



Rapport Etude

Étude de l'impact du chauffage au bois sur la qualité de l'air (Rennes Métropole)

Campagne de mesure sur le territoire de Rennes Métropole durant l'hiver 2024

Vf du 02/06/2025

Etude réalisée par Air Breizh

À la demande de Rennes Métropole



Avertissements

Les informations contenues dans ce rapport traduisent la mesure d'un ensemble d'éléments à un instant et un lieu donné, caractérisé par des conditions climatiques propres.

Air Breizh ne saurait être tenu pour responsable des événements pouvant résulter de l'interprétation et/ou de l'utilisation des informations faites par un tiers.

Conditions de diffusions

Air Breizh est l'organisme agréé de surveillance de la qualité de l'air dans la région Bretagne, au titre de l'article L221-3 du Code de l'environnement, précisé par l'arrêté du 13 juin 2022 pris par le Ministère de l'Environnement portant renouvellement de l'agrément de l'association.

À ce titre et compte tenu de ses statuts, Air Breizh est garant de la transparence de l'information sur les résultats des mesures et les rapports d'études produits selon les règles suivantes :

Air Breizh réserve un droit d'accès au public à l'ensemble des résultats de mesures et rapports d'études selon plusieurs modalités : document papier, mise en ligne sur son site internet www.airbreizh.asso.fr, résumé dans ses publications, ...

Toute utilisation de ce rapport et/ou de ces données doit faire référence à Air Breizh.

Air Breizh ne peut, en aucune façon, être tenu responsable des interprétations et travaux utilisant ses mesures et ses rapports d'études pour lesquels Air Breizh n'aura pas donné d'accord préalable.

Organisation interne – contrôle qualité

Projet : Étude de l'impact du chauffage au bois sur la qualité de l'air (Rennes Métropole) – Campagne de mesure sur le territoire à l'hiver 2024

Version - date	Modifications	Auteur	Validation
Vf du 02/06/2025	Modification après les relectures de Rennes Métropole	Raphaële FALHUN (Ingénieure d'études)	Olivier CESBRON (Chef de projet) Gaël LEFEUVRE (Directeur)

SOMMAIRE

I.	Contexte.....	8
II.	Présentation de la zone d'étude.....	9
II1.	Station Thabor	9
II2.	Site de l'Ecole Leroux	11
II3.	Site de Cesson	12
III.	Polluants étudiés.....	13
III1.	Les particules	13
a)	Taille des particules	14
b)	Origine et composition des particules.....	14
III2.	Le carbone suie	15
IV.	Moyens mis en oeuvre.....	17
IV1.	Protocole.....	17
a)	Mesure en continu des particules	17
b)	Analyse différée – EC/OC-sucres	17
c)	Mesure en continu du BC - Aéthalomètre (AE33).....	17
IV2.	Dates de la campagne de mesure.....	18
IV3.	Réglementation.....	18
IV4.	Synthèse du protocole	19
V.	Contexte des mesures.....	20
V1.	Contrôle qualité des mesures	20
a)	Mesure automatique.....	20
b)	Prélèvements PM2,5 sur filtres	20
V2.	Conditions météorologiques.....	20
a)	Direction et vitesse de vent.....	20
b)	Pluviométrie et température.....	22
c)	Episode de pollution particulaire	23
VI.	Résultats.....	24
VI1.	Mesure PM10 et PM2,5	24
a)	Analyse statistique.....	24

b)	Evolution des concentrations sur la période étudiée	25
c)	Comparaison avec la station rurale nationale Kergoff	26
VI2.	Résultats des analyses différées PM _{2,5}	28
a)	EC/OC	28
b)	Traceurs organiques	31
VI3.	Mesure du carbone suie en continu	33
a)	Analyse statistique	33
b)	Comparaison BCwb/lévoglucosan	34
c)	Evolution des concentrations horaires pendant la campagne	34
VII.	Part des particules issues du chauffage au bois	37
VII1.	Station Thabor	37
a)	Part journalière des particules fines issues du chauffage au bois	37
b)	Origine des particules fines issues de chauffage au bois (PM _{bio})	38
c)	Evolution de la part horaire des particules fines issues du chauffage au bois	39
VII2.	Site de l'Ecole Leroux	40
a)	Part journalière des particules fines issues du chauffage au bois	40
VII3.	Site de Cesson	41
a)	Part journalière des particules fines issues du chauffage au bois	41
b)	Origine des particules fines issues de chauffage au bois (PM _{bio})	42
c)	Evolution de la part horaire des particules issues du chauffage au bois	42
VIII.	Conclusion	45
IX.	Annexes	49
IX1.	Estimation des concentrations en PM provenant de la combustion de biomasse	49
IX2.	Représentativité des mesures de particules fines - Comparaison 2023 - 2024	50
IX3.	Lecture des roses de pollution	52
IX4.	Contribution du chauffage au bois en France	53
IX5.	Présentation d'Air Breizh	53
a)	Présentation générale	53
b)	Missions	54
c)	Un observatoire régional de la qualité de l'air	54

Liste des figures

Figure 1 : Localisation de la station Thabor à Rennes	10
Figure 2 : Localisation du site de l'Ecole Leroux à Rennes.....	11
Figure 3 : Localisation du site de Cesson	12
Figure 4 : Comparaison des tailles de particules PM10 et PM2,5 (Source U.S EPA)	14
Figure 5 : Aethalomètre à la station Thabor à Rennes	18
Figure 6 : Rose des vents mesurés pendant la campagne (à gauche) et normales mensuelles de rose des vents (Station Météo France Rennes St-Jacques)	21
Figure 7 : Evolution des températures moyennes journalières et des cumuls de précipitation journalière du 18 janvier au 28 février 2024 relevés à la station Météo France Rennes St-Jacques	22
Figure 8 : Evolution des données journalières PM10 et PM2,5 du 19 janvier au 28 février 2024	26
Figure 9 : Evolution du ratio PM2,5/PM10 pendant la campagne	26
Figure 10 : Comparaison entre les évolutions des concentrations horaires PM2,5 à Kergoff et pour les 3 sites de mesure.....	27
Figure 11 : Evolution journalière des concentrations en EC et OC dans les PM2,5 du 19 janvier au 28 février 2024.....	29
Figure 12 : Corrélation OC/EC mesurés sur filtre pour les 3 sites du 19/01 au 28/02/2024.....	30
Figure 13 : Evolution journalière des concentrations en lévoglucosan.....	31
Figure 14 : Corrélation entre lévoglucosan et OC pour les 3 sites pendant la campagne	32
Figure 15 : Corrélation entre BCwb et lévoglucosan pour les 2 sites équipés d'un AE33	34
Figure 16 : Evolutions horaires des concentrations en BCwb et BCff mesurées par AE33 pendant la campagne. Les heures sont exprimées en temps universel (TU).	35
Figure 17 : Profils journaliers moyens en BCwb au niveau des 2 sites équipés d'un AE33	35
Figure 18 : Evolution journalière des PM10, PM2,5 et des PM issues de la combustion de biomasse (en concentration et en proportion) au niveau de la station Thabor	38
Figure 19 : Rose de pollution des PMbio à la station Thabor pendant la campagne	38
Figure 20 : Evolution horaire des concentrations en PM10, PM2,5, PMff et PMbio et des proportions des PM liées aux phénomènes de combustion et à d'autres sources au niveau de la station Thabor pendant la campagne	39
Figure 21 : Evolution journalière des PM10, PM2,5 et des PM issues de la combustion de biomasse (en concentration et en proportion) au niveau du site de l'Ecole Leroux.....	41
Figure 22 : Evolution journalière des PM10, PM2,5 et des PM issues de la combustion de biomasse (en concentration et en proportion) au niveau du site de Cesson.....	42
Figure 23 : Rose de pollution des PMbio au niveau du site de Cesson pendant la campagne	42
Figure 24 : Evolution horaire des concentrations en PM10, PM2,5, PMff et PMbio et des proportions des PM liées aux phénomènes de combustion et à d'autres sources au niveau du site Cesson pendant la campagne	43

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques de la station urbaine de fond Thabor à Rennes.....	10
Tableau 2 : Valeurs de références	19
Tableau 3 : Synthèse du protocole de mesure	19
Tableau 4 : Taux de recouvrement des analyseurs automatiques pendant la campagne (données horaires).....	20
Tableau 5 : Données statistiques des mesures horaires PM pendant la période étudiée (18/01/2024 – 28/02/2024)	24
Tableau 6 : Résultats des analyses différée EC/OC dans les PM _{2,5}	28
Tableau 7 : Résultats des analyses de lévoglucosan.....	31
Tableau 8 : Résultats des analyses en mannosan.....	32
Tableau 9 : ratio lévoglucosan/mannosan.....	32
Tableau 10 : Résultats des mesures par AE33 et des estimations des PM liées à la biomasse pendant la campagne.....	33
Tableau 11 : Part des PM issues de la combustion biomasse au niveau de la station Thabor du 19 janvier au 28 février 2024.....	37
Tableau 12 : Part des PM issues de la combustion biomasse au niveau du site de l'Ecole Leroux du 19 janvier au 28 février 2024	40
Tableau 13 : Part des PM issues de la combustion biomasse au niveau du site de Cesson du 19 janvier au 28 février 2024	41

Glossaire

AE33	Aetholomètre multilongueur d'onde : appareil de mesure de carbone suie
AASQA	Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air
BC	Carbone suie ou « Black Carbon »
BCff	Carbone suie issu de la combustion d'hydrocarbures, « fuel fossile »
BCwb	Carbone suie issu de la combustion de biomasse, « wood burning »
CARA	Programme de la caractérisation chimique des particules
COV	Composés organiques Volatils
DJU	Degré Jour Unifié
EC	Carbone élémentaire
GES	Gaz à effet de serre
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
Heure TU	L'heure est exprimée en Temps Universel (TU)
LCSQA	Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air
MERA	Observatoire national de Mesure et d'Évaluation en zone Rurale de la pollution Atmosphérique à longue distance
NH ₃	Ammoniac

nm	nanomètre
NOx	Oxydes d'azote
OC	Carbone organique
OM	Matière organique
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PM1	Particules fines ayant un diamètre aérodynamique inférieur à 1 µm
PM2,5	Particules fines ayant un diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm (PM1 comprises dans les PM2,5)
PM10	Particules fines ayant un diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm (PM2,5 comprises dans les PM10)
PMbio	Particules fines issues de la combustion de biomasse (estimation à partir de la mesure du BC)
PMbiofiltres	Particules fines issues de la combustion de biomasse (estimation à partir des analyses différées EC/OC)
PPA	Plan de Protection de l'Atmosphère
PUF	Particules ultrafines
µm	micromètre

I. CONTEXTE

La qualité de l'air est un enjeu majeur pour la santé et l'environnement. Sur le territoire de Rennes Métropole, le 3^{ème} PPA couvrant la période 2022-2027 a été approuvé par le Préfet d'Ille-et-Vilaine en décembre 2022. Dans le cadre de la stratégie qualité de l'air de Rennes Métropole, la **question du chauffage au bois est centrale** (action 20 du PPA). En effet, la combustion de bois est le principal émetteur de particules du secteur résidentiel sur le territoire de Rennes Métropole (93% des émissions de PM_{2,5} du secteur¹). Ainsi une étude spécifique sur le chauffage au bois, comprenant différents axes de travail et conduite par plusieurs acteurs, a été lancée par Rennes Métropole en 2023. Elle sera partagée aux élus, avec une liste d'actions possibles, qui serviront de base pour la définition d'une politique à venir.

Air Breizh a été sollicité afin d'apporter son expertise dans le domaine de la modélisation des émissions du chauffage résidentiel (chauffage au bois individuel et chaufferie biomasse) et de la mesure dans l'air ambiant des traceurs de la combustion de biomasse.

Ce **rapport porte sur la campagne de mesure**, menée durant l'hiver 2023-2024, qui a pour objectif :

- l'étude de l'évolution spatio-temporelle des polluants émis par la combustion de biomasse,
- l'estimation de la part des émissions issues de la combustion de biomasse au sein des particules fines en période de chauffage.

Il n'existe pas de méthodologie permettant de mesurer directement les concentrations de particules provenant de la combustion de biomasse. Cependant la présence de ces particules peut être identifiée par **l'analyse chimique de marqueurs organiques spécifiques** tel que le lévoglucosan. Il est aussi possible d'estimer les concentrations en particules issues des phénomènes de combustion à partir des **mesures en continu du carbone suie**.

Les résultats présents dans ce rapport portent sur les mesures en continu des particules fines (PM₁₀ et PM_{2,5}) et du carbone suie, ainsi que sur les analyses chimiques des filtres prélevés du 18 janvier au 29 février 2024 au niveau de 3 sites de mesure. Les proportions des particules fines issues de la combustion de biomasse dans les concentrations de particules fines mesurées pour les différents sites sont estimées.

¹ Source : inventaire des émissions d'Air Breizh (ISEA v5.1)

II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Dans le cadre de cette campagne, **3 sites** sont considérés au niveau du **territoire de Rennes Métropole**. En plus de la station urbaine de fond, Thabor, située dans le centre de Rennes, 2 autres sites implantés dans des quartiers résidentiels ont été retenus en raison d'une densité de chauffage au bois importante. Le choix des 2 quartiers a été déterminé par Rennes Métropole à la suite d'enquêtes et de porte-à-porte concernant les types d'équipements de chauffage au bois et leur niveau d'utilisation. Puis les emplacements des moyens mobiles (camion laboratoire) ont été déterminés par Air Breizh à la suite de visites terrain tenant compte des différentes contraintes techniques.

II.1. Station Thabor

La station urbaine de fond Thabor a été mise en service fin 2022. Elle est située à proximité du centre-ville de Rennes, place Saint-Melaine, à côté du parc du Thabor, d'un parking et d'une école.

Cette station remplace les sites de Pays-Bas et de Saint-Yves, fermés courant 2022. Elle regroupe les analyseurs qui étaient dans ces 2 stations urbaines de fond.

La cabine est équipée d'un analyseur de particules PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, d'oxydes d'azote, d'ozone et de préleveurs pour le suivi des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), des métaux lourds (Tableau 1) et pour les pesticides.

Cette station est une station de référence « particules » de la région Bretagne et fait partie du programme national CARA². Elle est ainsi équipée d'un aéthalomètre AE33 pour la mesure en continu du carbone suie, un analyseur pour la mesure des particules ultrafines (PUF) et d'un ACSM (Aerosol Chemical Speciation Monitor) pour la mesure de la composition chimique des particules submicroniques non-réfractaires (PM₁-NR).

² Dispositif [CARA](http://www.caraparticules.org) (Caractérisation chimique des particules), géré par le LCSQA visant à améliorer les connaissances sur l'origine et la nature des particules



Figure 1 : Localisation de la station Thabor à Rennes

Tableau 1 : Caractéristiques de la station urbaine de fond Thabor à Rennes

Typologie de la station	Station urbaine de fond
Code station	FR19039
Latitude	48°6'54.76'
Longitude	-1°40'23.12''
Altitude	54 m
Polluants mesurés	
Réglementés	PM10, PM2.5, NOx, NO, NO ₂ , O ₃ , HAP, métaux lourds
Non réglementés	PM1, Carbone suie, PM1-NR, pesticides, PUF

II2. Site de l'Ecole Leroux

Le **site de l'Ecole Leroux** est situé au sein de l'école du même nom. De nombreux habitats individuels environnent le site avec le quartier 'Village des Castors' au sud mais également des maisons individuelles à l'est et au nord. Les maisons du Village des Castors, au sud de Rennes sont principalement équipées de poêles à bois ou à granulés (enquête et porte-à-porte mené par Rennes Métropole).



Figure 2 : Localisation du site de l'Ecole Leroux à Rennes

II3. Site de Cesson

A Cesson-Sévigné le site retenu se situe devant la résidence Beausoleil rue de la Barrière à proximité du quartier Bellevue (rue du Courtil/Avenue de la Grande Fontenelle). Dans ce quartier, la proportion de cheminées ouvertes est élevée (enquête et porte-à-porte de Rennes Métropole). De plus, la vue aérienne du Site de Cesson (Figure 3) permet de se rendre compte du grand nombre de maisons individuelles qui entourent ce site de mesure.



Figure 3 : Localisation du site de Cesson

Dans ce rapport les mesures réalisées au niveau des 3 sites ci-dessus sont comparées aux mesures réalisées au niveau de la station rurale nationale, Kergoff, située en centre Bretagne dans la commune de Merléac (22). Cette station fait partie du dispositif MERA³ pour lequel des prélèvements de particules fines PM_{2,5} sont réalisés tous les 6 jours afin de permettre l'analyse de la spéciation chimique et notamment l'analyse EC/OC.

³ Observatoire national de Mesure et d'Evaluation en zone Rurale de la pollution Atmosphérique à longue distance

III. POLLUANTS ETUDIES

La **combustion de bois** est considérée comme une énergie limitant la production de Gaz à Effet de Serre (GES). En effet, en prenant en considération les émissions en CO₂, la quantité libérée lors de la combustion de biomasse correspond à celle absorbée par les végétaux lors de leur croissance (à l'inverse des combustibles fossiles qui n'absorbent pas de CO₂). Bien qu'ayant un bilan carbone considéré comme faible, cette source d'énergie a cependant un impact négatif sur la qualité de l'air. De fait, d'autres **polluants sont émis lors de la combustion du bois** tels que les oxydes d'azote, les oxydes de soufre, le monoxyde de carbone, les particules, les hydrocarbures aromatiques polycycliques... La production de ces composés provient de la combustion incomplète du bois, dépendante de la qualité du bois (humidité notamment), de la composition du combustible, et du bon réglage des installations⁴.

Plusieurs études ont déjà été menées sur l'impact des phénomènes de combustion en France⁵ mais aussi à Rennes à partir des données de la station urbaine de fond⁶. L'influence du chauffage au bois sur la qualité de l'air a été mise en avant par le LCSQA notamment dans le cadre du programme CARA (2015)⁷.

Sur la base de ces éléments, **les composés suivants ont été retenus** dans le cadre de cette campagne :

- Mesure en continu des concentrations massiques des particules fines PM₁₀ et PM_{2,5} dans l'air ambiant,
- Analyse de la composition chimique (EC/OC) des particules fines PM_{2,5} et dosage du lévoglucosan au sein de la matière organique,
- Mesure en continu du carbone suie (BC) par AE33 ; dispositif de mesure permettant d'évaluer la contribution de deux sources de combustion (biomasse et hydrocarbures).

III.1. Les particules

Les particules atmosphériques sont un mélange de composés solides et/ou liquides, en suspension dans un milieu gazeux. Ces polluants particuliers sont parfois désignés sous le nom d'aérosols. Elles sont constituées d'une très grande variété de **composés organiques et inorganiques**. Les particules en suspension sont désignées par l'abréviation PM pour « Particulate Matter ».

⁴ Evaluation de l'impact de la combustion biomasse sur la qualité de l'air campagne 2013-2014 (Air Pays de la Loire – août 2014)

⁵ Impact du chauffage au bois sur les concentrations en particules à la Rochelle, Atmo Nouvelle Aquitaine, 2019

⁶ Bilan de la mesure du carbone suie à la station Pays-Bas de 2019 à 2022 à Rennes, Air Breizh, 2023

⁷ Impact de la combustion biomasse sur les concentrations de PM₁₀ dans 10 agglomérations du programme CARA au cours de l'hiver 2014/2015, LCSQA, 2015

a) Taille des particules

Les particules fines sont classées en fonction de leur diamètre aérodynamique, c'est notamment par la taille que sont définis les seuils réglementaires (Tableau 2). L'ensemble des particules dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres (μm) sont appelées PM10. De la même manière, les PM2,5 et PM1 désignent respectivement les particules dont le diamètre est inférieur à 2,5 μm et 1 μm . La Figure 4 illustre les PM en les comparant avec le diamètre d'un cheveu (50-70 μm) en parallèle d'un grain de sable (90 μm).

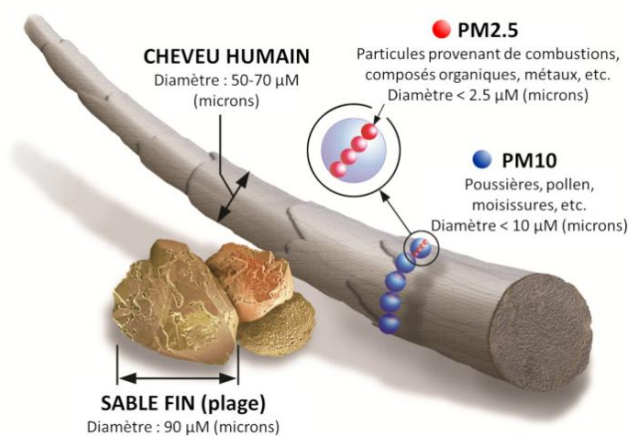


Figure 4 : Comparaison des tailles de particules PM10 et PM2,5 (Source U.S EPA)

Dans cette étude, la **mesure en continu des concentrations massiques en PM10 et PM2,5 permet l'analyse de l'évolution spatio-temporelle des niveaux de particules en fonction des conditions météorologiques.**

b) Origine et composition des particules

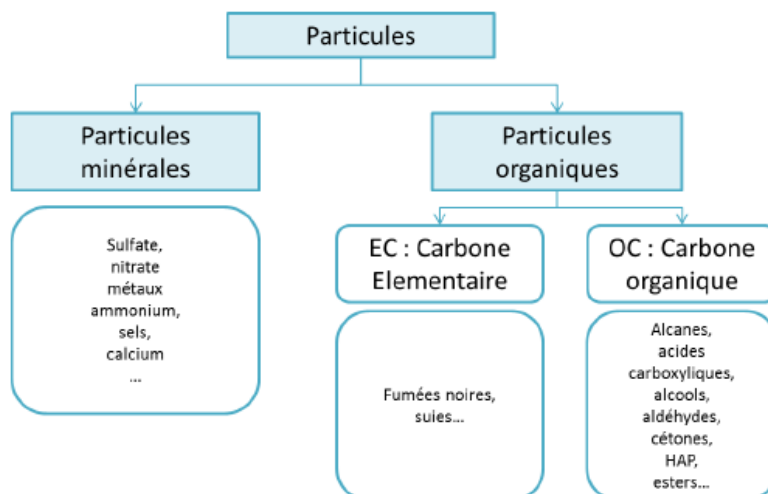
Les particules peuvent aussi bien être d'origine **naturelle** que d'origine **anthropique**. Les particules naturelles proviennent des éruptions volcaniques, du transport par le vent de poussières minérales, des embruns marins, ou encore de la végétation. Les sources anthropiques sont la combustion d'hydrocarbures, de biomasse, l'agriculture, l'industrie.

Il faut distinguer deux catégories de particules selon leur processus de formation :

- les **particules primaires** émises directement dans l'atmosphère par différents mécanismes : par action mécanique du vent sur le sable, le sol ou la roche, par des processus de combustion tels que les feux de forêts, les incinérateurs, par des processus biologiques conduisant à l'émission de pollens, par des activités industrielles ou encore par usure de matériaux tels que les pneus, les freins, le revêtement des routes.
- les **particules secondaires** formées dans l'atmosphère par des réactions physico-chimiques à partir de précurseurs gazeux tels que le dioxyde soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x), l'ammoniac (NH_3), les composés organiques volatils (COV).

La composition des particules varie fortement en fonction de la source d'émission mais également selon les processus physico-chimiques auxquels les particules sont soumises au cours du transport.

Elles sont composées d'un mélange de deux fractions : la **fraction organique avec les particules organiques** et la **fraction inorganique associée aux particules minérales**.



La combustion de bois étant le sujet de cette étude, la fraction inorganique des particules (sulfate, nitrate, sels marins, métaux...) ne sera pas considérée par la suite. Les particules issues de la combustion de bois se trouvent dans la fraction carbonée (matière organique, carbone élémentaire). C'est pourquoi, l'analyse de la composition chimique (EC/OC) des PM_{2,5} est réalisée ainsi que le dosage du lévoglucosan au sein de la matière organique.

Les particules organiques sont constituées de :

- **matière organique** (OM), constituée de carbone (carbone organique) et de nombreux hétéroatomes (H, O, N...). C'est une matrice complexe regroupant une multitude de composés appartenant aux grandes familles de la chimie organique (alcanes, acides carboxyliques, alcools, cétones, esters, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), dioxines...). Elle est à la fois d'origine primaire (anthropique : combustion dont le trafic routier, ou naturelle : pollens, débris végétaux, bactéries...) et secondaire (condensation et nucléation de COV).
- **carbone suie** ou carbone élémentaire (EC) produit par la combustion (cf. III2).

III2. Le carbone suie

Le **carbone suie** (ou **black carbon** noté **BC**) est produit par la **combustion incomplète de combustibles d'origine fossile et de la biomasse**. Les principales sources sont les moteurs à combustion (diesel et autres carburants fossiles), la combustion résidentielle de bois et de charbon, l'utilisation de fioul lourd ou du charbon, le brûlage de déchets agricoles/végétaux, ainsi que les feux de forêt. Il est formé de trop peu d'hétéroatomes (O, H, N..) pour être considéré comme organique. Il est constitué de carbone (C) et caractérisé par une grande capacité d'absorption du rayonnement lumineux.

Le **BC** est majoritairement présent dans les particules fines **PM2,5** et se trouve particulièrement dans les **PM1**. Plus les particules sont fines, plus elles pénètrent profondément dans les voies respiratoires. Du fait de sa petite taille, le **BC** pénètre dans l'appareil respiratoire en profondeur et favorise les risques cardio-vasculaires. Au-delà de ses propriétés physiques qui lui permettent de pénétrer profondément dans les poumons, l'impact sanitaire du **BC** est aussi en lien avec les propriétés chimiques des fractions organiques et métalliques. En effet, il peut être vecteur de produits chimiques à toxicité variable pour le corps humain (métaux lourds, HAP (Hydrocarbure aromatique polycyclique) ...). Les effets de salissures sur les bâtiments sont les impacts sur l'environnement les plus évidents visuellement. Le dépôt de carbone suie sur des surfaces enneigées ou glacées réduit le pouvoir réfléchissant (albédo) et accentue leur fonte. Sa propriété à absorber le rayonnement solaire en fait le seul aérosol caractérisé par un forçage radiatif positif. Autrement dit, sa présence dans l'atmosphère participe au réchauffement climatique.

Dans la littérature scientifique, il est également **appelé Black Carbon (BC) ou Elemental Carbon (EC)** mais ces deux dénominations recouvrent la même classe de composés chimiques. Ils se distinguent par la méthode de mesure utilisée : mesure optique pour le premier et mesure thermique pour le deuxième.

Dans cette étude les 2 termes seront utilisés puisque la mesure en continu du BC (mesure optique) a été menée au niveau de 2 sites et l'analyse différée en laboratoire EC/OC dans les PM2,5 a été réalisée pour les 3 sites.

IV. MOYENS MIS EN OEUVRE

IV1. Protocole

a) Mesure en continu des particules

Des analyseurs de mesure en continu des particules fines (PM₁₀ et PM_{2,5}) permettent de suivre l'évolution temporelle des concentrations massiques sur un pas de temps horaire. Dans le cadre de cette étude ce sont des analyseurs optiques (FIDAS200) qui ont été utilisés et qui font partie de la liste des appareils recommandés par le LCSQA pour la surveillance réglementaire. La limite de détection de ce modèle est 1 µg/m³ dans une gamme de mesure de 0 à 10000 µg/m³.

b) Analyse différée – EC/OC-sucre

Des prélèvements journaliers sur filtre quartz ont été effectués quotidiennement par échantillonneur haut-débit (30 m³/h) de type DA80 sur la fraction PM_{2,5}.

Il s'agit de la méthode recommandée par le LCSQA pour la caractérisation chimique des particules (également utilisée dans le cadre du programme de caractérisation chimique des particules CARA⁸). Les filtres exposés sont ensuite analysés en laboratoire (Air Paris et LSCE) pour déterminer :

- Les aérosols carbonés : carbone élémentaire (EC) et carbone organique (OC – concentration d'atomes de carbone contenus au sein de la matière organique), par méthode thermo-optique en appliquant la méthode européenne EUSAAR2
- Le lévoglucosan et autres sucres par chromatographie en phase liquide.

c) Mesure en continu du BC - Aéthalomètre (AE33)

L'aéthalomètre multi-longueurs d'onde (de type AE 33) (Figure 5) mesure la concentration en BC en effectuant une mesure de la lumière absorbée par les particules prélevées en continu sur une bande filtrante. La mesure est réalisée dans la fraction PM_{2,5}.

L'AE33 permet de distinguer deux principales sources de BC par mesure optique grâce à l'utilisation des caractéristiques d'absorption de ces sources : la **combustion de biomasse** (wb) et la **combustion d'hydrocarbures** (ff). La combustion de biomasse, en plus du carbone suie, émet principalement de la matière organique dont une partie, appelée « Brown Carbon » est capable d'absorber le rayonnement lumineux dans le proche ultraviolet (autour de 400 nm).

⁸ <https://www.lcsqa.org/fr/le-dispositif-cara>

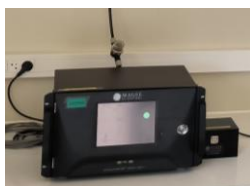


Figure 5 : Aethalomètre à la station Thabor à Rennes

La concentration en carbone suie est donnée par l'expression suivante :

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

Où **BC** : Concentration en carbone suie totale

BC_{wb} : Concentration en carbone suie issu de la combustion de biomasse, « wood burning » (chauffage au bois, brûlage de déchets vert et feux de forêt)

BC_{ff} : Concentration en carbone suie issu de la combustion d'hydrocarbures, « fuel fossile » (essentiellement issu du transport routier)

Ensuite, il est possible **d'estimer les concentrations de PM₁₀ attribuables à ces deux familles de sources** à partir des concentrations en BC⁹. Dans cette étude, les facteurs de conversions utilisés pour la fraction biomasse, sont ceux calculés à partir de la corrélation aux mesures différées EC/OC.

Les estimations des concentrations en particules PM₁₀ issues de la combustion de biomasse (PM_{bio}) effectuées à partir des mesures obtenues par l'AE33 sont présentées en annexe (IX1).

IV2. Dates de la campagne de mesure

En raison de l'objectif de la campagne, la période hivernale a été retenue afin de maximiser la part des particules issues de la combustion de biomasse.

La période de janvier/février a été choisie en lien avec la disponibilité du matériel et l'utilisation maximale du chauffage pendant les 2 derniers hivers (analyse des DJU (Degré Jour Unifié) transmis par Rennes Métropole 2021-2022 et 2022-2023).

La campagne a été réalisée durant **6 semaines du 18 janvier au 29 février 2024**. Cette durée est jugée suffisante pour dresser un état de la qualité de l'air représentatif de la période hivernale.

IV3. Réglementation

Les valeurs de référence sont issues du code de l'environnement (article R221-1), des lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air (révisées en 2021) et de la nouvelle directive sur la qualité de l'air révisant la directive 2008/50/CE. Elles sont présentées dans le Tableau 2 ci-dessous.

Les mesures PM durant cette campagne seront comparées aux seuils journaliers information/recommandation pris en compte au niveau de la Préfecture d'Ille-et-Vilaine c'est-à-dire,

⁹ Guide méthodologique pour la mesure du « Black Carbon » par Aethalomètre multi-longueur d'onde AE33 dans l'air ambiant, LCSQA, version 2020

50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière pour les PM10 et 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière pour les PM2,5.

Tableau 2 : Valeurs de références

Polluant	Valeur limite		Objectif qualité	Recommandation OMS (2021)		Nouvelle directive européenne (seuils visés en 2030)	
	Moy journalière	Moy annuelle	Moy annuelle	Moy journalière	Moy annuelle	Moy journalière	Moy annuelle
PM10	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM2,5	-	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

IV4. Synthèse du protocole

Les sites de mesure ainsi que les paramètres suivis pendant la campagne sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 : Synthèse du protocole de mesure

Mesures du 18/01/2024 au 29/02/2024			Mesure en continu par analyseur automatique		Prélèvement sur filtre PM2,5 puis analyse en laboratoire
Site de mesure	Adresse	Coordonnées	PM10, PM2,5	BC	EC/OC/lévoglucosan
Station Thabor	Place St-Melaine Rennes	Latitude : 48,11521 Longitude : -1,67309	X	X	X
Site Ecole Leroux	Ecole Oscar Leroux Bd Gaëtan Hervé Rennes	Latitude : 48,09091 Longitude : -1,67078	X	-	X
Site Cesson	Face à la résidence Beausoleil Rue de la Barrière Cesson-Sévigné	Latitude : 48,12042 Longitude : -1,61030	X	X	X

V. CONTEXTE DES MESURES

V1. Contrôle qualité des mesures

a) Mesure automatique

Afin de garantir une bonne représentativité des mesures sur l'année et assurer leur comparaison aux valeurs repères annuelles, la réglementation française a fixé des durées de mesure minimales sur l'année appelées « Taux de couverture » et exprimées en pourcentage de l'année. Pour les polluants réglementés (PM10, PM2,5, O₃, NO₂) la référence est fixée à 85%. Dans la cadre de l'étude de la composition chimique des particules, il n'existe pas de seuil réglementaire à respecter.

Tableau 4 : Taux de recouvrement des analyseurs automatiques pendant la campagne (données horaires)

Analyseur	Station Thabor	Site de l'Ecole Leroux	Site de Cesson
Fidas	100%	99%	98%
AE33	90%	-	96%

Les taux de recouvrement des appareils sont tous supérieurs à 90% ce qui est satisfaisant pour l'exploitation des données de mesure en continu.

b) Prélèvements PM2,5 sur filtres

Au total, ce sont 123 prélèvements journaliers qui ont été réalisés. Les 41 filtres exposés par site ont été envoyés aux laboratoires pour analyse EC/OC et sucres.

Après analyse, seuls 3 prélèvements ont été invalidés du fait de résultats incohérents (soit 97% d'échantillons valides et exploités).

V2. Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques, en particulier les vents, jouent un rôle important dans la dispersion ou l'accumulation des polluants.

Les données météorologiques présentées dans le chapitre suivant et dans l'ensemble du rapport, sont tirées des mesures de la station Météo France de Rennes St-Jacques (code Météo France 35281001) située à moins de 10 kilomètres de la station Thabor à Rennes.

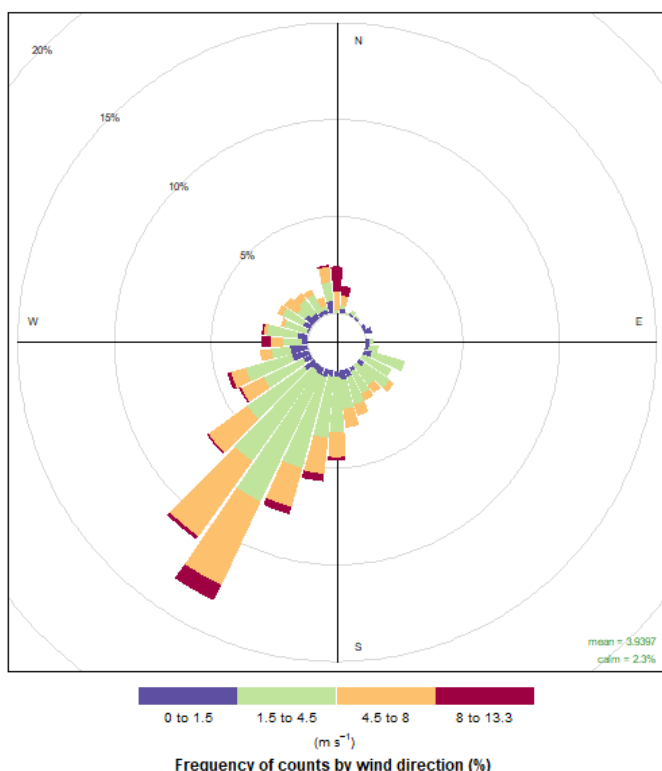
a) Direction et vitesse de vent

Les conditions de direction et vitesse du vent pendant une période sont souvent représentées par des roses des vents (Figure 6). Celle-ci permet de visualiser sur une période donnée :

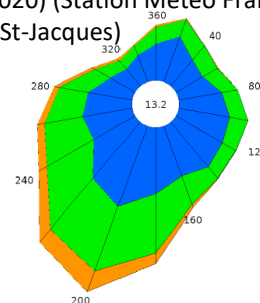
- le pourcentage de vent pour chaque direction, ainsi plus la pâle est de grande taille plus les vents venant de cette direction ont été nombreux pendant la période,
- les vitesses des vents venant de chaque direction et leur occurrence : la couleur de chaque pâle indique la classe de vitesse et sa grandeur, le pourcentage de vent avec cette vitesse.

Pendant la période de l'étude, les conditions de vent à la station Rennes Saint-Jacques sont comparées aux normales (1991-2020) de janvier et février. La rose des vents du 18 janvier au 28 février 2024 présente des vents dominants de secteur Sud-Ouest et majoritairement compris entre 1,5 m/s et 8 m/s. Ces conditions sont cohérentes avec les normales des mois de janvier et février. Pendant la durée de la campagne, le secteur de Nord-Est a été peu porteur de vent par rapport aux normales mensuelles.

Rose des vents mesurés 18 janvier – 28 février 2024
(Station Météo France Rennes St-Jacques)



Normale de rose des vents de **janvier**
(1991-2020) (Station Météo France
Rennes St-Jacques)



Normale de rose des vents de **février**
(1991-2020) (Station Météo France
Rennes St-Jacques)

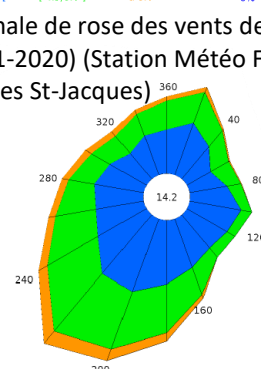


Figure 6 : Rose des vents mesurés pendant la campagne (à gauche) et normales mensuelles de rose des vents (Station Météo France Rennes St-Jacques)

b) Pluviométrie et température

La **température** est un paramètre influent sur les teneurs en polluants atmosphériques. Un écart thermique important entre la nuit et le jour, associé à des températures froides, favorise les phénomènes d'inversion thermique qui contribuent à l'accumulation des polluants (phénomène rencontré couramment au printemps). De plus les températures ont un impact sur certaines activités émettrices ; l'utilisation du chauffage résidentiel par exemple est dépendant des températures. Quant aux **précipitations**, elles sont favorables à un lessivage de l'atmosphère, permettant une diminution des concentrations en polluants.

Les température moyennes journalières ainsi que les cumuls de précipitation journalière relevés pendant la campagne à la station Météo France Rennes St-Jacques sont présentés dans la Figure 7. Les premiers jours de la campagne (du 18 au 20 janvier) présentent des conditions sèches et des températures moyennes journalières basses ($< 2^{\circ}\text{C}$). Sur l'ensemble de la campagne, les températures moyennes journalières sont majoritairement supérieures aux moyennes normales mensuelles (respectivement de $6,2^{\circ}\text{C}$ et $6,6^{\circ}\text{C}$ pour janvier et février) ; seuls 5 jours sont en dessous des normales mensuelles. Le cumul de précipitation de février 2024 est supérieur au cumul normal de février.

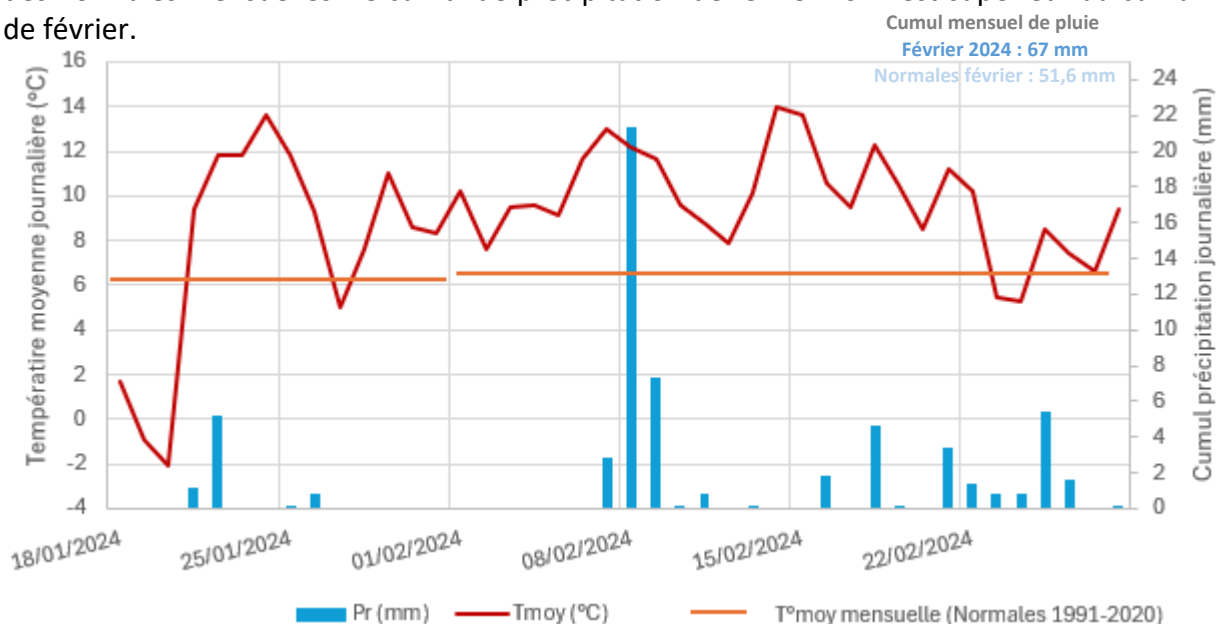


Figure 7 : Evolution des températures moyennes journalières et des cumuls de précipitation journalière du 18 janvier au 28 février 2024 relevés à la station Météo France Rennes St-Jacques

L'analyse des conditions météorologiques pendant la campagne de mesure révèle un hiver peu rigoureux, avec des températures moyennes journalières plus élevées que la normale mensuelle. Le mois de février a été plus pluvieux comparé aux normales 1991-2020. Quant aux vents, ils sont dominés par un large secteur Sud-Ouest en cohérence avec la normale, et une distinction porte sur la fréquence des vents de Nord-Est qui est plus faible. Les premiers jours de la campagne (18 au 20 janvier 2024) avec des températures bien inférieures à la normale de janvier vont permettre d'approcher les contributions du chauffage au bois dans des conditions hivernales.

c) Episode de pollution particulaire

En Ille-et-Vilaine, du 18 janvier au 28 février 2024, un **épisode de pollution particulaire aux PM_{2,5}** a eu lieu, les **19 et 20 janvier**, avec dépassement du seuil journalier d'information/recommandation (IR) pour les PM_{2,5}, fixé à 25 µg/m³. Le département d'Ille-et-Vilaine est le seul département breton (et français) à avoir un arrêté préfectoral déclenchant une procédure d'information-recommandation pour un épisode de pollution atmosphérique par PM_{2,5}.

Concernant les PM₁₀, un dépassement du seuil d'information/recommandation, fixé à 50µg/m³, a été dépassé le 19 janvier 2024, au niveau de la station trafic Rennes Laënnec.

Cet épisode de pollution particulaire (PM_{2,5} et PM₁₀) est lié à une faible dispersion des particules fines en l'absence de vent combinée à des températures basses.

La partie VI.1.b) va permettre de comparer les seuils IR par rapport aux mesures PM₁₀ et PM_{2,5} réalisées sur les sites de Cesson et de l'Ecole Leroux dans le cadre de cette campagne.

VI. RESULTATS

Dans cette partie, les résultats des mesures en continu et des analyses différées en laboratoires réalisées pendant la campagne sont comparées entre les sites. Pour commencer, les **mesures en continu des particules fines** (PM10 et PM2,5) sont analysées et les concentrations en PM2,5 pour chacun des sites sont comparées à celle obtenues à la station rurale nationale Kergoff pendant la même période. Puis, les résultats des analyses en laboratoire (EC/OC et sucres) dans les PM2,5 sont présentées. Enfin, les mesures en continu de carbone suie (BC) ainsi que de la fraction issue de la combustion de biomasse (BCwb) sont comparées entre les 2 sites équipés d'un aethalomètre AE33 (station Tabor et site de Cesson).

VI1. Mesure PM10 et PM2,5

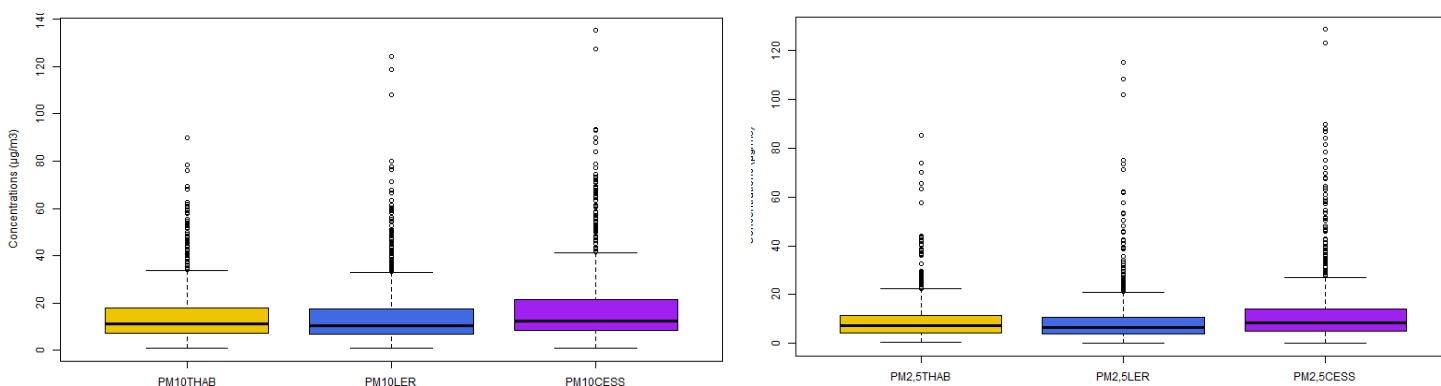
a) Analyse statistique

Le Tableau 5 présente les résultats statistiques des mesures des particules fines pendant l'étude. Pendant la campagne, les moyennes horaires en particules sont plus élevées au niveau du site de Cesson. La moyenne en PM10 du site de Cesson est supérieure à celle de la station Tabor et du site de l'Ecole Leroux, respectivement de 19% et 23%. Pour les PM2,5, ces écarts sont plus forts avec 28% et 31%. Les moyennes mesurées à la station Tabor et au site de l'Ecole Leroux sont quant à elles similaires (écart absolu inférieur à 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Les niveaux maximums horaires PM10 et PM2,5 mesurés au niveau des sites de l'Ecole Leroux et de Cesson, en proximité des quartiers résidentiels, sont supérieurs aux maximums horaires enregistrés à la station urbaine Tabor. La comparaison des médianes entre les 3 points de mesure met en avant un niveau de fond en particules fines PM10 et PM2,5 plus bas au niveau du site de l'Ecole Leroux. Le site de Cesson, en plus de présenter les concentrations horaires maximales les plus élevées, atteint les niveaux de fond les plus forts en PM10 et PM2,5. Les concentrations horaires maximales PM10 et PM2,5 sont toutes mesurées dans la nuit du 19 au 20 janvier 2024.

Tableau 5 : Données statistiques des mesures horaires PM pendant la période étudiée (18/01/2024 – 28/02/2024)

Concentrations en PM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10			PM2,5		
	Station Tabor	Site de l'Ecole Leroux	Site de Cesson	Station Tabor	Site de l'Ecole Leroux	Site de Cesson
1er quartile	7,3	6,9	8,3	4,4	4,0	5,0
Médiane	11,5	10,6	12,3	7,2	6,7	8,3
3ème quartile	18,0	17,4	21,5	11,6	10,9	14,0
Max horaire (date du max)	89,9 (20/01/2024)	124,2 (19/01/2024)	135,3 (19/01/2024)	85,1 (20/01/2024)	114,9 (19/01/2024)	128,5 (19/01/2024)
Moyenne horaire	14,7	14,2	17,5	9,5	9,3	12,2



Afin d'analyser la représentativité des mesures pendant ces 6 semaines de campagne, les résultats obtenus sont comparés en annexe (IX2) aux résultats des mesures PM10 et PM2,5 à la station Thabor pendant la même période en 2023 (pas d'historique de mesure plus important pour cette station urbaine de fond mise en service en décembre 2022). La comparaison des concentrations en particules fines entre 2023 et 2024 est également réalisée au niveau de la station rurale nationale Kergoff. Ainsi, il est constaté que les niveaux moyens obtenus en 2024 pour les 2 stations sont inférieurs à ceux mesurés en 2023. Cependant, à l'échelle horaire et journalière les concentrations maximales atteintes en PM10 et PM2,5 sont représentatives de celles mesurées dans le passé. En effet, lors des quelques journées froides en début de campagne, le maximale horaire en PM2,5, au niveau de la station Thabor, a été plus élevée que celle enregistrée en 2023 sur la même période.

b) Evolution des concentrations sur la période étudiée

L'évolution des concentrations journalières en PM10 et PM2,5, mesurés au niveau de la station Thabor, du site de l'Ecole Leroux et du site de Cesson est présentée dans la Figure 8.

Les variations des concentrations journalières en particules fines suivent les mêmes tendances au fil de la campagne. Cependant, ponctuellement, les concentrations journalières en PM10 et PM2,5 sont supérieures pour le site de Cesson par rapport aux deux autres qui sont très proches (par exemple les jours du 12 et du 16 février). Les maximums journaliers en PM10 et PM2,5 sont mesurés simultanément pour les 3 sites de mesure le 19 janvier 2024. Durant cette journée, le seuil journalier information/recommandation (IR) caractérisant le premier niveau des épisodes de pollution aux particules fines PM10, fixé à 50 µg/m³, a été dépassé au niveau des sites de Cesson (61 µg/m³) et de l'Ecole Leroux (52 µg/m³). Concernant le seuil information/recommandation fixé à 25 µg/m³ pour les PM2,5, il a été dépassé 2 jours consécutifs, les 19 et 20 janvier au niveau des 3 sites de mesure. Le traitement des données d'analyse différée des PM2,5 et de mesure de carbone suie va permettre de déterminer la proportion du chauffage au bois dans les niveaux mesurés.

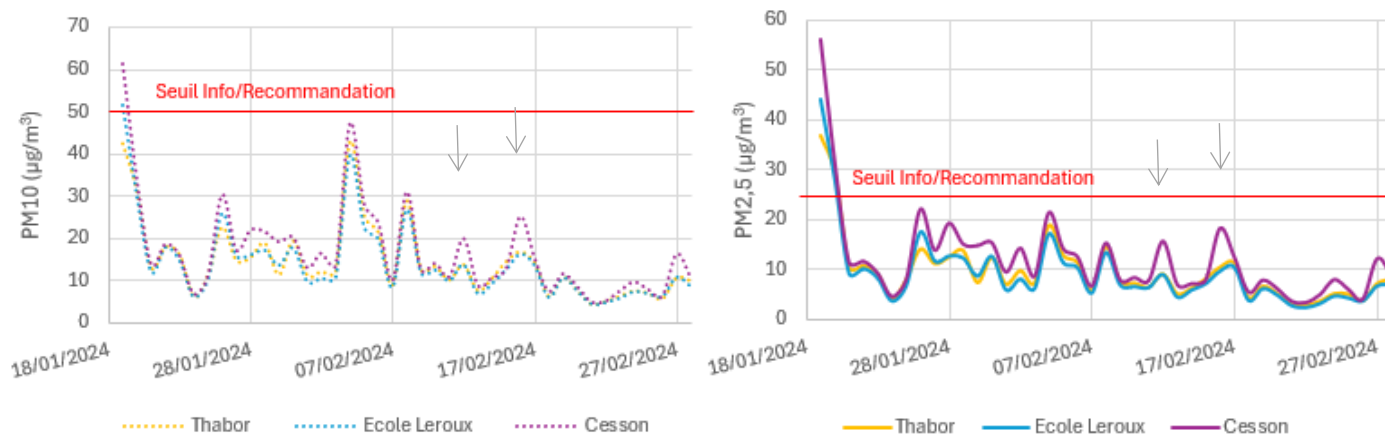


Figure 8 : Evolution des données journalières PM10 et PM2,5 du 19 janvier au 28 février 2024

La comparaison du ratio $PM_{2,5}/PM_{10}$ est présentée dans la Figure 9. Plus le ratio est élevé, plus les PM_{10} sont constituées de $PM_{2,5}$ et à l'inverse plus le ratio est faible plus la fraction dite « grossière » (particules ayant un diamètre compris en 2,5 et 10 μm – $PM_{2,5-10}$) est importante. La variation journalière des ratios $PM_{2,5}/PM_{10}$ est marquée pendant la campagne avec un ratio élevé pour les 3 sites pendant les 2 premiers jours de la campagne (18-19 janvier) en lien avec les températures faibles. Ponctuellement, le ratio $PM_{2,5}/PM_{10}$ au niveau du site de Cesson présente, certains jours, des augmentations plus marquées que pour les 2 points de mesure situés à Rennes (station Thabor et site de l'Ecole Leroux). Cela indique une part plus importante des $PM_{2,5}$ dans les PM_{10} au site de Cesson.

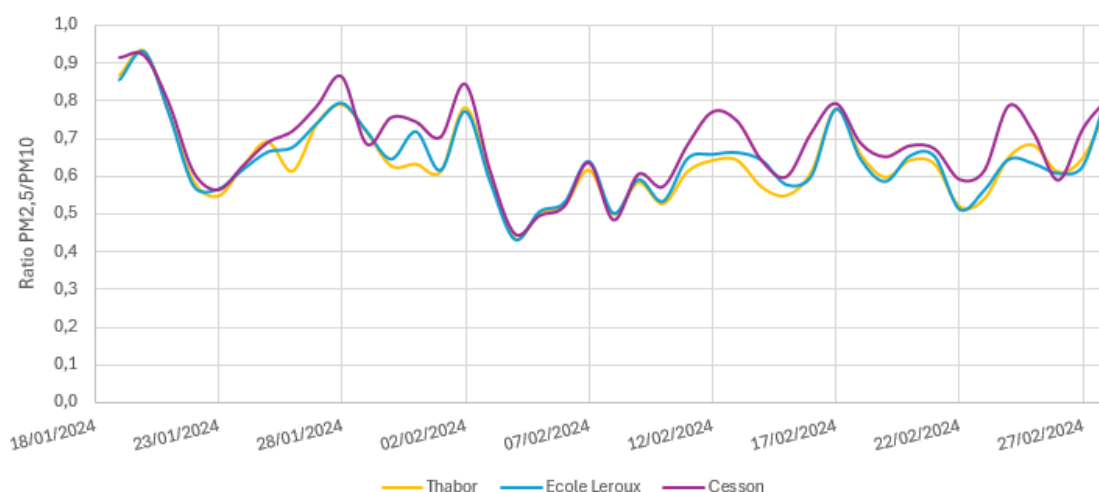


Figure 9 : Evolution du ratio $PM_{2,5}/PM_{10}$ pendant la campagne

c) Comparaison avec la station rurale nationale Kergoff

En annexe (IX2), les données $PM_{2,5}$ et PM_{10} mesurées pendant la campagne au niveau de la station Thabor sont comparées aux mesures réalisées au niveau de la station rurale Kergoff pendant la même

période. En 2024, les médianes PM10 et PM2,5 enregistrées à la station Thabor sont respectivement de +83% et +85% par rapport à celles de la station Kergoff. Ce constat est cohérent puisque la station rurale nationale a pour objectif de mesurer la pollution atmosphérique de fond, non influencée localement par des sources d'émissions anthropiques.

La comparaison du suivi horaire des concentrations en PM2,5 entre la station rurale nationale Kergoff (Figure 10) et les 3 sites de la campagne permet de mettre en avant la cohérence régionale de l'évolution des mesures pendant la campagne. En effet, lorsque les niveaux augmentent à Kergoff, la même évolution est constatée sur les différents sites. Cependant, certaines augmentations sur les 3 sites de mesures ne sont pas constatées à Kergoff ce qui révèle l'influence des activités urbaines de proximité (trafic, chauffage résidentiel...) dans les concentrations mesurées au niveau des sites de mesure de la campagne. Des augmentations ponctuelles plus fortes sont notamment constatées sur le site de Cesson comme le 28/01, le 30/01, le 12/02 ou encore 16/02 par exemple. Cela traduit une influence locale plus importante pour ce site.

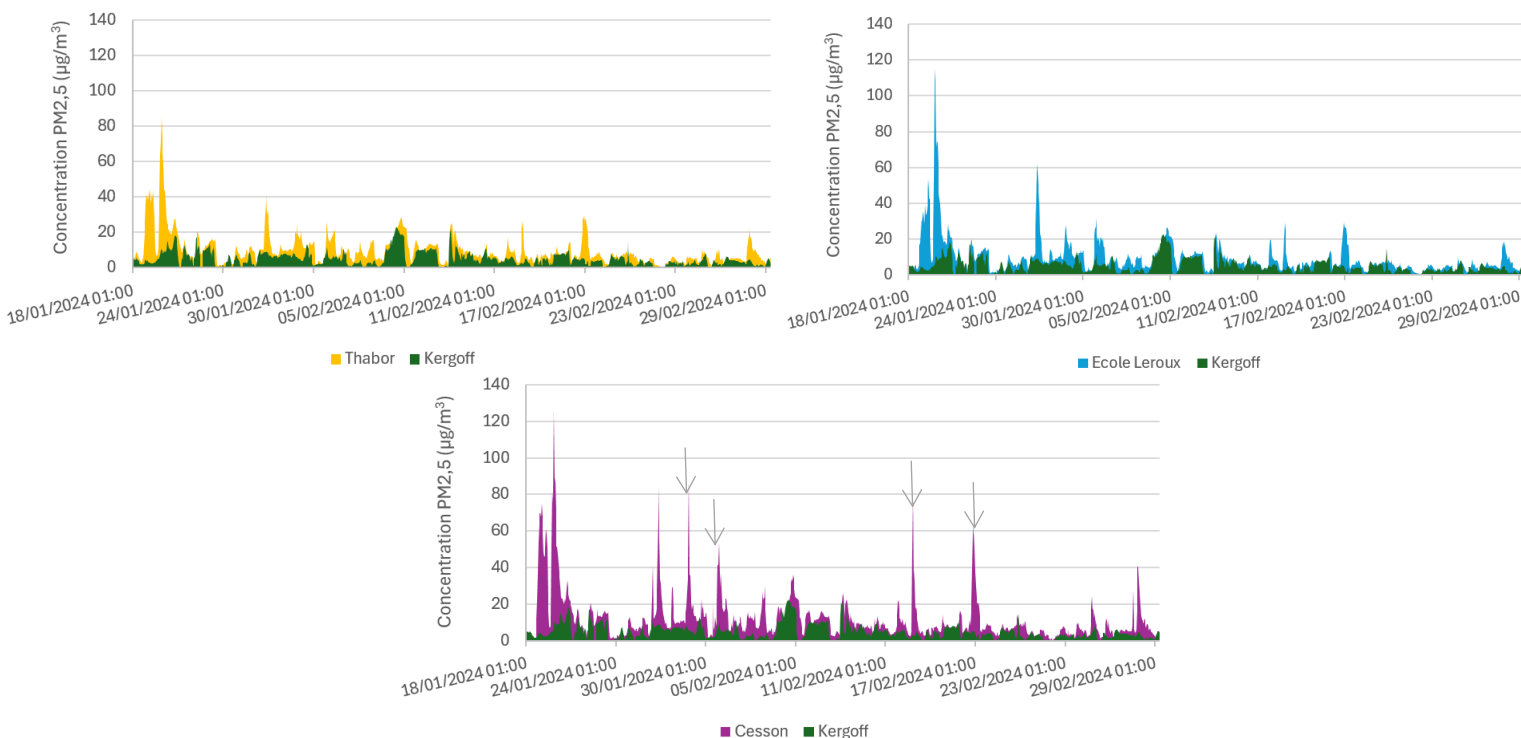


Figure 10 : Comparaison entre les évolutions des concentrations horaires PM2,5 à Kergoff et pour les 3 sites de mesure

Les plus forts niveaux (maximum, médiane et moyenne) en PM10 et PM2,5 pendant la campagne sont mesurés au site de Cesson. Le niveau de fond en particules fines (PM10 et PM2,5) le plus faible (médiane la plus basse) est observé au site de l'Ecole Leroux à Rennes. Durant la campagne, 2 jours sont concernés par un dépassement du seuil IR pour les PM2,5 au niveau des 3 sites de mesure. La comparaison des niveaux PM2,5 mesurés pendant la campagne avec la station rurale nationale de fond met en avant l'influence des activités locales sur les concentrations horaires en PM2,5. A noter que les conditions météorologiques sont peu représentatives de conditions hivernales normales (températures plus douces et pluviométrie plus forte). Cela impacte directement les niveaux mesurés en particules fines (PM10 et PM2,5) pendant la campagne. Ainsi les

concentrations en particules fines (PM₁₀ et PM_{2,5}) considérées pendant ces 6 semaines de 2024 sont plus faibles que celles mesurées sur la même période en 2023. L'impact de ces conditions météorologiques différentes des normales sur la contribution du chauffage au bois dans les émissions de particules fines (PM₁₀ et PM_{2,5}) est donc également probable.

VI2. Résultats des analyses différées PM_{2,5}

a) EC/OC

Les **résultats des analyses différées EC/OC dans les PM_{2,5}** pendant la campagne du 19 janvier au 28 février 2024 sont présentés dans le Tableau 6.

Les **concentrations moyennes en carbone élémentaire (EC)** pendant la campagne vont de 0,4 à 0,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec une concentration plus forte au niveau du site de l'Ecole Leroux. Les concentrations maximales journalières sont obtenues lors de la journée du 19 janvier concernée par les niveaux les plus élevés en PM_{2,5}. La concentration maximale journalière la plus forte est mesurée au niveau du site de l'Ecole de Leroux à Rennes.

Les **concentrations en carbone organique (OC)** sont plus fortes pour le site de Cesson en moyenne (+35% par rapport au 2 autres sites) et en maximum journalier. Les moyennes en OC sont proches entre la station Thabor et le site de l'Ecole Leroux. Cependant, le niveau maximal journalier est plus fort pour le site de l'Ecole Leroux.

Tableau 6 : Résultats des analyses différée EC/OC dans les PM_{2,5}

Concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC			OC		
	Moyenne	Max journalier (date du max)	Médiane	Moyenne	Max journalier (date du max)	Médiane
Station Thabor	0,4	2,4 (19/01/2024)	0,3	2,3	14,9 (19/01/2024)	1,6
Site de l'Ecole Leroux	0,6	4,1 (19/01/2024)	0,4	2,4	18,6 (19/01/2024)	1,4
Site de Cesson	0,5	2,9 (19/01/2024)	0,3	3,1	21,2 (19/01/2024)	2,1

A titre d'information, la moyenne des résultats EC/OC dans les PM_{2,5} au niveau de la station rurale nationale, Kergoff, des 7 prélèvements sur des jours communs (du 19/01 au 28/02/2024) est de 0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour EC et 0,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour OC. Les concentrations plus fortes en EC/OC pour les sites urbains confirment l'influence des sources locales de combustion en lien avec les activités anthropiques dont le trafic routier et le chauffage au bois résidentiel.

La Figure 11 compare les évolutions journalières des concentrations EC et OC dans les PM_{2,5} des 3 sites de mesure durant la campagne. Les concentrations en EC et OC évoluent de la même manière pour les différents sites. Le 19 janvier se démarque avec les concentrations les plus fortes pour les 3 sites. La concentration plus élevée en EC au niveau du site de l'Ecole Leroux avec une concentration

maximale journalière de $4,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ peut s'expliquer par l'influence du trafic routier (avenues et boulevards alentours) lorsque les conditions météorologiques sont sèches et peu dispersives. Notons que les 4 jours évoqués précédemment (28/01, 30/01, 12/02 et 16/02) présentent des concentrations plus fortes en OC au niveau du site de Cesson. L'influence du chauffage au bois plus forte pour ce site est constatée, notamment les 12 et 16 février, par les concentrations en EC également plus élevées en comparaison au 2 autres points de mesure.

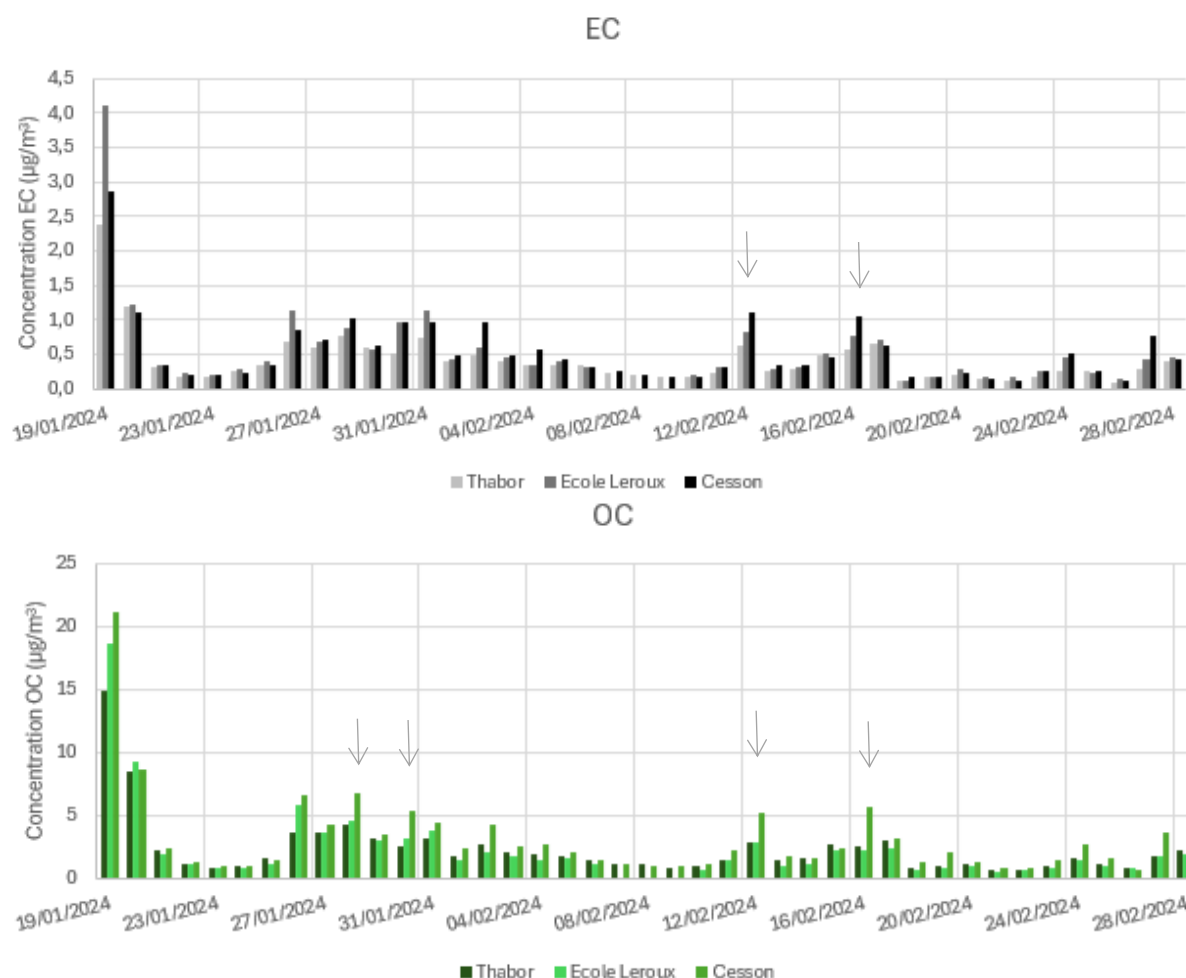


Figure 11 : Evolution journalière des concentrations en EC et OC dans les PM_{2,5} du 19 janvier au 28 février 2024

Une méthode utilisée pour l'évaluation de l'OC secondaire est basée sur les ratios OC/EC. Les ratios OC/EC sont inférieurs à 2 sur les sites fortement influencés par le trafic routier, compris entre 2 et 9 pour les sites urbains de fond et augmentent avec la diminution des émissions anthropiques (exemples des sites ruraux qui ont des ratios supérieurs à 10)¹⁰.

¹⁰ Organic and elemental carbon concentrations in carbonaceous aerosols during summer and winter sampling campaigns in Barcelona, Spain, M. Viana et al, Atmospheric Environment 40, 2006

La Figure 12 présente les corrélations du carbone organique et du carbone élémentaire mesurés sur filtre pour les 3 sites avec des $R^2 > 0,9$ ¹¹. Durant cette campagne, les ratios OC/EC varient entre 4,7 et 6,9. Le ratio est plus faible pour le site de l'Ecole Leroux, du fait de niveaux plus forts en EC. Cela peut s'expliquer par la présence d'axes routiers dans les environs du site et ainsi de la contribution de la combustion d'hydrocarbures plus élevées dans les concentrations en carbone élémentaire.

En effet, le ratio OC/EC plus important peut-être causé par :

- l'abondance des composés organiques secondaires qui peuvent être transportés sur de longues distances,

- une contribution importante de la combustion de la biomasse,

- les émissions biogéniques.

Le ratio le plus élevé pendant la campagne est obtenu pour le site de Cesson (6,9) ce qui tend vers une contribution plus importante de la combustion de la biomasse au niveau de ce point de mesure.

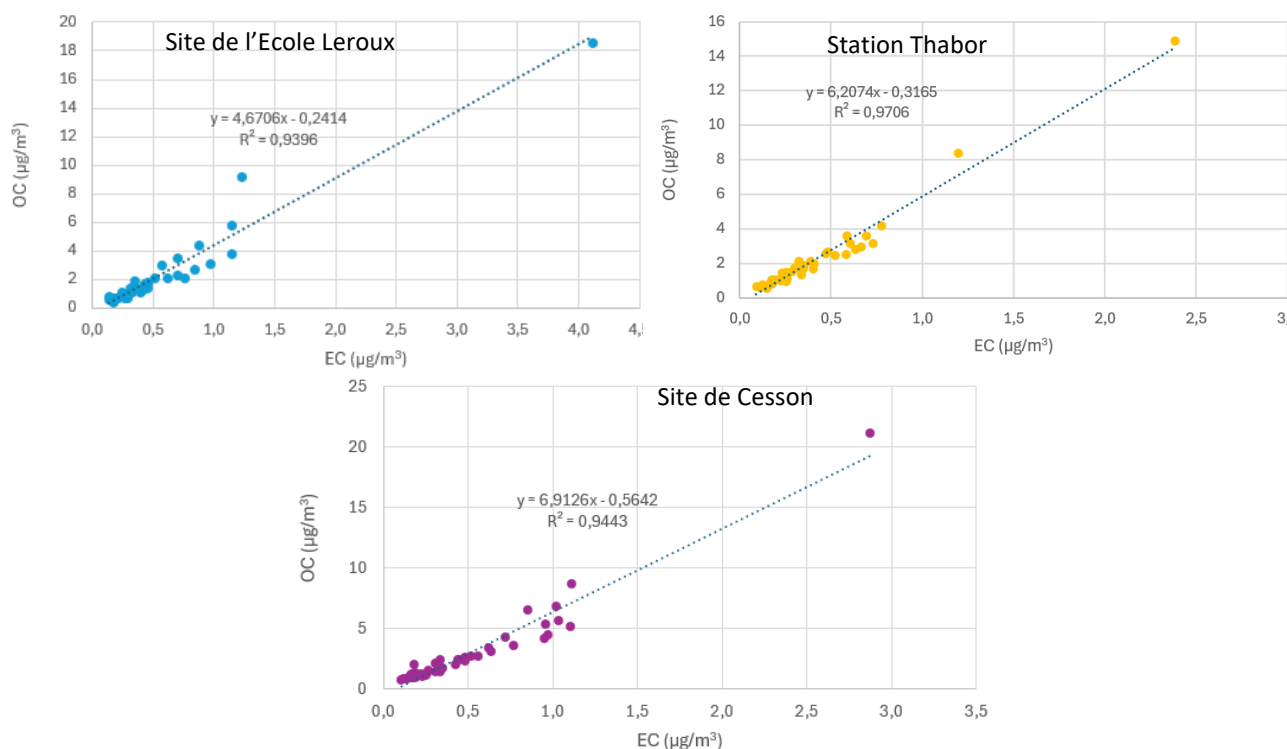


Figure 12 : Corrélation OC/EC mesurés sur filtre pour les 3 sites du 19/01 au 28/02/2024

Les variations des concentrations journalières en EC et OC sont cohérentes entre les 3 sites. Les 2 premiers jours présentent les concentrations en EC et OC les plus élevées ce qui confirme l'influence plus forte de la combustion de biomasse durant ces deux journées où les températures étaient les plus froides. La station Thabor est celle qui présente les plus petites concentrations en EC et OC pendant la campagne. Le site de l'Ecole Leroux a la plus forte moyenne en EC et cela

¹¹ R^2 est le coefficient de détermination qui permet d'analyser l'adéquation entre la régression linéaire et les données collectées. Plus il est proche de 1, plus la régression linéaire est en adéquation avec les données collectées. Si le coefficient est proche de zéro, il signale la quasi-absence de données corrélées.

pourrait s'expliquer par l'influence du trafic routier à proximité de ce point de mesure. Quant au site de Cesson, il présente les plus fortes concentrations en carbone organique ainsi que le ratio OC/EC le plus élevé ce qui pourrait s'expliquer par une contribution du chauffage au bois plus importante pour ce site.

b) Traceurs organiques

Le **lévoglucosan** est spécifique de la combustion de cellulose. Il est communément considéré comme un **bon traceur de la combustion de bois**, notamment le chauffage en hiver ou encore le brûlage de déchets verts. Les résultats des analyses en laboratoire du lévoglucosan sont présentés dans le Tableau 7 et la Figure 13.

Pendant la campagne hivernale, la concentration moyenne en lévoglucosan est plus élevée pour le site de Cesson avec des écarts respectifs de 131% et 83% par rapport au site de l'Ecole Leroux et à la station Thabor. L'évolution des concentrations journalières corrobore le constat précédent puisque les concentrations en lévoglucosan mesurées sur le site de Cesson sont supérieures à celles des 2 autres points de mesure (station Thabor et site de l'Ecole Leroux). La station Thabor est la moins influencée par la combustion de biomasse et à l'inverse le site de Cesson est celui le plus influencé. Les maximums journaliers sont atteints le 19 janvier en lien avec les concentrations élevées mesurées en PM₁₀ et PM_{2,5}. L'influence du chauffage au bois est notable pour cette journée du 19 janvier. Pour cette journée, les ratios lévoglucosan/PM₁₀ sont de 6% à la station Thabor, 8% au site de l'Ecole Leroux et 9% au site de Cesson. Ce ratio traduit l'influence du chauffage au bois dans les niveaux de particules fines PM₁₀, plus il est élevé plus le chauffage au bois représente une part importante dans les particules fines PM₁₀.

Les 12 et 16 février, les concentrations journalières en lévoglucosan sont plus fortes au niveau du site de Cesson (le ratio lévoglucosan/PM₁₀ est de 8% et 7% pour le site de Cesson contre des ratios inférieurs à 4% pour les 2 autres sites) ce qui confirme l'influence plus forte du chauffage au bois pour ces deux journées.

Tableau 7 : Résultats des analyses de lévoglucosan

Concentrations en lévoglucosan (ng/m ³)	Station Thabor	Site de l'Ecole Leroux	Site de Cesson
Moyenne	325	412	752
Min - Max journalier (date du max)	26 - 2343 (19/01/2024)	50 - 4309 (19/01/2024)	109 - 5602 (19/01/2024)
Médiane	214	196	403

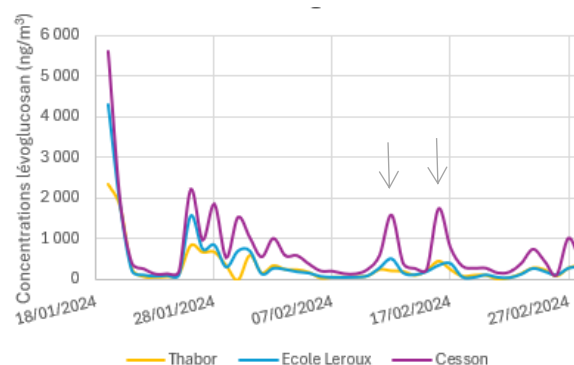


Figure 13 : Evolution journalière des concentrations en lévoglucosan

Le rapport OC/lévoglucosan permet d'estimer les contributions de la combustion de la biomasse. Il est influencé par les différentes conditions de combustion et types de bois. Dans la littérature, le ratio moyen à l'émission pour la combustion de bois dur est de 7. La Figure 14 présente de très

bonnes corrélations entre le lévoglucosan et l'OC pour les trois sites. Les ratios obtenus pendant la campagne sont compris entre 3,6 et 5,3, ce qui indique une combustion de bois plutôt dur.

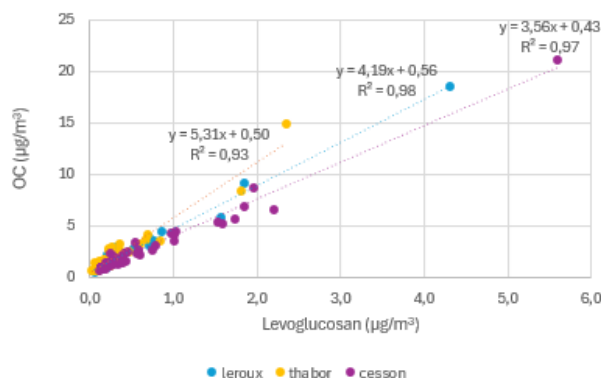


Figure 14 : Corrélation entre lévoglucosan et OC pour les 3 sites pendant la campagne

Le mannosan, isomère du lévoglucosan, peut également être considéré comme un des traceurs de la combustion de la biomasse. Les concentrations sont plus faibles sur l'ensemble des sites (Tableau 8). Cette différence de concentration est due aux facteurs d'émission systématiquement plus faibles pour les isomères du lévoglucosan et ce quel que soit le type de bois brûlé.¹²

Tableau 8 : Résultats des analyses en mannosan

Concentrations en mannosan (ng/m³)	Station Thabor	Site de l'Ecole Leroux	Site de Cesson
Moyenne	24	29	46
Min - Max journalier (date du ma)	4 - 161 (19/01/2024)	3 - 317 (19/01/2024)	7 - 351 (19/01/2024)

Le ratio lévoglucosan/mannosan (L/M) est utilisé dans la littérature comme indicateur d'essence de bois brûlés et des conditions de combustion. Des études précédentes ont montré que les ratios lévoglucosan/mannosan de la combustion du bois dur sont compris entre 10 et 30, et le ratio L/M de la combustion du bois résineux est de 3 à 10.¹³ Pour cette campagne de mesure, les ratios L/M calculés sont compris entre 14,5 et 16,6. Cela indique l'utilisation prédominante des bois durs aux alentours des 3 sites.

Tableau 9 : ratio lévoglucosan/mannosan

lévoglucosan/mannosan	Station Thabor	Site de l'Ecole Leroux	Site de Cesson
Moyenne (Min - Max journalier)	14,5 (5,6 - 20,1)	15,1 (11,4 - 20,8)	16,6 (11,8 - 20,9)

¹² 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, F. Chevrier, 2006

¹³ Caractérisation des particules sur la zone littorale des Hauts-de-France et de la Normandie, Rapport N°01/2021/SZH/V0, Atmo Hauts-de-France/Atmo Normandie

L'analyse des traceurs organiques de la combustion de bois dont le lévoglucosan dans les prélèvements PM_{2,5}, révèle des variations journalières marquées. Notons une variation spatio-temporelle cohérente entre les 3 sites. Cependant, la moyenne en lévoglucosan pendant la campagne est plus forte pour le site de Cesson indiquant une influence plus importante du chauffage au bois localement. De plus, cette influence est ponctuellement plus forte pour certains jours (exemples des 12 et 16 février 2024). Le calcul des ratios lévoglucosan/mannosan révèle la combustion de bois similaire (bois dur) sur les 3 sites.

VI3. Mesure du carbone suie en continu

Dans cette partie, les résultats des mesures en continu au niveau des 2 sites équipés d'un aethalomètre AE33 (station Thabor et site de Cesson) sont présentés.

a) Analyse statistique

*Les résultats des mesures en continu du **carbone suie**, via l'analyseur AE33, ainsi que des **estimations des concentrations en particules fines provenant de la combustion de biomasse (PMbio)** et leur **proportion dans les PM10** sont présentés dans le*

Tableau 10. L'estimation des PMbio via la mesure du BCwb (part du carbone suie issu de la combustion de biomasse) est présentée en annexe. Les mesures BCff (part du carbone suie issu de la combustion d'hydrocarbures) sont fournies bien que ça ne soit pas l'objet de cette étude.

Les résultats en **BC et BCwb obtenus sur le site de Cesson sont plus élevés** qu'au niveau de la station Thabor (respectivement + 29% et +82%). En effet, la concentration moyenne en BC est plus forte pour le site de Cesson. C'est la part de **carbone suie issu de la combustion de biomasse (BCwb) qui est plus importante** pour ce site avec une moyenne de 0,5 µg/m³ contre 0,3 µg/m³ pour la station Thabor. Les mesures en continu via l'AE33, confirment le constat réalisé avec les mesures différées, d'une influence plus prononcée du chauffage au bois pour le site de Cesson.

Les proportions moyennes sur l'ensemble de la campagne des PM10 liées au chauffage au bois au niveau de la station Thabor et du site de Cesson sont respectivement de 20% et 23%. Notons que les proportions maximales horaires des particules issues du chauffage au bois sont bien plus fortes que les proportions moyennes puisqu'elles sont supérieures à 90% pour les 2 sites.

Tableau 10 : Résultats des mesures par AE33 et des estimations des PM liées à la biomasse pendant la campagne

	BC		BCwb		BCff		PMbio		Proportion des PMbio dans les PM10	
Concentrations (µg/m ³)	Station Thabor	Site de Cesson	Station Thabor	Site de Cesson	Station Thabor	Site de Cesson	Station Thabor	Site de Cesson	Station Thabor	Site de Cesson
Moyenne horaire	0,6	0,9	0,3	0,5	0,3	0,3	3,1	4,7	20%	23%
Médiane	0,4	0,5	0,1	0,2	0,2	0,2	1,4	1,8	15%	18%
Max horaire	7,0	11,6	4,2	7,6	2,4	3,3	50	78,6	100%	94%
Max journalier	3,2	5,0	0,8	3,3	0,6	0,9	20,4	28,1	52%	57%

Pour information, en 2022 au niveau de la station Pays-Bas, la moyenne en BC était de $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ce qui positionnait la station de Rennes parmi les sites urbains en France présentant les plus faibles concentrations en BC. L'historique 2019 -2022 au niveau de cette station urbaine de fond présentait une variation pluriannuelle significative avec une baisse de la concentration en BC de -45% entre 2019 et 2022. Cette baisse s'explique principalement par la baisse du BC lié à la part de la combustion d'hydrocarbures.¹⁴

b) Comparaison BCwb/lévoglucosan

La comparaison entre les différents traceurs de la combustion de biomasse (BCwb et lévoglucosan) obtenus par des méthodes de mesure différentes (mesure en continu et analyse différée) est expliquée dans cette partie. Le lévoglucosan et le BCwb montrent une bonne corrélation pour les 2 points de mesure (Station Thabor et Site de Cesson) avec un R^2 de 0,96 et 0,78 (Figure 15). Ces résultats confirment que les mesures de BCwb par l'analyseur AE33 sont cohérentes avec les mesures réalisées en différé et donc estiment convenablement les niveaux de combustion de biomasse pour les 2 sites équipés.

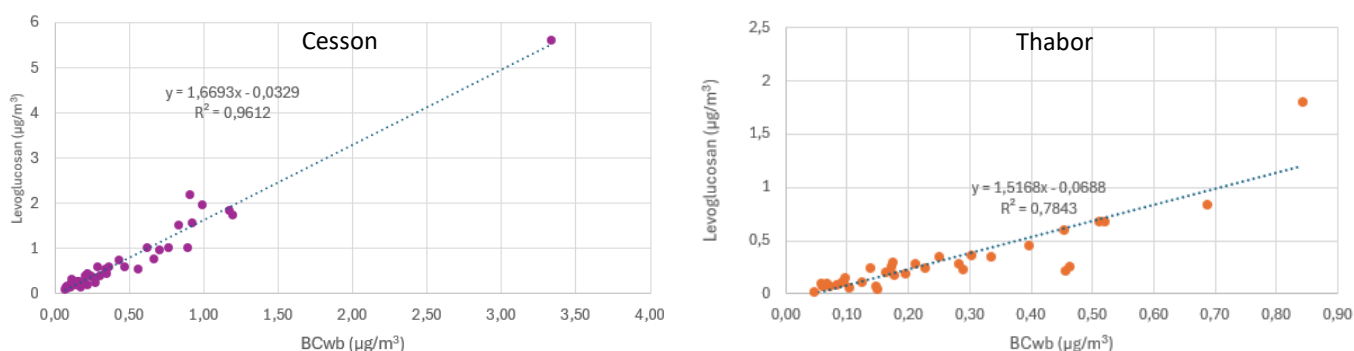


Figure 15 : Corrélation entre BCwb et lévoglucosan pour les 2 sites équipés d'un AE33

c) Evolution des concentrations horaires pendant la campagne

Les évolutions horaires des concentrations de BCff et BCwb au niveau des 2 sites équipés d'un AE33 sont présentées dans la Figure 16. Les variations horaires des concentrations en carbone suie issu de la combustion de biomasse (BCwb) sont marquées pour les 2 sites. Les pics horaires de BCwb sont plus forts au niveau du site de Cesson. En effet, l'analyse des données horaires confirme une influence forte du chauffage au bois le 12/02 à 21h TU (temps universel) et le 16/02 à 22h TU avec des concentrations horaires respectives de $6,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de $6,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. L'environnement du site de Cesson ; notamment le quartier résidentiel Bellevue, composé de nombreuses maisons individuelles avec des foyers ouverts régulièrement utilisés, peut expliquer ce constat.

¹⁴ Bilan de la mesure de carbone suie à la station Pays-Bas à Rennes de 2019 à 2022, Air Breizh, 2023

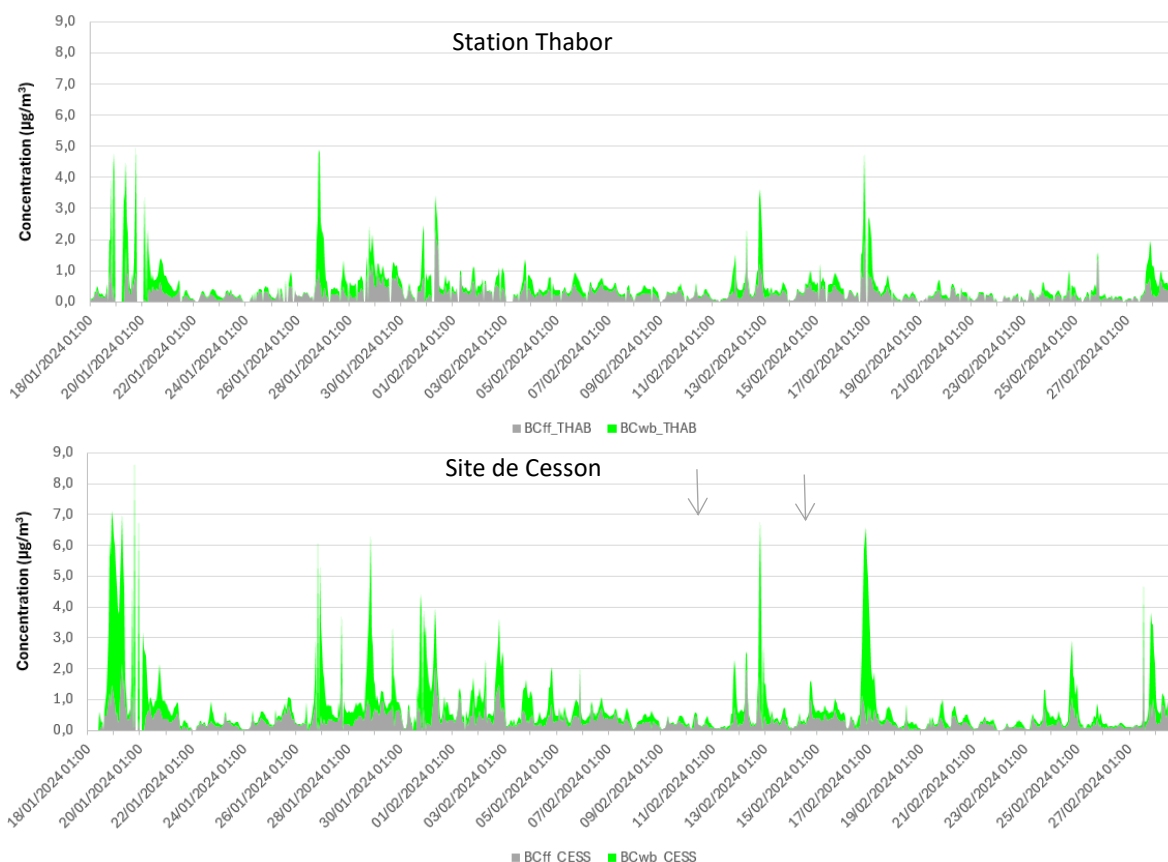


Figure 16 : Evolutions horaires des concentrations en BCwb et BCff mesurées par AE33 pendant la campagne. Les heures sont exprimées en temps universel (TU).

La mesure en continu du carbone suie permet de tracer les profils journaliers moyens du carbone suie issu de la combustion de biomasse (BCwb) (Figure 17). Les profils journaliers des deux sites sont similaires avec des niveaux plus faibles l'après-midi et l'augmentation des concentrations de BCwb en soirée. Cette évolution est cohérente avec l'utilisation du chauffage résidentiel au bois en soirée. La différence entre ces 2 profils moyens journaliers porte sur les niveaux mesurés. En effet, le pic de BCwb en soirée est plus fort au niveau du site de Cesson avec une moyenne maximale de $1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à 22h, contre $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à 23h au niveau de la station Thabor, ce qui confirme l'influence plus importante du chauffage au bois pour le site de Cesson.

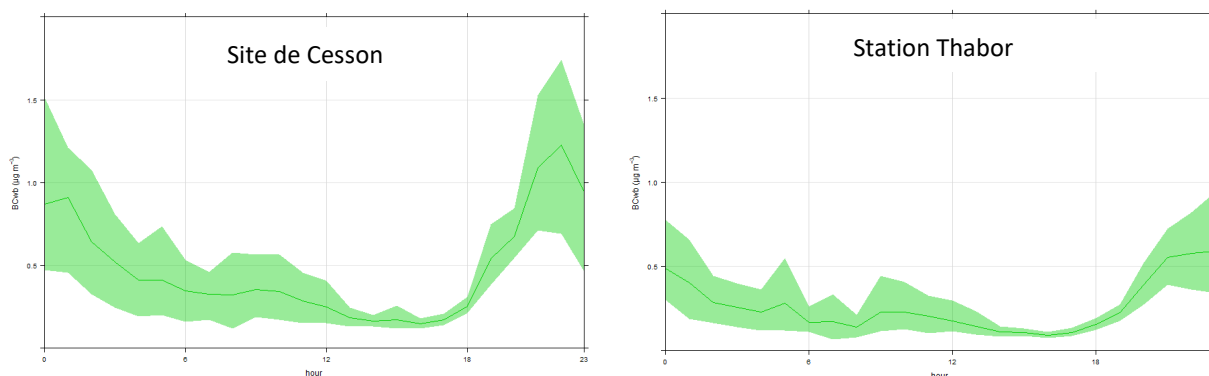


Figure 17 : Profils journaliers moyens en BCwb au niveau des 2 sites équipés d'un AE33

La mesure en continu du carbone suie permet de constater des concentrations plus fortes en BC au niveau de site de Cesson qui s'explique par une part plus élevée de carbone suie issu de la combustion de biomasse (56% du BC est issu du chauffage au bois au niveau du site de Cesson contre 43% à la station Thabor).

Le suivi horaire met en avant des variations ponctuelles fortes au niveau du site de Cesson qui confirment une influence locale marquée du chauffage au bois. De plus, l'évolution horaire moyenne journalière des concentrations en BCwb est cohérente avec l'utilisation du chauffage résidentiel au bois en soirée.

VII. PART DES PARTICULES ISSUES DU CHAUFFAGE AU BOIS

Cette partie présente, par site, les résultats des estimations de la part des particules imputables à la combustion du bois :

- en moyenne sur l'ensemble de la campagne (1,5 mois) à partir des données journalières (résultats des prélèvements sur filtres),
- à l'échelle journalière pour les 3 points de mesure (résultats des filtres)
- à l'échelle horaire pour la station Thabor et le site de Cesson (estimation à partir des données de mesure en continu de l'AE33).

A noter que sur l'ensemble de la campagne, les parts moyennes de particules imputables à la combustion de bois sont probablement sous-estimées au regard des conditions météorologiques différentes des normales saisonnières. Quant aux parts maximales horaires et journalières obtenues pendant la campagne, elles sont similaires à celles observées par le passé pendant un hiver froid.

VIII.1. Station Thabor

a) Part journalière des particules fines issues du chauffage au bois

A la suite du calcul des estimations des concentrations en particules issues de la combustion de biomasse à partir des analyses filtres (PMbiofiltres) (cf annexe IX2), les parts journalières moyennes des particules issues du chauffage au bois dans les PM10 et les PM2,5 sont présentées dans le Tableau 11. **En moyenne sur toute la campagne, à la station Thabor, 18% des PM10 et 27% des PM2,5 mesurées proviennent du chauffage au bois.** La part des PM2,5 est la plus forte car ce sont elles qui sont émises majoritairement lors de la combustion du bois.

Tableau 11 : Part des PM issues de la combustion biomasse au niveau de la station Thabor du 19 janvier au 28 février 2024

Station Thabor	Part des PMbiofiltres	
	PM10	PM2,5
Moyenne journalière (max – min)	18% (51% – 2%)	27% (57% – 4%)

L'évolution journalière des concentrations en particules issues de la combustion de biomasse est fortement variable au fil de la campagne. Les parts journalières de particules PM10 et PM2,5 issues du chauffage au bois les plus fortes (de l'ordre de 50%) sont constatées en début de campagne, les 19 et 20 janvier 2024 (pour rappel, en période d'épisode de pollution).

Toutes les augmentations des concentrations en PM10 et PM2,5 ne sont pas liées à des particules issues de la combustion de biomasse. En effet, l'augmentation des concentrations en particules fines le 4 février n'est pas corrélée à une augmentation de la fraction des PMbiofiltres. L'augmentation de

la fraction inorganique des particules fines (exemple des poussières crustales, sels marins, nitrate d'ammonium...) peut expliquer ces hausses.

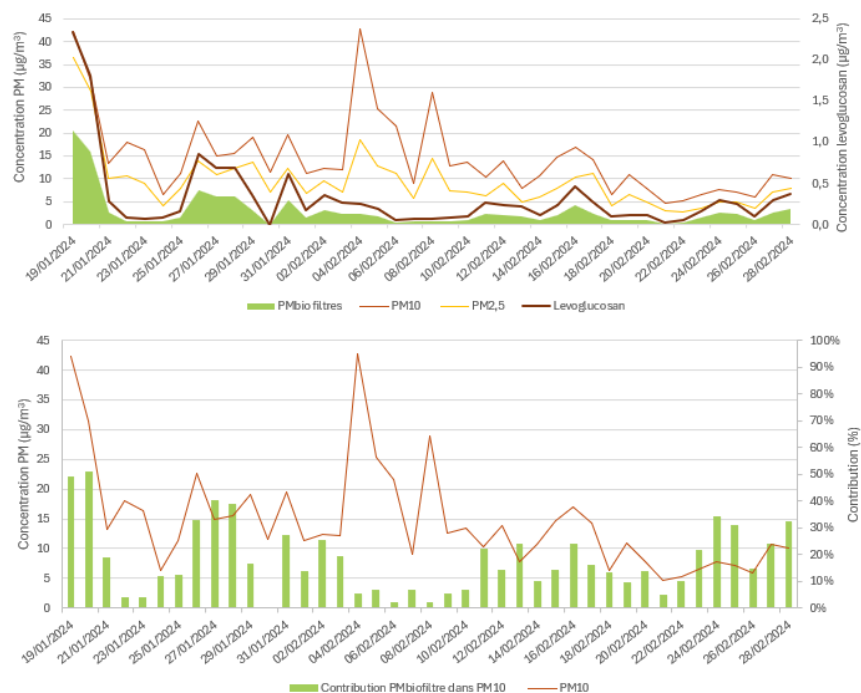


Figure 18 : Evolution journalière des PM10, PM2,5 et des PM issues de la combustion de biomasse (en concentration et en proportion) au niveau de la station Thabor

b) Origine des particules fines issues de chauffage au bois (Pmbio)

La Figure 19 représente la rose de pollution (clé de lecture en annexe IX3) pour les particules fines issues de la combustion de biomasse au niveau de la station Thabor (corrélation des Pmbio obtenues à partir des mesures horaires AE33 pendant la campagne avec les données Météo France de la station Rennes St-Jacques). Les plus fortes concentrations sont observées par vent faible (vitesse inférieure à 2 m/s) ce qui indique une influence locale. Pour des vents d'environ 4 m/s, une légère influence de Sud-Est est constatée.

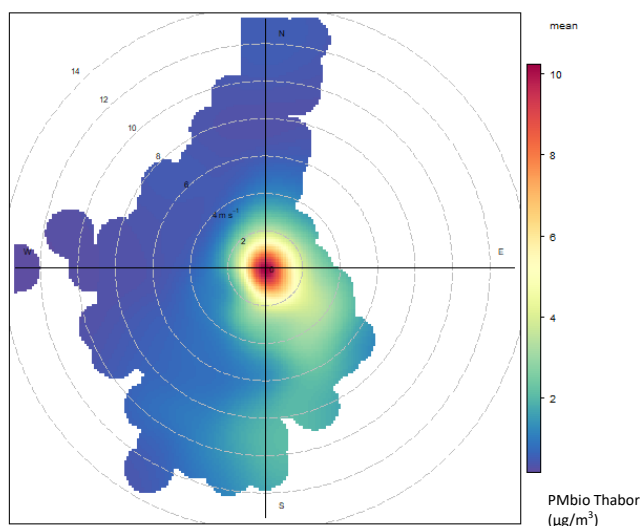


Figure 19 : Rose de pollution des Pmbio à la station Thabor pendant la campagne

c) Evolution de la part horaire des particules fines issues du chauffage au bois

La mesure en continu du carbone suie via l'AE33 permet un suivi horaire des concentrations des PM liées aux phénomènes de combustion (biomasse - PMbio et hydrocarbures – PMff). La Figure 20 présente l'évolution horaire des concentrations en particules fines ainsi que des proportions des PM10 issues des sources de combustion et des particules fines liées à d'autres sources. A l'échelle horaire la variation des concentrations et des proportions en PMbio est encore plus marquée qu'au niveau journalier. En effet, la part horaire maximale des particules issues du chauffage au bois, au niveau de la station Thabor, atteint les 100%.

A noter que les concentrations de particules fines issues de la combustion d'hydrocarbures (PMff) sont moins variables que celles des PMbio. La masse restante des PM10 provient d'autres sources diverses : embruns marins, poussières crustales, formations de particules secondaires liées à des émissions gazeuses du trafic, de l'agriculture...

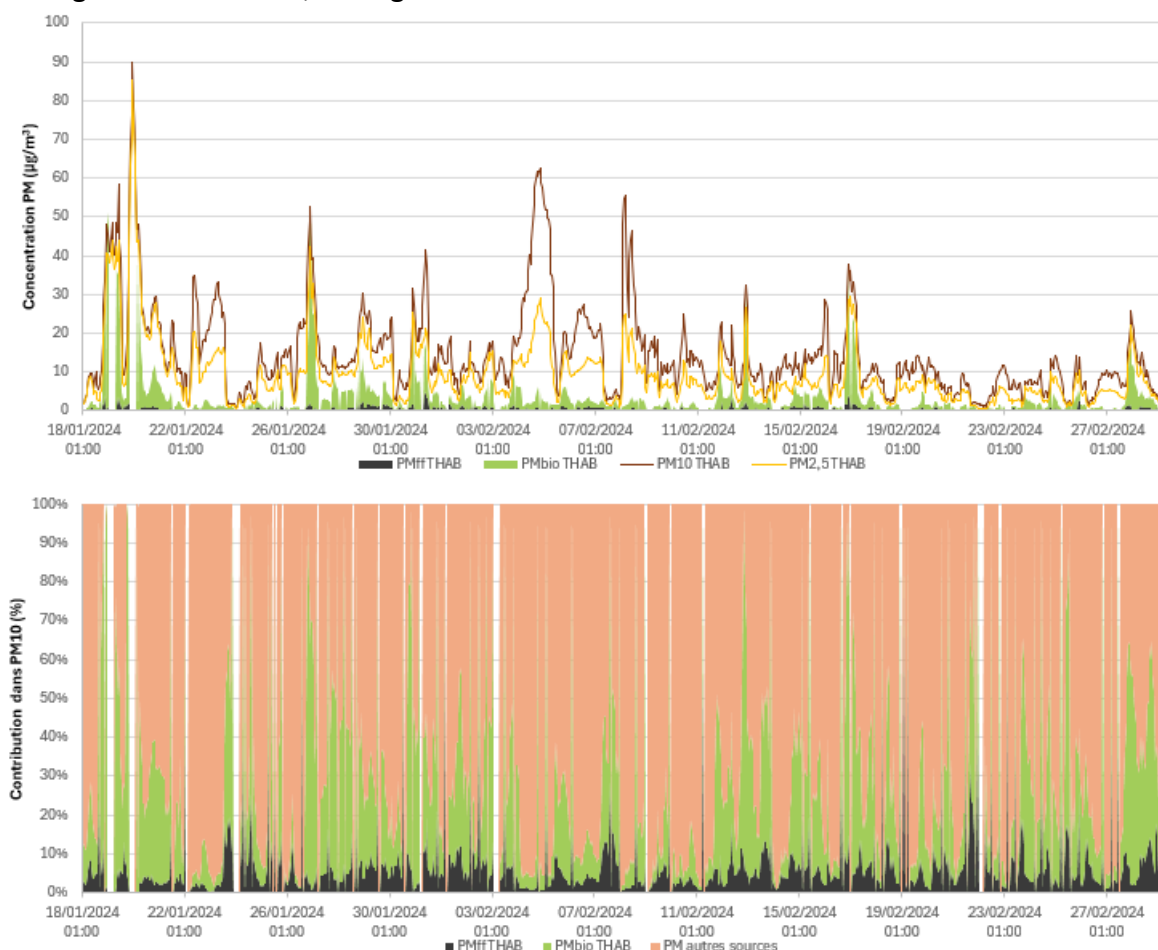


Figure 20 : Evolution horaire des concentrations en PM10, PM2,5, PMff et PMbio et des proportions des PM liées aux phénomènes de combustion et à d'autres sources au niveau de la station Thabor pendant la campagne

VII.2. Site de l'Ecole Leroux

Le site de l'Ecole Leroux n'étant pas équipé d'un analyseur automatique (AE33) pour la mesure du carbone suie, seuls les résultats issus des prélèvements journaliers des PM_{2,5} et des analyses en laboratoire sont présentés.

a) Part journalière des particules fines issues du chauffage au bois

En moyenne pendant la période 19 janvier au 28 février 2024, au niveau du site de l'Ecole Leroux à Rennes, 20% des PM₁₀ et 29% des PM_{2,5} mesurées sont imputables au chauffage au bois (Tableau 12).

Au maximum, sur la journée du 19 janvier (lors de l'épisode de pollution particulière), 69% des PM₁₀ et 81 % des PM_{2,5} observées sont issues de la combustion de biomasse. En comparaison avec les résultats de la station Thabor, cela révèle une influence du chauffage au bois plus importante pour le site de l'Ecole Leroux en proximité du quartier résidentiel « Village des Castors » dont plusieurs maisons sont équipées en poêles à bois régulièrement utilisés (Enquête réalisée par Rennes Métropole en novembre 2023).

Tableau 12 : Part des PM issues de la combustion biomasse au niveau du site de l'Ecole Leroux du 19 janvier au 28 février 2024

Site de l'Ecole Leroux	Part des PMbiofiltres	
	PM ₁₀	PM _{2,5}
Moyenne journalière (max – min)	20% (69% - 2%)	29% (81% - 4%)

Le suivi journalier pendant la campagne permet d'identifier de fortes variations de l'influence du chauffage au bois dans les concentrations en PM₁₀ (Figure 21). Les plus fortes concentrations et proportions en PM₁₀ issues du chauffage au bois (69% et 51% des PM₁₀) sont obtenues en début de campagne pendant les 2 jours aux températures les plus basses (pour rappel, en période d'épisode de pollution). Le caractère multi-sources des particules est visible avec des jours, du 4 au 10 février, présentant peu d'influence du chauffage au bois (faibles concentrations en PMbio et des proportions de PM₁₀ issues de la combustion de biomasse inférieures à 7%) bien que les concentrations en PM₁₀ soient conséquentes.

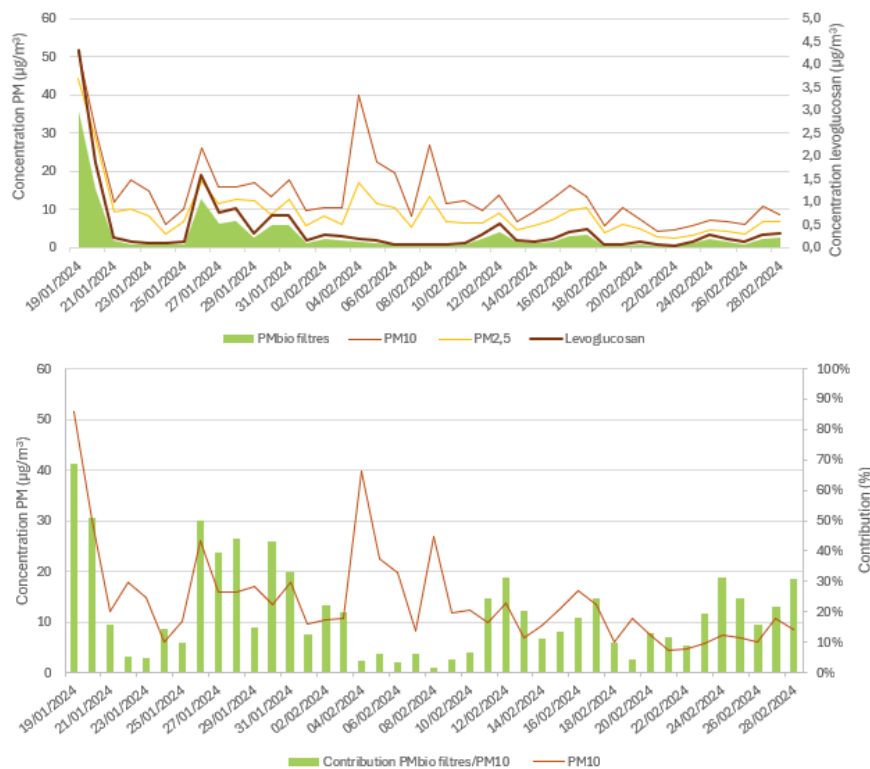


Figure 21 : Evolution journalière des PM10, PM2,5 et des PM issues de la combustion de biomasse (en concentration et en proportion) au niveau du site de l'Ecole Leroux

VIII.3. Site de Cesson

a) Part journalière des particules fines issues du chauffage au bois

Pendant la campagne, le site de Cesson est celui qui présente les parts de particules PM10 et PM2,5 issues de la combustion de biomasse les plus fortes, respectivement de 25% et 35% (Tableau 13). Cela traduit une influence plus importante sur ce site de la combustion de biomasse en lien avec l'utilisation du chauffage résidentiel au bois, notamment au niveau du quartier Bellevue dont les habitations sont équipées en cheminées ouvertes régulièrement utilisées (Enquête réalisée par Rennes Métropole en décembre 2023).

Tableau 13 : Part des PM issues de la combustion biomasse au niveau du site de Cesson du 19 janvier au 28 février 2024

Site de Cesson	Part des PMbiofiltres	
	PM10	PM2,5
Moyenne journalière (max – min)	25% (58% - 3%)	35% (66% - 6%)

De même que pour les 2 autres sites, les variations des concentrations journalières en particules fines issues de la combustion de biomasse (Figure 22) sont importantes pendant la campagne. Les 12 et

16 février 2024, jours avec des concentrations plus élevées pour les traceurs de la combustion de biomasse (BCwb et lévoglucosan) au niveau du site de Cesson (cf VI2.b et VI3.c), les parts de PM10 attribuables à la combustion de biomasse sont respectivement de 49% et 43% alors qu'elles sont inférieures à 31% pour les 2 autres sites.

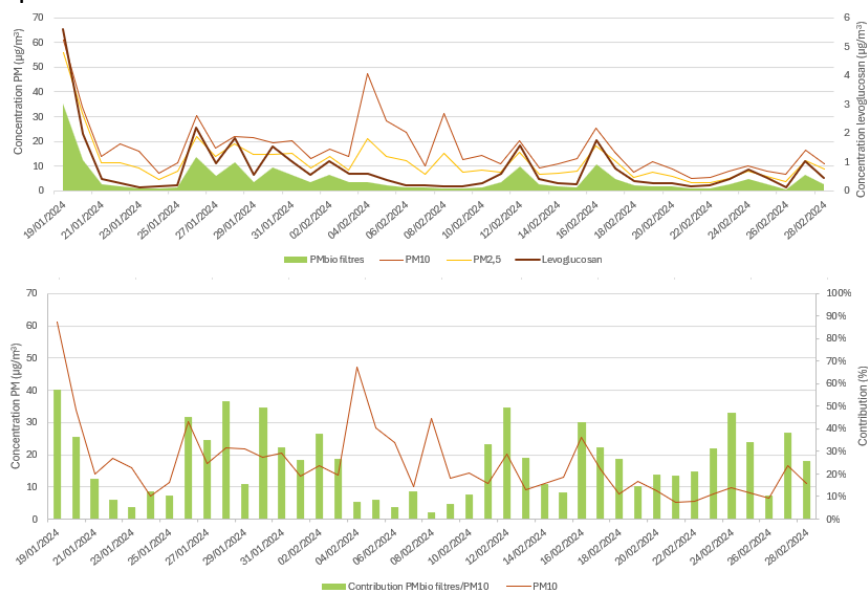


Figure 22 : Evolution journalière des PM10, PM2,5 et des PM issues de la combustion de biomasse (en concentration et en proportion) au niveau du site de Cesson

b) Origine des particules fines issues de chauffage au bois (PMbio)

La Figure 23 représente la rose de pollution (clé de lecture e, annexe IX3) pour les particules fines issues de la combustion de biomasse au niveau du site de Cesson (corrélation des PMbio estimées à partir des mesures horaires AE33 pendant la campagne avec les données Météo France de la station Rennes St-Jacques). Les plus fortes concentrations sont observées par vent faible (vitesse inférieure à 2 m/s) ce qui indique une influence locale. Une légère influence d'un large secteur Est est constatée pour des vents de 2 m/s.

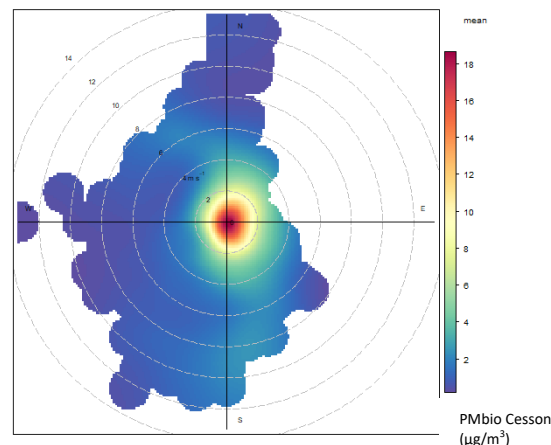


Figure 23 : Rose de pollution des PMbio au niveau du site de Cesson pendant la campagne

c) Evolution de la part horaire des particules issues du chauffage au bois

Le suivi des concentrations horaires en particules fines issues du chauffage au bois au niveau du site de Cesson (Figure 24) confirme de fortes variations de l'influence du chauffage au bois au fil de la campagne. La part horaire maximale de particules PM10 imputables au chauffage au bois atteint 94% au niveau du site de Cesson. La proportion de particules PM10 issues du chauffage au bois est plus

marquée que pour la station Thabor. Lors de la comparaison Cesson/Kergoff des concentrations en PM_{2,5} (VI.1.c), 4 jours avaient été mis en avant les 28/01, 30/01, 12/02 et 16/02/2024. De plus, des niveaux plus forts en carbone organique (OC) avaient été constatés par rapport aux deux autres sites ainsi que des concentrations journalières en lévoglucosan plus élevées. L'analyse des proportions horaires confirme l'augmentation des concentrations en particules fines du fait de l'influence du chauffage du bois. En effet, des proportions horaires de PM₁₀ issues du chauffage au bois (PM_{bio}) supérieures à 80% sont obtenues ponctuellement durant les soirées (21h-23h TU) de ces 4 jours avec des concentrations horaires en PM₁₀ et PM_{2,5} supérieures à 50 µg/m³. A chacune de ces augmentations, une corrélation avec la baisse des températures est visible.

Ainsi des conditions plus froides pendant la campagne auraient entraîné une utilisation plus importante du chauffage au bois et donc certainement des concentrations en particules fines plus fortes du fait d'une influence du chauffage résidentiel au bois plus marquée.

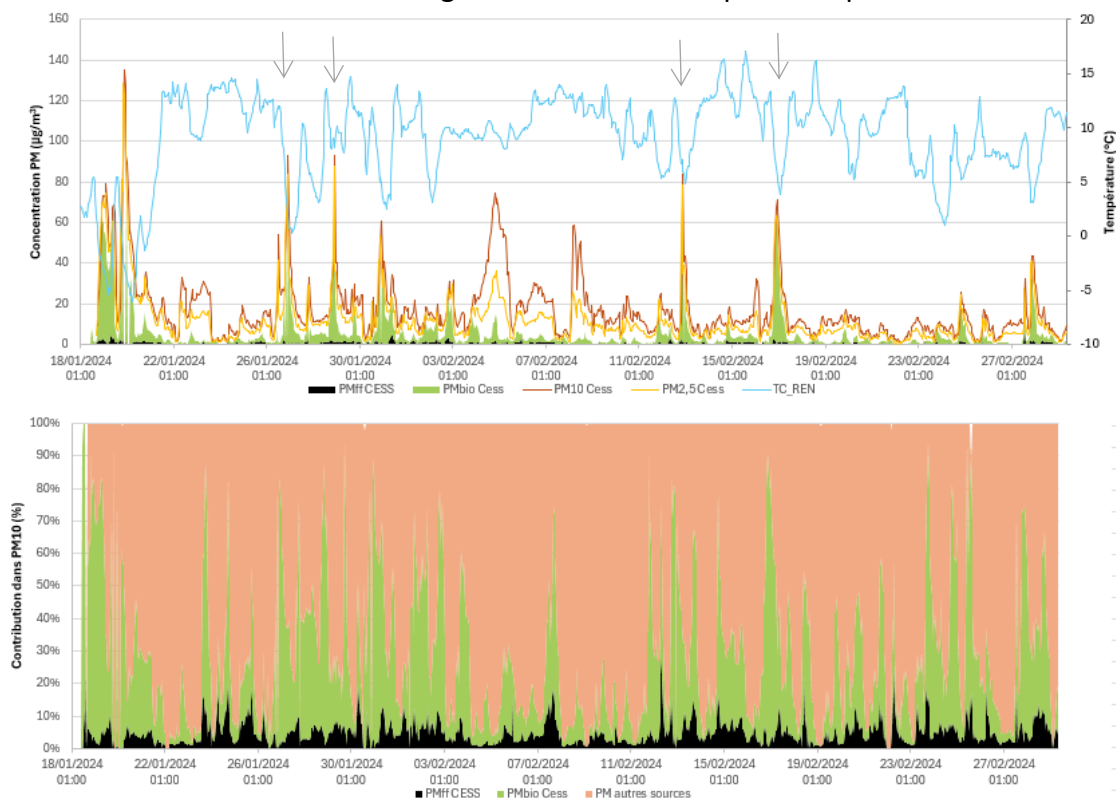


Figure 24 : Evolution horaire des concentrations en PM₁₀, PM_{2,5}, PM_{ff} et PM_{bio} et des proportions des PM liées aux phénomènes de combustion et à d'autres sources au niveau du site Cesson pendant la campagne

Les deux méthodes d'estimation des particules liées à la combustion de biomasse mènent à des résultats comparables. L'intérêt de la mesure en continu est de pouvoir distinguer les 2 sources de combustion (hydrocarbures et biomasse) mais aussi de pouvoir analyser les données à l'échelle horaire.

En moyenne sur la campagne, au niveau du site de Cesson, 25% des PM₁₀ mesurées sont imputables à la combustion de biomasse. Ainsi, il est le site le plus impacté des 3 par le chauffage au bois. La mesure en continu du carbone suie met en avant de fortes variations horaires de la part

du chauffage au bois dans les particules. Les proportions de PM10 issues de la combustion de biomasse augmentent notamment en soirée en lien avec l'utilisation du chauffage au bois et des baisses de température. Pour rappel, les conditions météorologiques pendant la campagne n'étaient pas favorables à une utilisation élevée du chauffage au bois ni à une accumulation dans l'atmosphère des polluants émis par la combustion. Ainsi les proportions déterminées ci-dessus (à l'échelle de l'ensemble de la campagne) sont probablement sous-estimées par rapport à un hiver froid et sec. Cependant, les parts maximales observées en début de campagne sont représentatives de l'influence que peut avoir le chauffage au bois dans les niveaux de particules lorsque les conditions météorologiques incitent à l'utilisation du chauffage au bois.

Pendant la campagne, 18% (station Thabor) à 25 % (site de Cesson) des concentrations massiques journalières en PM10 mesurées sont issues de la combustion de biomasse. Ces résultats sont comparables ceux obtenus sur d'autres agglomérations françaises au niveau des stations urbaines de fond (annexe IX4).

VIII. CONCLUSION

Ce rapport présente les résultats de la campagne de mesure dans l'air ambiant des traceurs de la combustion de biomasse réalisée du 18 janvier au 28 février 2024. Cette campagne a été réalisée dans le cadre de l'étude spécifique sur le chauffage au bois menée par Rennes Métropole.

■ Le protocole de mesure

Les 3 sites de mesure considérés dans cette étude sont la station urbaine de fond Thabor (station réglementaire et référente en particules fines de la région Bretagne), ainsi que 2 sites équipés ponctuellement dans le cadre de cette étude : « Ecole Leroux » et « Cesson », localisés dans 2 quartiers résidentiels respectivement le « village castors » (équipé majoritairement de poêle à bois) à Rennes et le quartier Bellevue (équipé majoritairement de cheminées ouvertes) à Cesson-Sévigné. En lien avec la problématique, les mesures ont porté sur le suivi en continu des niveaux de particules fines et la quantification de traceurs liés à la combustion biomasse.

■ Représentativité des mesures

L'analyse des conditions météorologiques pendant la campagne de mesure a mis en avant un hiver doux, avec un mois de février plus pluvieux comparé aux normales 1991-2020. Quant aux vents, ils sont dominés par un large secteur Sud-Ouest en cohérence avec la normale. A noter que le secteur Sud-Est a été moins représenté que la normale au niveau de la station Météo France Rennes St-Jacques.

Il s'agit d'un point marquant de cette campagne. Les niveaux moyens mesurés sont probablement sous-estimés par rapport à un hiver normal. En effet, la représentativité des mesures de particules fines (PM10 et PM2,5) pendant la campagne a été étudiée en comparant les résultats 2024 avec ceux de 2023 pendant la même période. Au niveau de la station Thabor, les concentrations moyennes mesurées du 18 janvier au 28 février sont inférieures de -29% pour les PM10 et de -41% pour les PM2,5 par rapport à 2023.

En revanche, quelques journées (18 au 20 janvier) ont présenté des températures très faibles avec des niveaux de particules proches de ceux de l'hiver 2023 ; les parts maximales journalières (et horaires) de particules fines issues de la combustion biomasse sont donc probablement représentatives de l'influence du chauffage au bois lorsque les températures sont basses.

■ Résultats : les mesures en continu des particules fines

Les plus fortes concentrations (maximum, médiane et moyenne) en particules (PM10 et PM2,5) pendant la campagne sont mesurées au niveau du site de Cesson. Les 2 premiers jours de la campagne sont concernés par un épisode de pollution particulaire avec dépassement du seuil information-recommandation journalier de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM2,5 au niveau des 3 sites de mesure. Cette étude permet de mettre en avant les variations spatiales des concentrations en particules fines au sein du territoire de Rennes Métropole.

La comparaison des niveaux PM2,5 mesurés pendant la campagne au niveau des sites de la métropole rennaise avec la station rurale nationale de fond (Kergoff en centre Bretagne) révèle une cohérence régionale. La variation des concentrations est similaire pour les sites avec l'influence

ponctuelle des activités locales urbaines visible sur les concentrations horaires en PM_{2,5} au niveau des sites de la métropole.

Les concentrations moyennes horaires en particules obtenues pendant la campagne sont inférieures à celles mesurées par le passé, cependant les concentrations maximales horaires atteintes sont représentatives de celles observées en 2023.

▪ Résultats : les analyses de la composition chimique des particules PM_{2,5}

De même que pour les concentrations en particules fines, les variations journalières des concentrations en carbone élémentaire (EC) et carbone organique (OC) dans les PM_{2,5} sont cohérentes entre les 3 sites. Les 2 premiers jours de la campagne (durant le dépassement du seuil information-recommandation PM_{2,5}) présentent les concentrations les plus élevées. Cela révèle l'influence potentiellement plus forte de la combustion de biomasse durant ces deux journées aux températures hivernales. La station Thabor est celle qui présente les plus petites concentrations en EC et OC pendant la campagne. La moyenne en EC, plus forte au niveau du site de l'Ecole Leroux, peut s'expliquer par le trafic routier plus présent aux alentours que pour les 2 autres sites. Quant au site de Cesson, il présente les plus fortes concentrations en carbone organique ainsi que le ratio OC/EC le plus élevé ce qui révèle une contribution du chauffage biomasse potentiellement plus importante.

L'analyse des traceurs organiques de la combustion de bois dont le lévoglucosan dans les prélèvements PM_{2,5} révèle des variations journalières marquées. Notons une variation spatio-temporelle cohérente entre les 3 sites. Cependant, la moyenne sur l'ensemble de la campagne est plus forte pour le site de Cesson indiquant une influence plus importante du chauffage au bois localement. En effet, la concentration en lévoglucosan est constatée ponctuellement plus forte pour certains jours (par exemple les 12 et 16 février 2024). Le calcul des ratios lévoglucosan/mannosan révèle la combustion de bois similaire (bois dur) sur les 3 sites.

▪ Résultats : mesure en continu du carbone suie (BC)

Bien que non prévu initialement dans le protocole, Air Breizh a été en mesure de déployer un aethalomètre supplémentaire pour cette étude afin d'assurer un suivi en continu des concentrations en carbone suie (BC). Deux sites ont été équipés : station Thabor, déjà équipée dans le cadre de la surveillance réglementaire, et le site de Cesson.

La mesure en continu du BC au niveau de ces 2 sites permet de constater des concentrations plus fortes en BC (+29%) au niveau de site de Cesson. Ce constat est cohérent avec les résultats des analyses de la composition chimique des filtres (concentration moyenne plus élevée en EC au niveau du site de Cesson).

La distinction du BC selon les 2 principales sources de combustion (biomasse et hydrocarbures) permet d'expliquer les écarts entre les niveaux de BC pour les différents sites. La moyenne en carbone suie du site de Cesson présente une part plus élevée de carbone suie issu de la combustion de biomasse (56% du BC est issu du chauffage au bois au niveau du site de Cesson contre 43% à la station Thabor).

Le suivi horaire indique des variations ponctuelles fortes au niveau du site de Cesson qui confirment une influence locale marquée du chauffage au bois. La localisation du site de Cesson (proche du quartier résidentiel de Bellevue) justifie cette influence. De plus, l'évolution horaire avec une augmentation des concentrations en carbone suie issu de la combustion de biomasse le soir est cohérente avec l'utilisation du chauffage résidentiel au bois à ce moment de la journée.

■ **Résultats : part de particules fines PM10 et PM2,5 imputables à la combustion biomasse**

L'estimation de la part des particules fines issues de la combustion de bois confirme les constats réalisés précédemment entre les sites de mesure.

Sur l'ensemble de la campagne, la station Thabor est le site le moins impacté par le chauffage résidentiel au bois avec une proportion moyenne de particules PM10 issues de la combustion de biomasse de 18%. Au niveau du site de l'Ecole Leroux, la part moyenne de particules PM10 issues du chauffage au bois est de 20% et elle atteint 25% pour le site de Cesson.

Ces proportions sont plus importantes pour la fraction PM2,5 (de 27% à 35%) étant donné que les émissions de particules liées au chauffage au bois sont majoritairement dans les PM2,5.

A l'échelle journalière, la part maximale de chauffage au bois peut être 3 fois supérieure à la moyenne pendant la campagne. Par exemple pour le site de l'Ecole Leroux, la proportion journalière maximale de particules fines issues du chauffage au bois atteint 69% des PM10 et 81% des PM2,5. Au niveau des 2 autres sites, les parts journalières maximales de particules provenant du chauffage au bois sont plus faibles et pourtant, elles représentent plus de la moitié des PM10 et PM2,5.

La mesure en continu de carbone suie (BC) permet d'estimer les parts horaires de particules issues de la combustion de biomasse qui atteignent plus de 90% des PM10 mesurées, notamment entre 21h et 23h.

Ainsi, selon les sites, la part moyenne du chauffage au bois dans les PM10 et PM2,5 est variable et non négligeable, d'autant plus que les conditions météorologiques n'étaient pas favorables à de fortes concentrations en particules fines ni à une utilisation soutenue du chauffage au bois. Cependant, la proportion de particules fines issues du chauffage au bois à un pas de temps plus ponctuel (horaire/journalier) est conséquente et représentative pour les 3 sites.

	Part des particules issues du chauffage au bois		
	Moyenne* (max J – min J)		Max H**
	PM10	PM2,5	PM10
Site de Cesson	25% (58% - 3%)	35% (66% - 6%)	94%
Site de l'Ecole Leroux	20% (69% - 2%)	29% (81% - 4%)	-
Station Thabor	18% (51% - 2%)	27% (57% - 4%)	100%

*estimation des parts de PMbiofiltre via les analyses différées

**estimation des parts de PMbio via la mesure en continu du BC

▪ Limites

Comme déjà évoqué, la période étudiée présente peu de jours avec des températures froides (hivernales) ce qui a pour impact de limiter l'utilisation du chauffage au bois. L'influence sur les niveaux de particules fines mesurés pendant la campagne a été constatée, les concentrations mesurées sont inférieures à celles rencontrées en 2023 à la même période. Ainsi les résultats moyens sur les proportions de PM issues du chauffage au bois sont probablement sous-estimés par rapport à un hiver proche des normales saisonnières. Cependant l'impact maximal du chauffage au bois (maximum journalier ou horaire) observé lors des premiers jours de cette étude est représentatif de l'influence que peut avoir cette source de particules dans les niveaux mesurés dans ces quartiers résidentiels.

Les 3 secteurs équipés avaient été retenus du fait de leur spécificité en termes d'équipements de chauffage notamment les sites de Cesson (foyers ouverts majoritaires) et de l'Ecole Leroux (poêles à granulés majoritaires).

Malgré des différences observées entre les secteurs, le lien entre les parts de particules issues de la combustion de biomasse et le type d'installations de chauffage est peu évident à réaliser. La densité des installations qui diffère entre les quartiers « village des castors » et Bellevue peut également influencer l'impact du chauffage au bois localement. Les conditions de combustion, la qualité du bois, l'entretien des installations impactent également les émissions des équipements. De plus, les phénomènes de transport avec le vieillissement des masses d'air (oxydation de la matière organique) après émissions sont autant de paramètres qui influencent les concentrations des polluants issus des rejets des différentes installations. En revanche, les différences à l'émission de ces installations (foyer ouvert, poêle à granulés ou à bois) sont aujourd'hui très bien documentées.

IX. ANNEXES

IX1. Estimation des concentrations en PM provenant de la combustion de biomasse

Estimation des PMbiomasse via l'AE33

L'AE33 permet de distinguer les 2 fractions du carbone suie qu'il est possible de relier aux deux principales sources de combustion que sont la combustion de biomasse (wb) et la combustion d'hydrocarbures(ff). Les fractions peuvent ensuite être utilisées pour estimer les concentrations de PM10 attribuables à ces 2 familles de sources à l'aide d'un facteur multiplicatif : ¹⁵

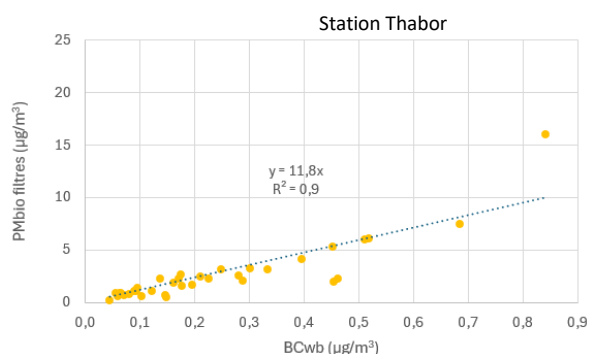
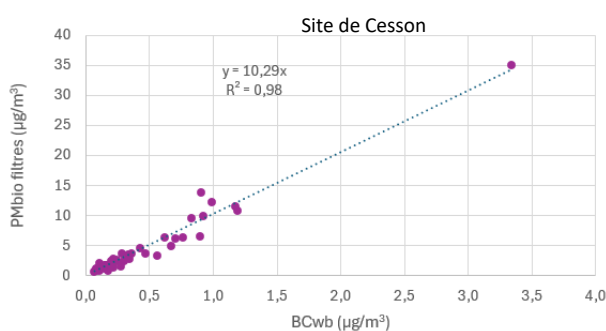
$$\text{PMwb} = b \times \text{BCwb}$$

Où **PMwb** (noté **PMbio** dans ce rapport) est la concentration massique des particules issues de la combustion de biomasse

En plus du carbone suie, les **PMwb** sont constituées principalement d'aérosols organiques primaires.

Les parts calculées de **PMwb** sont des estimations, il est important de les considérer comme des ordres de grandeur et non pas des valeurs de mesure précises.

Pour convertir le BCwb en PMwb, le coefficient b recommandé par le LCSQA est de 10 sauf si une estimation de ce coefficient est possible. Dans cette étude, la détermination du facteur multiplicatif (b) est possible pour chacun des sites en faisant la corrélation entre les PMbiofiltres et le BCwb (mesuré par AE33). Ainsi les facteurs multiplicatifs appliqués pour l'estimation des PM liées à la combustion de biomasse (PMbio) sont de 10,3 pour le site de Cesson et 11,8 pour la station Thabor.



Estimation des PMbiofiltres

La mesure directe des concentrations de particules provenant de la combustion de biomasse n'existe pas. Cependant, il est possible d'identifier la présence de ce type de particules par l'analyse chimique

¹⁵Guide méthodologique pour la mesure du « Black Carbon » par aethalomètre multilongueur d'onde AE33 dans l'air ambiant, LCSQA, octobre 2020

du lévoglucosan. Il est ensuite possible d'estimer les concentrations en PMbio à partir de facteurs multiplicatifs et de la concentration en lévoglucosan

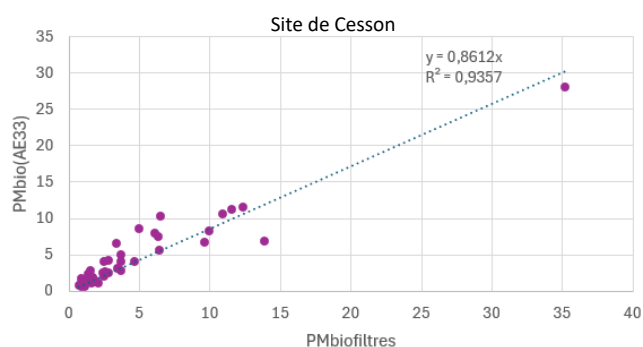
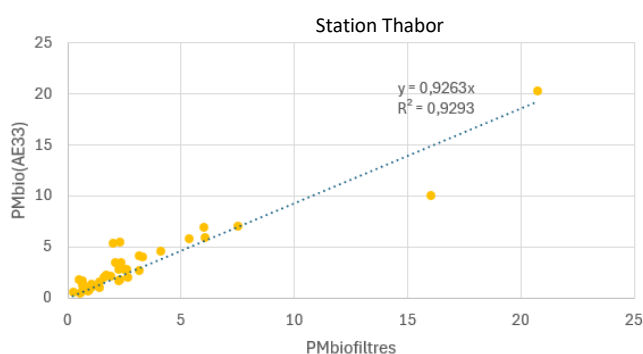
$$\text{PMbiofiltre} = f \times \text{levoglucosan} \times 1,8 \times 1,1$$

f étant égal à la moyenne des 3 ratios journaliers (OC/levoglucosan) les plus faibles pour chaque site d'étude. Les facteurs de conversion sont présentés dans le tableau ci-dessous.

	(OC/levoglucosan) _{min}	
	Dates	Moyenne
Thabor	20, 26/01 et 25/02/2024	4,5
Ecole Leroux	19, 26 et 30/01/2024	4,2
Cesson	26/01, 12 et 16/02/2024	3,2

Comparaison PMbio (AE33) - PMbio (filtres)

Il est possible de mettre en parallèle les PMbio (AE33) estimées via la mesure en continu du BC et les PMbiofiltres estimées via l'analyse des filtres. Les graphiques ci-dessous présentent une bonne corrélation avec des $R^2 > 0,9$. Cela permet de confirmer les estimations via les 2 méthodologies et d'appliquer l'estimation des PMbiofiltres au niveau du site de l'Ecole Leroux (non équipé d'AE33).



IX2. Représentativité des mesures de particules fines - Comparaison 2023 - 2024

Les conditions météorologiques pendant la campagne étant différentes des normales saisonnières, les données de mesures de l'hiver 2024 sont comparées à celles de l'année précédente. Afin de se rendre compte de l'influence de ces paramètres météorologiques sur les niveaux de particules dans l'air ambiant, les concentrations de particules fines pour la station Thabor et Kergoff obtenues du 18 janvier au 28 février 2024 sont comparées à celles mesurées pendant la même période en 2023 (tableau ci-dessous). Ainsi les concentrations moyennes de PM10 et PM2,5 à la station Thabor pendant la campagne en 2024 sont inférieures respectivement de -29% et -41% par rapport aux

moyennes en 2023 sur la même période. Au niveau de la station rurale nationale Kergoff située en Centre Bretagne, le constat est similaire avec des concentrations moyennes et des médianes en particules fines PM10 et PM2,5 plus faibles en 2024 par rapport à 2023. A noter que les concentrations maximales horaires sont quant à elles proches entre les 2 années avec une concentration maximale horaire en PM2,5 à la station Thabor supérieure en 2024 par rapport à 2023. Les maximales horaires en particules fines PM10 et PM2,5 sont respectivement de -4% et + 19% entre les 2 années pour la station Thabor.

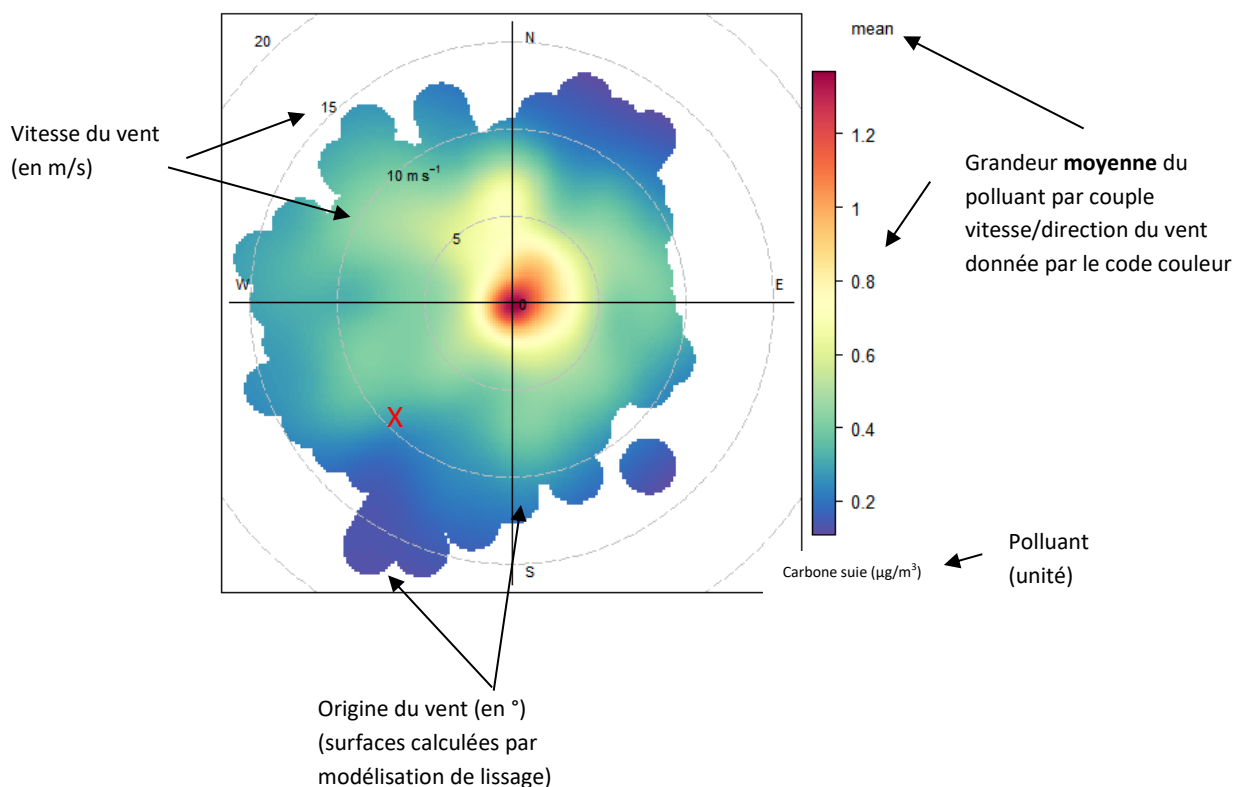
Cela révèle que les conditions particulières (températures douces pour la saison, mois de février pluvieux) pendant la réalisation de la campagne de mesures ont eu pour effet une sous-estimation certaine des niveaux moyens de particules fines mesurées pour une période hivernale, liée à un lessivage de l'atmosphère mais aussi à une utilisation du chauffage au bois plus faible (donc moins d'émissions de particules liées à la combustion de bois).

Il est donc important de considérer les résultats moyens de cette étude comme étant plus faibles que dans les conditions d'un hiver froid et sec. En revanche, à l'échelle horaire les niveaux observés en particules fines PM10 et PM2,5, notamment au niveau de la station urbaine de fond Thabor, sont similaires. Ainsi, les maximales mesurées pendant la campagne sont représentatives.

	Concentrations en particules fines ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10		PM2,5	
		Station Thabor	Station Kergoff	Station Thabor	Station Kergoff
2024 (18/01 – 28/02)	Maximale horaire	89,9	62,6	85,1	22,7
	Moyenne horaire	14,7	8,6	9,5	4,9
	Médiane	11,5	6,3	7,2	3,9
2023 (18-01 – 28/02)	Maximale horaire	93,3	97,9	71,4	26,4
	Moyenne horaire	20,8	14,3	16,2	6,5
	Médiane	16,7	8,7	12,2	5

IX3. Lecture des roses de pollution

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



Exemple de lecture **X** : Concentration moyenne en carbone suie de $0,2 - 0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (cf échelle de couleur) pour des vents de Sud-Ouest à une vitesse d'environ $8 - 9 \text{ m/s}$.

IX4. Contribution du chauffage au bois en France

Ci-dessous des données issues du travail CARA sur l'étude de la combustion de biomasse sur les concentrations de PM10 dans 10 agglomérations au cours de l'hiver 2014 – 2015¹⁶.

Ville	Contribution hivernale moyenne de la combustion de biomasse dans les PM10
Rouen	20%
Reims	19%
Strasbourg	20%
Nantes	22%
Poitiers	29%
Lyon	21%
Grenoble	36%
Bordeaux	37%
Marseille	17%
Nice	20%

IX5. Présentation d'Air Breizh

a) Présentation générale

La surveillance de la qualité de l'air est assurée en France par des associations régionales, constituant le dispositif national représenté par la Fédération ATMO France.

Ces organismes, agréés par le Ministère de la Transition écologique et solidaire, ont pour missions de base, la mise en œuvre de la surveillance et de l'information sur la qualité de l'air, la diffusion des résultats et des prévisions, et la transmission immédiate au Préfet et au public, des informations relatives aux dépassements ou prévisions de dépassements des seuils de recommandation et d'information du public et des seuils d'alerte.

En Bretagne, cette surveillance est assurée par Air Breizh depuis 1986.

¹⁶ LCSQA-INERIS-DRC-16-159637-01163A/ programme CARA_chauffage au bois_hiver 2014-15

Le réseau de mesure s'est régulièrement développé et dispose en 2024, de 14 stations de mesure, réparties sur le territoire breton, ainsi que d'un laboratoire mobile, de cabines et de différents préleveurs, pour la réalisation de campagnes de mesure ponctuelles.

L'impartialité de ses actions est assurée par la composition quadripartite de son Assemblée Générale regroupant quatre collèges :

- Collège 1 : services de l'Etat,
- Collège 2 : collectivités territoriales,
- Collège 3 : émetteurs de substances polluantes,
- Collège 4 : associations de protection de l'environnement et personnes qualifiées.

b) Missions

- **Surveiller les polluants urbains** nocifs (SO₂, NO₂, CO, O₃, Métaux lourds, HAP, Benzène, PM10 et PM2.5) dans l'air ambiant,
- **Informers la population, les services de l'Etat, les élus, les industriels...**, notamment en cas de pic de pollution. Diffuser quotidiennement l'indice ATMO, sensibiliser et éditer des supports d'information : plaquettes, site web...,
- **Etudier l'évolution de la qualité de l'air au fil des ans**, et vérifier la conformité des résultats par rapport à la réglementation.
- **Apporter son expertise sur des problèmes de pollutions spécifiques** et réaliser des campagnes de mesure à l'aide de moyens mobiles (laboratoire mobile, tubes à diffusion, préleveurs, jauges OWEN...) dans l'air ambiant extérieur et intérieur

c) Un observatoire régional de la qualité de l'air

La surveillance de la qualité de l'air pour les polluants réglementés est assurée via **des stations de mesures réparties au niveau des grandes agglomérations bretonnes**. Ce dispositif comptant une quarantaine d'analyseurs en continu, est complété par d'autres outils comme **l'inventaire spatialisé des émissions** et **la modélisation**, qui permettent d'assurer une meilleure couverture spatiale de notre région.



www.airbreizh.asso.fr

3 E, rue de Paris
Atalis 2,
35510 CESSON-SEVIGNE
Tél. 02 23 20 90 90