

Les particules

Caractérisation chimique

Bilans annuels 2019, 2020, 2021, 2022

Période de mesure : 2019, 2020, 2021, 2022

Communes et départements d'étude : Talence (33), Poitiers (86), Limoges (87)

Référence : R&D_INT_22_028

Version du : 20/12/2023

Auteur(s) : Perrine Jankowski - Ingénieure études, Florie Francony - Ingénieure études
Vérification du rapport : Rémi Feuillade, Directeur Délégué
Validation du rapport : Rémi Feuillade, Directeur Délégué

Avant-Propos

Titre : Les particules – Caractérisation chimique, Bilan annuel 2019, 2020, 2021, 2022

Reference : R&D_INT_22_028

Version : 20/12/2023

Selon offre n° : Prescriptions internes

Nombre de pages : 100 (couverture comprise)

Conditions d'utilisation

Atmo Nouvelle-Aquitaine fait partie du dispositif français de surveillance et d'information sur la qualité de l'air. Sa mission s'exerce dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996 et de ses décrets d'application.

À ce titre et compte tenu de ses statuts, Atmo Nouvelle-Aquitaine est garant de la transparence de l'information sur les résultats de ces travaux selon les règles suivantes :

- Atmo Nouvelle-Aquitaine est libre de leur diffusion selon les modalités de son choix : document papier, communiqué, résumé dans ses publications, mise en ligne sur son site internet (www.atmo-nouvelleaquitaine.org)
- les données contenues dans ce rapport restent la propriété d'Atmo Nouvelle-Aquitaine. En cas de modification de ce rapport, seul le client sera informé d'une nouvelle version. Tout autre destinataire de ce rapport devra s'assurer de la version à jour sur le site Internet de l'association.
- en cas d'évolution de normes utilisées pour la mesure des paramètres entrant dans le champ d'accréditation d'Atmo Nouvelle-Aquitaine, nous nous engageons à être conforme à ces normes dans un délai de 6 mois à partir de leur date de parution
- toute utilisation de ce document doit faire référence à Atmo Nouvelle-Aquitaine et au titre complet du rapport.

Atmo Nouvelle-Aquitaine ne peut en aucune façon être tenu responsable des interprétations, travaux intellectuels, publications diverses résultant de ses travaux pour lesquels l'association n'aurait pas donné d'accord préalable. Dans ce rapport, les incertitudes de mesures ne sont pas prises en compte lors de comparaison à un seuil réglementaire

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Atmo Nouvelle-Aquitaine :

- depuis le [formulaire de contact](#) de notre site Web
- par mail : contact@atmo-na.org
- par téléphone : 09 84 200 100

Validation numérique du rapport, le

Sommaire

1. Contexte	9
2. Les particules.....	10
2.1. Mécanisme de formation	10
2.2. Distribution en taille.....	10
2.3. Composition chimique.....	11
2.4. Impacts.....	12
3. Moyens mis en œuvre	13
3.1. Polluants suivis et méthodes de mesure	13
3.2. Appareils de mesure	13
3.2.1. Aethalomètre [AE33].....	13
3.2.2. Spectromètre de masse [ACSM]	14
3.3. Sites de mesure.....	15
3.3.1. Bordeaux-Talence	16
3.3.2. Poitiers-Augouard.....	17
3.3.3. Limoges-Berland	17
3.4. Taux de fonctionnement	18
3.4.1. Taux de fonctionnement annuel	18
3.4.2. Taux de fonctionnement mensuel.....	19
4. Conditions météorologiques	20
4.1. Températures et précipitations.....	20
4.1.1. Bordeaux - Mérignac	20
4.1.2. Poitiers - Biard.....	22
4.1.3. Limoges - Bellegarde.....	24
4.2. Roses des vents.....	26
4.2.1. Bordeaux – Mérignac.....	27
4.2.2. Poitiers - Biard.....	29
4.2.3. Limoges - Bellegarde.....	31
5. Résultats	33
5.1. Le carbone suie ou Black Carbon [BC].....	33
5.1.1. Statistiques descriptives	33
5.1.2. Evolution annuelle	36
5.1.3. Evolution mensuelle.....	37
5.1.4. Evolution journalière.....	41
5.1.5. Profils journaliers.....	45
5.1.6. Corrélation avec les autres polluants	51
5.1.7. Influence météorologique et origine de la pollution	63

5.2.	Matière organique et ions majeurs.....	68
5.2.1.	Statistiques descriptives	68
5.2.2.	Évolution journalière.....	69
5.2.3.	Evolution mensuelle.....	73
5.2.4.	Profils journaliers.....	78
5.2.5.	Influence météorologique et origine de la pollution	81
6.	Conclusions	85

Annexes

ANNEXE 1 : Bibliographie.....	89
ANNEXE 2 : Comparaisons aux normales Météo France	92
ANNEXE 3 : Lecture des roses des vents et des roses de pollution.....	98
ANNEXE 4 : Représentation statistique des données à l'aide de « boxplot ».....	99

Lexique

Polluants

→ BC	Black Carbon ou carbone suie
→ BC _{ff}	Black Carbon issu de la combustion de fuel fossile
→ BC _{tot}	Black Carbon total, identique au Black Carbon (BC)
→ BC _{wb}	Black Carbon issu de la combustion de la biomasse
→ Cl ⁻	Ion chlorure
→ COV	Composés Organiques Volatils
→ EC	Carbone élémentaire
→ H ₂ S	Sulfure d'hydrogène
→ H ₂ SO ₄	Acide sulfurique
→ NH ₃	Ammoniac
→ NH ₄ ⁺	Ion ammonium
→ NH ₄ NO ₃	Nitrate d'ammonium
→ NH ₄ HSO ₄	Sulfate d'ammonium hydrogéné
→ (NH ₄) ₂ SO ₄	Sulfate d'ammonium
→ NO ₃ ⁻	Ion nitrate
→ NO _x	Oxydes d'azote
→ OM	Matière organique
→ PM ₁₀	Particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm (particules grossières)
→ PM _{2,5}	Particules de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm (particules fines)
→ PM ₁	Particules de diamètre aérodynamique inférieur à 1 µm (particules fines)
→ PM _{0,1}	Particules de diamètre aérodynamique inférieur à 100 nm (particules ultrafines)
→ SO ₄ ²⁻	Ion sulfate
→ SO _x	Oxydes de soufre

Unités de mesure

→ µg	Microgramme (= 1 millionième de gramme = 10 ⁻⁶ g)
→ m ³	Mètre cube
→ part./cm ³	Nombre de particules par centimètre cube
→ nm	Nanomètre (10 ⁻⁹ m)
→ L/min	Litre par minute

Abréviations

→ ACSM	Aerosol Chemical Speciation Monitor
→ AE33	Aethalomètre modèle AE33
→ LCSQA	Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air
→ PUF	Particules UltraFines
→ PRSE	Plan Régional Santé Environnement
→ TU	Temps Universel

Définitions

Particules

- **Black Carbon Fuel Fossile (BC_{ff})** : Black Carbon issu de la combustion de fuel fossile, essentiellement du trafic routier en milieu urbain
- **Black Carbon Wood Burning (BC_{wb})** : Black Carbon issu de la combustion de la biomasse (chauffage au bois, brûlage de déchets verts ou encore feux de forêt)
- **Black Carbon ou Black Carbon Total (BC ou BC_{tot})** : Composé primaire issu d'une combustion incomplète des combustibles carbonés provenant de la combustion de fuel fossile et de la combustion de biomasse
$$BC = BC_{tot} = BC_{ff} + BC_{wb}$$
- **Diamètre aérodynamique (D_p)** : Diamètre d'une particule sphérique, de masse volumique de 1 g/cm³ et ayant la même vitesse de chute que la particule considérée
- **Granulométrie (Distribution granulométrique)** : Mesure de la taille des particules dans l'atmosphère, détermination de leur forme et étude de leur répartition dans différents intervalles de tailles.
- **Particules en suspension** : Toutes les particules présentes dans l'atmosphère
- **Particules grossières (PM₁₀)** : Particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 µm
- **Particules fines (PM_{2,5})** : Particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 2,5 µm
- **Particules fines (PM₁)** : Particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 1 µm
- **Particules ultrafines (PM_{0,1})** : Particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 0,1 µm

Stations

- **Influence de fond** : Station de mesure qui permet le suivi du niveau d'exposition de la majorité de la population aux phénomènes de pollution dits de « fond » dans les centres urbains, périurbains ou en milieu rural. Les mesures sont représentatives de l'air respiré par la majorité des habitants de ces zones.
- **Influence industrielle** : Représente l'exposition maximale sur les zones soumises directement à une pollution d'origine industrielle.
- **Influence trafic** : Représente l'exposition maximale sur les zones soumises à une forte circulation urbaine et routière.

Météorologie

- **Extrême maximale (Record)** : Valeur la plus élevée enregistrée au cours de la période
- **Extrême minimale (Record)** : Valeur la plus basse enregistrée au cours de la période
- **Normales** : Représentent le climat d'une période donnée. Elles sont calculées sur 30 ans et mises à jour toutes les décennies. Les normales climatiques sont calculées à partir des valeurs mensuelles obtenues pendant les périodes de référence.
 - Maximale : La température normale maximale du mois de janvier est calculée en moyennant les températures mensuelles les plus élevées des 30 mois de janvier de la période étudiée.
 - Minimale : La température normale minimale du mois de janvier est calculée en moyennant les températures mensuelles les plus basses des 30 mois de janvier de la période étudiée.
 - Moyenne : La température normale du mois de janvier est calculée en moyennant les températures moyennes mensuelles des 30 mois de janvier de la période étudiée.
- **Rose des vents** : Est une représentation complète du vent, sur un site donné, pendant une période d'observation d'au moins un mois. Elle regroupe :
 - les fréquences des directions d'où vient le vent
 - les fréquences de force du vent pour chaque direction de vent.En dessous d'une vitesse de 1 m.s⁻¹, on parle de vents faibles. Ces vents ne sont pas pris en compte dans les roses des vents présentées dans ce rapport car leur direction n'est pas établie.
- **Rose de pollution** : permet de localiser les différences de concentrations d'un polluant en fonction de la direction et de la force du vent

Statistiques

- **Maximum** : Plus grande valeur que l'on retrouve dans un échantillon
- **Minimum** : Plus petite valeur que l'on retrouve dans un échantillon
- **Moyenne** : Indicateur le plus simple permettant de réduire tout un échantillon de valeurs à une seule. Elle est égale à la somme de toutes les valeurs, divisée par leur nombre.
- **Médiane** : Valeur centrale d'une série statistique dont les valeurs observées ont été rangées dans l'ordre croissant. La moitié des observations lui sont inférieures ou égales et la moitié des observations lui sont supérieures ou égales.
- **Quartile** : Chacune des trois valeurs qui divisent les données triées en quatre parts égales, de sorte que chaque partie représente 1/4 de l'échantillon de population
 - le 1^{er} quartile est la donnée de la série qui sépare les 25 % inférieurs des données (Q1)
 - le 2^{ème} quartile est la donnée de la série qui sépare les 50 % inférieurs des données (Q2)
 - le 3^{ème} quartile est la donnée de la série qui sépare les 75 % inférieurs des données (Q3)
- **P90** : Les centiles ou percentiles sont les valeurs qui séparent les données triées en 100 parts égales, de sorte que chaque partie représente 1/100 de l'échantillon des valeurs. Les centiles permettent de mesurer la dispersion d'un échantillon.
 - le 1^{er} centile sépare le 1 % inférieur des données
 - le 90^{ème} centile sépare les 90 % inférieurs des données, si la valeur se situe dans le 90^{ème} percentile, cela signifie que cette valeur est supérieure à 90 % des valeurs de l'échantillon.
- **Boxplot ou boîtes à moustaches** : Est une représentation graphique de données statistiques. Elle permet de comparer la dispersion des valeurs dans un échantillon. Elle résume la série de données en quelques indicateurs : médiane, quartiles, minimum, maximum, ou déciles.

Divers

- **Conversion entre l'heure locale et l'heure universelle (UTC) :**
 - D'octobre à avril (hiver) : heure locale = heure UTC + 1h
 - D'avril à octobre (été) : heure locale = heure UTC + 2h.

Résumé

Depuis plusieurs années, la composition chimique des particules est suivie sur 3 sites de la région Nouvelle-Aquitaine : Bordeaux-Talence, Poitiers-Augouard et Limoges-Berland. Ces données apportent une meilleure compréhension des particules, comme l'origine et la contribution des différentes sources d'émissions. Le Black Carbon ou carbone suie (BC), la matière organique (OM) et les ions majeurs (ions chlorure (Cl^-), ammonium (NH_4^+), nitrate (NO_3^-) et sulfate (SO_4^{2-})) sont étudiés.

En fond urbain, plusieurs sources de particules ont été identifiées :

Le **trafic routier** émet du Black Carbon issu de la combustion de fuel fossile (BC_{fr}) et de la matière organique (OM), il entre également en jeu dans la formation de particules secondaires (nitrate d'ammonium notamment). La combustion de fuel fossile, provenant en majeure partie du trafic routier en milieu urbain, est une source de pollution présente tout au long de l'année. La part de combustion de fuel fossile représente annuellement environ 10 % des PM_{10} . Mensuellement, les particules issues de cette source de combustion (PM_{fr}) représentent entre 5 à 20 % des PM_{10} . Certains jours, la combustion de fuel fossile peut contribuer jusqu'à 49 % des PM_{10} sur des concentrations moyennes journalières.

L'année 2020 a été marquée par le Covid19 et ses mesures sanitaires contraignantes (confinements et limitations de déplacement), entraînant une réduction de trafic. Cette baisse de trafic est visible sur les concentrations, ainsi que sur les évolutions annuelles, mensuelles et journalières de Black Carbon issu de combustions d'origine fossiles.

L'impact du **chauffage résidentiel au bois** est visible à travers le Black Carbon (BC_{wb}) issu de la combustion de biomasse et un apport supplémentaire en matière organique (OM) en hiver. Les concentrations en BC_{wb} et en matière organique présentent un profil marqué par le chauffage résidentiel. Les particules PM_{wb} , issues de la combustion de biomasse, représente annuellement, environ 20 % des PM_{10} : 21,3 % sur Bordeaux-Talence, 18,6 % sur Limoges-Berland et 17,8 % sur Poitiers-Augouard. Les variations saisonnières sont importantes avec des contributions de cette source nettement plus hauts en hiver qu'en été, pouvant aller de 6 % à 45 % des concentrations en particules PM_{10} . Certains jours, la combustion de la biomasse peut contribuer jusqu'à 93 % des PM_{10} sur les concentrations moyennes journalières.

Enfin, les **particules secondaires** jouent aussi un rôle non négligeable dans les concentrations en particules mesurées. En effet, la période froide est caractérisée par la présence de nitrates (NO_3^-) provenant de l'oxydation des oxydes d'azote (NO_x , issus principalement du transport routier) stabilisés par association avec l'ammoniac (NH_3 , émis principalement par les activités agricoles), tandis qu'en période chaude, les sulfates (SO_4^{2-}) remplacent les nitrates car les fortes conditions d'ensoleillement accélèrent l'oxydation photochimique du dioxyde de soufre (SO_2), émis par des combustions fossiles contenant du soufre (fioul, charbon, etc.).

1. Contexte

En charge de la surveillance de la qualité de l'air, Atmo Nouvelle-Aquitaine dispose d'un réseau de stations fixes implantées sur l'ensemble de la région afin de suivre en continu l'évolution des polluants réglementés. Parmi les polluants réglementés, les particules suscitent un intérêt particulier du fait :

- de leur impact sur la santé, l'environnement et le climat,
- des dépassements récurrents de valeur limite sur le territoire français et sur la région, dont l'agglomération bordelaise sur la période 2007-2010,
- de leurs origines multiples (trafic, chauffage, agriculture, particules d'origine secondaire, etc.)

La réglementation en air ambiant a historiquement été basée sur la masse des particules dans l'air, du fait des technologies métrologiques disponibles. La directive 1996/62/CE¹ a ainsi focalisé les efforts sur les PM₁₀, particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm. La directive 2008/50/CE² a ensuite complété la réglementation sur les particules plus fines, à savoir les PM_{2,5}, particules de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm. À l'heure actuelle, les valeurs réglementaires relatives aux particules s'intéressent encore uniquement aux concentrations massiques.

Depuis plusieurs années, l'intérêt croissant pour la surveillance des particules de très petites tailles et pour leur caractérisation chimique a conduit Atmo Nouvelle-Aquitaine à mettre en place un plan de surveillance spécifique pour les particules fines.

- ➔ Dans le cadre du PRSE 2009-2013 d'Aquitaine, AIRAQ, aujourd'hui devenu Atmo Nouvelle-Aquitaine, a mené des mesures exploratoires de particules fines et ultrafines sur deux stations de mesures, à savoir :
 - la station urbaine de fond de Bordeaux-Talence, située dans l'agglomération bordelaise, qui est la station de référence pour tous les projets ayant trait aux particules,
 - la station sous influence industrielle de Mourenx (puis sur la station de Lacq), située dans le bassin de Lacq.
- ➔ Des travaux sont également menés, en collaboration avec le LCSQA sur deux stations, aujourd'hui stations de référence « particules » de la région Nouvelle-Aquitaine, dans le but d'étudier la composition chimique des particules :
 - la station urbaine de fond de Bordeaux-Talence,
 - la station urbaine de fond de Poitiers-Augouard, située dans la Communauté Urbaine du Grand Poitiers.
- ➔ Depuis début 2019, la station urbaine de fond de Limoges-Berland, située dans la Communauté Urbaine Limoges Métropole permet également d'étudier une partie de la composition chimique des particules.

Les données recueillies, comme la composition chimique, la concentration en nombre et la distribution granulométrique apportent des informations complémentaires et contribuent à une meilleure compréhension des particules. Ces connaissances aident ainsi à l'évaluation de la provenance et de la contribution des différentes sources d'émissions, permettant ensuite de cibler les secteurs émetteurs lors la mise en œuvre de politiques urbaines. La composition des particules en zones urbaines est particulièrement complexe de par la multitude des sources d'émissions et des mécanismes de transformation physico-chimique impliqués.

Aujourd'hui, quatre stations permettent le suivi des particules, au-delà du réglementaire : Bordeaux-Talence, Poitiers-Augouard et Limoges-Berland, stations urbaines de fond, où sont mesurées les particules fines et ultrafines ainsi que leur composition chimique, et Lacq, station rurale sous influence industrielle, pour le suivi des particules fines et ultrafines. Ce document présente les bilans annuels de la composition chimique des particules fines pour les années 2019, 2020, 2021 et 2022.

¹ Directive 96/62/CE du conseil du 27 septembre 1996 concernant l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air ambiant

² Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe

2. Les particules

2.1. Mécanisme de formation

Les aérosols sont émis dans l'atmosphère par une grande variété de sources et par des mécanismes de formation différents, leur conférant des tailles et des compositions chimiques variées. Les particules peuvent être d'origine naturelle, telles que les poussières minérales ou les cendres volcaniques, mais également d'origine anthropique comme les particules issues de la combustion de fuel fossile. Deux types d'aérosols peuvent être distingués selon leur processus de formation :

- ➔ les aérosols primaires émis directement dans l'atmosphère par différents mécanismes : par action mécanique du vent sur les roches, les sols ou les sables, par des processus de combustion tels que les feux de forêts ou les unités d'incinération, par les éruptions volcaniques, par des processus biologiques conduisant à l'émission de pollens ou de débris végétaux, par des activités industrielles telles que la construction de bâtiments ou encore par usure de matériaux de synthèse tels que les pneus et les revêtements des routes.
- ➔ les aérosols secondaires formés dans l'atmosphère par des processus de transformation et de condensation de composés gazeux. Certains composés gazeux, appelés précurseurs d'aérosols, peuvent conduire, à travers diverses transformations chimiques, telles que l'oxydation, à des composés de plus faibles tensions de vapeur se condensant et formant la matière particulaire. Les principaux précurseurs gazeux sont les Composés Organiques Volatiles (COV), les oxydes de soufre et d'azote (SO_x , NO_x) et l'ammoniac (Buseck and Adachi, 2008; Seinfeld and Pandis, 2006).

2.2. Distribution en taille

L'atmosphère est un milieu essentiellement gazeux dans lequel se trouvent des particules sous forme solide ou liquide appelées communément aérosols atmosphériques. La diversité des sources et des mécanismes d'émission induit une multiplicité de particules de tailles et de compositions chimiques variées. Ces particules peuvent avoir un diamètre aérodynamique allant de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de micromètres. Les particules de diamètre inférieur à $2,5 \mu\text{m}$ sont dites « fines » tandis que les particules de diamètre supérieur à $2,5 \mu\text{m}$ sont dites « grossières ». Dans une atmosphère moyenne, il existe quatre modes principaux de distribution (Seinfeld and Pandis, 1998; Whitby, 1978) :

- ➔ **le mode ultrafin** (ou mode de nucléation) représentant les aérosols de **diamètre (D_p) inférieur à $0,02 \mu\text{m}$** , formés par condensation de vapeur lors de processus de combustion ou par nucléation de molécules de gaz. Du fait de leur très grand nombre, et en particulier proches des sources de combustion, ces particules coagulent très rapidement, formant des noyaux de condensation (CCN, Cloud Condensation Nuclei). Ce type de particules a donc une faible durée de vie dans l'atmosphère et évolue rapidement vers le mode d'accumulation.
- ➔ **le mode d'Aitken** (aérosols dont le **diamètre est compris entre $0,02$ et $0,1 \mu\text{m}$**), souvent **regroupé avec le mode ultrafin**, provenant principalement de la coagulation de particules ultrafines (Kulmala et al., 2004).
- ➔ **le mode fin** ou mode d'accumulation (aérosols dont le **diamètre est compris entre $0,1 \mu\text{m}$ et $2,5 \mu\text{m}$**) comprenant les particules de combustion et les particules résultant de la condensation de vapeur sur les particules de ce mode et de la coagulation des particules du mode de nucléation. Ces particules sont petites mais coagulent trop lentement pour atteindre le mode grossier. Ainsi, elles ont une durée de vie relativement longue (environ deux semaines) et contribuent aux effets de visibilité des aérosols atmosphériques. Elles sont éliminées par dépôts secs ou humides (Anastasio and Martin, 2001).

➔ **le mode grossier** représentant les aérosols de **diamètre supérieur à 2,5 µm** formés par des processus mécaniques anthropiques, tels que l'agriculture, l'industrie, les exploitations minières, et naturels, tels que le soulèvement de poussières désertiques ou les embruns marins. Du fait de leur taille, les particules grossières se déposent rapidement à la surface de la Terre et sont éliminées par sédimentation, ainsi leur durée de vie dans l'atmosphère est de seulement quelques heures (Buseck and Adachi, 2008).

Les particules sont caractérisées par leur taille, leur volume, leur surface spécifique et leur nombre et sont généralement représentées par une distribution granulométrique. D'un point de vue réglementaire, les particules sont différenciées selon leur diamètre aérodynamique. On distingue les PM₁₀ de diamètre inférieur à 10 µm, les PM_{2,5} de diamètre inférieur à 2,5 µm et les PM₁ de diamètre inférieur à 1 µm.

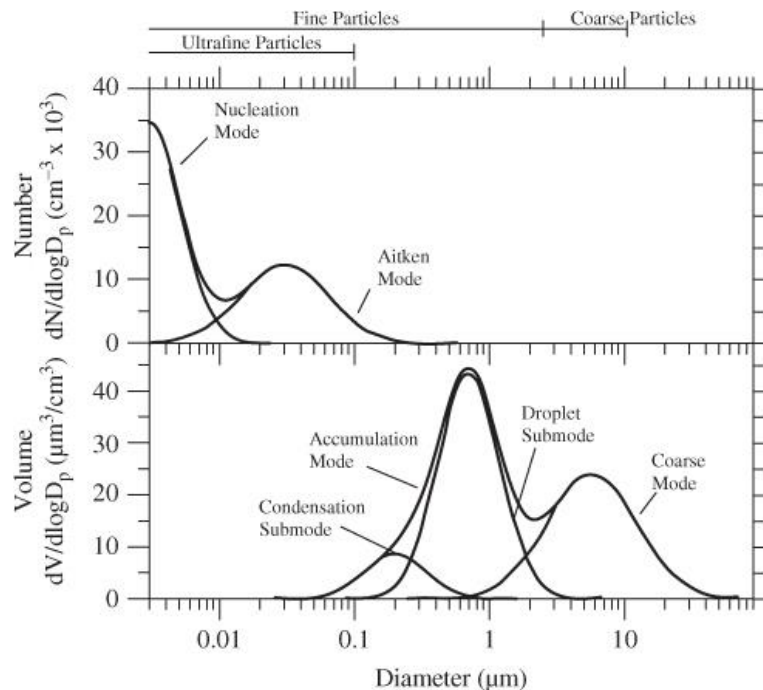


Figure 1 | Distribution en nombre et en volume des particules atmosphériques en fonction du diamètre (Seinfeld and Pandis, 1998)

Les particules atmosphériques grossières constituent la fraction granulométrique la plus importante en masse. Ce sont des particules primaires naturelles ou anthropiques issues de processus mécaniques d'émissions (poussières terrigènes, embruns marins, particules volcaniques, débris de pneus, débris végétaux, pollens, etc.) (Kiehl and Rodhe, 1995; Lelieveld et al., 2002; Putaud et al., 2004a). Les particules fines et ultrafines ne représentent, quant à elles, pas plus de quelques pourcents de la masse totale des particules mais sont les plus importantes en nombre. Ce sont des particules primaires anthropiques telles que les suies ou secondaires naturelles et anthropiques (sulfates, ammonium, composés organiques) issues de processus chimiques (Kiehl and Rodhe, 1995; Lelieveld et al., 2002; Putaud et al., 2004a).

2.3. Composition chimique

Les particules atmosphériques sont constituées d'une très grande variété de composés chimiques organiques et inorganiques. Leur composition chimique varie suivant leurs sources d'émission mais également les processus physico-chimiques qui ont lieu au cours du transport des particules. Les aérosols sont constitués d'eau, de matière carbonée, d'espèces ioniques, de métaux et d'éléments traces. La proportion de chaque composé varie suivant l'origine des particules. En effet, un aérosol d'origine naturelle est constitué principalement d'espèces ioniques, de métaux et d'éléments traces tandis que les aérosols d'origine anthropique sont caractérisés par des proportions de matière carbonée plus importantes (Heintzenberg, 1989; Heintzenberg et al., 2000; Putaud et al., 2004b).

La fraction carbonée est constituée de matière organique (OM) et de carbone élémentaire (EC) et peut représenter jusqu'à plus de 70 % de la masse des PM (Favez et al., 2010; Jimenez et al., 2009). Les composés organiques formant l'OM sont extrêmement nombreux et il est impossible d'identifier et de quantifier l'ensemble de ces composés. Le sulfate non marin (SO_4^{2-}), le nitrate (NO_3^-) et l'ammonium (NH_4^+) représentent une part importante de la fraction ionique de l'aérosol atmosphérique et sont majoritairement d'origine secondaire, issus de gaz précurseurs pouvant être d'origine naturelle ou anthropique (Seinfeld and Pandis, 1998). La composante minérale, d'origine terrigène ou anthropique (remise en suspension de particules par les véhicules par exemple), est constituée de métaux tels que l'aluminium, le silicium, le fer, etc. et peut représenter jusqu'à 25 % de la masse des PM sur des sites sous influence de zones arides ou de transport longue distance de poussières crustales (Putaud et al., 2004b). Enfin, la composante marine constituée de chlorure, de sodium, de magnésium, de calcium et de potassium représente une part importante des aérosols naturels. Cette part diminue lorsque le site d'étude est éloigné d'une côte.

2.4. Impacts

La nocivité des particules dépend de leur composition mais également de leur taille. En effet, les particules les plus fines (diamètre inférieur à $2,5 \mu\text{m}$) peuvent pénétrer profondément dans le système respiratoire et atteindre les bronchioles et alvéoles pulmonaires (pour les particules inférieures à $0,1 \mu\text{m}$ de diamètre), tandis que les particules de taille plus importante sont arrêtées par les voies respiratoires supérieures (Berico et al., 1997; Oberdörster et al., 2005; Terzano et al., 2010).

Les principaux effets de cette pollution par les particules sont essentiellement des troubles respiratoires tels que l'asthme, le cancer du poumon ou l'arythmie cardiaque. Des études ont également montrées que les particules fines pouvaient être à l'origine de problèmes de diabète, de reproduction ou de malformations chez les nouveau-nés (Delfino et al., 2005; Donaldson et al., 2001; Gehring et al., 2010; Strickland et al., 2009).

3. Moyens mis en œuvre

3.1. Polluants suivis et méthodes de mesure

Caractéristique mesurée	Matériel	Référence et/ou principe de la méthode	Accréditation
Concentration en oxydes d'azote (NO _x)	Analyseurs automatiques	NF EN 14211 - Dosage du dioxyde d'azote et du monoxyde d'azote par chimiluminescence	 ACCREDITATION COFRAC N° 1-6354* Portée disponible sur www.cofrac.fr
Concentration en dioxyde de soufre (SO ₂)		NF EN 14212 - Dosage du dioxyde de soufre par fluorescence UV	
Concentration en ozone (O ₃)		NF EN 14625 - Dosage de l'ozone par photométrie UV	
Concentration en particules (PM ₁₀ ; PM _{2,5})		NF EN 16450 - Systèmes automatisés de mesurage de la concentration de matière particulaire (PM ₁₀ ; PM _{2,5})	
Distribution granulométrique de particules (Diamètre 20 nm – 800 nm)		Mesure via UFP 3031 : Tri des particules par classe de taille (en fonction de leur mobilité électrique), puis comptage à l'aide d'un électromètre	Pas d'accréditation
Distribution granulométrique de particules (Diamètre 150 nm – 15 µm)		Mesure optique via Fidas : mesure de la diffusion de lumière blanche par les particules. <i>Cette méthode permet une identification du niveau de PM₁ (hors équivalence de méthode de référence validée par la directive européenne)</i>	
Comptage de particules (Diamètre 7 nm – 1 µm)		Mesure via un compteur de particules CPC (Condensation Particle Counter) : compteur de particules à condensation	
Concentration en black carbon		Mesure via un aethalomètre : Atténuation de l'intensité d'un faisceau lumineux à travers un échantillon de poussières déposées sur filtre	
Caractérisation chimique des particules		Mesure via un spectromètre de masse ACSM (Aerosol Chemical Speciation Monitor)	

Figure 2 | Matériel et méthodes de mesure

* Les avis et interprétations ne sont pas couverts par l'accréditation COFRAC d'Atmo Nouvelle-Aquitaine. Toute utilisation des données d'Atmo Nouvelle-Aquitaine, couvertes par l'accréditation doit faire mention : "Ces essais ont été réalisés par Atmo Nouvelle-Aquitaine – Accréditation n°1-6354, portée disponible sous www.cofrac.fr", sans y associer le logo COFRAC et préciser que les rapports d'Atmo Nouvelle-Aquitaine sont disponibles sur demande ou joindre ces derniers dans leur intégralité au document rapportant ces résultats.

3.2. Appareils de mesure

3.2.1. Aethalomètre [AE33]

La combustion de matière carbonée (gaz, pétrole, charbon et biomasse) émet de nombreux polluants atmosphériques gazeux ou particulaires. Une grande partie de ces aérosols carbonés, dont le carbone suie appelé « Black Carbon » (BC), absorbent la lumière. Ce composé est un traceur primaire issu exclusivement d'une combustion incomplète de ces combustibles carbonés. Il est également inerte dans l'atmosphère et peut ainsi parcourir de très longues distances (Bodhaine, 1995; Hansen et al., 1989; Sciare J. et al., 2009).

L'Aethalomètre modèle AE33 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) permet de déconvoluer deux sources de BC par mesure optique grâce à l'utilisation des caractéristiques d'absorption de ces sources de combustion : la combustion de la biomasse (wb) et les sources de combustion de fuel fossile (ff), toutes deux émettrices de BC (Favez et al., 2010; Herich et al., 2011; Sandradewi et al., 2008a, 2008b). En effet, les aérosols provenant

majoritairement de la combustion de biomasse, aussi appelés « Brown Carbon », sont constitués de certaines molécules organiques absorbant les longueurs d'onde proches de l'ultraviolet (400 nm) (Kocbach et al., 2006; Sun et al., 2007), tandis que les aérosols provenant de combustions fossiles, purement graphitiques, absorbent dans le proche infrarouge (850 - 900 nm) (Kirchstetter et al., 2004).



Figure 3 | AE33, Photo d'un Aethalomètre

La concentration totale en black carbon est alors donnée suivant l'expression :

$$BC = BC_{ff} + BC_{wb}$$

où BC est la concentration en black carbon total (mesurée à 880 nm), BC_{ff} est la concentration en BC issu de la combustion de fuel fossile (essentiellement du trafic routier) et BC_{wb} est la concentration en BC issu de la combustion de la biomasse (chauffage au bois, brûlage de déchets verts et feux de forêt).

3.2.2. Spectromètre de masse [ACSM]

L'ACSM (Aerosol Chemical Speciation Monitor), développé par la société Aerodyne Res. Inc., est un spectromètre de masse qui permet de caractériser, en temps réel, la composition chimique des particules submicroniques (PM_{10} , particules de diamètre aérodynamique inférieur à 1 μm) non-réfractaires, c'est-à-dire qui ont une température de volatilisation inférieure à 600 °C comme c'est le cas du sulfate (SO_4^{2-}), du nitrate (NO_3^-), du chlorure (Cl^-), de l'ammonium (NH_4^+) et du carbone organique (OC) (Docherty et al., 2015).



Figure 4 | ACSM, Photo d'un spectromètre « Aerosol Chemical Speciation Monitor »

Cet instrument est constitué de trois parties principales : un système de lentilles aérodynamiques qui permet de focaliser le faisceau de particules, un système de vaporisation/ionisation où les particules sont vaporisées et converties en ions positifs et un système de détection pour analyser la composition chimique des particules.

3.3. Sites de mesure

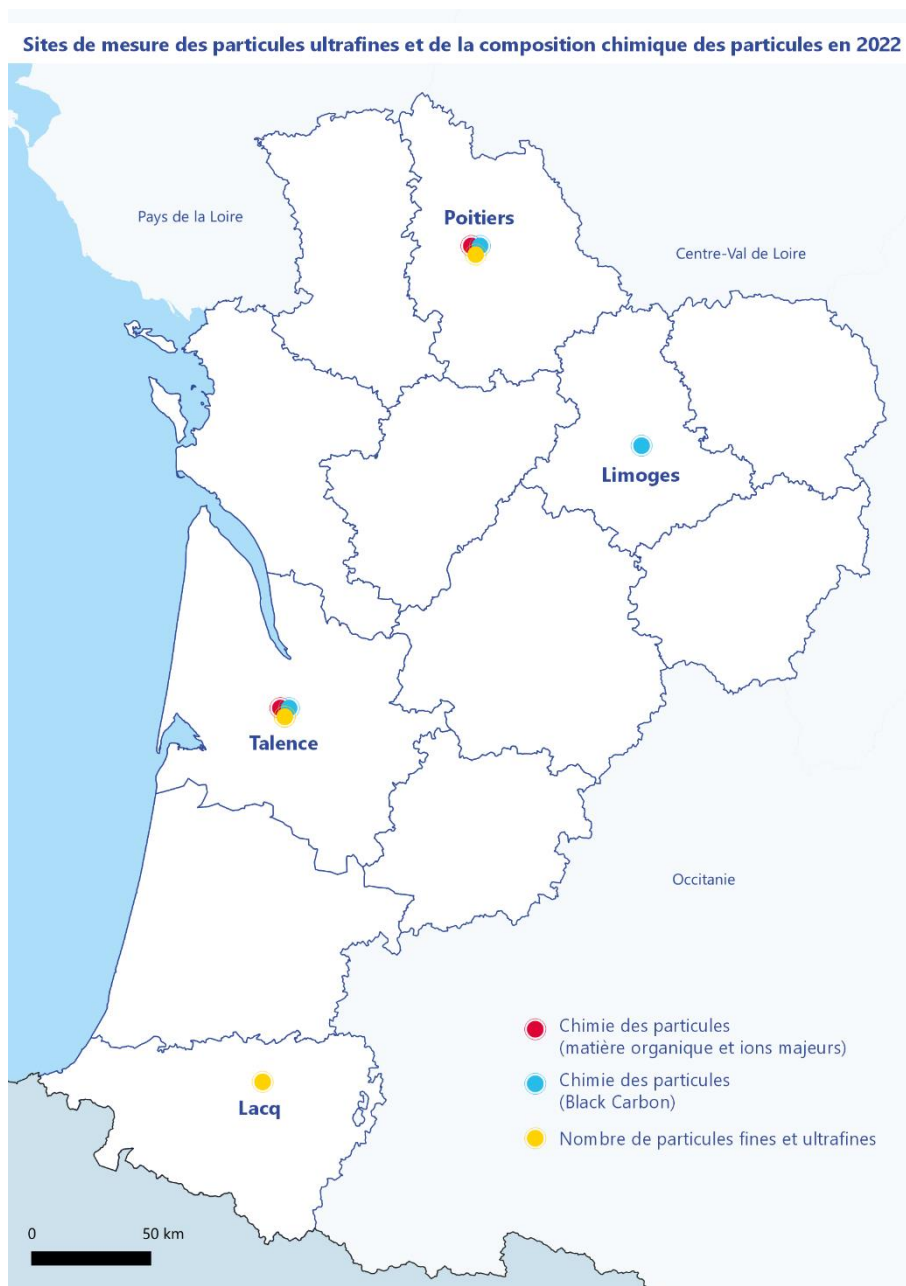


Figure 5 | Localisation des mesures de particules fines et ultrafines, Carte régionale

De 2019 à 2022, la surveillance des particules par Atmo Nouvelle-Aquitaine s'est organisé ainsi :

- ➔ Composition chimique des particules, analysée au niveau des :
 - station urbaine de fond de Bordeaux-Talence,
 - station urbaine de fond de Poitiers-Augouard,
 - station urbaine de fond de Limoges-Berland.
- ➔ Dans un rapport spécifique³, sont exploités la distribution granulométrique et le comptage de particules ultrafines, fines et grossières suivies au niveau des :
 - station urbaine de fond de Bordeaux-Talence,

³[Comptage et granulométrie des particules : bilans annuels 2019, 2020, 2021, 2022 | Atmo Nouvelle-Aquitaine \(atmo-nouvelleaquitaine.org\)](https://atmo-nouvelleaquitaine.org/)

- station urbaine de fond de Poitiers-Augouard,
- station urbaine de fond de Limoges-Berland,
- station de proximité industrielle de Lacq.

3.3.1. Bordeaux-Talence

Située dans l'agglomération bordelaise, Bordeaux-Talence (x : 416 248,2 m, y : 6 417 704,8, altitude : 23 m) est une station de fond urbain, localisée au croisement des rues de Verdun et du Général Percin, en retrait des axes de circulation importants. Elle n'est pas sous influence directe d'une source en particulier.

Cette station est une station de référence « particules » de la région Nouvelle-Aquitaine, dans le but d'étudier la granulométrie et la composition chimique des particules. Elle fait partie du programme national CARA (CARActérisation chimique et sources des particules) géré par le LCSQA visant à mieux documenter l'origine des PM10 en cas d'épisode de pollution aux particules.

La station de Bordeaux-Talence est instrumentée d'un UFP 3031 et d'un AE33 depuis 2014, un ACSM depuis 2015. Des compteurs Fidas et CPC sont venus compléter le dispositif de mesure de particules en 2018 et 2019.

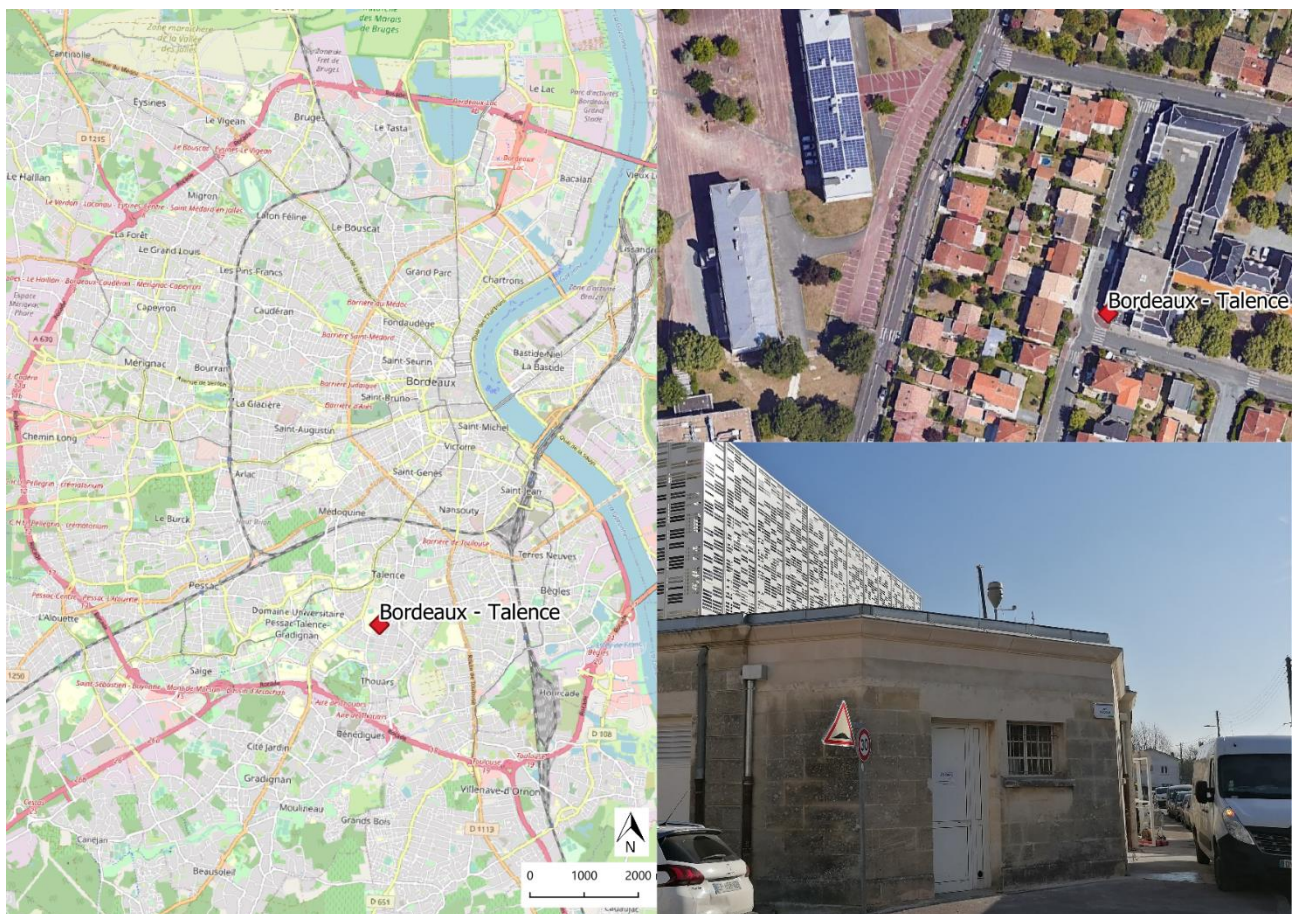


Figure 6 | Bordeaux-Talence, Localisation et environnement de la station

3.3.2. Poitiers-Augouard

Située dans la Communauté Urbaine du Grand Poitiers, Poitiers-Augouard (x : 496 786,3 m, y : 6 612 743,4 m, altitude : 105 m) est une station de fond urbain localisée dans une zone urbaine dense.

Tout comme la station de Bordeaux-Talence, cette station est une station de référence « particules » de la région Nouvelle-Aquitaine et fait partie du programme national CARA.

Elle est instrumentée d'un AE33 depuis 2014 et d'un ACSM depuis 2015. Des compteurs Fidas et CPC sont également venus compléter le dispositif de mesure de particules en 2016 et 2021.



Figure 7 | Poitiers-Augouard, Localisation et environnement de la station

3.3.3. Limoges-Berland

Située dans la Communauté Urbaine Limoges Métropole, Limoges-Berland (x : 564 935.5 m, y : 6 528 440.8 m, altitude : 437 m) est une station de fond urbain située dans une zone urbaine.

Tout comme les stations de Bordeaux-Talence et Poitiers-Augouard, cette station fait partie du programme national CARA.

Elle a été mise en service le 1^{er} janvier 2019, et est instrumentée d'un AE33 et d'un compteur Fidas.



Figure 8 | Limoges-Berland, Localisation et environnement de la station

3.4. Taux de fonctionnement

3.4.1. Taux de fonctionnement annuel

Entre 2019 et 2022, pour les 3 sites, les taux de fonctionnement annuel des différents appareils varient. Ces variations sont liées aux maintenances et problèmes techniques divers des appareils de mesure, aux travaux environnants les stations, pouvant impliquer des invalidations de mesures, ou encore pour l'année 2020, des restrictions de déplacements entraînant l'arrêt des mesures pendant les premières phases de confinement (Covid19).

- En 2022, à partir du mois de mars, des travaux ont eu lieu dans l'environnement direct de la station de Bordeaux-Talence. Les mesures de particules ont dû être arrêtées pour le restant de l'année. Les résultats de l'année 2022 pour la station de Bordeaux-Talence ne sont pas présentés dans le rapport, car ils sont non représentatifs de l'année.
- En 2020, en raison des restrictions de déplacement (Covid19, confinement), les appareils permettant la mesure des particules ont dû être arrêtés en mars et avril, expliquant les plus faibles taux de fonctionnement. Des différences dans les moyennes avec les années précédentes et suivantes peuvent ainsi être induites.

Sont surlignés en bleu, les taux de fonctionnement inférieurs au taux de fonctionnement de référence de 85 %.

Taux de fonctionnement		ACSM	AE33
Bordeaux - Talence	2022	12%	14%
	2021	25%	95%
	2020	10%	92%
	2019	76%	95%
Poitiers - Augouard	2022	68%	92%
	2021	73%	96%
	2020	88%	95%
	2019	80%	94%
Limoges - Berland	2022		97%
	2021		97%
	2020		93%
	2019		70%

Figure 9 | Taux de fonctionnement annuel

3.4.2. Taux de fonctionnement mensuel

Les taux de fonctionnement des différents appareils, pour les 3 stations, sont détaillés pour les 12 mois de chaque année dans les tableaux suivants.

Bordeaux - Talence		Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Annuel
ACSM	2022	97%	54%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12%
	2021	-	45%	91%	93%	21%	-	-	-	-	-	-	46%	25%
	2020	83%	35%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10%
	2019	94%	89%	82%	78%	69%	-	64%	99%	93%	89%	82%	72%	76%
AE33	2022	96%	79%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14%
	2021	96%	98%	95%	100%	92%	81%	92%	95%	99%	98%	98%	96%	95%
	2020	98%	90%	98%	96%	89%	84%	93%	89%	91%	93%	90%	94%	92%
	2019	96%	97%	96%	99%	97%	98%	97%	94%	97%	97%	86%	89%	95%

Figure 10 | Bordeaux-Talence, Taux de fonctionnement mensuel

Poitiers - Augouard		Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Annuel
ACSM	2022	-	-	-	73%	100%	98%	81%	100%	100%	75%	99%	89%	68%
	2021	86%	97%	94%	98%	55%	-	81%	94%	99%	97%	58%	13%	73%
	2020	98%	90%	81%	80%	82%	98%	83%	92%	87%	88%	97%	83%	88%
	2019	78%	80%	96%	92%	16%	18%	99%	98%	98%	99%	83%	98%	80%
AE33	2022	99%	78%	99%	99%	98%	60%	97%	95%	99%	91%	92%	99%	92%
	2021	97%	98%	97%	99%	93%	95%	92%	93%	99%	91%	99%	97%	96%
	2020	82%	97%	98%	98%	92%	96%	97%	92%	99%	99%	98%	96%	95%
	2019	94%	98%	96%	95%	93%	96%	97%	91%	98%	89%	94%	94%	94%

Figure 11 | Poitiers-Augouard, Taux de fonctionnement mensuel

Limoges - Berland		Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Annuel
AE33	2022	99%	98%	99%	99%	99%	91%	96%	81%	99%	99%	99%	100%	97%
	2021	98%	99%	100%	100%	99%	89%	98%	96%	98%	99%	100%	87%	97%
	2020	69%	99%	100%	100%	89%	96%	91%	78%	99%	100%	99%	98%	93%
	2019	-	55%	75%	82%	99%	96%	86%	99%	99%	98%	48%	-	70%

Figure 12 | Limoges-Berland, Taux de fonctionnement mensuel

4. Conditions météorologiques

Les résultats ci-dessous ont été élaborés à partir de mesures enregistrées par les stations Météo-France Bordeaux-Mérignac, Poitiers-Biard, Limoges-Bellegarde et Pau-Uzein pour les années 2019, 2020, 2021 et 2022. Les comparaisons aux normales, ainsi que des extraits des bulletins climatiques (années 2019-2022) publiés par Météo-France sont disponibles en annexe 2.

4.1. Températures et précipitations

Les normales (minimales, maximales et cumuls de précipitations) sont calculées tous les 10 ans sur des périodes de 30 ans, tandis que les records (températures extrêmes) se calculent sur la base de toutes les données existantes.

4.1.1. Bordeaux - Mérignac

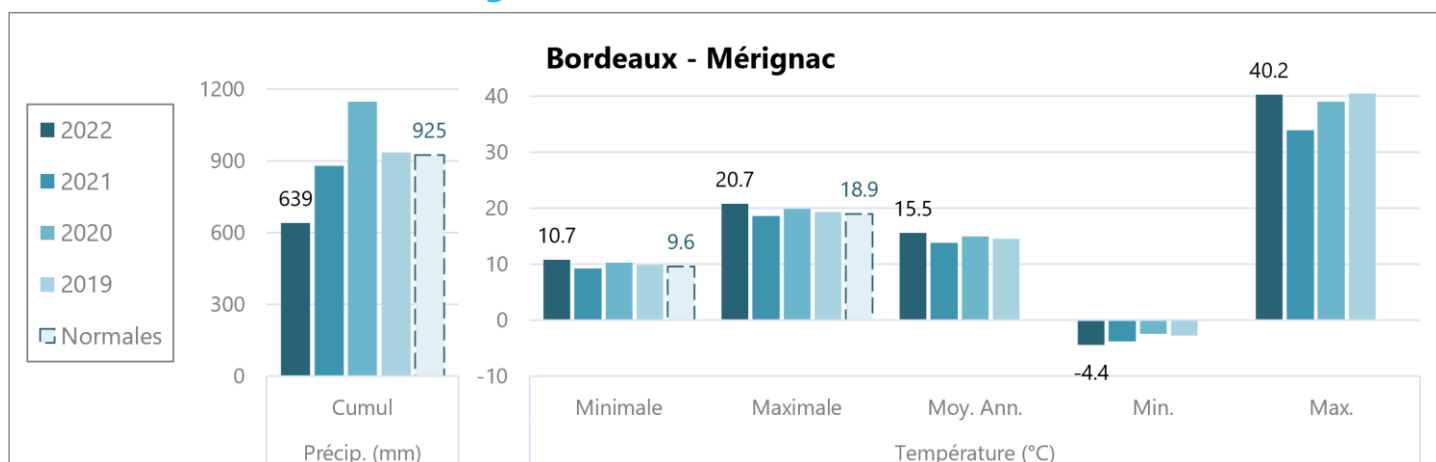


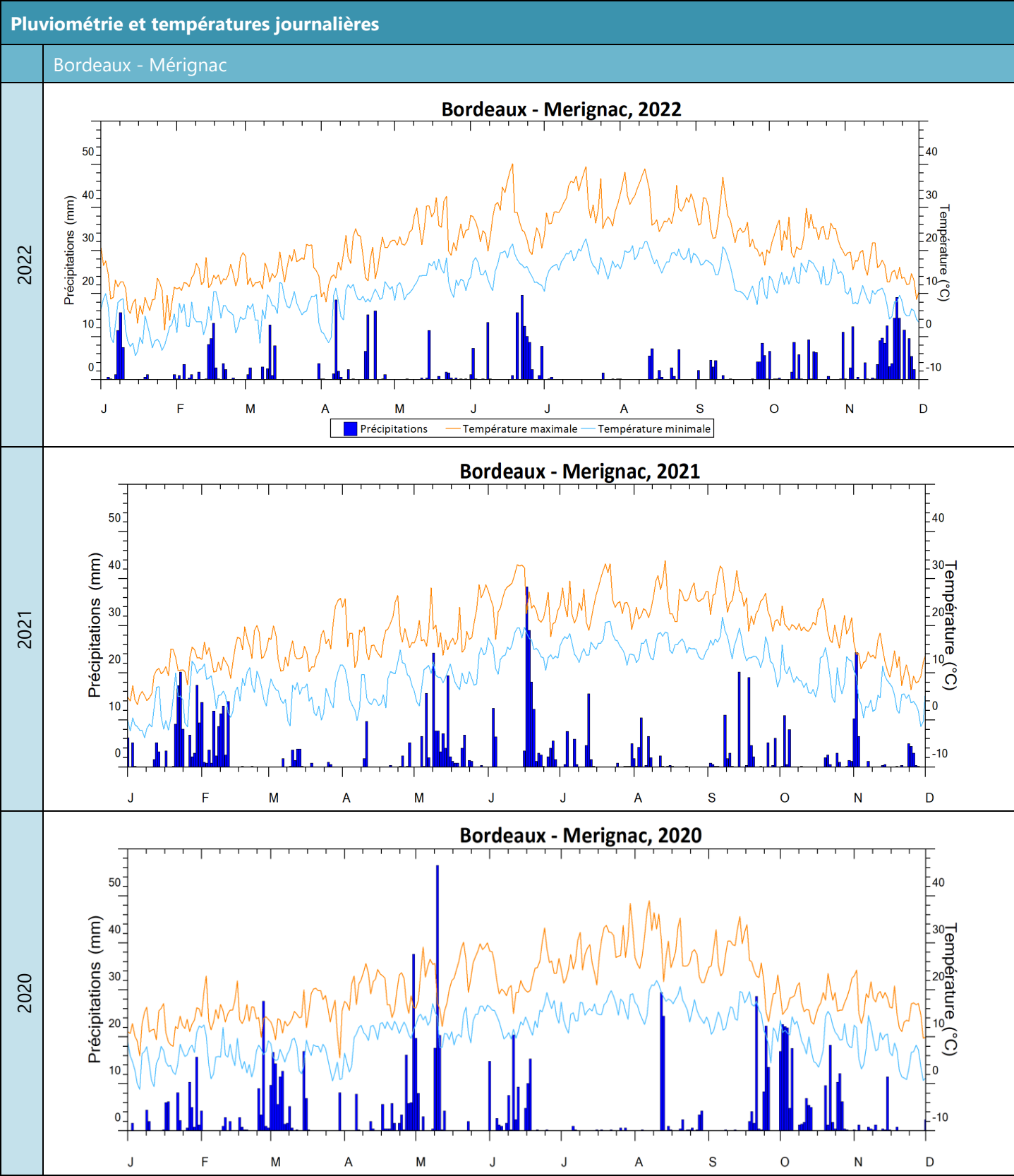
Figure 13 | Bordeaux-Mérignac, Précipitations et températures (données annuelles)

➔ **Précipitations**, hormis l'année 2020, présentant une pluviométrie excédentaire, les niveaux de précipitations de Bordeaux-Mérignac ont été inférieurs aux normales Météo France en 2021 et 2022. L'année 2022 présente une pluviométrie extrêmement faible (636 mm), la normale (1991-2020) est de 925 mm.

➔ Températures

- **Minimale**, hormis l'année 2021, présentant une température minimale moyenne plus faible, les minimales mesurées par la station ont été supérieures aux normales Météo France pour les 3 autres années. L'année 2022 présente la minimale la plus élevée de ces 4 années.
- **Maximale**, hormis l'année 2021, présentant une température maximale moyenne plus faible, les maximales mesurées par la station ont été supérieures aux normales Météo France pour les 3 autres années. L'année 2022 présente la maximale la plus élevée de ces 4 années.
- La **température moyenne annuelle** (Moy. Ann.) la plus élevée au cours de ces 4 années est de 15,5°C (2022).
- La **température la plus froide** (Min.) enregistrée au cours de ces 4 années est de -4,4°C, le 15 janvier 2022.
- La **température la plus chaude** (Max.) enregistrée au cours de ces 4 années est de 40,4°C, le 23 juillet 2019.

Les figures suivantes représentent la pluviométrie et les températures minimales et maximales journalières pour les années 2022, 2021, 2020 et 2019, enregistrées par la station Bordeaux-Mérignac.



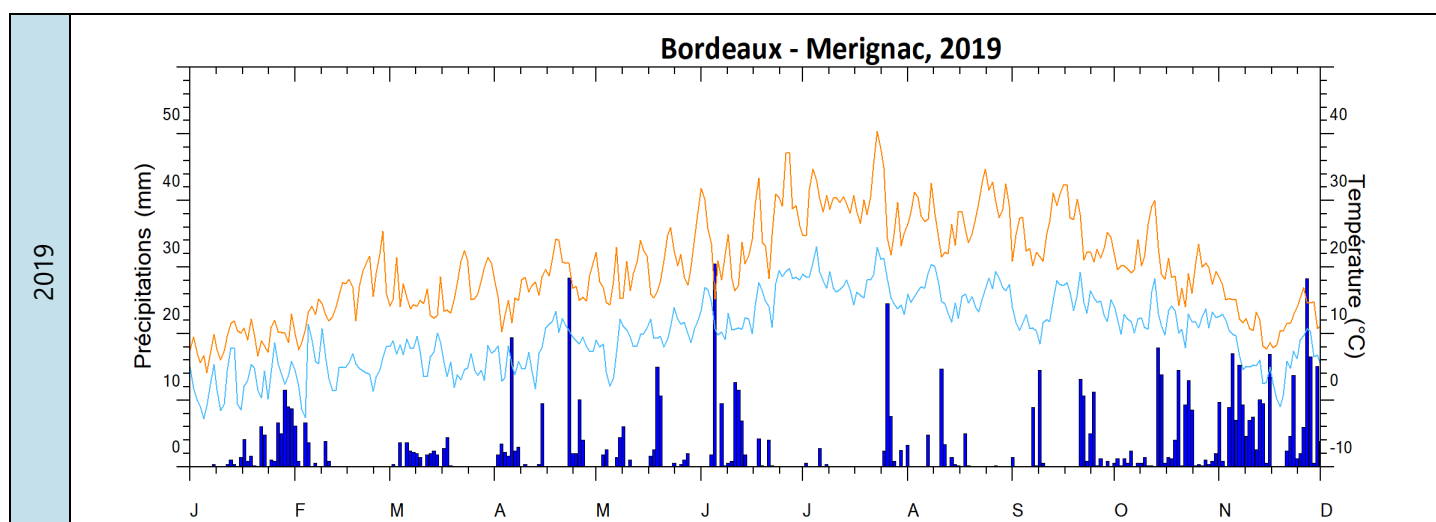


Figure 14 | Bordeaux-Mérignac, Précipitations et températures (données journalières)

4.1.2. Poitiers - Biard

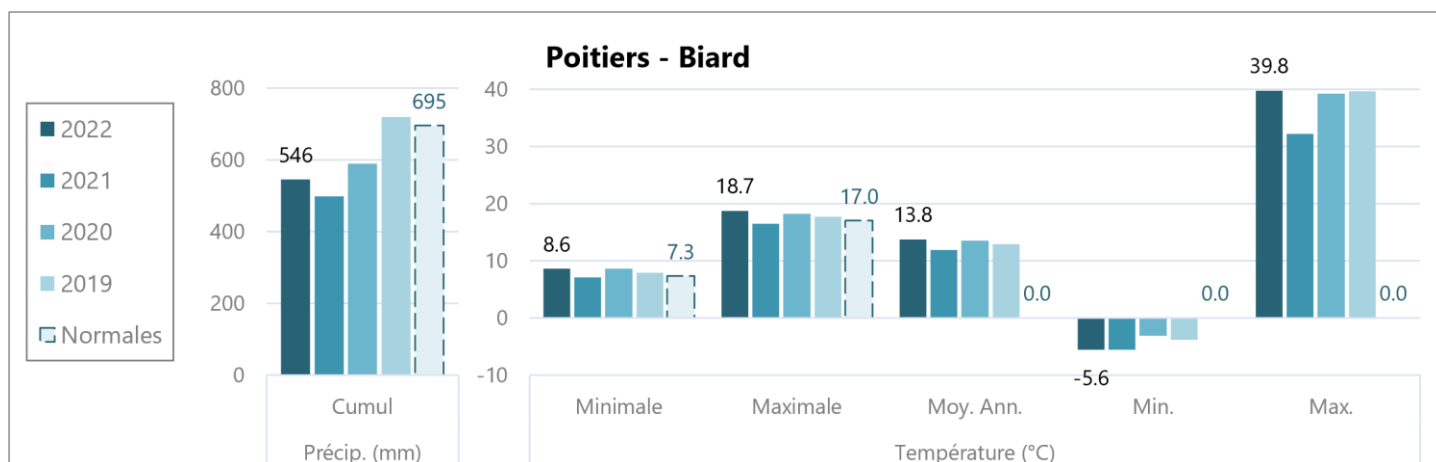


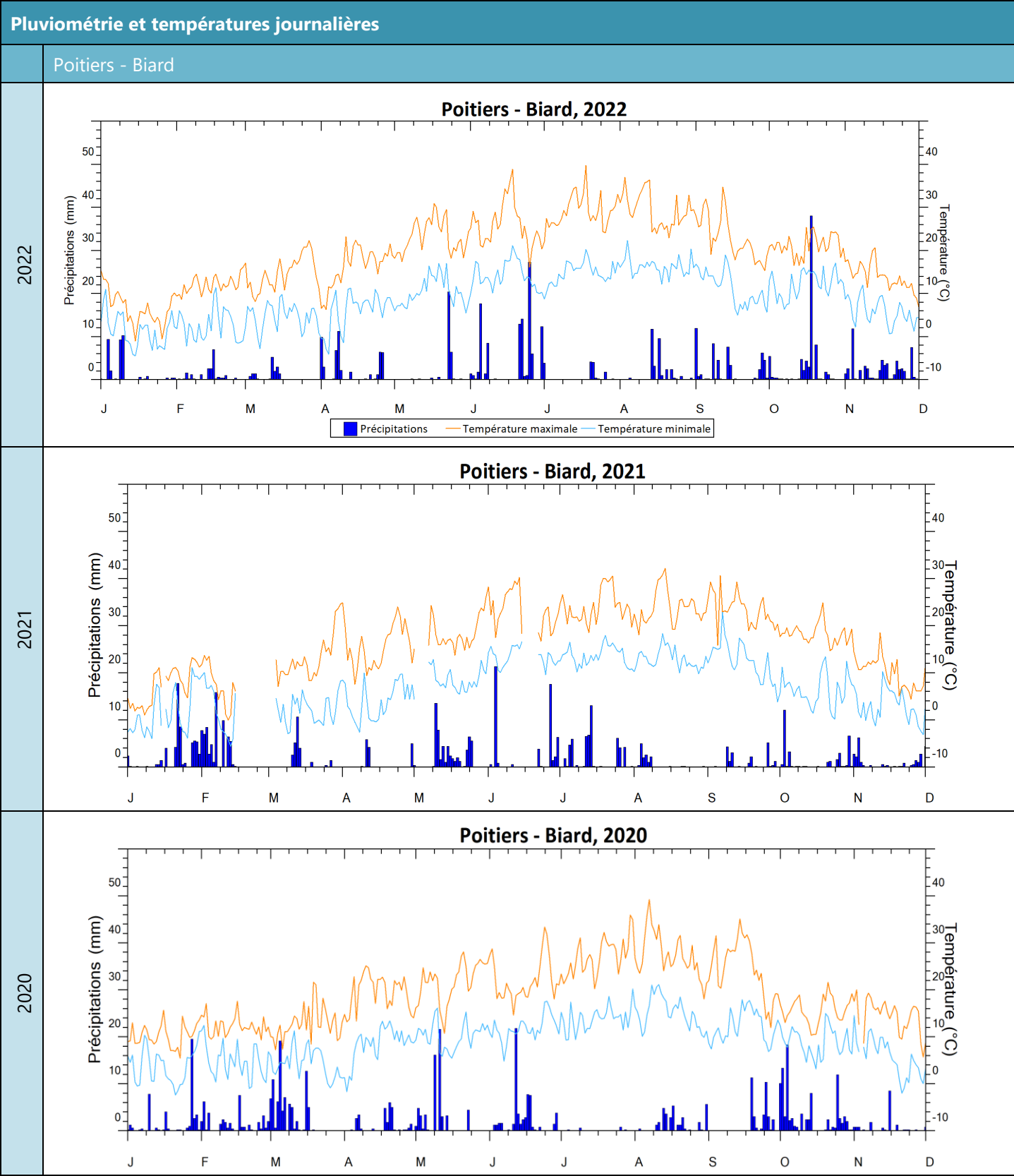
Figure 15 | Poitiers-Biard, Précipitations et températures (données annuelles)

➔ **Précipitations**, hormis l'année 2019, présentant une pluviométrie excédentaire, les niveaux de précipitations de Poitiers-Biard ont été inférieurs aux normales Météo France pour les 3 autres années. L'année 2021 présente une pluviométrie extrêmement faible (498 mm), la normale (1991-2020) est de 695 mm.

➔ Températures

- **Minimale**, hormis l'année 2021, présentant une température minimale moyenne plus faible, les minimales mesurées par la station ont été supérieures aux normales Météo France pour les 3 autres années. Les années 2020 et 2022 présentent la même minimale, 8,6°C, valeur la plus élevée de ces 4 années.
- **Maximale**, hormis l'année 2021, présentant une température maximale moyenne plus faible, les maximales mesurées par la station ont été supérieures aux normales Météo France pour les 3 autres années. L'année 2022 présente la maximale la plus élevée de ces 4 années, 18,7°C.
- La **température moyenne annuelle** (Moy. Ann.) la plus élevée au cours de ces 4 années est de 13,8°C (2022).
- La **température la plus froide** (Min.) enregistrée au cours de ces 4 années est de - 5,6°C, les 13 février 2021 et 18 décembre 2022.
- La **température la plus chaude** (Max.) enregistrée au cours de ces 4 années est de 39,8°C, le 18 juillet 2022.

Les figures suivantes représentent la pluviométrie et les températures minimales et maximales journalières pour les années 2022, 2021, 2020 et 2019, enregistrées par la station Poitiers-Biard.



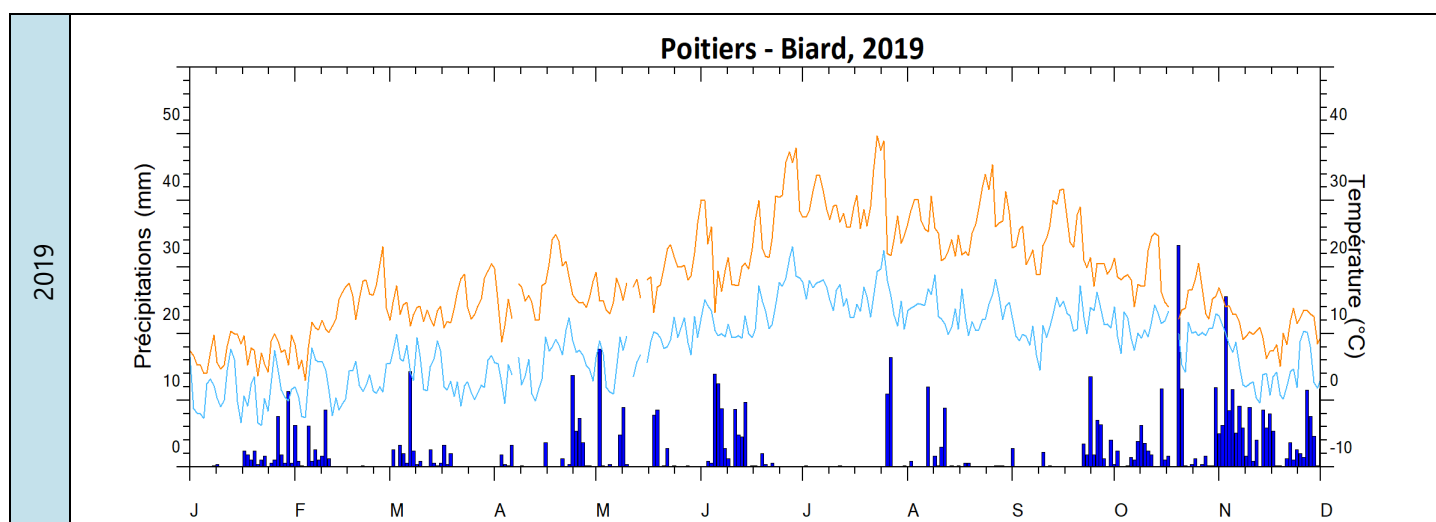


Figure 16 | Poitiers-Biard, Précipitations et températures (données journalières)

4.1.3. Limoges - Bellegarde

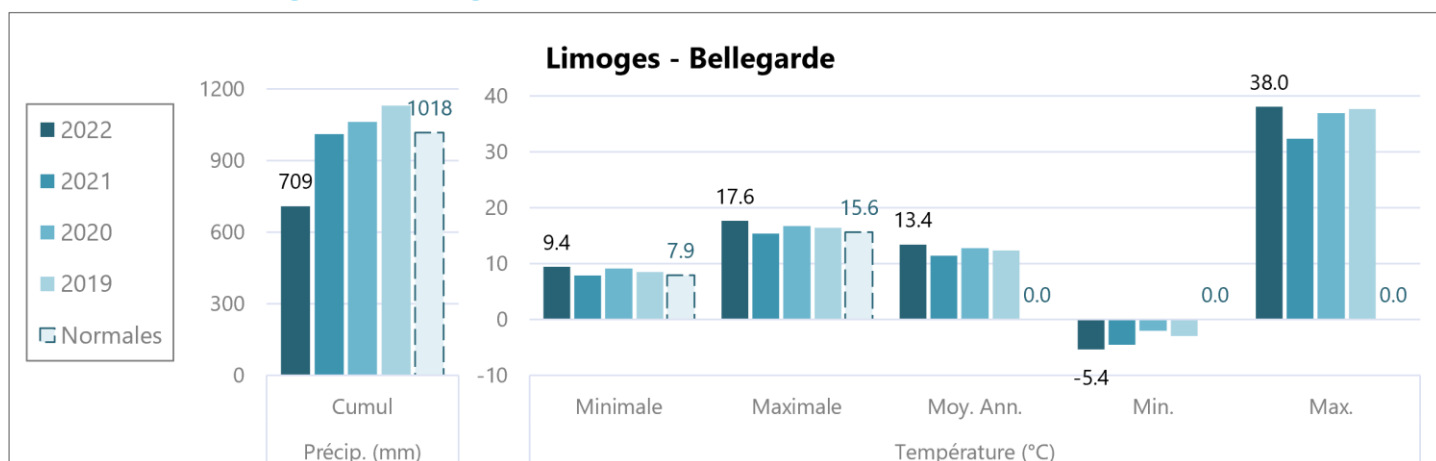


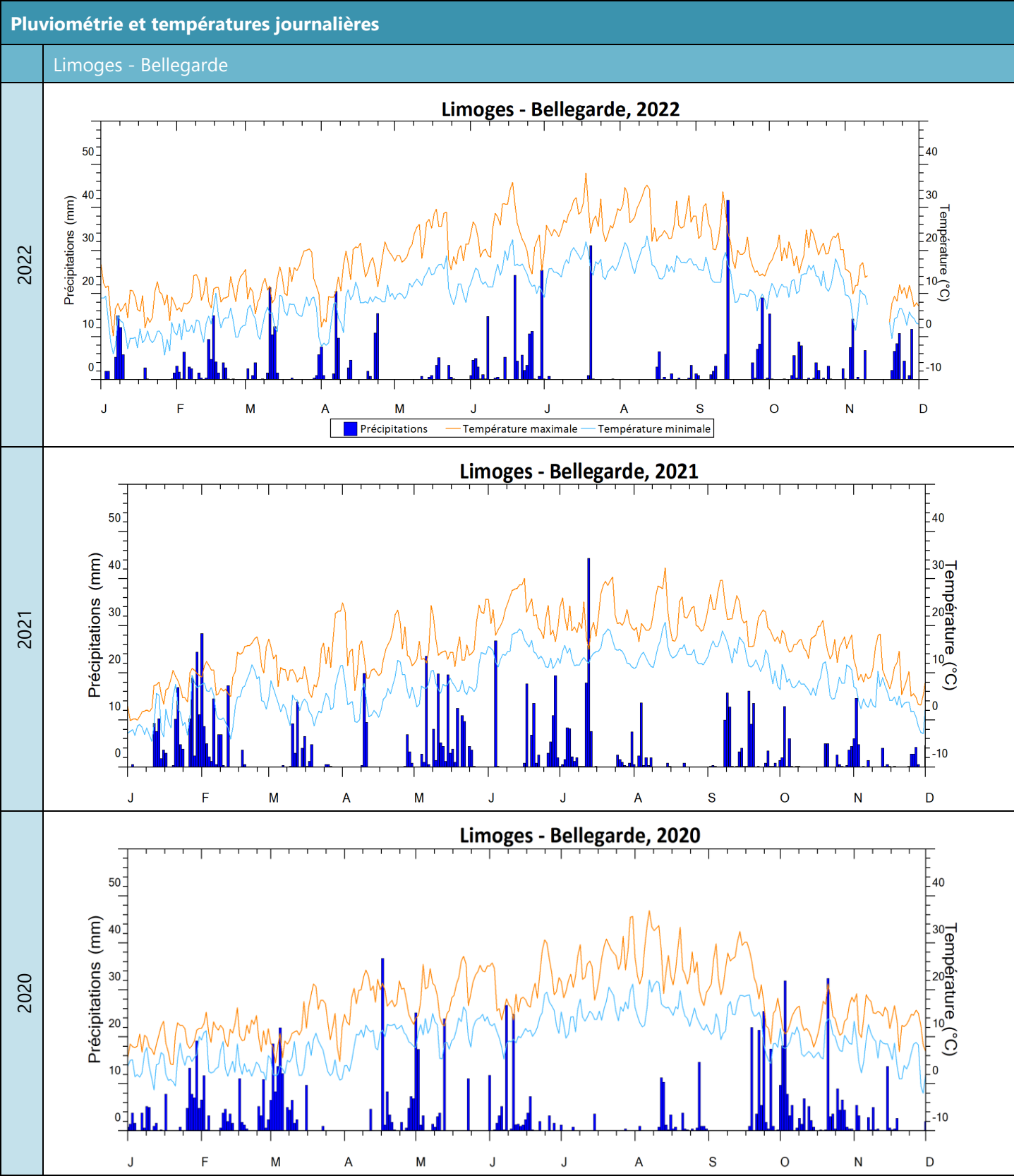
Figure 17 | Limoges-Bellegarde, Précipitations et températures (données annuelles)

➤ **Précipitations**, sur Limoges-Bellegarde, les années 2019 et 2020 présentent des pluviométries excédentaires aux normales. Quant à l'année 2022, celle-ci dévoile une pluviométrie extrêmement faible (709 mm), la normale (1991-2020) est de 1018 mm.

➤ Températures

- **Minimale**, hormis l'année 2021, présentant une température minimale moyenne légèrement plus faible, les minimales mesurées par la station ont été supérieures aux normales Météo France pour les 3 autres années. L'année 2022 présente la minimale la plus élevée de ces 4 années.
- **Maximale**, hormis l'année 2021, présentant une température maximale moyenne légèrement plus faible, les maximales mesurées par la station ont été supérieures aux normales Météo France pour les 3 autres années. L'année 2022 présente la maximale la plus élevée de ces 4 années.
- La **température moyenne annuelle** (Moy. Ann.) la plus élevée au cours de ces 4 années est de 13,4°C (2022).
- La **température la plus froide** (Min.) enregistrée au cours de ces 4 années est de -5,4°C, le 11 décembre 2022.
- La **température la plus chaude** (Max.) enregistrée au cours de ces 4 années est de 38,0°C, le 18 juillet 2022.

Les figures suivantes représentent la pluviométrie et les températures minimales et maximales journalières pour les années 2022, 2021, 2020 et 2019, enregistrées par la station Limoges-Bellegarde.



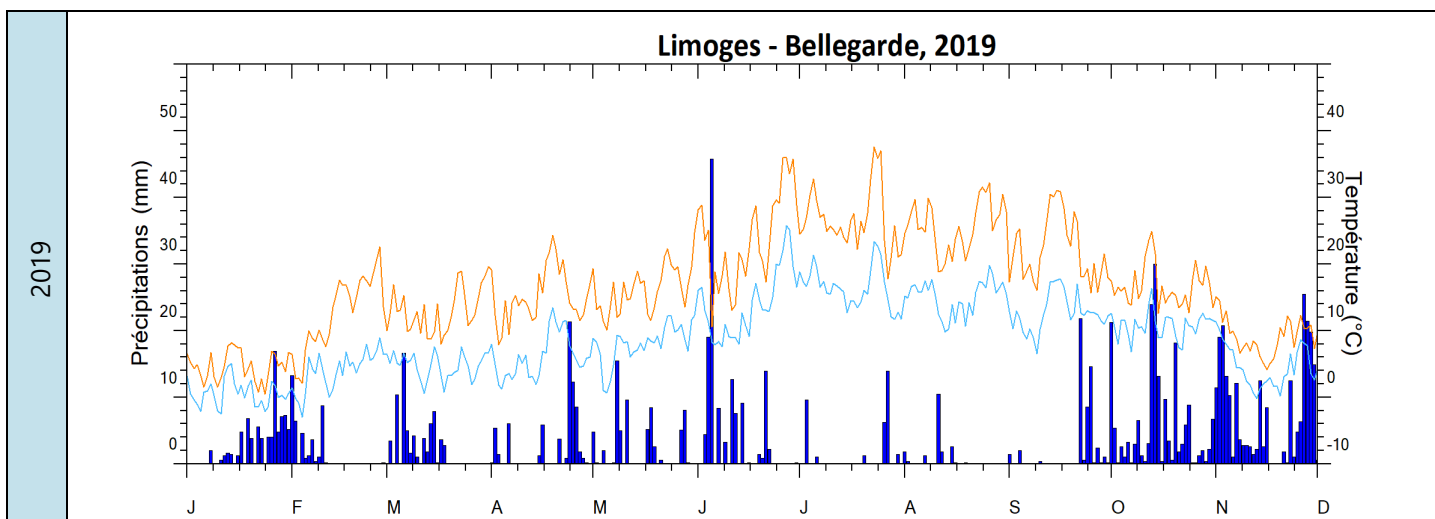


Figure 18 | Limoges-Bellegarde, Précipitations et températures (données journalières)

4.2. Roses des vents

Il s'agit d'une représentation du vent, pour un site donné pendant une période d'observation déterminée. Les roses des vents associent les directions aux vitesses de vents et informent ainsi sur la provenance des masses d'air captées à la station. Les vents calmes, dont la vitesse est inférieure à 1 m.s^{-1} , ne sont pas pris en compte. Ces vents sont trop faibles pour que leur direction soit établie. Une explication de lecture des roses des vents se trouve en annexe 3.

Les figures ci-dessous présentent les roses des vents établies pour les années 2019, 2020, 2021 et 2022 pour les stations Météo France de Bordeaux-Mérignac, Poitiers-Biard, Limoges-Bellegarde et Pau-Uzein. Deux échelles de temps sont présentées : les roses annuelles ainsi que les roses saisonnières.

4.2.1. Bordeaux – Mérignac

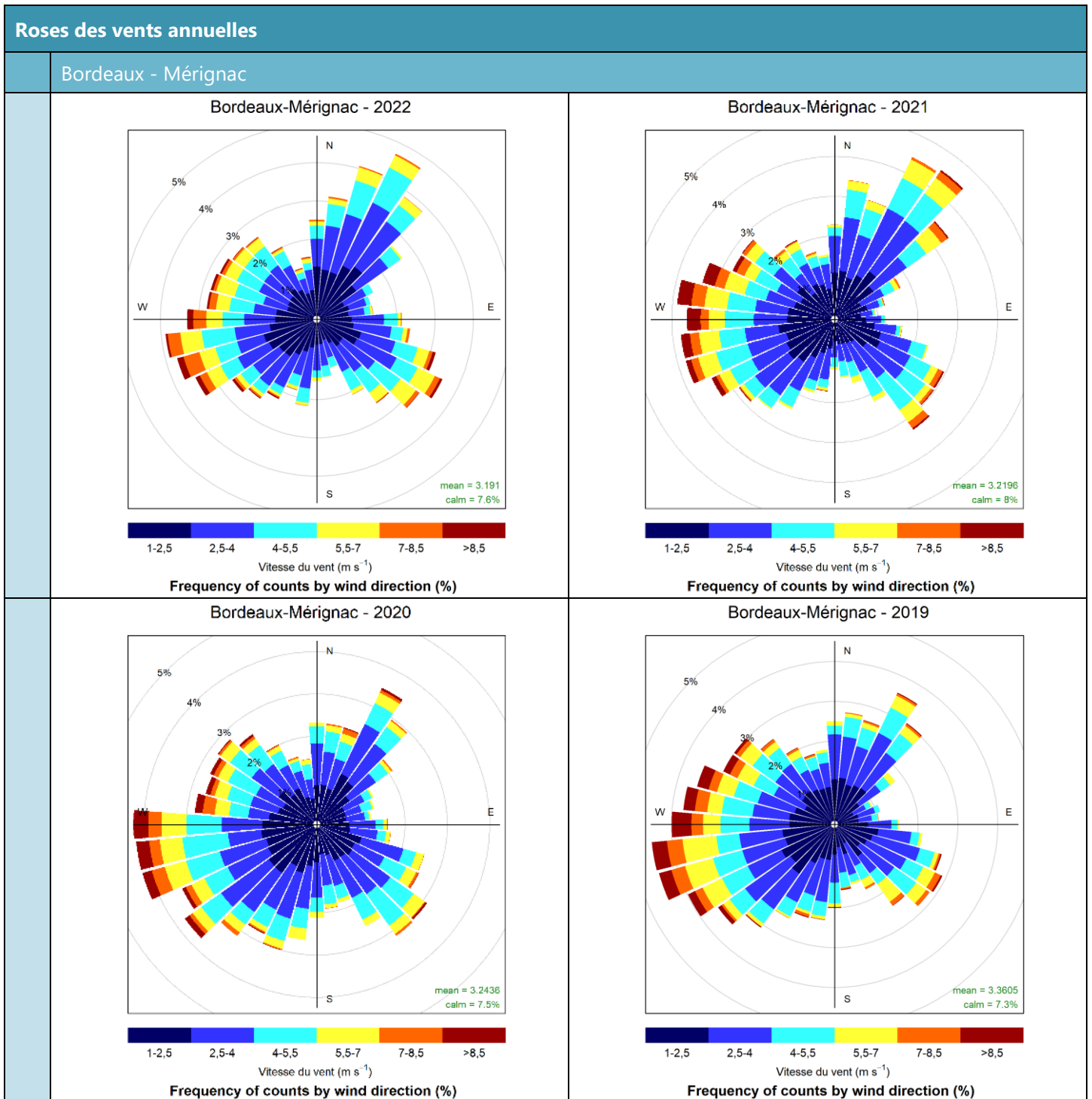


Figure 19 | Bordeaux-Mérignac, Roses des vents annuelles (données horaires)



Roses annuelles

- Les vents les plus forts et les plus fréquents proviennent essentiellement du secteur ouest, correspondant à la façade atlantique



Roses saisonnières

- A l'été et au printemps, il y a peu de vent provenant des secteurs sud.
- Aux saisons froides, une fréquence importante de vent est originaire des secteurs sud-est.

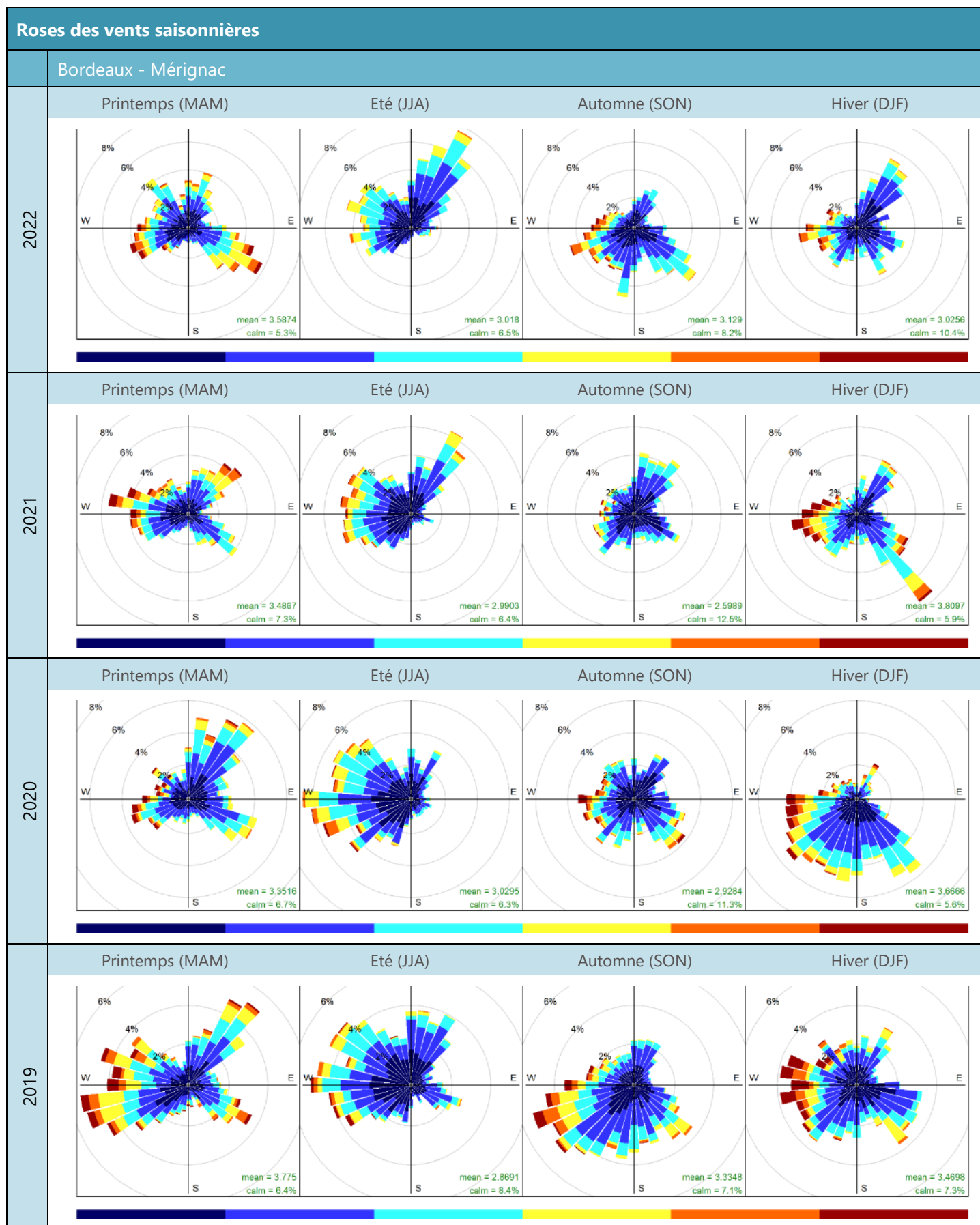


Figure 20 | Bordeaux-Mérignac, Roses des vents saisonnières (données horaires)

4.2.2. Poitiers - Biard

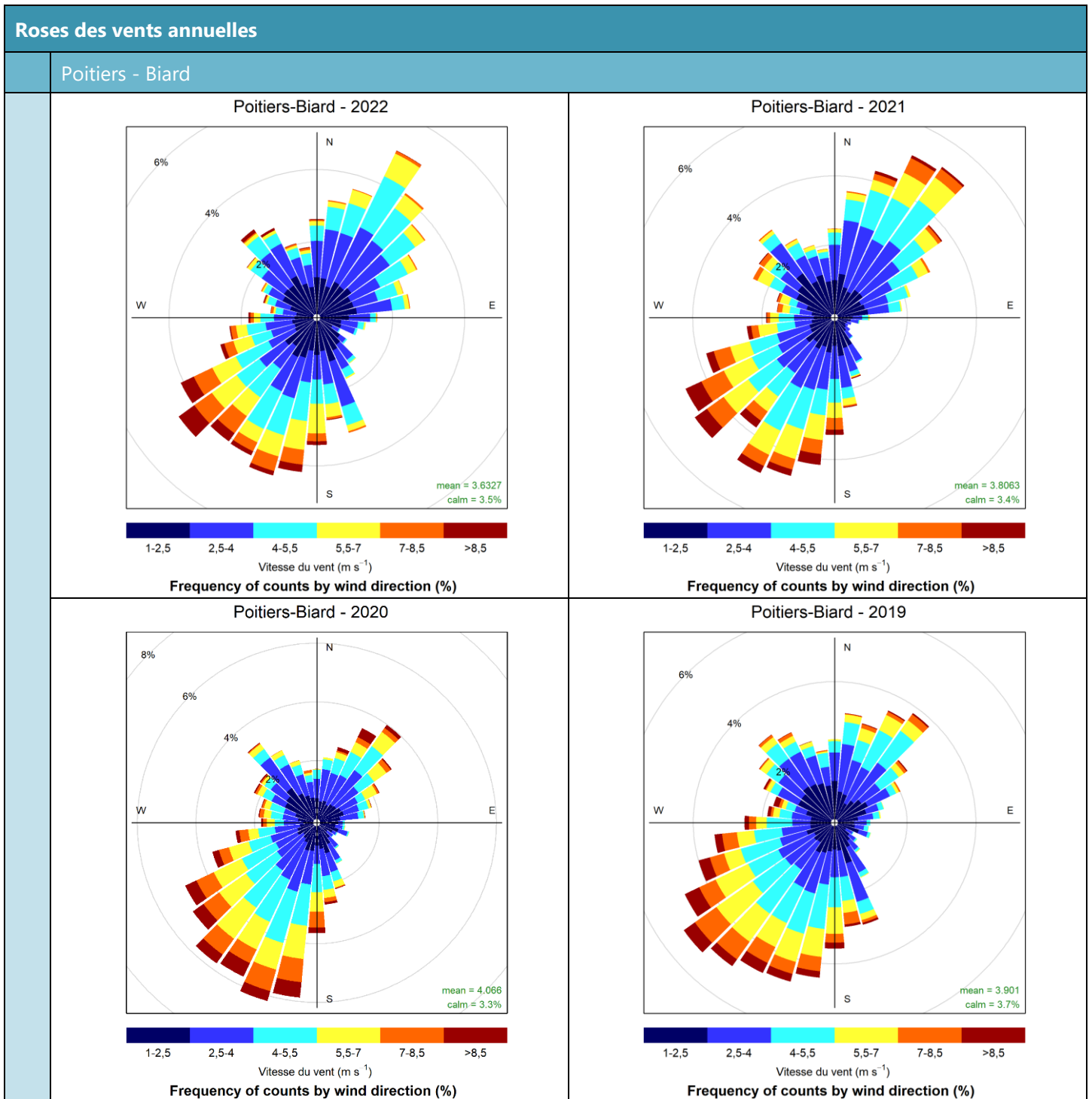


Figure 21 | Poitiers-Biard, Roses des vents annuelles (données horaires)

- Roses annuelles
 - Les vents les plus forts proviennent principalement de deux secteurs : sud-ouest et nord-est.
- Roses saisonnières
 - En automne et hiver, sont mesurés les vents les plus forts, ils sont principalement issus des secteurs sud-ouest.

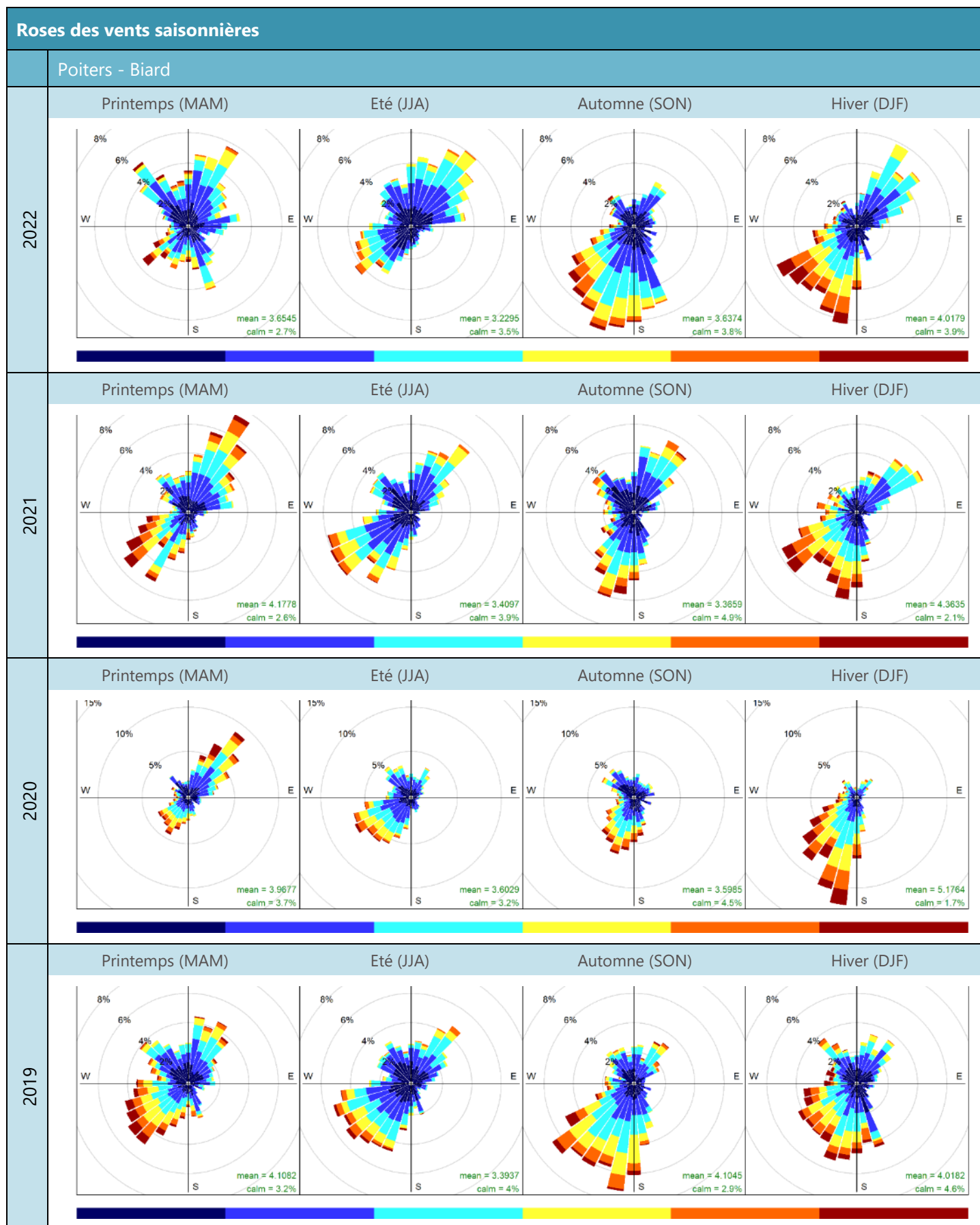


Figure 22 | Poitiers-Biard, Roses des vents saisonnières (données horaires)

4.2.3. Limoges - Bellegarde

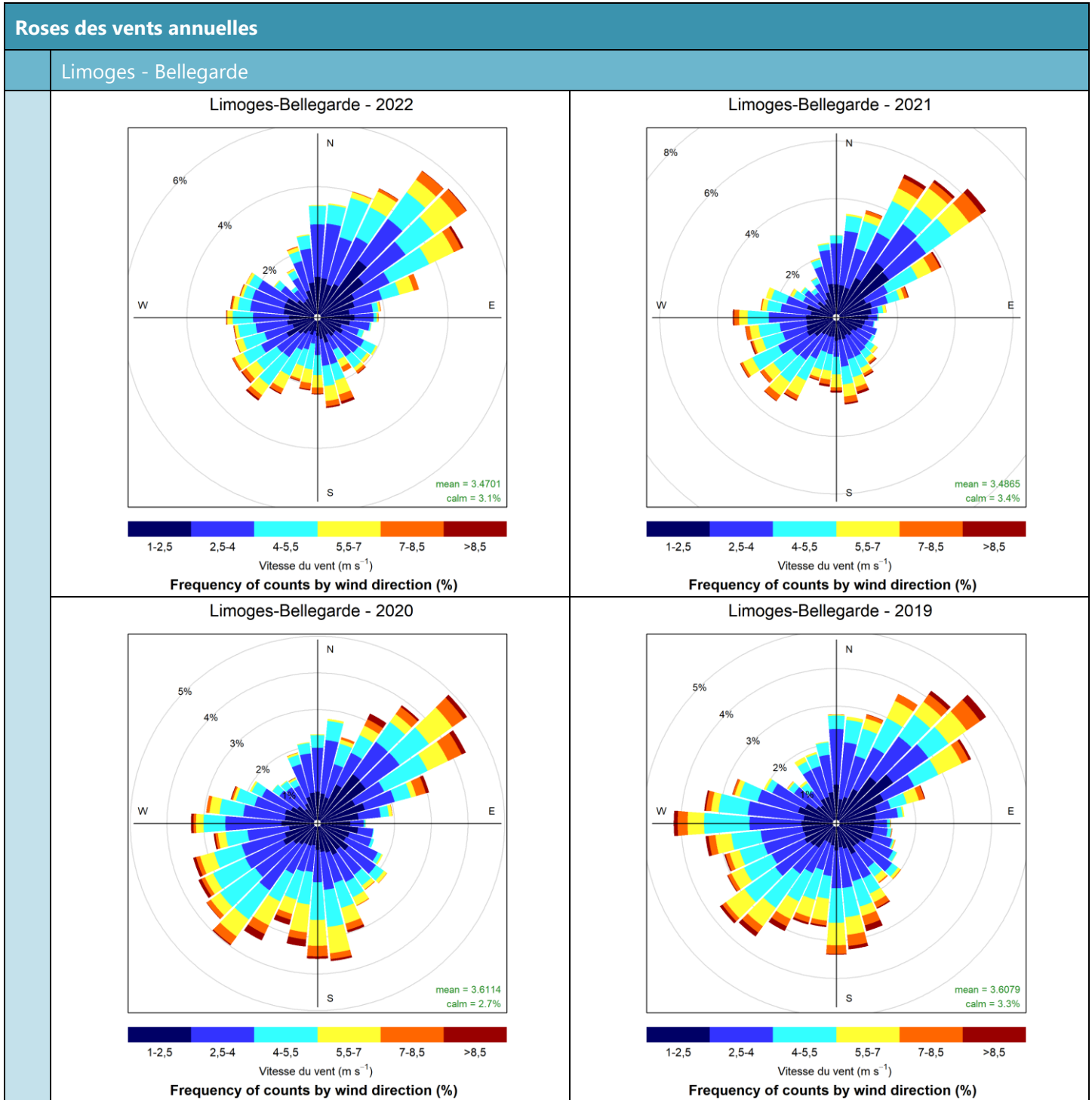


Figure 23 | Limoges-Bellegarde, Roses des vents annuelles (données horaires)



Roses annuelles

- Les vents proviennent principalement de deux secteurs : sud-ouest et nord-est.

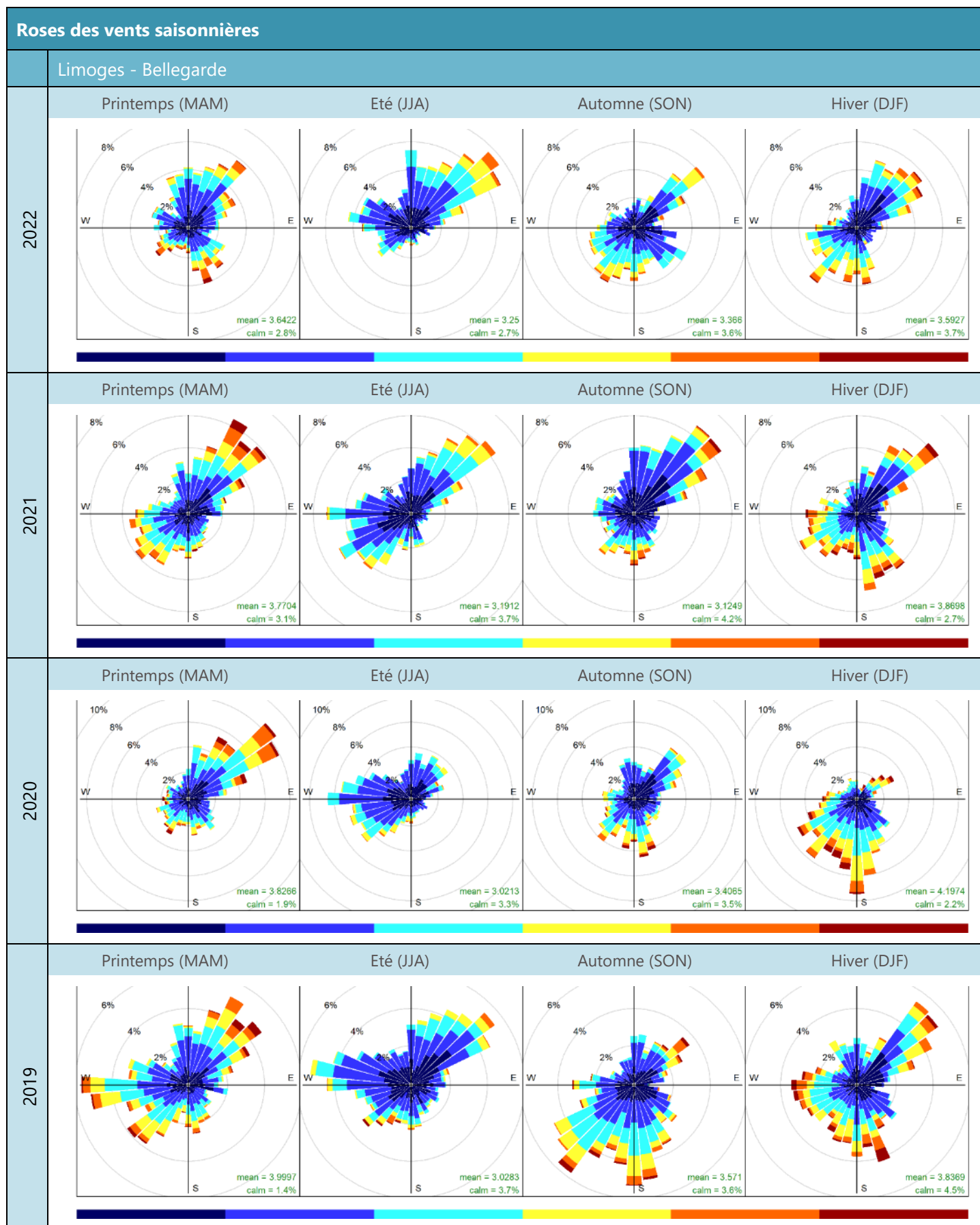


Figure 24 | Limoges-Bellegarde, Roses des vents saisonnières (données horaires)

5. Résultats

Dans les paragraphes suivants et dans un objectif de représentativité des résultats, seules les périodes comportant plus de 75 % de données disponibles sont présentées. Ainsi, une année, une saison, un mois ou une journée ne disposant pas de 75 % de mesures valides ne sont pas exposés. Les données indisponibles peuvent provenir de l'AE33 (Black Carbon), de l'ACSM (OM et ions majeurs) ou de des analyseurs PM (PM₁₀ et PM_{2,5}).

5.1. Le carbone suie ou Black Carbon [BC]

Cette partie exploite les mesures obtenues par les Aethalomètres [AE33], installés sur les sites de Bordeaux-Talence, Poitiers-Augouard et Limoges-Berland.

L'Aethalomètre permet de distinguer et de quantifier deux sources de carbone-suie. Il est non seulement important de connaître la contribution de ces deux sources sur la concentration en BC mais également leur contribution sur la masse des PM₁₀.

Des études ont montré qu'il était possible d'estimer un ratio permettant de passer d'une concentration en BC à une concentration en PM₁₀ des deux sources de combustion identifiées par l'aethalomètre (Chevrier, 2016; LCSQA, 2015).

- Pour la combustion de fuel fossile, l'expression suivante est utilisée quel que soit le site de mesure (El Haddad et al., 2009; Laschober et al., 2004) :

$$PM_{ff} = 2 \times BC_{ff}$$

- Pour la combustion de la biomasse, il a été montré qu'un ratio unique ne pouvait être utilisé pour l'ensemble des sites de mesure. En effet, il varie suivant les caractéristiques des sites. En utilisant la méthodologie donnée par le LCSQA en 2015, basée sur l'utilisation des concentrations en lévoglucosan, traceur organique univoque de la combustion de la biomasse, il est possible de déterminer des ratios spécifiques. Afin d'avoir une meilleure fiabilité pour ces ratios, la prise en compte de plusieurs hivers est recommandée. Jusqu'à maintenant, un ratio unique est utilisé pour tous les sites de Nouvelle-Aquitaine :

$$PM_{wb} = 10 \times BC_{wb}$$

Les valeurs de PM_{ff} et PM_{wb} doivent être vues comme des ordres de grandeurs entachés d'une forte incertitude associée aux coefficients de conversion moyens utilisés. Elles permettent néanmoins d'appréhender de manière plus concrète la contribution des sources de combustion aux concentrations de particules présentes dans l'air.

5.1.1. Statistiques descriptives

Pour les trois grandeurs mesurées, BC, BC_{wb} et BC_{ff}, et les grandeurs calculées PM_{wb} et PM_{ff}, la moyenne annuelle, la valeur médiane, le maximum journalier ainsi que le maximum horaire sont regroupés dans les tableaux suivants pour les sites de Bordeaux-Talence, Poitiers-Augouard et Limoges-Berland. La part de la combustion de la biomasse dans les PM₁₀ (PM_{wb}) ainsi que celle de la combustion de fuel fossile (PM_{ff}) y figure également. BC correspond au black carbon total, pouvant également être noté BC_{tot}, soit la somme de BC_{ff} et BC_{wb}.

AE33 - Statistiques descriptives								
Bordeaux - Talence								
	$\mu\text{g}/\text{m}^{-3}$	BC	BCwb	BCff	PMwb	PMff	%wb*	%ff*
2022	Moy. annuelle	-	-	-	-	-	-	-
	Médiane	-	-	-	-	-	-	-
	Max. horaire	-	-	-	-	-	-	-
	Max. journalier	-	-	-	-	-	-	-
2021	Moy. annuelle	1.0	0.3	0.7	3.3	1.4	21%	9%
	Médiane	0.6	0.1	0.4	1.2	0.9	0%	0%
	Max. horaire	35.4	7.4	30.2	73.9	60.4	94%	100%
	Max. journalier	5.8	2.7	4.2	27.2	8.4	73%	32%
2020	Moy. annuelle	1.0	0.4	0.7	3.5	1.4	23%	9%
	Médiane	0.6	0.1	0.4	1.3	0.8	0%	0%
	Max. horaire	18.9	9.6	16.4	95.9	32.9	100%	93%
	Max. journalier	7.2	3.9	3.4	38.9	6.8	76%	30%
2019	Moy. annuelle	1.1	0.3	0.8	3.1	1.6	20%	11%
	Médiane	0.7	0.1	0.5	1.2	1.0	0%	0%
	Max. horaire	19.0	7.7	17.0	77.1	34.0	100%	100%
	Max. journalier	5.9	2.8	3.9	28.4	7.8	76%	39%

* dans PM10

Figure 25 | BC, Bordeaux-Talence, Statistiques descriptives

AE33 - Statistiques descriptives								
Poitiers - Augouard								
	$\mu\text{g}/\text{m}^{-3}$	BC	BCwb	BCff	PMwb	PMff	%wb*	%ff*
2022	Moy. annuelle	0.9	0.3	0.7	2.7	1.3	19%	9%
	Médiane	0.7	0.2	0.5	1.5	1.0	0%	0%
	Max. horaire	11.1	6.9	9.9	69.1	19.7	100%	100%
	Max. journalier	4.6	1.8	3.2	18.4	6.4	93%	39%
2021	Moy. annuelle	0.8	0.3	0.6	2.6	1.2	18%	8%
	Médiane	0.6	0.1	0.4	1.3	0.9	0%	0%
	Max. horaire	11.6	4.8	10.5	48.0	21.0	100%	100%
	Max. journalier	3.1	1.4	1.9	14.3	3.7	74%	23%
2020	Moy. annuelle	0.8	0.2	0.5	2.4	1.1	18%	8%
	Médiane	0.5	0.1	0.4	1.2	0.8	0%	0%
	Max. horaire	15.8	4.8	12.0	47.6	23.9	100%	100%
	Max. journalier	5.4	2.3	3.6	22.5	7.2	55%	23%
2019	Moy. annuelle	1.0	0.3	0.7	2.7	1.4	17%	9%
	Médiane	0.6	0.1	0.5	1.3	0.9	0%	0%
	Max. horaire	20.8	5.9	15.7	58.8	31.4	100%	100%
	Max. journalier	6.6	2.2	4.7	22.0	9.3	67%	36%

* dans PM10

Figure 26 | BC, Poitiers-Augouard, Statistiques descriptives

AE33 - Statistiques descriptives								
Limoges - Berland								
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	BC	BC _{wb}	BC _{ff}	PM _{wb}	PM _{ff}	%wb*	%ff*
2022	Moy. annuelle	0.8	0.3	0.6	2.6	1.1	20%	8%
	Médiane	0.5	0.1	0.4	1.2	0.8	0%	0%
	Max. horaire	16.9	8.0	13.4	80.3	26.9	100%	100%
	Max. journalier	4.0	2.5	2.3	24.9	4.6	73%	27%
2021	Moy. annuelle	0.8	0.3	0.6	2.6	1.2	19%	9%
	Médiane	0.6	0.1	0.4	1.1	0.8	0%	0%
	Max. horaire	27.0	5.7	23.4	57.3	46.8	100%	100%
	Max. journalier	6.4	2.1	4.6	21.4	9.1	75%	49%
2020	Moy. annuelle	0.8	0.2	0.6	2.4	1.1	20%	9%
	Médiane	0.5	0.1	0.4	1.2	0.8	0%	0%
	Max. horaire	18.3	4.6	15.8	45.9	31.7	100%	100%
	Max. journalier	3.3	1.6	2.1	15.7	4.3	61%	41%
2019	Moy. annuelle	-	-	-	-	-	-	-
	Médiane	-	-	-	-	-	-	-
	Max. horaire	-	-	-	-	-	-	-
	Max. journalier	-	-	-	-	-	-	-

* dans PM₁₀

Figure 27 | BC, Limoges-Berland, Statistiques descriptives

De ces tableaux, nous pouvons observer :

- Sur les valeurs annuelles,
 - Les 3 sites de fond urbain de Bordeaux-Talence, Poitiers-Augouard et Limoges-Berland présentent peu de différences sur les moyennes annuelles.
 - Pour les 3 paramètres observés [BC, BC_{wb} et BC_{ff}] et pour chacun des 3 sites, les concentrations médianes⁴ sont inférieures aux concentrations moyennes. L'écart entre ces 2 valeurs indique une répartition inégalitaire des concentrations mesurées. Lorsque la médiane est inférieure à la moyenne, les inégalités se situent en haut de l'échelle. Des concentrations élevées tirent la moyenne vers le haut.
- L'impact de la combustion de biomasse est le plus important sur Bordeaux-Talence. En 2020, ce site a enregistré les maxima horaires et journaliers les plus élevés.
- Concernant la combustion de fuel fossile, assimilée au trafic routier,
 - Bordeaux-Talence présente, en 2021, les maxima horaires les plus élevés,
 - tandis que Poitiers-Augouard présente en 2019 le maxima journalier le plus élevé mesuré.
- La part de la combustion de la biomasse (%wb) représente :
 - annuellement, environ 20 % des PM₁₀ : 21,3 % sur Bordeaux-Talence, 18,6 % sur Limoges-Berland et 17,8 % sur Poitiers-Augouard.
 - La combustion de la biomasse (%wb) peut atteindre jusqu'à 93 % des PM₁₀ sur des valeurs journalières, comme le 11 novembre 2022 sur Poitiers-Augouard.
 - La combustion de la biomasse (%wb) contribue régulièrement à la totalité des PM₁₀ (100 %) sur des valeurs horaires. Toutes sont observées pendant les périodes froides.
- La part de combustion de fuel fossile (%ff) représente :
 - annuellement, environ 10 % des PM₁₀ : 9,4 % sur Bordeaux-Talence, 9,1 % sur Limoges-Berland et 8,4 % sur Poitiers-Augouard.
 - La combustion de fuel fossile (%ff) peut atteindre jusqu'à 49 % des PM₁₀ sur des valeurs journalières, comme le 13 décembre 2021 sur Limoges-Berland.
 - La combustion de fuel fossile (%ff) contribue régulièrement à la totalité des PM₁₀ (100 %) sur des valeurs horaires.

⁴ Cf paragraphe « Statistiques » dans la section « Définitions »

5.1.2. Evolution annuelle

Le diagramme en boîte, ou « boxplot » en anglais, est la représentation statistique d'une série de données. Cet outil graphique permet la représentation des informations de dispersion de la série de données étudiée : moyenne, médiane, valeurs extrêmes, premiers et troisièmes quartiles. Le plancher de la boîte correspond au 1^{er} quartile, le plafond au 3^{ème} quartile. De fait, 50 % des concentrations observées se situent dans l'amplitude définie par les plages haute et basse de la boîte. Les valeurs minimales (25% des plus faibles) et maximales (25 % des plus élevées) en sont excluent. L'explication de la lecture de ces diagrammes se trouve en annexe 4.

En raison des faibles taux de fonctionnement des appareils Bordeaux-Talence 2022 (14 %) et Limoges-Berland 2019 (70 %), les résultats ne sont pas présentés, car ceux-ci sont jugés non représentatifs de l'année écoulée.

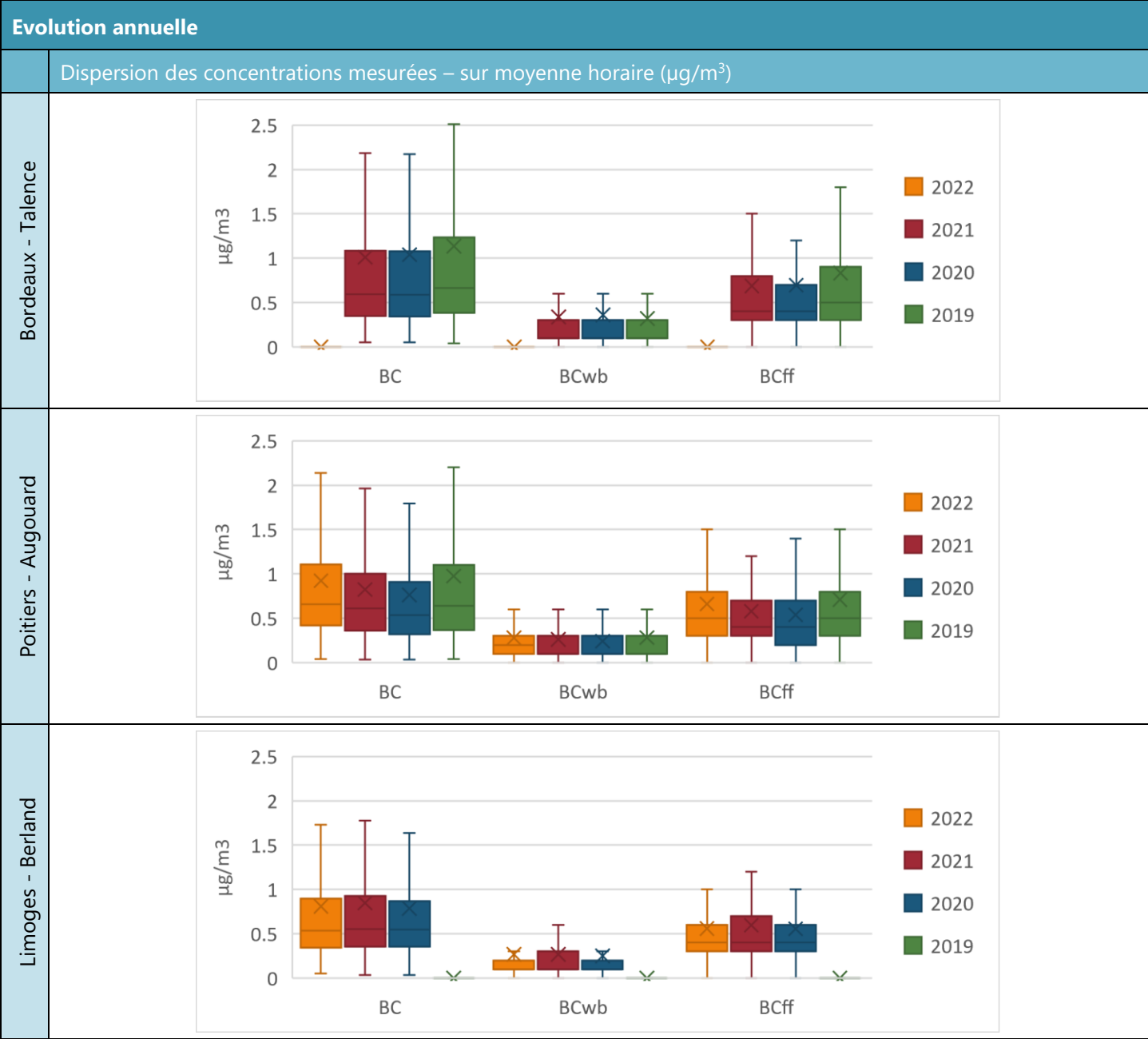


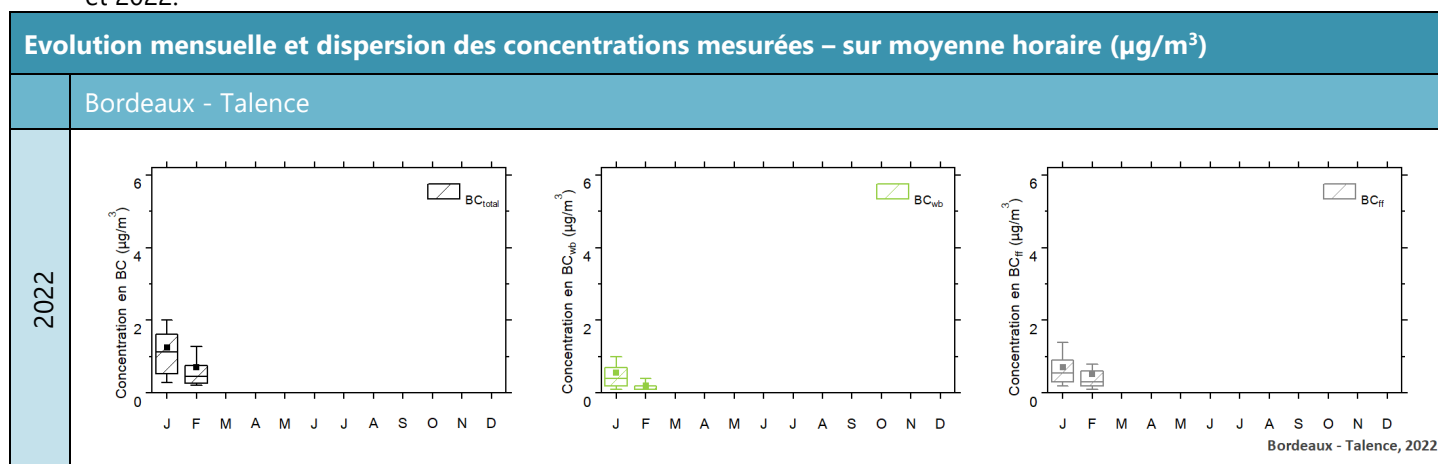
Figure 28 | BC, Evolution annuelle et dispersion des concentrations mesurées

- Pour les 3 paramètres [BC, BC_{wb} et BC_{ff}] ainsi que pour les 3 sites étudiés, les concentrations médianes⁵ (ligne horizontale centrale de la boîte) sont inférieures aux concentrations moyennes (représentées par la croix). L'écart entre ces 2 valeurs indique une répartition inégale des concentrations mesurées. Lorsque la médiane est inférieure à la moyenne, les inégalités se situent en haut de l'échelle. Plus la ligne verticale est longue, plus la dispersion des mesures sera grande et plus les valeurs atteintes seront élevées.
 - Les épisodes de pollution, avec des concentrations élevées tirent la moyenne vers le haut.
- **BC**, l'année 2019 présente des concentrations moyennes et médianes annuelles plus hautes, ainsi qu'une étendue des valeurs est plus grande. Les concentrations maximales mesurées sont plus élevées que pour les autres années.
- **BC_{wb}** varie très peu sur ces 3 années. Les boxplots pour les 3 années sont très similaires : concentrations moyennes et médianes annuelles semblables, dispersion des mesures analogues.
- **BC_{ff}**, l'année 2020 présente une moyenne annuelle plus faible, ainsi qu'une dispersion des concentrations moins importante. L'année 2020 a été marquée par le Covid19 et ses mesures sanitaires contraignantes (confinements et limitations de déplacement), entraînant une réduction de trafic. Cette baisse de trafic est visible sur les concentrations en black carbon d'origine fossile.

5.1.3. Evolution mensuelle

- **BC**, les concentrations en Black Carbon évoluent au cours des saisons. En période hivernale, les concentrations en BC sont plus élevées ; elles sont plus faibles d'avril à septembre.
- **BC_{wb}** présente les concentrations les plus importantes d'octobre à février. La fraction issue de la combustion de biomasse provient essentiellement du chauffage domestique au bois. Pendant les périodes chaudes, celle-ci est faible, voire inexistante.
- **BC_{ff}**, la part issue de la combustion de fuel fossile présente moins de variation saisonnière. La combustion de fuel fossile, provenant en majeure partie du trafic routier, est une source de pollution présente en continu tout au long de l'année. Une augmentation des concentrations est cependant visible en période hivernale, elle est à relier avec les conditions météorologiques : stabilité des masses d'air plus importantes, peu favorables à la dispersion des polluants dans l'atmosphère.

Les diagrammes ci-dessous présentent les concentrations mensuelles en Black Carbon, sous forme de boxplot, observées à Bordeaux-Talence, Poitiers-Augouard et Limoges-Berland au cours des années 2019, 2020, 2021 et 2022.



⁵ Cf paragraphe « Statistiques » dans la section « Définitions »

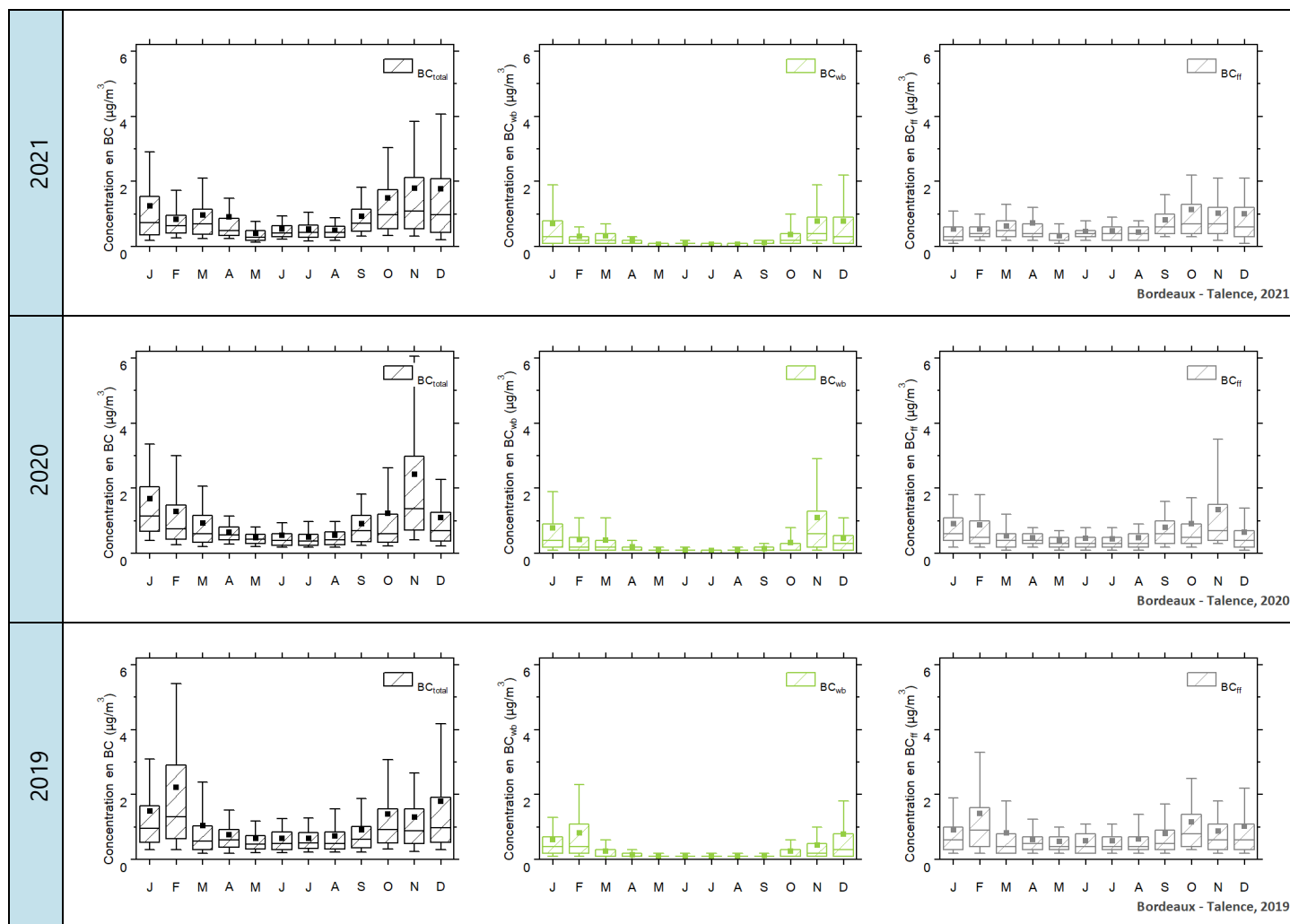


Figure 29 | BC, Bordeaux-Talence, Evolution mensuelle et dispersion des concentrations mesurées

- En mars et avril 2020, les concentrations en BC_{ff} sont particulièrement faibles et s'expliquent par les limitations de déplacements/trafic (Covid19).
- En novembre 2020, les niveaux en Black Carbon BC, BC_{ff} et BC_{wb} sont élevés. 14 jours présentent des niveaux en BC compris dans les 10 % des concentrations les plus hautes de l'année 2020, 12 jours pour le BC_{wb} et 11 jours pour le BC_{ff} . Les 23 et 24 novembre 2020, la Gironde était touchée par un épisode aux particules PM_{10} (procédure préfectorale d'information et de recommandations)
- En février 2019, les niveaux en Black Carbon BC, BC_{ff} et BC_{wb} sont élevés. 13 jours présentent des niveaux en BC compris dans les 10 % des concentrations les plus hautes de l'année 2019, 14 jours pour le BC_{wb} et 9 jours pour le BC_{ff} . Les 22, 23 et 26 février 2019, la Nouvelle-Aquitaine subissaient plusieurs épisodes de pollution aux particules PM_{10} (procédure préfectorale d'alerte pour les Landes et les Pyrénées-Atlantiques les 22 et 23 février et procédure préfectorale d'information et de recommandations le 26 février pour la Gironde).

Evolution mensuelle et dispersion des concentrations mesurées – sur moyenne horaire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

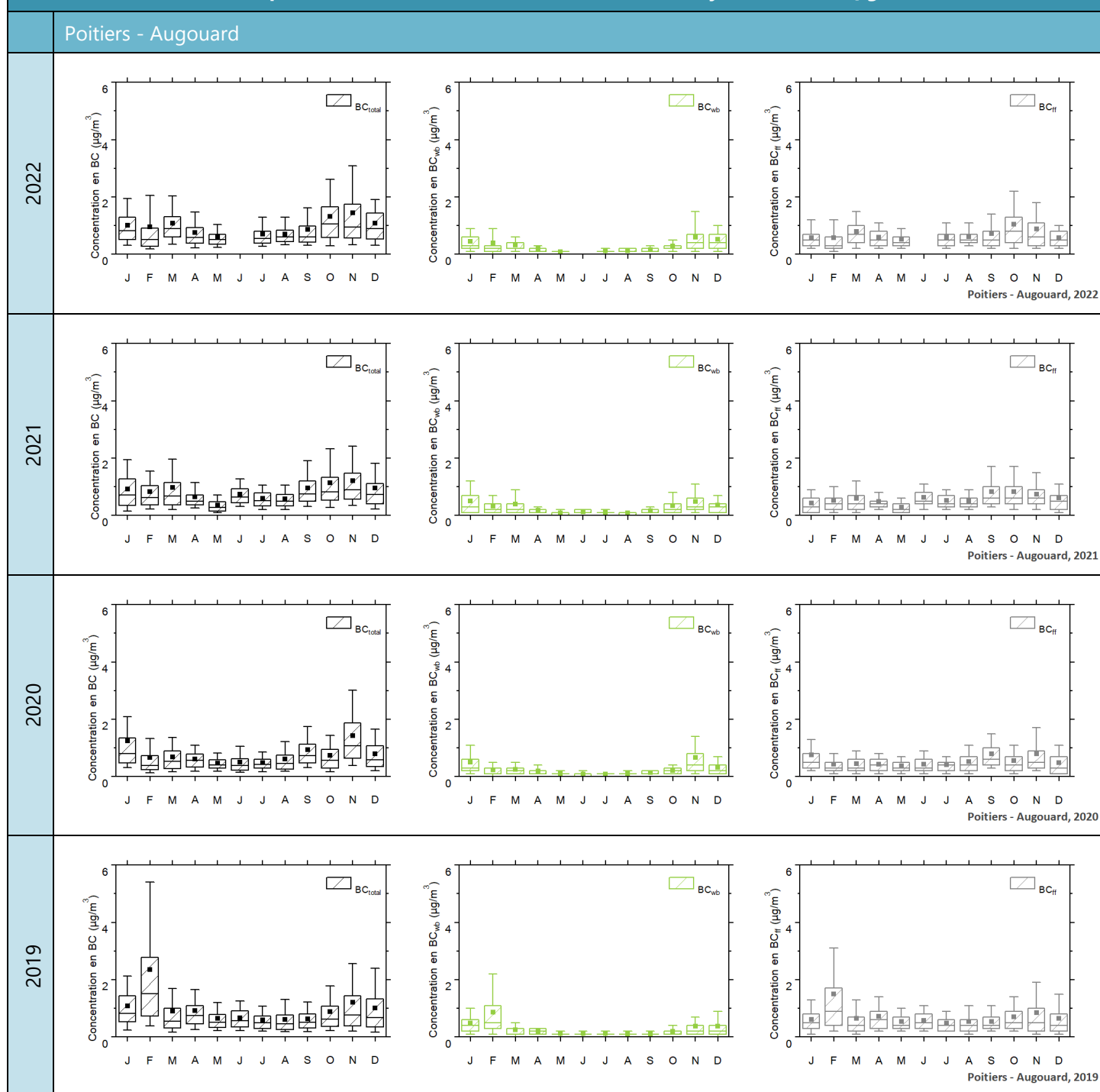


Figure 30 | BC, Poitiers-Augourd, Evolution mensuelle et dispersion des concentrations mesurées

- En novembre 2020, les niveaux en Black Carbon BC, BC_{ff} et BC_{wb} sont élevés. 16 jours présentent des niveaux en BC et BC_{wb} compris dans les 10 % des concentrations les plus hautes de l'année 2020 et 9 jours pour le BC_{ff}. Les 23 et 24 novembre 2020, la Nouvelle-Aquitaine était touchée par un épisode aux particules PM₁₀ (procédure préfectorale d'information et de recommandations en Gironde)
- En février 2019, les niveaux en Black Carbon BC, BC_{ff} et BC_{wb} sont élevés. 13 jours présentent des niveaux en BC compris dans les 10 % des concentrations les plus hautes de l'année 2019, 14 jours pour le BC_{wb} et 12 jours pour le BC_{ff}. La Nouvelle-Aquitaine subissait plusieurs épisodes de pollution aux particules PM₁₀ (procédure préfectorale d'alerte pour les Landes et les Pyrénées-Atlantiques les 22 et 23 février et procédure préfectorale d'information et de recommandations le 26 février pour la Gironde).

Evolution mensuelle et dispersion des concentrations mesurées – sur moyenne horaire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

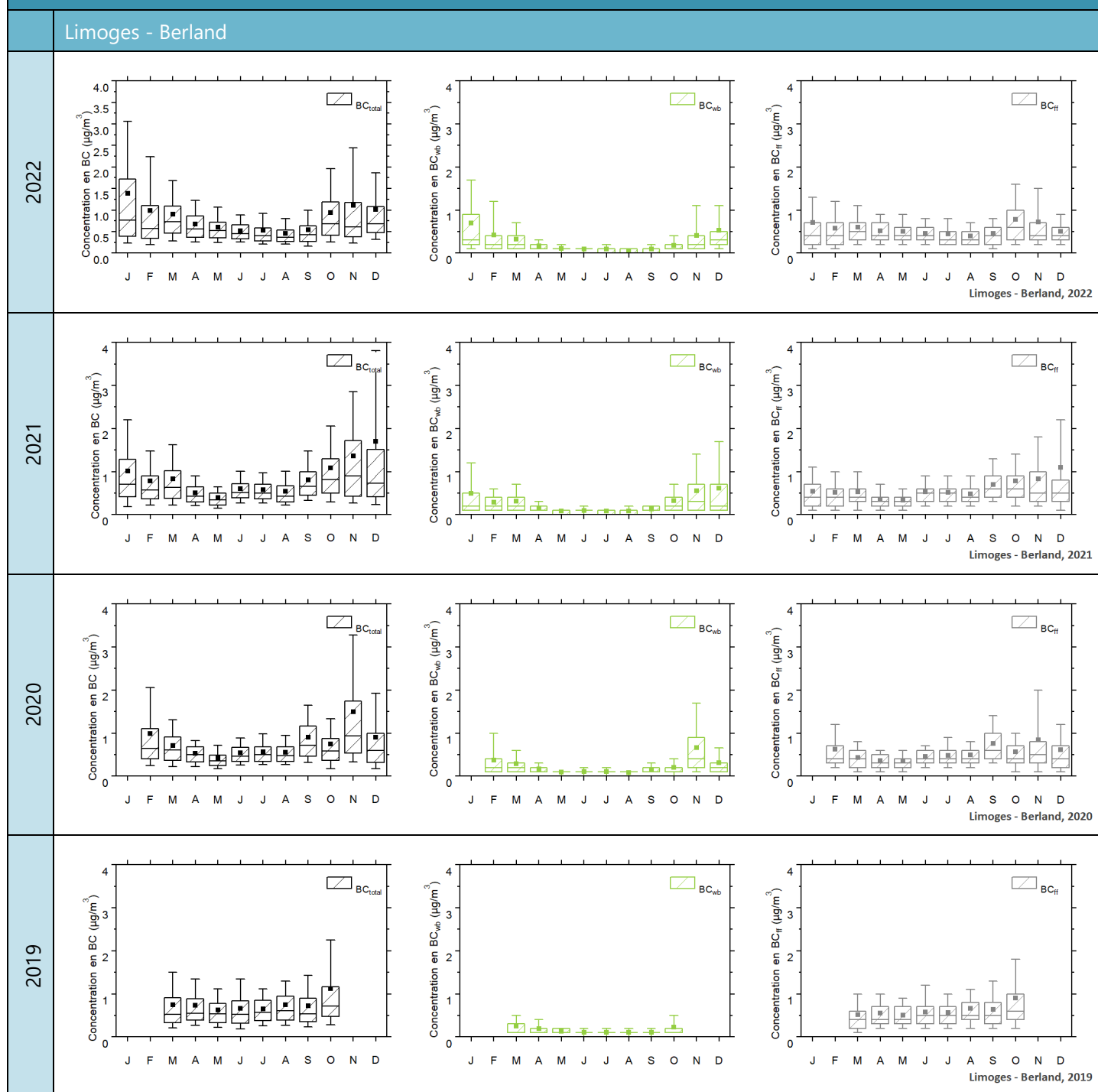


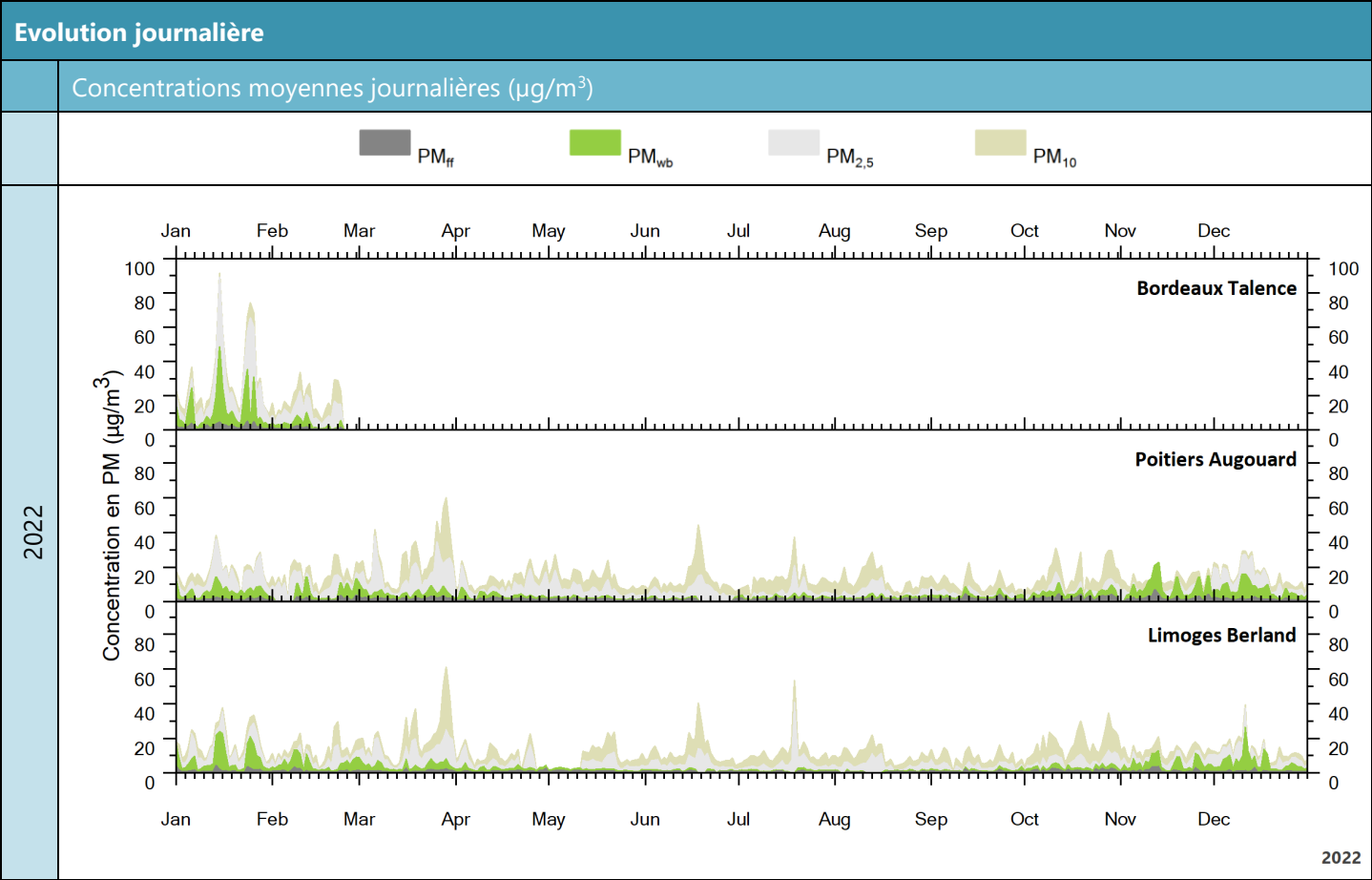
Figure 31 | BC, Limoges-Berland, Evolution mensuelle et dispersion des concentrations mesurées

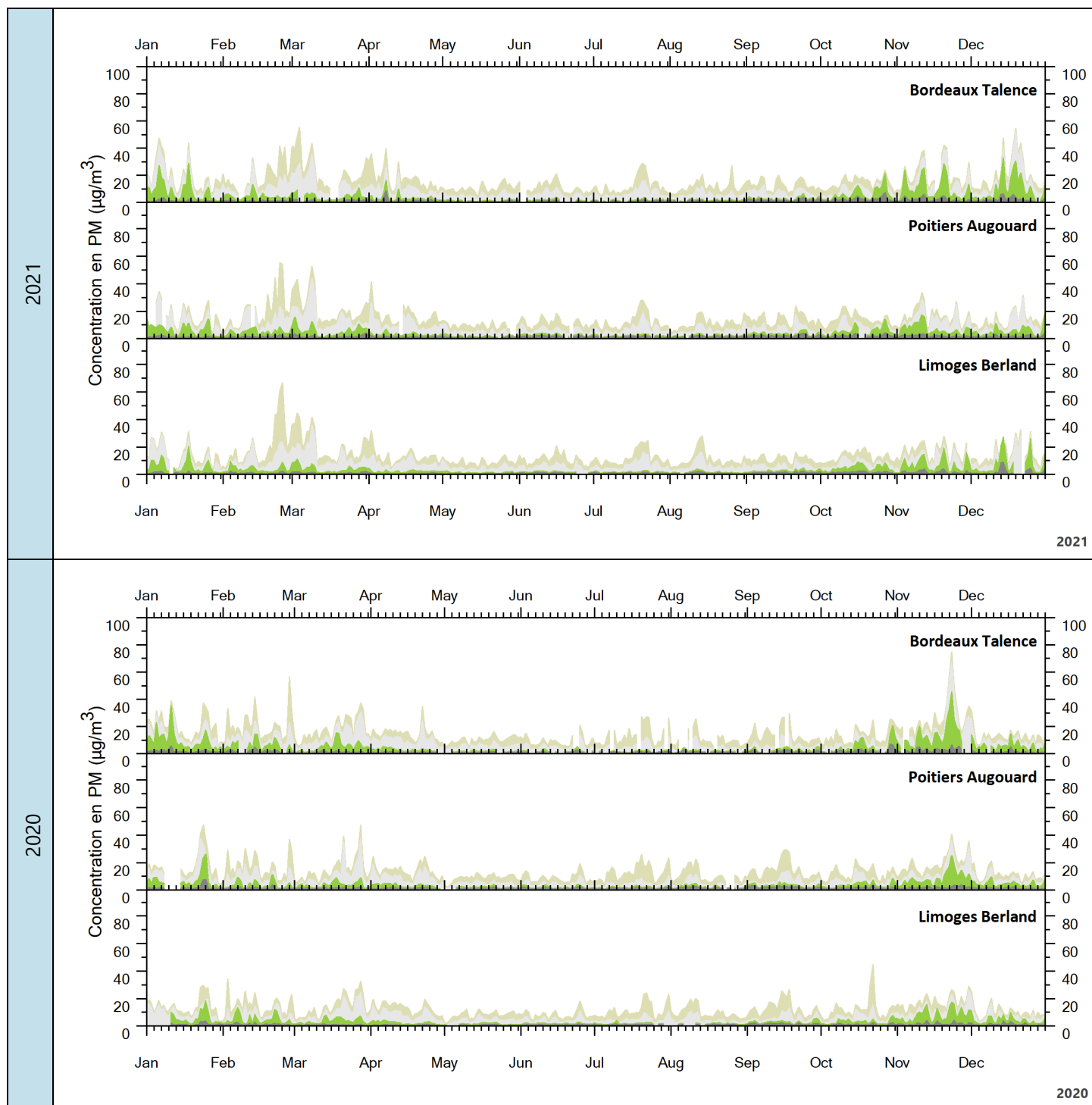
- En novembre 2020, les niveaux en Black Carbon BC, BC_{ff} et BC_{wb} sont élevés. 12 jours présentent des niveaux en BC compris dans les 10 % des concentrations les plus hautes de l'année 2020, 15 pour le BC_{wb} et 9 jours pour le BC_{ff}. Les 23 et 24 novembre 2020, la Nouvelle-Aquitaine était touchée par un épisode aux particules PM₁₀ (procédure préfectorale d'information et de recommandations en Gironde).
- En septembre 2020, la concentration en BC et BC_{ff} ressort par rapport à l'évolution annuelle attendue. La station Limoges-Berland étant située à proximité du parking de l'école, la rentrée scolaire ou la reprise des cours pourrait expliquer ces concentrations plus importantes.

5.1.4. Evolution journalière

- ➔ L'impact saisonnier est peu visible sur les concentrations en PM_{10} et $PM_{2,5}$ du fait de la multitude de sources entrant en jeu dans leur composition, ainsi que sur les concentrations en PM_{ff} dont la source est relativement constante au cours des saisons.
- ➔ Les concentrations en PM_{wb} varient beaucoup suivant les saisons ; très faibles durant les périodes chaudes, les PM_{wb} sont bien plus présentes en saison froide.

Les graphiques ci-dessous illustrent l'évolution journalière des concentrations en PM_{10} , $PM_{2,5}$ et des fractions issues de la combustion de bois et de la combustion de fuel fossile, pour les sites Bordeaux-Talence, Poitiers-Augouard et Limoges-Berland.





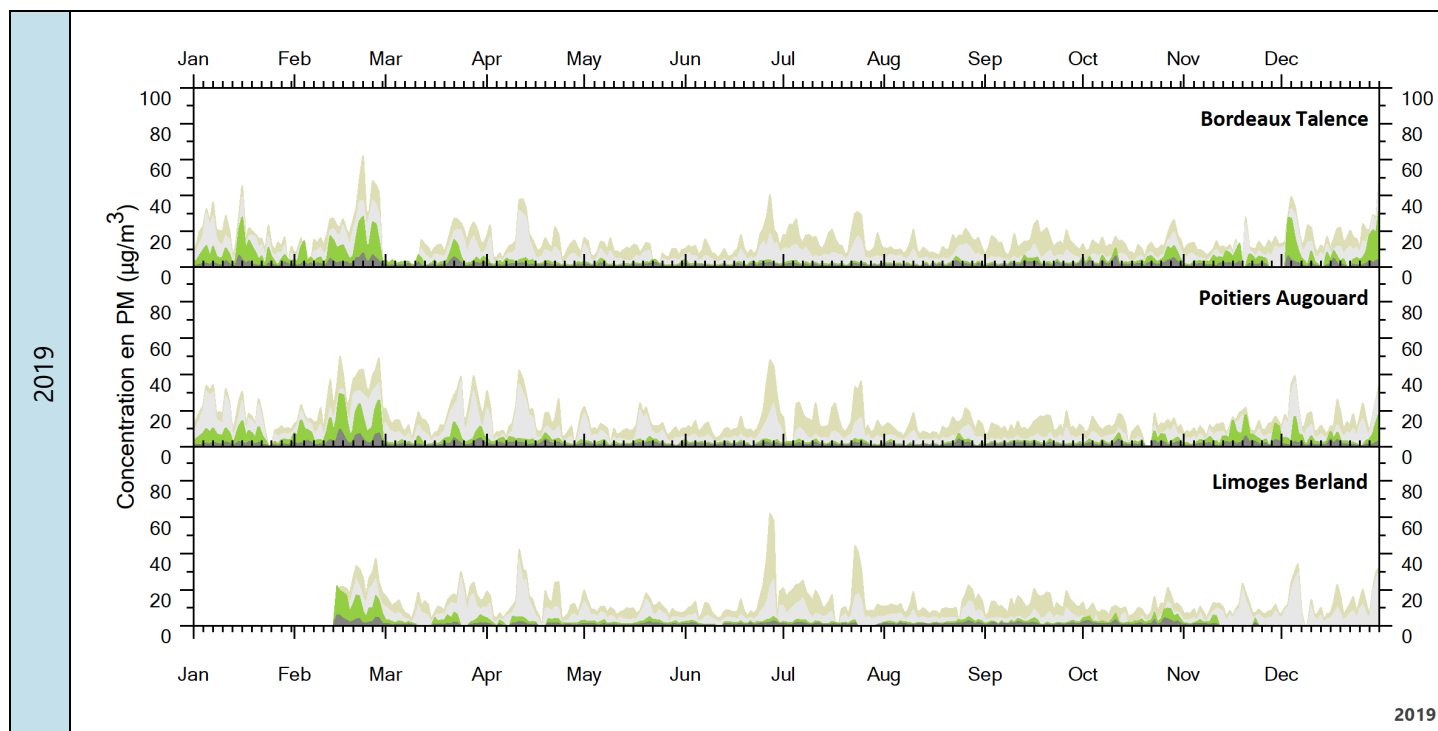
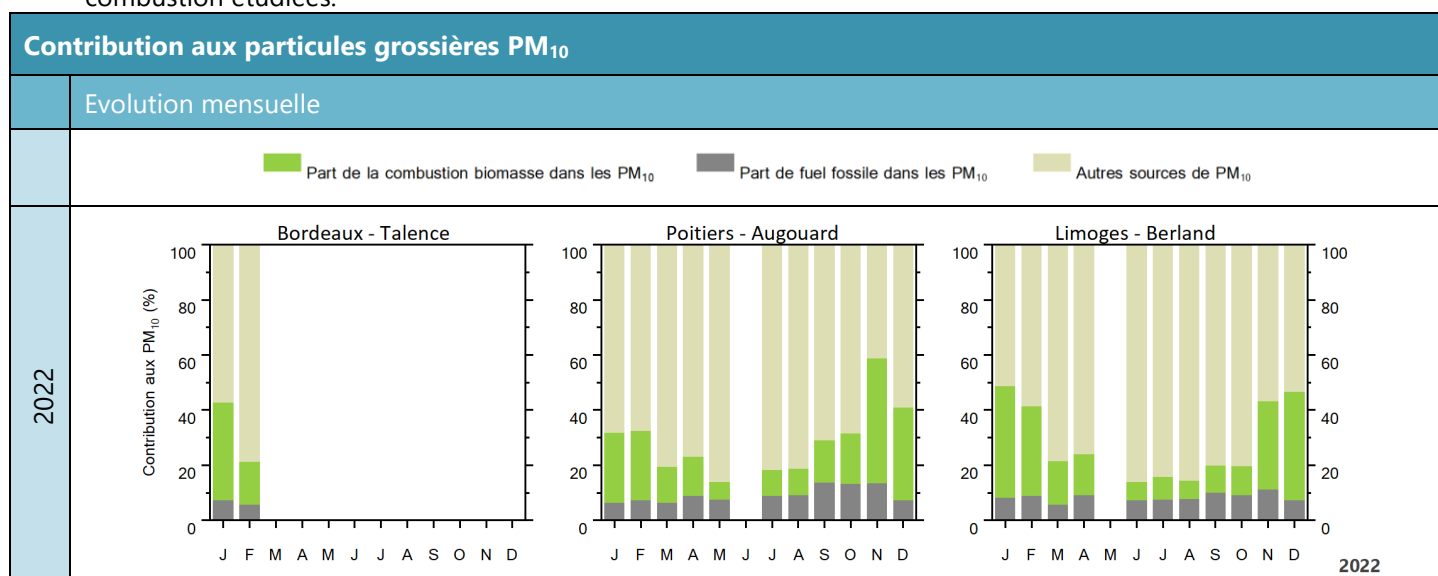


Figure 32 | BC, Evolution des concentrations moyennes journalières

- En janvier et février 2022, en Gironde, plusieurs épisodes de pollution aux particules PM_{10} ont été caractérisés : dépassement du seuil d'alerte le 15 janvier ainsi que dépassement du seuil d'information et recommandations les 16, 24, 25 et 26 janvier, puis les 21 et 22 février 2022. Durant ces journées, la part de particules PM_{wb} représentaient 37 à 48 % des PM_{10} .
- Les 23 et 24 novembre 2020, le seuil d'information et de recommandations pour les PM_{10} est dépassé en Gironde. Durant ces journées, la part de particules PM_{wb} représentaient 52 puis 45 % des PM_{10} .
- En 2019, les 22, 23 et 26 février, plusieurs procédures préfectorales concernant les PM_{10} ont été caractérisés en Nouvelle-Aquitaine. La part de particules PM_{wb} représentaient en moyenne journalière 33 % des PM_{10} . Sur Poitiers-Augouard et Limoges-Berland, sans atteindre le seuil d'information et de recommandations des PM_{10} , la part des particules PM_{wb} est également conséquente durant ces journées et témoigne de l'impact du chauffage résidentiel au bois.

Les figures ci-dessous présentent les moyennes mensuelles des contributions aux PM_{10} des deux sources de combustion étudiées.



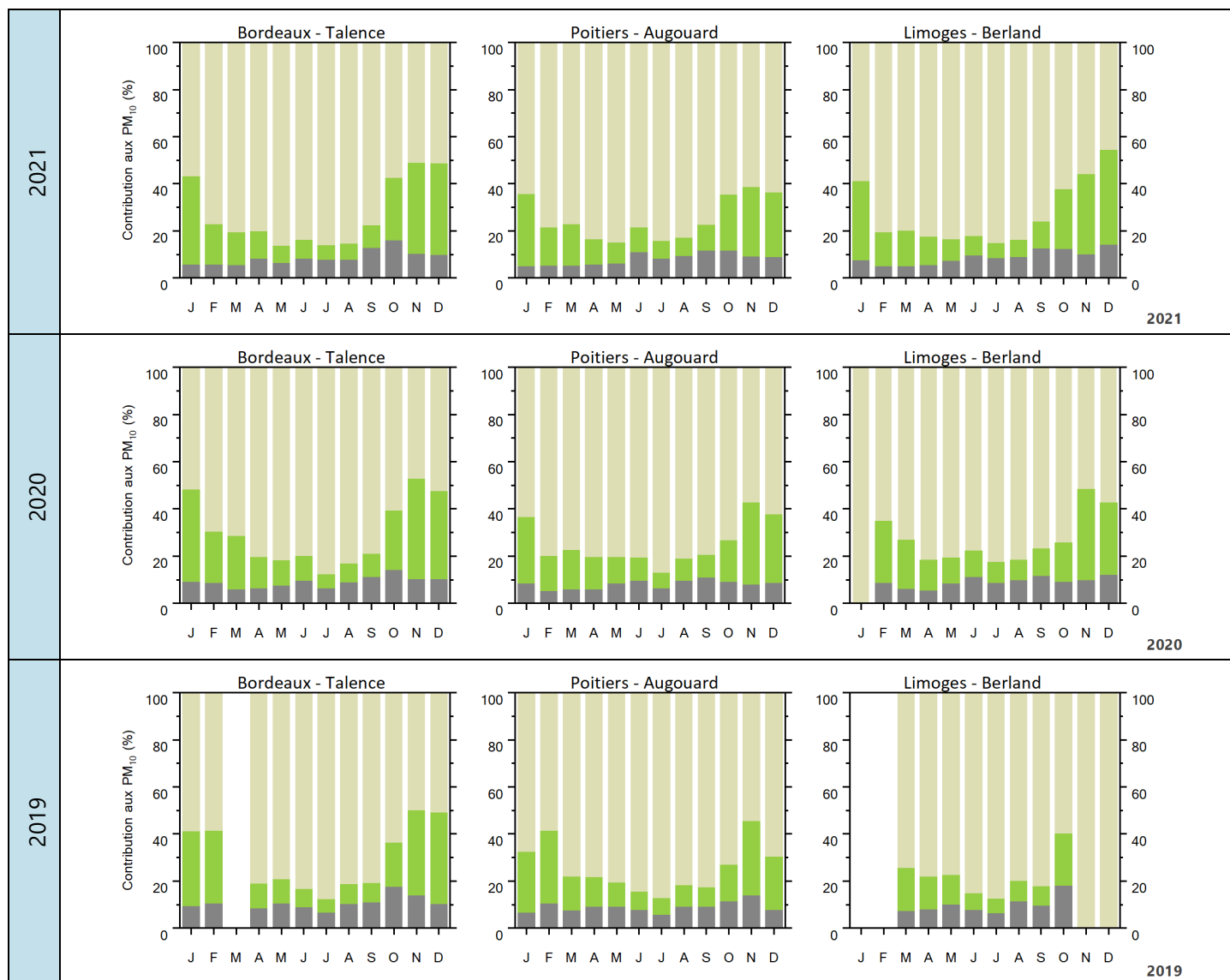


Figure 33 | BC, Contribution mensuelle aux particules grossières PM_{10}

→ **Combustion de biomasse (PM_{wb})**, sa contribution varie énormément au cours des saisons. Nettement plus importante l'hiver, la part de combustion de biomasse provient principalement du chauffage résidentiel.

- Bordeaux-Talence : la contribution minimale observée est de 6 % (juillet 2019), la contribution maximale atteint 42 % (novembre 2020).
- Poitiers-Augouard : de 6 % (mai 2022) jusqu'à 45 % (novembre 2022)
- Limoges-Berland : de 6 % (juillet 2019) jusqu'à 40 % (janvier 2022)

→ **Combustion de fuel fossile (PM_{ff})**, provenant en grande partie du trafic routier, les émissions sont présentes tout au long de l'année, la contribution PM_{ff} est plus stable, il y a moins de variation au fil des saisons.

- Bordeaux-Talence : de 5 % (mars 2021) jusqu'à 18 % (octobre 2019)
- Poitiers-Augouard : de 5 % (janvier 2021) jusqu'à 14 % (novembre 2019)
- Limoges-Berland : de 5 % (mars 2021) jusqu'à 18 % (octobre 2019)

5.1.5. Profils journaliers

Les profils journaliers moyens permettent de caractériser le comportement général des polluants au cours d'une journée. Les concentrations en PM_{wb} et PM_{ff} évoluent et diffèrent suivant le site, les saisons, l'heure de la journée, mais également suivant les jours de la semaine.

→ PM_{ff}

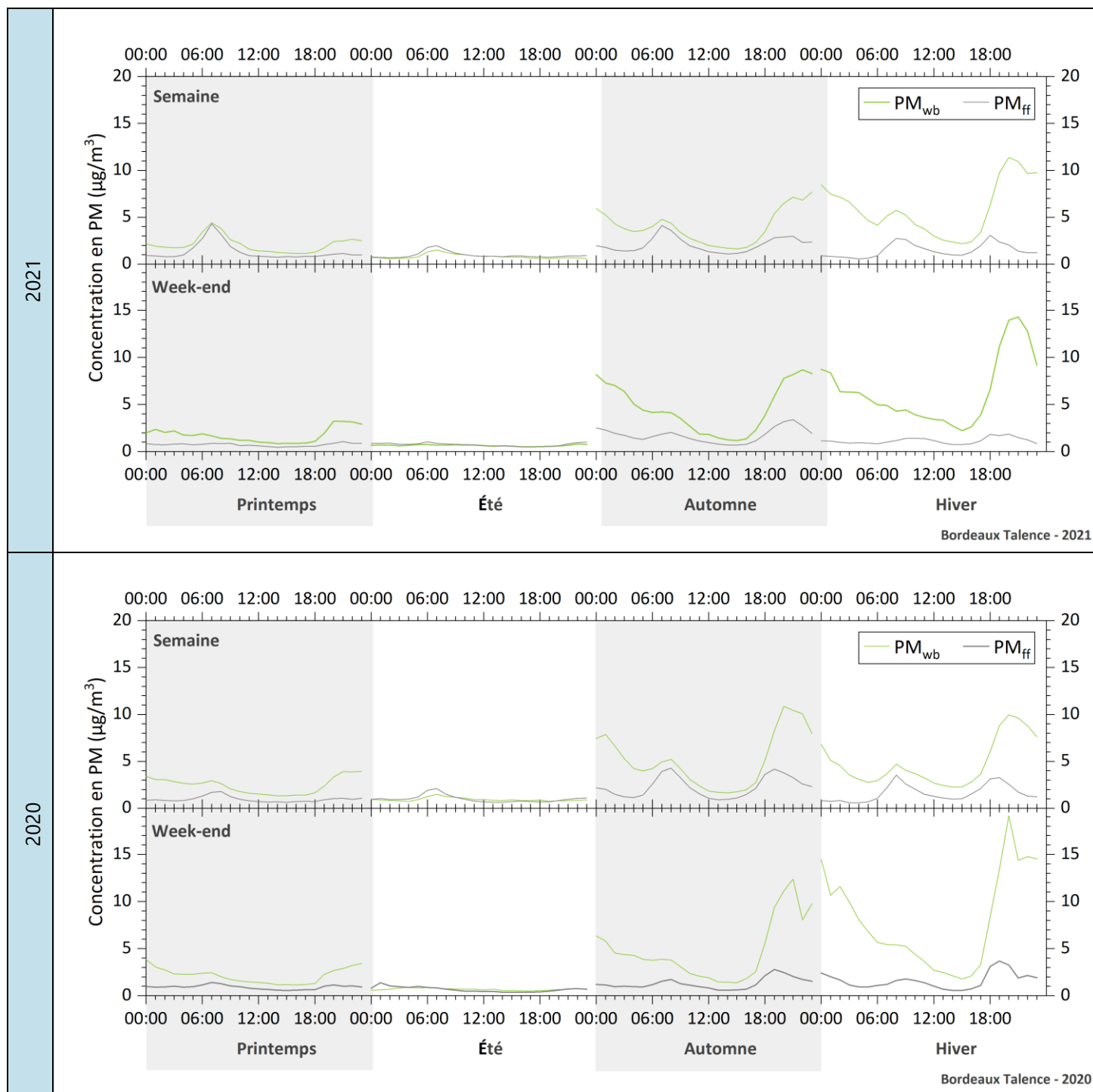
- Les 3 sites présentent des profils classiques de fond urbain avec 2 pics : le premier vers 7h-9h et un autre en début de soirée, vers 18h (heure TU) correspondant aux pics d'émissions du trafic routier, causés par les trajets « domicile-travail ».
- La différence entre les jours de semaine et de weekend est clairement visible sur les PM_{ff} , les concentrations du week-end sont stables au fil de la journée et présentent peu d'augmentations de particules en lien avec le trafic routier aux heures de pointe. Selon la saison (automne et hiver) et parce que les conditions météorologiques sont favorables à l'accumulation de pollution, de légères augmentations de particules sont observables le matin et en début de soirée.
- Au printemps 2020, le profil journalier moyen des particules PM_{ff} est relativement plat en comparaison aux 3 autres années et ne présente pas l'habituelle augmentation des concentrations entre 7 et 9h le matin. Cette période correspond aux restrictions de déplacement induites par le Covid19 et explique les niveaux plus faibles des particules.

→ PM_{wb}

- Les 3 sites présentent des profils typiques de chauffage résidentiel : l'évolution au cours de la journée montre une augmentation importante des PM_{wb} en fin de journée, notamment en automne et en hiver. Les niveaux commencent à augmenter à partir de 17h, les concentrations restent élevées en début de soirée et diminuent lentement jusqu'au petit matin. Ce pic est lié à la combustion de bois. En effet, les saisons froides sont propices aux émissions primaires provenant du chauffage. Pour les particules, sur cette période, la contribution des feux de cheminées est significative.
- Le week-end, les concentrations atteintes en PM_{wb} sont plus élevées qu'en semaine. L'utilisation du chauffage au bois y est plus importante.

Les figures suivantes illustrent les évolutions des concentrations en Black Carbon au cours d'une journée. Les quatre saisons ont été distinguées : printemps (mars, avril, mai), été (juin, juillet, août), automne (septembre, octobre, novembre) et hiver (décembre, janvier, février). Deux catégories de profils sont présentées, la première représentant les jours de semaine (lundi au vendredi), la seconde illustrant les jours de week-end (samedi, dimanche). Les profils journaliers sont en heure TU (temps universel).

Profils journaliers moyens des concentrations	
	Bordeaux - Talence
2022	---



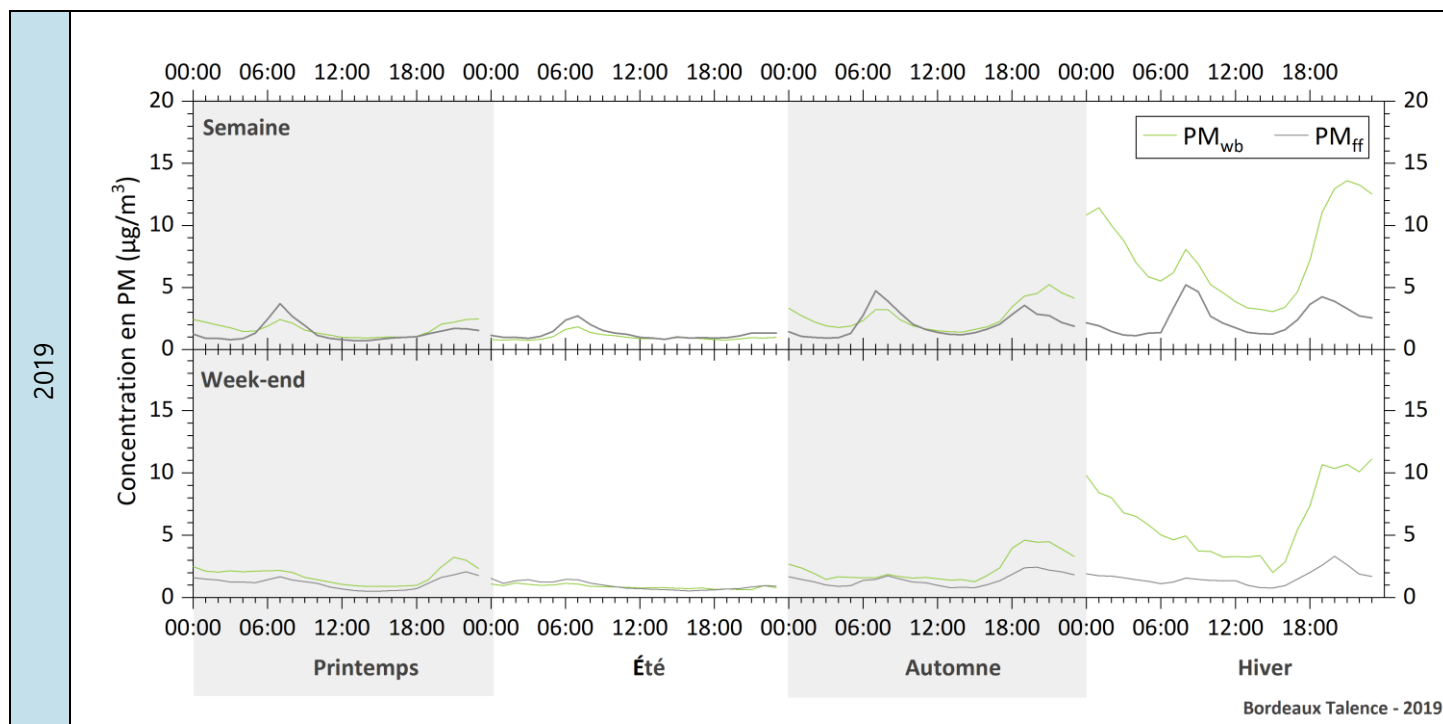
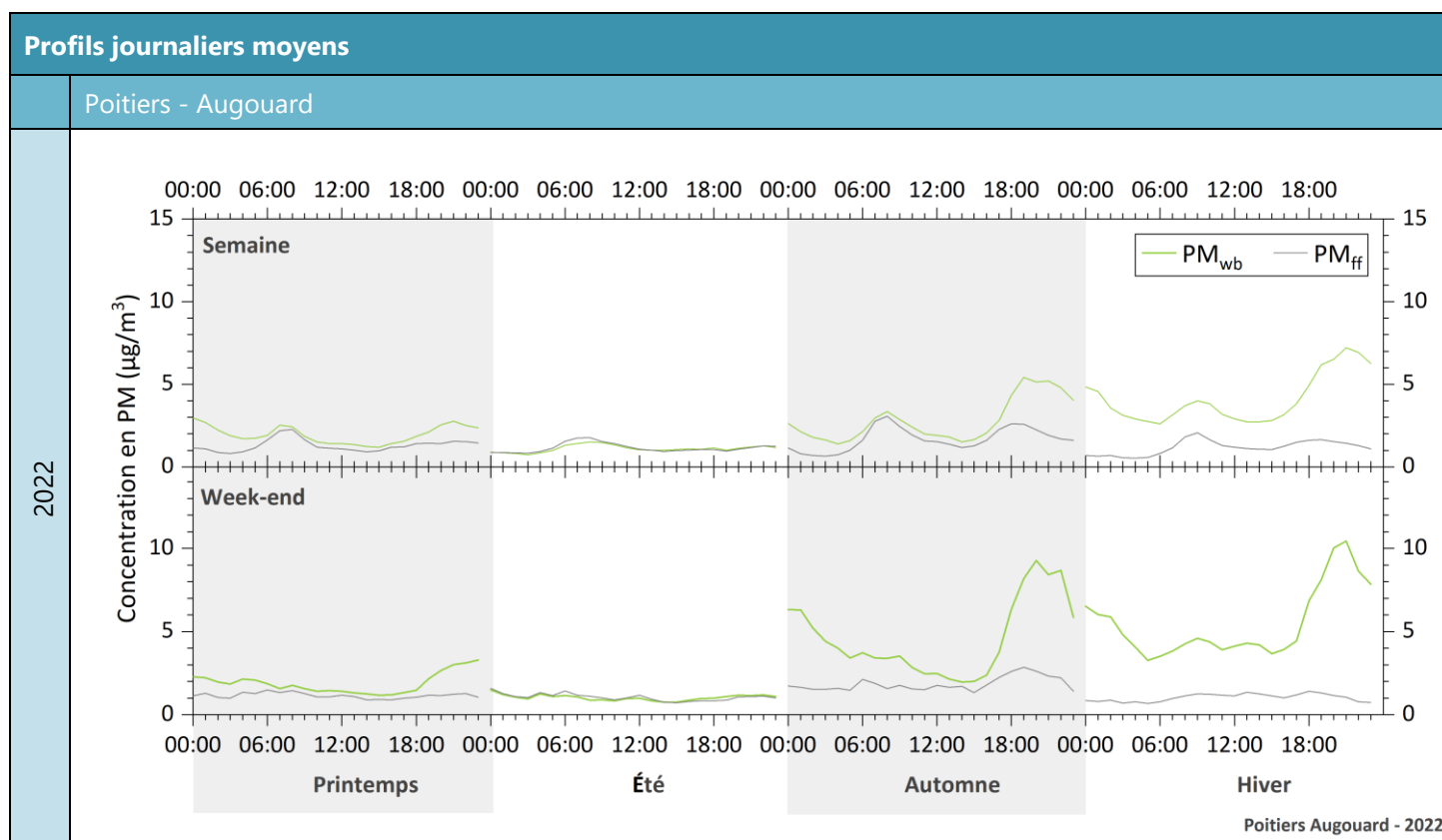
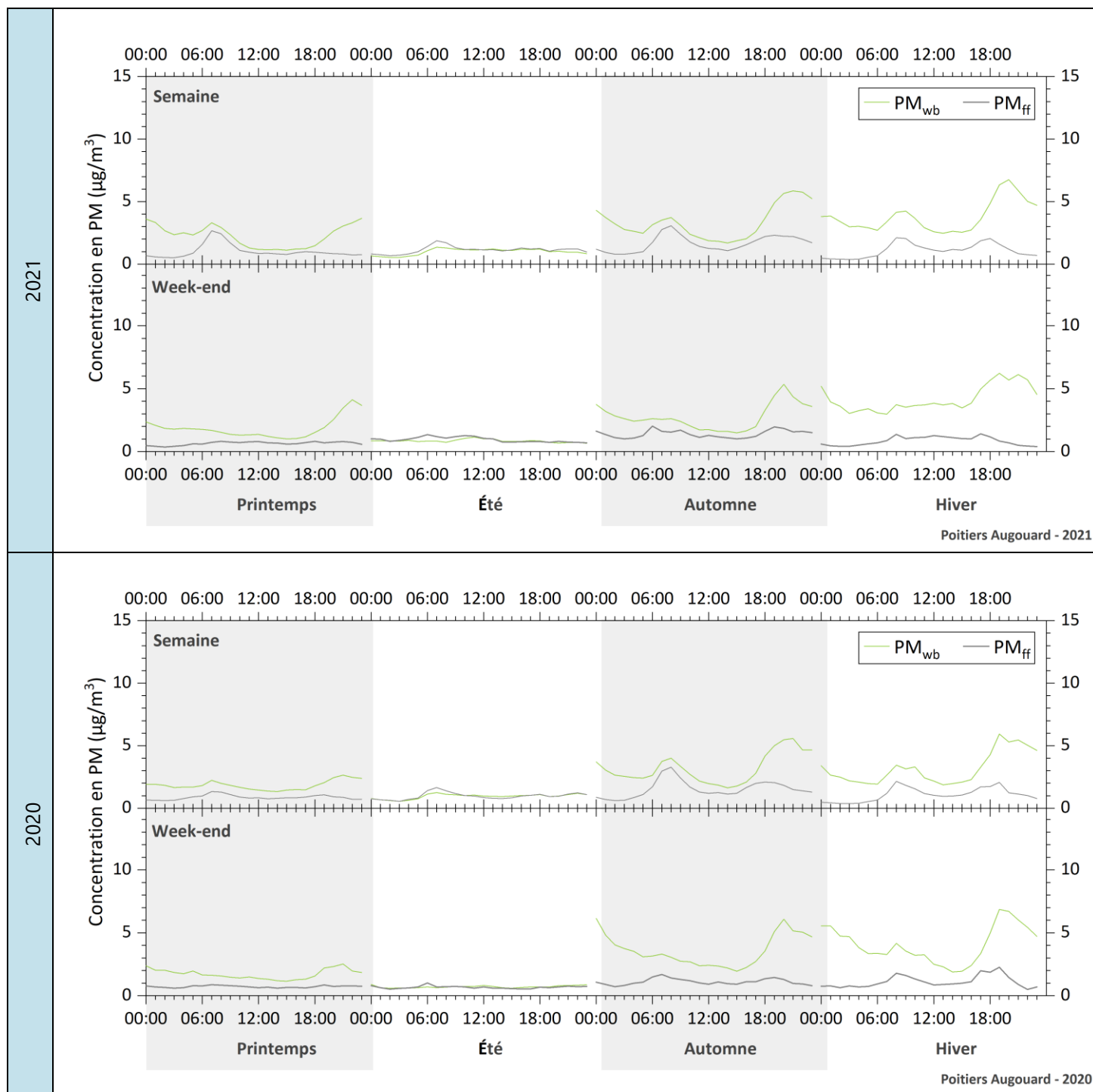


Figure 34 | BC, Bordeaux-Talence, Profils moyens journaliers (heure TU)





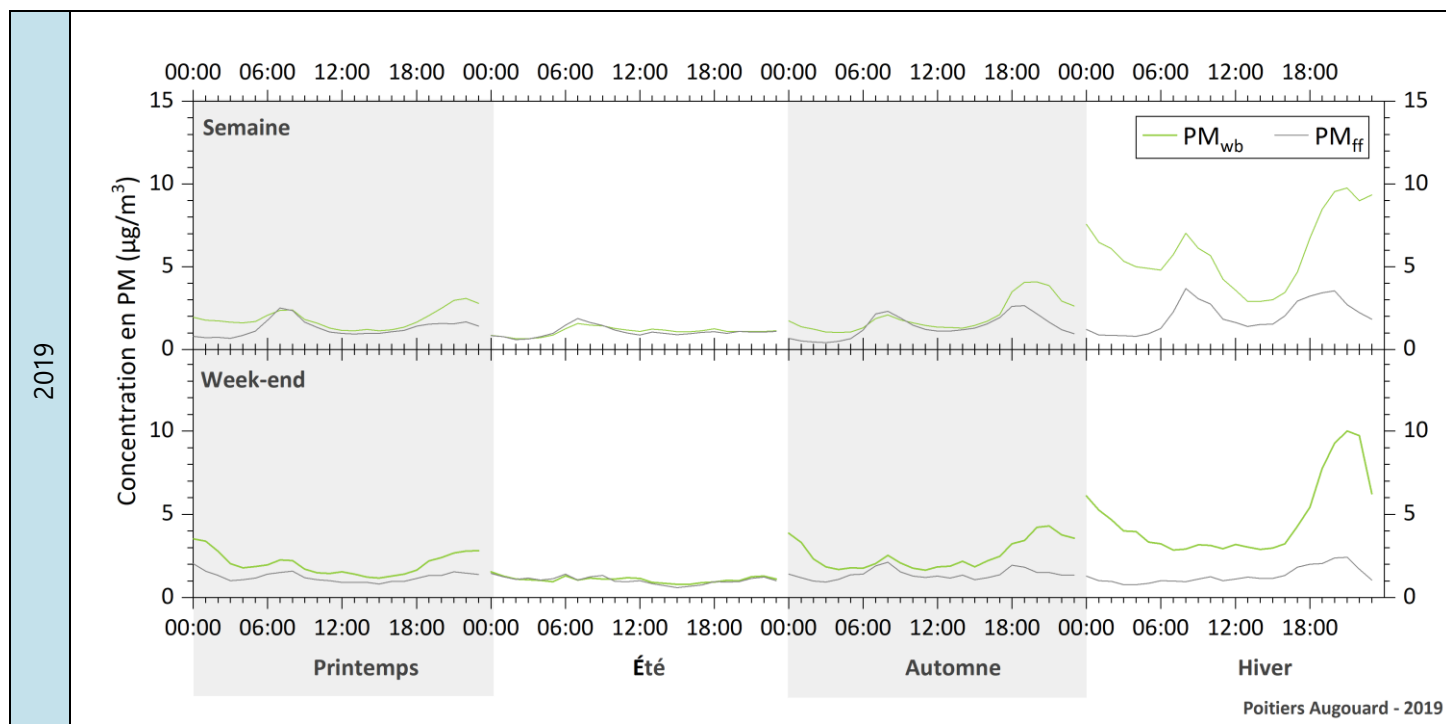
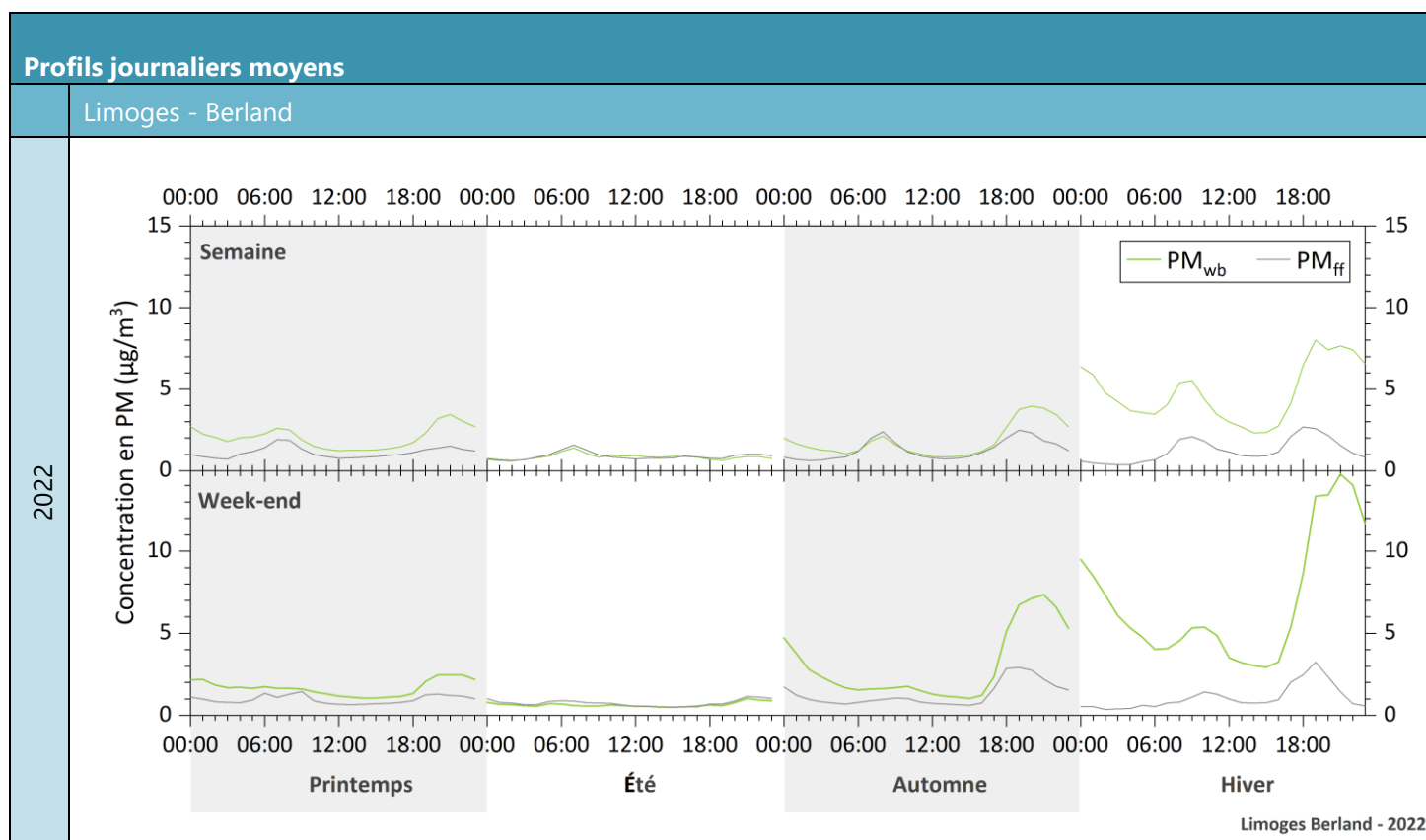
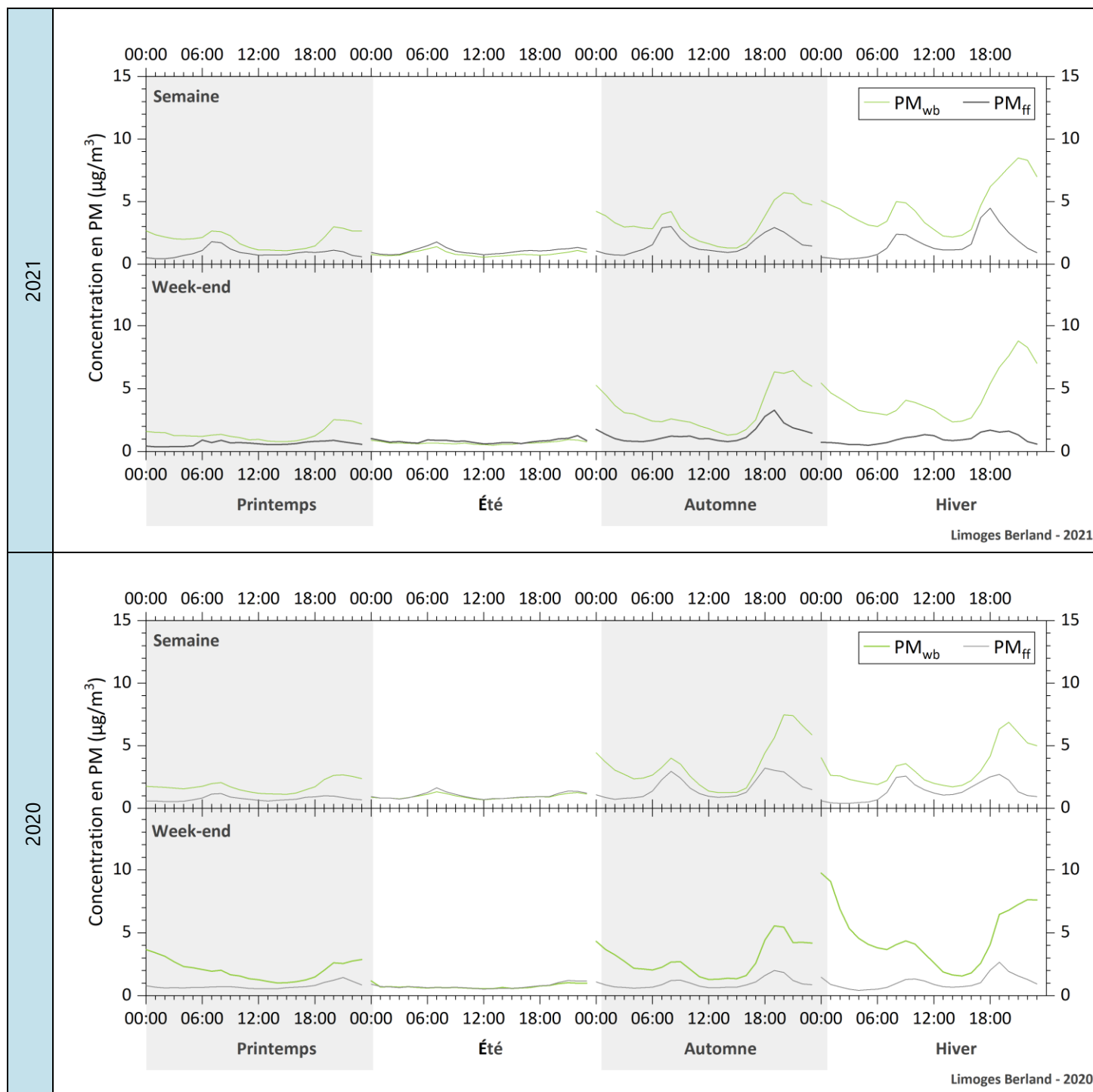


Figure 35 | BC, Poitiers-Augouard, Profils moyens journaliers





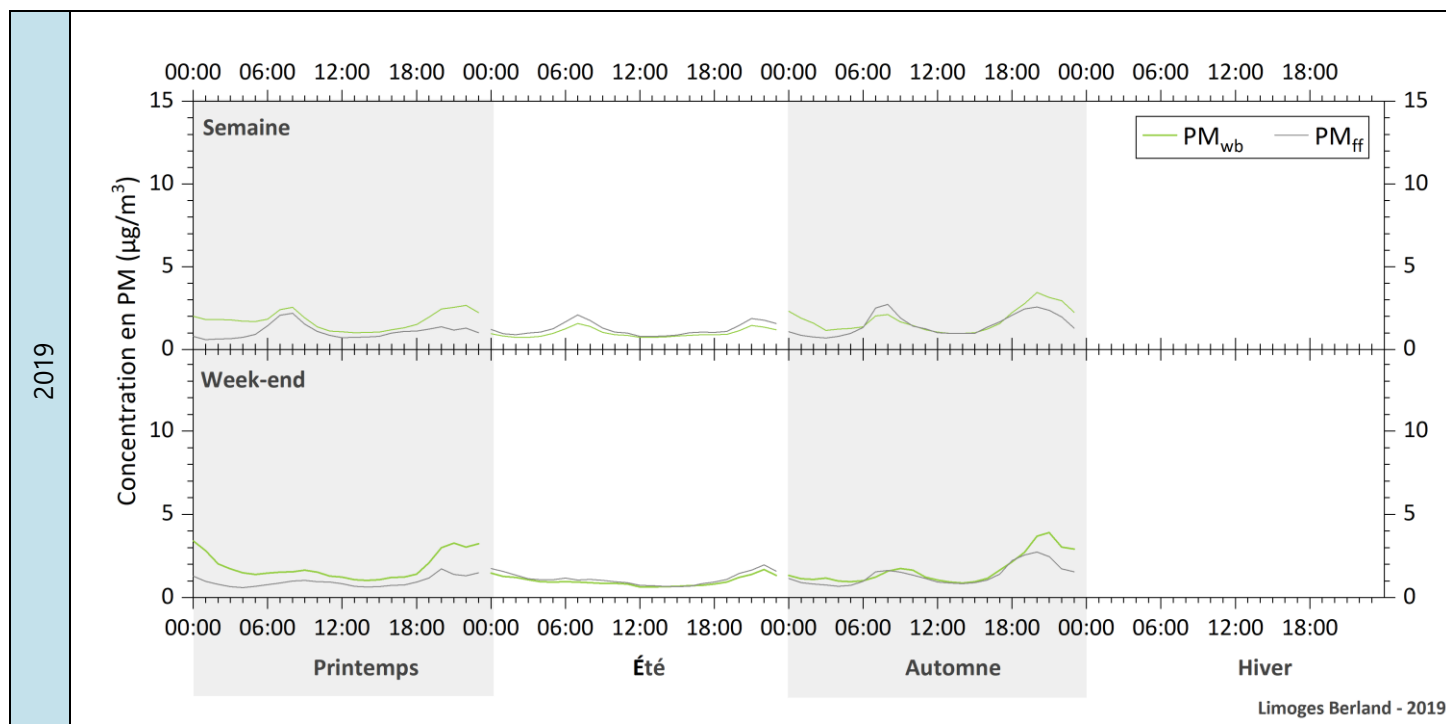


Figure 36 | BC, Limoges-Berland, Profils moyens journaliers

5.1.6. Corrélation avec les autres polluants

Les coefficients de corrélation de Pearson représentent l'intensité de relation qui existe entre deux polluants. Il est compris entre -1 et 1. Dans les figures suivantes, les corrélations positives sont affichées en bleu et correspondent à des liens forts entre polluants ; les corrélations négatives en rouge. L'intensité de la couleur est proportionnelle au coefficient de corrélation.

Pour les 3 sites, les plus fortes corrélations sont observées pour :

- ➔ **BC_{ff}**, avec les oxydes d'azote (NO_x, NO et NO₂), polluants caractéristiques du trafic routier
- ➔ **BC_{wb}**, avec la matière organique (OM), polluant émis par la combustion de biomasse.
- ➔ BC_{tot}, BC_{ff} et BC_{wb} présentent également de bonnes corrélations avec les particules (PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁), ceci s'explique par le fait que le Black Carbon est une composante des particules.
- ➔ Aucune corrélation avec l'ozone, ni pour le BC_{ff}, ni pour le BC_{wb}.

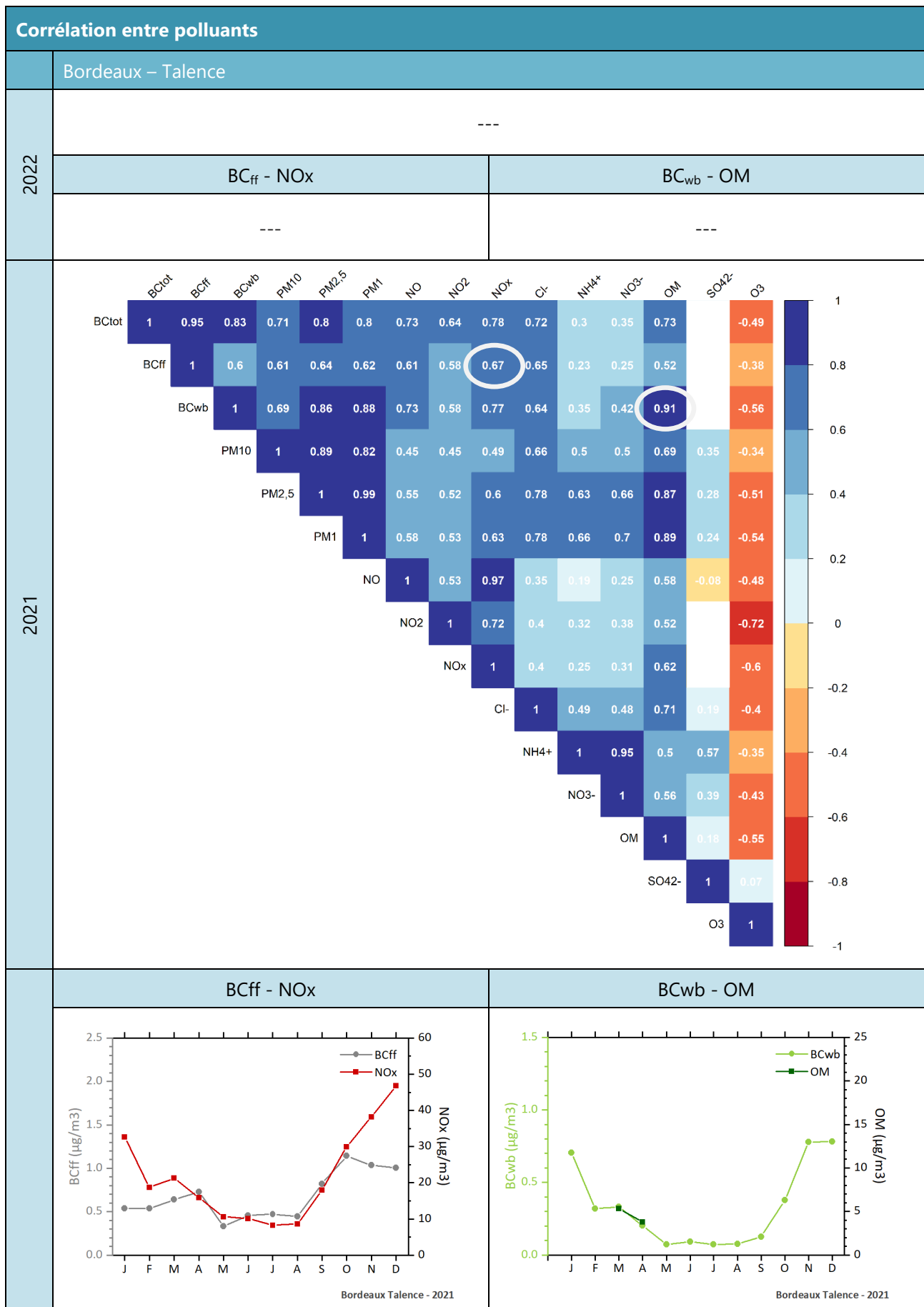
Sous les coefficients de corrélation, l'évolution des moyennes mensuelles illustre les évolutions conjointes du Black Carbon aux autres polluants :

- BC_{ff} avec les oxydes d'azote (NO_x)
- BC_{wb} avec la matière organique (OM)

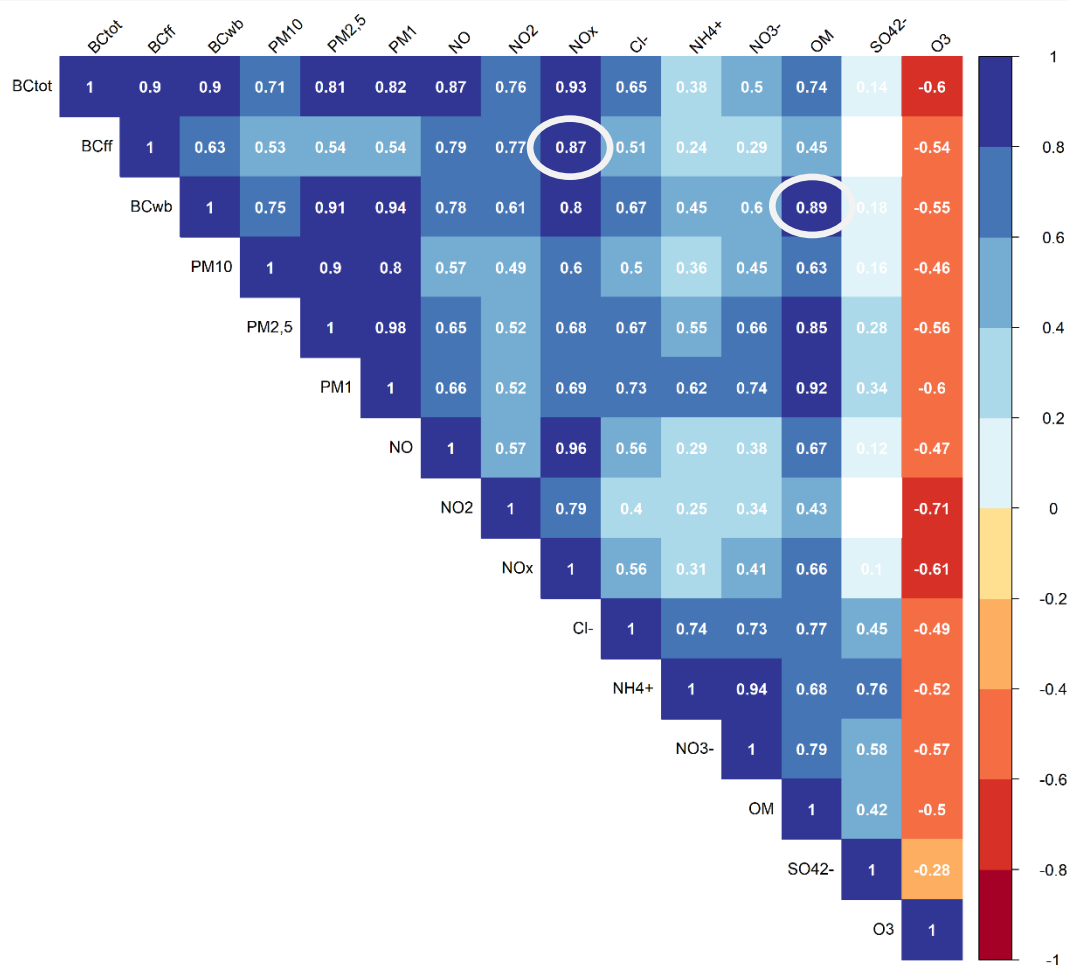
Bordeaux – Talence

En 2022, en raison de travaux à proximité de la station Bordeaux-Talence, l'aéthlalomètre AE33 a peu fonctionné (2 mois), c'est pourquoi, les corrélations 2022 ne sont pas présentées ici, elles sont jugées non représentatives de l'année.

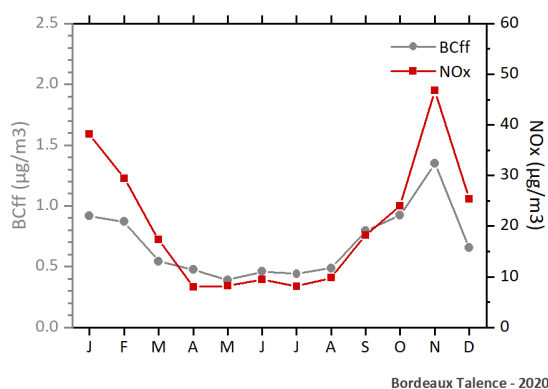
À Bordeaux-Talence, les corrélations atteignent 0,88 en 2019 entre le BC_{ff} et les NO_x, et 0,91 en 2021 entre le BC_{wb} et l'OM.



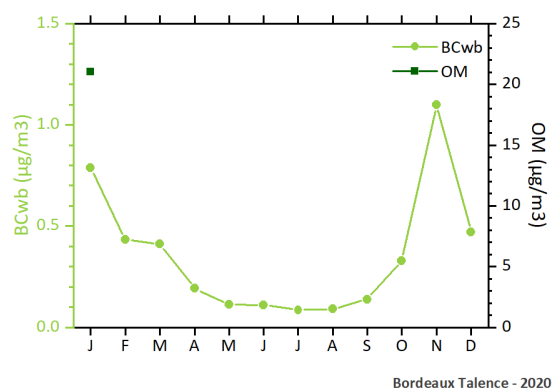
2020



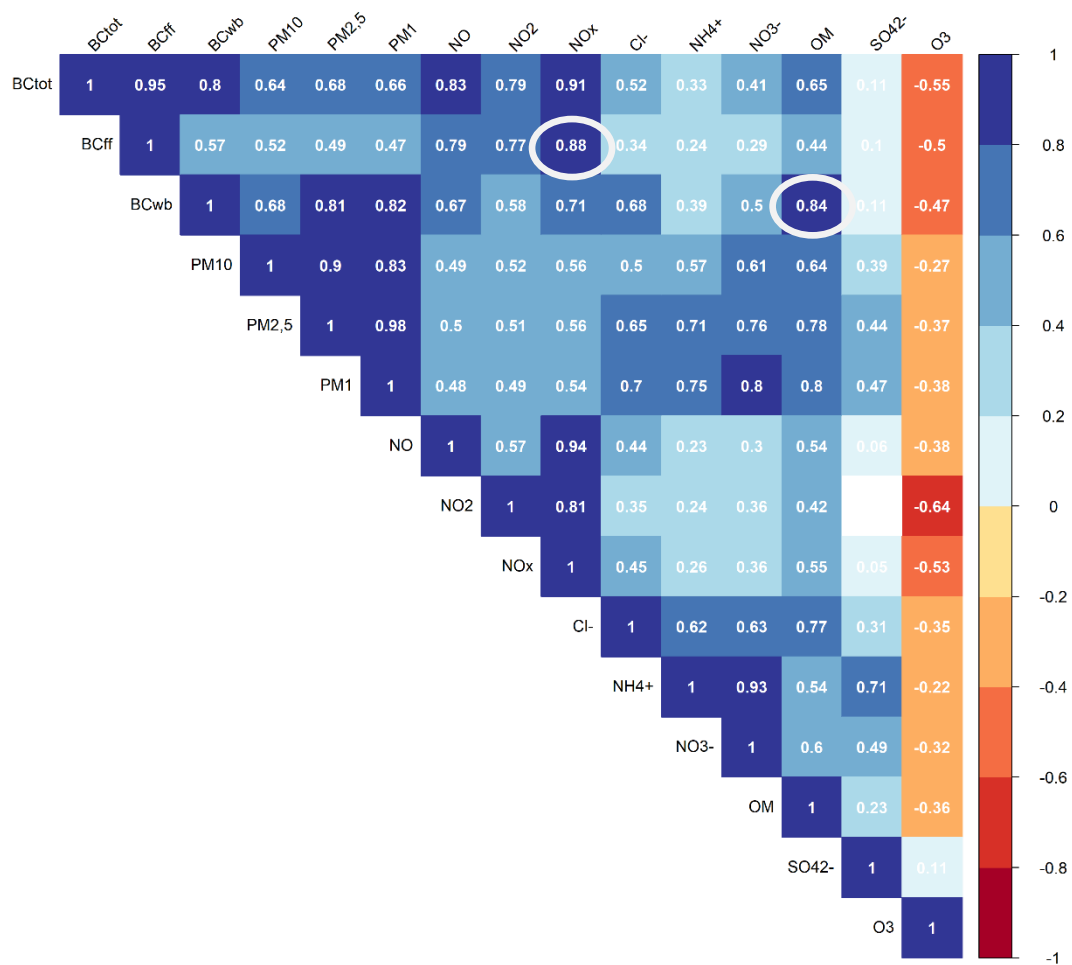
BCff - NOx



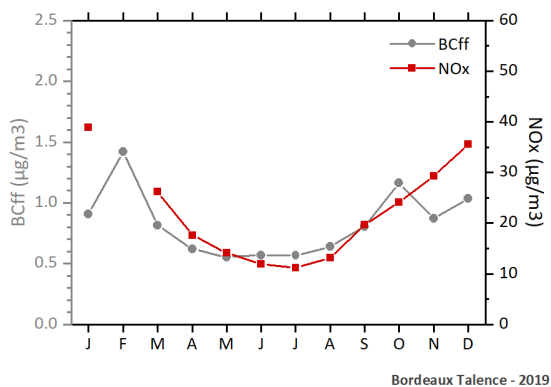
BCwb - OM



2019



BC_{ff} - NO_x



BC_{wb} - OM

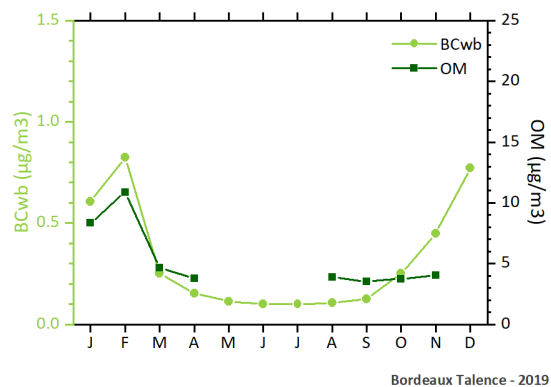
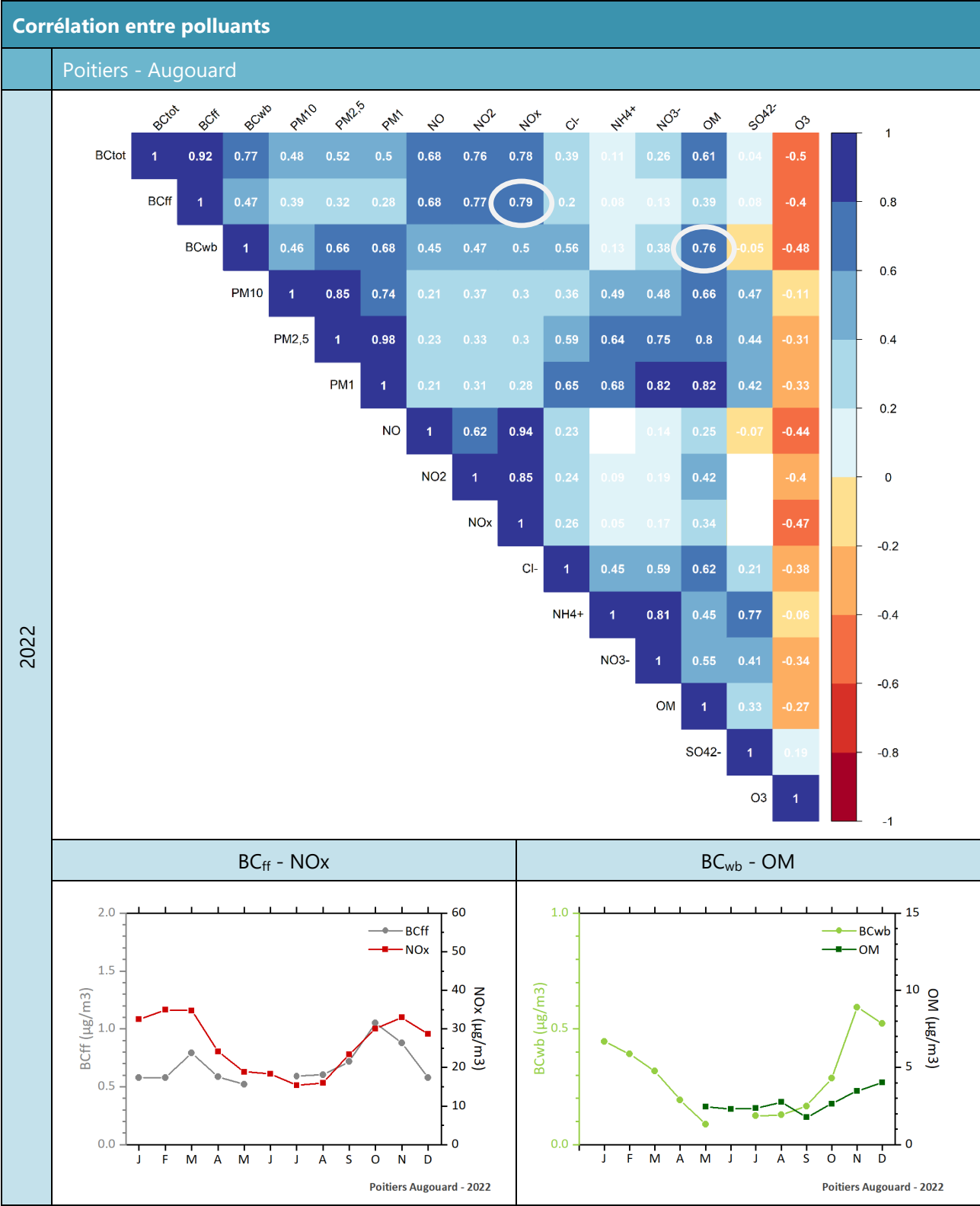


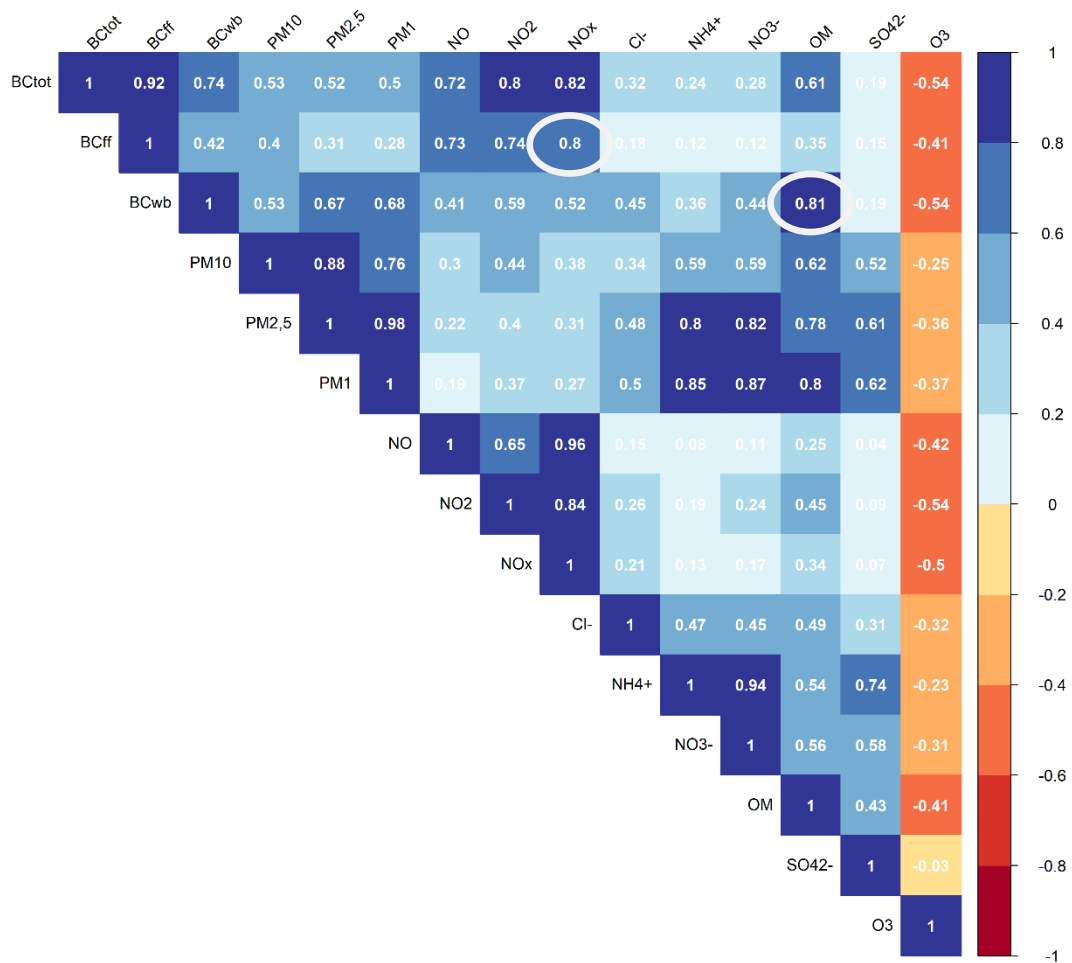
Figure 37 | BC, Bordeaux-Talence, Corrélation avec les autres polluants

Poitiers - Augourd

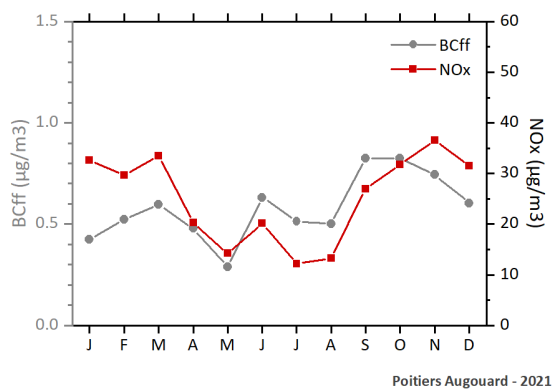
À Poitiers-Augourd, les corrélations atteignent 0,87 en 2019 entre le BC_{ff} et les NO_x, et 0,82 en 2019 entre le BC_{wb} et l'OM.



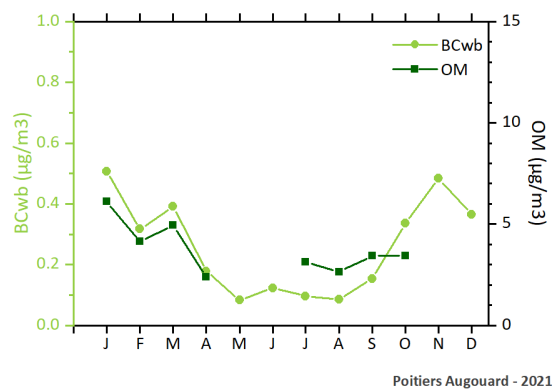
2021



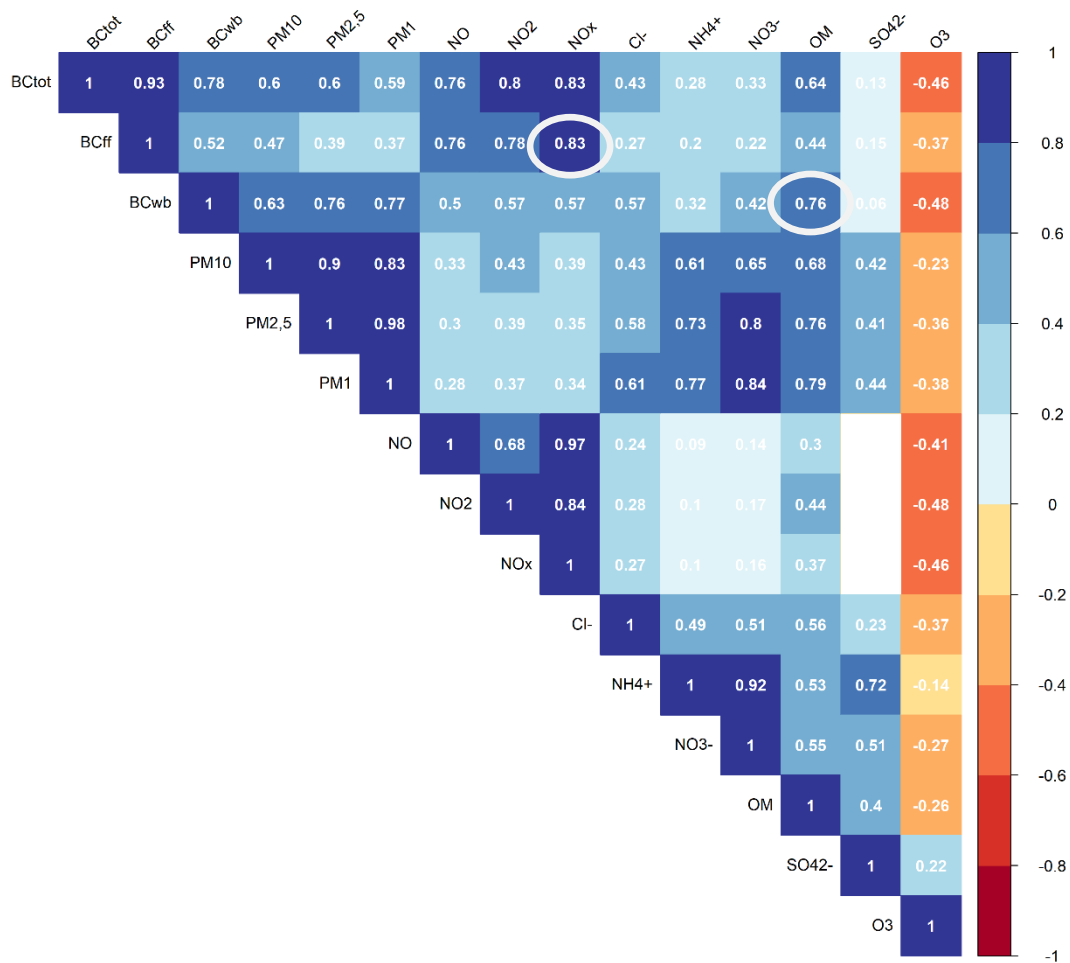
BC_{ff} - NO_x



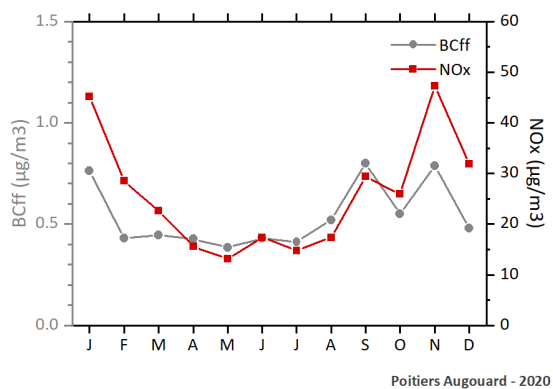
BC_{wb} - OM



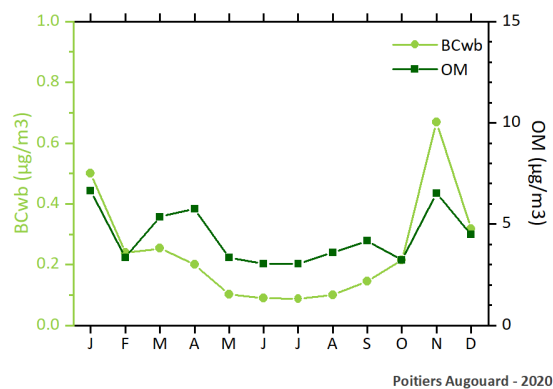
2020



BC_{ff} - NO_x



BC_{wb} - OM



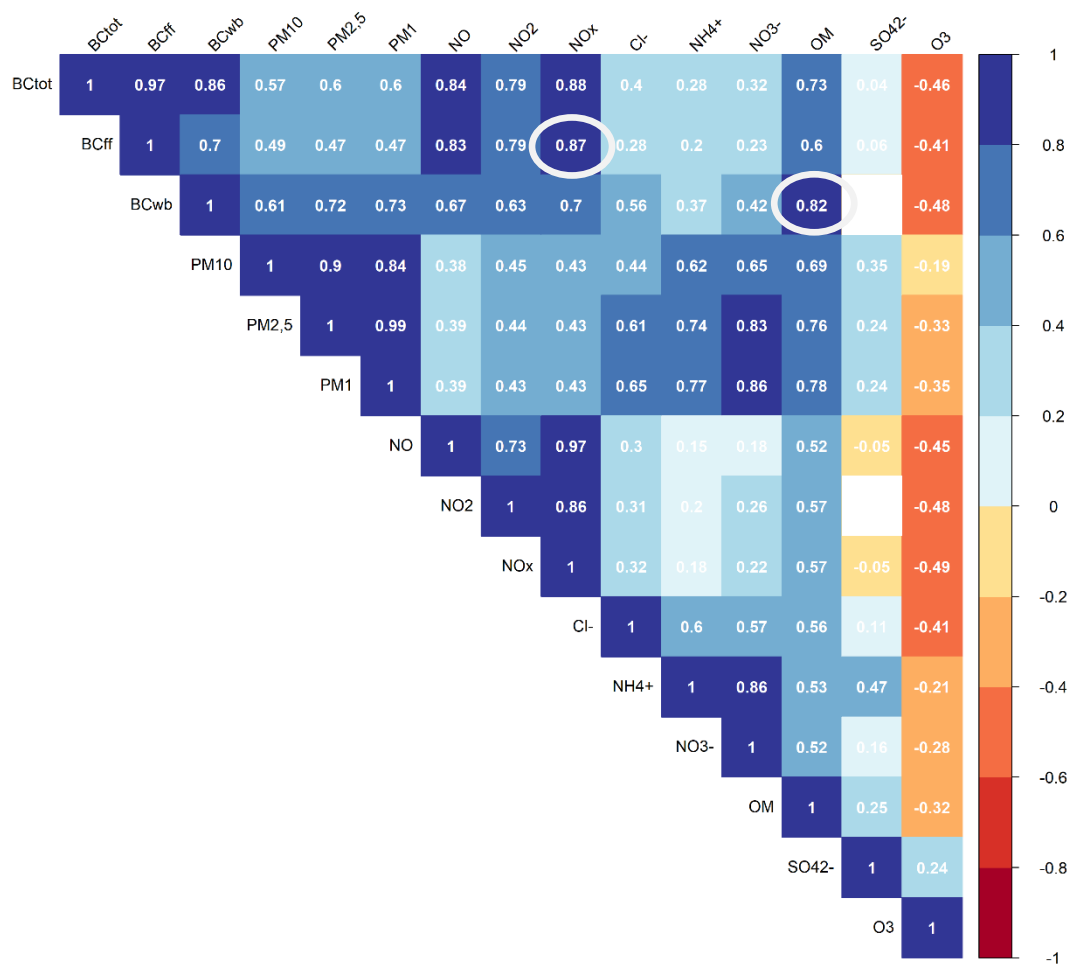
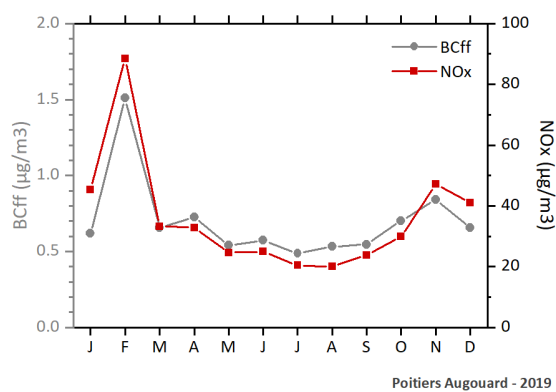
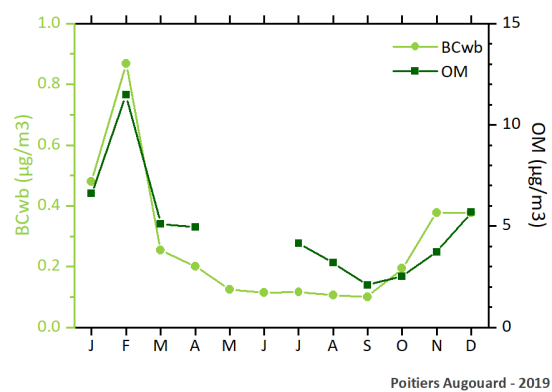
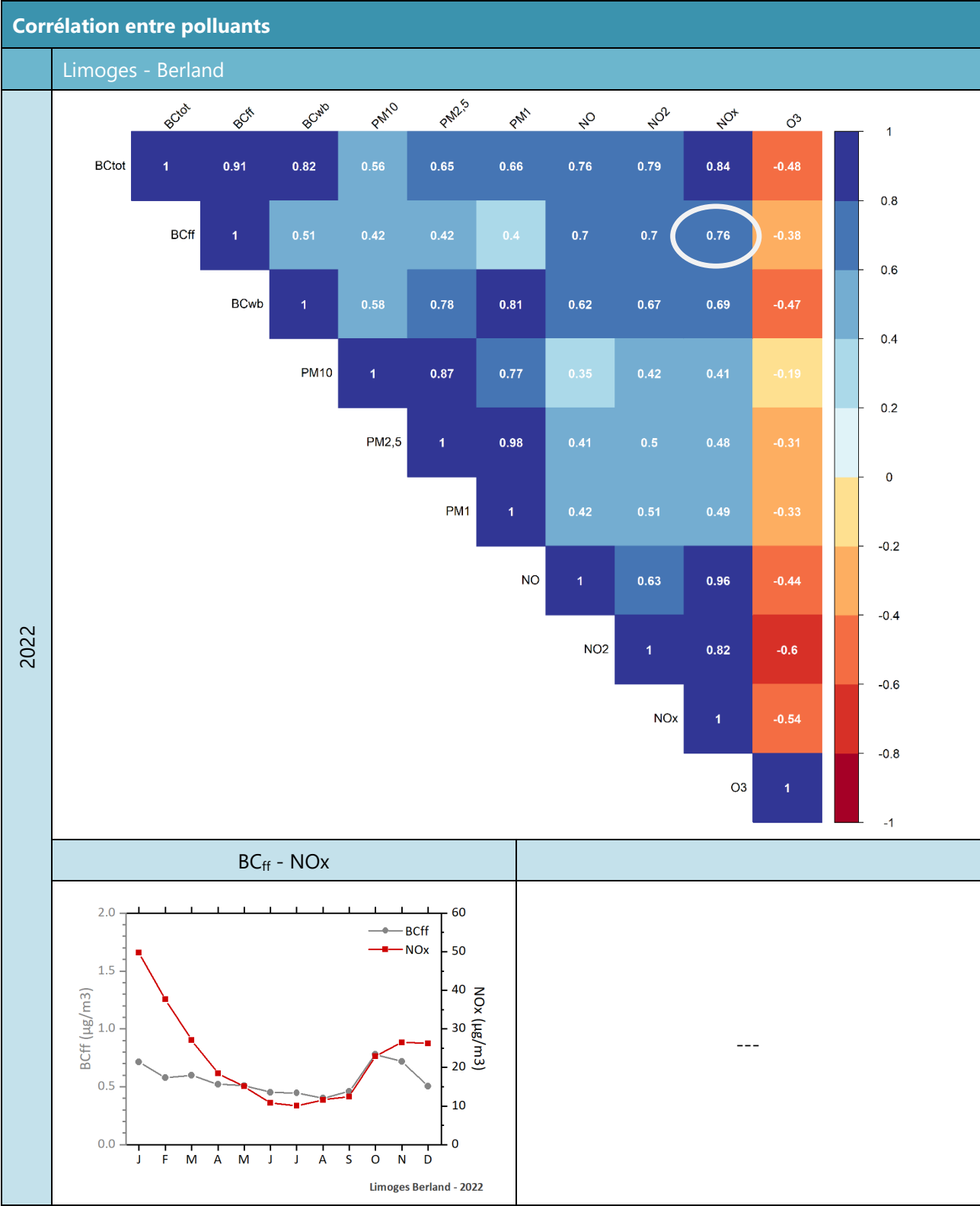
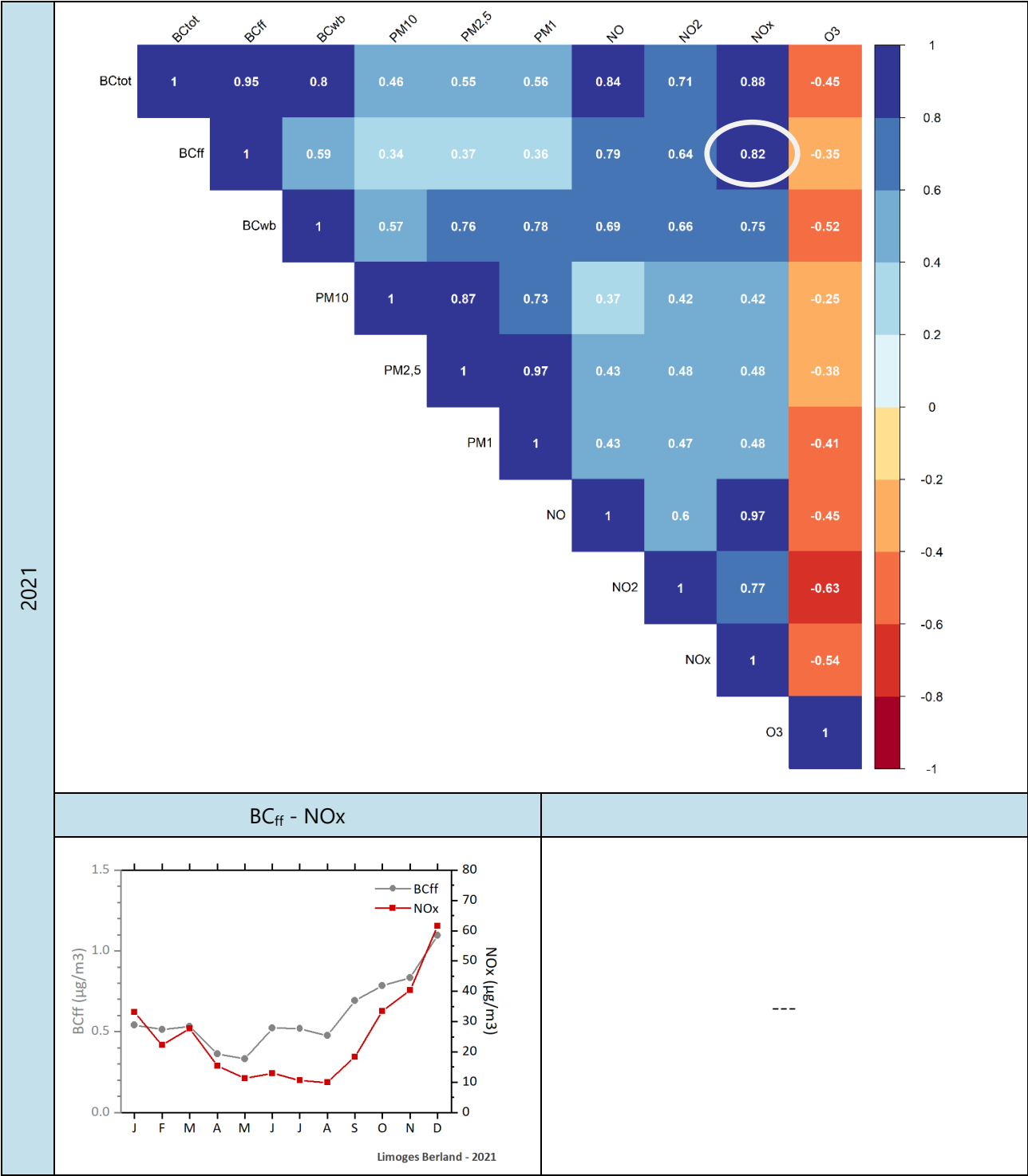
BC_{ff} - NO_xBC_{wb} - OM

Figure 38 | BC, Poitiers-Augouard, Corrélation avec les autres polluants

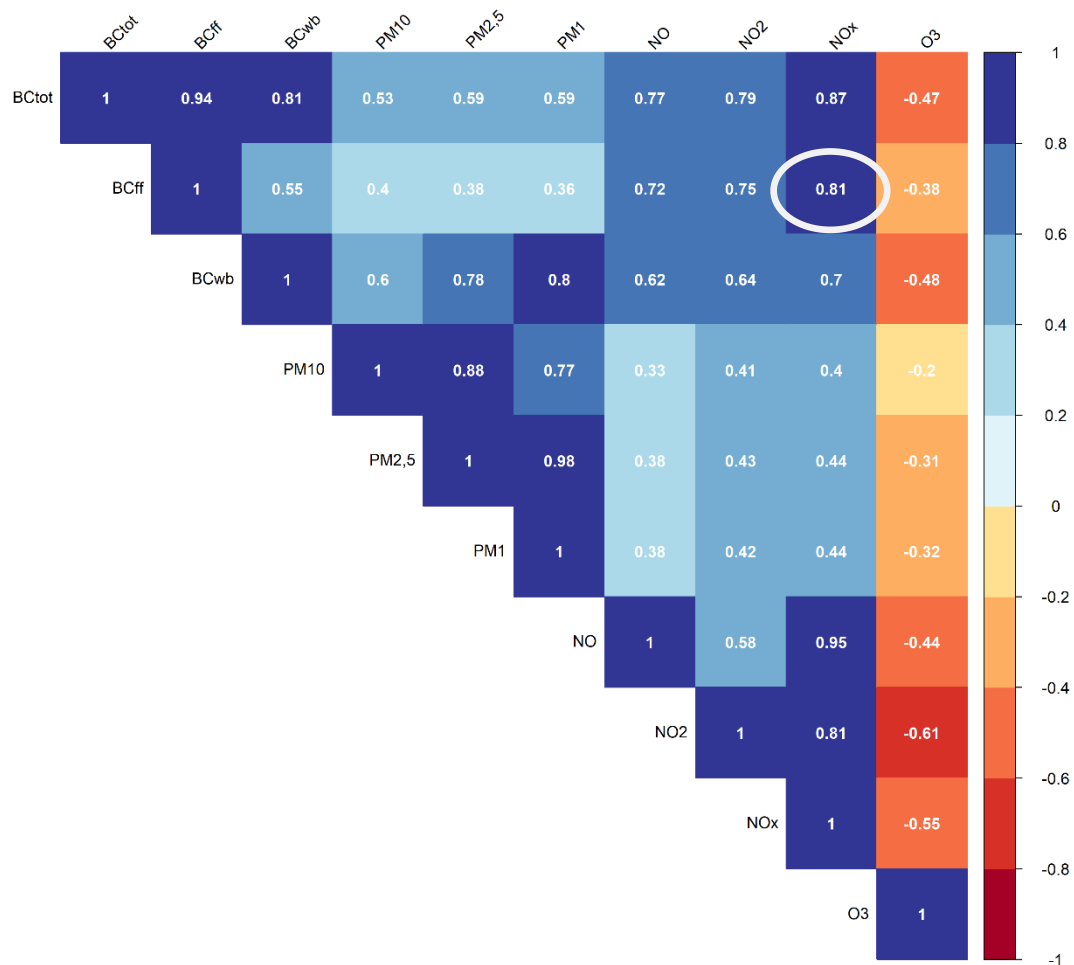
Limoges - Berland

N'étant pas équipé d'ACSM, la comparaison avec la matière organique n'est ici pas possible. À Limoges-Berland, les corrélations atteignent 0,83 en 2019 entre le BC_{ff} et les NO_x.

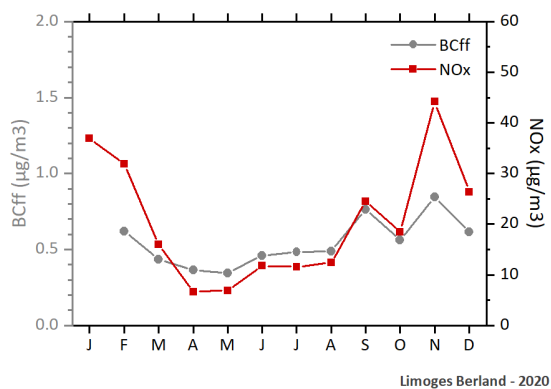




2020



BC_{ff} - NO_x



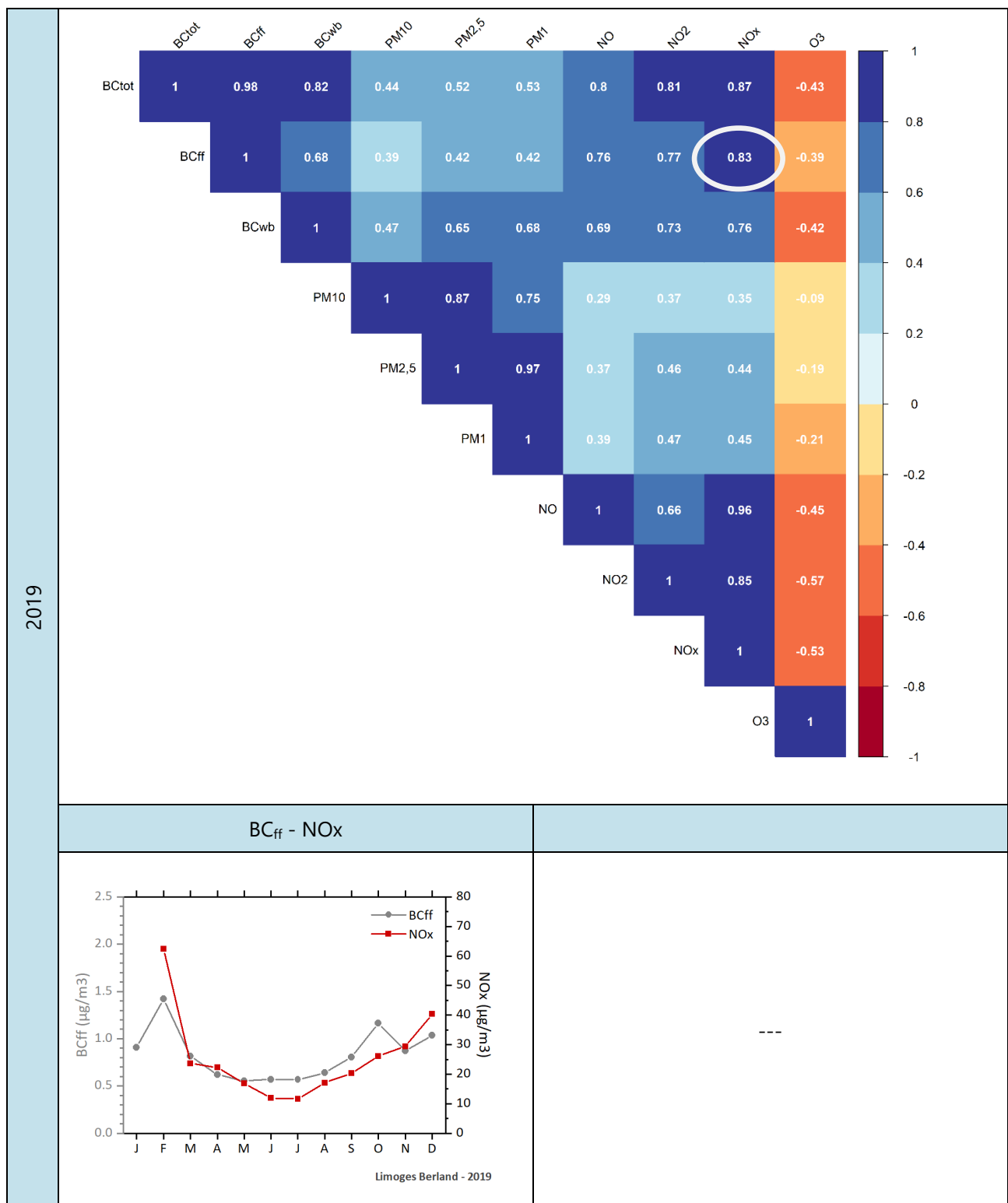


Figure 39 | BC, Limoges-Berland, Corrélation avec les autres polluants

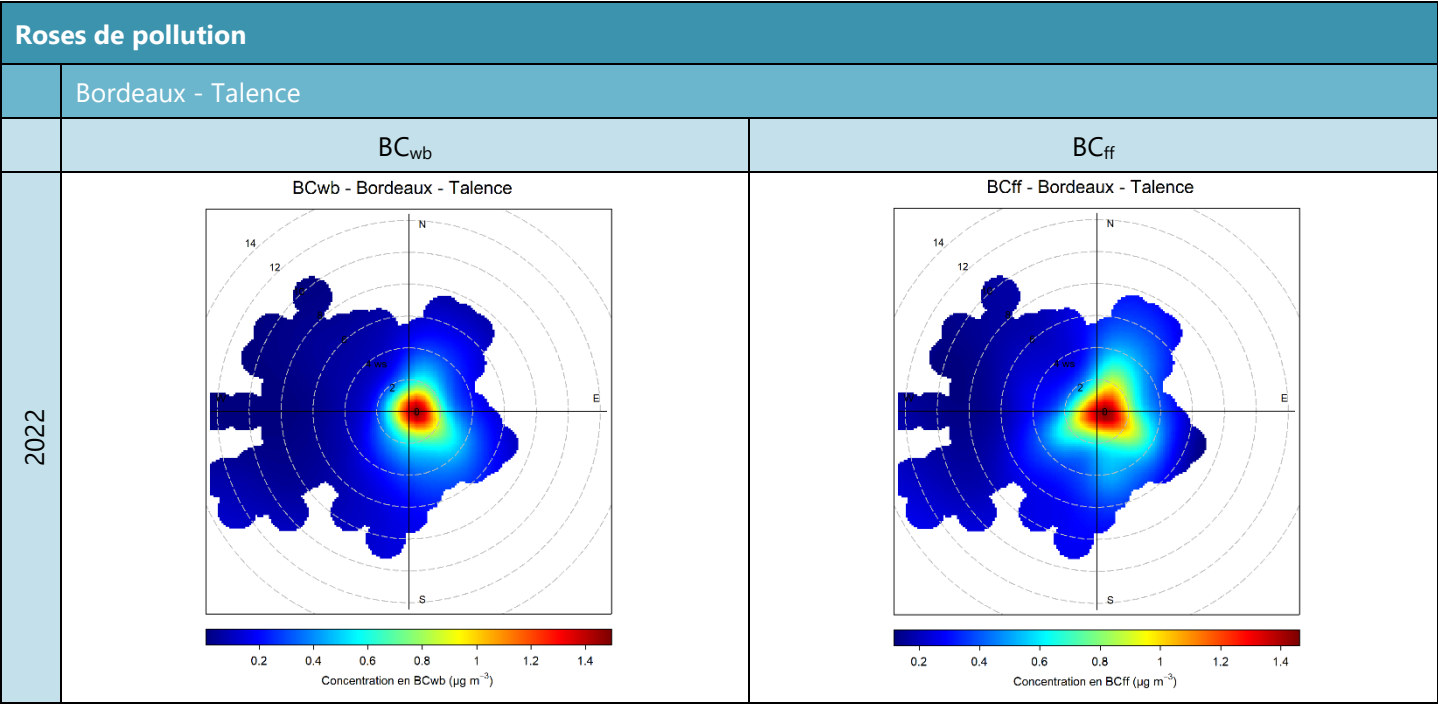
5.1.7. Influence météorologique et origine de la pollution

Les conditions météorologiques influencent les niveaux mesurés à la station. Les roses de pollution permettent de localiser les différences de concentrations d'un polluant (représentées par l'échelle de couleurs) en fonction de la direction du vent et de la force du vent (cercles)⁶. Ainsi, les roses de pollution permettent d'identifier l'origine des masses d'air chargées en particules, mesurées au niveau de la station. Le pas de temps horaire a été utilisé afin de mettre en évidence un lien potentiel entre ces différents paramètres.

Les figures ci-dessous présentent les roses annuelles de pollution en BC_{wb} et BC_{ff} pour les années 2019, 2020, 2021 et 2022, pour les sites de Bordeaux-Talence, Poitiers-Augouard et Limoges-Berland. Les roses de pollution ne prennent pas en compte les vents faibles, dont la vitesse est inférieure à 1 m.s⁻¹. En termes de qualité de l'air, si les niveaux plus forts sont obtenus avec des vitesses de vent élevées cela implique une source régionale, voire un import à plus longue distance de particules. Au contraire, s'ils sont centrés à 0-4 m/s, cela indique une augmentation de concentrations liée à des conditions météorologiques peu favorables à la dispersion des émissions locales de polluants, donc une origine de la pollution plus locale.

Bordeaux - Talence

- Les fortes concentrations en BC_{wb} sont observées par vents faibles (inférieur à 3 m.s⁻¹) et proviennent de l'ensemble des directions. Elles sont probablement issues de sources locales, liées au caractère résidentiel du site, utilisant le chauffage au bois en période hivernale.
- Les plus fortes concentrations en BC_{ff} sont également observées par vents faibles, laissant suggérer l'influence des voies de circulation les plus proches.



⁶ Explication de la lecture des roses de pollution en annexe 3

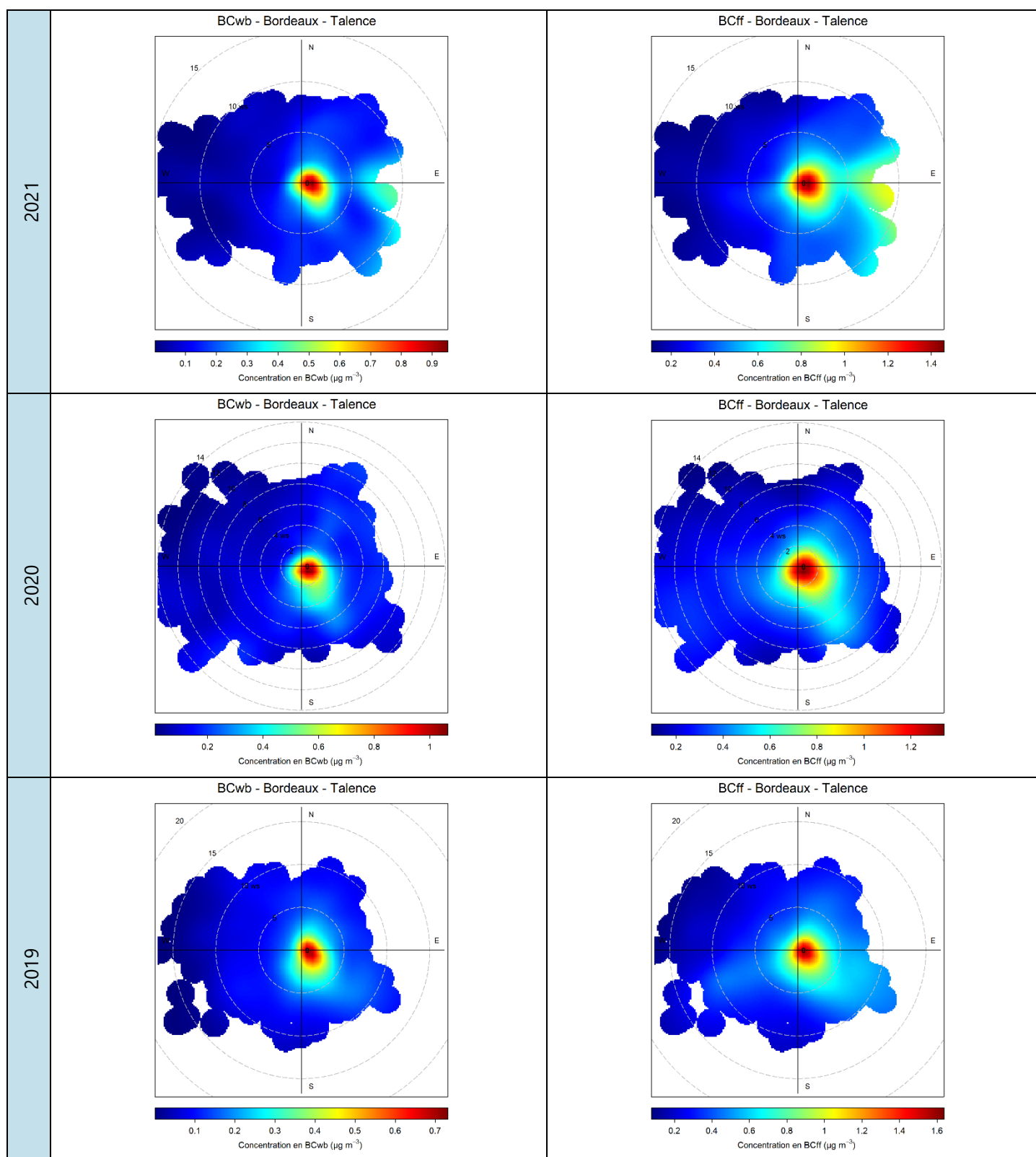
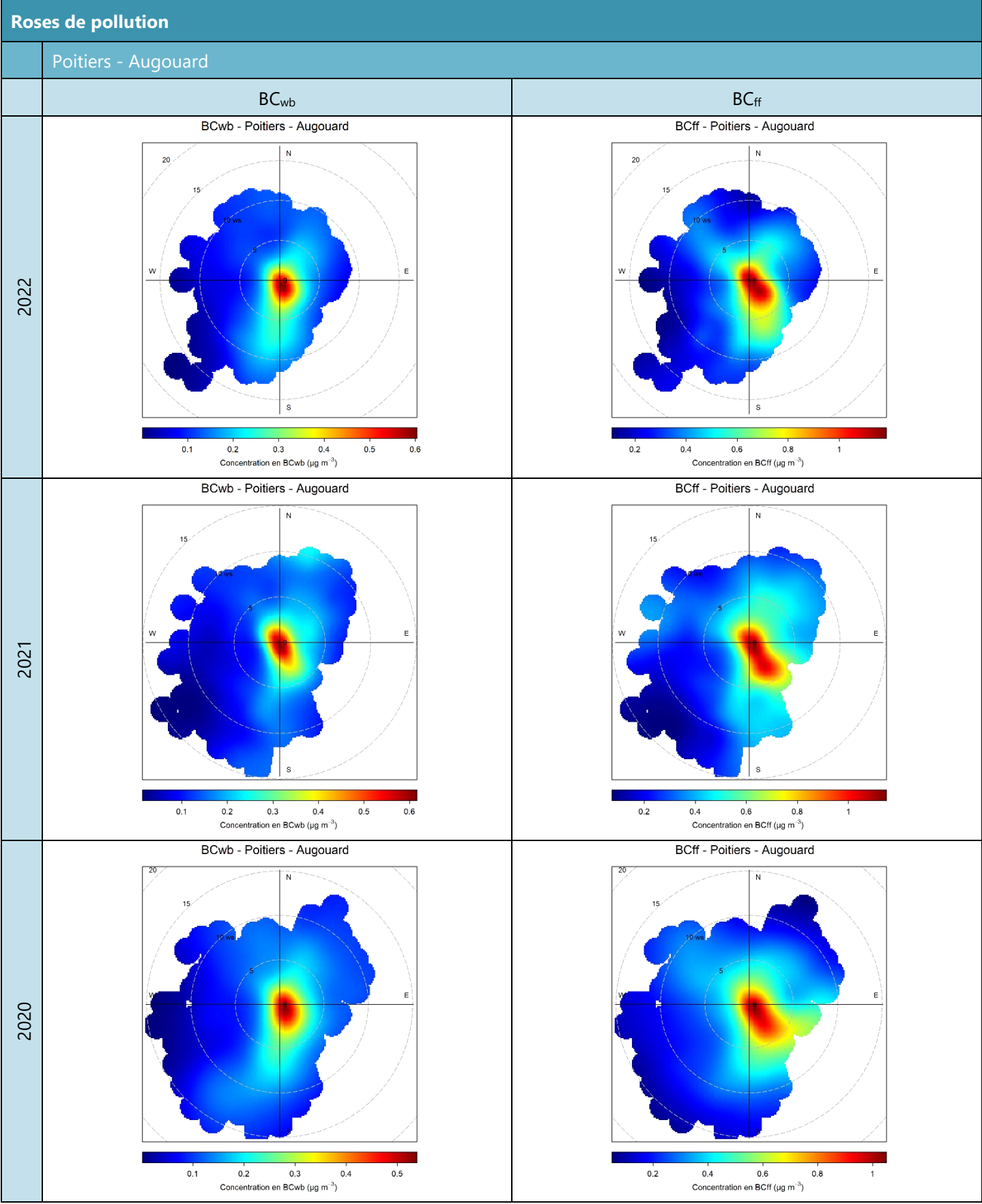


Figure 40 | BC, Bordeaux-Talence, Roses de pollution

Poitiers - Augouard

- Les concentrations les plus importantes en BC_{wb} ont été détectées par vents faibles (inférieur à 3 m/s), elles proviennent de l'ensemble des directions, avec toutefois l'influence du secteur sud légèrement plus importante.

- Les plus fortes concentrations en BC_{ff} sont observées en présence de vents faibles à calmes (jusqu'à 5 m/s) provenant des secteurs sud/sud-est. Elles sont à mettre en lien avec les axes de circulation à proximité mais aussi avec la circulation sur le parking où est positionnée la station de mesure.



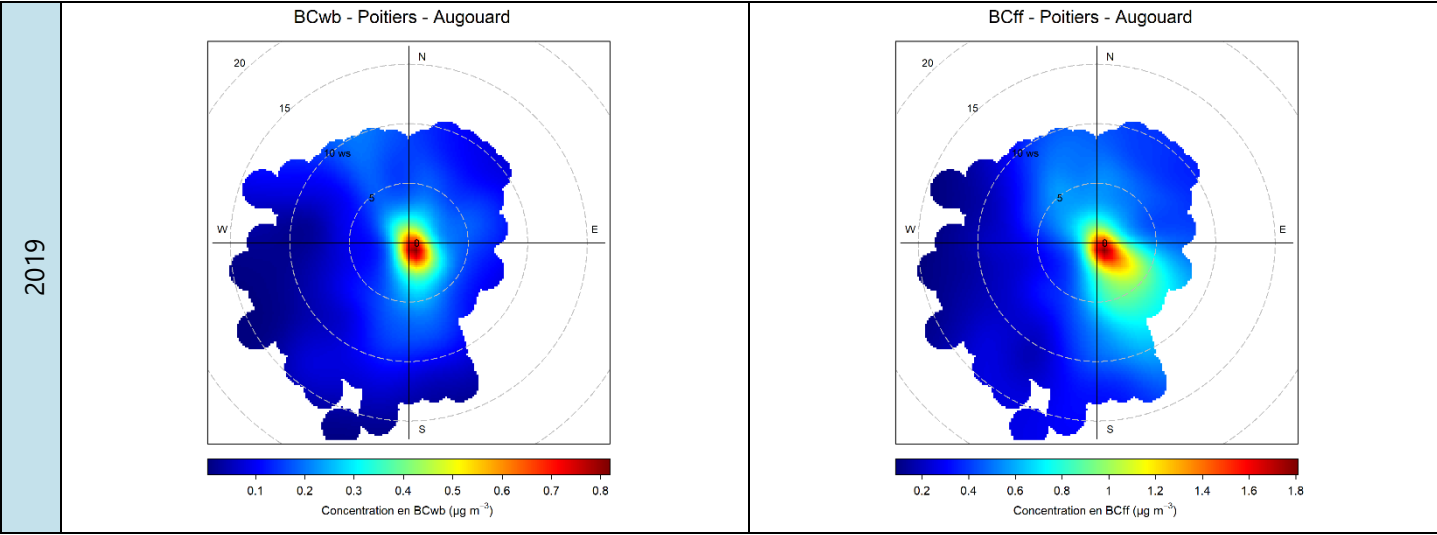
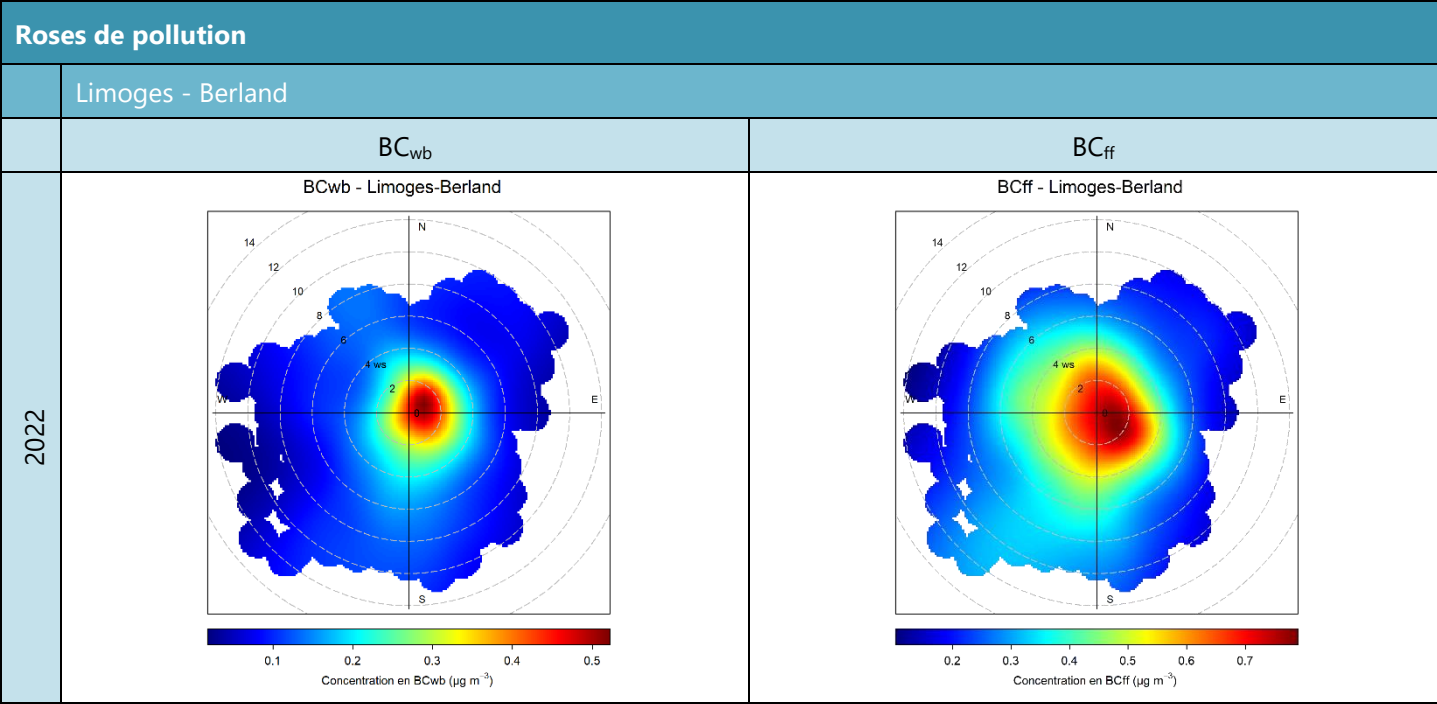


Figure 41 | BC, Poitiers-Augouard, Roses de pollution

Limoges - Berland

- Les plus fortes concentrations en BC_{wb} sont observées par vents faibles (inférieur à 3 m/s) et proviennent de l'ensemble des directions. Elles sont probablement issues de sources locales, liées au caractère résidentiel du site, utilisant le chauffage au bois en période hivernale.
- Les plus fortes concentrations en BC_{ff} sont également observées par vents faibles (inférieur à 4 m/s), laissant suggérer l'influence des voies de circulation les plus proches ou du parking de l'école situé à 40 m.



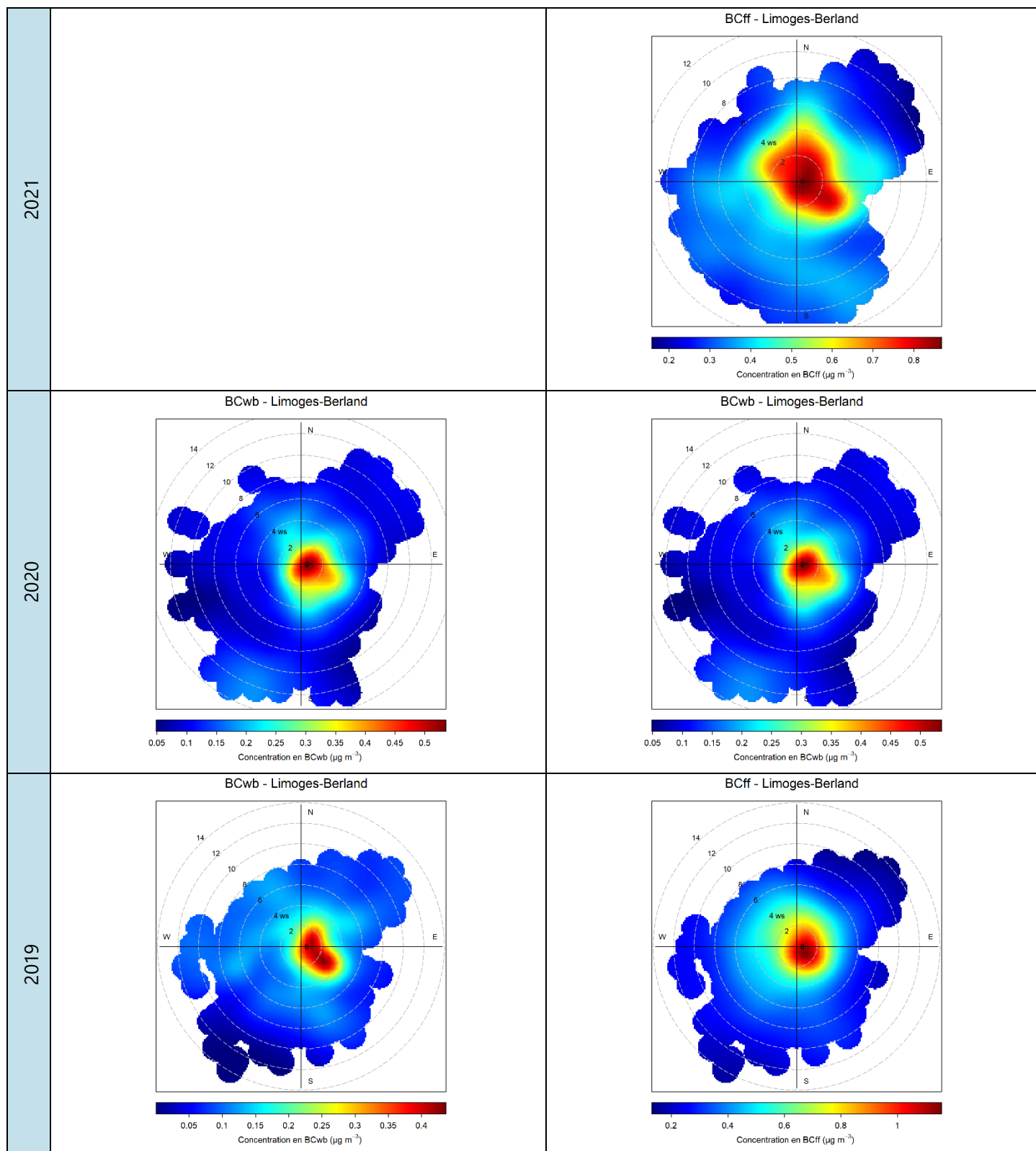


Figure 42 | BC, Limoges-Berland, Roses de pollution

5.2. Matière organique et ions majeurs

Cette partie exploite les mesures obtenues par le spectromètre de masse [ACSM], installés sur les sites de Bordeaux-Talence et Poitiers-Augouard. L'ACSM permet de suivre les composantes chimiques majeures des particules submicroniques non-réfractaires : ion chlorure (Cl^-), ion ammonium (NH_4^+), ion nitrate (NO_3^-), ion sulfate (SO_4^{2-}) et matière organique (OM).

5.2.1. Statistiques descriptives

Pour les ions majeurs – chlorure (Cl^-), ammonium (NH_4^+), nitrate (NO_3^-), sulfate (SO_4^{2-}) – ainsi que pour la matière organique (OM), la moyenne annuelle, la valeur médiane, le maximum journalier ainsi que le maximum horaire sont regroupés dans les tableaux suivants pour les sites de Bordeaux-Talence et Poitiers-Augouard. Les taux de fonctionnement étant insuffisants (< 75 %), les résultats annuels ne sont présentés ni pour Bordeaux-Talence en 2022, 2021 et 2020, ni pour Poitiers-Augouard en 2022 et 2021.

ACSM - Statistiques descriptives						
Bordeaux - Talence						
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	OM	Cl^-	NH_4^+	NO_3^-	SO_4^{2-}
2022	Moy. annuelle	-	-	-	-	-
	Médiane	-	-	-	-	-
	Max. horaire	-	-	-	-	-
	Max. journalier	-	-	-	-	-
2021	Moy. annuelle	-	-	-	-	-
	Médiane	-	-	-	-	-
	Max. horaire	-	-	-	-	-
	Max. journalier	-	-	-	-	-
2020	Moy. annuelle	-	-	-	-	-
	Médiane	-	-	-	-	-
	Max. horaire	-	-	-	-	-
	Max. journalier	-	-	-	-	-
2019	Moy. annuelle	5.8	0.1	0.7	1.5	1.3
	Médiane	3.4	0.0	0.5	0.5	1.0
	Max. horaire	183.3	3.9	7.2	22.7	9.3
	Max. journalier	69.7	1.2	5.2	13.9	5.3

Figure 43 | OM et ions majeurs, Bordeaux-Talence, Statistiques descriptives

ACSM - Statistiques descriptives						
Poitiers - Augouard						
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	OM	Cl^-	NH_4^+	NO_3^-	SO_4^{2-}
2022	Moy. annuelle	-	-	-	-	-
	Médiane	-	-	-	-	-
	Max. horaire	-	-	-	-	-
	Max. journalier	-	-	-	-	-
2021	Moy. annuelle	-	-	-	-	-
	Médiane	-	-	-	-	-
	Max. horaire	-	-	-	-	-
	Max. journalier	-	-	-	-	-
2020	Moy. annuelle	4.4	0.0	0.7	1.2	0.9
	Médiane	3.5	0.0	0.5	0.5	0.8
	Max. horaire	65.2	2.7	8.1	21.9	6.0
	Max. journalier	17.9	0.3	5.7	15.1	4.1
2019	Moy. annuelle	4.8	0.1	0.7	1.7	0.9
	Médiane	3.2	0.0	0.4	0.5	0.6
	Max. horaire	94.5	2.0	5.6	24.8	7.0
	Max. journalier	26.2	0.7	4.0	15.3	5.3

Figure 44 | OM et ions majeurs, Poitiers-Augouard, Statistiques descriptives

De ces tableaux, nous pouvons observer :

- ➔ Les 2 sites de fond urbain Bordeaux-Talence et Poitiers-Augouard présentent peu de différences sur les moyennes annuelles, le site de Bordeaux-Talence présente cependant des concentrations moyennes plus élevées pour tous les composés, notamment pour la matière organique et les sulfates.
- Pour les 5 paramètres observés [OM, Cl^- , NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-}], les concentrations médianes⁷ sont inférieures aux concentrations moyennes. L'écart entre ces 2 valeurs indique une répartition inégale des concentrations mesurées. Lorsque la médiane est inférieure à la moyenne, les inégalités se situent en haut de l'échelle. Des concentrations élevées tirent la moyenne vers le haut. Les épisodes de pollution, avec des concentrations élevées tirent la moyenne vers le haut.
- ➔ La différence la plus marquée entre les deux sites s'observe sur les concentrations en sulfates (SO_4^{2-}). En effet, cet aérosol inorganique secondaire peut provenir de l'oxydation photochimique du SO_2 émis par des combustions fossiles contenant du soufre (fioul, charbon, etc.). Les sulfates peuvent également être produits sur de larges échelles par oxydation en phase gazeuse puis évaporation des gouttes de nuages (Raes et al., 2000). Mais il peut également dériver de sulfure de diméthyle (DMS) produit par les algues marines (Seinfeld and Pandis, 1998). Ainsi, du fait de sa proximité avec l'Océan Atlantique, le site de Bordeaux-Talence est sous l'influence supplémentaire du sulfate marin.

5.2.2. Évolution journalière

Pour chaque site de mesure, les graphiques du dessus présentent l'évolution journalière des concentrations en particules grossières PM_{10} , en Black Carbon et des composés mesurés par l'ACSM. Les graphiques du dessous illustrent leur contribution journalière aux particules fines PM_{10} .

Bordeaux - Talence

- ➔ En moyenne pour l'année 2019, la matière organique contribue à 53 % des particules PM_{10} . Les sulfates y représentent 15 %, le Black Carbon 13 %, les nitrates 11 %, l'ammonium 7 % et enfin l'ion chlorure ne représente pas plus de 1 % des PM_{10} .
- ➔ Lors d'un dépassement du seuil d'alerte en PM_{10} ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), le 15 janvier 2022, la contribution de la matière organique aux PM_{10} s'élève à 72 %, ce qui illustre les sources plus importantes en hiver avec notamment la combustion de biomasse.

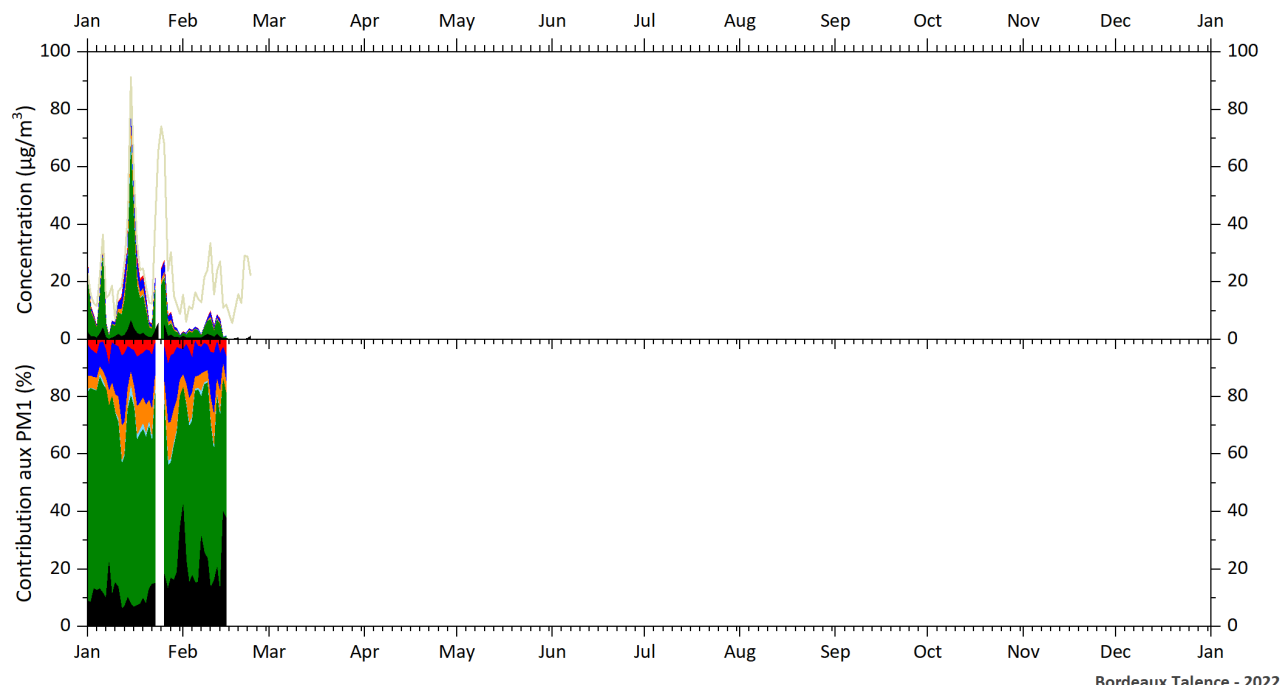
⁷ Cf paragraphe « Statistiques » dans la section « Définitions »

Evolution journalière et contribution aux PM₁

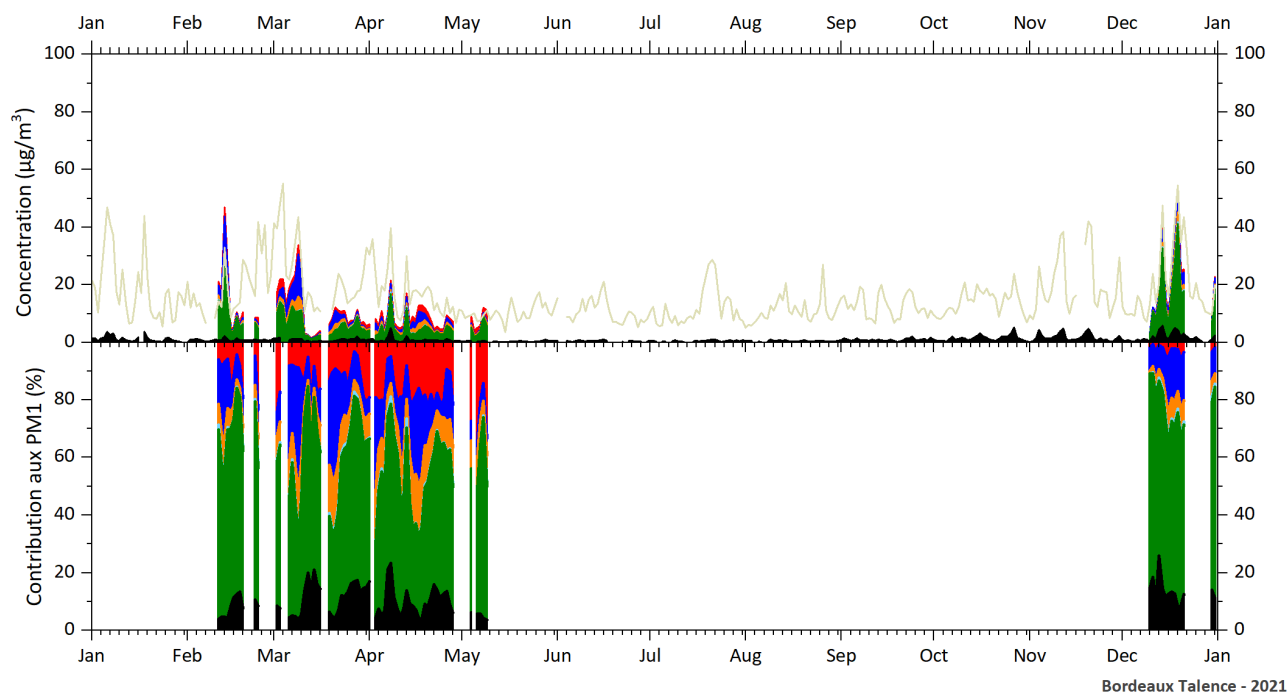
Bordeaux - Talence

BC_{total}
 OM
 Cl⁻
 NH₄⁺
 NO₃⁻
 SO₄²⁻
 PM₁₀

2022



2021



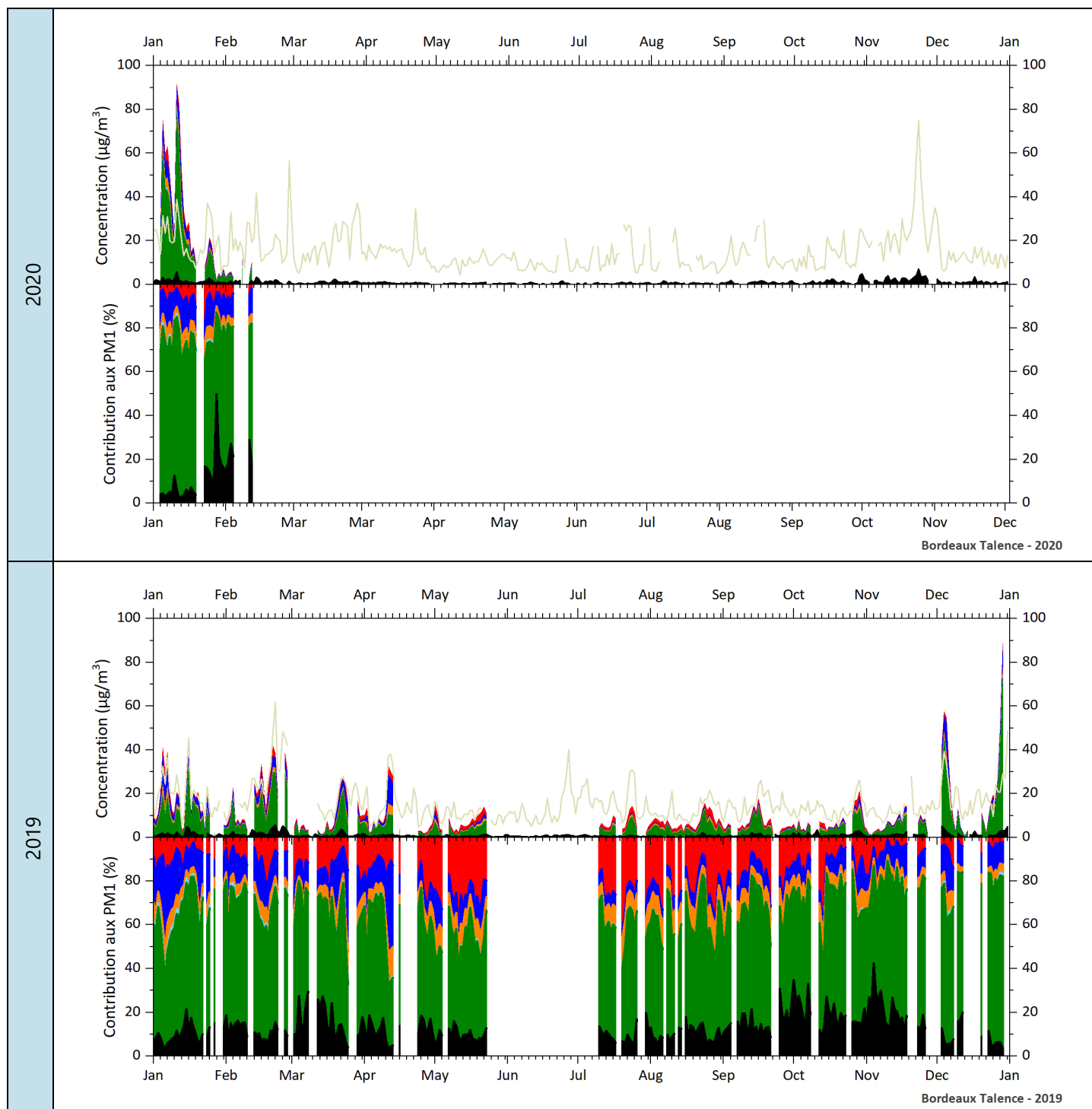


Figure 45 | OM et ions majeurs, Bordeaux-Talence, Evolutions journalières des concentrations et contributions aux PM1

Poitiers-Augouard

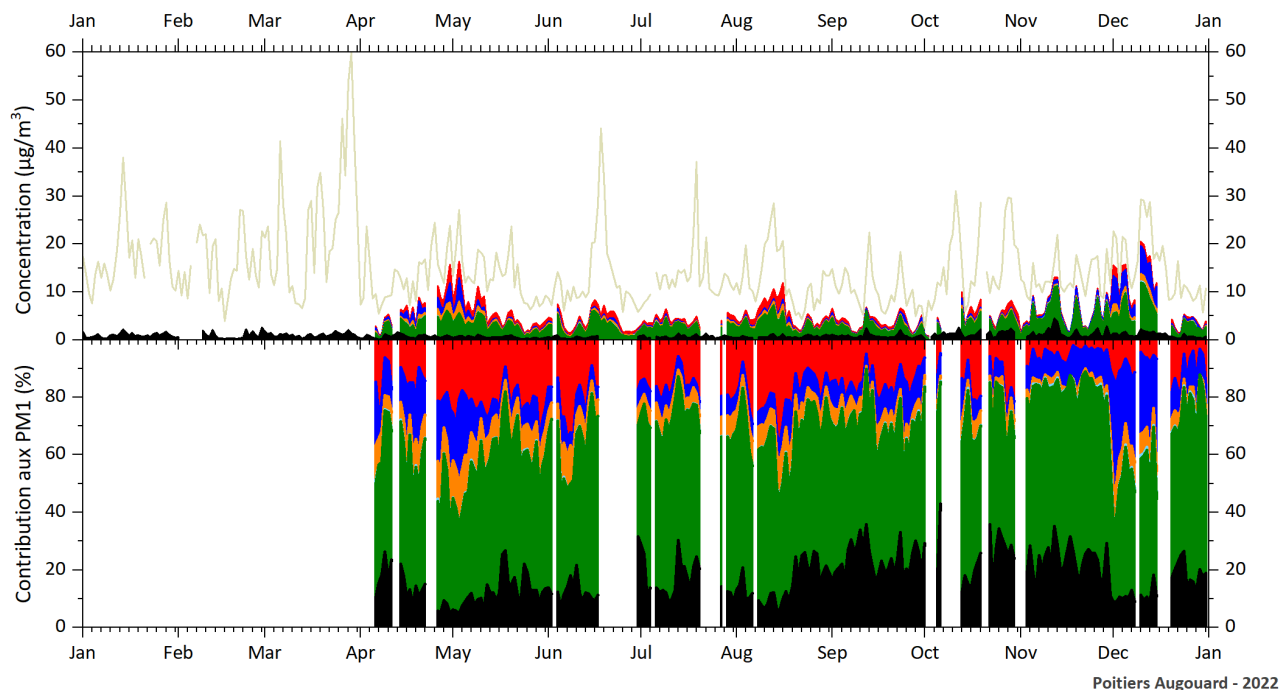
- En moyenne sur les 4 années, la matière organique contribue entre 48 et 56 % des PM₁, les sulfates entre 12 et 16 %, le black carbon entre 11 et 17 %, les nitrates entre 10 et 14 % et enfin l'ammonium entre 6 et 10 % des particules fines PM₁. L'ion chlorure ne représente pas plus de 1 % des particules fines PM₁.
- Le 9 mars 2021, à Poitiers-Augouard, les concentrations en PM₁₀ atteignent 53 µg/m³, les PM_{2,5} 44 µg/m³. En cette journée printanière, les particules dans l'atmosphère sont dominées par le nitrate d'ammonium : le nitrate contribue à 40 % des PM₁, l'ammonium à 16 %.

Evolution journalière et contribution aux PM₁

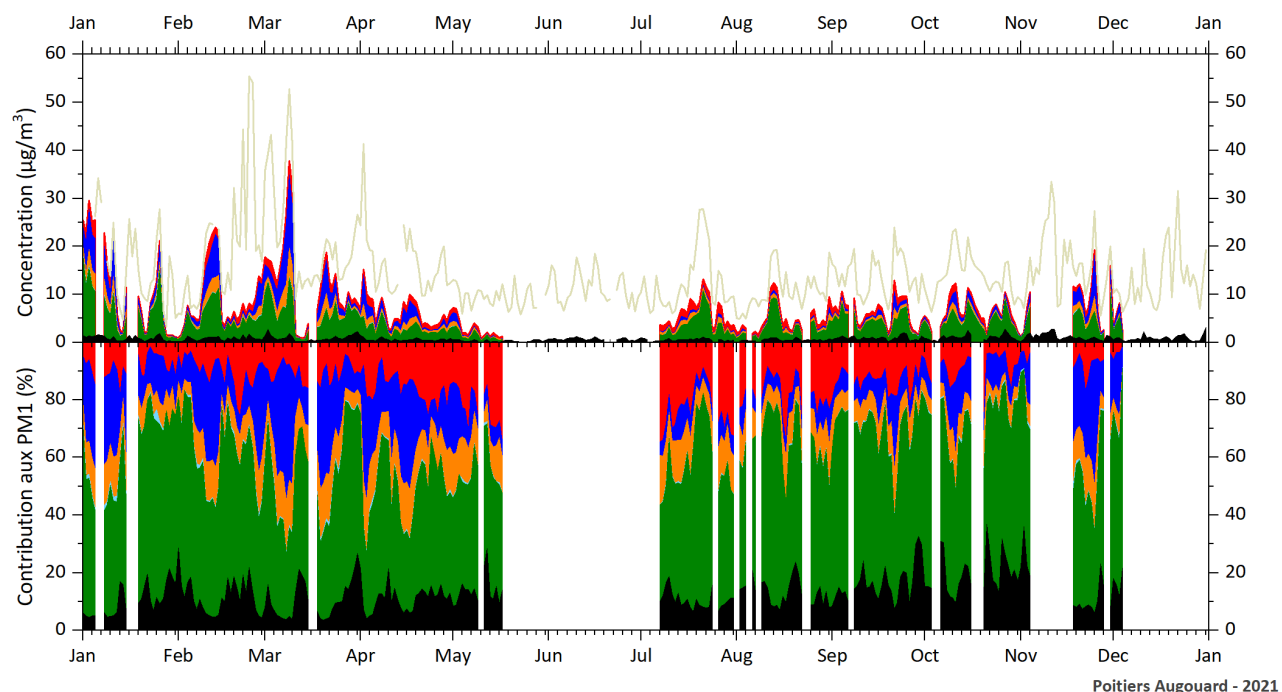
Poitiers - Augouard

BC_{total}
 OM
 Cl⁻
 NH₄⁺
 NO₃⁻
 SO₄²⁻
 PM₁₀

2022



2021



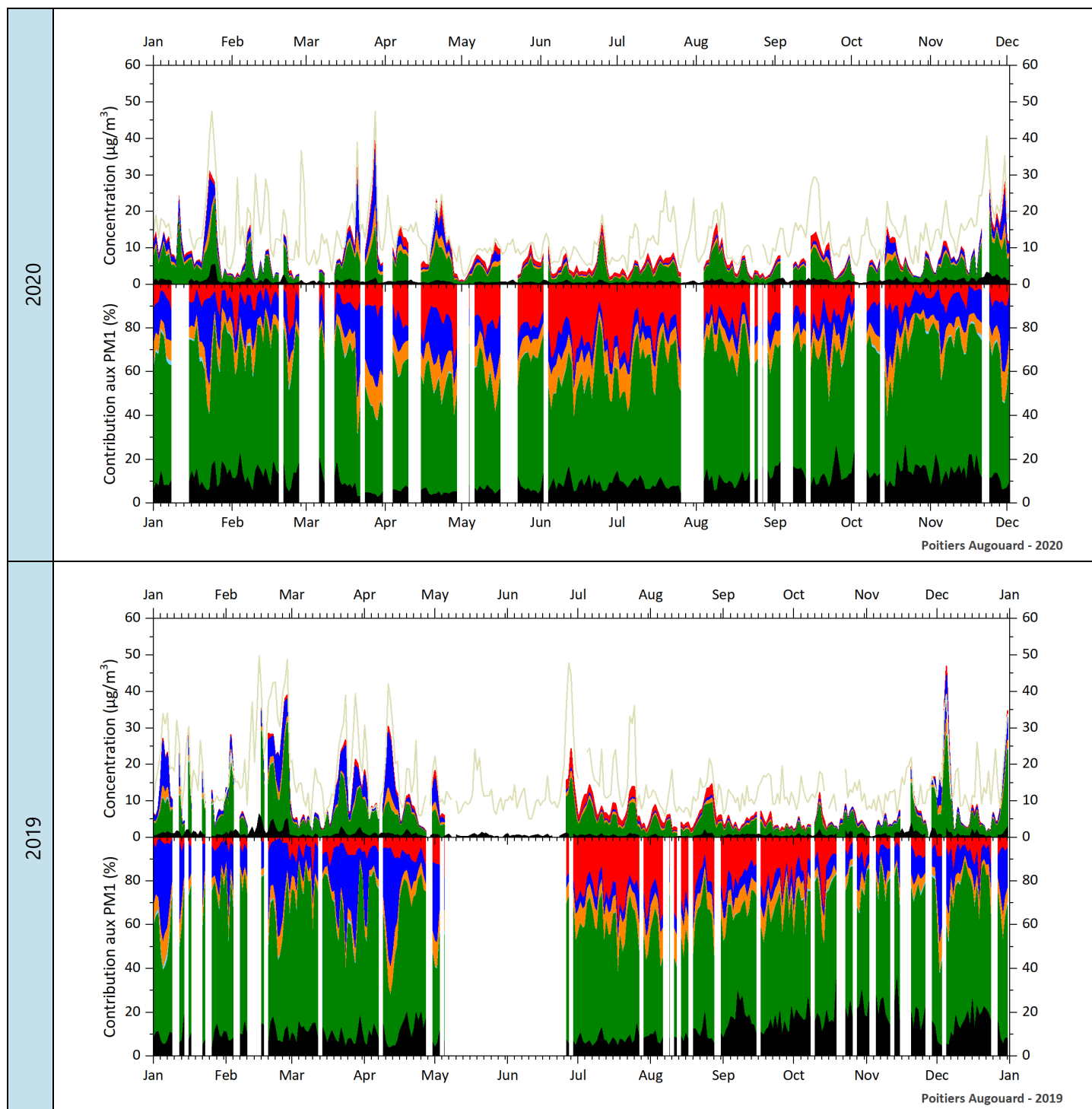


Figure 46 | OM et ions majeurs, Poitiers-Augouard, Evolutions journalières des concentrations et contributions aux PM1

5.2.3. Evolution mensuelle

Le diagramme en boîte, ou « boxplot » en anglais, est la représentation statistique d'une série de données. Cet outil graphique permet la représentation des informations de dispersion de la série de données étudiée : moyenne, médiane, valeurs extrêmes, premiers et troisièmes quartiles. Le plancher de la boîte correspond au 1^{er} quartile, le plafond au 3^{ème} quartile. De fait, 50 % des concentrations observées se situent dans l'amplitude définie par les plages haute et basse de la boîte. Les valeurs minimales (25% des plus faibles) et maximales (25 % des plus élevées) en sont excluent. L'explication de la lecture de ces diagrammes se trouve en annexe 4.

Les diagrammes ci-dessous présentent les concentrations mensuelles, sous formes de boxplot, des différents paramètres mesurés par l'ACSM à Bordeaux-Talence et Poitiers-Augouard au cours des années 2019, 2020, 2021 et 2022.

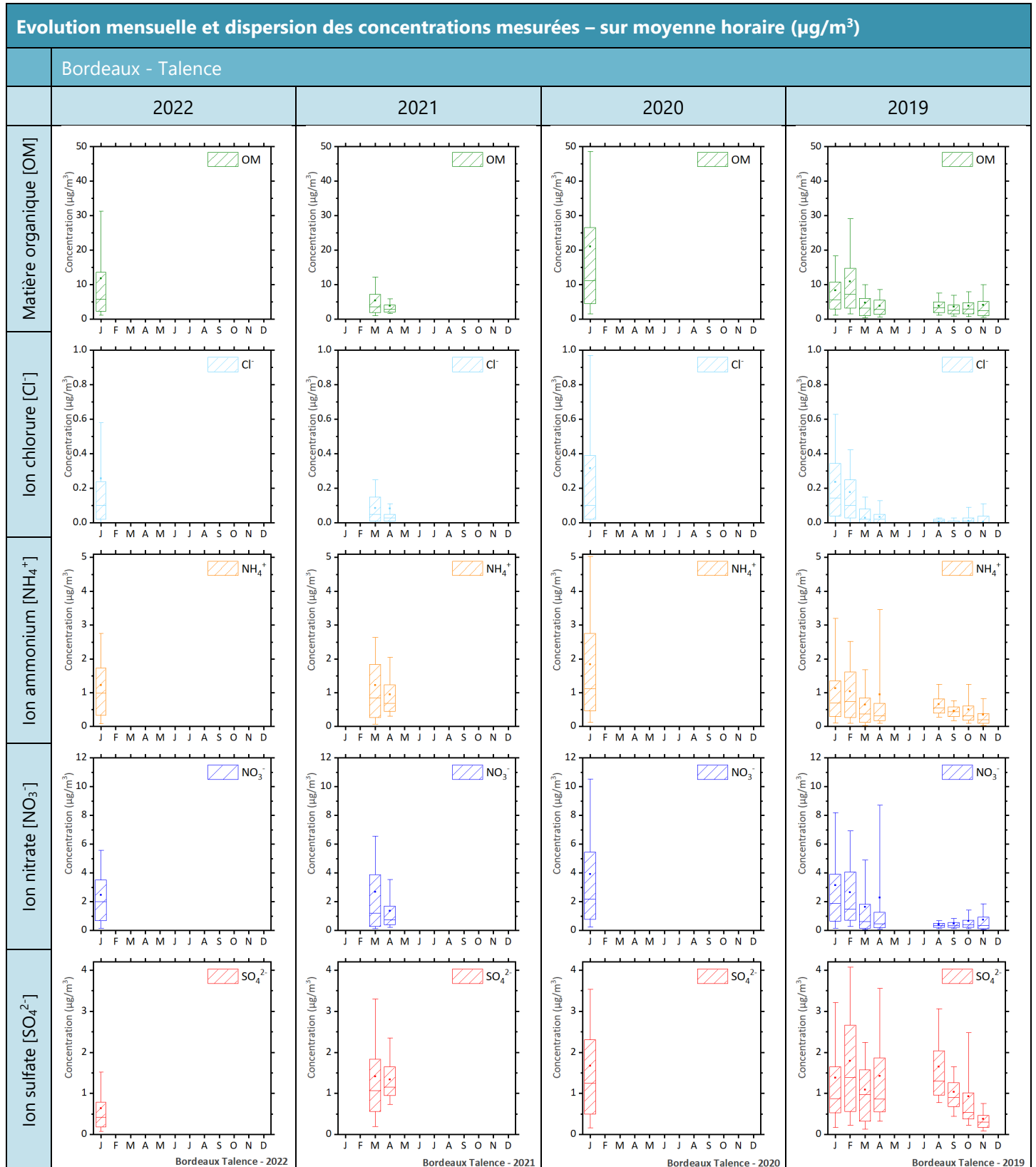


Figure 47 | OM et ions majeurs, Bordeaux-Talence, Evolutions mensuelles des concentrations et dispersion des mesures

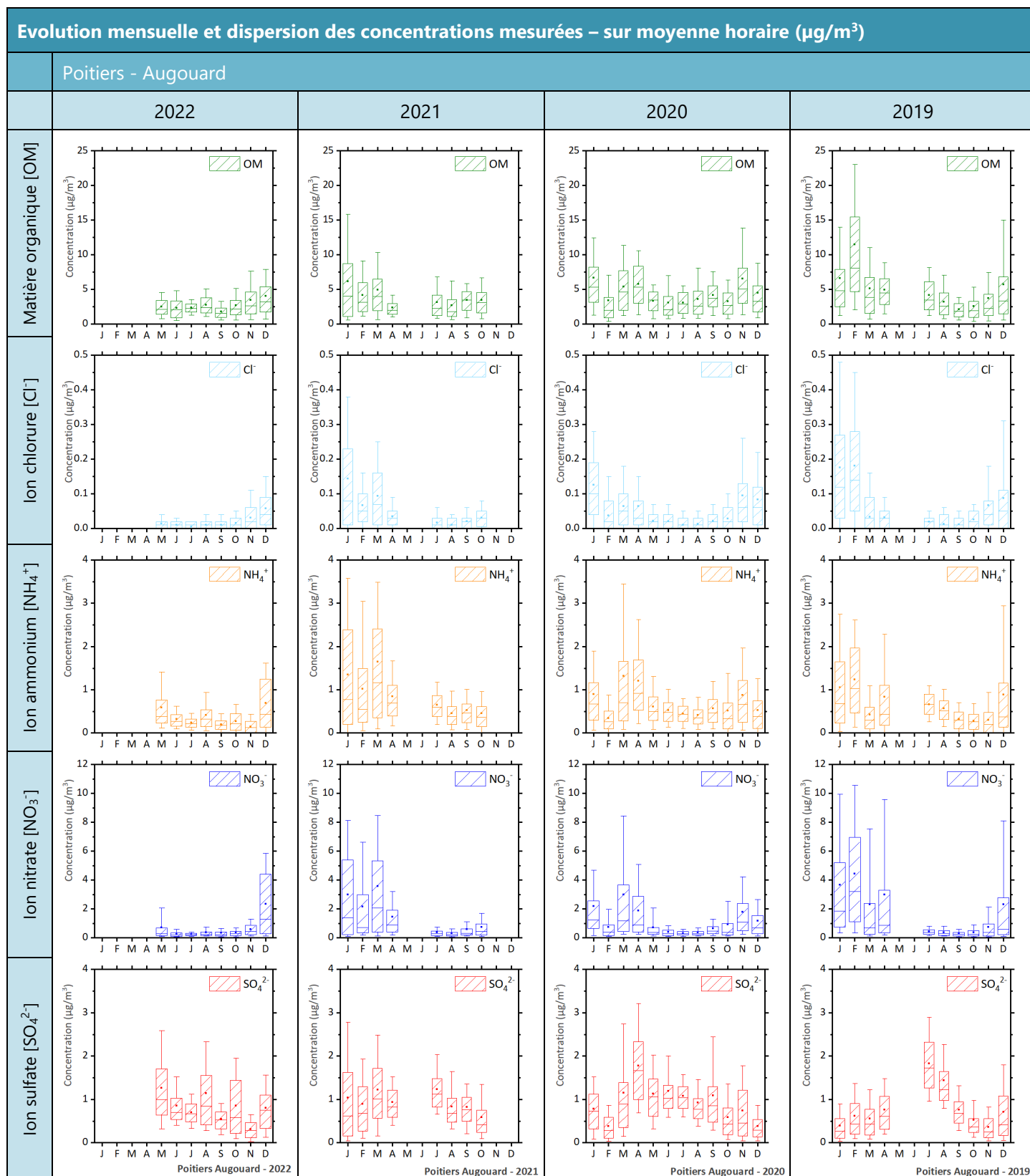


Figure 48 | OM et ions majeurs, Poitiers-Augouard, Evolutions mensuelles des concentrations et dispersion des mesures

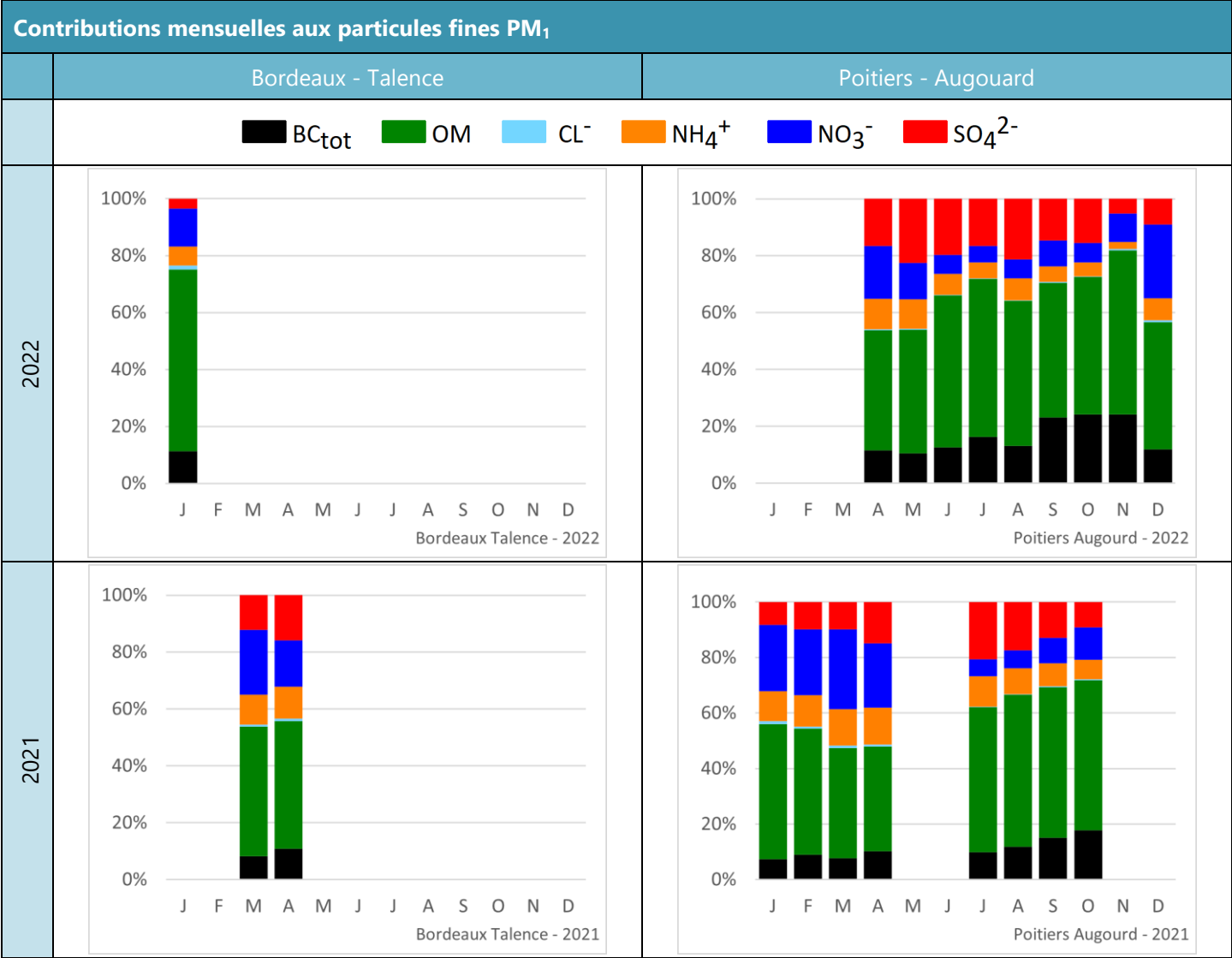
- **OM**, en période hivernale, la concentration en matière organique augmente du fait d'une augmentation des sources, telles que la combustion de la biomasse (chauffage bois).
- **Cl^-** , les plus fortes concentrations en ion chlorure (Cl^-) sont observées en hiver.
- **NH_4^+ , NO_3^-** , les plus fortes concentrations en ammonium (NH_4^+) et nitrates (NO_3^-) sont observées au printemps et en hiver.

En phase particulaire, les nitrates (NO_3^-) provenant de l'oxydation des NO_x , fortement émis par les procédés de combustion (Logan, 1983), sont stabilisés par association avec l'ammoniac (NH_3), émis principalement par les activités agricoles (élevage et utilisation d'engrais azotés) mais également par les moteurs à essence catalysés (Heeb et al., 2006), formant le nitrate d'ammonium (NH_4NO_3). Les fortes concentrations en NO_3^- observées en hiver et au printemps s'expliquent d'une part par un épandage de doses massives d'engrais azotés et de lisiers (effluents d'élevage) au printemps mais également du fait des caractéristiques du NH_4NO_3 dépendant fortement des conditions météorologiques. En effet, dans des conditions de températures élevées, la forte volatilité de NO_3^- lui permet de passer de la phase particulaire à la phase gazeuse : ce sont de faibles températures et une forte humidité qui entraînent une plus forte stabilité du nitrate d'ammonium (Mozurkewich, 1993; Zhang et al., 2000). Les fortes concentrations sont également observées lors de périodes de faible dispersion (faible altitude d'inversion de température).

➔ **SO_4^{2-}** , Contrairement aux nitrates, les sulfates présentent de plus fortes contributions aux PM en été. Les fortes conditions d'ensoleillement accélèrent l'oxydation photochimique du SO_2 en SO_4^{2-} qui est ensuite transformé en acide sulfurique (H_2SO_4), sulfate d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) ou sulfate d'ammonium hydrogéné (NH_4HSO_4) par nucléation ou condensation (Berresheim et al., 1995; Korhonen et al., 1999).

Contributions mensuelles aux particules fines PM_{10}

Les figures ci-dessous présentent les contributions mensuelles du black carbon, de la matière organique ainsi que des ions majeurs aux particules fines PM_{10} .



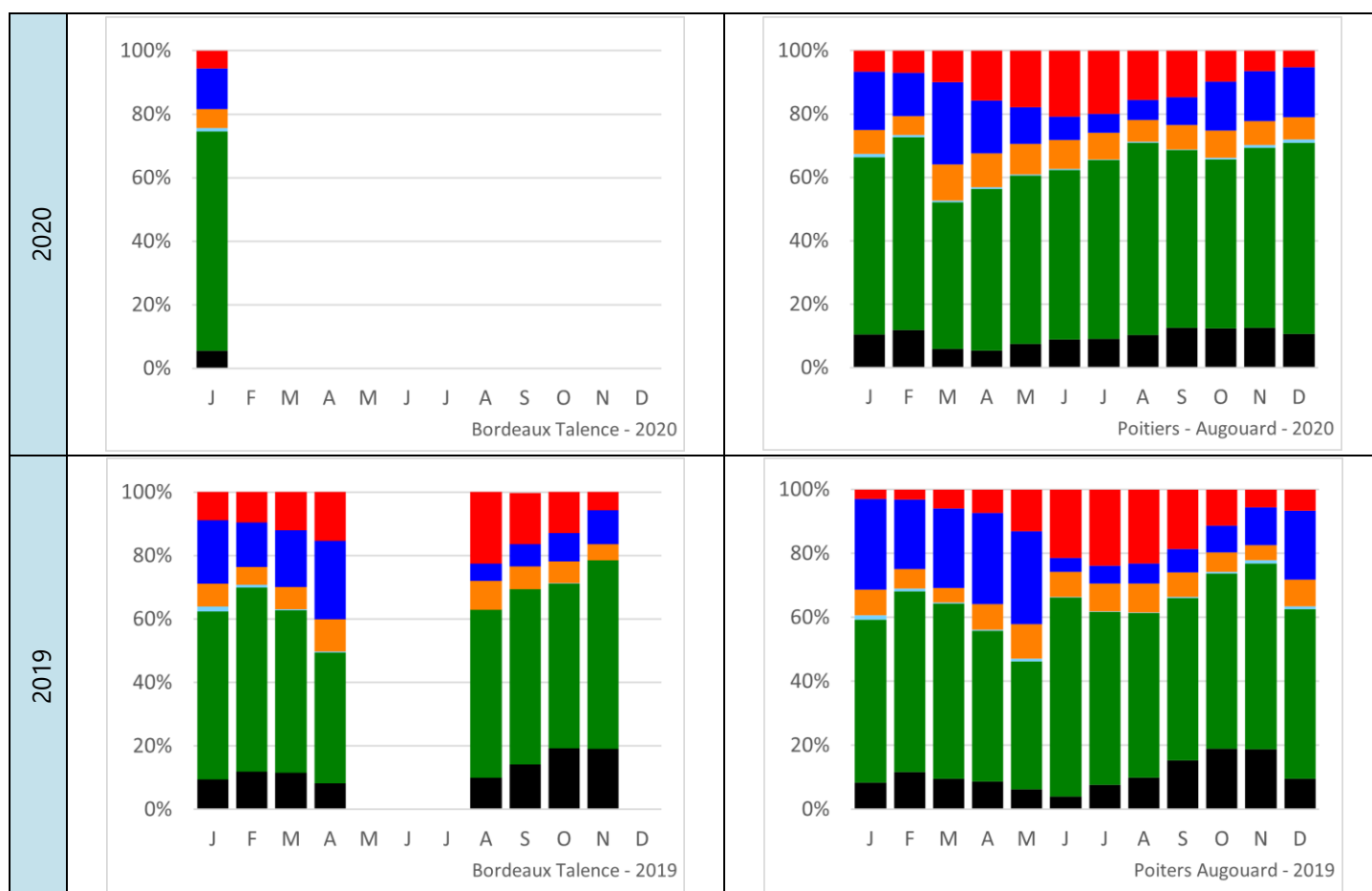


Figure 49 | OM et ions majeurs, Contributions mensuelles aux particules fines PM1

- ➔ **BC_{tot}**, entre 5 % (avril 2020) et 24 % (octobre et novembre 2022). Comme vu dans le chapitre précédent, le Black Carbon total provient à la fois de la combustion de fuel fossile (BC_{ff}) et de la combustion de biomasse (BC_{wb}). Le BC_{ff} est issu du trafic routier, source de pollution présente tout au long de l'année. Le BC_{wb} est lié à la consommation de bois pour le chauffage résidentiel. Les contributions du BC_{tot} sont plus importantes durant les mois froids, lors de l'utilisation des moyens de chauffage, le BC_{tot} reste cependant présent tout au long de l'année à cause de sa part d'origine routière. Au printemps 2020, les contributions en BC sont plus faibles que pour les autres années, ce qui s'explique par les restrictions de déplacement induites par la Covid19.
- ➔ **OM**, entre 38 % (avril 2021) et 61 % (février 2020), est liée à de multiples sources : trafic routier, industries, activités biogéniques. A celles-ci s'ajoute la combustion de biomasse en hiver. L'OM est émise directement dans l'atmosphère ou résulte de l'oxydation de certains COV notamment émis par la végétation (aérosol organique secondaire). C'est durant les mois les plus froids que l'on observe les plus fortes contributions. La matière organique reste néanmoins importante tout au long de l'année. En été, la composition de la matière organique change et une grande partie pourrait être due à des processus de formation via des Composés Organiques Volatils biogéniques (COV) (Yu et al., 2005).
- ➔ **Cl⁻**, bien que très faiblement contributaire aux PM₁, entre 0 et 1%, c'est durant les mois hivernaux que l'ion chlorure est le plus présent.
- ➔ **NH₄⁺**, entre 2 % (novembre 2022) et 13 % (avril 2021), c'est au printemps que sa contribution aux PM₁ est la plus forte. Cela s'explique par le caractère semi-volatil de la molécule : les températures fraîches et l'humidité permettent à l'ammonium de rester sous forme particulaire.
- ➔ **NO₃⁻**, entre 6 % (juillet 2021) et 29 % (mars 2021). Les contributions des nitrates sont les plus élevées de janvier à avril. Tout comme l'ammonium, les températures fraîches et l'humidité lui permettent de rester sous forme particulaire.
- ➔ **SO₄²⁻**, entre 3 % (janvier 2019) et 24 % (juillet 2019). Le sulfate s'observe particulièrement durant les mois chauds : mai, juin, juillet et août. L'ensoleillement estival permet oxydation du SO₂ en SO₄²⁻ et ainsi de se stabiliser sous forme particulaire.

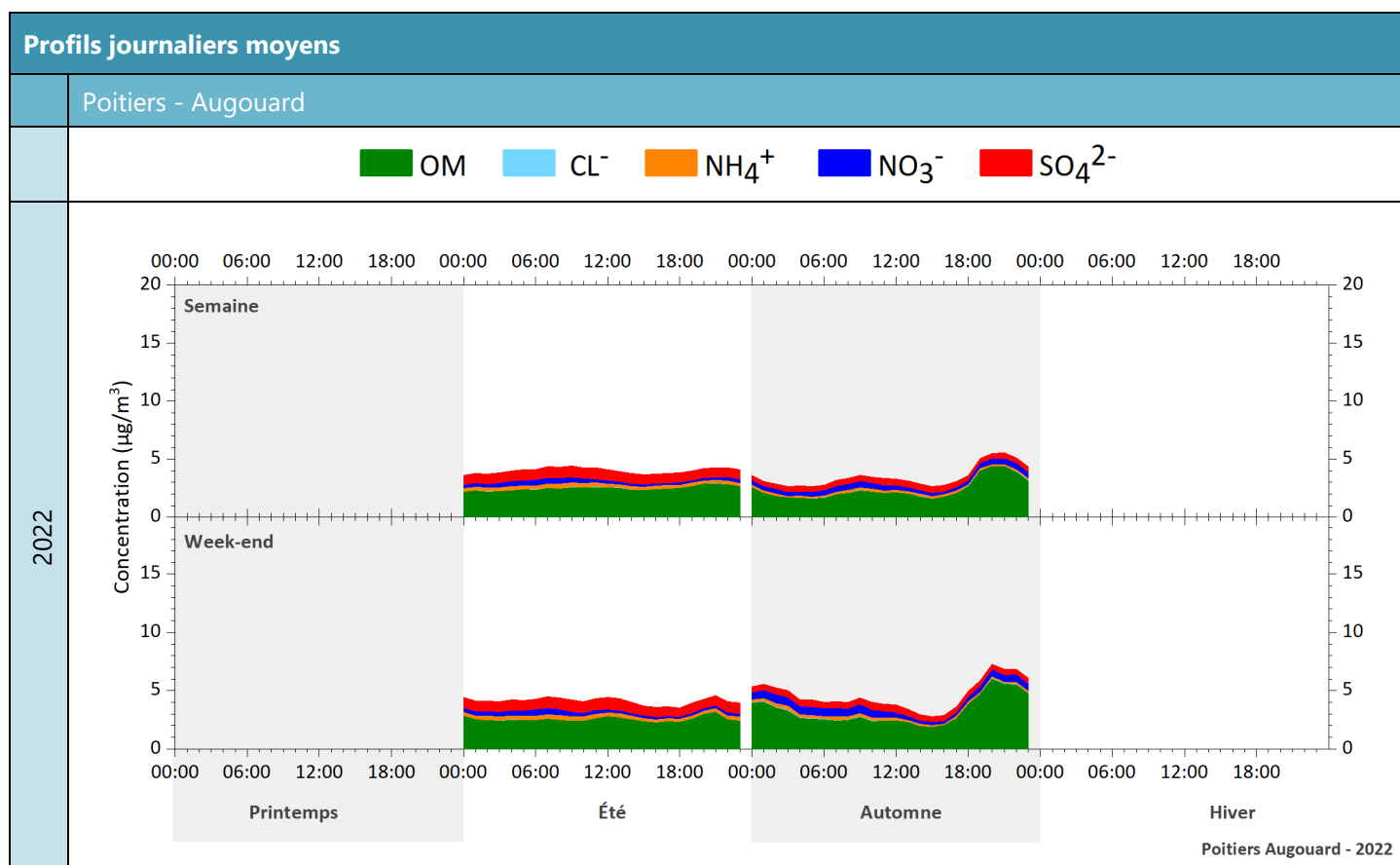
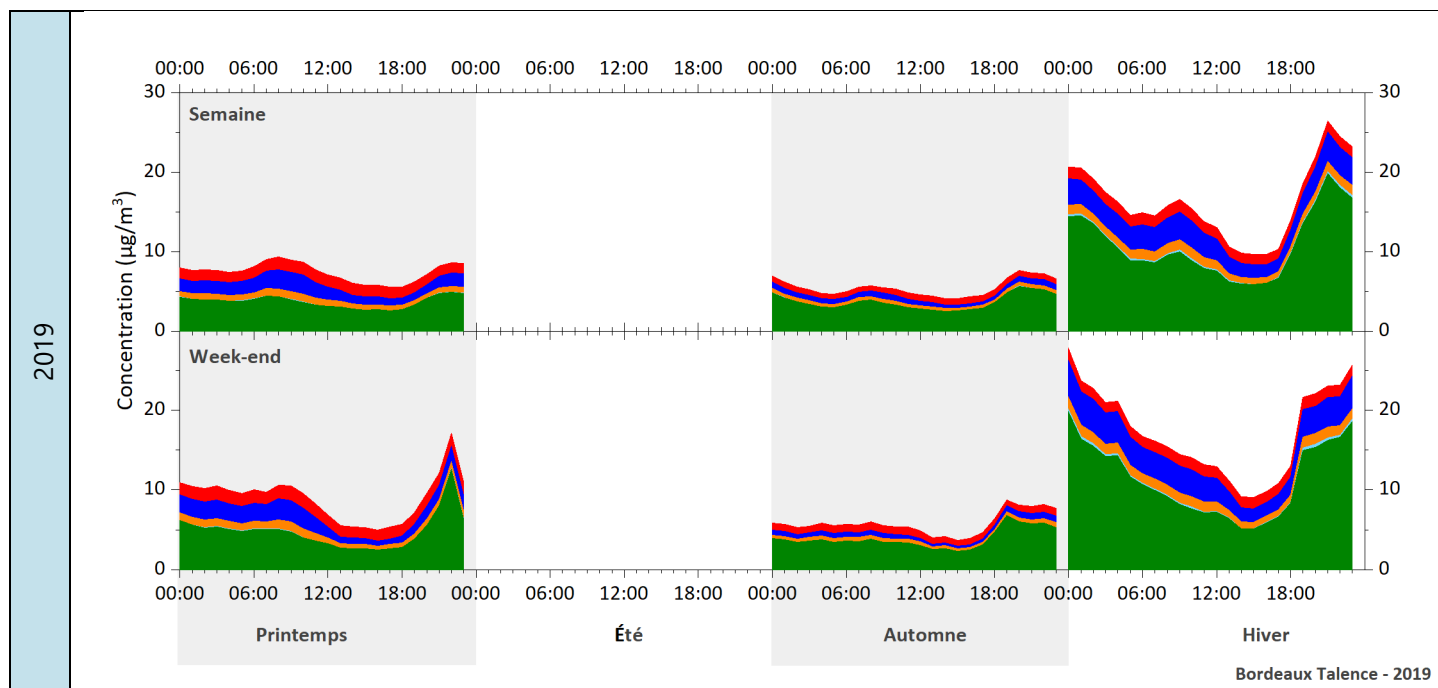
5.2.4. Profils journaliers

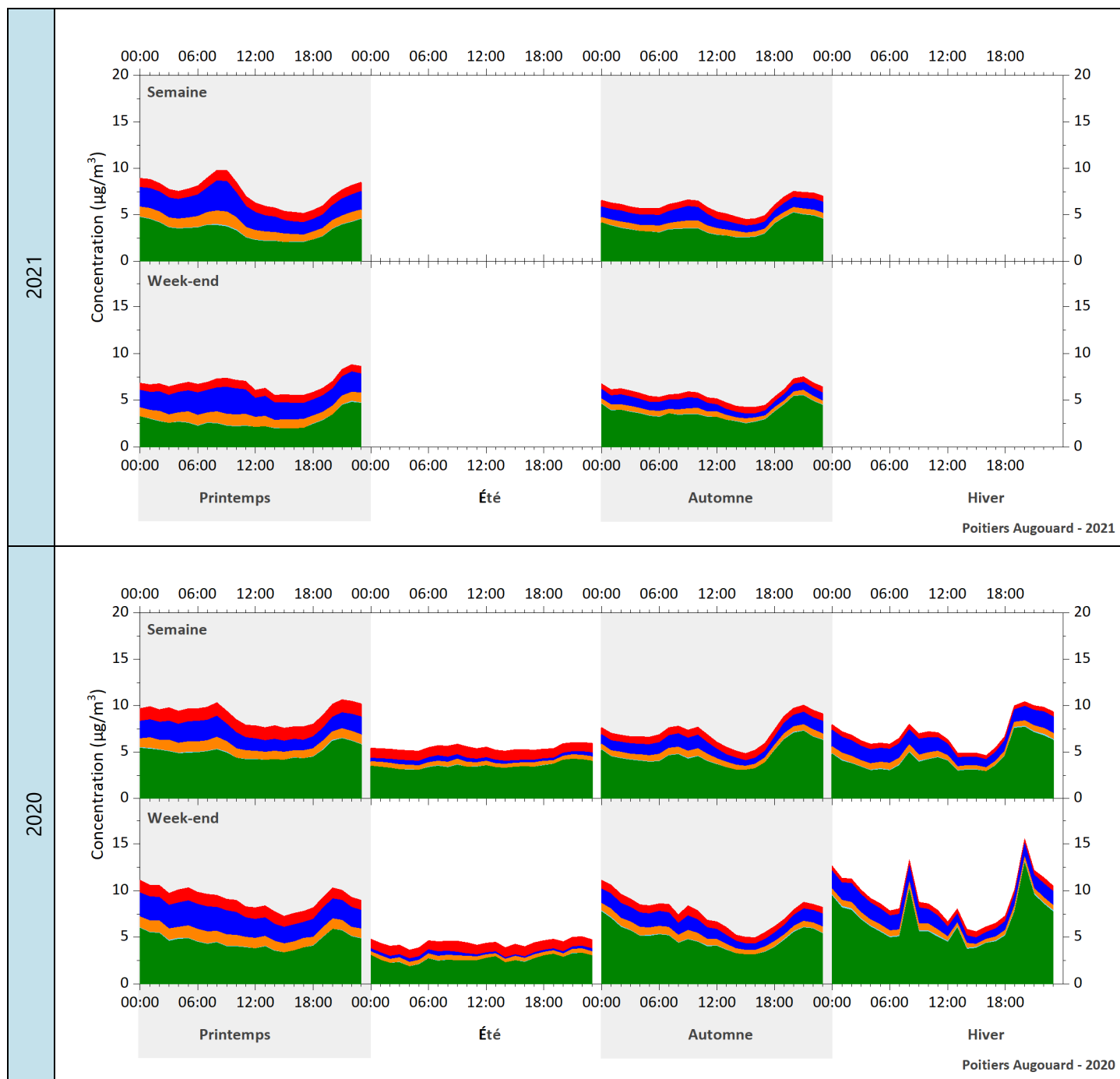
Les profils journaliers moyens permettent de caractériser le comportement général des polluants au fil d'une journée. Les concentrations évoluent et diffèrent suivant le site, les saisons, l'heure de la journée, mais également suivant les jours de semaine.

- **OM**, la matière organique est le paramètre évoluant le plus au fil des saisons, mais également au cours de la journée. En effet, une part étant liée au chauffage résidentiel au bois, les valeurs les plus élevées s'observent pendant les saisons froides. Le profil journalier aussi est influencé par la combustion de biomasse, les concentrations augmentent en fin de journée lors de la mise en route des moyens de chauffage. Toutefois, les concentrations en OM restent importantes tout au long de l'année. En été, la composition de la matière organique est notamment due aux activités biogéniques.
Sur Bordeaux-Talence, l'utilisation du chauffage bois le week-end en fin de journée semble plus importante qu'en semaine.
- **NH₄⁺**, les concentrations les plus élevées s'observent au printemps. Résultant de l'ammoniac (NH₃) émis principalement au printemps par les activités agricoles (épandage d'engrais et de lisiers) mais également par les moteurs à essence catalysés, les conditions météorologiques printanières sont également favorables à la formation de particules de nitrates d'ammonium (NH₄NO₃) : forte humidité et faibles températures matinales. Les valeurs les plus fortes s'observent aux périodes les plus froides de la journée (nuit et matinée), le nitrate d'ammonium est sous forme de particule. A l'inverse, les valeurs les plus faibles sont mesurées dans le milieu de l'après-midi, lorsque le nitrate d'ammonium passe sous forme gazeuse.
- **NO₃⁻**, les nitrates sont issus de l'oxydation des NOx. Ces derniers proviennent du trafic routier, source de pollution présente tout au long de l'année. On retrouve les nitrates durant les saisons les plus fraîches (automne, hiver, printemps), au moment où les basses températures et l'humidité permettent la formation de particules de nitrate d'ammonium (NH₄NO₃). Le caractère semi-volatile du nitrate, de l'ammonium ou du chlorure d'ammonium se traduit dans l'évolution des concentrations au cours de la journée : les valeurs les plus élevées correspondent aux heures les plus froides (nuit et matinée), le nitrate d'ammonium est sous forme de particule. A l'inverse, les valeurs les plus faibles sont mesurées dans le milieu de l'après-midi, lorsque le nitrate d'ammonium passe sous forme gazeuse.
- **SO₄²⁻**, les concentrations les plus importantes en sulfate se retrouvent au printemps et en été, lorsque les conditions d'ensoleillement favorisent l'oxydation photochimique du SO₂ en SO₄²⁻.

Les figures suivantes illustrent les évolutions des concentrations en matière organique et en ions majeurs au cours d'une journée. Les quatre saisons ont été distinguées : printemps, été, automne et hiver. Deux catégories de profils sont présentées, la première représentant les jours de semaine (lundi au vendredi), la seconde illustrant les jours de week-end (samedi, dimanche).

Profils journaliers moyens	
	Bordeaux - Talence
	OM Cl⁻ NH₄⁺ NO₃⁻ SO₄²⁻
2022	---
2021	---
2020	---





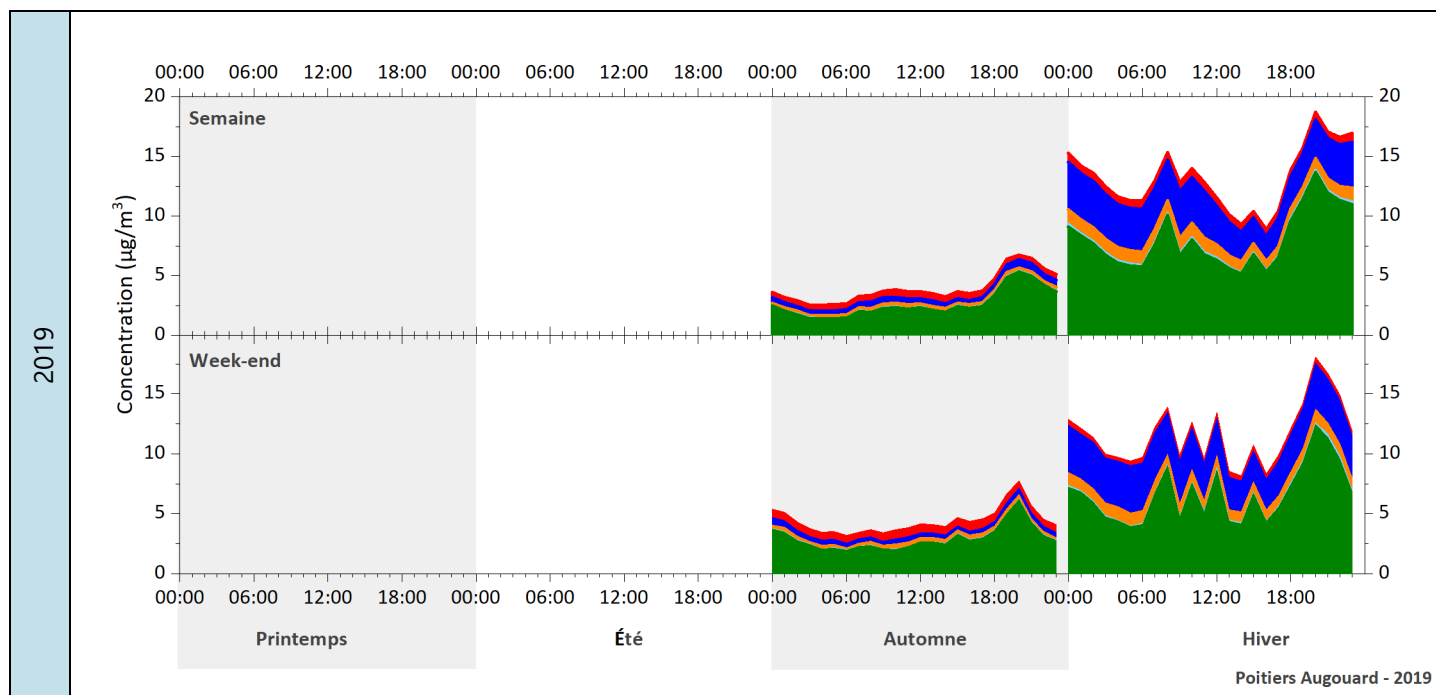


Figure 51 | OM et ions majeurs, Poitiers-Augouard, Profils journaliers moyens

5.2.5. Influence météorologique et origine de la pollution

Les conditions météorologiques influencent les niveaux mesurés à la station. Les roses de pollution permettent de localiser les différences de concentrations d'un polluant (représentées par l'échelle de couleurs) en fonction de la direction du vent et de la force du vent (cercles)⁸. Ainsi, les roses de pollution permettent d'identifier l'origine des masses d'air chargées en particules, mesurées au niveau de la station. Le pas de temps horaire a été utilisé afin de mettre en évidence un lien potentiel entre ces différents paramètres.

Les figures ci-dessous présentent les roses annuelles de pollution pour la matière organique (OM) et les ions chlorure (Cl^-), ammonium (NH_4^+), nitrate (NO_3^-) et sulfate (SO_4^{2-}) pour les années 2019, 2020, 2021 et 2022, pour les sites de Bordeaux-Talence et Poitiers-Augouard. Les roses de pollution ne prennent pas en compte les vents faibles, dont la vitesse est inférieure à 1 m.s^{-1} . En termes de qualité de l'air, si les niveaux plus forts sont obtenus avec des vitesses de vent élevées cela implique une source régionale, voire un import à plus longue distance de particules. Au contraire, s'ils sont centrés à 0-4 m/s, cela indique une augmentation de concentrations liée à des conditions météorologiques peu favorables à la dispersion des émissions locales de polluants, donc une origine de la pollution plus locale.

Bordeaux - Talence

- ➔ **OM, NO_3^- , Cl^-** , les fortes concentrations en OM, NO_3^- et en Cl^- sont observées par vents faibles (inférieurs à 3 m/s), donc issues de sources locales probablement liées au caractère résidentiel du site, utilisant le chauffage au bois en période hivernale.
- ➔ **NH_4^+** , les plus fortes concentrations sont observées par vents faibles (inférieurs à 3 m/s), probablement liées à des sources locales. Un secteur sud-est, avec des vitesses de vents comprises entre 5 et 10 m/s laisse suggérer des sources d'ammoniac au sud-est de la station.
- ➔ **SO_4^{2-}** , les sulfates proviennent de directions variées lors de vents faibles à forts, indiquant une autre localisation de l'apport que pour les autres espèces mesurées. En effet, le sulfate, avec des temps de formation dans l'atmosphère particulièrement longs, est un marqueur de masses d'air vieilles et ayant subi un transport.

⁸ Explication de la lecture des roses de pollution en annexe 3

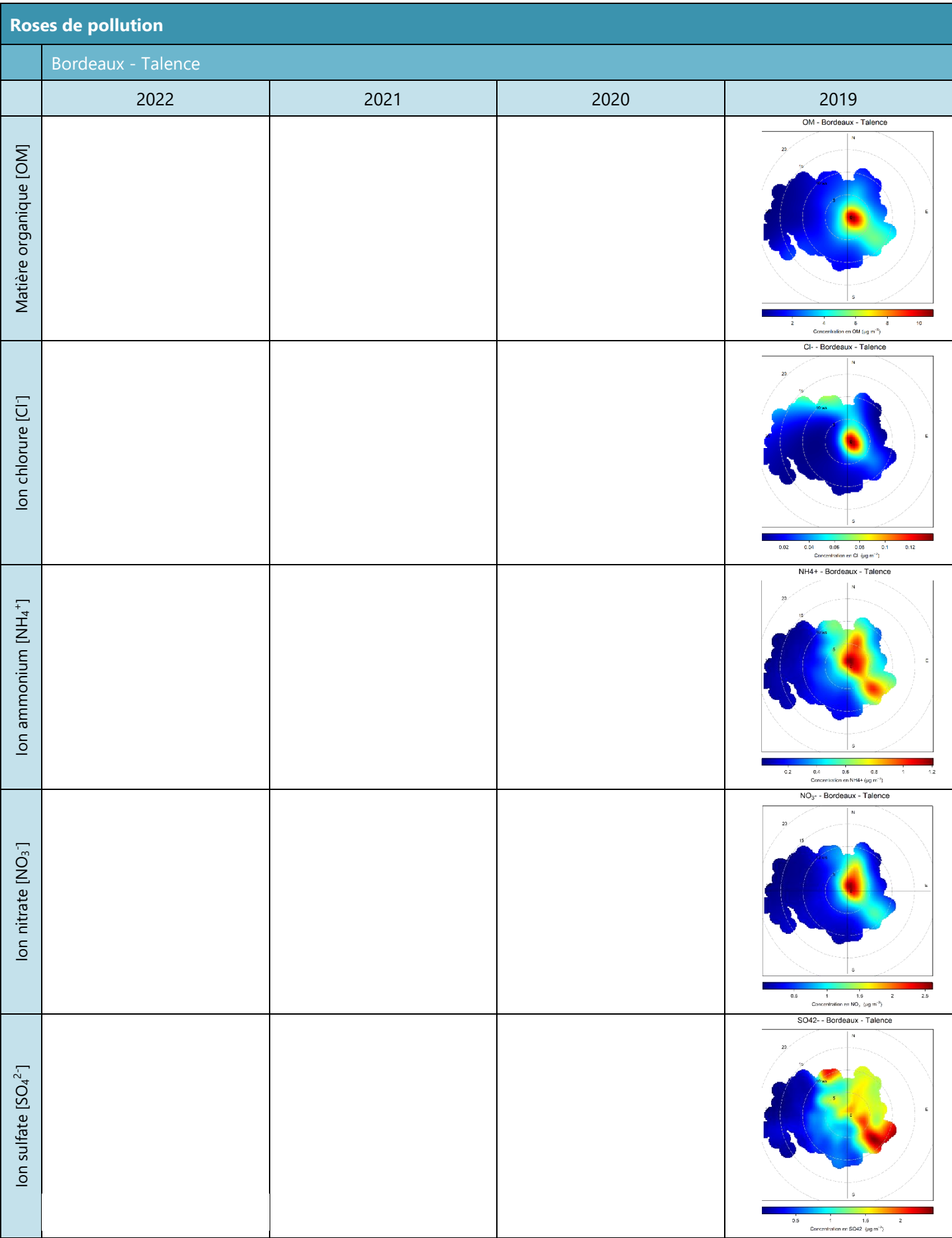
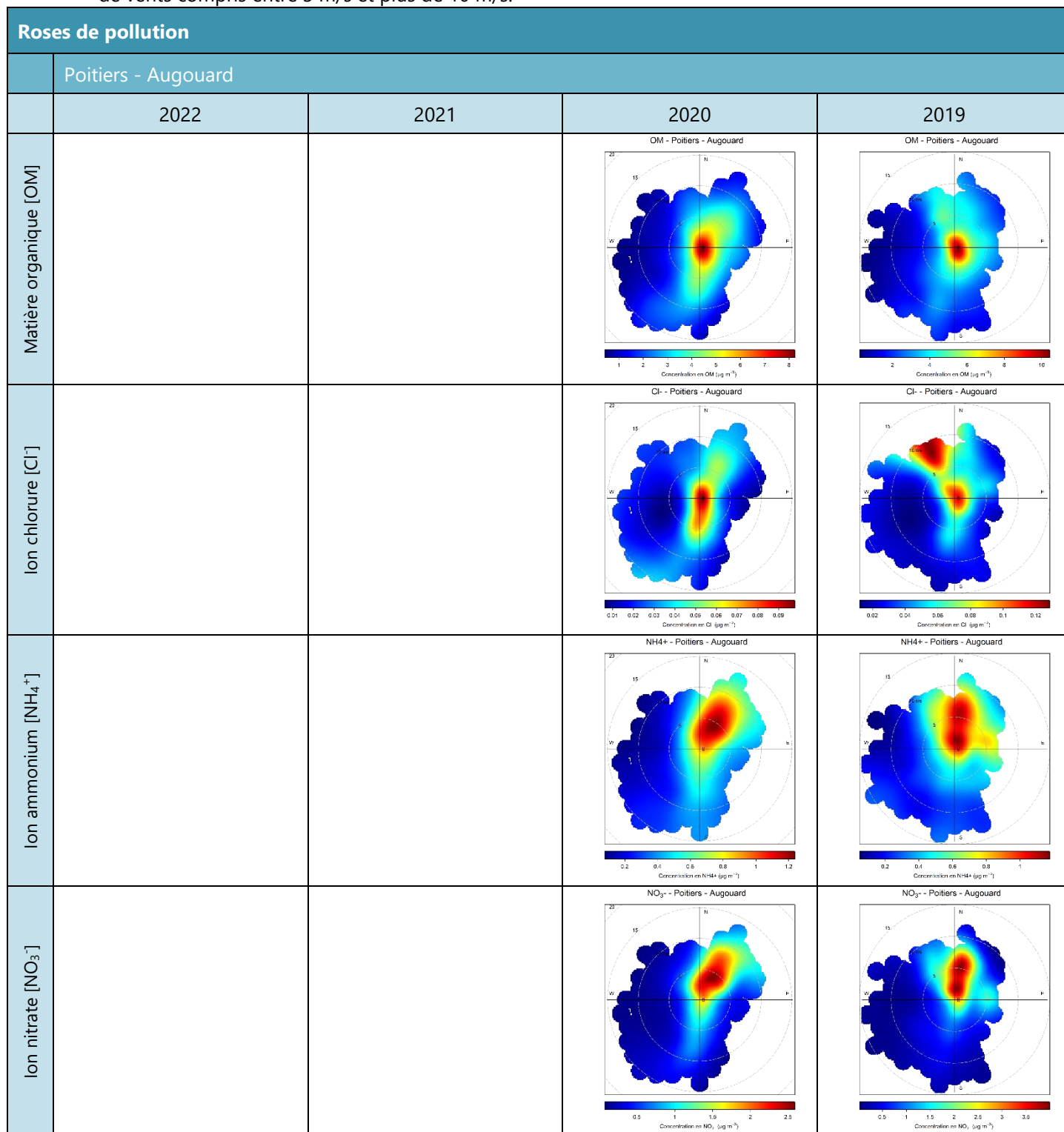


Figure 52 | OM et ions majeurs, Bordeaux-Talence, Roses de pollution

Poitiers - Augouard

- ➔ **OM**, les plus fortes concentrations sont observées par vents faibles, la matière organique semble issue de sources locales.
- ➔ **Cl⁻**, provenant d'une part de sources locales (fortes concentrations observées par vents faibles), le Cl⁻ semble également provenir d'autres sources plus lointaines car il présente de fortes concentrations lors de vents compris entre 5 et 10 m/s originaires du secteur nord/nord-ouest supposant un apport plus lointain.
- ➔ **NH₄⁺, NO₃⁻ et SO₄²⁻**, les autres ions majeurs sont issus d'un secteur nord/nord-est et sont observés lors de vents compris entre 3 m/s et plus de 10 m/s.



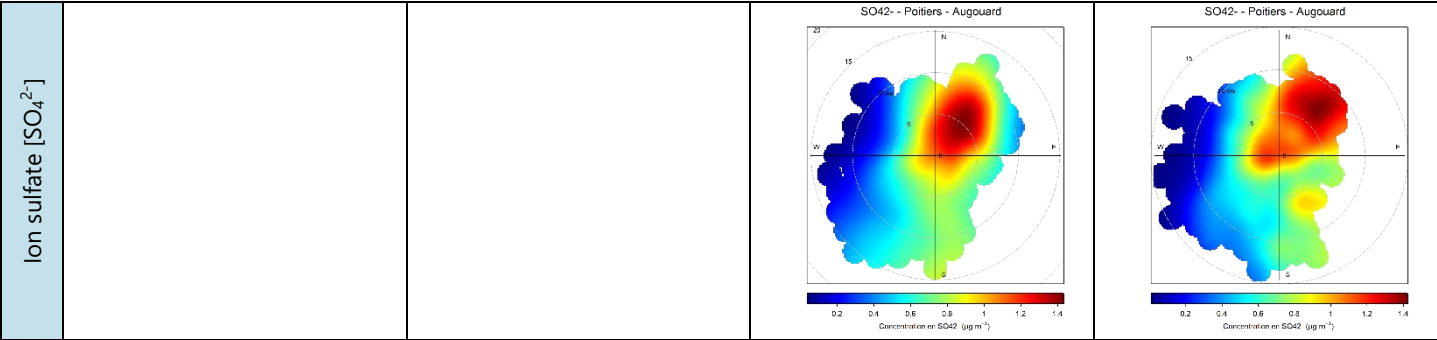


Figure 53 | OM et ions majeurs, Poitiers-Augouard, Roses de pollution

6. Conclusions

Depuis plusieurs années, la composition chimique des particules est suivie sur trois sites de la région Nouvelle-Aquitaine : Bordeaux-Talence, Poitiers-Augouard et Limoges-Berland. Toutes trois sont des stations urbaines de fond, et deux sont aujourd'hui des stations de référence « particules ». Plusieurs grandeurs sont suivies en continu sur ces sites :

- le Black Carbon ou carbone suie (BC) permettant de quantifier deux sources de combustion : la combustion de la biomasse et les combustions fossiles telles que le trafic routier (Bordeaux-Talence, Poitiers-Augouard et Limoges-Berland),
- la composition chimique des particules comprenant la matière organique (OM) et les ions majeurs (ions chlorure (Cl^-), ammonium (NH_4^+), nitrate (NO_3^-) et sulfate (SO_4^{2-})) (Bordeaux-Talence et Poitiers-Augouard).

En fond urbain, plusieurs sources de particules ont été identifiées :

- ➔ **Le trafic routier** émet du Black Carbon issu de la combustion de fuel fossile (BC_{ff}) et de la matière organique (OM), il entre également en jeu dans la formation de particules secondaires (nitrate d'ammonium notamment).
 - Le BC_{ff} , qui est une composante des particules, présente une bonne corrélation avec les oxydes d'azote (NO_x). Les concentrations BC_{ff} sont plus importantes en jours ouvrés que le week-end, des pics de concentrations sont également observables le matin et le soir. Ces évolutions hebdomadaires et journalières sont typiques des polluants d'origine routière.
 - Présentes toute l'année, les particules issues de la combustion de fuel fossile représentent mensuellement 5 à 20 % des particules PM_{10} . La combustion de fuel fossile, provenant en majeure partie du trafic routier, est une source de pollution présente en continu tout au long de l'année. Les concentrations, plus élevées en période hivernale, sont à relier avec les conditions météorologiques : stabilité des masses d'air plus importante, peu favorable à la dispersion des polluants dans l'atmosphère.
 - Bordeaux-Talence, Poitiers-Augouard et Limoges-Berland présentent peu de différences sur les concentrations annuelles. Annuellement, la part de combustion de fuel fossile représente environ 10 % des PM_{10} : 9,4 % sur Bordeaux-Talence, 9,1 % sur Limoges-Berland et 8,4 % sur Poitiers-Augouard. Certains jours, la combustion de fuel fossile peut contribuer jusqu'à 49 % des PM_{10} sur des valeurs journalières.
 - L'année 2020 a été marquée par le Covid19 et ses mesures sanitaires contraignantes (confinements et limitations de déplacement), entraînant une réduction de trafic. Cette baisse de trafic est visible sur les concentrations, ainsi que sur les évolutions annuelles, mensuelles et journalières de Black Carbon d'origine fossile.
- ➔ L'impact du **chauffage résidentiel au bois** est visible à travers le Black Carbon provenant de la combustion de biomasse (BC_{wb}) ainsi que par un apport supplémentaire de matière organique (OM) en hiver.
 - les concentrations en BC_{wb} et en matière organique présentent un profil marqué par le chauffage résidentiel. Les niveaux de ces composés sont nettement plus hauts en hiver qu'en été. De plus, pendant la saison froide, les concentrations nocturnes ainsi que celles des week-ends restent élevées ; l'utilisation du chauffage au bois y est plus importante. Comme l'illustrent les roses de pollution, ces particules proviennent de sources locales présentes autour de la station de mesure.
 - Les niveaux en particules PM_{wb} varient énormément au cours des saisons, pouvant représenter de 6 % à 45 % des particules PM_{10} . Nettement plus importante l'hiver, la part de combustion de la biomasse provient principalement du chauffage résidentiel.
 - L'impact de la combustion de biomasse est le plus important à Bordeaux-Talence. Cette source de combustion représente, annuellement, environ 20 % des PM_{10} : 21,3 % sur Bordeaux-Talence, 18,6 % sur Limoges-Berland et 17,8 % sur Poitiers-Augouard. Certains jours, la combustion de la biomasse peut atteindre jusqu'à 93 % des PM_{10} en moyennes journalières.

➤ **Les particules secondaires** jouent aussi un rôle non négligeable dans les concentrations en particules mesurées.

- La période froide est caractérisée par la présence de nitrates (NO_3^-) provenant de l'oxydation des oxydes d'azote (NO_x , issus principalement du transport routier) stabilisés par association avec l'ammoniac (NH_3 , émis principalement par les activités agricoles). C'est en fin d'hiver - début de printemps que les concentrations en nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) sont les plus élevées du fait de faibles températures et d'une forte humidité qui entraînent une plus forte stabilité de la molécule. Entre 2019 et 2022, les nitrates ont contribué à 14 % de la masse des PM_{10} à Bordeaux-Talence et à 18 % à Poitiers-Augouard, en moyenne entre les mois de janvier à mars et d'octobre à décembre.
- En période chaude, les sulfates (SO_4^{2-}) remplacent les nitrates car les fortes conditions d'ensoleillement accélèrent l'oxydation photochimique du dioxyde de soufre (SO_2), émis par des combustions fossiles contenant du soufre (fioul, charbon, etc.) en SO_4^{2-} . Les sulfates peuvent également dériver de sulfure de diméthyle (DMS) produit par les algues marines.

Table des figures

Figure 1 Distribution en nombre et en volume des particules atmosphériques en fonction du diamètre (Seinfeld and Pandis, 1998)	11
Figure 2 Matériel et méthodes de mesure	13
Figure 3 AE33, Photo d'un Aethalomètre	14
Figure 4 ACSM, Photo d'un spectromètre « Aerosol Chemical Speciation Monitor »	14
Figure 5 Localisation des mesures de particules fines et ultrafines, Carte régionale	15
Figure 6 Bordeaux-Talence, Localisation et environnement de la station	16
Figure 7 Poitiers-Augouard, Localisation et environnement de la station	17
Figure 8 Limoges-Berland, Localisation et environnement de la station	18
Figure 9 Taux de fonctionnement annuel	19
Figure 10 Bordeaux-Talence, Taux de fonctionnement mensuel	19
Figure 11 Poitiers-Augouard, Taux de fonctionnement mensuel	19
Figure 12 Limoges-Berland, Taux de fonctionnement mensuel	19
Figure 13 Bordeaux-Mérignac, Précipitations et températures (données annuelles)	20
Figure 14 Bordeaux-Mérignac, Précipitations et températures (données journalières)	22
Figure 15 Poitiers-Biard, Précipitations et températures (données annuelles)	22
Figure 16 Poitiers-Biard, Précipitations et températures (données journalières)	24
Figure 17 Limoges-Bellegarde, Précipitations et températures (données annuelles)	24
Figure 18 Limoges-Bellegarde, Précipitations et températures (données journalières)	26
Figure 19 Bordeaux-Mérignac, Roses des vents annuelles (données horaires)	27
Figure 20 Bordeaux-Mérignac, Roses des vents saisonnières (données horaires)	28
Figure 21 Poitiers-Biard, Roses des vents annuelles (données horaires)	29
Figure 22 Poitiers-Biard, Roses des vents saisonnières (données horaires)	30
Figure 23 Limoges-Bellegarde, Roses des vents annuelles (données horaires)	31
Figure 24 Limoges-Bellegarde, Roses des vents saisonnières (données horaires)	32
Figure 25 BC, Bordeaux-Talence, Statistiques descriptives	34
Figure 26 BC, Poitiers-Augouard, Statistiques descriptives	34
Figure 27 BC, Limoges-Berland, Statistiques descriptives	35
Figure 28 BC, Evolution annuelle et dispersion des concentrations mesurées	36
Figure 29 BC, Bordeaux-Talence, Evolution mensuelle et dispersion des concentrations mesurées	38
Figure 30 BC, Poitiers-Augouard, Evolution mensuelle et dispersion des concentrations mesurées	39
Figure 31 BC, Limoges-Berland, Evolution mensuelle et dispersion des concentrations mesurées	40
Figure 32 BC, Evolution des concentrations moyennes journalières	43
Figure 33 BC, Contribution mensuelle aux particules grossières PM ₁₀	44
Figure 34 BC, Bordeaux-Talence, Profils moyens journaliers (heure TU)	47
Figure 35 BC, Poitiers-Augouard, Profils moyens journaliers	49
Figure 36 BC, Limoges-Berland, Profils moyens journaliers	51
Figure 37 BC, Bordeaux-Talence, Corrélation avec les autres polluants	54
Figure 38 BC, Poitiers-Augouard, Corrélation avec les autres polluants	58
Figure 39 BC, Limoges-Berland, Corrélation avec les autres polluants	62
Figure 40 BC, Bordeaux-Talence, Roses de pollution	64
Figure 41 BC, Poitiers-Augouard, Roses de pollution	66
Figure 42 BC, Limoges-Berland, Roses de pollution	67
Figure 43 OM et ions majeurs, Bordeaux-Talence, Statistiques descriptives	68
Figure 44 OM et ions majeurs, Poitiers-Augouard, Statistiques descriptives	69
Figure 45 OM et ions majeurs, Bordeaux-Talence, Evolutions journalières des concentrations et contributions aux PM ₁	71
Figure 46 OM et ions majeurs, Poitiers-Augouard, Evolutions journalières des concentrations et contributions aux PM ₁	73

Figure 47 OM et ions majeurs, Bordeaux-Talence, Evolutions mensuelles des concentrations et dispersion des mesures	74
Figure 48 OM et ions majeurs, Poitiers-Augouard, Evolutions mensuelles des concentrations et dispersion des mesures	75
Figure 49 OM et ions majeurs, Contributions mensuelles aux particules fines PM1	77
Figure 50 OM et ions majeurs, Bordeaux-Talence, Profils journaliers moyens	79
Figure 51 OM et ions majeurs, Poitiers-Augouard, Profils journaliers moyens.....	81
Figure 52 OM et ions majeurs, Bordeaux-Talence, Roses de pollution.....	82
Figure 53 OM et ions majeurs, Poitiers-Augouard, Roses de pollution	84
Figure 54 Année 2022, Comparaison aux normales Météo France	93
Figure 55 Année 2021, Comparaison aux normales Météo France	94
Figure 56 Année 2020, Comparaison aux normales Météo France	95
Figure 57 Année 2019, Comparaison aux normales Météo France	97
Figure 58 Diagramme en boîte (Boxplot), Schéma explicatif du diagramme en boîte	99

Annexes

ANNEXE 1 : Bibliographie

- Anastasio, C., Martin, S.T., 2001. Atmospheric nanoparticles. *Rev. Mineral. Geochem.* 44, 293–349. <https://doi.org/10.2138/rmg.2001.44.08>
- Berico, M., Luciani, A., Formignani, M., 1997. Atmospheric aerosol in an urban area—measurements of TSP and PM10 standards and pulmonary deposition assessments. *Atmos. Environ.* 31, 3659–3665. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00204-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00204-5)
- Berresheim, H., Wine, P., Davis, D., 1995. Sulfur in the atmosphere. *Compos. Chem. Clim. Atmosphere* 251–307.
- Bodhaine, B.A., 1995. Aerosol absorption measurements at Barrow, Mauna Loa and the south pole. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 100, 8967–8975.
- Buseck, P.R., Adachi, K., 2008. Nanoparticles in the atmosphere. *Elements* 4, 389–394. <https://doi.org/10.2113/gselements.4.6.389>
- Chevrier, F., 2016. Chauffage au bois et qualité de l'air en Vallée de l'Arve: définition d'un système de surveillance et impact d'une politique de rénovation du parc des appareils anciens (Thèse). Université Grenoble Alpes, Grenoble.
- Delfino, R.J., Sioutas, C., Malik, S., 2005. Potential Role of Ultrafine Particles in Associations between Airborne Particle Mass and Cardiovascular Health. *Environ. Health Perspect.* 113, 934–946.
- Docherty, K.S., Lewandowski, M., Jimenez, J.L., 2015. Effect of Vaporizer Temperature on Ambient Non-Refractory Submicron Aerosol Composition and Mass Spectra Measured by the Aerosol Mass Spectrometer. *Aerosol Sci. Technol.* 49, 485–494.
- Donaldson, K., Stone, V., Seaton, A., MacNee, W., 2001. Ambient particle inhalation and the cardiovascular system: potential mechanisms. *Environ. Health Perspect.* 109, 523–527.
- El Haddad, I., Marchand, N., Dron, J., Temime-Roussel, B., Quivet, E., Wortham, H., Jaffrezo, J.L., Baduel, C., Voisin, D., Besombes, J.L., 2009. Comprehensive primary particulate organic characterization of vehicular exhaust emissions in France. *Atmos. Environ.* 43, 6190–6198.
- Favez, O., Haddad, I.E., Piot, C., Boréave, A., Abidi, E., Marchand, N., Jaffrezo, J.-L., Besombes, J.-L., Personnaz, M.-B., Sciare, J., 2010. Inter-comparison of source apportionment models for the estimation of wood burning aerosols during wintertime in an Alpine city (Grenoble, France). *Atmospheric Chem. Phys.* 10, 5295–5314.
- Gehring, U., Wijga, A.H., Brauer, M., Fischer, P., de Jongste, J.C., Kerkhof, M., Oldenwening, M., Smit, H.A., Brunekreef, B., 2010. Traffic-related air pollution and the development of asthma and allergies during the first 8 years of life. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 181, 596–603.
- Hansen, A.D.A., Conway, T.J., Strele, L.P., Bodhaine, B.A., Thoning, K.W., Tans, P., Novakov, T., 1989. Correlations among combustion effluent species at Barrow, Alaska: Aerosol black carbon, carbon dioxide, and methane. *J. Atmospheric Chem.* 9, 283–299.
- Heeb, N.V., Forss, A.-M., Brühlmann, S., Lüscher, R., Saxer, C.J., Hug, P., 2006. Three-way catalyst-induced formation of ammonia—velocity- and acceleration-dependent emission factors. *Atmos. Environ.* 40, 5986–5997.
- Heintzenberg, J., 1989. Fine particles in the global troposphere A review. *Tellus B* 41B, 149–160. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.1989.tb00132.x>
- Heintzenberg, J., Covert, D.C., Van Dingenen, R., 2000. Size distribution and chemical composition of marine aerosols: a compilation and review. *Tellus B* 52, 1104–1122. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.2000.00136.x>
- Herich, H., Hueglin, C., Buchmann, B., 2011. A 2.5 year's source apportionment study of black carbon from wood burning and fossil fuel combustion at urban and rural sites in Switzerland. *Atmospheric Meas. Tech.* 4, 1409–1420.
- Jimenez, J.L., Canagaratna, M.R., Donahue, N.M., Prevot, A.S.H., Zhang, Q., Kroll, J.H., DeCarlo, P.F., Allan, J.D., Coe, H., Ng, N.L., Aiken, A.C., Docherty, K.S., Ulbrich, I.M., Grieshop, A.P., Robinson, A.L., Duplissy, J., Smith, J.D., Wilson, K.R., Lanz, V.A., Hueglin, C., Sun, Y.L., Tian, J., Laaksonen, A., Raatikainen, T., Rautiainen, J.,

- Vaattovaara, P., Ehn, M., Kulmala, M., Tomlinson, J.M., Collins, D.R., Cubison, M.J., Dunlea, J., Huffman, J.A., Onasch, T.B., Alfarra, M.R., Williams, P.I., Bower, K., Kondo, Y., Schneider, J., Drewnick, F., Borrmann, S., Weimer, S., Demerjian, K., Salcedo, D., Cottrell, L., Griffin, R., Takami, A., Miyoshi, T., Hatakeyama, S., Shimo, A., Sun, J.Y., Zhang, Y.M., Dzepina, K., Kimmel, J.R., Sueper, D., Jayne, J.T., Herndon, S.C., Trimborn, A.M., Williams, L.R., Wood, E.C., Middlebrook, A.M., Kolb, C.E., Baltensperger, U., Worsnop, D.R., 2009. Evolution of Organic Aerosols in the Atmosphere. *Science* 326, 1525–1529. <https://doi.org/10.1126/science.1180353>
- Kiehl, J., Rodhe, H., 1995. Modeling geographical and seasonal forcing due to aerosols. *Aerosol Forcing Clim.* 281–296.
- Kirchstetter, T.W., Novakov, T., Hobbs, P.V., 2004. Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 109.
- Kocbach, A., Li, Y., Yttri, K.E., Cassee, F.R., Schwarze, P.E., Namork, E., 2006. Physicochemical characterisation of combustion particles from vehicle exhaust and residential wood smoke. Part. *Fibre Toxicol.* 3, 1.
- Korhonen, P., Kulmala, M., Laaksonen, A., Viisanen, Y., McGraw, R., Seinfeld, J.H., 1999. Ternary nucleation of H₂SO₄, NH₃, and H₂O in the atmosphere. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 104, 26349–26353. <https://doi.org/10.1029/1999JD900784>
- Kulmala, M., Vehkamäki, H., Petäjä, T., Dal Maso, M., Lauri, A., Kerminen, V.M., Birmili, W., McMurry, P.H., 2004. Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations. *J. Aerosol Sci.* 35, 143–176. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2003.10.003>
- Laschober, C., Limbeck, A., Rendl, J., Puxbaum, H., 2004. Particulate emissions from on-road vehicles in the Kaisermühlen-tunnel (Vienna, Austria). *Atmos. Environ.* 38, 2187–2195.
- LCSQA, 2015. Impact de la combustion de la biomasse sur les concentrations de PM₁₀ dans les 10 agglomérations du programme CARA au cours de l'hiver 2014-2015.
- Lelieveld, J., Berresheim, H., Borrmann, S., Crutzen, P.J., Dentener, F.J., Fischer, H., Feichter, J., Flatau, P.J., Heland, J., Holzinger, R., Kormann, R., Lawrence, M.G., Levin, Z., Markowicz, K.M., Mihalopoulos, N., Minikin, A., Ramanathan, V., de Reus, M., Roelofs, G.J., Scheeren, H.A., Sciare, J., Schlager, H., Schultz, M., Siegmund, P., Steil, B., Stephanou, E.G., Stier, P., Traub, M., Warneke, C., Williams, J., Ziereis, H., 2002. Global Air Pollution Crossroads over the Mediterranean. *Science* 298, 794–799. <https://doi.org/10.1126/science.1075457>
- Logan, J.A., 1983. Nitrogen oxides in the troposphere: Global and regional budgets. *J. Geophys. Res. Oceans* 88, 10785–10807. <https://doi.org/10.1029/JC088iC15p10785>
- Morawska, L., Bofinger, N.D., Kocis, L., Nwankwoala, A., 1998. Submicrometer and supermicrometer particles from diesel vehicle emissions. *Environ. Sci. Technol.* 32, 2033–2042.
- Mozurkewich, M., 1993. The dissociation constant of ammonium nitrate and its dependence on temperature, relative humidity and particle size. *Atmospheric Environ. Part Gen. Top.* 27, 261–270. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(93\)90356-4](https://doi.org/10.1016/0960-1686(93)90356-4)
- Oberdörster, G., Oberdörster, E., Oberdörster, J., 2005. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ. Health Perspect.* 113, 823–839.
- Putaud, J.P., Van Dingenen, R., Alastuey, A., Bauer, H., Birmili, W., Cyrys, J., Flentje, H., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hansson, H.C., Harrison, R.M., Herrmann, H., Hitzenberger, R., Hügl, C., Jones, A.M., Kasper-Giebl, A., Kiss, G., Koussa, A., Kuhlbusch, T.A.J., Löschau, G., Maenhaut, W., Molnar, A., Moreno, T., Pekkanen, J., Perrino, C., Pitz, M., Puxbaum, H., Querol, X., Rodriguez, S., Salma, I., Schwarz, J., Smolik, J., Schneider, J., Spindler, G., ten Brink, H., Tursic, J., Viana, M., Wiedensohler, A., Raes, F., 2004a. A European aerosol phenomenology – 3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe. *Atmos. Environ.* 44, 1308–1320. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.12.011>
- Putaud, J.P., Van Dingenen, R., Dell'Acqua, A., Raes, F., Matta, E., Decesari, S., Facchini, M.C., Fuzzi, S., 2004b. Size-segregated aerosol mass closure and chemical composition in Monte Cimone (I) during MINATROC. *Atmos Chem Phys* 4, 889–902. <https://doi.org/10.5194/acp-4-889-2004>
- Raes, F., Dingenen, R.V., Vignati, E., Wilson, J., Putaud, J.-P., Seinfeld, J.H., Adams, P., 2000. Formation and cycling of aerosols in the global troposphere. *Atmos. Environ.* 34, 4215–4240.
- Ristovski, Z.D., Morawska, L., Bofinger, N.D., Hitchins, J., 1998. Submicrometer and supermicrometer particulate emission from spark ignition vehicles. *Environ. Sci. Technol.* 32, 3845–3852.
- Sandradewi, J., Prévôt, A.S.H., Szidat, S., Perron, N., Alfarra, M.R., Lanz, V.A., Weingartner, E., Baltensperger, U., 2008a. Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter. *Environ. Sci. Technol.* 42, 3316–3323.

- Sandradewi, J., Prévôt, A.S.H., Weingartner, E., Schmidhauser, R., Gysel, M., Baltensperger, U., 2008b. A study of wood burning and traffic aerosols in an Alpine valley using a multi-wavelength Aethalometer. *Atmos. Environ.* 42, 101–112.
- Sciare J., Favez O., Sarda-Estève R., Oikonomou K., Cachier H., Kazan V., 2009. Long - term observations of carbonaceous aerosols in the Austral Ocean atmosphere: Evidence of a biogenic marine organic source. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 114.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, New York.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley & Sons, New York.
- Strickland, M.J., Klein, M., Correa, A., Reller, M.D., Mahle, W.T., Riehle-Colarusso, T.J., Botto, L.D., Flanders, W.D., Mulholland, J.A., Siffel, C., 2009. Ambient air pollution and cardiovascular malformations in Atlanta, Georgia, 1986–2003. *Am. J. Epidemiol.* 169, 1004–1014.
- Sun, H., Biedermann, L., Bond, T.C., 2007. Color of brown carbon: A model for ultraviolet and visible light absorption by organic carbon aerosol. *Geophys. Res. Lett.* 34.
- Terzano, C., Di Stefano, F., Conti, V., Graziani, E., Petroianni, A., 2010. Air pollution ultrafine particles: toxicity beyond the lung. *Eur Rev Med Pharmacol Sci* 14, 809–821.
- Whitby, K.T., 1978. The physical characteristics of sulfur aerosols. *Atmospheric Environ.* 1967 12, 135–159. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(78\)90196-8](https://doi.org/10.1016/0004-6981(78)90196-8)
- Yu, J.Z., Huang, X.-F., Xu, J., Hu, M., 2005. When Aerosol Sulfate Goes Up, So Does Oxalate: Implication for the Formation Mechanisms of Oxalate. *Environ. Sci. Technol.* 39, 128–133. <https://doi.org/10.1021/es049559f>
- Zhang, Y., Seigneur, C., Seinfeld, J.H., Jacobson, M., Clegg, S.L., Binkowski, F.S., 2000. A comparative review of inorganic aerosol thermodynamic equilibrium modules: similarities, differences, and their likely causes. *Atmos. Environ.* 34, 117–137.

ANNEXE 2 : Comparaisons aux normales Météo France

Bilan climatique de l'année 2022⁹, exceptionnellement chaude, ensoleillée et peu arrosée

L'année 2022 a été l'année la plus chaude jamais enregistrée en France depuis le début du XXe siècle. Elle a débuté et s'est achevée par une extrême douceur et a été jalonnée d'épisodes de chaleur et de douceur remarquables, notamment un épisode de chaleur très précoce en mai, trois vagues de chaleur durant l'été et un épisode de chaleur tardif exceptionnel du 15 au 31 octobre. Les épisodes de froid ont été rares. Toutefois, après une fin d'hiver très douce, une offensive hivernale tardive a concerné le pays début avril avec des records de froid et des chutes de neige en plaine.

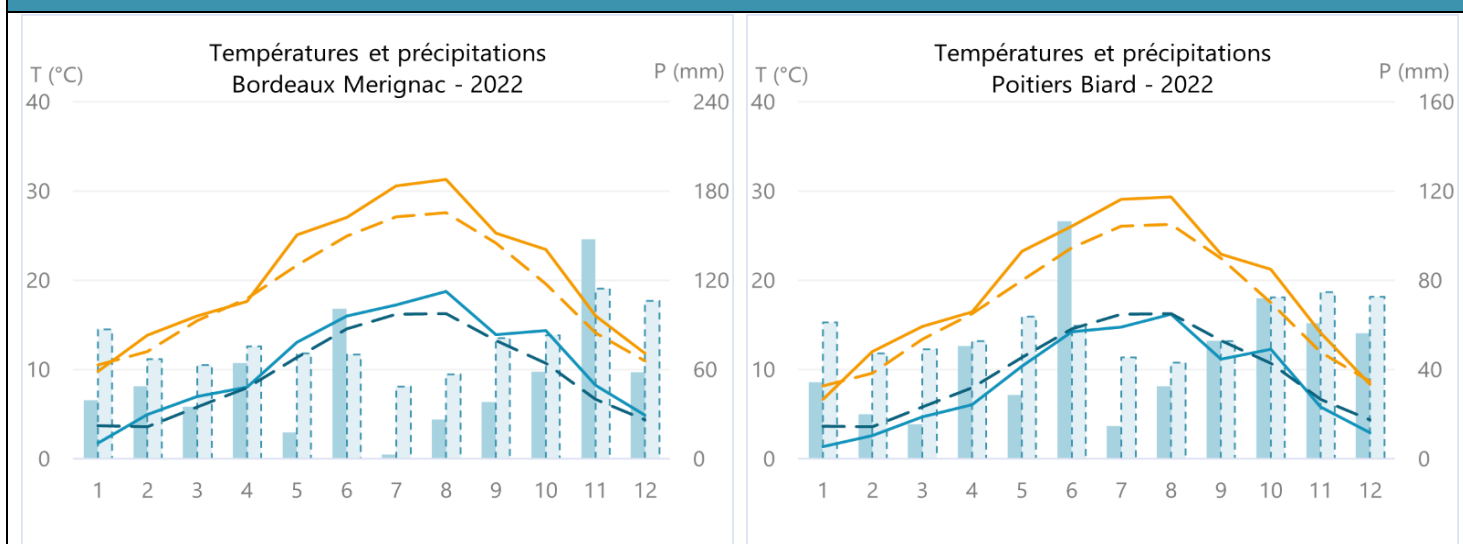
Les températures ont été supérieures à la normale¹⁰ la majeure partie de l'année. Seul le mois de janvier a été inférieur à la normale. Le mois d'avril a été en moyenne proche des valeurs de saison avec une forte chute des températures en début de mois. Les températures ont ainsi été en moyenne 1 à 3 °C au-dessus des normales sur l'ensemble du territoire.

L'année 2022 a été globalement peu arrosée, tout particulièrement en mai et juillet qui ont enregistré un déficit record de précipitations. Juillet 2022, déficitaire de près de 85 % se classe même au second rang des mois les plus secs tous mois confondus depuis 1959. Seuls les mois de juin, septembre et novembre ont connu une pluviométrie excédentaire. Les cumuls de précipitations ont été déficitaires de 10 à 40 % sur la quasi-totalité du pays.

L'année 2022 a été l'année la plus ensoleillée que la France ait connue depuis le début des mesures et de nombreux records annuels sur la période 1991-2022 ont été battus.

Sont présentées ci-dessous les températures minimales et maximales, les précipitations 2022, ainsi que les normales de saison (N-, période 1991-2020) relevées par les stations météorologiques de Bordeaux-Mérignac, Poitiers-Biard, Limoges-Bellegarde et Pau-Uzein. Les minimales correspondent aux moyennes mensuelles des températures minimales journalières, les maximales : aux moyennes mensuelles des températures maximales journalières, et enfin les précipitations : au cumul des précipitations tombées pendant le mois.

Année 2022, Comparaisons aux normales Météo France



⁹ Extrait du Bulletin climatique de l'année 2022, bilan définitif du 12 janvier 2023, Météo France

¹⁰ Référence 1991-2020

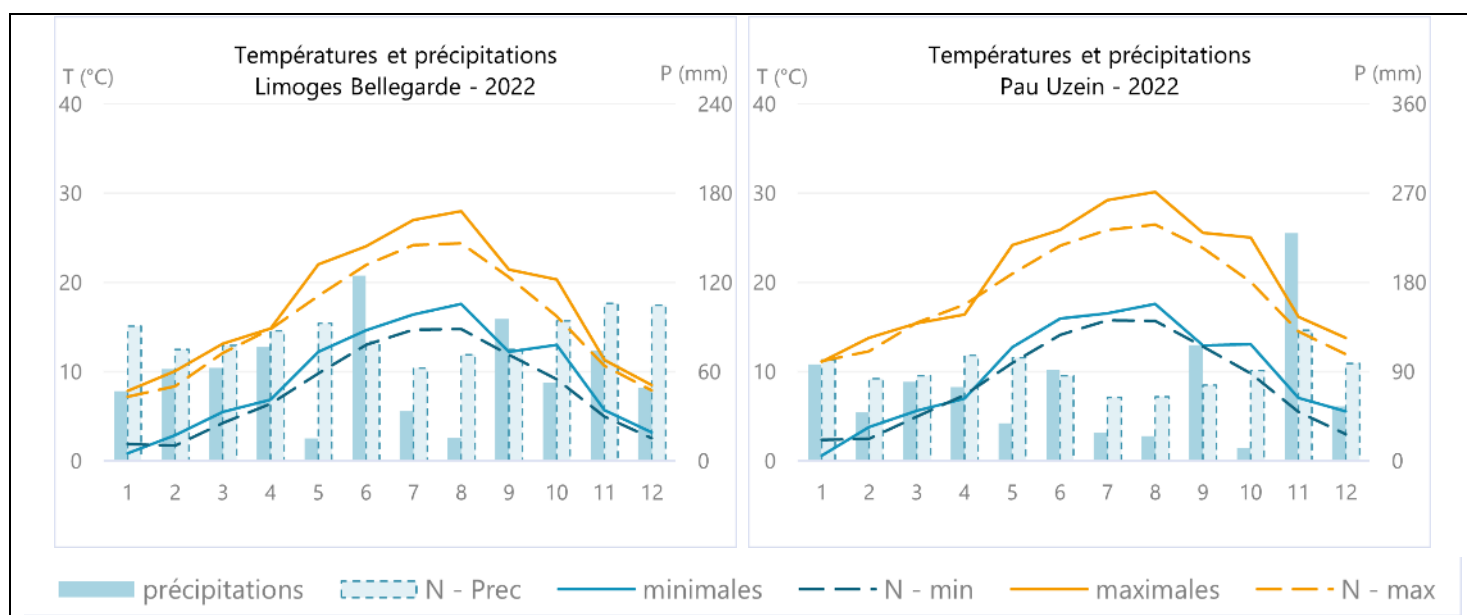


Figure 54 | Année 2022, Comparaison aux normales Météo France

Bilan climatique de l'année 2021¹¹, avec de forts contrastes

L'année 2021, est en moyenne plus conforme à la normale que les années précédentes, a été toutefois très contrastée. Tout au long de l'année, la douceur a alterné avec des périodes de froid assez marqué. Les mois de février, juin et septembre ont été particulièrement chaud. En revanche, en avril, les gelées ont été fréquentes et parfois sévères, le mois de mai a été remarquablement frais.

Les températures ont été très contrastées tout au long de l'année alternant entre pics de fraîcheur et de douceur. Des records de froid ont ainsi été enregistrés mi-janvier et mi-février. La fraîcheur a ensuite dominé durant le printemps avec de fortes gelées tardives en avril et un mois de mai en moyenne plus de 1°C en dessous de la normale. En revanche, des records de douceur ont été battus fin février et fin mars. La France a également connu un épisode de chaleur précoce mi-juin puis une première quinzaine de septembre très chaude.

Les précipitations ont été également très hétérogènes. Après un mois de janvier bien arrosé, les pluies ont été déficitaires jusqu'en avril. A l'inverse, la fin du printemps et le début de l'été ont été bien arrosés. Les pluies ont ensuite été déficitaires jusqu'à la fin de l'automne. Le début de l'hiver 2021-2022 a ensuite été marqué par le retour des précipitations très abondantes.

L'ensoleillement a été proche de la normale sur une grande partie du pays.

Sont présentées ci-dessous les températures minimales et maximales, les précipitations 2021, ainsi que les normales de saison (N-, période 1991-2020) relevées par les stations météorologiques de Bordeaux-Mérignac, Poitiers-Biard, Limoges-Bellegarde et Pau-Uzein. Les minimales correspondent aux moyennes mensuelles des températures minimales journalières, les maximales : aux moyennes mensuelles des températures maximales journalières, et enfin les précipitations : au cumul des précipitations tombées pendant le mois.

¹¹ Extrait du Bulletin climatique de l'année 2021 sur la France métropolitaine, bilan définitif du 20 janvier 2022, Météo France

Année 2021, Comparaisons aux normales Météo France

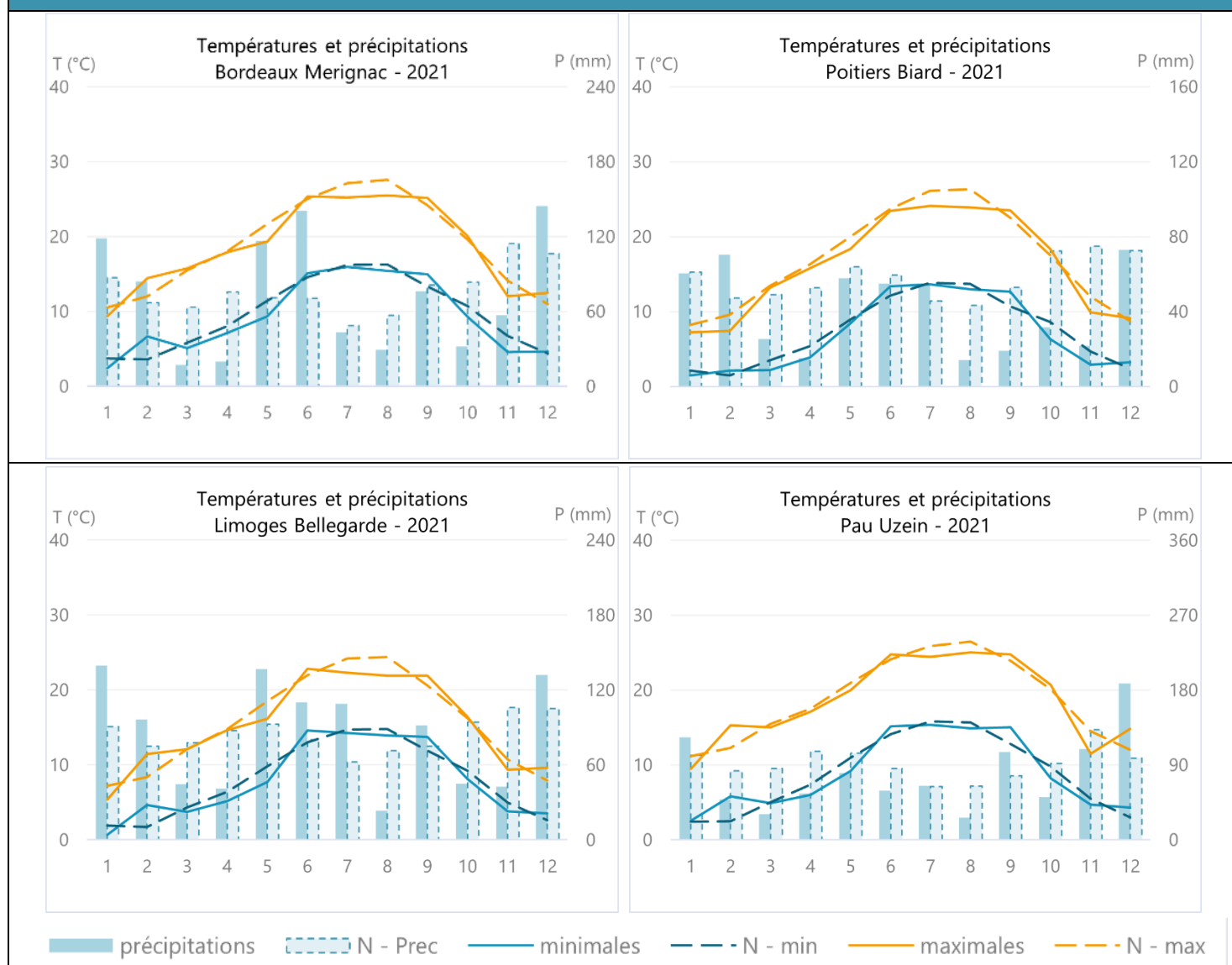


Figure 55 | Année 2021, Comparaison aux normales Météo France

Bilan climatique de l'année 2020¹², au 1er rang des années les plus chaudes en France

Dans la continuité de 2019, l'année 2020 s'est à nouveau caractérisée par la prédominance d'une grande douceur tout au long de l'année. Deux vagues de chaleur se sont produites durant l'été, suivies d'un épisode de chaleur tardif exceptionnel mi-septembre.

Les températures moyennes mensuelles sur la France sont restées supérieures aux normales¹³ excepté en octobre. Le pays a connu plusieurs épisodes caniculaires, notamment lors de deux vagues de chaleur du 30 juillet au 1^{er} août et du 6 au 13 août ainsi que de fortes chaleurs remarquablement tardives en septembre. L'année 2020 s'est ainsi classée au 1^{er} rang des années les plus chaudes sur la période 1900-2020.

La pluviométrie a été géographiquement contrastée, excédentaire du Cotentin et de la Bretagne à la côte basque ainsi que sur l'est des Pyrénées mais souvent déficitaire de 10 à 30 % sur la moitié est du pays. Les précipitations ont été particulièrement déficitaires en juillet et en novembre. En revanche, les mois d'octobre et décembre ont été bien arrosés, particulièrement sur le sud de l'Aquitaine où les pluies ont généré des crues

¹² Extrait du Bulletin climatique de l'année 2020 sur la France métropolitaine, bilan définitif du 14 janvier 2021, Météo France

¹³ Moyenne de référence 1981-2010

et inondations avec des cumuls mensuels records sur la période 1959-2020 sur le département des Landes. En moyenne sur l'année et sur l'ensemble du pays, la pluviométrie a été proche de la normale.

L'ensoleillement, proche de la normale¹⁴ sur le sud du pays, a généralement été excédentaire de plus de 10 % sur une grande moitié nord.

Sont présentées ci-dessous les températures minimales et maximales, les précipitations 2020, ainsi que les normales de saison (N-, période 1991-2020) relevées par les stations météorologiques de Bordeaux-Mérignac, Poitiers-Biard, Limoges-Bellegarde et Pau-Uzein. Les minimales correspondent aux moyennes mensuelles des températures minimales journalières, les maximales : aux moyennes mensuelles des températures maximales journalières, et enfin les précipitations : au cumul des précipitations tombées pendant le mois.

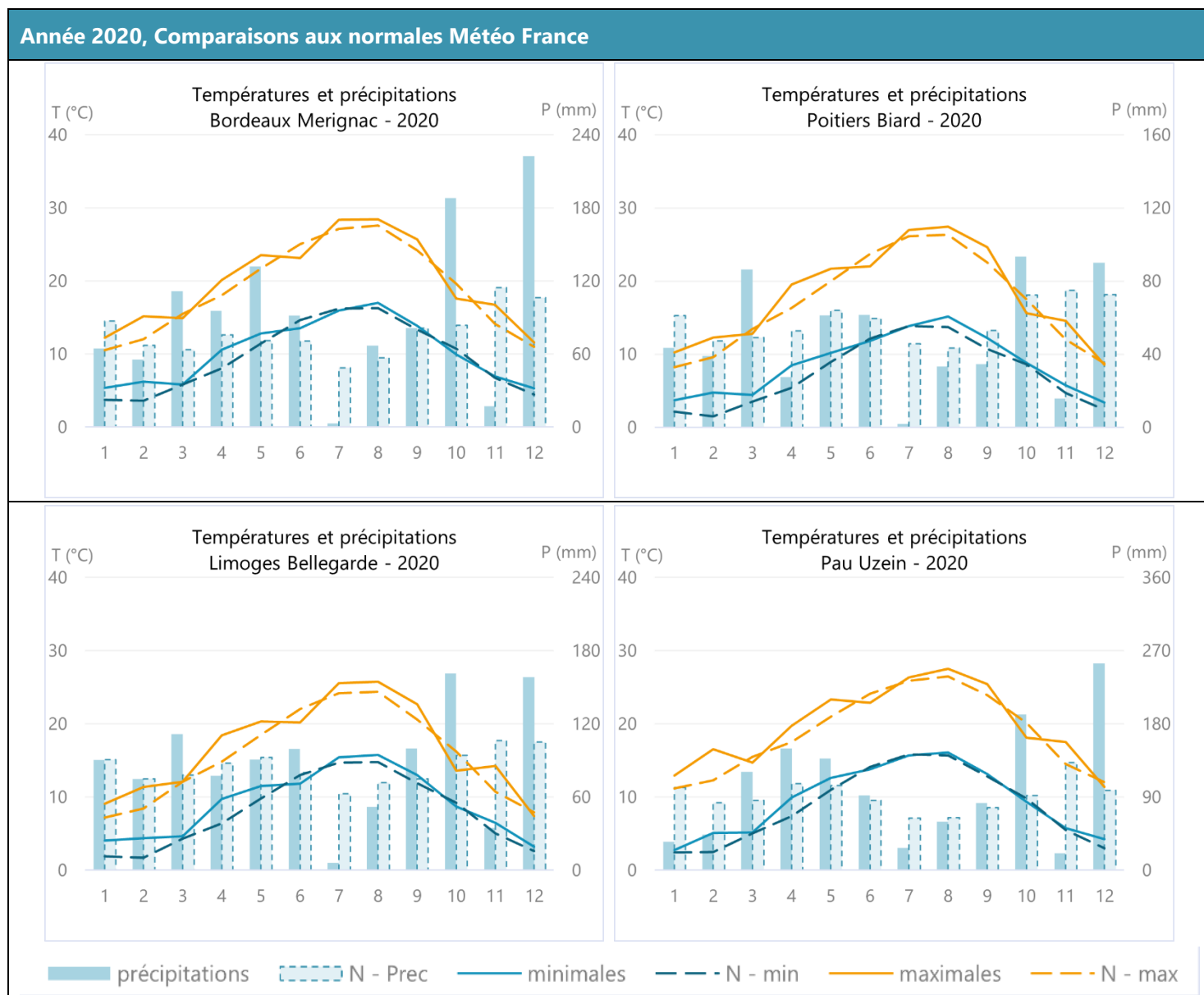


Figure 56 | Année 2020, Comparaison aux normales Météo France

¹⁴ Moyenne de référence 1991-2010

Bilan climatique de l'année 2019¹⁵, au 3ème rang des années les plus chaudes en France

2019 s'est caractérisée par un soleil généreux et la prédominance de la douceur tout au long de l'année avec deux vagues de chaleur d'une intensité exceptionnelle durant l'été. La pluviométrie a été très contrastée. Déficitaire jusqu'à fin septembre, elle a atteint le dernier trimestre un excédent proche de 60 % avec des pluies très abondantes sur le sud du pays.

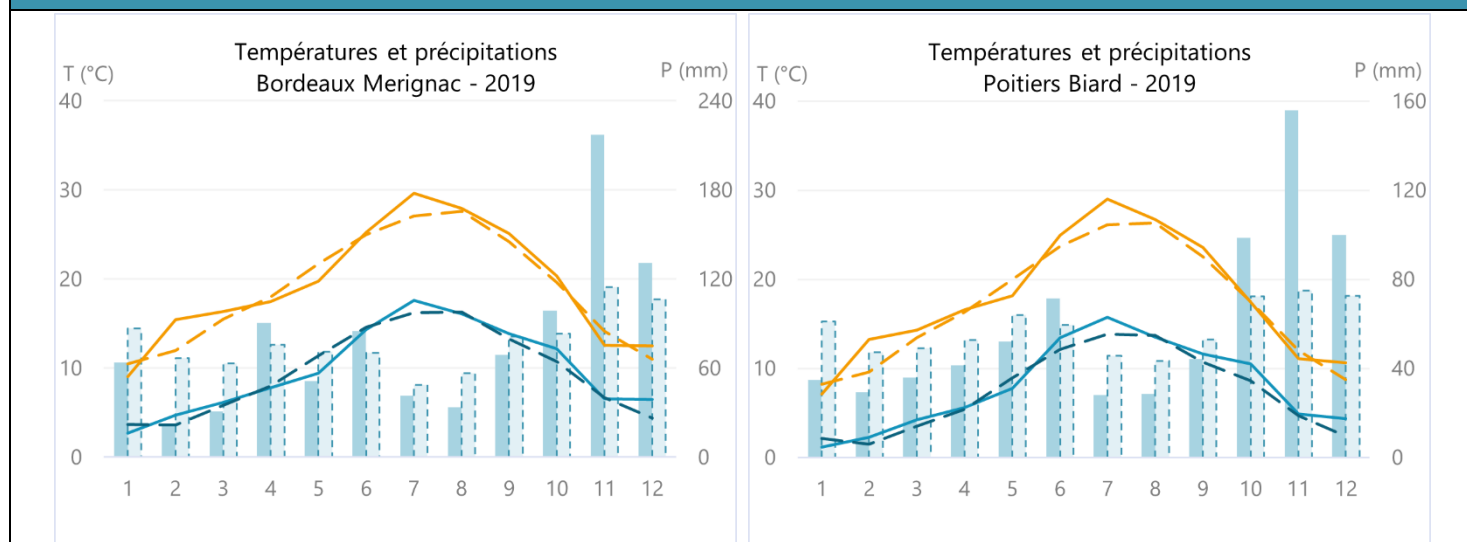
Les températures sont restées en moyenne plus élevées que la normale, excepté en janvier et en mai. Deux épisodes de canicule ont concerné la France du 25 au 30 juin puis du 21 au 26 juillet. De nombreux records absolus ont été battus sur l'ensemble du pays. La température moyenne annuelle de 13,7 °C a dépassé la normale¹⁶ de 1,1 °C, plaçant l'année 2019 au 3ème rang des années les plus chaudes depuis le début du XXe siècle, derrière 2018 et 2014.

La pluviométrie a été proche de la normale en moyenne sur la France et sur l'année mais très contrastée. Suite à un dernier trimestre 2019 très pluvieux, la façade ouest de l'Hexagone a été bien arrosée avec un excédent de 10 à 40 %. De janvier à septembre, les précipitations sont restées déficitaires. Ce déficit pluviométrique associé à des températures estivales très élevées a provoqué un assèchement remarquable des sols superficiels du Grand-Est au Massif central ainsi que sur le pourtour méditerranéen en fin d'été et début d'automne. Les passages perturbés qui se sont succédé d'octobre à décembre avec des précipitations très abondantes ont contribué au retour à la normale de la pluviométrie annuelle.

L'ensoleillement annuel, généralement proche de la normale¹⁷ sur le sud de la France, a été excédentaire de plus de 10 % sur une grande partie de la moitié nord.

Sont présentées ci-dessous les températures minimales et maximales, les précipitations 2019, ainsi que les normales de saison (N-, période 1991-2020) relevées par les stations météorologiques de Bordeaux-Mérignac, Poitiers-Biard, Limoges-Bellegarde et Pau-Uzein. Les minimales correspondent aux moyennes mensuelles des températures minimales journalières, les maximales : aux moyennes mensuelles des températures maximales journalières, et enfin les précipitations : au cumul des précipitations tombées pendant le mois.

Année 2019, Comparaisons aux normales Météo France



¹⁵ Extrait du Bulletin climatique de l'année 2019 sur la France métropolitaine, bilan définitif du 12 janvier 2023, Météo France

¹⁶ Moyenne de référence 1981-2010

¹⁷ Moyenne de référence 1991-2010

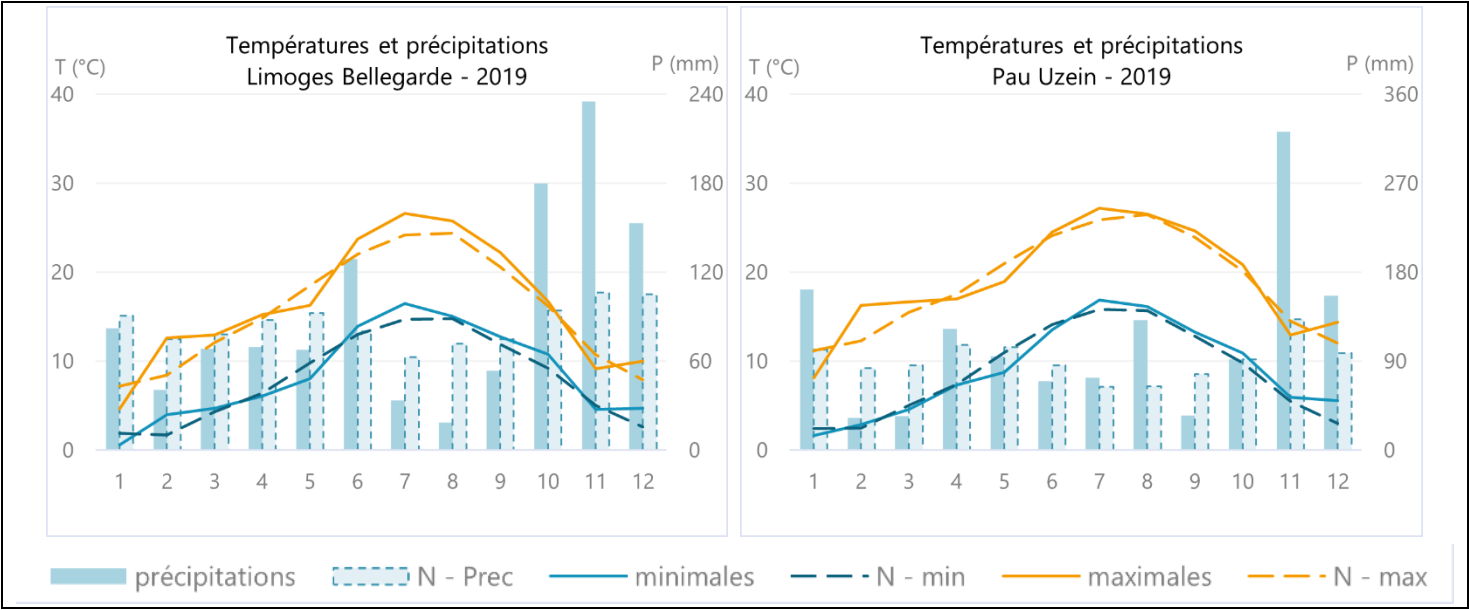
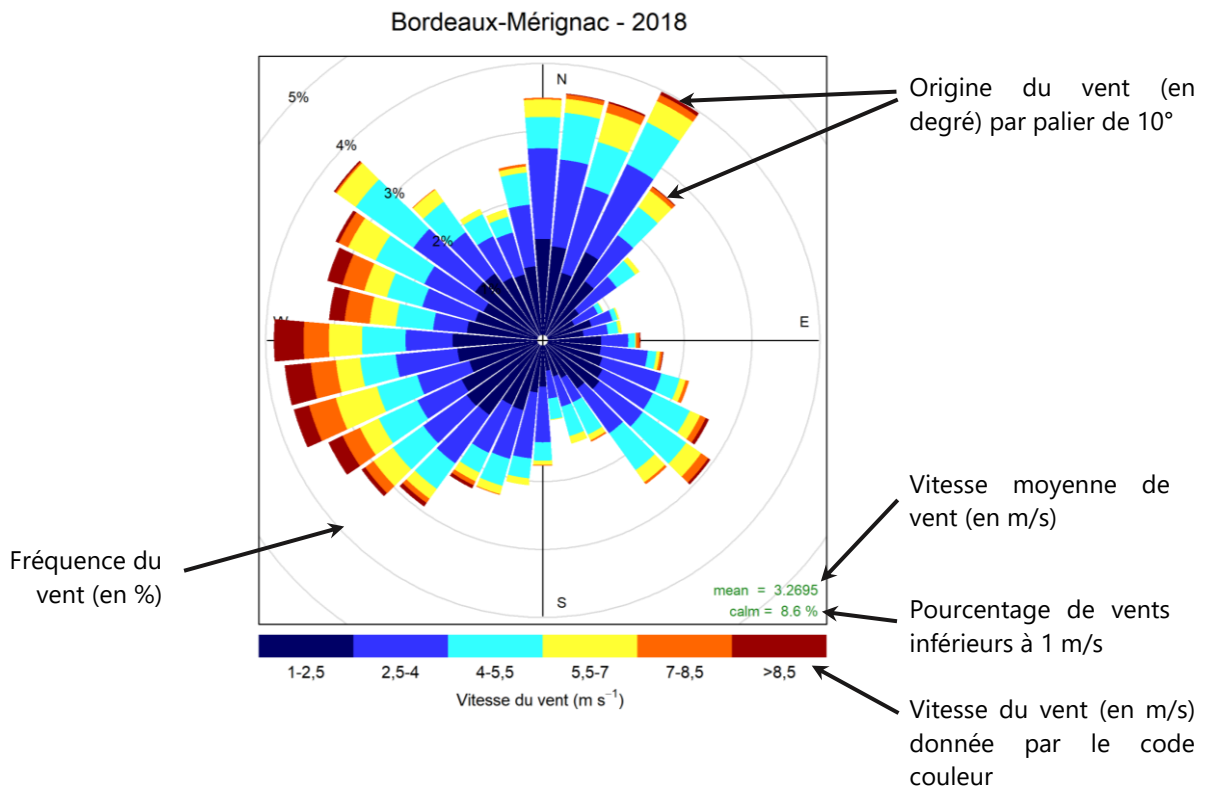


Figure 57 | Année 2019, Comparaison aux normales Météo France

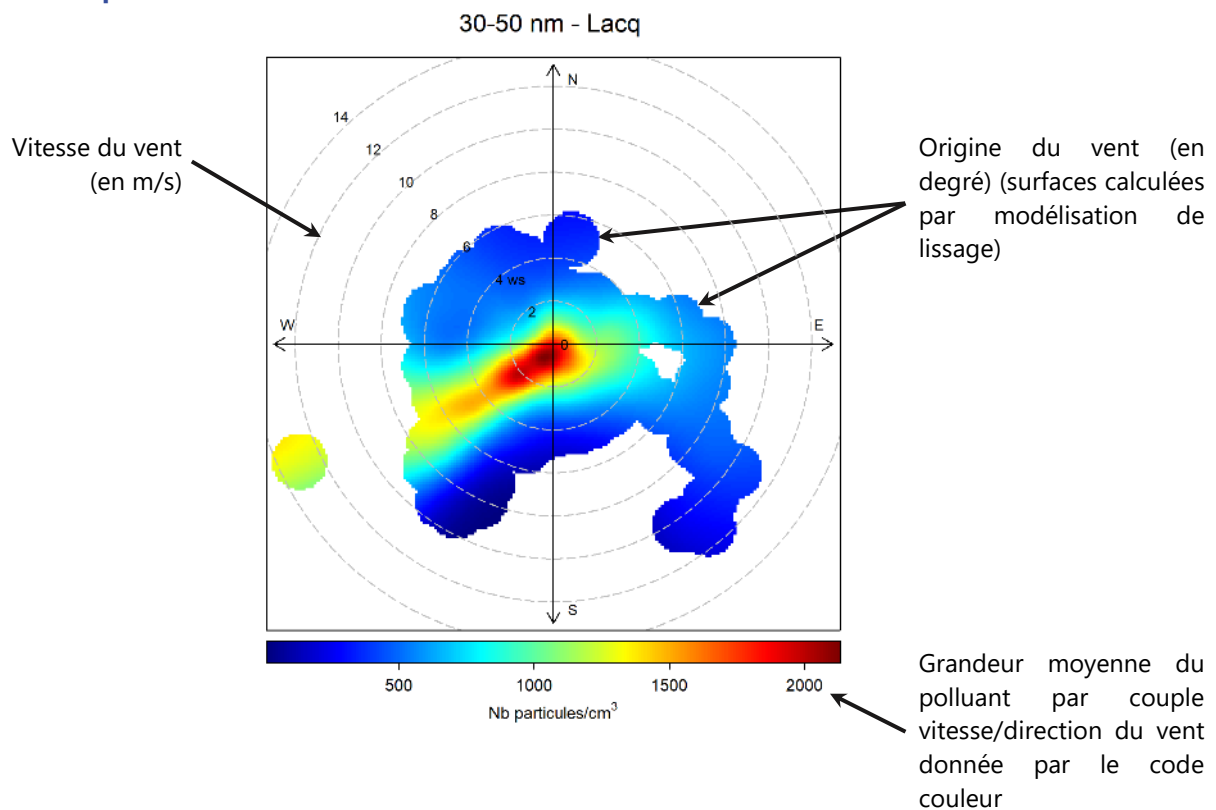
ANNEXE 3 : Lecture des roses des vents et des roses de pollution

Les roses des vents et de pollution sont réalisées grâce au package Openair du logiciel R.

➤ Rose des vents :



➤ Rose de pollution :



ANNEXE 4 : Représentation statistique des données à l'aide de « boxplot »

Le diagramme en boîte, ou « boxplot » en anglais, est la représentation statistique d'une série de données. Cet outil graphique permet la représentation des informations de dispersion de la série de données étudiée : moyenne, médiane, valeurs extrêmes, premiers et troisièmes quartiles. Le plancher de la boîte correspond au 1^{er} quartile, le plafond au 3^{ème} quartile. Ainsi, 50 % des concentrations observées se situent dans l'amplitude entre les plages haute et basse de la boîte, les valeurs minimales (25% des plus faibles) et maximales (25 % des plus élevées) en sont excluent.

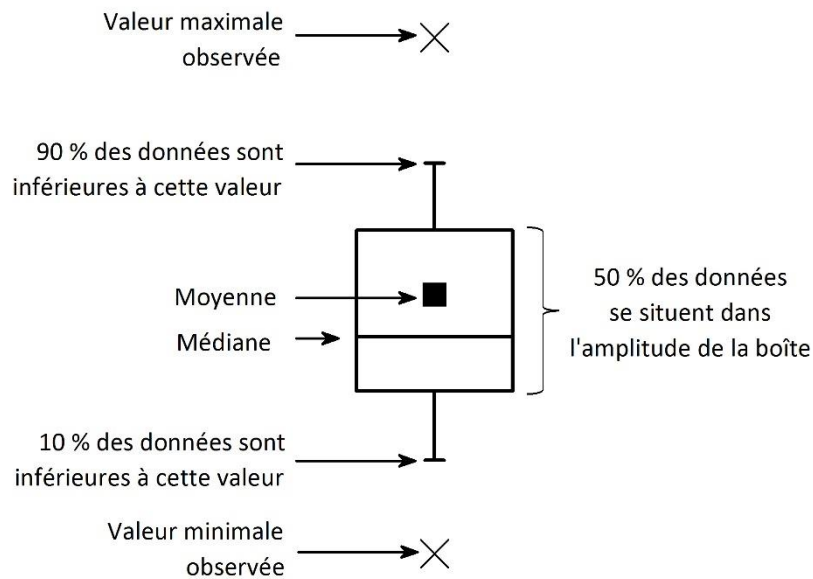


Figure 58 | Diagramme en boîte (Boxplot), Schéma explicatif du diagramme en boîte

RETROUVEZ TOUTES
NOS **PUBLICATIONS** SUR :
www.atmo-nouvelleaquitaine.org

Contacts

contact@atmo-na.org

Tél. : 09 84 200 100

Pôle Bordeaux (siège social) - ZA Chemin Long
13 allée James Watt - 33 692 Mérignac Cedex

Pôle La Rochelle (adresse postale-facturation)
ZI Périgny/La Rochelle - 12 rue Augustin Fresnel
17 180 Périgny

Pôle Limoges
Parc Ester Technopole - 35 rue Soyouz
87 068 Limoges Cedex

