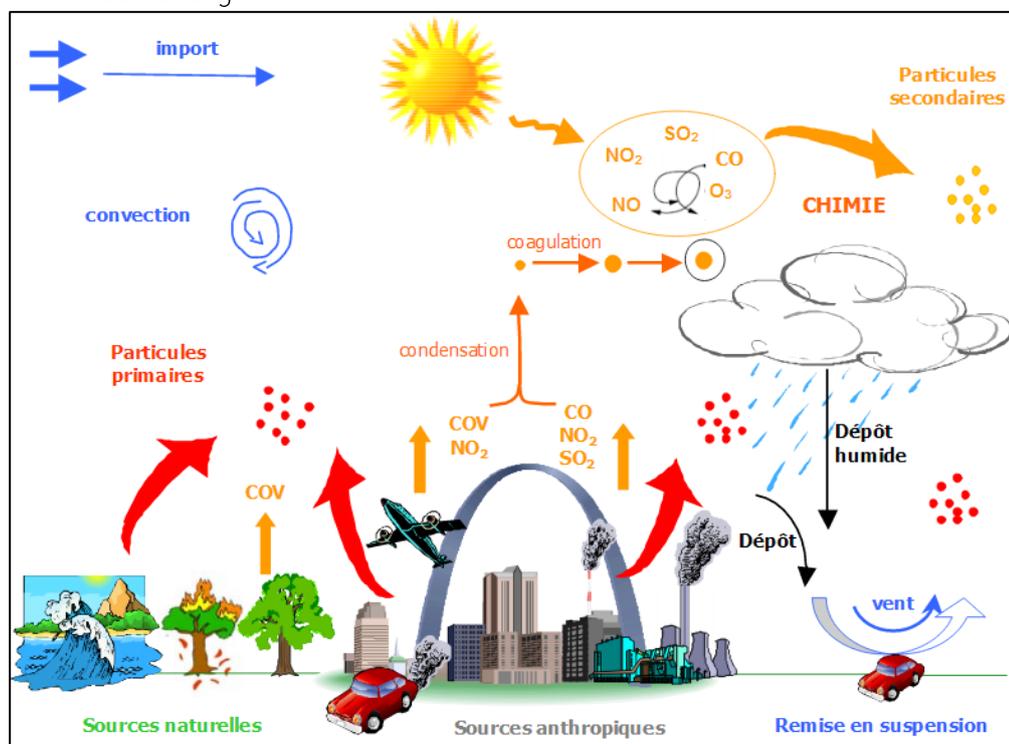


Figure 2 : Sources et classes d'émissions des particules (8)

Les particules peuvent être séparées en 3 classes d'émissions : primaire, secondaire et remise en suspension. Les particules primaires sont émises directement dans l'atmosphère par des sources naturelles et anthropiques. Les secondaires sont issues de processus physico-chimiques à partir de polluants précurseurs comme le SO₂, les NO_x, NH₃ et les composés organiques volatils (COV). Les espèces principales de particules secondaires sont les sulfates, issus de l'oxydation du SO₂ en acide sulfurique (H₂SO₄) (7). Parmi les sulfates, on distingue les sulfates marins qui proviennent de l'oxydation du diméthylsulfure produit par les vagues, et les sulfates non marins résultant de la conversion et de l'oxydation du SO₂ émis par des industries et des centrales thermiques. Les nitrates résultent de l'oxydation du NO₂ en acide nitrique, cette réaction peut se faire aussi en phase gazeuse mais dans ce cas-là, le nitrate est associé à l'ion ammonium NH₄⁺, elle peut se faire aussi dans la fraction grossière lorsque le nitrate est associé à des sels marins (Na⁺) ou des poussières calcaires (Ca₂⁺). Les composés organiques secondaires, issus de réactions chimiques à partir de COV, sont émis par les sources anthropiques (humaines), mais aussi biogéniques (végétations) et terrigènes. Cette source de particules est difficile à quantifier car la formation de particules secondaires met en jeu des mécanismes complexes, mal connus quantitativement et qualitativement (7).

La dernière catégorie rassemble les particules remises en suspension qui sont générées principalement par le vent et le trafic urbain (9). On voit que l'étude des particules est complexe, les origines et la composition des particules sont très diverses et difficiles à identifier, toutefois, les quelques études menées convergent vers les composés chimiques suivants :

Composés	Zone d'émissions
Sels (nitrates, sulfates, ammonium, marins)	Zones côtière (marins), rurale (nitrates, ammonium), trafic (sulfates)
Composés carbonés organiques (HAP, mélange d'hydrocarbures liés à des atomes d'oxygène, etc...)	Zones trafic, industrielle et urbaine
Métaux lourds (plomb, arsenic, cadmium...)	Zone industrielle
Carbone Suie	Zones trafic et industrielle
Poussières minérales/crustales	Zone rurale
Sucres	Zone urbaine, zone proche de lieux de combustion

Tableau 1 : Origine des composés présents dans les particules

Le carbone suie aussi appelé Carbone Élémentaire correspond au carbone graphitique amorphe (non soluble), provenant des combustions incomplètes de combustibles fossiles et biomasse. Ils sont souvent au cœur de la particule, entouré de composés carbonés organiques (9). Le carbone suie a un pouvoir de réchauffement de l'atmosphère et il est l'un des principaux polluants climatiques de courte durée de vie dans l'atmosphère, entre 3 et 8 jours (7).

Les sucres, comme par exemple le levoglucosan qui est un traceur de la combustion du bois provenant de la dégradation de la cellulose par pyrolyse, font partie de la matière organique comme les composés carbonés organiques.

D. Persistance des particules dans l'atmosphère et épisodes de pollution

Les particules peuvent demeurer plus ou moins longtemps dans l'atmosphère, selon leur taille et leur stabilité. Les particules grossières, c'est-à-dire entre 2,5 et 10 µm de diamètre, retombent généralement lentement et restent en suspension environ 1 jour en absence de mouvement d'air (7). Dans le cas des particules fines, inférieures à 2,5 µm, elles restent plus longtemps en suspension et il est difficile de les éliminer (uniquement par précipitations), ces particules sont donc celles qui restent le plus longtemps dans l'atmosphère. Il faut savoir aussi qu'une particule en suspension peut devenir le vecteur d'autres polluants qui s'y adsorbent plus ou moins provisoirement ou qui y ont été intégrées lors de sa formation. Les polluants sont transportés d'autant plus loin et longtemps par la particule si cette dernière s'est formée dans une zone de fortes concentrations de particules (7).

La persistance longue de particules peut aboutir à des épisodes de pollution avec la combinaison de conditions météorologiques favorables comme la présence de situations anticycloniques avec des températures très froides, un vent faible voire nul, l'absence de précipitations et une inversion de température favorisant l'accumulation de ces particules (11). Il existe deux types d'épisodes : les épisodes de pollution hivernale et printanière, nous aborderons leur spécificité ultérieurement.

La notion de couche limite atmosphérique est une notion importante dans l'apparition ou non d'épisodes de pollution : il s'agit de la couche de l'atmosphère en contact avec la surface et pouvant aller jusqu'à 1,5 km d'altitude. Elle est soumise à l'influence du sol à l'échelle d'une journée, le vent y étant ralenti par le frottement du sol, et la température variant pendant le cycle diurne. La force de Coriolis entraîne une rotation de la direction du vent de l'ordre de 25 degrés entre le sol et le sommet de la couche, ceci va faire qu'un panache de polluants ne va pas se transporter dans la même direction en fonction de l'altitude où il se trouve. C'est aussi une couche où la turbulence va favoriser la dilution des polluants, mais cette turbulence dépend de la variation de la température en fonction de l'altitude, du vent, du relief, des obstacles sur le sol ; on imagine alors que la dilution des polluants près du sol et dans toute la couche limite est un problème complexe. Elle évite aussi aux particules de se déverser dans la couche atmosphérique située au-dessus : la troposphère (7).

En situation anticyclonique, la couche limite a tendance à s'affaisser ce qui augmente l'inversion de température qui la limite à sa partie supérieure. Les polluants émis dans la couche limite sont ainsi emprisonnés. En hiver, les polluants primaires s'accumulent sur une couche de faible hauteur et la formation de brouillard à cette époque de l'année retarde le développement d'une couche convective. Les polluants sont captés par les brouillards ce qui donne des réactions en phase liquide. En été, les situations anticycloniques correspondent à des ciels clairs donc à une forte irradiation solaire, les températures sont élevées, ce qui favorise des réactions photochimiques et la formation de polluants secondaires, comme l'ozone principalement (7).

E. Seuils réglementaires

Un épisode de pollution est défini comme la période au cours de laquelle la concentration journalière en PM_{10} dans l'air ambiant est supérieure aux seuils réglementaires. Il existe alors deux niveaux de procédures : le niveau d'information et de recommandation lorsque les concentrations en PM_{10} sont supérieures à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière, et le seuil d'alerte où les concentrations dépassent $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière avec la diffusion de consignes de protection sanitaire et de réduction des émissions de polluants. A titre d'exemple, pour les épisodes de pollution en PM_{10} , les consignes sont alors de ne pas utiliser les cheminées à bois particulièrement pour les foyers ouverts, de limiter l'usage de véhicules automobiles, notamment

les véhicules diesel, de réduire les vitesses sur les voies rapides (12). Les épisodes de pollution particulaire ont pour origine deux phénomènes différents : l'import continental des particules et l'augmentation des émissions primaires avec des conditions météorologiques défavorables à la dispersion des polluants. Ces procédures sont régies par des arrêtés préfectoraux intégrant la réglementation Européenne (5) (6). Parmi celle-ci, on y retrouve les valeurs limites ou les objectifs de qualité présentés dans le tableau suivant.

	Valeurs limites	Objectif de qualité	Seuil d'information	Seuil d'alerte
En Moyenne Annuelle	40 µg/m ³	30 µg/m ³	/	/
En Moyenne Journalière	50 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 9,6% du temps soit 35 jours/an	/	50 µg/m ³	80 µg/m ³

Tableau 2 : Seuils réglementaires sur les PM₁₀

L'exploitation des données réalisée dans la suite du rapport est basée sur ces différents seuils.

F. Instrumentations

Pour les concentrations des particules, les mesures en continu des poussières sont assurées, dans les AASQA, par des TEOM FDMS (à gauche) (TEOM 1400 couplé à un module FDMS 8500 pour Lig'Air). La mesure repose sur une microbalance inertielle utilisant un élément conique oscillant à sa fréquence naturelle. Le filtre de collection est monté sur cet élément et l'ensemble oscille à une fréquence de base d'environ 200Hz, fréquence déterminée par les caractéristiques physiques de l'élément conique et par la masse du filtre. Ainsi, lorsque la masse de particules déposées sur le filtre augmente, une décroissance de la fréquence de vibration se produit. Cette décroissance est ensuite convertie en variation de masse. Le FDMS permet quant à lui de mesurer la perte de masse par volatilisation en cours d'échantillonnage et par conséquent d'appliquer un facteur correctif en temps réel sur la mesure du TEOM (10). Ce système a été démontré conforme à la méthode de référence (la gravimétrie) pour une concentration journalière.



Pour la chimie particulaire, les mesures par prélèvements sur filtres sont réalisées par des collecteurs à haut débit DIGITEL DA-80 (cf Annexe 3) qui permettent le prélèvement automatique d'air et le changement des filtres selon des fréquences de consignes. Les collecteurs des PM₁₀ sont situés pour l'année 2014 à Orléans-la-Source et pour l'année 2015 à Sully-sur-Loire, Montargis, Joué-lès-Tours et Orléans-la-Source. Les DA-80 sont, chacun, équipés d'une tête de coupure qui permet de prélever la fraction désirée des particules via le phénomène d'impaction. Les filtres utilisés sont en fibre de quartz pour permettre d'avoir de très faibles niveaux de blancs, ils sont changés

automatiquement par le DA-80 (10). Les mesures sont effectuées pendant 24 heures, tous les jours, et 4 mesures par heure ce qui permet d'avoir une moyenne horaire indicative. Les filtres conditionnés sont transmis par les laboratoires d'analyses. Après les mesures effectuées, les filtres leur sont envoyés tout en respectant les conditions de transport et de stockage. Les laboratoires vont ensuite réaliser les analyses demandées puis communiquer les résultats concernant les concentrations des composés recherchés. Pour les PM₁₀, Lig'Air confie les analyses au LGGE, le Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement à Grenoble.

II. Comportement des PM₁₀

La base de données exploitée, traitée et analysée au cours de cette étude concerne 3 principaux types de mesures : les concentrations horaires en particules en suspension PM₁₀ mesurées sur 9 villes de la région, les données météorologiques horaires issues principalement des stations de mesures de Météo-France et les données de composition chimique des particules obtenues sur 4 villes de la région. La description des 3 bases de données est détaillée dans le tableau 3.

Données	Villes/Stations	Période
Concentrations horaires	Dreux, Chartres/Lucé, Orléans la Source, Montargis, Blois Nord, Vierzon, Châteauroux, Bourges Leblanc, Tours/La Bruyère	01 Janvier 2011 au 31 Décembre 2015
Données météorologiques	Dreux/Laons, Chartres, Orléans, Amilly/Montargis, Blois, Tours, Bourges, Châteauroux, Romorantin	01 Janvier 2011 au 31 Décembre 2015
Composition chimique	Joué-lès-Tours, Orléans-la-Source, Montargis, Sully-sur-Loire	Entre Décembre 2013 et Décembre 2015

Tableau 3 : Stations et périodes de mesures en fonction des types de données

Ces trois bases constituent environ 3 100 000 données. L'exploitation a été réalisée essentiellement sous Excel et sous programmation R.

A. Influence des paramètres météorologiques sur la teneur en particules

La concentration en particules est dépendante des conditions météorologiques. Les paramètres étudiés sont la température, la vitesse et la direction du vent, les précipitations, la durée d'insolation, l'humidité relative de l'air et la pression au niveau de la mer.

Lorsque les précipitations augmentent, on remarque une diminution importante de la concentration en PM₁₀, avec une limite à 5 mm/h (en rouge). Ceci est dû au lessivage atmosphérique réduisant les concentrations mesurées, les particules sont ainsi moins nombreuses en suspension comme l'atteste la figure 3.

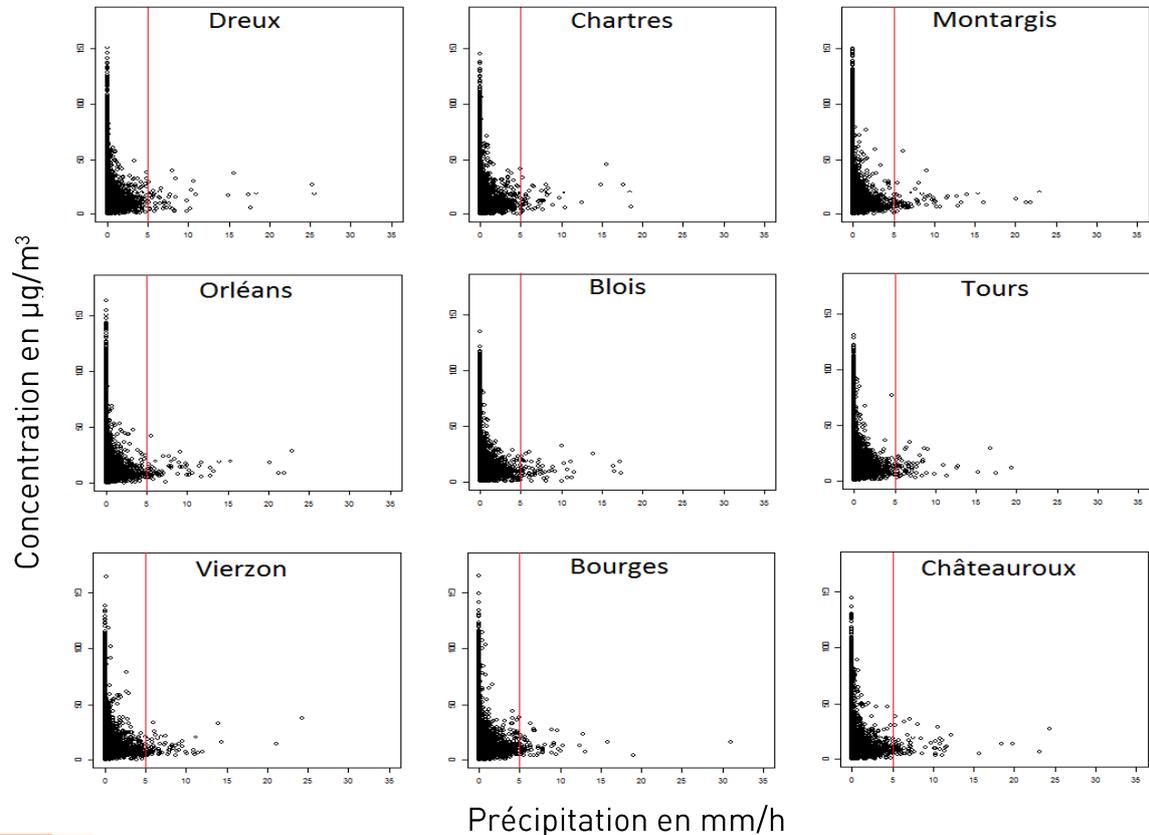


Figure 3 : Concentrations en µg/m³ (unité 50) en fonction des précipitations en mm/h (unité 5)

Pour la température (cf Annexe 5), les concentrations sont plus importantes pour des températures froides comprises entre -5°C et 10°C. Ceci est dû à l'augmentation des émissions issues de la combustion du bois (chauffage) et des conditions anticycloniques froides qui favorisent la condensation des particules. En effet, lorsque l'air est sursaturé par de la vapeur d'eau à basse température, les particules coagulent plus facilement. On note deux comportements pour les valeurs de concentrations élevées : le premier à des températures faibles (< 5°C) correspondant à des épisodes de pollution hivernaux ; l'autre à des températures moyennes (environ 10°C) correspondant à des épisodes de pollution printaniers.

Pour la pression (cf Annexe 6), il y a une augmentation soudaine des concentrations autour de 1015 hPa, valeur à partir de laquelle il est considéré que nous sommes sous des pressions anticycloniques, qui couplées à des températures froides constituent des conditions propices à une augmentation de la concentration des particules pouvant conduire à un épisode de pollution. Pour ce qui est des autres paramètres météorologiques (humidité dans l'air, durée d'insolation), il n'y a pas d'influence majeure sur les concentrations en particules ce qui signifie que ces paramètres ont un impact assez faible sur la concentration des particules en suspension.

La direction et la vitesse du vent sont les paramètres météorologiques qui peuvent avoir le plus d'impact sur la concentration en PM₁₀. Lorsque la vitesse du vent augmente, on observe une diminution de la concentration. Plus le vent est fort, plus les particules sont dispersées, limitant ainsi une augmentation de la concentration en particules à la surface (cf Annexe 7). Sur la figure 4, il a été combiné la rose des vents et la répartition des vitesses du vent selon chaque direction du vent en se basant sur les valeurs horaires des deux données.

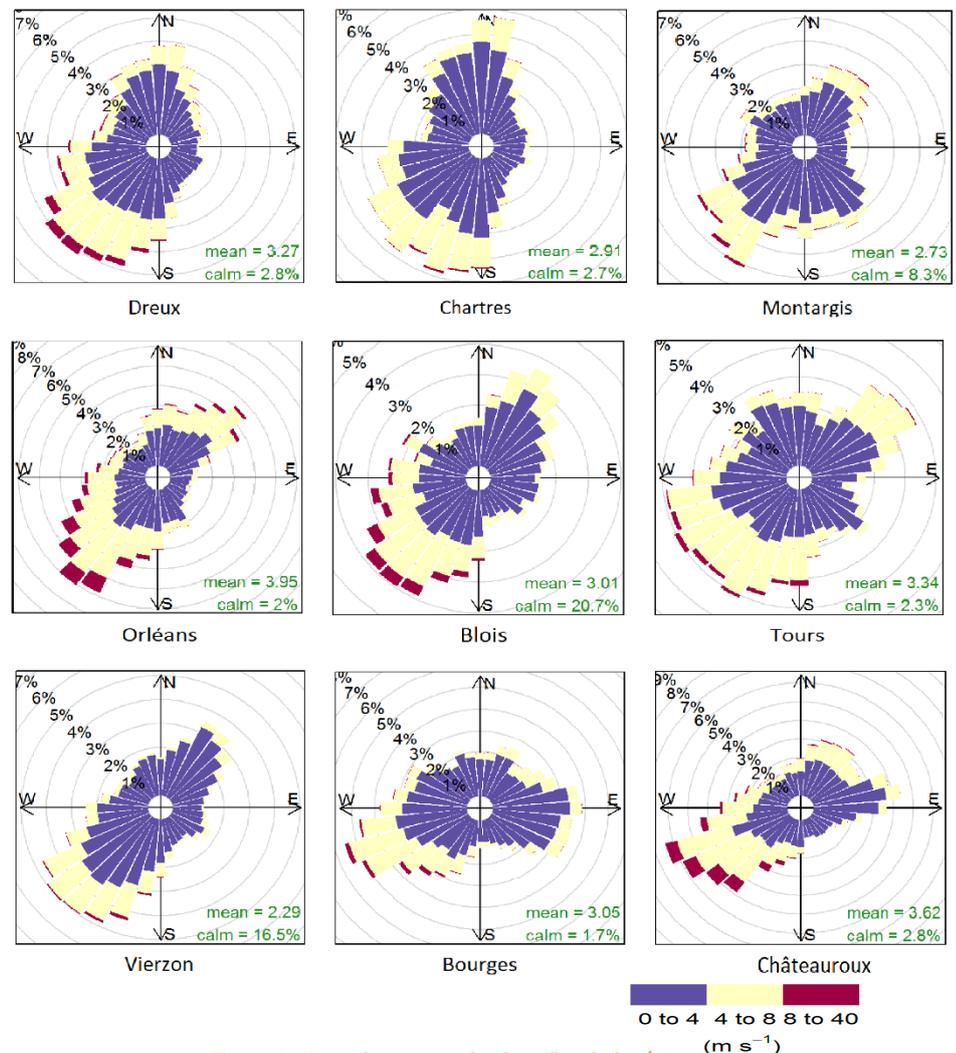


Figure 4 : Rose des vents selon les villes de la région

L'intensité du vent a été distribuée en 3 classes : les vents faibles en violet, les vents moyens en jaune et les vents forts en bordeaux. Pour les vents faibles, représentant 60% de la totalité des vents, l'origine du vent est plus difficile à prédire que pour les vents supérieurs à 4 m/s dont l'origine principale est le sud-ouest, c'est-à-dire venant de l'océan Atlantique. En effet, les dépressions proviennent en grande majorité de l'océan et engendrent des vents de plus fortes intensités. Le tableau 4 présente la prédominance des vents selon les villes classées par secteur. On retrouve principalement le vent de sud-ouest en tant que vent majoritaire et le vent de nord-est pour le vent secondaire. Compte tenu des remarques précédentes, la région est surtout influencée par

un climat océanique et donc caractérisée par des vents de direction sud-ouest. Les villes situées au centre et au nord-est de la région présentent le même comportement pour les vents majoritaires et secondaires. Au contraire, pour les vents secondaires, on observe que les villes des secteurs nord et sud ne se comportent pas de la même manière. Les premières sont sous l'influence d'un vent de secteur nord tandis que pour les deuxièmes, elles sont sous l'influence d'un vent de secteur est.

Ainsi, la région Centre-Val de Loire est globalement influencée par du vent de secteur sud-ouest et du vent de nord-est en vent secondaire principalement. Les vents forts évitant la stagnation des polluants sont principalement originaires du secteur sud-ouest. Le climat océanique a donc une forte influence sur les vents de la région.

Secteur	Villes	Vent Majoritaire	Vent Secondaire
Nord	Chartres	S/SO	N
	Dreux	SO	N
Ouest	Tours	S/SO/O	NE
Sud	Châteauroux	SO	E
	Bourges	SO	E
Centre	Blois	SO	NE
	Vierzon	SO	NE
Nord-Est	Montargis	SO	NE/S/SE
	Orléans	SO	NE

Tableau 4 : Prédominance des vents selon les villes de la région

Sur la Figure 5, il a été combiné la concentration des PM₁₀ et la rose des vents. En règle générale, la concentration diminue lorsque les vents proviennent du sud et de l'ouest donc d'origine océanique. Le vent d'origine océanique apporte plus de précipitations et de vents forts que le vent provenant du continent, et permet le lessivage atmosphérique et donc une diminution des concentrations. A l'opposé de ce phénomène, les vents de nord et de nord-est vont augmenter la concentration des particules.

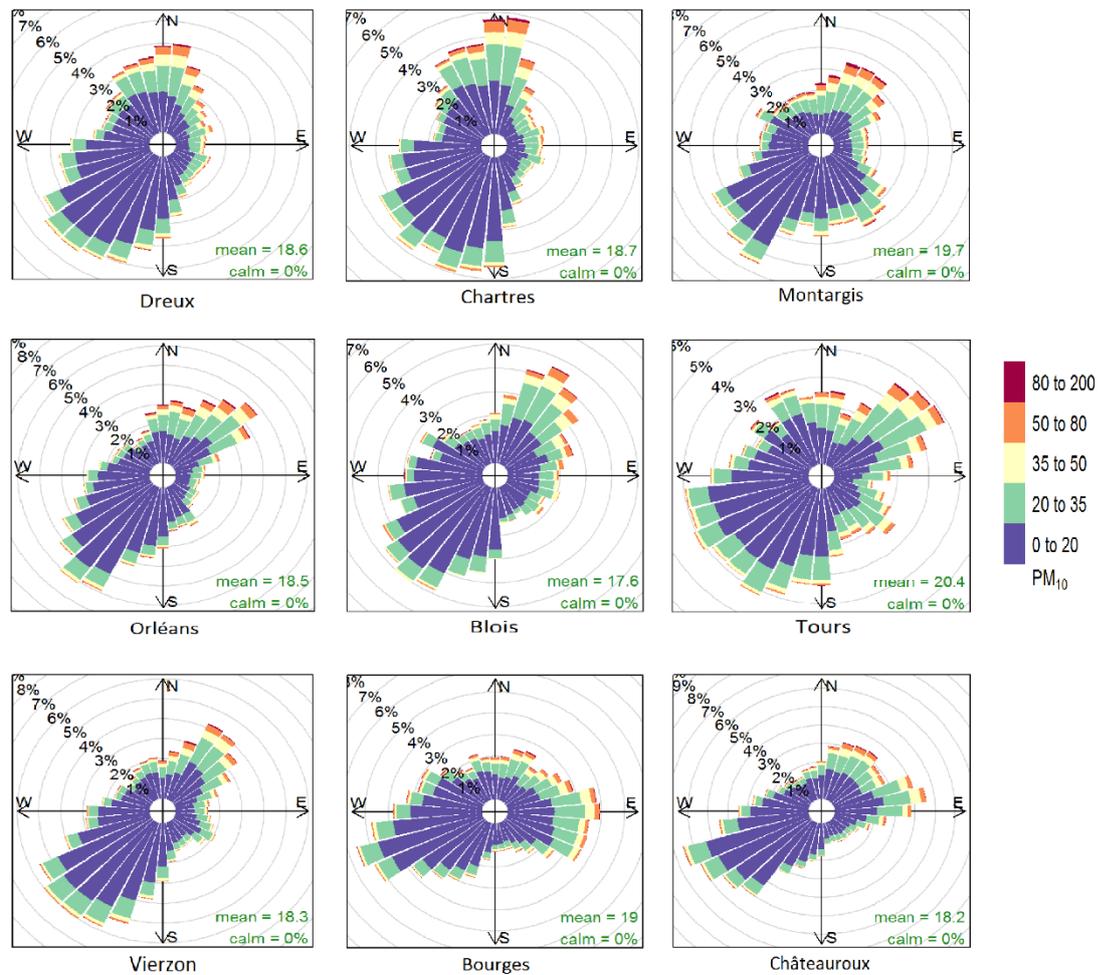


Figure 5 : Rose de pollution selon les villes de la région

Les concentrations inférieures à 20 µg/m³ sont fortement enregistrées pour un vent de sud-ouest à cause des raisons citées précédemment. Entre 20 et 50 µg/m³, il y a une répartition homogène de la direction des vents même si le quart nord-est est légèrement prédominant pour ces concentrations. Pour les valeurs élevées comprises entre 50 et 80 µg/m³, on observe plus facilement la prédominance du vent de nord-est sauf pour Châteauroux et Bourges qui sont des agglomérations soumises à des fortes concentrations sur le secteur est. Pour les valeurs supérieures à 80 µg/m³, le secteur nord-est est le plus représenté pour l'ensemble des villes ce qui signifie que les vents de ce secteur dans certaines conditions sont porteurs d'une quantité importante en PM₁₀. Il faut noter aussi une évolution de ces fortes concentrations en fonction de la position des villes. Plus on va vers le sud de la région, moins on retrouve de fortes quantités de particules, tandis que les villes situées au nord et nord-est sont plus sujettes à ces concentrations élevées. Ceci semble s'expliquer par une contribution interrégionale plus importante, dont fait partie la région parisienne. Après avoir étudié l'influence de la météorologie sur les concentrations en particules, nous allons comparer les villes entre elles en ne considérant que les concentrations en PM₁₀ relevées sur les 5 dernières années (2011-2015).

B. Etude comportementale des particules en suspension PM₁₀ en fonction des seuils réglementaires

Il a été réalisé différents graphiques selon différents critères permettant de comparer les villes entre elles et aussi de comparer les résultats en fonction des seuils réglementaires (tableau 2).

a) Comportement des particules selon la moyenne annuelle

Les résultats de la figure 6 sont représentés sous forme de boîte à moustaches¹. Sur une année, il est demandé de ne pas dépasser 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle et d'être en dessous du seuil de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ comme objectif de qualité toujours en moyenne annuelle (tableau 2).

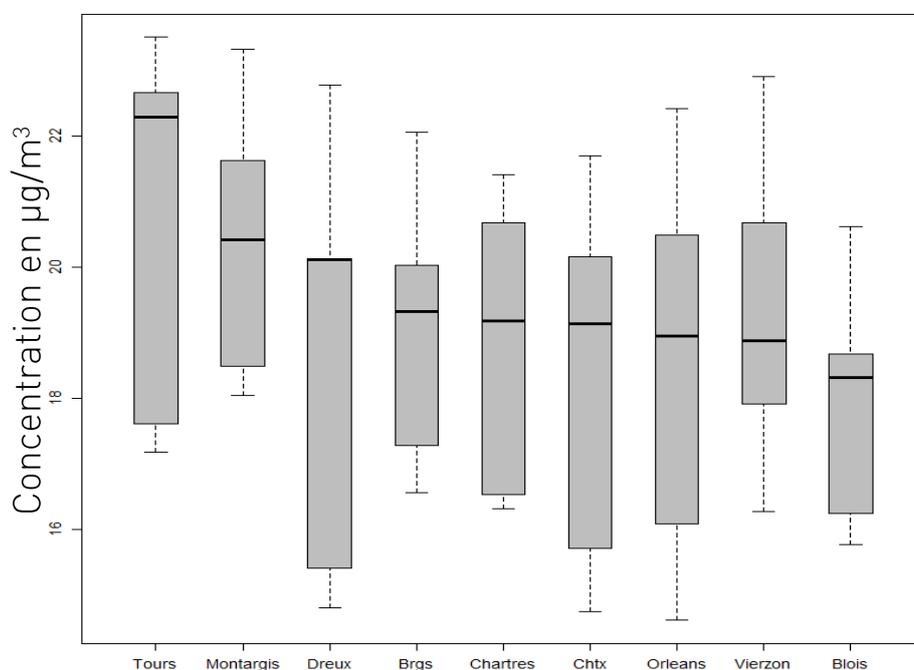


Figure 6 : Moyennes annuelles des concentrations en PM₁₀ selon les villes de la région

Pour chaque ville, chaque valeur correspond à une année. Comme l'analyse porte sur 5 ans, il y a donc 5 données au total. Pour les 9 villes, on se situe en dessous de l'objectif de qualité (30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). En comparant les villes, Tours est plus impactée par les particules à l'année. Avec Montargis, qui se détache des autres villes, ces deux villes sont celles qui enregistrent une concentration annuelle en particules plus élevée dans la région. Ces observations montrent que la pollution de fond de ces villes est plus élevée à l'année. Blois semble être la ville la moins impactée par les particules.

¹ Boîte à moustaches : représentation graphique pour un jeu de données, permettant de représenter 5 valeurs, avec les valeurs minimum et maximum aux extrémités. Ensuite, la médiane qui signifie que 50% des valeurs sont situées en dessous ; en dessous de la médiane, il y a le premier quartile qui signifie que 25% des valeurs sont situées en dessous. Enfin, le troisième quartile signifiant que 75% des valeurs sont situées en dessous.

b) Comportement des particules selon le nombre de jours de dépassement

La réglementation indique qu'il ne faut pas dépasser le seuil de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ plus de 9,6% du temps pour une année, soit 35 jours. La figure 7 montre les 5 valeurs observées par ville correspondant aux 5 valeurs annuelles du nombre de jours dépassant les 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (a) et le nombre de jours total sur les 5 ans où le seuil a été dépassé (b).

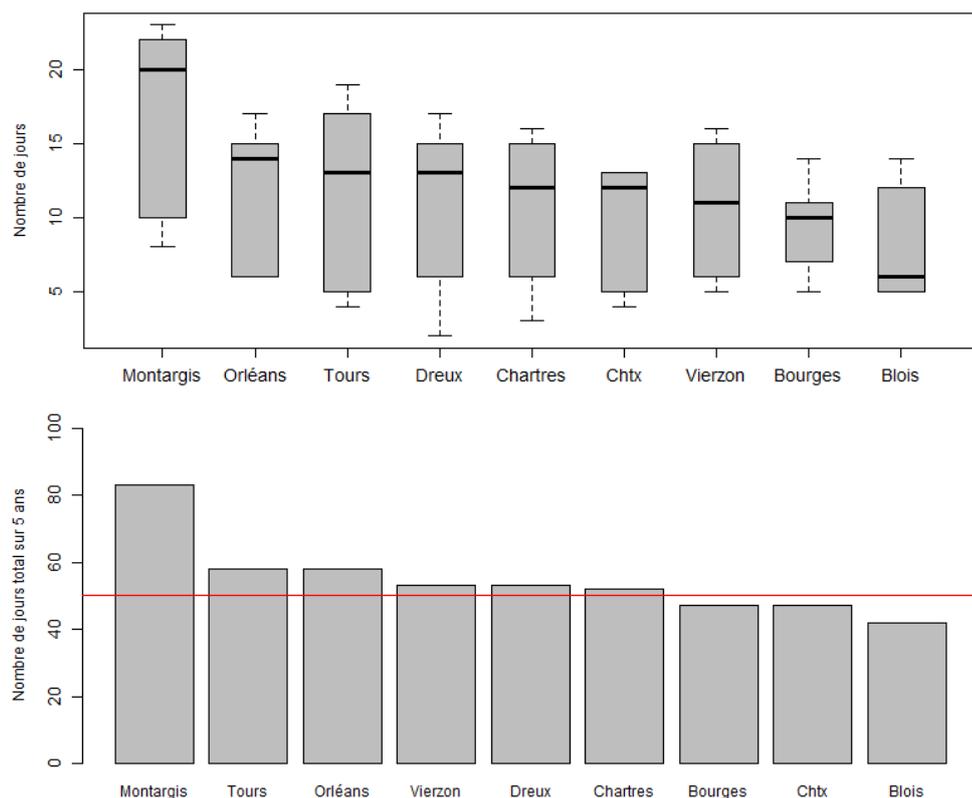


Figure 7 : Nombre de jours dépassant la valeur de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par an selon les villes de la région (a) et le nombre de jours total sur les 5 années selon les villes de la région (b)

Pour les 9 villes, la valeur limite de 35 jours n'est pas dépassée, ce qui atteste du respect de la réglementation. Cependant, la ville de Montargis se détache très nettement comme pour le paramètre réglementaire précédent. Ensuite, on retrouve les deux agglomérations principales de la région, Orléans et Tours. La ville de Blois semble être moins impactée que les autres villes. Sur le second graphique, Montargis se détache largement avec deux fois plus d'épisodes de pollution que Blois lors de ces 5 dernières années, expliquant les différences constatées sur la figure 6. Il y a donc, à Montargis, plus d'épisodes de pollution et que ces derniers sont beaucoup plus chargés en particules. Les villes qui sont les moins impactées sont celles du sud et du centre de la région. Ceci peut provenir du climat et/ou de la situation géographique. Comme précédemment, les deux grandes agglomérations se situent juste après Montargis, prouvant qu'il y a plus d'émissions dans ces agglomérations. L'annexe 7 montre la répartition des épisodes de pollution pour chaque ville, ce qui signifie, par exemple

pour Montargis, que plus de 80% des épisodes de pollution enregistrés dans la région ont impacté la ville de Montargis, ce qui confirme les constatations.

Globalement, les villes du nord et du nord-est de la région sont impactées par les plus fortes concentrations en particules en suspension PM₁₀. La proximité de la région parisienne et la pollution interrégionale peuvent contribuer à ces fortes concentrations. Une éventuelle contribution non négligeable des pays de l'Europe de l'Est (Allemagne, Pologne, Ukraine) à cause de la présence importante de centrales à charbon très émettrices de particules en suspension, peut également avoir un impact. Les grandes agglomérations sont aussi impactées par la pollution en provenance de ces régions, couplée à une contribution des émissions locales plus élevées par rapport aux autres villes de tailles plus petites, pour lesquelles les émissions restent plus faibles.

c) Comportement des particules selon la moyenne journalière

Sur la figure 8, la ligne orange à 50 µg/m³ représente le seuil d'information et de recommandation, et la ligne rouge à 80 µg/m³ délimite le seuil d'alerte. Les valeurs médianes (traits noirs pleins) sont comprises entre 16 et 19 µg/m³ pour les 9 villes. Ceci indique que les concentrations journalières dans la région semblent relativement homogènes sur l'ensemble du territoire régional.

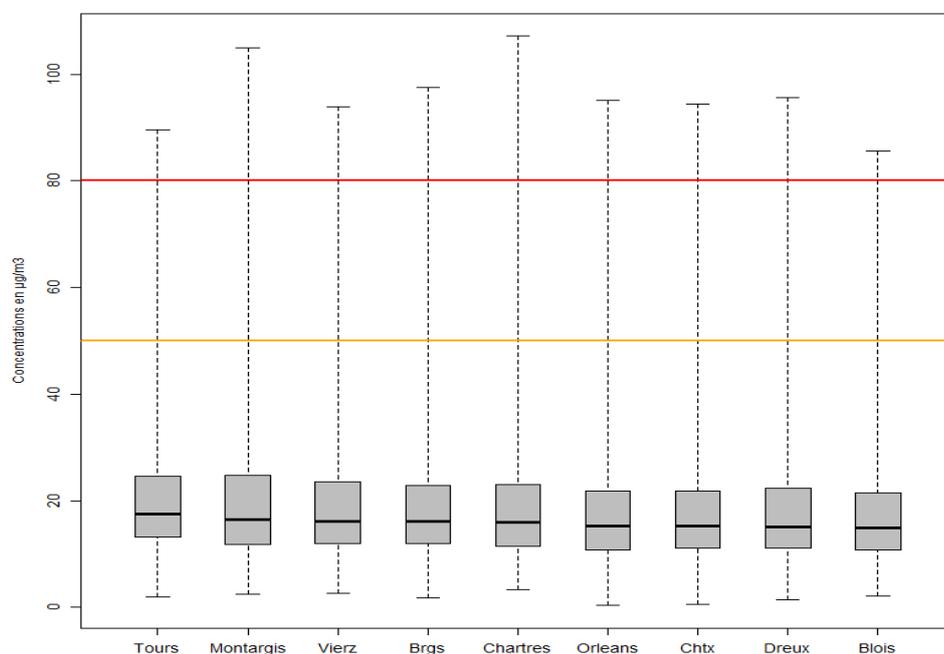


Figure 8 : Moyennes Journalières des concentrations en PM₁₀ selon les villes de la région

Plus de 75% des valeurs sont situées en dessous des valeurs limites régies par la réglementation (tableau 2). Toutefois, en ce qui concerne les valeurs de concentrations journalières maximales, Chartres et Montargis présentent les valeurs les plus importantes. De plus, ces

viles sont situées dans la partie nord/nord-est de la région et comme vu précédemment avec les roses de pollution, les vents de ce secteur apportent de grandes quantités de particules lors d'épisodes de pollution. A l'inverse, Tours et Blois ont les valeurs maximales les plus faibles, car ces villes peuvent être plus touchées par de forts phénomènes pluvieux apportés par les dépressions océaniques. En comparant la figure 8 avec celle de l'annexe 8, qui représente les moyennes journalières des concentrations en PM_{10} supérieures à $50 \mu g/m^3$, peu de différences sont observées.

A partir de la figure 9, on observe le même comportement sur les 9 villes avec des pics de pollution présents en début et en fin d'année, correspondant à des périodes froides de l'année et un retour à la pollution de fond lors des périodes chaudes. Lors de l'épisode hivernal de février 2012, il y a une augmentation globale de la concentration en PM_{10} ce qui signifie que ce type de pollution est produit par les émissions résidentielles notamment par l'utilisation du chauffage (gaz, combustion de bois, etc.) qui est propice à une augmentation des concentrations en particules.

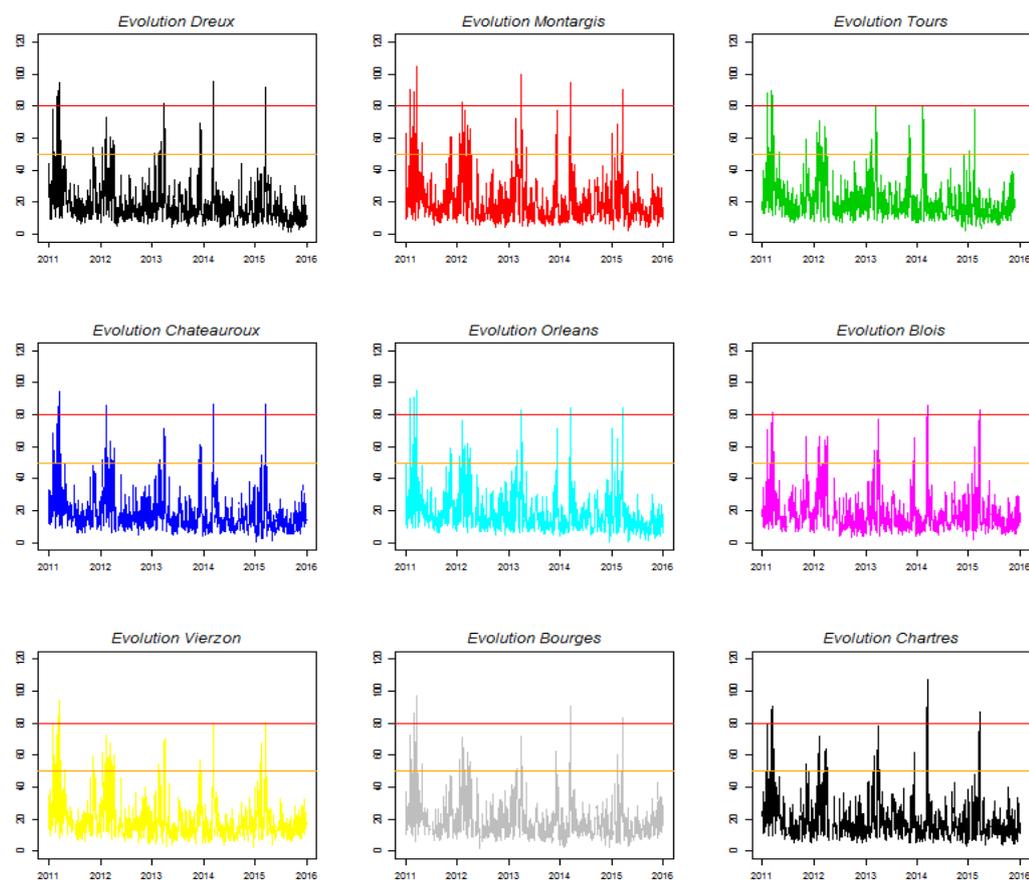


Figure 9 : Evolution de la concentration journalière sur les 5 années selon les villes de la région

Malgré cela, la pollution de fond tend à diminuer, comme pour Dreux où on passe de $18 \mu g/m^3$ en 2011 à $15 \mu g/m^3$ en 2015. Cela peut provenir de l'amélioration de la qualité de l'air dans l'ensemble de la région mais aussi des conditions météorologiques de ces dernières années

avec des hivers plus doux et pluvieux. Une autre possibilité est la politique de réduction des émissions de particules menée par l'Etat français ainsi que les évolutions technologiques des moteurs automobiles. De plus, le nombre d'épisodes de pollutions tend à diminuer lui aussi avec en moyenne une quinzaine de jours de dépassement en 2011 pour cinq en 2015.

d) Corrélation entre les villes de la région

Le tableau 5 présente la corrélation des résultats entre chaque ville pour observer les différences qu'il peut y avoir entre elles.

Il y a une homogénéité des résultats autour des 90% de corrélation entre chaque ville sauf pour Tours pour laquelle les résultats sont autour de 40%. Ceci peut être expliqué par des émissions locales et des conditions météorologiques pouvant être différentes. En comparant chaque ville entre elles, on remarque une sectorisation assez nette avec des taux de corrélation supérieurs à 95% entre ces villes. Il y a le secteur nord comprenant Chartres et Dreux, le secteur sud comprenant Bourges, Châteauroux et Vierzon, et le secteur nord-est comprenant Montargis et Orléans. La ville de Blois a moins de corrélation que certaines villes, ceci confirmant les analyses faites précédemment. Il faut noter qu'entre les villes du secteur Nord et du secteur Sud, la corrélation est plus faible (88%) ce qui signifie que chaque zone géographique de la région est touchée différemment par les particules.

Sur cette partie, nous avons vu que chaque ville respectait les valeurs réglementaires sauf entre décembre et mars, lors de conditions météorologiques favorables à l'augmentation de la concentration des particules en suspension pouvant engendrer l'apparition d'un épisode de pollution. Par ailleurs, chaque ville a un comportement propre selon sa situation géographique, le nombre d'habitants, la configuration de la ville, la présence d'axes routiers majeurs comme les autoroutes, etc.

	Dreux	Montargis	Tours	Châteauroux	Orléans	Blois	Vierzon	Bourges	Chartres
Dreux	1	0,91	0,43	0,88	0,93	0,89	0,88	0,88	0,96
Montargis	0,91	1	0,40	0,92	0,95	0,91	0,93	0,93	0,91
Tours	0,43	0,40	1	0,43	0,42	0,37	0,43	0,41	0,39
Châteauroux	0,88	0,92	0,43	1	0,93	0,89	0,96	0,97	0,87
Orléans	0,93	0,95	0,42	0,93	1	0,92	0,93	0,93	0,92
Blois	0,89	0,91	0,37	0,89	0,92	1	0,9	0,90	0,91
Vierzon	0,88	0,93	0,43	0,96	0,93	0,90	1	0,97	0,87
Bourges	0,88	0,93	0,41	0,97	0,93	0,90	0,97	1	0,88
Chartres	0,96	0,91	0,39	0,87	0,92	0,91	0,87	0,88	1

Tableau 5 : Corrélation des concentrations horaires entre les villes de la région

En conclusion de cette partie, il ressort que Montargis semble être la ville la plus touchée par les particules en suspension PM₁₀, suivie de

Tours et d'Orléans. Ces trois villes de la région présentent des moyennes annuelles en concentration de particules plus élevées et sont plus impactées par des épisodes de pollution. La pollution de fond est également plus élevée. Les villes du nord de la région sont moins impactées par rapport aux trois villes précédemment citées mais enregistrent des concentrations supérieures par rapport aux villes du sud (Bourges, Châteauroux, Vierzon). Enfin, Blois est la ville la moins touchée par la pollution particulaire. Pour terminer notre analyse, nous allons étudier la composition chimique des particules pour certaines villes de la région afin de déterminer l'origine des composés constituant les particules en suspension.

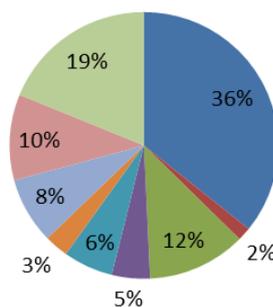
III. Composition et origines des particules

L'étude de la composition chimique des particules a été réalisée sur trois villes de la région : Montargis, Orléans et Tours. Nous avons montré précédemment que sur les 5 dernières années, ces 3 villes enregistraient des concentrations en particules les plus importantes de la région et sont plus fréquemment impactées par des épisodes de pollution. Le format de données de composition chimique est présenté en Annexe 9.

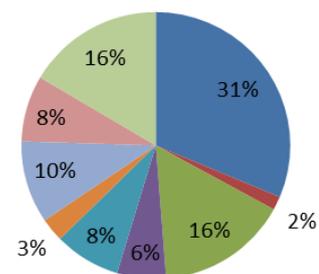
A. Composition moyenne annuelle des particules

La figure 10 présente la répartition des différents composés chimiques constituant les particules en suspension PM₁₀ sur les 3 villes.

Composition des particules sur Montargis



Composition des particules sur Orléans



Composition des particules sur Tours

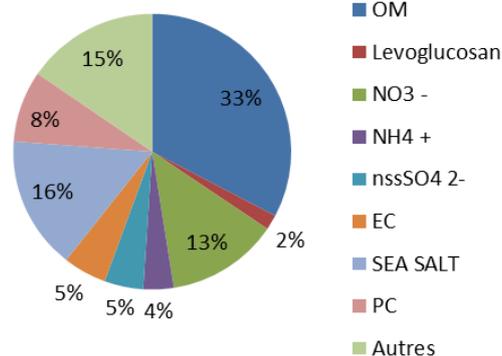


Figure 10 : Composition des particules selon les villes étudiées

Globalement, les espèces chimiques majoritaires sont la matière organique (entre 31 et 36% de la contribution totale des particules), suivi du nitrate (12 à 16%) puis d'une part non définie des particules nommée Autres (15 à 19%). Ces espèces majoritaires représentent les 2/3 de la contribution totale des particules. Chaque ville présente une composition chimique annuelle semblable.

En s'appuyant sur le tableau 1 et la figure 11, on se rend compte que le résidentiel (matière organique et levoglucosan), le trafic routier (matière organique, carbone suie et sulfate non marin) et l'agriculture (nitrate, ammonium) sont les principales origines des particules. Pour Tours, la proximité de la mer par rapport aux autres villes (16% pour les sels marins) et le trafic routier (5% pour le carbone suie) ont un impact plus marqué par rapport aux autres villes, ce qui pourrait être à la base des différences observées au niveau des résultats dans la partie précédente. Pour Orléans, la proximité de la Beauce, grande zone agricole proche de la ville, semble produire un possible impact sur la composition (16% pour le nitrate, 6% pour l'ammonium).

Maintenant, nous allons étudier la corrélation entre chaque composé, c'est-à-dire ceux présents dans les données d'analyses (cf Annexe 8), en prenant en compte certains paramètres météorologiques à partir du tableau 6). Les composés avec un taux de corrélation élevé sont l'ammonium et le nitrate avec 96%, suivi des sels marins (Na, Cl, Mg) autour de 95% et les sucres vers 85%.

Famille	Composé	OC	EC	Cl	NO3	nssSO4	Na	NH4	K	Mg	Ca	Levo-glucosan	Arabitol	Mannitol	Glucose
MO	OC	1	0.68	-0.42	0.278	0.33	-0.46	0.33	0.37	-0.32	0.30	0.63	0.13	-0.02	0.02
EC	EC	0.68	1	-0.13	0.09	-0.01	-0.16	0.06	0.36	-0.01	0.16	0.56	-0.04	-0.09	0.04
SEA SALT	Cl	-0.42	-0.13	1	-0.29	-0.32	0.96	-0.33	0.54	0.93	-0.37	0.10	-0.29	-0.25	-0.13
NO3	NO3	0.28	0.09	-0.29	1	0.41	-0.42	0.96	0.06	-0.37	0.40	0.28	-0.29	-0.35	-0.15
nssSO4	nssSO4	0.33	-0.01	-0.32	0.41	1	-0.33	0.59	-0.13	-0.23	0.43	-0.23	0.10	-0.09	-0.15
SEA SALT	Na	-0.46	-0.16	0.96	-0.42	-0.33	1	-0.47	0.44	0.96	-0.41	-0.03	-0.10	-0.06	-0.01
NH4	NH4	0.33	0.06	-0.33	0.96	0.59	-0.48	1	0.03	-0.42	0.41	0.21	-0.27	-0.36	-0.19
MO	K	0.37	0.36	0.54	0.06	-0.13	0.44	0.03	1	0.50	-0.13	0.71	-0.28	-0.32	-0.12
SEA SALT	Mg	-0.32	-0.01	0.93	-0.37	-0.23	0.96	-0.42	0.50	1	-0.27	0.01	-0.07	-0.06	-0.03
PC	Ca	0.30	0.16	-0.37	0.40	0.43	-0.41	0.41	-0.13	-0.27	1	-0.21	0.05	-0.01	-0.14
Levo-glucosan	Levo-glucosan	0.63	0.56	0.10	0.28	-0.23	-0.03	0.21	0.71	0.01	-0.21	1	-0.30	-0.32	-0.03
Sucres (MO)	Arabitol	0.13	-0.04	-0.29	-0.29	0.10	-0.10	-0.27	-0.28	-0.07	0.05	-0.30	1	0.90	0.61
	Mannitol	-0.02	-0.09	-0.25	-0.35	-0.09	-0.06	-0.36	-0.32	-0.06	-0.01	-0.32	0.90	1	0.82
	Glucose	0.02	0.04	-0.13	-0.15	-0.16	-0.01	-0.19	-0.12	-0.03	-0.14	-0.03	0.61	0.82	1

Météo	Dir.vent	-0.48	-0.37	0.28	-0.35	0.05	0.27	-0.22	-0.22	0.16	-0.45	-0.28	-0.22	-0.12	-0.08
	Vit.vent	-0.58	-0.49	0.56	-0.28	-0.11	0.58	-0.27	0.02	0.52	-0.32	-0.33	-0.01	0.01	-0.09
	Tempe	0.07	-0.12	-0.34	-0.30	0.38	-0.17	-0.20	-0.47	-0.10	0.44	-0.66	0.58	0.47	0.06

Tableau 6 : Corrélation des composés et des paramètres météorologiques majeurs

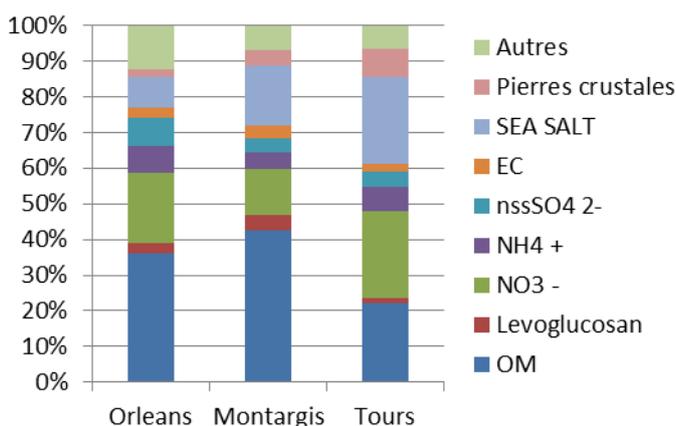
Enfin, le carbone organique, le carbone suie et le levoglucosan, tous issus de la combustion des foyers, sont autour des 65%. Le calcium, se trouvant principalement dans les poussières crustales, est légèrement lié (40%) au nitrate et à l'ammoniac utilisé en agriculture. Pour les composés anticorrélés (valeur négative proche de -1), on note que les sels marins sont anticorrélés avec la quasi-totalité des autres composés ce qui indique que les sels augmentent en concentration lorsque les autres diminuent.

Pour ce qui est de la météorologie, on observe bien l'impact du vent et de la direction du vent sur les sels marins. Le carbone organique et le carbone suie sont les plus anticorrélés avec la vitesse du vent, ce qui signifie que ces deux composés ont tendance à augmenter en concentration lorsque la vitesse du vent est faible. Pour la température, les sucres ont un taux de corrélation plus élevé, indiquant une augmentation de leurs concentrations lorsque la température augmente. À l'inverse, le levoglucosan est anticorrélé avec la température, ce qui confirme l'augmentation de sa concentration quand les températures diminuent. Selon la température, certains composés sont plus ou moins présents, comme on peut le voir en annexe 10. Les composés provenant de la combustion (chauffage résidentiel) sont en plus grande concentration à des températures faibles. Les sels marins sont plus présents à des températures proches de 10°C, apportés par le vent et le climat océanique. Selon les saisons, la composition n'est pas la même, et évolue différemment, c'est ce que nous allons voir dans la partie suivante.

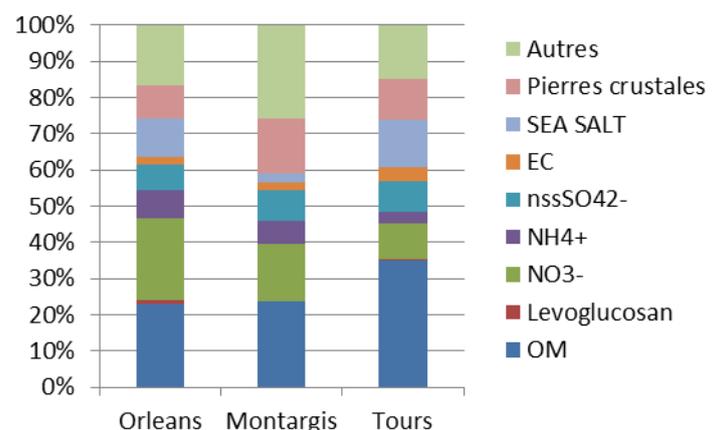
B. Saisonnalité

Avec les figures 11 et 12, on voit assez nettement que les composés retrouvés majoritairement lors des saisons froides (automne et hiver)

Composition des particules en Hiver



Composition des particules au Printemps



sont la matière organique, le levoglucosan et les sels marins.

Figure 11 : Composition des particules en Hiver et au Printemps selon les villes étudiées

À ces périodes de l'année, les températures étant plus froides, le recours au chauffage augmente significativement ce qui explique l'augmentation de la matière organique et du levoglucosan. Pour les sels marins, les différences s'expliquent par des épisodes dépressionnaires provenant de l'océan Atlantique, accompagnés de vents forts ce qui facilite le transport de ces sels en plus grande quantité.

Les composés d'origine agricole, nitrate et ammoniac, sont beaucoup plus présents en hiver et au printemps à cause des épandages d'engrais qui sont beaucoup plus fréquents à cette période de l'année.

Les poussières crustales sont plus présentes en été et au printemps, saisons propices aux moissons et aux semences agricoles. Cependant, les sulfates non marins et le carbone suie sont moins impactés par les saisons, puisque le trafic routier n'a pas de variations majeures pendant l'année.

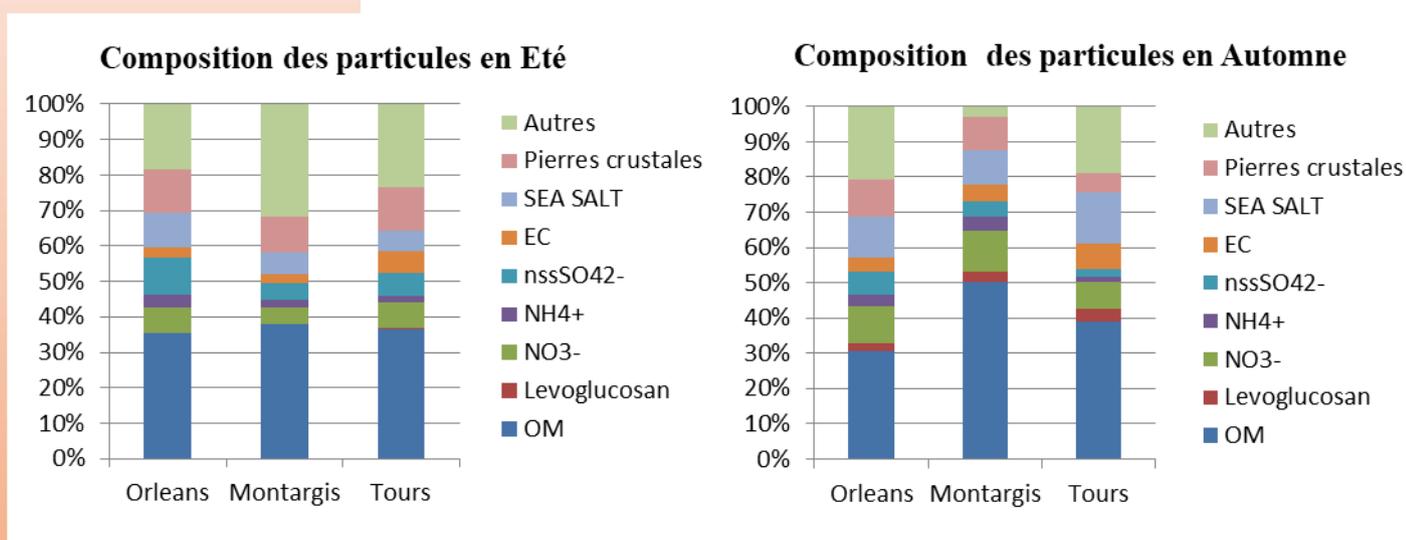


Figure 12 : Composition des particules en Été et en Automne selon les villes étudiées

Nous allons maintenant analyser plus précisément la concentration des composés selon la direction du vent, pour constater son impact sur la concentration des particules.

C. Influence de l'origine globale des masses d'air

Pour identifier l'origine des composés, il a été réalisé des roses des vents avec les concentrations des composés en fonction du vent. Deux origines ressortent de cette analyse :

- Origine nord/nord-est : le nitrate et l'ammoniac, d'origine agricole, ont une concentration accrue lorsque le vent semble provenir de ce secteur. Ceci indique le rôle majeur des cultures agricoles présentes de manière importante dans la région Centre-Val de Loire mais également dans les régions voisines.
- Origine ouest/sud-ouest : la part des sels marins (cf Annexe 11) dans la composition chimique des particules est plus importante dans ce secteur, soumis à un climat influencé océanique.

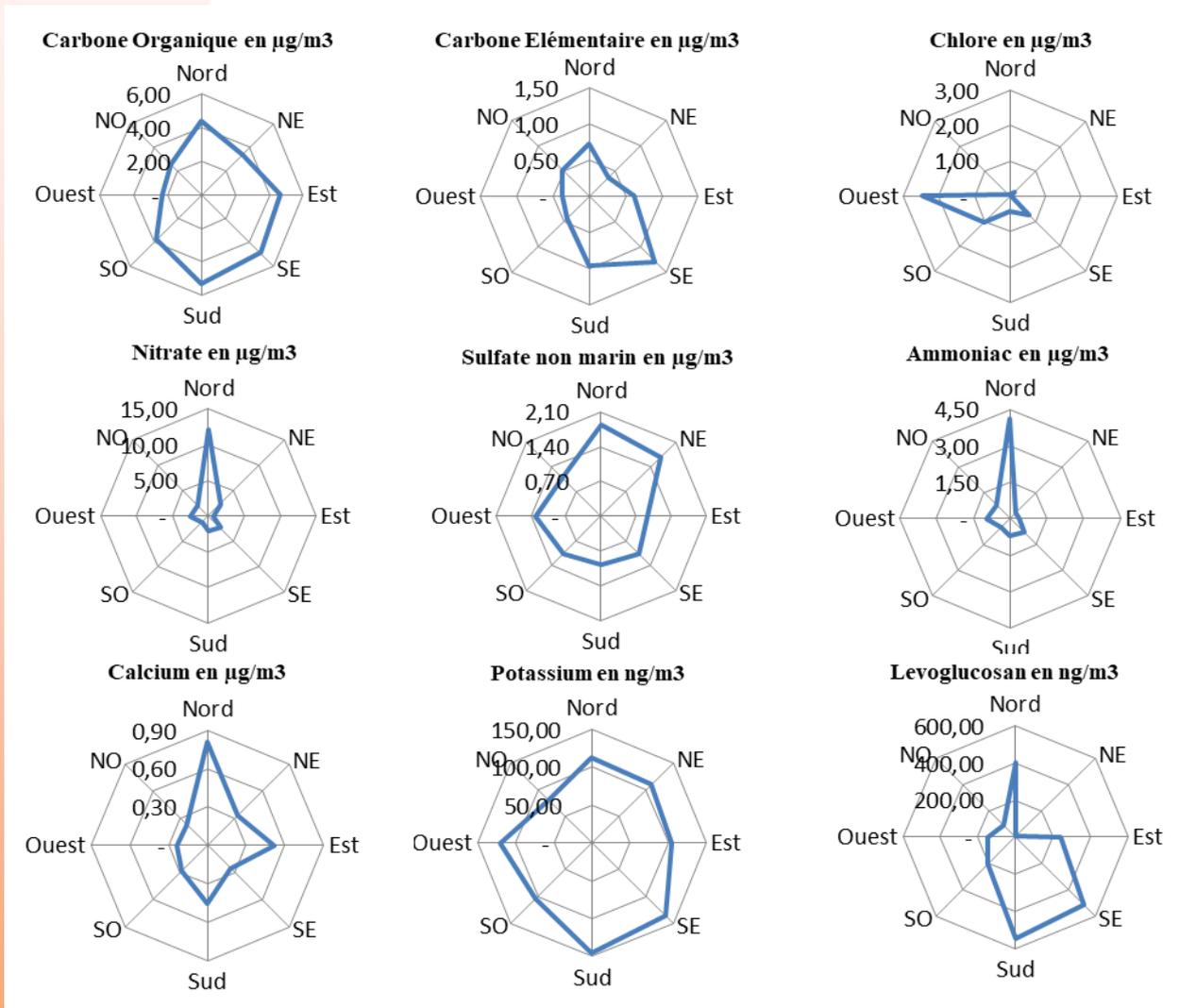


Figure 13 : Concentration de composants de particules en fonction de la direction du vent

Compte tenu d'un nombre de données d'analyses chimiques limitées, des études ultérieures devront être réalisées afin d'affiner ces observations.

D. Composition chimique pendant les épisodes de pollution

Intéressons-nous maintenant à la répartition des polluants lors de 2 épisodes de pollution : le premier hivernal (figure 14) et le second

printanier (figure 15).

Pour les épisodes hivernaux, on remarque une nette augmentation de la matière organique, ainsi que du levoglucosan. La présence de ces deux composés indique une contribution importante liée à l'utilisation importante du chauffage (combustion). Ils représentent à eux deux plus de 60% de la composition chimique des particules.

Pour les épisodes printaniers, ce sont les composés d'origine agricole qui augmentent significativement, en particulier le nitrate et l'ammoniac représentant 50% de la composition globale des particules. Il est à noter la plus faible contribution de la matière organique sur la composition.

Les composés qui ont moins d'impact lors de ces deux épisodes sont les sels marins, le sulfate non marin et le carbone élémentaire ou suie. Le premier étant favorisé lors de conditions météorologiques spécifiques (vent fort de sud-ouest). Le sulfate non marin et le carbone élémentaire sont d'origine anthropique et plus particulièrement du trafic routier.

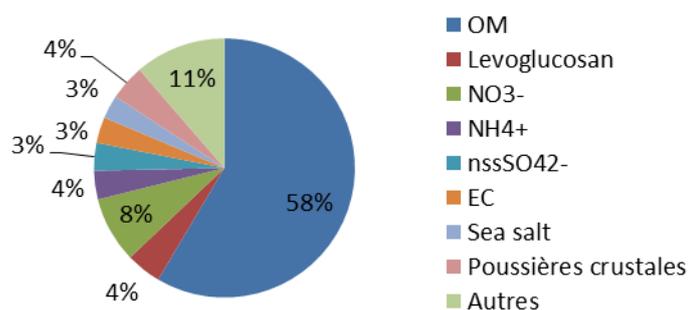


Figure 14 : Composition moyenne des particules lors d'épisodes de pollution hivernale

Ainsi, nous avons vu que la composition des particules n'avait pas de fortes variations entre Orléans, Montargis et Tours. Les secteurs résidentiel, trafic routier et agricole semblent être les principaux producteurs de particules, et que selon la saison, la composition des particules varie. Lors des épisodes de pollution, les secteurs de l'agriculture et du résidentiel peuvent fournir des molécules qui sont plus persistantes dans l'atmosphère et qui peuvent être aussi dégradées en polluants secondaires, plus nocifs en quantité notable.

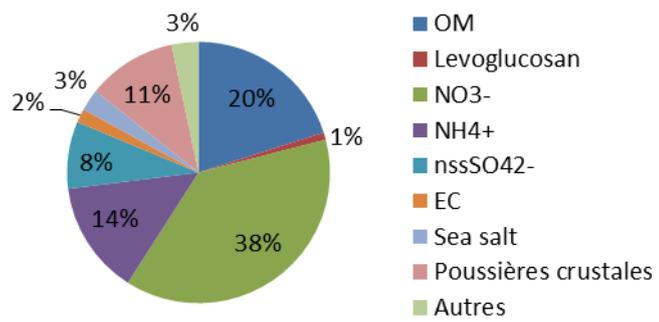


Figure 15 : Composition moyenne des particules lors d'épisodes de pollution printanière

Conclusion

Le travail réalisé a concerné l'étude comportementale des particules en suspension PM_{10} au sein de la région Centre-Val de Loire ainsi que la composition chimique pour déterminer leur origine. Dans un premier temps, nous avons vu que les villes du nord et du nord-est de la région sont plus souvent impactées par les plus fortes concentrations pouvant être expliquées par la proximité de la région parisienne et la pollution interrégionale. Les grandes agglomérations sont impactées par la pollution en provenance de ces régions, avec une contribution pouvant être plus ou moins importante des émissions locales plus élevées par rapport aux autres villes de tailles plus petites.

Montargis semble être la ville la plus influencée par les particules en suspension PM_{10} suivie de Tours et d'Orléans. Les villes du nord de la région (Dreux et Chartres) sont moins impactées par rapport aux trois villes précédemment citées mais enregistrent des concentrations supérieures par rapport aux villes du sud (Bourges, Châteauroux, Vierzon). Enfin, Blois est la ville la moins touchée par la pollution particulaire. La figure 16 récapitule les principaux résultats obtenus sur le comportement des PM_{10} à l'échelle régionale.

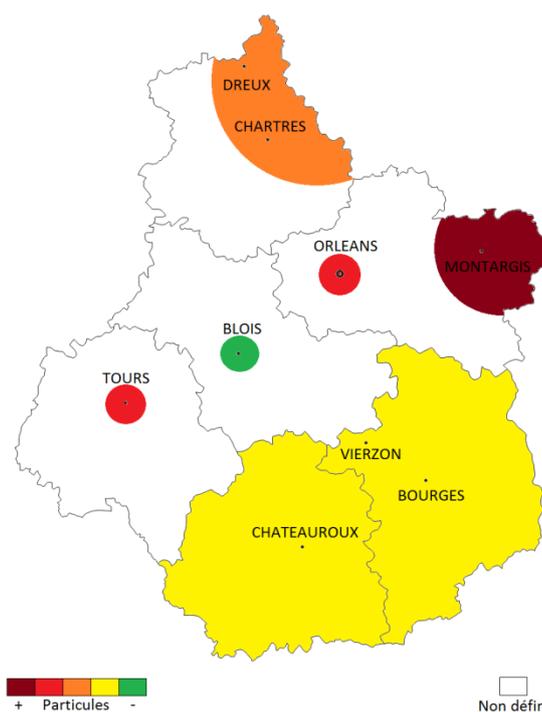


Figure 16 : Sectorisation des particules dans la région Centre-Val de Loire

Par manque de mesures, la partie non-définie pourra être étudiée à partir de la modélisation. Celle-ci permettra d'obtenir les concentrations en PM_{10} sur l'ensemble du territoire régional. Ainsi, la même étude pourra être réalisée sur les concentrations modélisées.

Dans un deuxième temps, nous avons vu que la matière organique était le composé majoritaire des PM_{10} , et que leur composition n'avait pas de

fortes variations entre Orléans, Montargis et Tours. Selon la saison, la composition des particules peut varier comme pour le levoglucosan, plus présent lors de périodes froides, ou encore le nitrate.

Lors des épisodes de pollution, les secteurs agricole et résidentiel semblent fournir des molécules qui persistent plus dans l'air. Ce sont également ces secteurs, avec le trafic routier, qui semblent être les principaux émetteurs de particules en suspension PM₁₀.

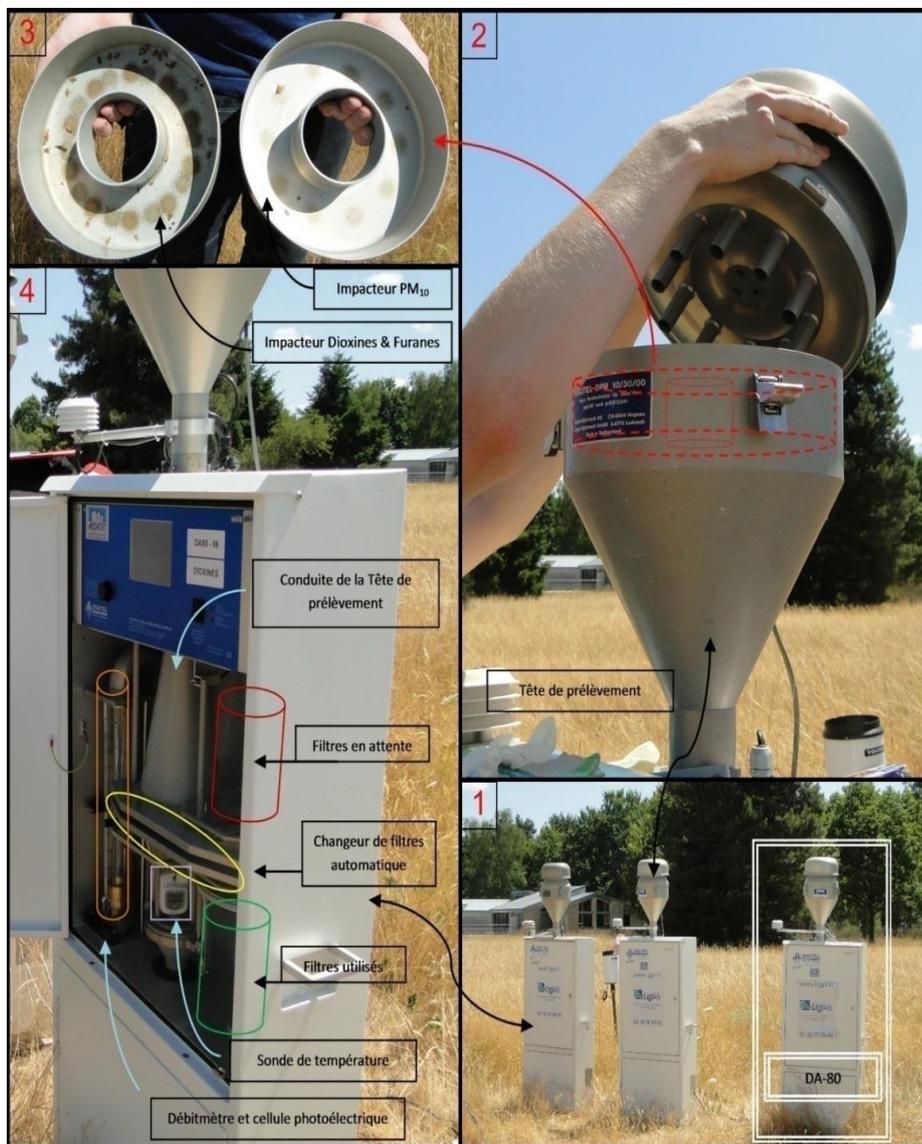
Lig'Air a produit récemment son nouveau Programme Régional de Surveillance de la Qualité de l'Air (PRSQA) pour la période 2017-2021. Un axe majeur de travail concerne l'amélioration de la connaissance des émissions de polluants atmosphériques, des concentrations dans l'air et de l'exposition à ces particules.

Aujourd'hui, les particules en suspension PM₁₀ restent un problème majeur en région Centre-Val de Loire notamment lors d'épisodes de pollution. Il existe cependant certaines interrogations, notamment sur l'import et l'export des particules au niveau de la région. Connaître la part de particules provenant de la région Centre-Val de Loire et des régions voisines reste un travail à réaliser. Ce travail pourra être réalisé via la modélisation et permettra d'agir plus précisément, lors d'épisodes de pollution, sur les territoires producteurs de grandes quantités de particules.

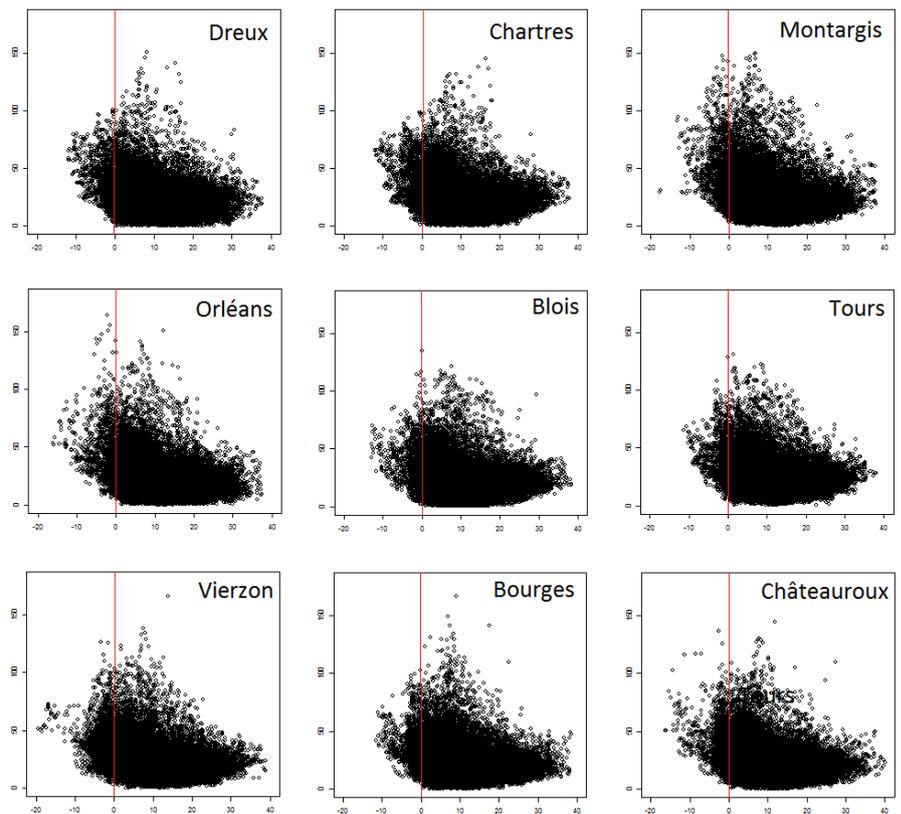
BIBLIOGRAPHIE

1. LOGAN, W. P. D. s.l, MORTALITY IN THE LONDON FOG INCIDENT, 1952. LOGAN, W. P. D.
2. C. Arden Pope III, Cardiovascular Mortality and Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution., PhD, et al. 2004.
3. Pascal M, de Crouy Chanel P, Corso M, Medina S, Wagner V, Gorla S, Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique [Online], 21 Juin 2016, Santé Publique France, <http://www.invs.sante.fr/Publications-et-outils/Rapports-et-syntheses/Environnement-et-sante/2016/Impacts-de-l-exposition-chronique-aux-particules-fines-sur-la-mortalite-en-France-continentale-et-analyse-des-gains-en-sante-de-plusieurs-scenarios-de-reduction-de-la-pollution-atmospherique>
4. LOI n° 96-1236 sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie. Legifrance. [Online] décembre 30, 1996. <http://www.legifrance.gouv.fr/>.
5. Directive 2008/50/CE du Parlement Européen et du Conseil.
6. 21 mai 2008. 2004/107/CE. 15 décembre 2004.
7. FONTAN, Jacques, Les pollutions de l'air, les connaître pour les combattre, Edition Vuibert, 2003, 194 pages
8. AIRPARIF, Synthèse des connaissances sur les particules en suspension dans l'air et des travaux d'airparif sur ces polluants [Online], Octobre 2008, http://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/biblio_particules_081022.pdf
9. AIRPARIF, Origine des particules respirées en Ile-de-France [Online], Dossier de presse du 14 Septembre 2011. http://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/synthese_particules_110914.pdf
10. DESCHEEMAECCKER, Maxence, Caractérisation chimique des particules en suspension dans la région Centre-Val de Loire, 2015, 53 pages.
11. SEIGNEUR, Christian, Environnement atmosphérique et qualité de l'air : Particules atmosphérique [Online]. http://cerea.enpc.fr/fich/support_cours/POLU1_2010-2011/VET-Particules.pdf
12. Arrêté préfectoral relatif à la gestion des épisodes de pollution atmosphérique pour le département du Loiret [Online], Octobre 2015. https://www.ligair.fr/media/Documents/AP_Gestion_des_episodes_de_la_PA_45.pdf

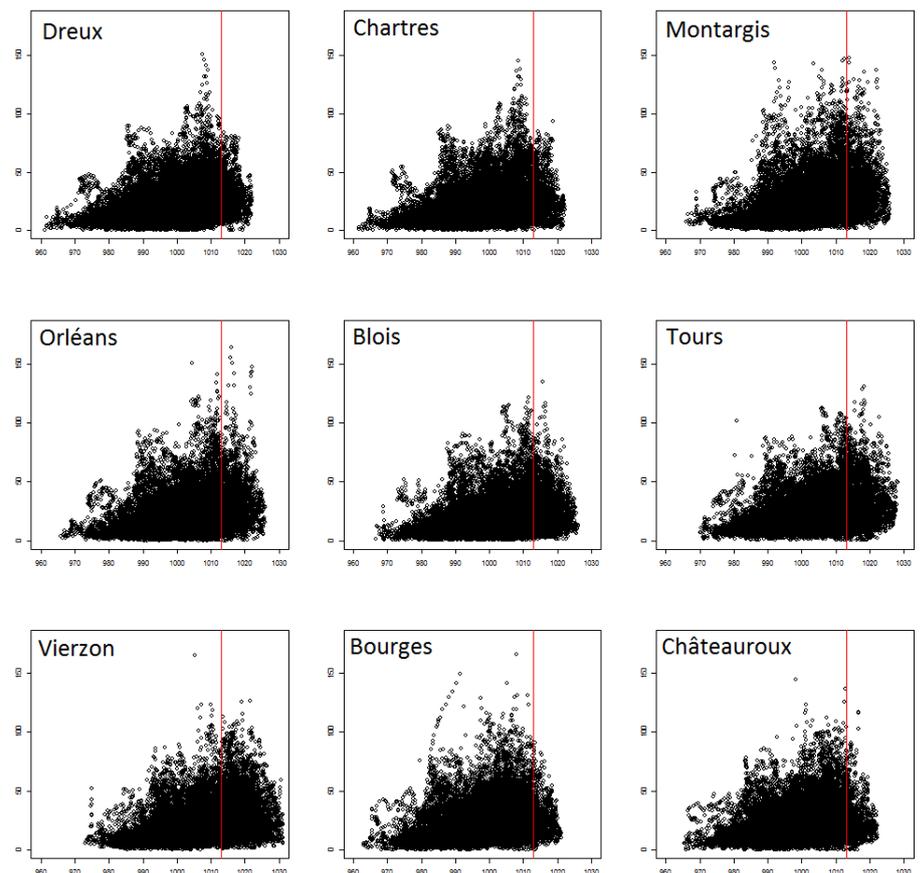
ANNEXE 1 : Appareil de mesure DIGITEL DA-80.



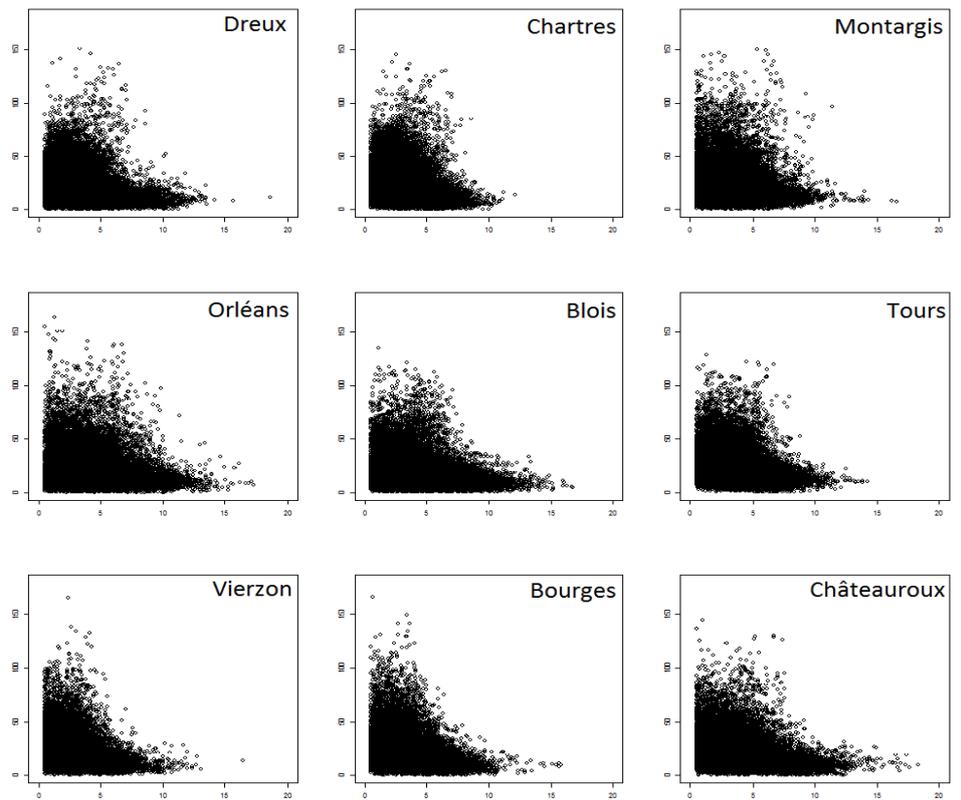
ANNEXE 2 : Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (unité 50) en fonction des températures en $^{\circ}\text{Celsius}$ (unité 10)



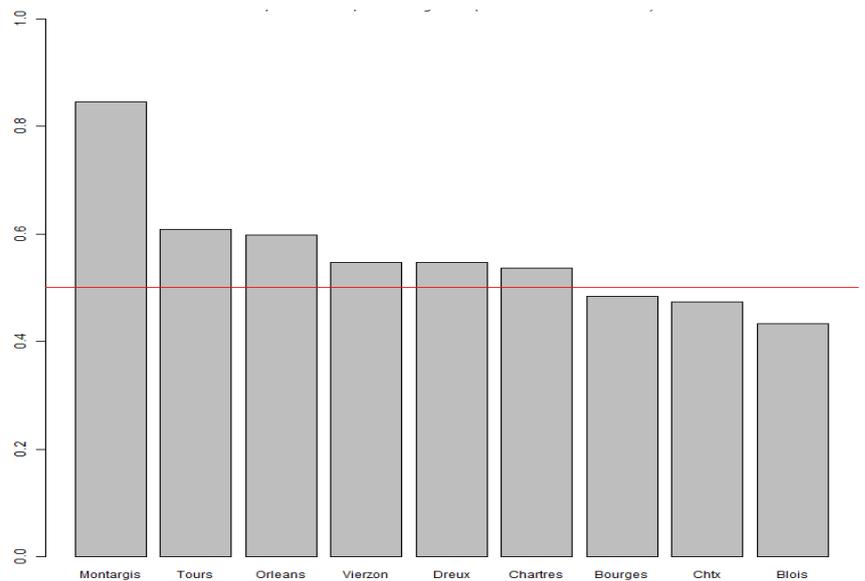
ANNEXE 3 : Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (unité 50) en fonction de la pression en hPa (unité 10)



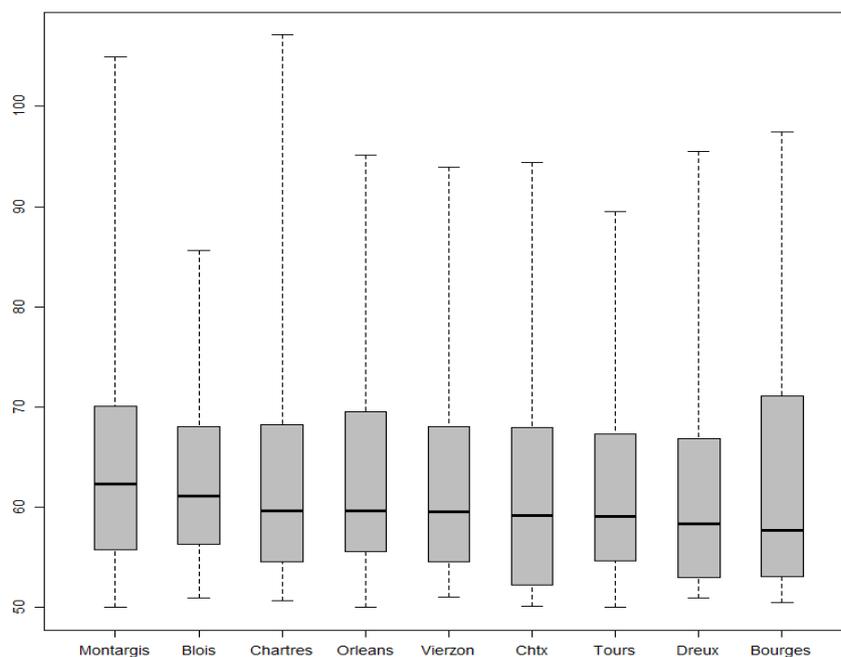
ANNEXE 4 : Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (unité 50) en fonction de la vitesse du vent en m/s (unité 5)



ANNEXE 5 : Répartition de la pollution régionale selon les villes de la région



ANNEXE 6 : Moyennes journalières des concentrations en PM₁₀ supérieures à 50 µg/m³



ANNEXE 7 : Exemple de données sur la composition des particules

Joué											
Début TU		23/3/15 10:22	31/3/15 10:22	19/5/15 9:30	27/5/15 9:30	3/9/15 9:08	11/9/15 9:08	1/12/15 11:00	9/12/15 11:00		
Fin TU		24/3/15 10:22	1/4/15 8:56	20/5/15 9:30	28/5/15 9:30	4/9/15 9:08	12/9/15 9:08	2/12/15 11:00	10/12/15 11:00		
Volume total prélevé (m ³)		722,24	674,85	722,5	729,5	721,3	726	710,2	701,6		
		Hiver	Hiver	Printemps	Printemps	Eté	Eté	Automne	Automne		
Elément	Chimique	Joue-230315	Joue-310315	Joue-190515	Joue-270515	Joue-030915	Joue-110915	Joue-011215	Joue-091215	Moyennes	
OC	[µg/m3]	4.42	1.77	1.48	2.70	1.87	4.79	7.47	4.83	3,67	
EC	[µg/m3]	0.73	0.27	0.31	0.54	0.45	1.53	1.77	2.12	0,97	
TC	[µg/m3]	5.15	2.04	1.79	3.24	2.31	6.32	9.24	6.95	4,63	
MSA	[ng/m3]	11.81	6.36	27.56	41.97	8.42	11.05	10.35	5.75	15,41	
Cl	[ng/m3]	62.59	6 132.13	1 617.96	19.22	165.87	26.42	1 440.69	2 179.09	1 455,50	
NO3	[ng/m3]	12 153.09	510.71	598.34	1 434.27	876.76	1 366.44	2 124.91	1 852.27	2 614,60	
SO4	[ng/m3]	1 882.83	1 231.95	740.78	1 444.34	730.84	1 539.45	1 103.55	769.13	1 180,36	
Ox	[ng/m3]	163.43	73.89	29.39	123.95	22.80	238.72	248.42	247.37	143,50	
Na	[ng/m3]	182.84	3 675.21	1 418.00	588.50	642.04	639.62	1 391.53	1 525.84	1 257,95	
NH4	[ng/m3]	4 095.75	160.86	75.72	572.15	153.61	472.11	400.12	440.94	796,41	
K	[ng/m3]	112.57	201.50	57.20	52.59	84.52	108.00	177.45	153.90	118,47	
Mg	[ng/m3]	24.60	259.32	67.99	36.22	40.17	46.40	110.94	126.73	89,05	
Ca	[ng/m3]	811.82	223.24	196.25	257.40	184.34	430.89	350.14	215.44	333,69	
arabitol	[ng/m3]	6.91	4.58	10.38	16.71	10.67	15.57	16.50	17.45	12,35	
sorbitol	[ng/m3]	0.52	0.47	<DL	<DL	<DL	0.89	<DL	<DL	0,63	
mannitol	[ng/m3]	2.41	3.28	7.74	9.85	18.35	16.74	14.21	6.47	9,88	
levoglucosan	[ng/m3]	402.76	227.16	26.94	31.14	15.69	55.79	1 179.99	730.69	333,77	
mannosan	[ng/m3]	22.85	9.00	1.06	2.94	<DL	4.94	104.53	68.94	30,61	
galactosan	[ng/m3]	13.11	6.24	1.22	1.35	<DL	2.56	34.76	25.30	12,08	
glucose	[ng/m3]	5.44	5.03	12.77	6.65	17.51	19.68	19.20	13.91	12,52	
PM10 mesurées	[µg/m3]	29,38	18,30	6,93	13,39	8,68	22,33	27,82	25,68		
PM10 reconstituées Ca	[µg/m3]	30,86	13,87	8,14	10,97	7,56	16,31	22,19	17,29		
PM10 reconstituées Air	[µg/m3]	32,58	16,30	8,55	11,13	7,59	17,08	23,99	18,97		

ANNEXE 8 : Prédominance des composés selon la température

Composé	T ≈ 0°C	T > 5°C	Non défini
OC			x
EC			x
Cl		x	
NO ₃	x	x	
nssSO ₄			x
Na		x	
NH ₄	x	x	
K	x		
Mg		x	
Ca		x	
levoglucosan	x		
Sucres		x	

ANNEXE 9 : Origines du Sodium et du Magnésium, deux des trois sels marins

