

Évaluation et sources du Black Carbone en Hauts-de-France entre 2015 et 2020

02/2020/SZH/V0

Etude menée entre 2015 et 2020

Auteur : Shouwen ZHANG

Relecteurs : Nathalie DUFOUR, Benoit ROCQ

Diffusion : 02 juin 2022

Avant-propos

Atmo Hauts-de-France est une association de type « loi 1901 » agréée par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (décret 2007-397 du 22 mai 2007) au même titre que l'ensemble des structures chargées de la surveillance de la qualité de l'air, formant le réseau national ATMO. Ses missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. Atmo Hauts-de-France est agréée du 1^{er} janvier 2019 au 31 décembre 2022, au titre de l'article L.221-3 du Code de l'environnement.

Conditions de diffusion

Atmo Hauts-de-France communique publiquement sur les informations issues de ses différents travaux et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ses travaux. A ce titre, les rapports d'études sont librement disponibles sur le site www.atmo-hdf.fr.

Responsabilités

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Atmo Hauts-de-France. Ces données ne sont pas rediffusées en cas de modification ultérieure. Les résultats sont analysés selon les objectifs de l'étude, le contexte et le cadre réglementaire des différentes phases de mesures, les financements attribués à l'étude et les connaissances métrologiques disponibles.

Avertissement

Atmo Hauts-de-France n'est en aucune façon responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses ou de toute œuvre utilisant ses mesures et ses rapports d'études pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

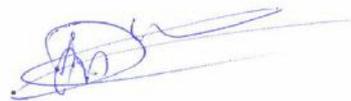
Toute utilisation partielle ou totale de ce document (extrait de texte, graphiques, tableaux, ...) doit faire référence à l'observatoire dans les termes suivants : © **Atmo Hauts-de-France – Rapport N°02/2020/SZH/V0**.

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

- depuis le formulaire de contact disponible à l'adresse <http://www.atmo-hdf.fr/contact.html>
- par mail : contact@atmo-hdf.fr
- par téléphone : 03 59 08 37 30

Réclamations

Les réclamations sur la non-conformité de l'étude doivent être formulées par écrit dans les huit jours de la livraison des résultats. Il appartient au partenaire de fournir toute justification quant à la réalité des vices ou anomalies constatées. Il devra laisser à Atmo Hauts-de-France toute facilité pour procéder à la constatation de ces vices pour y apporter éventuellement remède. En cas de litige, un accord amiable sera privilégié. Dans le cas où une solution n'est pas trouvée la résolution s'effectuera sous l'arbitrage des autorités compétentes.

	Nom	Qualité	Visa
Approbation	Nathalie Dufour	Responsable du Service Etudes	

Version du document : V3 basé sur trame vierge : EN-ETU-20

Date d'application : 01/01/2021

Sommaire

1. Synthèse de l'étude.....	6
2. Enjeux et objectifs de l'étude	8
3. Matériels et méthodes.....	10
3.1. Matériel utilisé.....	10
3.2. Méthode utilisée.....	10
3.3. Validation des données	11
3.4. Répartition de sources : le paramètre Alpha	12
4. Contexte environnemental	14
4.1. Localisation des points de mesure	14
4.2. Périodes de mesures.....	15
5. Résultats de l'étude	16
5.1. Résultats globaux.....	16
5.2. Variation journalière des PM_{10} et $PM_{2.5}$	24
5.3. Variation saisonnière	29
5.4. Variation pluriannuelle	31
5.5. Rose de pollution	32
5.6. Episodes de pollution	33
5.7. Le BC, traceur d'incendie.....	36
5.8. Impact du confinement lié à la pandémie du COVID-19.....	38
6. Conclusion et perspectives.....	41

Annexes

Annexe 1 : Glossaire.....	43
Annexe 2 : Choix de la valeur alpha.....	45
Annexe 3 : Brown Carbon.....	46
Annexe 4 : Comparaison EC/BC et $PM_{biomasse}/BC_{wb}$	48

Illustrations

Figure 1 Photo de l'aéthalomètre modèle AE33 (source : Atmo HdF)	10
Figure 2 Schéma de validation des données AE33 (source : Guide LCSQA AE33 version 2020).....	11
Figure 3 Valeur moyenne d'alpha pour Fives, Leeds et Creil en 2019-2020.....	12
Figure 4 Evolution saisonnière de alpha pour Fives, Leeds et Creil en 2019-2020	13
Figure 5 Localisations de points de mesures du BC en région HdF (bleu : site en continu ; orange : campagne courte durée)	14
Figure 6 Comparaison des niveaux de BC en région Hauts-de-France (site trafic : rouge ; site urbain : bleu clair ; site industriel : gris ; site portuaire : bleu foncé ; site rural : vert)	16
Figure 7 BC mesuré sur les sites trafic en France en 2019 (source de données : Géod'air).....	17
Figure 8 BC mesuré sur les sites urbains en France en 2019 (source de données : Géod'air)	17
Figure 9 PM_{wb} et PM_{ff} au niveau national (12-22/09/2021), source Shiny Programme CARA	18
Figure 10 Comparaison des niveaux de BC pour une même période d'étude en région Hauts-de-France.....	21
Figure 11 La répartition des sources (combustion de biomasse ou carburant fossile) pour les 10 sites étudiés.....	23
Figure 10 Comparaison la variation journalière de PM_{ff} , PM_{wb} , $PM_{2.5}$ et PM_{10} pour Roubaix et Fives en 2015-2016.....	24
Figure 11 Comparaison la variation journalière de PM_{ff} , PM_{wb} , $PM_{2.5}$ et PM_{10} pour Fives, Leeds et Creil en 2019	25
Figure 14 Comparaison la variation journalière de PM_{ff} , PM_{wb} , $PM_{2.5}$ et PM_{10} pour différente typologie de site	28
Figure 15 Variation saisonnière du BC à Fives, Leeds et Creil en 2019 et 2020.....	29
Figure 16 Variation saisonnière du BC_{ff} à Fives, Leeds et Creil en 2019 et 2020.....	29
Figure 17 Variation saisonnière du BC_{wb} à Fives, Leeds et Creil en 2019	30
Figure 18 Variation pluriannuelle du BC, BC_{ff} et BC_{wb}	31
Figure 19 Rose de pollution pour 9 sites étudiés (sauf Roubaix, pas de données vents disponibles)	32
Figure 20 Series temporelle des PM_{ff} , PM_{wb} , BC, PM_{10} et $PM_{2.5}$ à Creil et Lille Leeds	33
Figure 21 Series temporelle des PM_{ff} , PM_{wb} , BC, PM_{10} et $PM_{2.5}$ à Amiens, Creil et Lille Fives	34
Figure 20 Series temporelle des PM_{ff} , PM_{wb} , BC, PM_{10} et $PM_{2.5}$ à Lille Fives et Campagne-lès-Boulonnais.....	35
Figure 23 Composition chimique des particules PM_{10} à Lille (Source : V.Riffault, IMT Lille Douai)	35
Figure 24 BC, $PM_{2.5}$ et PM_{10} durant le Feu de Rouen (26-28 septembre 2019).....	36
Figure 25 BC, $PM_{2.5}$ et PM_{10} durant l'incendie à Compiègne	37
Figure 26 Evolution de l'impact du confinement sur le BC mesuré à Leeds et à Fives.....	38

Figure 25 Evolution de l'impact du confinement sur le BC_{ff} mesuré à Leeds et à Fives.....	39
Figure 28 Evolution de l'impact du confinement sur le BC_{wb} mesuré à Leeds et à Fives.....	39
Figure 29 Comparaison du Brown Carbon et PM_{wb} à Leeds, Fives, Amiens et Creil en 2020.....	47
Figure 30 Comparaison BC/EC à Fives pour la période 01-05/2018 et pour la période 2019-2020 ..	48
Figure 31 Comparaison $PM_{biomasse}/BC_{wb}$ à Fives pour la période 01-05/2018 et pour la période 2019-2020 ..	49

Tableaux

Tableau 1 Typologie de station et périodes de mesures du BC.....	15
Tableau 2 Statistiques sur l'exposant d'Angström (α).....	45

1. Synthèse de l'étude

Le « Black Carbon » (BC) est un composant des particules fines émis par la **combustion incomplète** de combustibles carbonés qui **impacte négativement** la qualité de l'air, le climat et la santé humaine.

Depuis 2015, les concentrations en Black Carbon ont été mesurées à l'aide d'un **aéthalomètre** (AE33) à différents endroits et en différentes périodes dans la région **Hauts-de-France**.

Dans ce rapport, le BC et ses deux sources principales (*BCff*: combustion de **carburant fossile** ou *BCwb*: combustion de **biomasse**) sont étudiés pour la période de 2015 à 2020.

Quelle est la concentration moyenne du Black Carbon en Hauts-de-France ?

La concentration moyenne du BC (toutes périodes confondues) mesurée en région Hauts-de-France varie entre 0.5 et $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les concentrations sont :

- **plus élevées** pour les sites en **proximité automobile**,
- **plus faibles** en **milieu rural**.

Le BC montre un niveau similaire sur les deux sites d'influence urbaine de Lille et Creil ($\sim 1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Les sites **industriels** et **portuaires** présentent un niveau similaire aux sites urbains.

Et par rapport aux autres régions ?

Parmi les sites en proximité du trafic en France, le BC mesuré à Lille Leeds est **4 fois plus faible** que celui du Boulevard Périphérique Est à Paris. Il se situe derrière les autres mesures d'influence trafic (Reims, Paris centre et Lyon), mais **plus élevé** que le site de Rouen. Les niveaux du BC de nos deux mesures d'influence urbaine (Lille Fives et Creil) se situent **dans la moyenne** des sites urbains en France.

Quelles sont les sources d'émission du Black Carbon ?

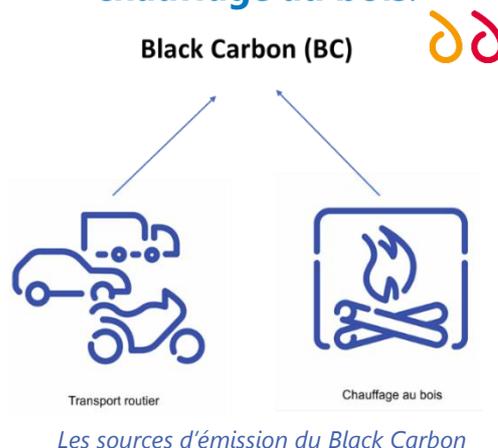
La combustion de **carburant fossile** contribue entre 65 et 90% du BC mesuré ; elle est plus importante pour les sites sous **influence trafic** ($84-90\%$).

La combustion de **biomasse** représente entre 10% et 35% de BC et est plus élevée pour le **site rural** (35%).

Les mesures en **milieu urbain** et en proximité **portuaire** présentent des niveaux intermédiaires (17 à 27% lié au chauffage au bois, 73 à 83% lié au trafic).

Le site sous influence **industrielle** présente une répartition similaire au site **rural** (69% lié à combustion de fioul fossile et 31% lié au chauffage au bois).

66 Le Black Carbon, un polluant issu de la combustion incomplète émis principalement par le **transport routier** et le **chauffage au bois**.



Comment la concentration du Black Carbon varie-t-elle dans le temps ?

Les particules PM10 issues de la combustion de **carburant fossile** présentent **2 pics significatifs** liés aux **heures de pointe** du **trafic** (matin 7h-9h et soir 17h-20h) et celles issues de la combustion de **biomasse** sont plutôt importantes durant la soirée (19h-23h).

La **concentration** du BC montre une **variation saisonnière** significative pour les 3 sites en continu (Lille-Fives, Lille-Leeds et Creil) : en 2019, les niveaux du BC en **hiver** ($\sim 1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont environ 2 fois plus importants qu'en été ($0.75\text{-}0.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

La **variation pluriannuelle** montre une **diminution** importante du BC : -36% pour Lille Leeds (2017-2020), -28% pour Lille Fives (2017-2020) et -13% pour Creil (2019-2020).

Le BC issu :

- de la combustion de carburant fossile (BC_{ff}) montre une variation pluriannuelle similaire au BC,
- de la combustion de biomasse (BC_{wb}) reste à un niveau **stable** pour Leeds et Creil et **augmente** entre 2017 et 2020 (+38%) pour Lille Fives.

A noter que les mesures de l'année 2020 sont impactées par le confinement lié à la pandémie Covid-19.

CHIFFRES CLES

65 à 90% du BC mesuré émis par la combustion de carburant fossile

10 à 35% du BC mesuré émis par la combustion de biomasse

2017-2020 diminution importante du BC

2 fois plus de BC en hiver qu'en été

A quoi peut servir la mesure de Black Carbon en cas d'épisode de pollution ou d'incident / accident ?

La mesure du BC peut aider à mieux comprendre la **nature** des épisodes de pollution aux particules.

Dans certains cas, les deux sources estimées (trafic local et chauffage au bois) peuvent expliquer jusqu'à **80-90%** des particules PM10 mesurées. Ou au contraire, il peut indiquer que ce sont les autres polluants responsables pour cet épisode. Comme le Black Carbon est un bon indicateur pour tous les types de combustion non complète, il peut être également utilisé comme traceur en cas d'**incendie**.

Alors que les autres méthodes d'identification de source (type prélèvement/analyse) nécessitent un temps d'analyse long (quelques jours à quelques semaines), la mesure du BC par l'aéthalomètre AE33 permet de fournir les informations **en temps réel** pour la détection des panaches.

Quel a été l'impact du confinement sur la mesure de Black Carbon ?

Le confinement de printemps 2020 lié à la pandémie Covid-19 a révélé un effet :

- sur les niveaux du BC issu du **trafic** qui voit ses **concentrations baisser** (diminution du trafic et conditions météorologiques dispersives),
- sur les niveaux du BC lié au **chauffage au bois** montrant une **hausse** en lien avec la présence plus importante des personnes à leur domicile.

Cette étude présente les premiers résultats des mesures du Black Carbon et ses sources principales en région Hauts-de-France. Elle est co-financée par la Région Hauts-de-France, la direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) Hauts-de-France et Atmo Hauts-de-France.

2. Enjeux et objectifs de l'étude

Le Black Carbon (BC), appelé également le carbone suie, est formé par la combustion incomplète de combustibles carbonés. A l'heure actuelle, il n'y a pas de définition scientifique pour ce composé. Deux caractéristiques principales permettent de distinguer ce polluant : il s'agit d'un composé constitué de l'élément carbone (C) et sa couleur noire absorbe le rayonnement lumineux. Le BC se trouve dans les particules fines dont le diamètre est inférieur à 2,5 µm (PM2.5).

Source

Le BC est un polluant primaire émis directement dans l'air par la combustion incomplète de combustibles fossiles, de biomasse et de biocarburants.

Les sources principales sont les transports (trafic routier, bateaux, avions...), le chauffage résidentiel (bois ou charbon), les centrales électriques utilisant du pétrole lourd ou du charbon, les processus industriels, le brûlage des déchets agricoles ou végétaux et les feux de forêt.

Effet climat

Le Black Carbon a un impact important sur le réchauffement climatique car il est très efficace pour absorber le rayonnement solaire. Il réduit l'albédo terrestre lorsqu'il se dépose sur la neige et la glace. Le BC peut également modifier indirectement l'absorption ou de la réflexion du rayonnement solaire par l'interaction avec les nuages.

Des études récentes estiment que les émissions de Black Carbon sont le deuxième contributeur au réchauffement climatique après les émissions de dioxyde de carbone¹.

Effet santé

Le Black Carbon présente des risques pour la santé, car il peut pénétrer profondément dans les poumons. Puis il peut passer dans le sang à travers les alvéoles grâce à sa petite taille, favorisant les risques cardio-vasculaires. De plus, le BC sert aussi de vecteurs à différentes substances toxiques voire cancérigènes ou mutagènes (métaux, HAP (Hydrocarbure aromatique polycyclique) ...).

En 2012, le rapport « Health effects of black carbon »² publié par l'OMS indique que l'exposition au BC peut avoir, des effets sanitaires variés à court ou plus long terme : mortalité cardiovasculaire, mortalité toutes causes confondues, et hospitalisations cardiopulmonaires.

En 2018, l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES), a recommandé une surveillance nationale du 1,3-butadiène et un suivi renforcé des particules ultrafines (PUF) et du carbone suie. En 2019, l'Anses a publié un rapport sur les particules de l'air ambiant extérieur, qui confirme avec des niveaux de preuve forts, les effets sur la santé (atteintes respiratoires et cardiovasculaires et décès anticipés) liés à certaines composantes des particules de l'air ambiant dont les particules ultrafines, le carbone suie et le carbone organique.

¹ T. C. Bond et al., « Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118, n° 11 (16 juin 2013): 5380-5552, <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>.

² OMS, « Health effects of black carbon », 2012.

Objectifs de cette étude

Les objectifs principaux dans cette étude sont de :

- Valider et optimiser la mesure du BC et ses sources principales (trafic ou combustion de biomasse) ;
- Documenter et comparer les niveaux de concentration du Black Carbon sur différents points en région Hauts-de-France ;
- Comparer les niveaux du BC mesurés dans notre région aux autres sites en France ;
- Estimer la répartition de la source des émissions du BC (trafic ou combustion de biomasse) ;
- Comprendre la variation journalière/saisonnaire/pluriannuelle du BC et ses sources ;
- Caractériser les épisodes de pollution et identifier les panaches d'incident à l'aide de mesures du BC ;
- Comprendre l'impact du confinement du printemps 2020 lié au Covid-19 sur les niveaux du BC et ses sources ;

3. Matériels et méthodes

3.1. Matériel utilisé

L'aéthalomètre AE33 (Magee Scientific) est utilisé pour mesurer la concentration massique du Black Carbon. L'instrument prélève les particules en air ambiant en continu sur la bande filtrante. Ensuite, il mesure la transmission lumineuse de la bande filtrante vierge et celle de la bande filtrante avec des particules. Cette analyse est effectuée à sept longueurs d'onde optiques dans la gamme du proche infrarouge (370 nm) au proche ultraviolet (950 nm). Enfin, l'AE33 calcule les concentrations de BC en analysant l'atténuation de la transmission lumineuse en temps réel (résolution temporelle à 1 min).

La concentration de BC est calculée à partir de la mesure optique à la longueur d'onde **880 nm**. Les autres longueurs d'onde peuvent être utilisées pour estimer la contribution des différentes sources de BC.

La concentration d'équivalent du BC à sept longueurs d'onde (370 nm, 470 nm, 520 nm, 590 nm, 660 nm, 880 nm et 950 nm) est notée comme BC1, BC2, ..., BC7, respectivement.

Le débit a été fixé à 5 L/min avec la taille de coupure à 2.5 µm. Comparées aux méthodes thermiques utilisées pour quantifier le carbone élémentaire (EC) et ses sources, les méthodes optiques proposent généralement une résolution temporelle plus fine (à la minute).



Figure 1 Photo de l'aéthalomètre modèle AE33 (source : Atmo HdF)

3.2. Méthode utilisée

La répartition des sources du Black Carbon est basée sur l'étude de Sandradewi et al. (2008)³.

Une fois que les deux sources du BC lié à la combustion de combustibles fossiles (BC_{ff}) et à la combustion de biomasse (BC_{wb}) sont calculées, elles peuvent ensuite être utilisées pour estimer la contribution de ces deux sources à la concentration de PM₁₀. Les deux fractions de PM₁₀ notées PM_{ff} et PM_{wb}, sont principalement constituées du BC et d'aérosols organiques primaires.

$$\begin{aligned} \text{PM}_{\text{ff}} &= a \times \text{BC}_{\text{ff}} \\ \text{PM}_{\text{wb}} &= b \times \text{BC}_{\text{wb}} \end{aligned}$$

Les coefficients *a* et *b* utilisés dans ce rapport pour calculer ces deux fractions sont basés sur (i) la littérature scientifique pour la contribution fossile, et

Pour en savoir plus

Cette méthode est basée sur le fait que le coefficient d'absorption des particules $b_{\text{abs}}(\lambda)$ est proportionnel à $\lambda^{-\alpha}$, avec λ la **longueur d'onde** et α l'**exposant d'absorption d'Angström**. Ce modèle suppose également que le coefficient d'absorption optique des particules ($b_{\text{abs}}(\lambda)$) est la somme des fractions de combustion de biomasse et de combustion de combustibles fossiles. Dans cette étude, les exposants d'Ångström pour estimer ces deux sources de BC sont fixé à : $\alpha_{\text{ff}}=1$ pour le combustible fossile et $\alpha_{\text{wb}}=2$ pour la biomasse.

³ Jisca Sandradewi et al., « Using Aerosol Light Absorption Measurements for the Quantitative Determination of Wood Burning and Traffic Emission Contributions to Particulate Matter », *Environmental Science & Technology* 42, n° 9 (1 mai 2008): 3316-23, <https://doi.org/10.1021/es702253m>.

(ii) les études LCSQA pour la contribution biomasse⁴, avec **a=2** et **b=10**, respectivement. La précision de cette estimation est de l'ordre de 50%.

A noter que la concentration de **PM_{ff}** ne tient pas compte des particules issues de l'abrasion des pneus, des freins et les poussières remises en suspension, ni les particules secondaires formées à partir des émissions de précurseurs gazeux (dont les NO_x).

3.3. Validation des données

La validation **technique** des données (en quart horaire) de fait en deux étapes.

La première étape est de vérifier que l'instrument respecte bien les critères qualités techniques assurant son fonctionnement optimal.

La deuxième étape est d'assurer la qualité de chaque point de mesure. Le schéma de validation est indiqué sur la Figure 2.

Une mesure quart-horaire (QH) doit être invalidée :

- si une seule valeur de $BC(\lambda_i)$ est négative ;
- si une seule valeur de $BC(\lambda_i)$ est manquante ;
- si elle correspond aux valeurs nulles de $BC(\lambda_i)$ à cause d'un changement de spot ruban ;
- si le coefficient de corrélation R^2 est inférieur à 0,9 ;
- Si le coefficient d'angström $\alpha < 0,75$ ou > 3 .

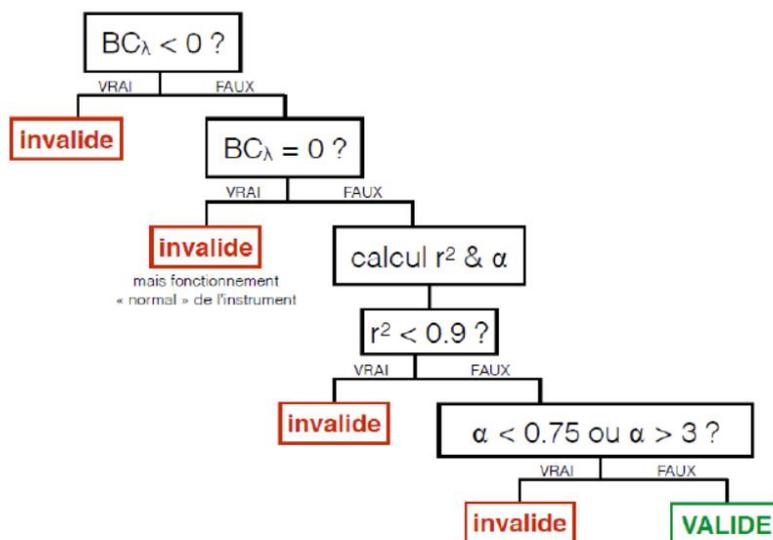


Figure 2 Schéma de validation des données AE33 (source : Guide LCSQA AE33 version 2020)

La validation **environnementale** concerne principalement les deux paramètres suivants :

- La concentration de BC en ng/m³ mesuré à 880 nm ;
- La contribution du chauffage au bois BB (%) pour « Biomass Burning ».

Pour plus de détails, voir le « Guide méthodologique pour la mesure du « Black Carbon » par Aéthalomètre multi longueur d'onde AE33 dans l'air ambiant (Version 2020) », page 31.

⁴ LCSQA, « Guide méthodologique pour la mesure du « Black Carbon » par Aéthalomètre multi longueur d'onde AE33 dans l'air ambiant (Version 2020) », octobre 2020.

3.4. Répartition de sources : le paramètre Alpha

Dans cette partie, nous allons discuter le paramètre **Alpha** qui permet de mieux comprendre la répartition des sources associées.

Comme déjà discuté dans la section 3.2, le coefficient d'absorption des particules $b_{abs}(\lambda)$ est proportionnel à $\lambda^{-\alpha}$, avec λ la longueur d'onde et α l'**exposant d'absorption d'Angström** qui décrit la dépendance spectrale du coefficient d'absorption. L'estimation des deux sources liées au BC est basée sur le choix de valeur d'alpha fixe ($\alpha_{ff} = 1$ et $\alpha_{wb} = 2$). Néanmoins, ces valeurs peuvent varier en fonction du site et de la saison.

En air ambiant, α est principalement compris entre 0.8 et 2.5 selon la littérature. Le BC émis par la combustion de **carburant fossile** possède un coefficient α **proche de 1** (entre 0.8 et 1.1). En revanche, le BC issu de la **combustion de biomasse** présente une forte absorption dans la gamme UV, ce qui se traduit par une valeur α **plus élevée**. Par conséquent, la valeur α varie en fonction de la typologie du site et en fonction de la saison.

La valeur moyenne d'alpha sur la période de 2019 à 2020 à Fives, Leeds et Creil est présentée sur la Figure 3. La valeur la plus faible se trouve à **Leeds (1.23)** ; elle se rapproche de la valeur définie pour la **combustion de carburant fossile** ($\alpha = 1$).

A **Creil** cette valeur est à **1.29**, ce qui signifie que ce site est le plus impacté par la **combustion de biomasse**. A **Lille Fives**, α enregistre une valeur de **1.26**, indiquant une influence de ces **deux sources avec moins** combustion de biomasse que à Creil.

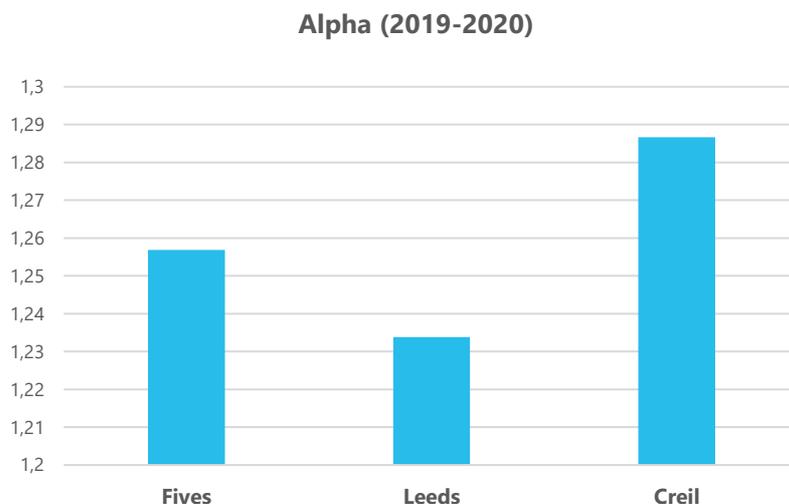


Figure 3 Valeur moyenne d'alpha pour Fives, Leeds et Creil en 2019-2020

La variation saisonnière d'alpha entre 2019 et 2020 est présentée sur la Figure 4. La valeur α **est plus élevée (1.3-1.4) en période froide** pour les 3 sites en lien avec l'utilisation du chauffage au bois plus importante.

La **valeur alpha est plus élevée au printemps 2020** pour toutes les 3 stations. Néanmoins, la température moyenne printanière à Lille et Creil en 2020 (11.6 et 11.5°C) est plus élevée qu'en 2019 (10.9°C et 10.5°C). Le confinement du printemps 2020 (17 mars – 11 mai) peut expliquer cette phénomène (plus d'utilisation de chauffage au bois à domicile à cause de télétravail, chômage partiel et l'école à distance...) et donc une augmentation de la valeur α .

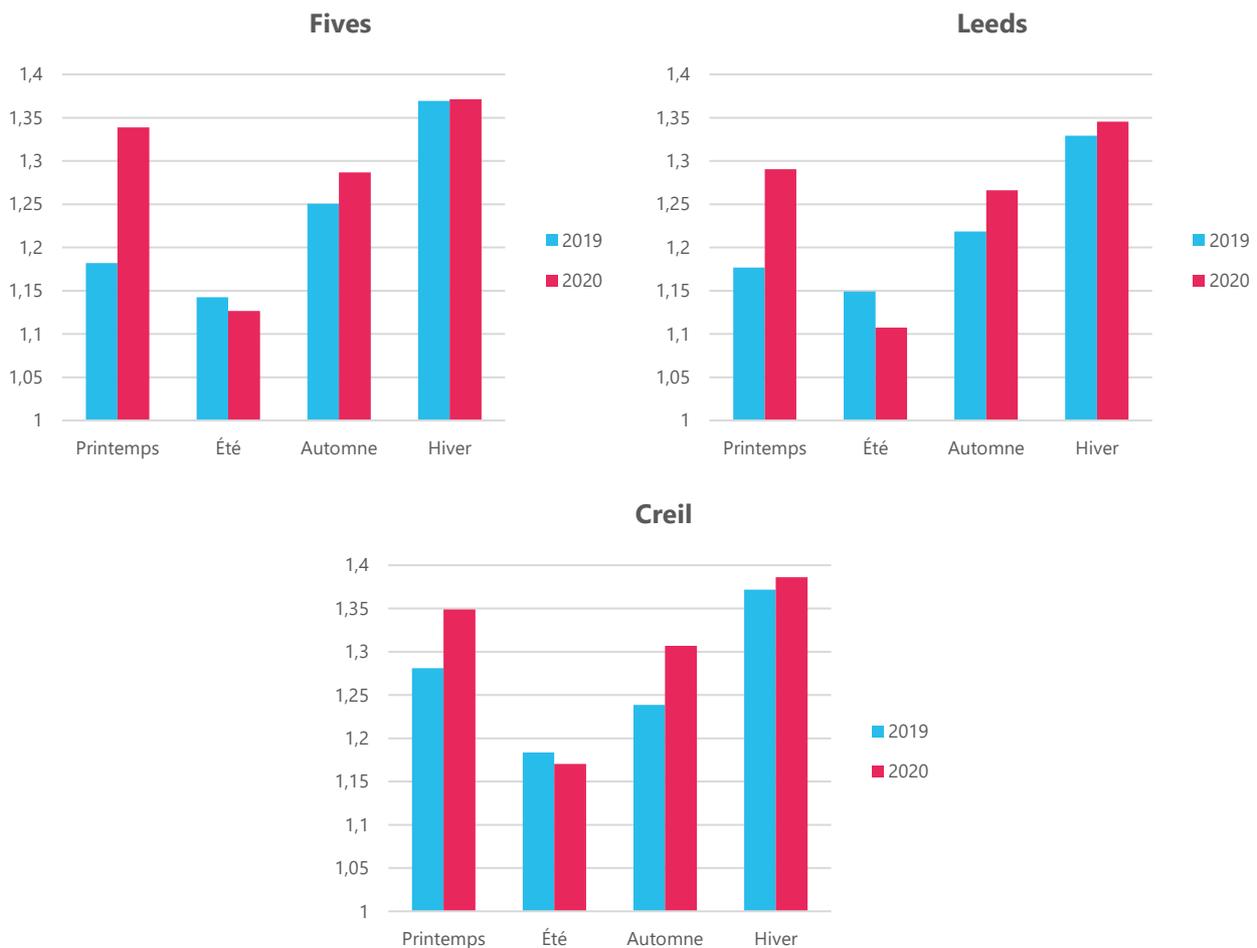


Figure 4 Evolution saisonnière de alpha pour Fives, Leeds et Creil en 2019-2020

Le choix de la valeur alpha influence directement la répartition des sources lié au BC. L'optimisation des coefficients α_{ff} et α_{wb} pour nos sites est discutée dans l'Annexe 2.

- **Le BC émis par la combustion de carburant fossile possède un coefficient α proche de 1. Le BC issu de la combustion de biomasse présente une valeur α plus élevée.**
- **La valeur moyenne d'alpha 2019-2020 est de 1.23 pour Leeds, 1.26 pour Lille Fives et 1.29 pour Creil.**
- **La valeur α est plus élevée (1.3-1.4) en période froide pour tous les 3 sites en lien avec l'utilisation du chauffage au bois.**
- **Au printemps 2020, la valeur alpha est plus élevée qu'en 2019 pour toutes les 3 stations, ce qui peut être expliqué par l'effet du confinement (plus d'utilisation de chauffage au bois à domicile).**

4. Contexte environnemental

4.1. Localisation des points de mesure

Les mesures du Black Carbon sont effectuées sur plusieurs territoires et sur différentes périodes en région Hauts-de-France depuis l'année 2015. Ces sites représentent des environnements différents (urbain, trafic, rural, industriel, portuaire...) au sein de la région.

La distribution spatiale des points de mesures est présentée sur la Figure 5.

Lille Fives (urbain), Lille Leeds (trafic) et Creil (urbain) sont les **3 stations fixes** qui surveillent le BC en continu. Les **autres 7 mesures** du BC (Dunkerque Port, Grande-Synthe, Calais, Campagne-lès-Boulonnais, Roubaix, Valenciennes Wallon, Amiens) sont effectuées dans le cadre d'autres études (ex., particules ultrafines 2018-2019⁵, BePoPi⁶) pour une **courte durée**.

A partir de 2022, les nouveaux points de mesures BC fixes seront choisis en lien avec la stratégie de caractérisation des particules en Hauts-de-France pour la période 2022-2026.

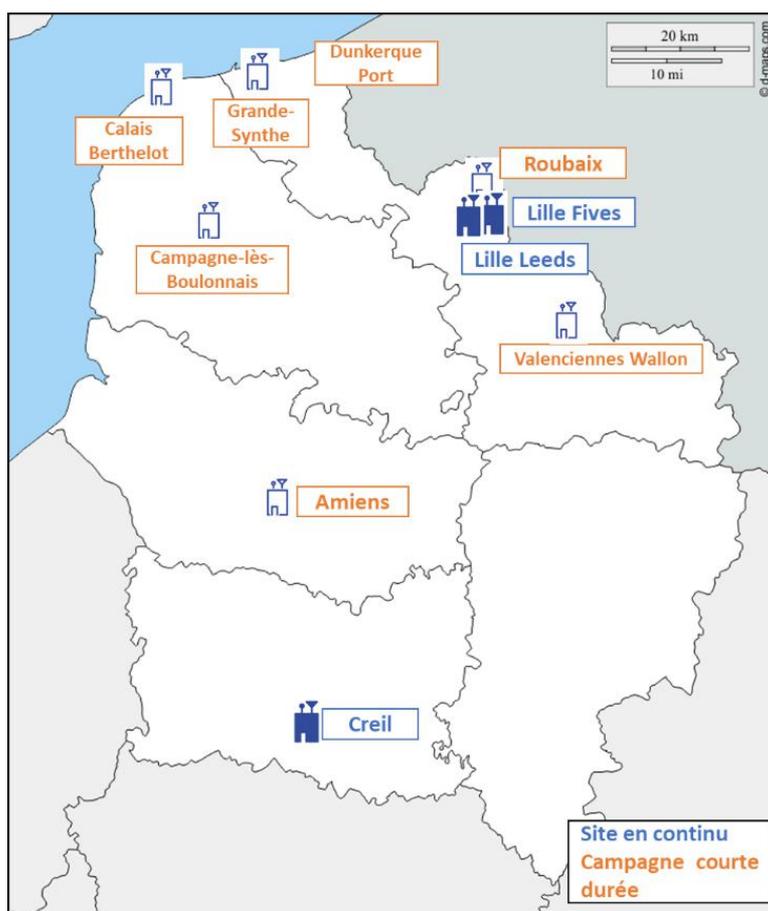


Figure 5 Localisations de points de mesures du BC en région Hdf (bleu : site en continu ; orange : campagne courte durée)

⁵ Atmo Hdf, « Surveillance des particules ultrafines dans la région Hauts-de-France », décembre 2020.

⁶ Atmo Hdf « Evaluation du rôle de la pollution atmosphérique sur les exacerbations de Broncho Pneumopathie Chronique Obstructive (BPCO) dans l'agglomération amiénoise », novembre 2021

4.2. Périodes de mesures

Les **10 points de mesures** du Black Carbon sont pris en compte dans cette étude avec différentes typologies : 4 stations urbaines, 2 stations trafic, 1 station rurale, 1 station industrielle, 1 station portuaire/urbaine et 1 station portuaire/industrielle.

Les périodes de mesures correspondantes sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 Typologie de station et périodes de mesures du BC

Station	Typologie	Périodes de mesures					
		2015	2016	2017	2018	2019	2020
Lille Fives	Urbain		■				
Roubaix	Trafic		■				
Lille Leeds	Trafic			■			
Creil	Urbain		■				
Grande-Synthe	Indus				■	■	
Campagne-lès-B.	Rural				■	■	■
Valenciennes	Trafic					■	■
Dunkerque Port	Port/indus					■	■
Calais Berthelot	Port/urbain						■
Amiens St-Pierre	Urbain					■	■

En vert les stations qui mesurent en continu

En jaune les études de plus courte durée

5. Résultats de l'étude

5.1. Résultats globaux

5.1.1. Niveaux de BC en région HdF (toutes périodes confondues)

La concentration moyenne du **Black Carbon** (toutes périodes confondues) mesurée en région Hauts-de-France est présentée sur la Figure 6. Les différentes typologies de site sont indiquées par la couleur : site trafic (rouge) ; site urbain (bleu clair) ; site industriel (gris) ; site portuaire (bleu foncé) ; site rural (vert).

Les concentrations correspondent la valeur moyenne de toutes les périodes confondues pour ce site. Les périodes de mesures pour chaque site sont déjà indiquées dans le Tableau 1. Comme les périodes de mesures sont différentes, cette comparaison reste une information indicative.

Les niveaux du BC sont **plus élevés** pour les 3 **sites trafic** (Valenciennes Wallon, Roubaix et Lille Leeds) avec une concentration moyenne comprise entre 1.6 et 2.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les deux **sites urbains** à Lille et à Creil montrent un niveau moyen autour de 1.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, plus élevé que le site urbain d'Amiens (0.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Le site industriel à Grande-Synthe présente un niveau similaire (1.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) aux sites urbains.

Le BC mesuré sur les deux sites portuaires (Calais : 0.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et Dunkerque port : 0.81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) est un peu plus faible que le site industriel. Le **site rural** à Campagne-lès-Boulonnais enregistre une concentration moyenne **plus faible** (~0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) que tous les autres sites.

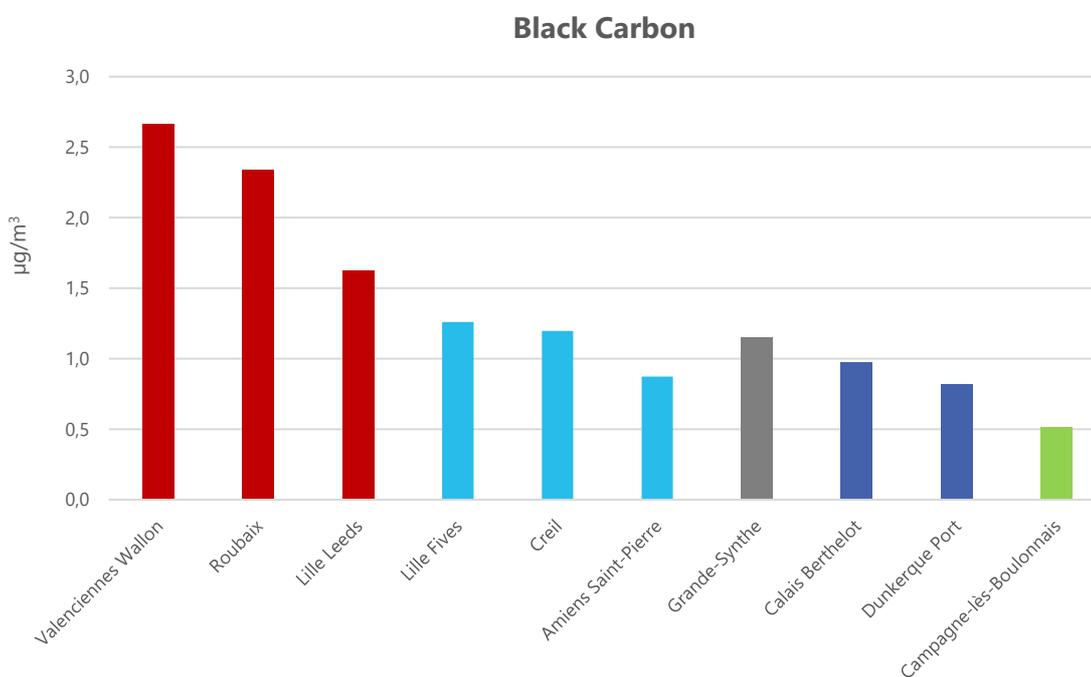


Figure 6 Comparaison des niveaux de BC en région Hauts-de-France (site trafic : rouge ; site urbain : bleu clair ; site industriel : gris ; site portuaire : bleu foncé ; site rural : vert)

5.1.2. Comparaison au niveau national

Dans cette partie, il est proposé de comparer les niveaux du **Black Carbon en région Hauts-de-France avec ceux des autres régions de France.**

Pour ceci, un premier travail est réalisé sur l'année 2019 ; tous les sites de mesure de mesure du BC en France avec **une couverture temporelle supérieure à 85% en 2019** sont pris en compte. L'étude porte sur les moyennes annuelles.

Parmi les sites trafic, **Lille Leeds** ($1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) est **4 fois plus faible que le long du Boulevard Périphérique Est à Paris** ($6.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Il se situe derrière les autres sites trafic (Reims, Paris centre et Lyon). Il est cependant légèrement plus élevé que le site trafic à Rouen ($1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

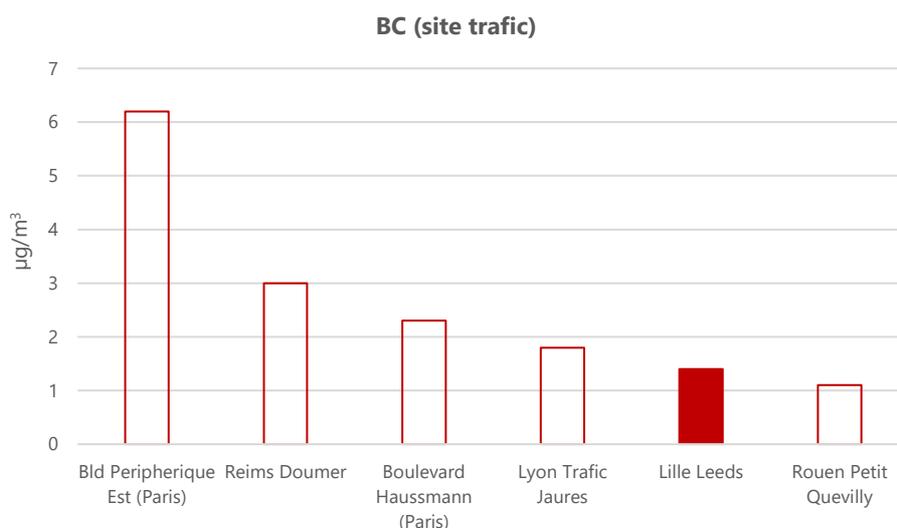


Figure 7 BC mesuré sur les sites trafic en France en 2019 (source de données : Géod'air)

Les deux sites urbains de la région (Fives et Creil) se situent dans la moyenne des autres sites urbains en France. Marignane (Provence-Alpes-Côte d'Azur) et Gennevilliers (Île-de-France) présentent des niveaux plus élevés ($1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Lille Fives montre une concentration identique à Chamonix ($1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et Creil a le même niveau que Grenoble, Lyon et Talence ($1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). La plus faible concentration du BC se trouve au Havre ($0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

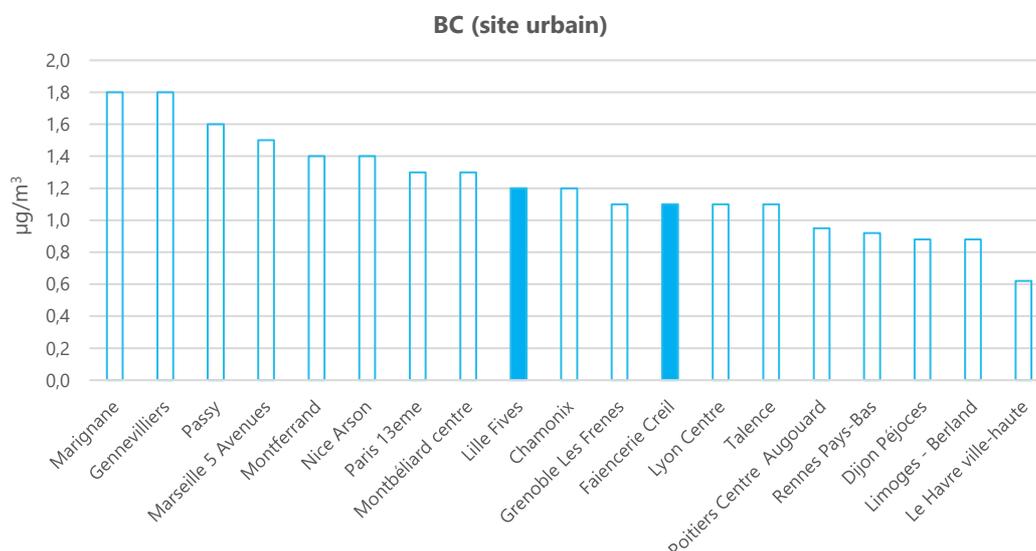


Figure 8 BC mesuré sur les sites urbains en France en 2019 (source de données : Géod'air)

Un second volet de comparaison avec le niveau national est présenté en Figure 9 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Elle présente l'évolution des concentrations en PM₁₀ attribuables aux sources de combustion de biomasse (PM_{wb}) et d'hydrocarbures (PM_{ff}) entre le 12 et le 22 septembre 2021. L'analyse montre que les deux sources sont bien présentes sur l'ensemble des sites, mais dans des quantités très variables. La somme de ces deux sources est assez importante à Lille Fives et Creil (10-20 µg/m³).



Figure 9 PM_{wb} et PM_{ff} au niveau national (12-22/09/2021), source Shiny Programme CARA ⁷

⁷ https://ineris.shinyapps.io/Programme_CARA/

- *La concentration moyenne du Black Carbon varie entre 0.5 et 2.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur la région Hauts-de-France.*
- *Les concentrations du BC sont plus élevées pour les sites en sous influence automobile et sont plus faibles en milieu rural.*
- *Le BC montre un niveau similaire sur les deux mesures de fond urbains de Lille et à Creil ($\sim 1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$).*
- *Les sites industriels et portuaires présentent un niveau similaire aux sites urbains.*
- *Parmi les sites trafic en France, le BC à Lille Leeds est 4 fois plus faible que celui du Boulevard Périphérique Est à Paris. Il se situe derrière les autres sites trafic (Reims, Paris centre et Lyon), mais reste plus élevé que le site trafic de Rouen.*
- *Les niveaux du BC de nos deux sites urbains (Lille Fives et Creil) se situent dans la moyenne des autres sites urbains en France.*

5.1.3. Comparaison pour les campagnes de courte durée (<= 1 an)

La concentration moyenne du Black Carbon pour plusieurs sites **sur une même période** de mesures est présentée sur la Figure 10. Cette comparaison permet de mieux comprendre les niveaux du BC à différents points en Hauts-de-France.

- Entre septembre 2015 et mai 2016, le BC mesuré sur le site trafic de **Roubaix** ($2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) est 60% plus élevé que le site urbain à Fives ($1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ce qui indique clairement le trafic routier est une source importante du BC.
- En mai et novembre 2019, le BC mesuré à **Valenciennes Wallon** (site trafic) est environ 3 fois plus élevé que celui de Creil, et environ 2 fois plus que celui de Fives et Leeds. La différence entre deux saisons est significative, les niveaux du BC à Valenciennes sont 40% plus élevés en automne qu'au printemps.
- En général, les mesures du BC à **Grande-Synthe** sont plus faibles que les 3 autres sites. La concentration du BC est environ 30 à 50% moins importante que pour le site trafic à Lille Leeds.
- Comme déjà indiqué dans la Figure 6, la concentration moyenne du BC à **Campagne-lès-Bouloonnais** est la plus faible parmi tous les sites. Son niveau est 2 à 3 fois moins élevé que les autres 3 sites.
- Le BC mesuré à **Calais** montre un niveau similaire aux 2 autres sites urbains, et reste plus faible (environ 30% moins) que le site trafic à Leeds.
- La concentration BC à **Dunkerque port** est entre 0.6 et $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui est toujours plus faible que les 3 autres stations ($0.7 - 1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$).
- En 2020, Le BC à **Amiens** ($0.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$) est environ 10% moins élevé qu'à Lille Fives et à Creil, et 20% moins important que le site trafic à Leeds. La concentration moyenne du BC à Lille Fives est très proche de celle à Creil.

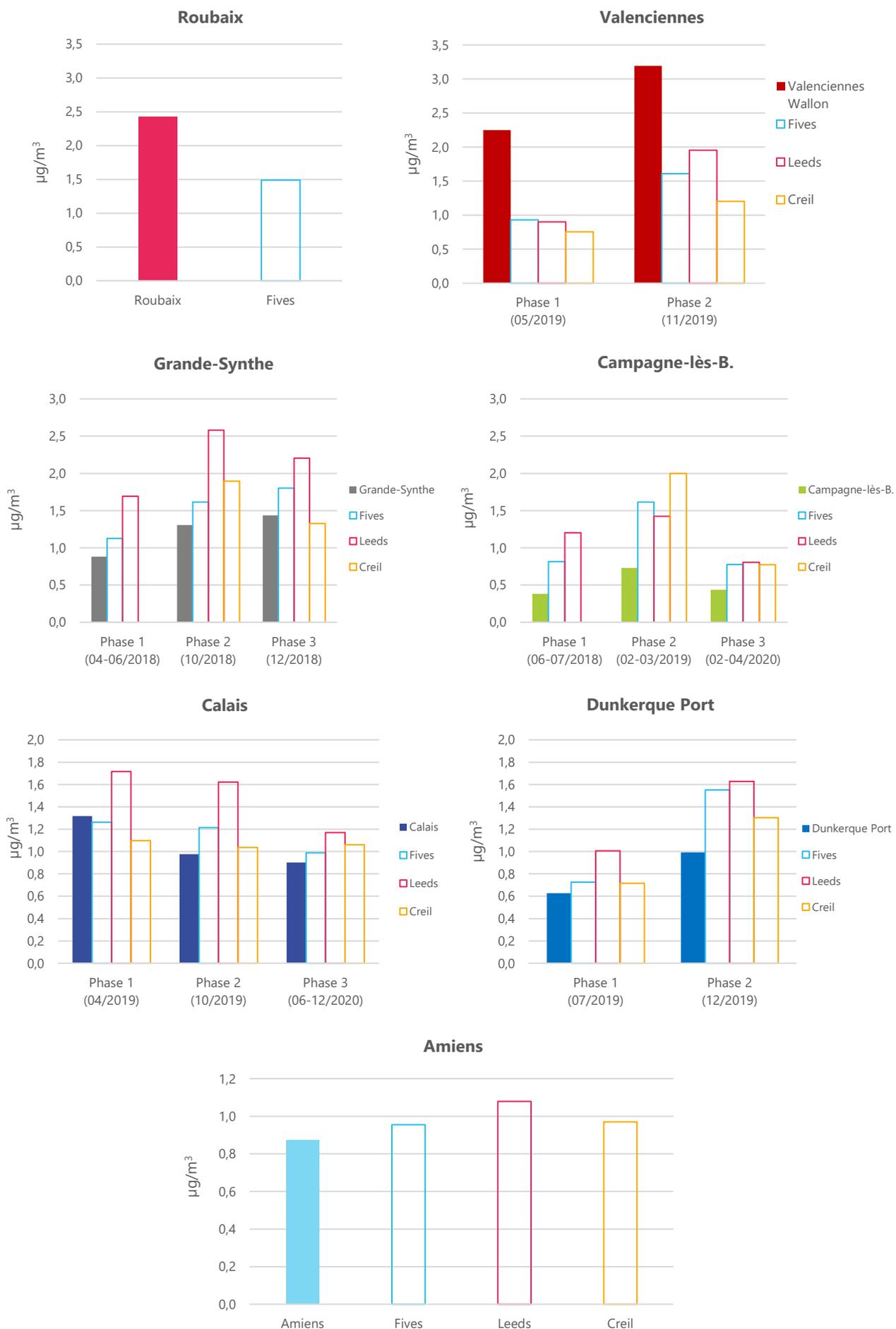


Figure 10 Comparaison des niveaux de BC pour une même période d'étude en région Hauts-de-France

5.1.4. Les sources du BC

Les deux sources du Black Carbon liées à la **combustion de carburant fossile (BC_{ff})** et à la **combustion de biomasse (BC_{wb})** peuvent être estimée par la méthode présentée dans la section 3.2. Les résultats graphiques sont présentés en Figure 11.

Pour les 3 **sites trafic** (Roubaix, Leeds, Valenciennes), le BC est émis principalement par la **combustion de carburant fossile (84% - 90%)**. En conséquence, la combustion de biomasse ne représente que 10-16% du BC.

Dans les 3 **stations urbaines** (Lille Fives, Creil et Amiens), la proportion de la **combustion de biomasse**, dont le chauffage au bois, est plus importante (**17%-27%**) que pour les sites trafic. A noter que, les données utilisées à Fives et à Creil sont la moyenne de 5 ans (2015-2020) et les données à Amiens sont uniquement pour l'année 2020. En 2020, le BC est fortement impacté par les conditions météorologiques particulières et le confinement lié à l'épidémie COVID-19 (voir la section 5.8).

A **Calais** et **Dunkerque Port**, la **combustion de biomasse** représente environ **20-25%** du BC. La combustion de **carburant fossile** représente environ **70-80 %** du BC. Ces résultats signifient que les deux sites sont moins impactés par les émissions trafic que les sites urbains. A noter qu'il existe 3 chaudières au fioul à Dunkerque, ces émissions peuvent également influencer la concentration en BC, notamment sur le BC_{ff} (lié à la combustion de fioul fossile).

A **Grande-Synthe** et **Campagne-lès-Bouloonnais**, la **combustion de biomasse** représente **30 à 35%** du BC, chiffre plus important que les autres sites instrumentés.

En résumé, la contribution de **combustion de carburant fossile** est plus importante sur les sites trafic, et contribue à **84-90% du BC mesuré**. Pour le site rural, la **combustion de biomasse** représente une proportion plus élevée (**35%**). Ce site est considéré comme représentatif d'un niveau du BC sur une station de fond rural sous influence de chauffage au bois en Hauts-de-France (35% lié au chauffage au bois, 65% lié au trafic). Les sites urbains enregistrent des niveaux moyens (17-27% lié au chauffage au bois, 73-83% lié au trafic).

- *La combustion de carburant fossile contribue entre 65 et 90% du BC mesuré, avec une part plus importante pour les sites trafic (84-90%).*
- *La combustion de biomasse représente 10% à 35% du BC, avec une part plus élevée (35%) pour le site rural.*
- *Les sites urbains enregistrent des niveaux moyens (17-27% lié au chauffage au bois, 73-83% lié au trafic).*

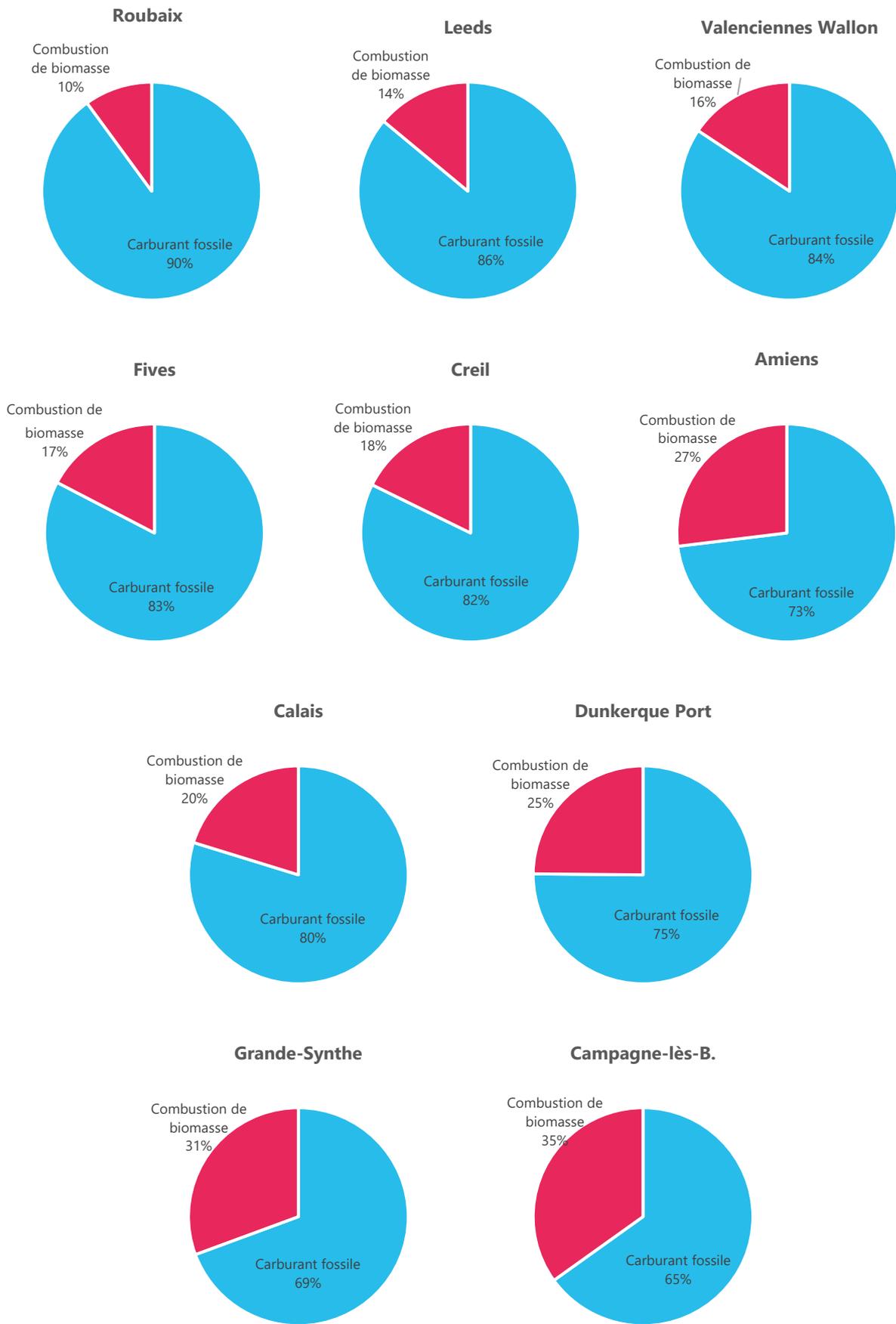


Figure 11 La répartition des sources (combustion de biomasse ou carburant fossile) pour les 10 sites étudiés

5.2. Variation journalière des PM_{ff} et PM_{wb}

5.2.1. Calcul PM_{ff} et PM_{wb}

Comme indiqué dans la section 3.2, l'AE33 permet de distinguer deux fractions du BC : la combustion de carburant fossile (BC_{ff}) et la combustion de biomasse (BC_{wb}) dans les PM_{2.5}. Ces fractions peuvent ensuite être utilisées pour estimer (avec une précision de l'ordre de 50%) les concentrations de PM₁₀ associées à ces deux familles de sources, notées respectivement **PM_{ff}** et **PM_{wb}** (voir la section 3.2). Les deux fractions de PM₁₀ PM_{ff} et PM_{wb}, sont principalement constituées du BC et d'aérosols organiques primaires. Le reste des particules PM₁₀ est constitué principalement d'aérosols inorganiques secondaires, poussières minérales, sels marins et métaux.

5.2.2. Comparaison de la variation journalière pour une même période

Dans cette partie, les variations journalières des PM_{ff}, PM_{wb}, PM_{2.5} et PM₁₀ sont comparées entre différents sites sur une même période.

Roubaix et Fives – période 2015-2016

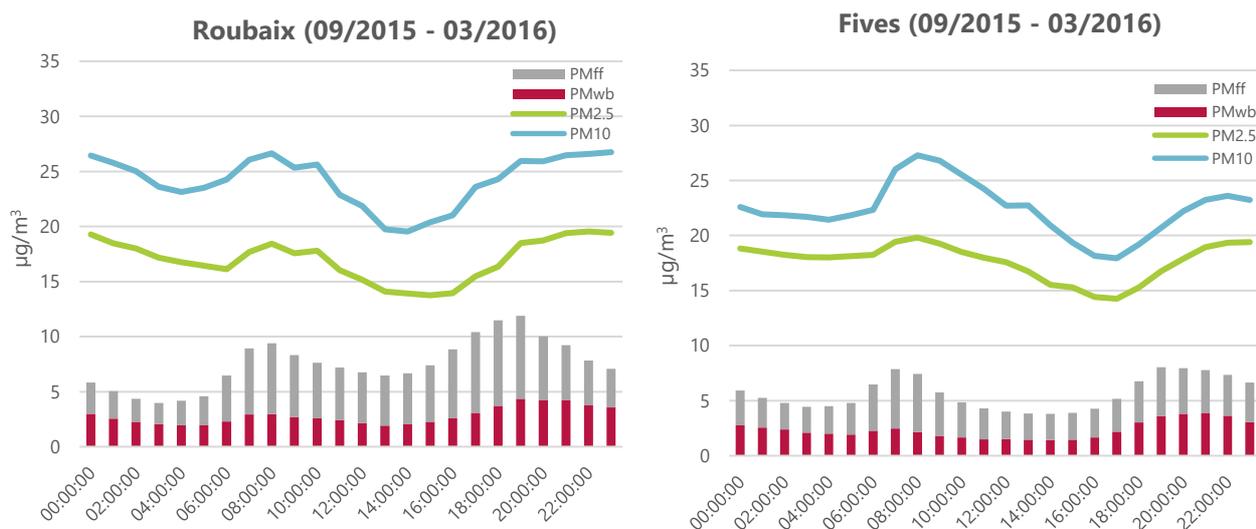


Figure 12 Comparaison la variation journalière de PM_{ff}, PM_{wb}, PM_{2.5} et PM₁₀ pour Roubaix et Fives en 2015-2016

Entre septembre 2015 et mars 2016, le profil journalier de ces 4 polluants à Roubaix et à Fives est présenté sur la Figure 12. La fraction des particules PM₁₀ issues de la combustion de carburant fossile (**PM_{ff}**) présente **2 pics significatifs** liés aux heures de pointe (**matin 7h-9h** et **soir 17h-20h**). La fraction des particules PM₁₀ issues de la combustion de biomasse (**PM_{wb}**) est plutôt importante durant la soirée (**19h-23h**).

A Roubaix, les PM_{ff} et les PM_{wb} représentent environ 19% et 12% respectivement des particules PM₁₀ en moyenne journalière. A l'heure de pointe du soir (18h-19h), leurs contributions peuvent atteindre jusqu'à 32% (PM_{ff}) et 17% (PM_{wb}) des PM₁₀.

A Fives, les niveaux de deux sources liées au BC sont relativement faibles par rapport à Roubaix. Les PM_{ff} et les PM_{wb} représentent environ 15% et 10% des particules PM₁₀ en moyenne journalière. A l'heure de pointe du soir (18h-19h), leurs contributions aux particules PM₁₀ sont à 21% et 17%, respectivement.

En résumé, la combustion de biomasse représente un niveau similaire pour les deux sites (4-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pendant la soirée. En revanche, le site trafic à **Roubaix** montre un niveau des **PM_{ff}** beaucoup **plus important** que à Fives (presque 2 fois à 19h).

Fives, Leeds et Creil en 2019

Sur le même principe, ces comparaisons ont été effectuées pour les 3 sites Fives, Leeds et Creil pour l'année 2019.



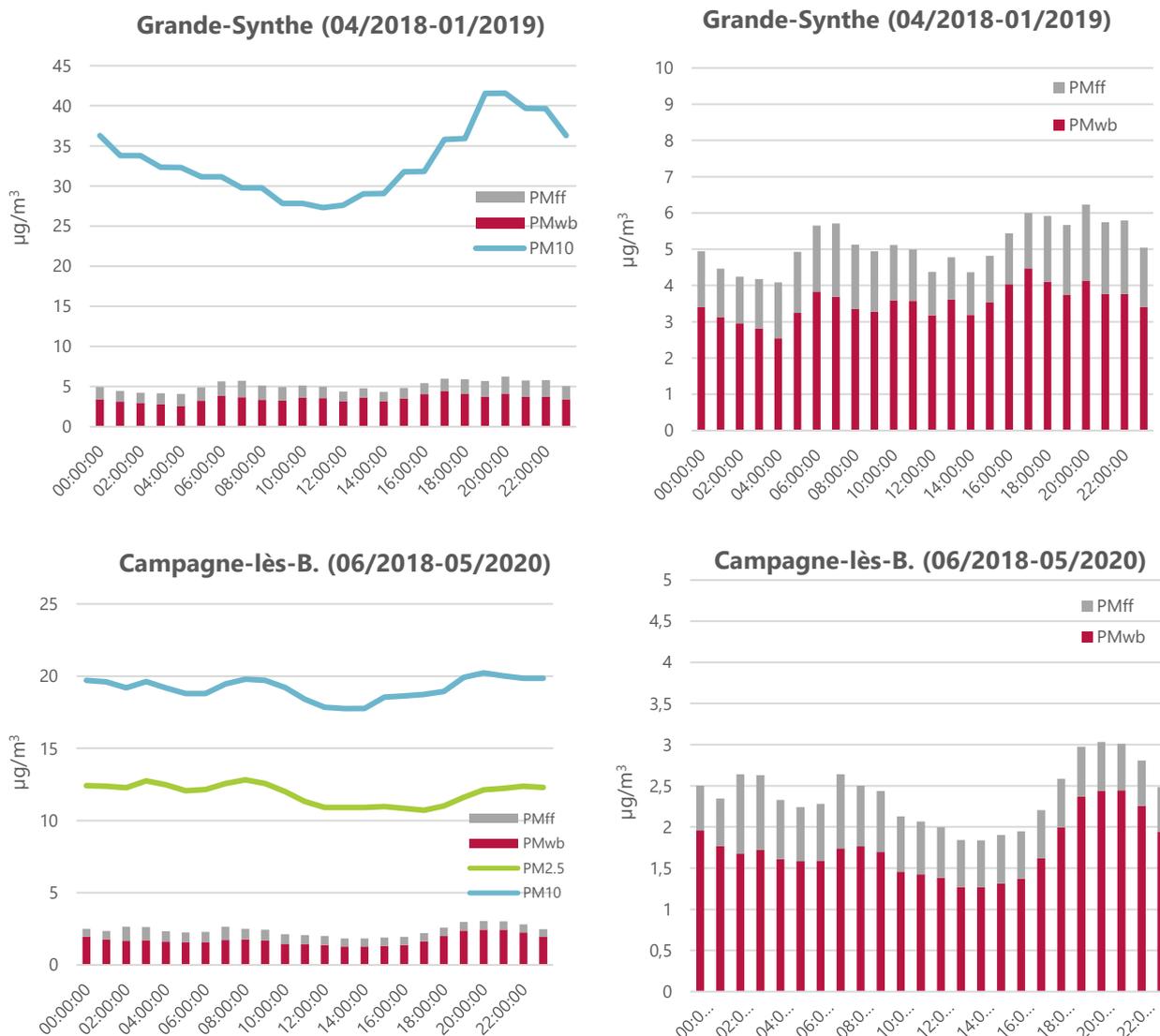
Figure 13 Comparaison la variation journalière de PM_{ff}, PM_{wb}, PM2.5 et PM10 pour Fives, Leeds et Creil en 2019

Les profils journaliers des PM_{ff} et des PM_{wb} sont très similaires pour ces 3 sites. Les PM_{wb} représentent entre 2.1 et 2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des particules PM10 en moyenne journalière. Les niveaux des PM_{ff} s'élèvent entre 1.8 et 2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et le niveau plus élevé est à site trafic Leeds.

Les **PM_{ff}** et **PM_{wb}** contribuent à environ **10%** et **12%** des particules **PM10** à **Fives** et **Creil** (pas de mesures PM10 à Leeds), respectivement. A Lille Fives, leurs contributions peuvent atteindre 13% et 18% à l'heure de pointe. Ces résultats confirment les conclusions du paragraphe précédent sur la période 2015-2016 pour Lille Fives.

5.2.3. Comparaison de la variation journalière pour différentes influences

Dans cette partie, la variation journalière des PM_{ff} et PM_{wb} est présentée pour différentes influences de site. Pour chaque site, deux types de graphiques sont présentés : la comparaison avec le niveau des $PM_{10}/PM_{2.5}$ (même échelle) et un zoom sur la variation journalière des PM_{ff} et PM_{wb} .

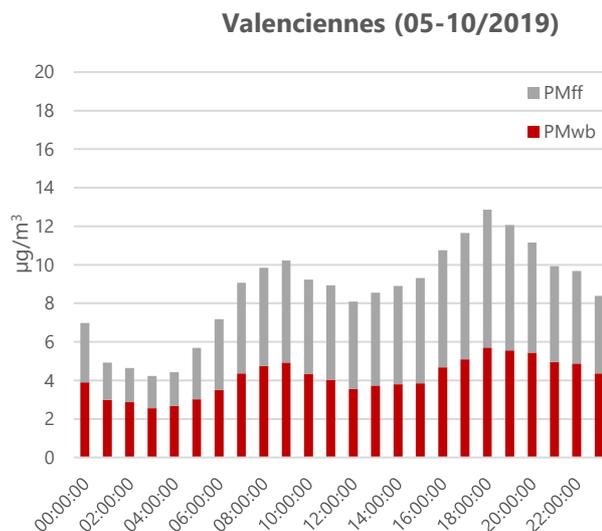
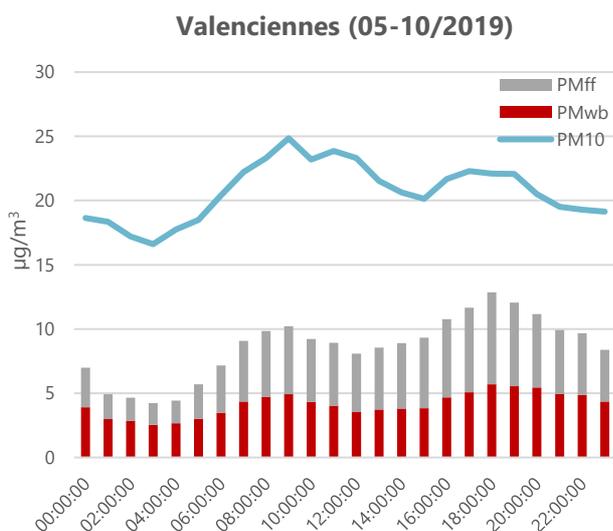


A **Grande-Synthe** et **Campagne-lès-Boulonnais**, les contributions des PM_{ff} et PM_{wb} aux particules PM_{10} sont faibles, à **3-5%** et **9-10%**, respectivement. En d'autres termes, les PM_{10} observées sur ces deux sites sont dominées par d'autres sources.

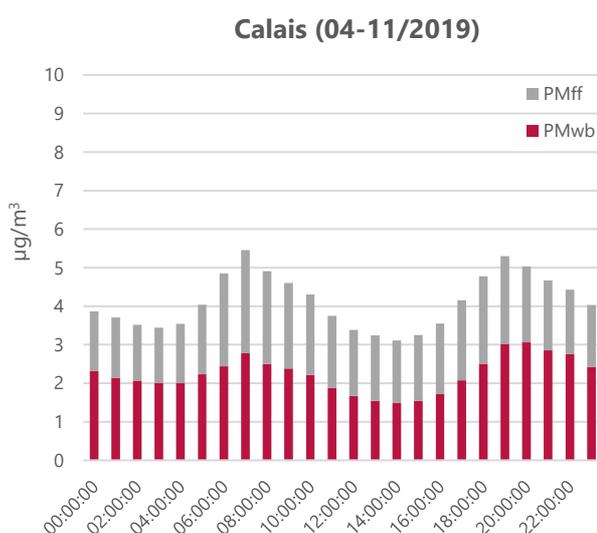
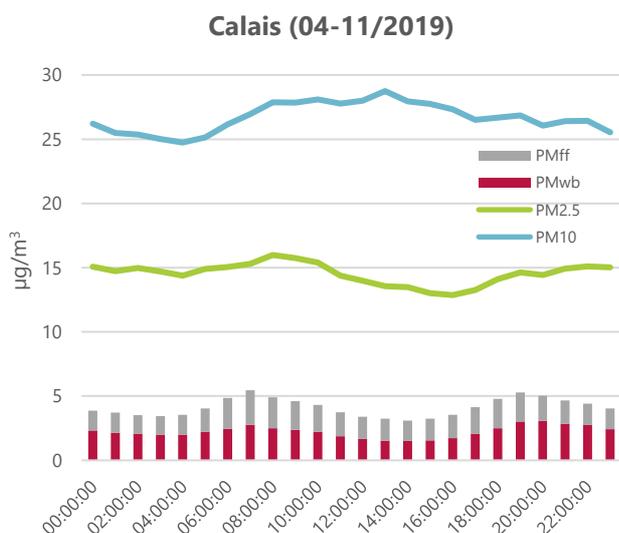
L'augmentation de ces deux sources aux heures de pointe est moins significative que sur les sites urbains et trafic. La répartition des sources montre que les **PM_{wb}** sont **2 à 5 fois plus élevées** que les **PM_{ff}** selon l'heure de la journée. **Le trafic local n'est pas une source importante** aux particules PM_{10} pour ces deux sites.

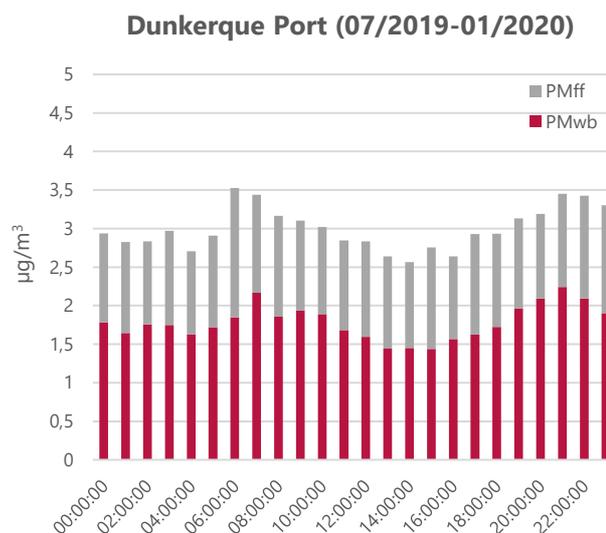
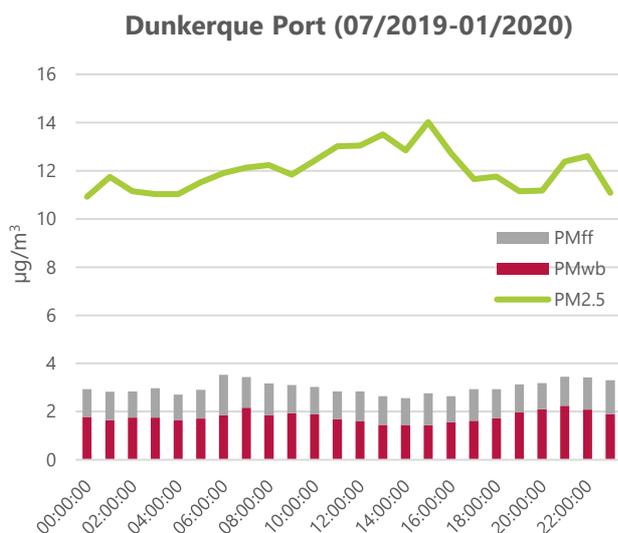
Les mesures à **Campagne-lès-Boulonnais** peuvent être considérées comme représentatives d'**un niveau de fond** rural avec influence de chauffage au bois sur la région Hauts-de-France avec **$1.7 \mu g/m^3$** pour les **PM_{wb}** et **$0.65 \mu g/m^3$** pour les **PM_{ff}** .

Le site de **Valenciennes** en proximité automobile montre une forte influence par les deux sources : les PM_{ff} et les PM_{wb}, représentant **22%** et **20%** des **particules PM10**, respectivement. A 18h, ces deux sources peuvent expliquer 58% des PM10 mesurées. C'est un site fortement impacté par ces deux sources locales.



A Calais, les PM_{ff} et PM_{wb} contribuent à 7% et 8% des particules PM10 chacune. La variation journalière correspond bien aux heures de pointe du trafic et à l'utilisation du chauffage au bois le soir. **A Dunkerque Port**, la somme des deux sources varie entre 2.5 et 3.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et la variation journalière est moins significative que celle de Calais.





A Amiens, les PM_{ff} et les PM_{wb} représentent 8% et 15% des particules PM_{10} , respectivement. Le pic du soir est plus important que celui du matin car les PM_{wb} sont plus élevées pendant la soirée, jusqu'à $3.8 \mu g/m^3$ à 21h.

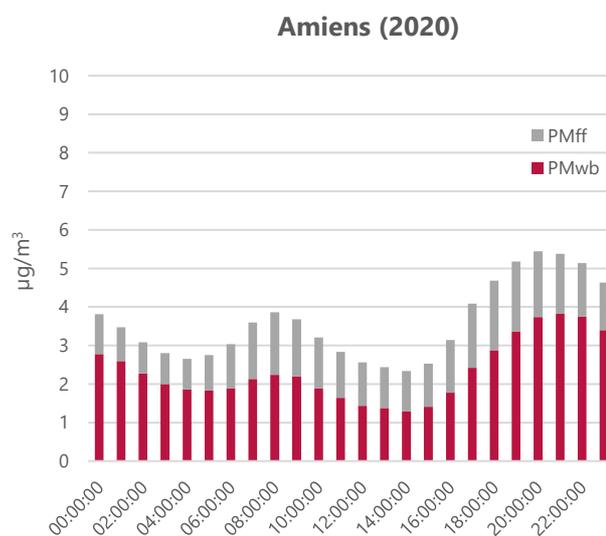
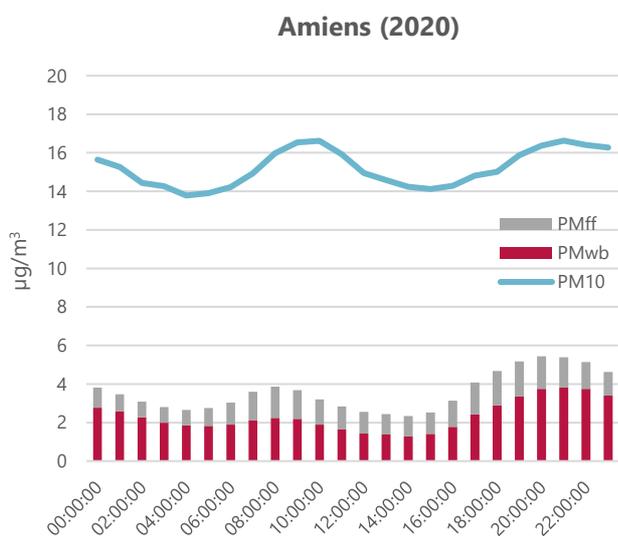


Figure 14 Comparaison la variation journalière de PM_{ff} , PM_{wb} , $PM_{2.5}$ et PM_{10} pour différente typologie de site

- **Les particules PM_{10} issues de la combustion de carburant fossile présentent 2 pics significatifs liés aux heures de pointe du trafic (matin 7h-9h et soir 17h-20h). Les particules PM_{10} issues de la combustion de biomasse sont plutôt importantes durant la soirée (19h-23h).**
- **En 2019, les PM_{ff} et PM_{wb} contribuent à environ 10% et 12% des particules PM_{10} à Fives et Creil, respectivement**
- **Les mesures à Campagne-lès-Boullonnais peuvent être considérées comme représentatives d'un niveau de fond rural avec influence de chauffage au bois sur la région Hauts-de-France avec $1.7 \mu g/m^3$ pour les PM_{wb} et $0.65 \mu g/m^3$ pour les PM_{ff}**

5.3. Variation saisonnière

5.3.1. BC total

La concentration du **BC** montre une **variation saisonnière significative** pour les 3 sites en continu (Fives, Leeds et Creil). En 2019, les niveaux sont **plus importants en hiver** (~1.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et **plus faibles en été** (0.75-0.95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). En 2020, le BC est plus élevé en automne (1.2-1.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) qu'en hiver ; ceci est probablement lié à des conditions météorologiques différentes et notamment des pluies intenses en début d'année 2020. Les concentrations au printemps 2020 sont plus faibles qu'en 2019, et sont éventuellement impactées par le confinement lié au COVID-19 (voir la section 5.8).

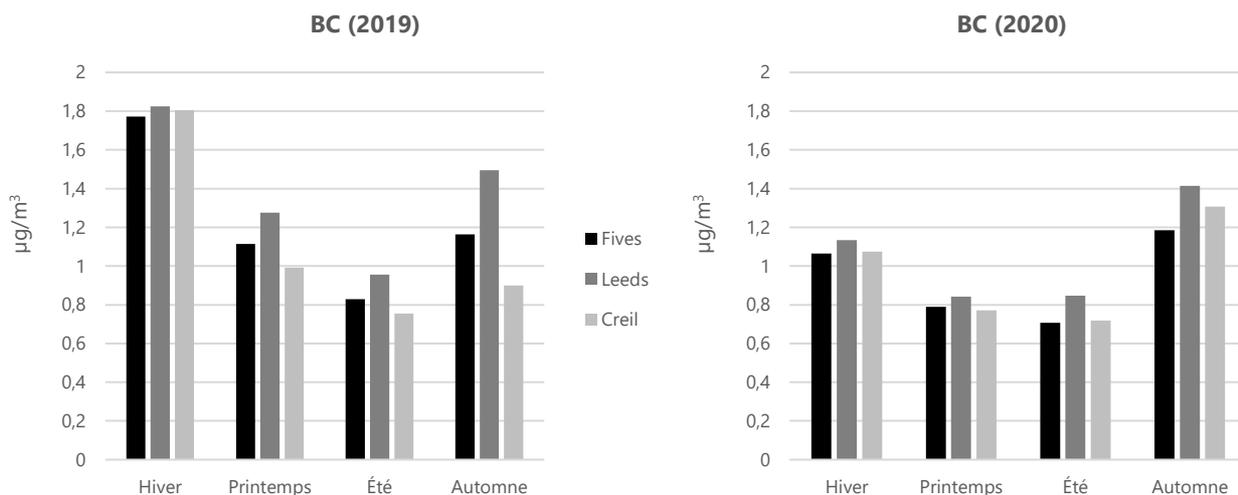


Figure 15 Variation saisonnière du BC à Fives, Leeds et Creil en 2019 et 2020

5.3.2. BC_{ff}, Trafic

Le **BC_{ff}** montre une **variation saisonnière très similaire au BC total**.

En 2019, les niveaux du BC_{ff} sont plus importants en période froide qu'en période chaude. En 2020, cette variation est moins significative. Les résultats de cette année sont probablement impactés par le confinement lié au COVID-19 (voir la section 5.8).

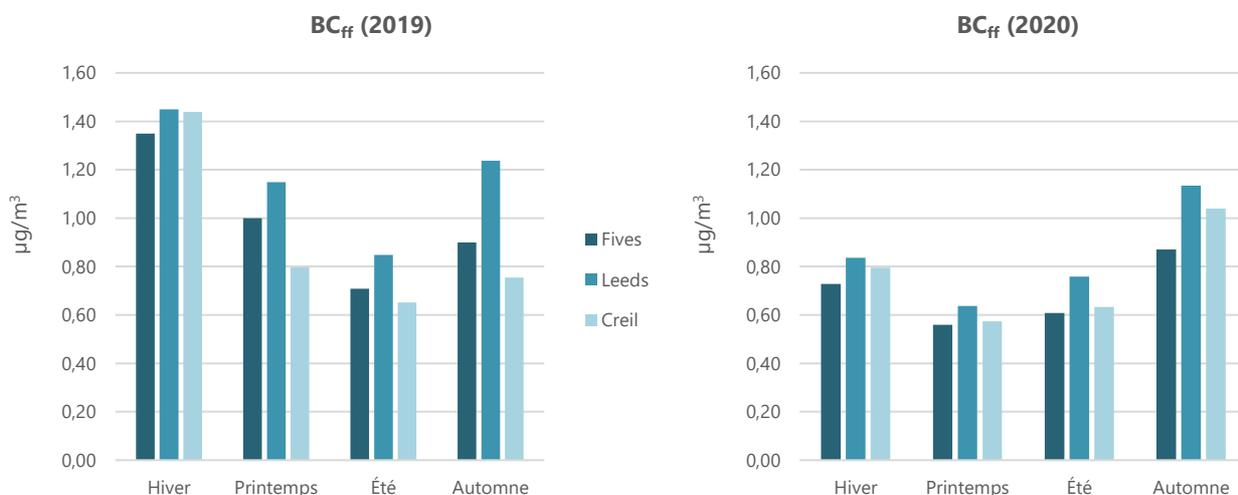


Figure 16 Variation saisonnière du BC_{ff} à Fives, Leeds et Creil en 2019 et 2020

5.3.3. BC_{wb} , Biomasse

Le BC_{wb} est principalement lié à l'utilisation de chauffage au bois résidentiel. Il est donc fortement impacté par la température ambiante.

En 2019-2020, il est environ **4 fois plus important en période froide qu'en période chaude**.

Le BC_{wb} en **2020** est plus important qu'en 2019 au **printemps**, en raison de confinement pendant cette période (plus de présence à domicile).

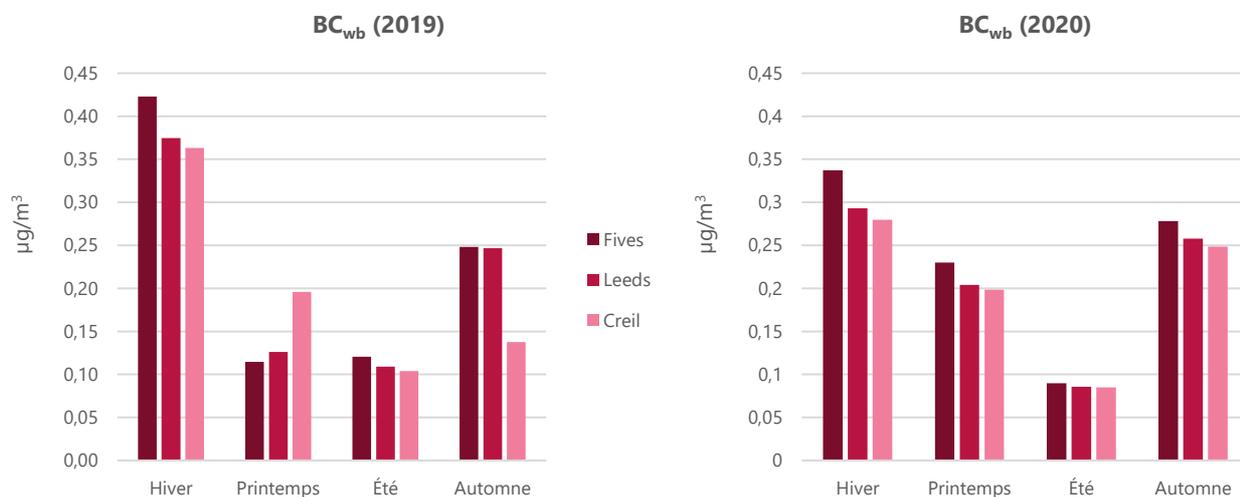


Figure 17 Variation saisonnière du BC_{wb} à Fives, Leeds et Creil en 2019

- *Le BC montre une variation saisonnière significative pour les 3 sites (Fives, Leeds et Creil) : il est plus important en hiver (~1.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et plus faible en été (0.75-0.95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).*
- *Le BC_{ff} montre une variation saisonnière très similaire au BC total.*
- *Le BC_{wb} est environ 4 fois plus important en période froide qu'en période chaude.*

5.4. Variation pluriannuelle

La **variation pluriannuelle** montre une **diminution importante du BC** sur les deux sites urbains : **-28%** pour **Lille Fives** (2017-2020), et **-13%** pour **Creil** (2019-2020). Pour le site trafic à Lille Leeds, on note une augmentation significative (11%) entre l'année 2017 et 2018. Le BC à **Leeds** montre une diminution très importante : **-36%** entre 2017 et 2020.

Le **BC_{ff}** montre une variation pluriannuelle similaire au BC : il diminue de manière significative entre 2017 et 2020 pour **Fives (-39%)** et **Leeds (-42%)**. Il **baisse également de 16% pour Creil** entre 2019 et 2020.

Cependant, le **BC_{wb}** reste **stable pour Leeds (0.22 µg/m³) et Creil (0.21 µg/m³)**. Il **augmente significativement** entre 2017 et 2020 (**+38%**) à **Lille Fives**.



Figure 18 Variation pluriannuelle du BC, BC_{ff} et BC_{wb}

- **Le BC_{ff} montre une diminution significative entre 2017 et 2020 pour Fives (-39%) et Leeds (-42%). Il baisse de 16% pour Creil entre 2019 et 2020.**
- **Cependant, le BC_{wb} reste stable pour Leeds (0.22 µg/m³) et Creil (0.21 µg/m³). Il augmente significativement entre 2017 et 2020 (+38%) à Lille Fives.**

5.5. Rose de pollution

Les roses de pollution du BC pour 9 sites étudiés (toutes périodes confondues) sont présentées dans la Figure 19. Elles montrent que le BC est bien une source locale qui est associée généralement avec les vents de moins de 5 km/h (vent calme).

Comment lire une rose de pollution ?

La concentration du BC est présentée en échelle de couleur (rouge pour la concentration plus élevée et bleu pour la concentration plus faible). La direction du vent est indiquée par N (nord), S(sud), E (est), et W (ouest). La vitesse du vent est indiquée dans l'axe du graphe (entre 0-20 km/h).

Pour certaines stations (Dunkerque Port et Amiens), le BC observé montre une origine locale mais également une source transportée par les vents plus importants (~10 km/h). Les sites urbains Fives et Amiens présentent un niveau de fond homogène dans toutes les directions (couleur verte et bleue).

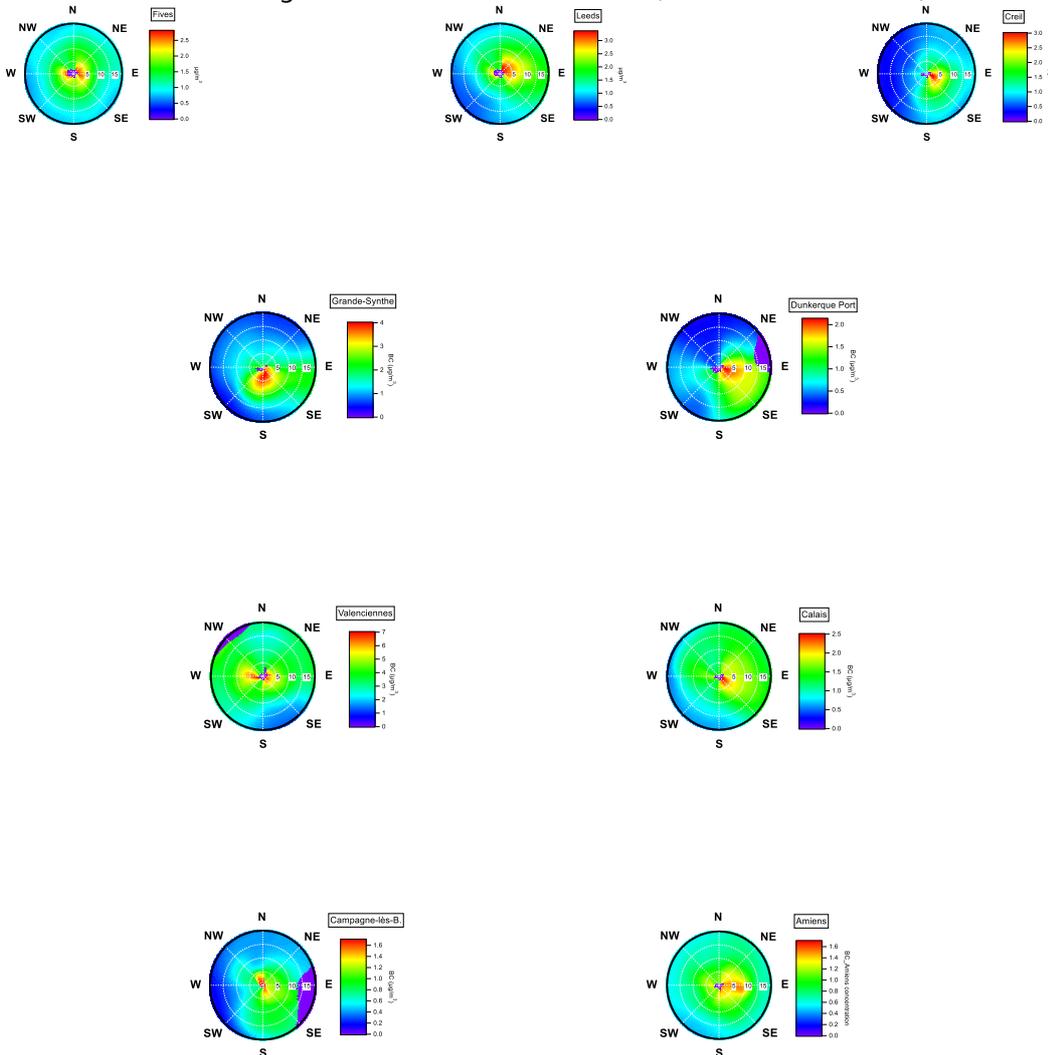


Figure 19 Rose de pollution pour 9 sites étudiés (sauf Roubaix, pas de données vents disponibles)

5.6. Episodes de pollution

Les études de cas sont données dans cette section pour illustrer les contributions des différentes sources liées au BC pendant les épisodes de pollution aux particules PM10 en 2020.

5.6.1. Episode du 13 au 16 septembre : mise en évidence d'une source trafic

A Creil et Lille Leeds entre le 13 et le 16 septembre 2020, les **PM_{ff}** représentent jusqu'à 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des particules PM10.

A **Creil**, les particules primaires émises par le **trafic** peuvent contribuer à **40% des PM10** et les deux sources (carburant fossile + combustion de biomasse) peuvent expliquer 58% des PM10 mesurées. A **Lille Leeds**, ces deux sources contribuent également jusqu'à **20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** de particules PM10.

Cet épisode est fortement influencé par **les sources locales**, notamment le **trafic**.

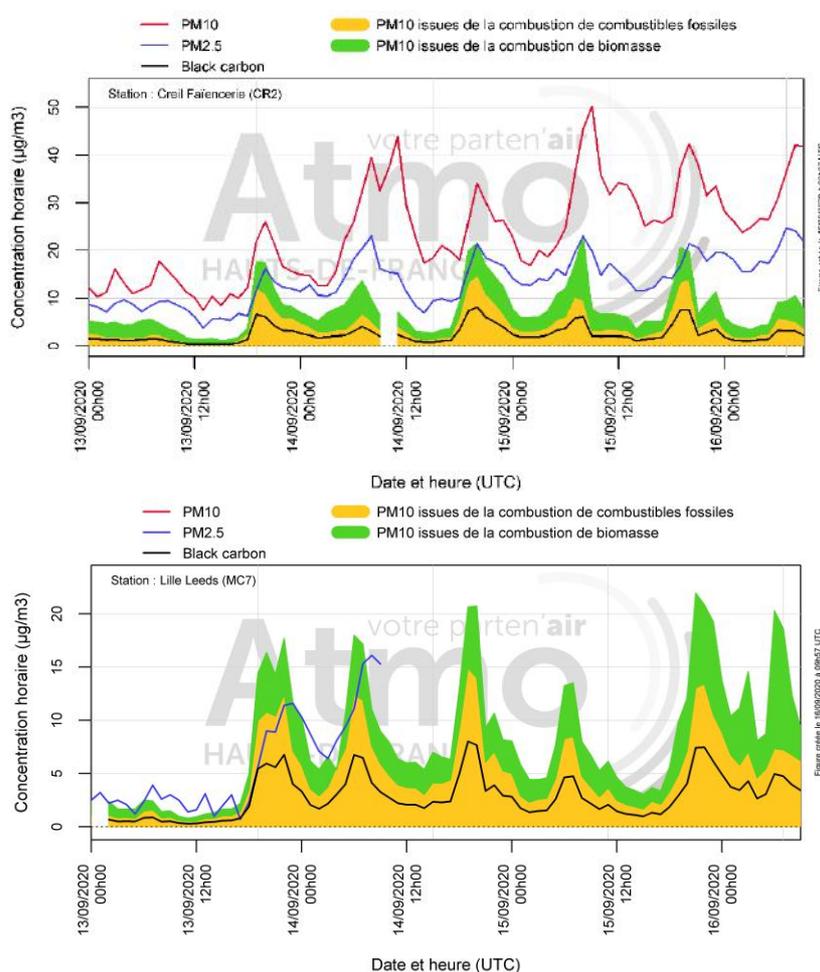


Figure 20 Series temporelle des PM_{ff}, PM_{wb}, BC, PM10 et PM2.5 à Creil et Lille Leeds

5.6.2. Episode du 25 au 27 novembre : un épisode lié à la combustion de biomasse

Entre le 25 et 27 novembre 2020, un épisode lié aux particules PM10 a touché la plupart de la région Hauts-de-France. Grâce aux mesures de BC, les sources majeures ont pu être identifiées pour cet épisode : A Amiens, le trafic contribue entre 10 et 20% des particules PM10 et la **combustion de biomasse** peut contribuer jusqu'à **70% des PM10** mesurées.

Ainsi, pour le pic du 26 novembre soir, les deux sources locales (trafic + chauffage au bois) peuvent expliquer entre 80 et 90% des PM10 mesurées.

Cet épisode est un **épisode de combustion**, très influencé par le **chauffage au bois**.

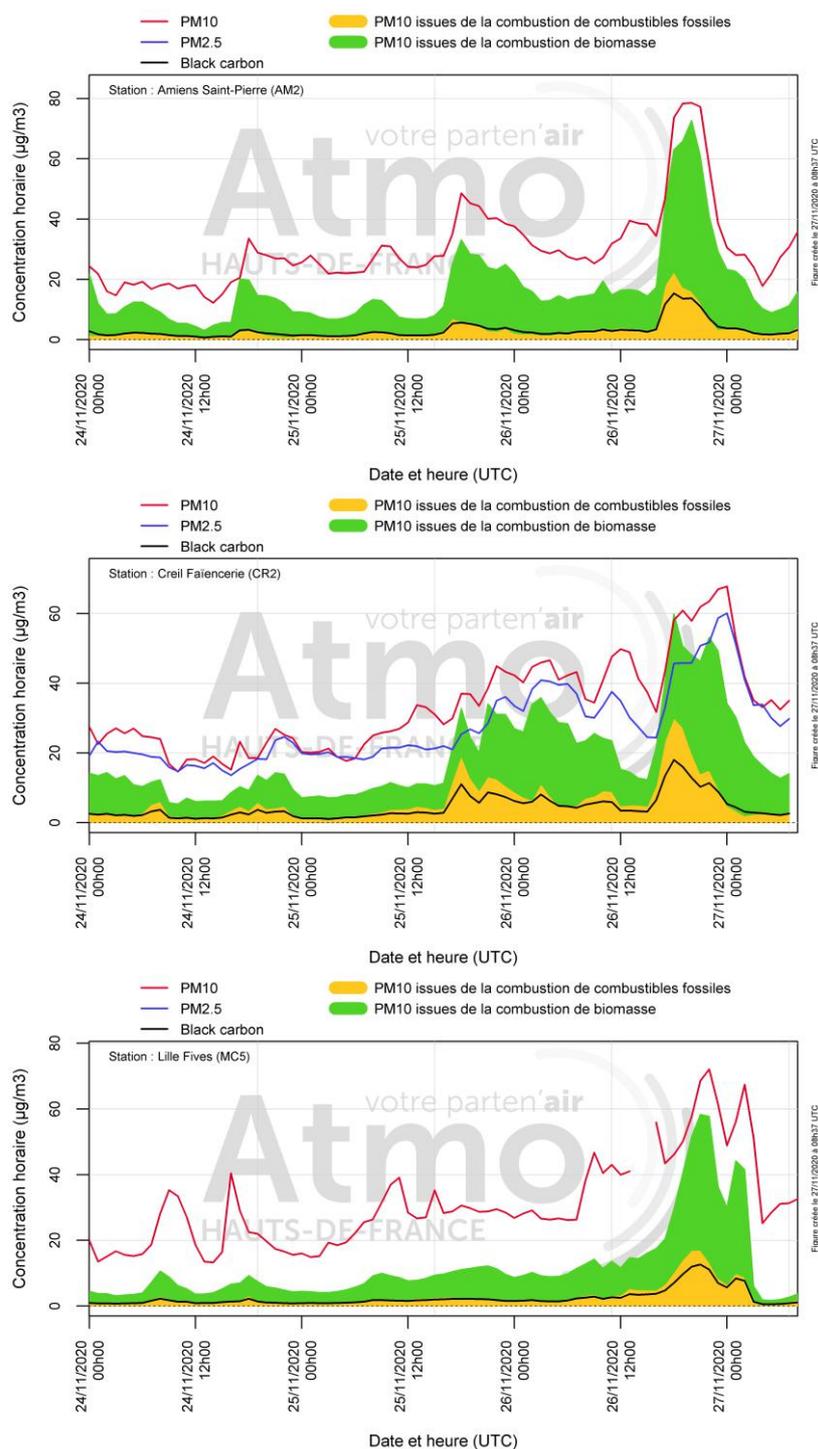


Figure 21 Series temporelle des PMff, PMwb, BC, PM10 et PM2.5 à Amiens, Creil et Lille Fives

5.6.3. Episode des 8 et 9 avril : un épisode printanier

Les 8 et 9 avril a eu lieu un épisode de particules PM10 typiquement printanier : les PM10 sont dominées par la fraction fine PM2.5. Les deux sources locales : le trafic et le chauffage au bois représentent moins de **5 à 10%** des particules **PM10** mesurées.

Les mesures de la composition chimique des particules PM1 par l'ACSM (*Aerosol Chemical Speciation Monitor*) à Lille montrent que les particules sont dominées par le composé **nitrate d'ammonium**. Ce dernier est formé dans l'atmosphère par les précurseurs gazeux (NOx : émis principalement par le transport routier et NH₃, émis principalement par les activités agricoles). Le nitrate d'ammonium peut être formé localement et/ou être transporté par une masse d'air déjà polluée.

Cet épisode est un **épisode** typique **printanier**, dominé par les **polluants secondaires** (nitrate d'ammonium).

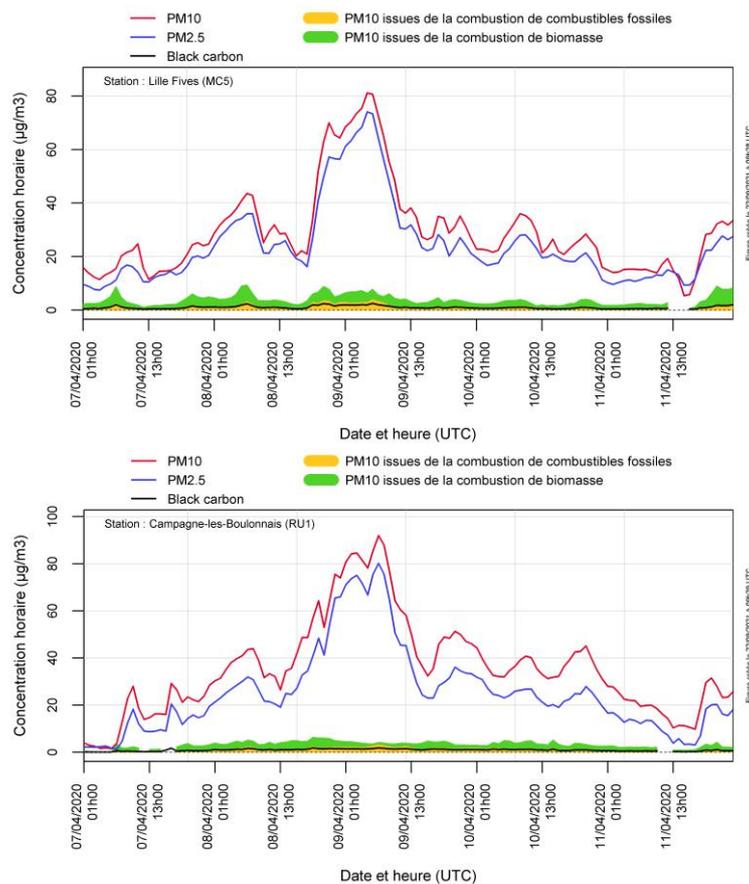


Figure 22 Series temporelle des PMff, PMwb, BC, PM10 et PM2.5 à Lille Fives et Campagne-lès-Boulonnais

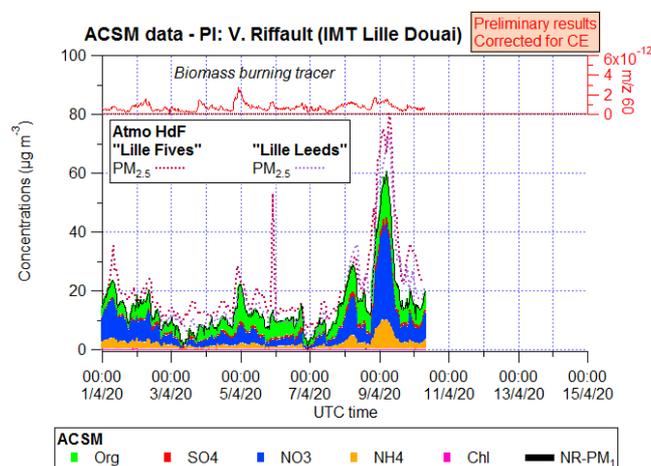


Figure 23 Composition chimique des particules PM1 à Lille (Source : V.Riffault, IMT Lille Douai)

- *La mesure du BC peut aider à mieux comprendre la nature d'épisodes de pollution.*
- *Dans certains cas, les deux sources estimées (trafic local + chauffage au bois) peuvent expliquer jusqu'à 80-90% des particules PM10 mesurées pendant l'épisode.*
- *Au contraire, il peut indiquer que ce sont les autres polluants (par exemple, nitrate d'ammonium) responsables de la hausse des concentrations.*

5.7. Le BC, traceur d'incendie

Comme indiqué dans la section 0, le Black Carbon est un bon indicateur pour tous les types de combustion non complète. Il peut être utilisé comme traceur en cas d'incendie.

5.7.1. Feu de Rouen

Le 26 septembre 2019, un **incident industriel** de Rouen a eu lieu dans une usine chimique classée Seveso seuil haut. Le panache lié à cet incident est passé sur la région Hauts-de-France et a été identifié par nos stations de mesures à Lille (Fives et Leeds). Le **Black Carbon** montre un premier pic vers 8h du matin avec une concentration de **5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , et un deuxième pic vers 14h avec une concentration d'environ **10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** . Néanmoins, les mesures du BC à Dunkerque Port et à Creil ne détectent pas ces panaches (Figure 24).

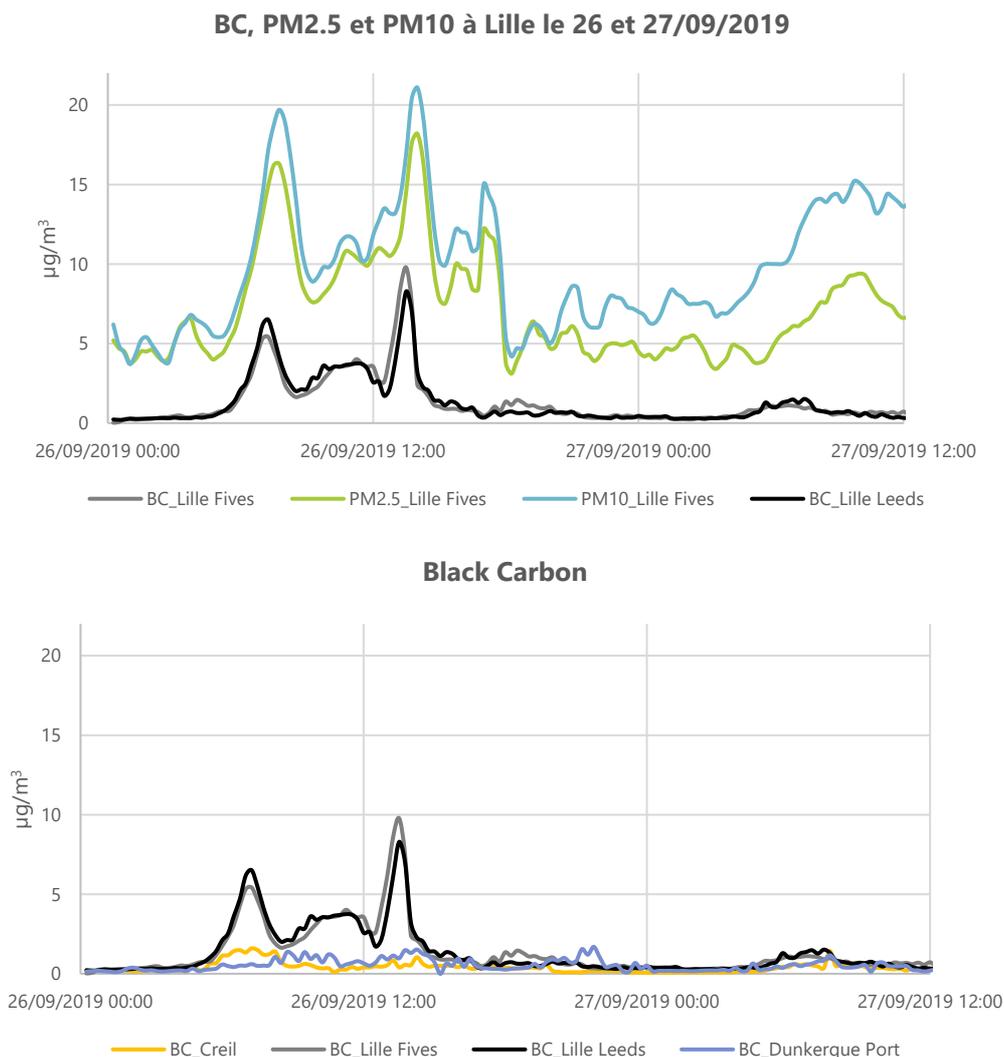


Figure 24 BC, PM2.5 et PM10 durant le Feu de Rouen (26-28 septembre 2019)

Les concentrations en particules **PM10 et PM2.5** à Lille Fives ont augmenté de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ jusqu'à **$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$** en lien avec l'arrivée de la masse d'air polluée par l'incendie. Leurs niveaux reviennent vers environ $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ après le passage du panache. Les niveaux de particules PM10 restent cependant très inférieurs au seuil d'information et de recommandation fixé à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière.

Le BC reste en faibles concentrations (inférieures à $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire) pour les jours suivants (27-28 septembre).

5.7.2. Incendie à Compiègne

Dans la nuit du 1^{er} au 2 septembre 2021, un incendie s'est déclaré sur le site Galloo de Clairoux (60).

La station de surveillance implantée à Creil, soit à 40 kilomètres du site, montre une augmentation des concentrations des particules PM2.5 et PM10 dans la nuit, tout en restant inférieur aux valeurs réglementaires. Le pic de concentrations a eu lieu vers 1h du matin. Avec des vents de secteur nord-est, cette station est située sous le panache de l'incendie. Les deux stations de Nogent-sur-Oise et Rieux, également proches, n'ont pas été influencées par l'incendie. Compte tenu de la direction des vents au démarrage de l'incendie, seule la station de Creil s'est trouvée sous son panache.

La Figure 25 montre l'évolution de ces concentrations de particules, avec des valeurs maximales observées à 01h00 (heure civile) avec **$55 \mu\text{g}/\text{m}^3$** pour les particules **PM10** et à 01h00 avec **$47 \mu\text{g}/\text{m}^3$** pour les particules **PM2.5**. La concentration du **BC** montre jusqu'à **$26 \mu\text{g}/\text{m}^3$** , représentant ainsi plus de **50% des particules PM2.5**, en lien avec l'incendie.

Polluants mesurés à Creil et à Nogent-sur-Oise

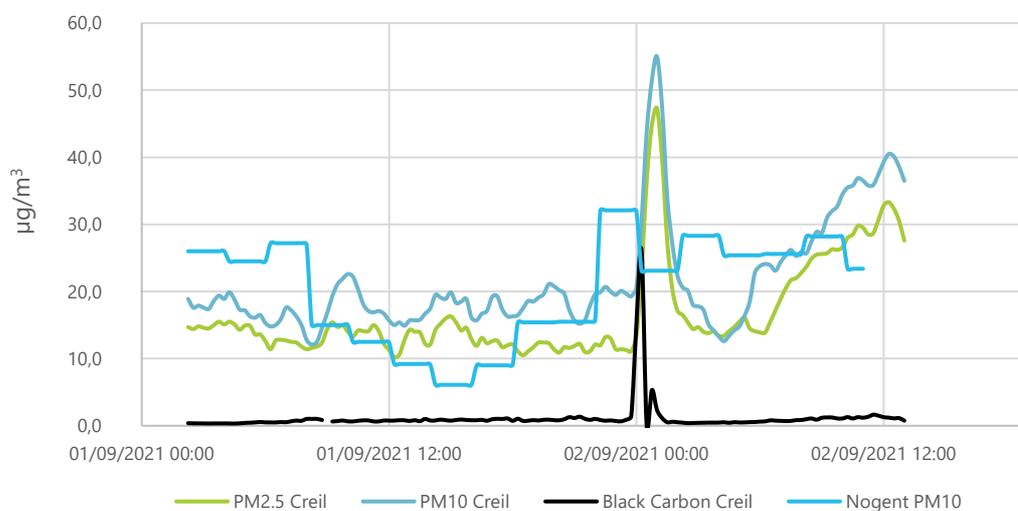


Figure 25 BC, PM2.5 et PM10 durant l'incendie à Compiègne

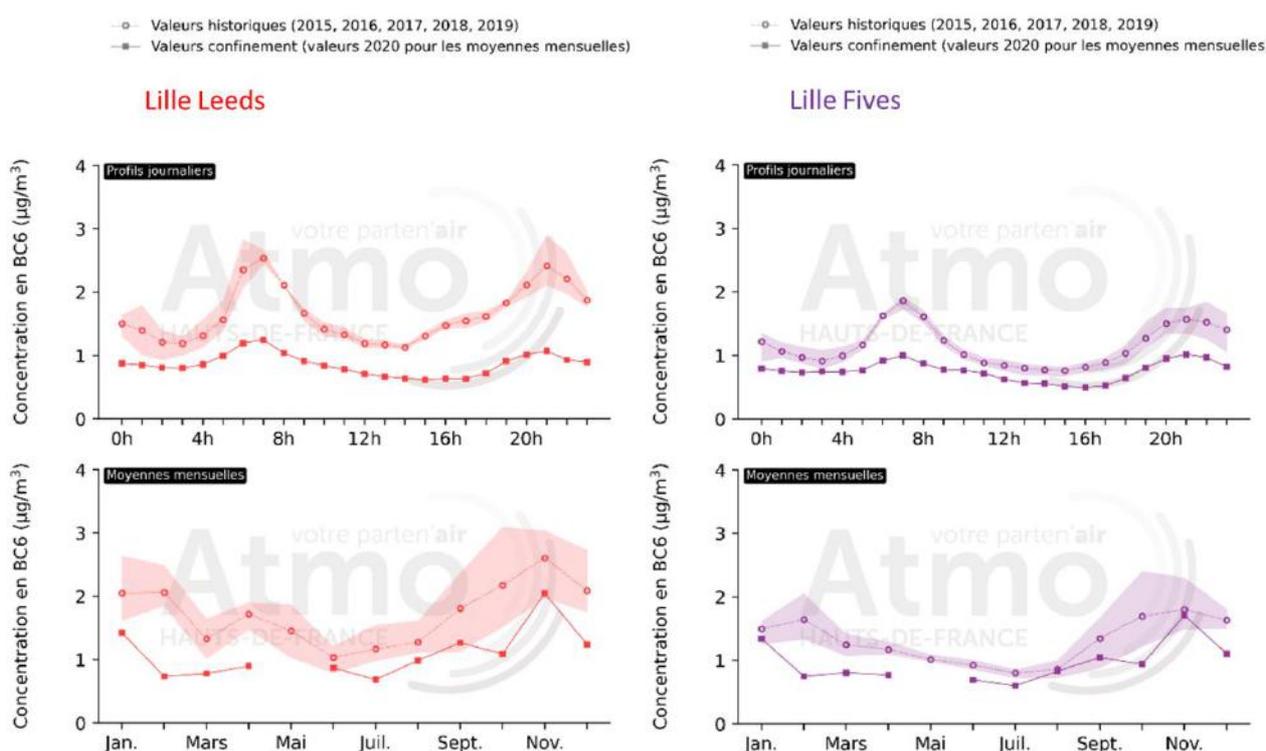
Comme le Black Carbon est un bon indicateur pour tous les types de combustion non complète. Il peut être également utilisé comme traceur en cas d'incendie. Deux études de cas sont analysées : le feu de Rouen en 2019 et l'incendie à Compiègne en 2021.

5.8. Impact du confinement lié à la pandémie du COVID-19

Afin de lutter contre la pandémie de COVID-19, un **confinement** a été mis en place en France le mardi 17 mars jusqu'au 11 mai 2020, soit **55 jours**. Une étude de l'impact du confinement sur la qualité de l'air à la Métropole Européenne de Lille a été effectuée afin d'élaborer sa politique de demain en matière d'amélioration de la qualité de l'air⁸.

Dans cette partie, il est proposé de zoomer sur l'impact du confinement sur le **Black Carbon et ses deux sources** associées.

Les Figures 24 à 26 montrent les profils journaliers pendant le confinement et la valeur moyenne mensuelle de BC, BC_{ff} et BC_{wb} sur deux stations à **Lille** (à gauche : Lille Leeds (trafic) ; à droite : Lille Fives (urbain)). Pour chaque graphique, la valeur en 2020 (en symbole solide) est comparée à la moyenne des 5 dernières années (en symbole vide).



⁸ Atmo HdF, « Impact du confinement lié à la pandémie du COVID-19 sur la qualité de l'air de la Métropole Européenne de Lille », août 2021.

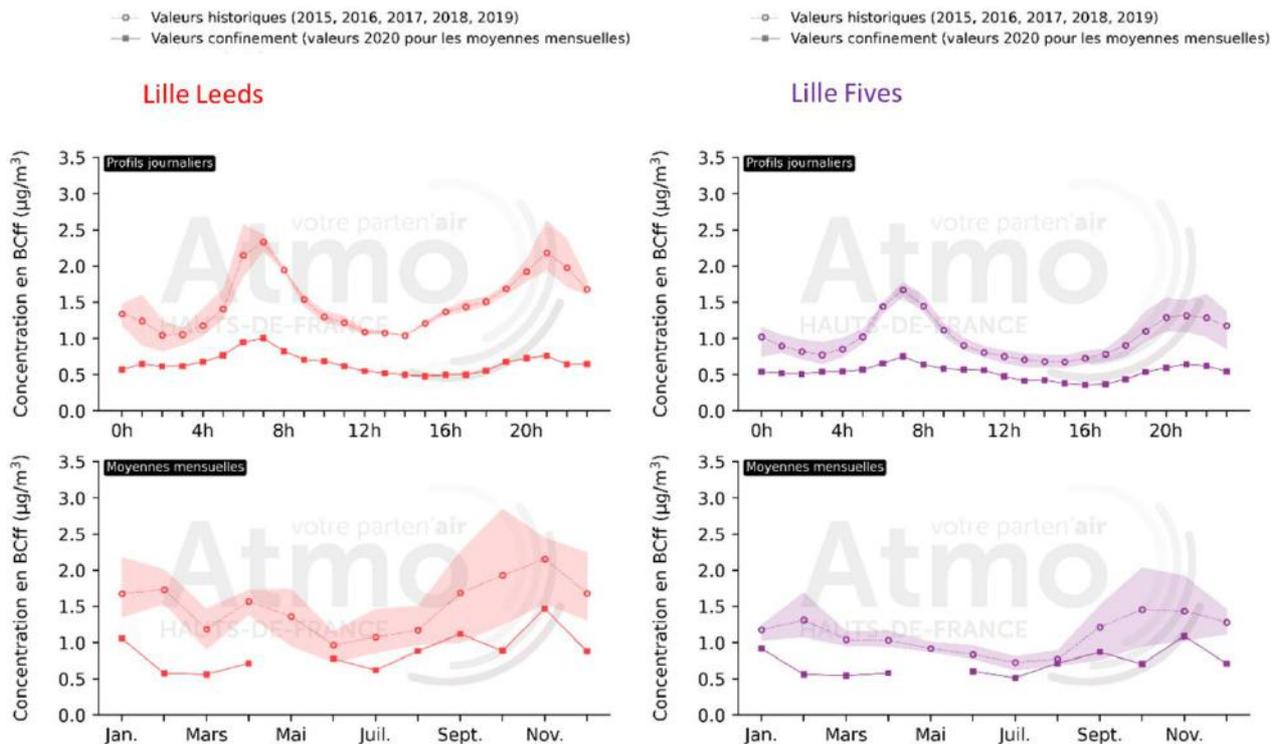


Figure 27 Evolution de l'impact du confinement sur le BC_{ff} mesuré à Leeds et à Fives

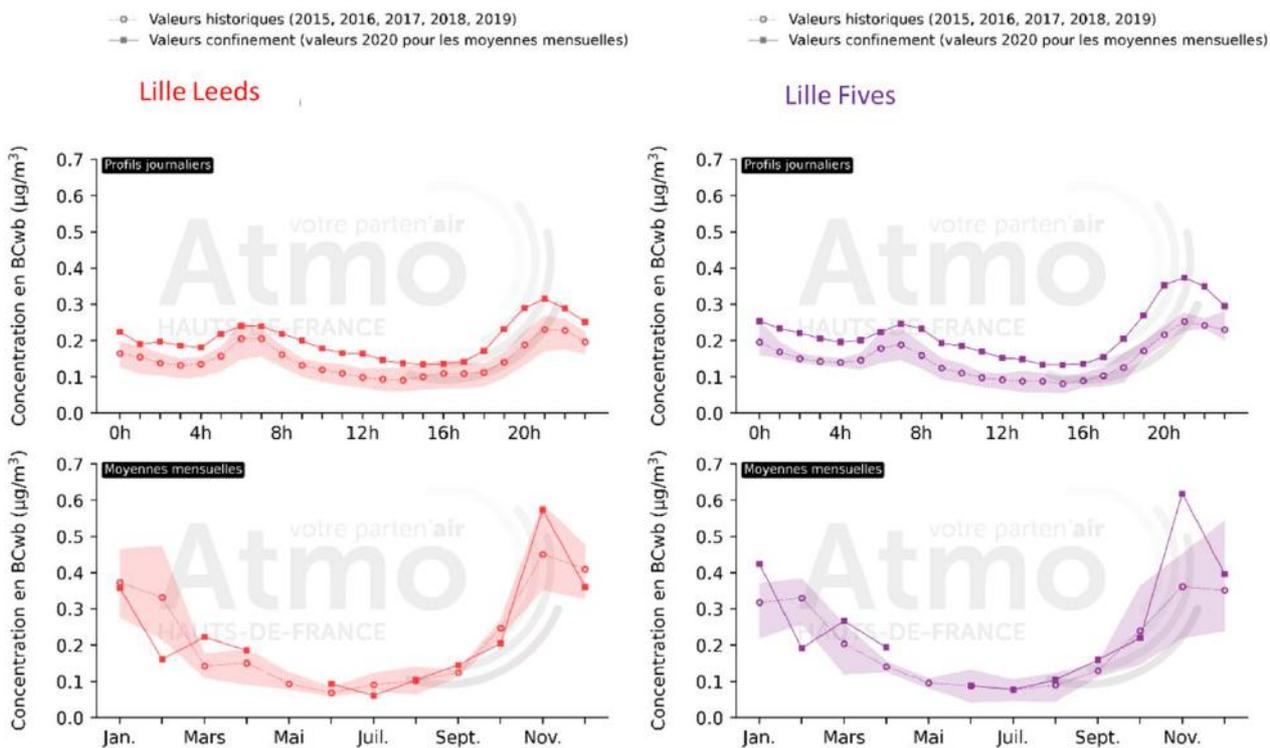


Figure 28 Evolution de l'impact du confinement sur le BC_{wb} mesuré à Leeds et à Fives

Pour le **Black Carbon**, le profil journalier pendant le confinement montre **un niveau plus bas que les 5 années précédentes**. Les pics liés aux heures de pointe sont moins significatifs. Néanmoins, la concentration moyenne mensuelle du BC en 2020 est déjà moins élevée que les 5 années précédentes (avant et après le confinement). On suppose que les faibles niveaux du **BC en 2020 sont influencés par le confinement et les conditions météorologiques**.

Pour le **BC lié au trafic**, il montre une variation **très similaire au BC total**. Le confinement a induit une diminution du trafic routier, donc une baisse importante du BC_{ff} . Dans le même temps, les conditions météorologiques ont aussi joué un rôle sur la concentration mesurée.

En ce qui concerne **la combustion de biomasse** (notamment le chauffage au bois), le mois de janvier 2020 se trouve au-dessus de la moyenne historique. Les concentrations diminuent pour passer sous la moyenne des 5 dernières années au cours du mois de février en lien avec les précipitations intensives. Les mois de mars et d'avril sont de nouveau au-dessus de la moyenne, **une hausse est visible sur la seconde moitié du mois de mars** ; elle peut être liée à la **présence plus importante des travailleurs à leur domicile**.

- *Les faibles niveaux du BC en 2020 sont influencés par le confinement et les conditions météorologiques.*
- *Le confinement a induit une diminution du trafic routier, donc une baisse importante du BC_{ff} . Les conditions météorologiques ont également joué un rôle sur la concentration mesurée.*
- *En ce qui concerne le BC lié au chauffage au bois, une hausse est visible sur la seconde moitié du mois de mars ; elle peut être liée à la présence plus importante des travailleurs à leur domicile.*

6. Conclusion et perspectives

Cette étude présente les premiers résultats des mesures du Black Carbon (BC) et ses sources principales en région Hauts-de-France pour la période 2015-2020. Elle est co-financée par la Région Hauts-de-France, La direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) Hauts-de-France et Atmo Hauts-de-France. L'aéthalomètre AE33 (Magee Scientific) est utilisé pour mesurer la concentration massique du Black Carbon sur plusieurs territoires et sur différentes périodes en région Hauts-de-France. Lille Fives (urbain), Lille Leeds (trafic) et Creil (urbain) sont les **3 stations fixes** qui surveillent le BC en continu. Les **7 autres mesures** du BC (Dunkerque Port, Grande-Synthe, Calais, Campagne-lès-Boullonnais, Roubaix, Valenciennes Wallon, Amiens) sont effectuées dans le cadre des autres études pour une **courte durée (<1 an)**.

Concentration BC et ses sources

La concentration moyenne du Black Carbon (toutes périodes confondues) mesurée en région Hauts-de-France varie entre 0.5 et 2.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les concentrations du BC sont plus élevées pour les sites en proximité automobile, et sont 3 à 5 fois plus élevées que le site rural. Le BC montre un niveau équivalent sur les deux sites urbains à Lille et à Creil ($\sim 1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

La combustion de carburant fossile contribue entre 65 et 90% du BC mesuré, tout en étant plus important pour les sites trafic (84-90%). La combustion de biomasse représente 10% à 35% du BC, avec un maximum pour le site rural. Les sites urbains présentent des niveaux moyens : 17 à 27% lié au chauffage au bois et 73 à 83% lié au trafic.

Comparaison au niveau national

Parmi les sites trafic en France, le BC à Lille Leeds est 4 fois plus faible que celui du Boulevard Périphérique Est à Paris. Il se situe derrière les autres sites trafic (Reims, Paris centre et Lyon), mais reste plus élevé que le site trafic à Rouen. Les niveaux du BC de nos deux sites urbains (Lille Fives et Creil) se situent dans la moyenne des autres sites urbains en France.

Variation temporelle

Les profils journaliers des particules PM10 issues de la combustion de carburant fossile présentent 2 pics significatifs liés aux heures de pointe (matin 7h-9h et soir 17h-20h). Les particules PM10 issues de la combustion de biomasse sont plutôt importantes durant la soirée (19h-23h).

Le BC montre une variation saisonnière significative pour les 3 sites en continu (Fives, Leeds et Creil), avec une moyenne plus importante en hiver ($\sim 1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et plus faible en été (0.75-0.95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Le BC_{ff} montre une variation saisonnière très similaire au BC total. Le BC_{wb} est environ 4 fois plus important en période froide qu'en période chaude.

La variation pluriannuelle montre une diminution importante du BC : -36% pour Lille Leeds (2017-2020), -28% pour Lille Fives (2017-2020), et -13% pour Creil (2019-2020). Le BC_{ff} montre une variation pluriannuelle similaire au BC. En revanche, le BC lié à la combustion de biomasse (BC_{wb}) reste à un niveau stable pour Leeds et Creil. Il augmente de manière significative entre 2017 et 2020 (+38%) pour Lille Fives.

Evènement : épisodes de pollutions/incendies/impact de confinement

La mesure du BC peut aider à mieux comprendre la nature d'épisodes de pollution. Dans certains cas, les deux sources estimées (trafic local + chauffage au bois) peuvent expliquer jusqu'à 80-90% des particules PM10 mesurées. Au contraire, il peut indiquer que ce sont les autres polluants responsables pour cet épisode.

Comme le Black Carbon est un bon indicateur pour tous les types de combustion non complète. Il peut être également utilisé comme traceur en cas d'incendie. Deux études de cas sont analysées : le feu de Rouen en 2019 et l'incendie à Compiègne en 2021. Grâce aux mesures de BC, les panaches d'incendie sont identifiés sur les stations de surveillance en temps réel.

Enfin, l'impact du confinement au printemps 2020 lié au pandémie COVID-19 a été étudié sur les mesures du BC. Les faibles niveaux du BC issu du trafic enregistrés sur cette période ont été influencés par l'effet du confinement et des conditions météorologiques. En revanche, le BC lié au chauffage au bois, montre une hausse en lien avec la présence plus importante des travailleurs à leur domicile.

Perspectives

Nouvelle technique de mesure

En 2022, l'exercice d'intercomparaison entre l'AE33 et un nouveau mini analyseur de Black Carbon MA350 (microAeth®) a été effectué par Atmo HdF. Les résultats sont en cours d'exploitation.

A partir de 2023, un nouvel analyseur TCA08 (Magee Scientific, *Total Carbon Analyzer*, Model TCA08) sera utilisé pour mesurer la concentration du carbone total. Le coupage avec l'aéthalomètre AE33 permettra de distinguer le carbone organique et le carbone élémentaire en temps réel.

Implantation des sites

La stratégie d'implantation des sites de mesures du BC sera mise en place en lien avec la « stratégie de surveillance nationale de la concentration en nombre total des Particules (ultra-)fines »⁹, compte tenu de leurs enjeux potentiels en termes d'impact sanitaire. En effet, le Black Carbon est généralement compris au sein des particules ultrafines. A plus long terme, un maillage spatial incluant des alternances d'un site à l'autre entre mesure des PUF et du BC pourrait être envisagé.

Plan d'action

La surveillance du BC par l'aéthalomètre permet de caractériser certaines sources émissions, notamment le trafic routier et le chauffage résidentiel. L'évolution pluriannuelle à Creil et à Lille montrent que le BC_{ff} a diminué significativement pendant ces dernières années. Cependant, les émissions de la combustion du bois restent stables, voire tendent augmenter à Lille Fives. Il est nécessaire de mettre en place des actions concrètes afin de limiter les émissions de chauffage au bois résidentiel.

⁹ https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/LCSQA2020-Strat%C3%A9gie%20surveillance%20concentration%20des%20PUF_v8.pdf

Annexes

Annexe 1 : Glossaire

µg/m³ : microgramme de polluant par mètre cube d'air. $1 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,001 \text{ mg}/\text{m}^3 = 0,001$ milligramme de polluant par mètre cube d'air.

µm : micromètre. $1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm} = 0,001$ millimètre.

AASQA : Association Agréée pour la Surveillance de la Qualité de l'Air.

Anthropique : Relatif à l'activité humaine. Qualifie tout élément provoqué directement ou indirectement par l'action de l'homme.

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

BC : Black Carbon

BCff : Black Carbon issu de combustion de carburant fossile

BCwb : Black Carbon issu de combustion de biomasse

Programme CARA : Caractérisation chimique des particules

Concentration : la concentration d'un polluant représente la quantité du composé présent dans l'air et s'exprime en masse par mètre cube d'air. Les concentrations des polluants caractérisent la qualité de l'air que l'on respire.

Conditions de dispersion : ensemble de conditions atmosphériques permettant la dilution des polluants dans l'atmosphère et donc une diminution de leurs concentrations (vent, température, pression, rayonnement...).

COVnM : Composés Organiques Volatils non Méthaniques

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement.

EC : carbone élémentaire

Emissions : rejets d'effluents gazeux ou particulaires dans l'atmosphère issus d'une source anthropique ou naturelle (exemple : cheminée d'usine, pot d'échappement, feu de biomasse...).

EPCI : Etablissement Public de Coopération Intercommunale.

Episode de pollution : période pendant laquelle la procédure d'information et d'alerte a été déclenchée traduisant le dépassement du niveau d'information et de recommandations voire du niveau d'alerte pour l'un ou plusieurs des polluants suivants : SO₂, NO₂, O₃ et PM10.

HAP : Hydrocarbure aromatique polycyclique

INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques.

LCSQA : Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air.

ng/m³ : nanogramme de polluant par mètre cube d'air. $1 \text{ ng}/\text{m}^3 = 0,000001 \text{ mg}/\text{m}^3 = 0,000001$ milligramme de polluant par mètre cube d'air.

Ni : nickel.

NH₃ : Ammoniac

NO₂ : dioxyde d'azote.

NO_x : oxydes d'azote.

O₃ : ozone.

OC : carbone organique

OMS : Organisation mondiale de la Santé

Objectif à long terme : niveau d'ozone à atteindre à long terme et à maintenir, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble.

Objectif de qualité : niveau à atteindre à long terme et à maintenir, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble.

PCAET : Plan Climat Air Energie Territorial

PM₁₀ : particules en suspension de taille inférieure ou égale à 10 µm.

PM_{2.5} : particules en suspension de taille inférieure ou égale à 2,5 µm.

Polluant primaire : polluant directement émis par une source donnée.

Polluant secondaire : polluant non émis directement, produit de la réaction chimique entre plusieurs polluants présents dans l'atmosphère.

PPA : Plan de Protection de l'Atmosphère

PRSQA : Programme Régional de Surveillance de la Qualité de l'Air.

PUF : particules ultrafines

SO₂ : dioxyde de soufre.

Valeur cible : niveau à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné, et fixé afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou l'environnement dans son ensemble.

Valeur limite : niveau à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser, et fixé sur la base des connaissances scientifiques afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble.

Annexe 2 : Choix de la valeur alpha

Le choix de la valeur alpha influence directement la répartition des sources lié au BC.

Dans cette étude, le BC lié à la combustion de biomasse (BC_{wb}) est calculé avec les coefficients $\alpha_{ff}=1$ et $\alpha_{wb}=2$. Néanmoins, ces coefficients peuvent être corrigés sur un site de mesure particulier, afin de mieux caractériser les sources de combustion locales. Selon le guide LCSQA, il est possible de considérer **les valeurs maximales de α pendant la nuit en hiver** lorsque la contribution de particules issues de la combustion de biomasse est majoritaire ($\alpha=\alpha_{wb}$), ainsi que **les valeurs minimales de α pendant les pics de trafic entre avril et octobre** ($\alpha= \alpha_{ff}$).

Dans le Tableau 2, la moyenne des 2% des minima et maxima sur l'exposant d'Angström (α) est calculée pour ces 3 sites pour la période 2019-2020.

La **valeur α minimale** varie entre **1.03 et 1.09** ; elle est plus faible à Leeds, et plus élevée à Creil. La **valeur α maximale** varie entre **1.54 et 1.62** pour ces 3 sites.

Donc α_{ff} optimal pour nos sites est légèrement plus élevé que la valeur par défaut. En revanche, α_{wb} de nos stations est 25% moins élevé que la valeur définie. Ces influences sur la répartition des sources (BC_{wb} et BC_{ff}) peuvent être étudiées sur une prochaine étude.

Tableau 2 Statistiques sur l'exposant d'Angström (α)

Alpha (2019-2020)	Fives	Leeds	Creil
Moyenne des 2% des minima	1.04	1.03	1.09
Moyenne des 2% des maxima	1.62	1.54	1.59

α_{ff} optimal pour nos sites est légèrement plus élevé que la valeur par défaut. En revanche, α_{wb} de nos stations est 25% moins élevé que la valeur définie. Ces influences sur la répartition des sources (BC_{wb} et BC_{ff}) pourront être étudiées dans une prochaine étude

Annexe 3 : Brown Carbon

Une méthode alternative pour estimer la concentration liée à la combustion de biomasse va être introduite. Elle sera comparée avec notre méthode classique (BC_{wb}).

La notion du **Brown Carbon (BrC)** a été introduite récemment en tant que cause possible du changement climatique. **Cette classe de carbone organique, connue pour sa couleur brun clair, est émise par la combustion de matière organique.** Le Brown Carbon coexiste avec le Black Carbon lors qu'il est produit par la combustion de biomasse et de biocarburant dans l'atmosphère.

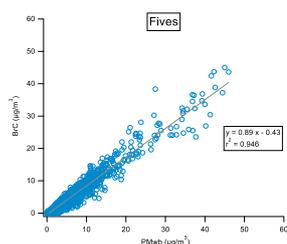
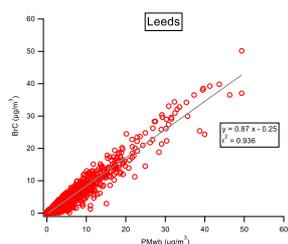
La concentration du **Brown Carbon (BrC)** peut être estimée par l'équation suivante :

$$BrC \approx 5,735 \times (BC1 - BC7)$$

selon le guide LCSQA AE33 version 2020¹⁰, avec $BC1$ = concentration équivalente du BC à 370 nm, et $BC7$ = concentration équivalente du BC à 950 nm.

Cette méthode alternative a été testée pour évaluer la concentration de PM_{wb} pour les **données à Leeds, Fives, Amiens et Creil en 2020**. Le Brown Carbon est comparé avec les PM_{wb} estimées par la méthode classique, qui est décrite dans la section 3.2.

Les corrélations sont très bonnes entre les deux méthodes pour les 4 sites étudiés avec $R^2 > 0.94$, pente = 0.87 – 1.04.



¹⁰ LCSQA, « Guide méthodologique pour la mesure du « Black Carbon » par Aethalomètre multi longueur d'onde AE33 dans l'air ambiant (Version 2020) ».



Figure 29 Comparaison du Brown Carbon et PMwb à Leeds, Fives, Amiens et Creil en 2020

En résumé, **la concentration du Brown Carbon (BrC) est un bon indicateur de combustion de biomasse. Cette méthode alternative peut être utilisée pour estimer les PM_{wb}** (PM10 issues de combustion de biomasse).

- *La concentration du Brown Carbon (BrC) peut être estimée par $(BrC) \approx 5,735 \times (BC1 - BC7)$.*
- *Cette méthode alternative a été testée pour évaluer la concentration de PM_{wb} pour les données à Leeds, Fives, Amiens et Creil.*
- *Les corrélations sont très bonnes entre les deux méthodes pour les 4 sites étudiés*
- *En résumé, la concentration du Brown Carbon (BrC) est un bon indicateur de combustion de biomasse. Cette méthode alternative peut être utilisée pour estimer les PM_{wb} (PM10 issues de combustion de biomasse).*

Annexe 4 : Comparaison EC/BC et $PM_{\text{biomasse}}/BC_{\text{wb}}$

La concentration du BC mesurée par l'aéthalomètre est comparée avec celle du carbone élémentaire prélevé sur filtre afin de vérifier les mesures du BC.

Le carbone suie, présente une double caractéristique physique (thermique et optique), ce qui conduit deux types de classification : le **Carbone Élémentaire (EC)**, qui représente la partie réfractaire (jusqu'à 600-800 °C) des particules carbonées émises par combustion et le **Black Carbon (BC)** qui représente la fraction absorbant le rayonnement lumineux.

A Lille Fives, dans le cadre du programme CARA (caractérisation chimique des particules), les particules PM10 sont prélevées sur filtre puis analysées pour connaître leur composition chimique (période d'étude : 2018-2020). Le carbone élémentaire (EC) et le lévoglucosan ont été analysés parmi une trentaine d'espèces chimiques pour chaque filtre.

Dans un premier temps, la concentration de l'EC prélevé sur le filtre et le BC mesuré par AE33 sont comparés. Les comparaisons entre mesure de BC et d'EC montrent une relation linéaire avec un coefficient directeur fluctuant d'un site de mesure à un autre, et généralement compris entre 1 et 2. Une non-linéarité ou un rapport très supérieur à 2 doivent amener à une investigation sur la qualité des données.

A Lille Fives, deux périodes d'études ont été prises en compte pour la comparaison EC/BC : 01-05/2018 (5 mois) et 07/2019-06/2020 (1 an).

Le ratio BC/EC s'établit à **1.3** pour les 5 premiers mois de l'année 2018, et le ratio augmente à **1.7** pour une année complète (2019-2020). Le coefficient de détermination (R^2) est plus élevé pour un an de données (**0.86** contre **0.7**). Cette comparaison valide nos mesures du BC par aéthalomètre à Fives.

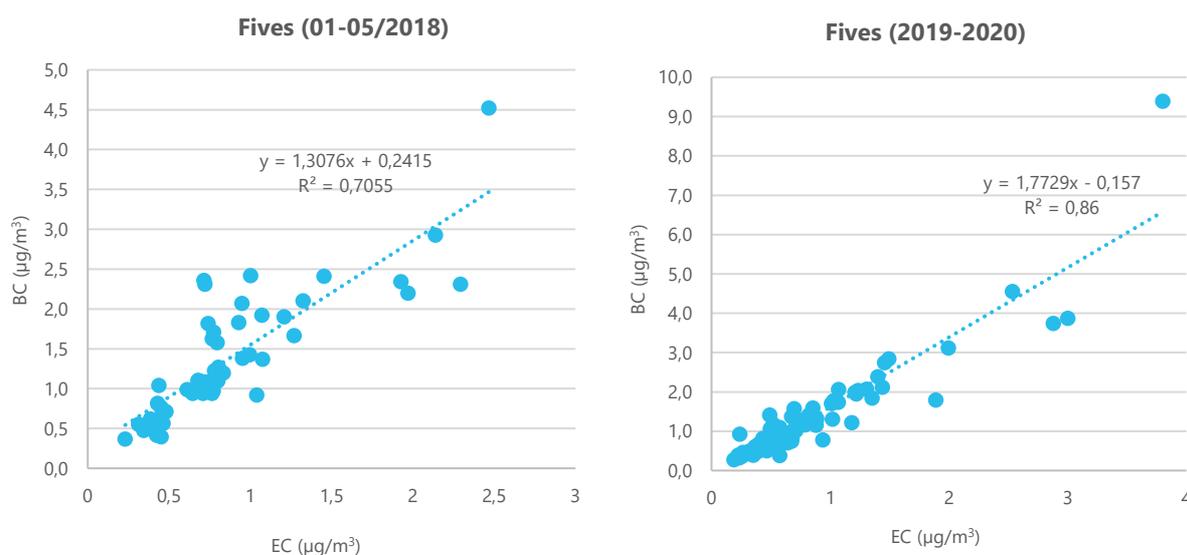


Figure 30 Comparaison BC/EC à Fives pour la période 01-05/2018 et pour la période 2019-2020

Ensuite, le facteur de conversion entre le PM_{biomasse} et le BC_{wb} est discuté. Il permet de valider le coefficient appliqué pour convertir BC_{wb} en PM_{wb} .

Le **lévoglucosan** est considéré comme **un bon traceur** des particules émises par **la combustion de biomasse en air ambiant**.

La concentration de carbone organique (OC) liée à la combustion de biomasse (**OC_{biomasse}**) peut être estimée à partir de la concentration du lévoglucosan à l'aide d'un facteur multiplicatif (**f**) :

$$OC_{biomasse} = f \times \text{lévoglucosan}$$

Les valeurs de **f** rapportées dans la littérature varient entre 3 et 15. La valeur $f=7.35$ a été précédemment utilisée par Puxbaum et al. (2007)¹¹ pour différents sites de fond européen. Selon le rapport LCSQA en 2016¹², afin de limiter les risques de surestimation, il est proposé ici de fixer une borne supérieure en se basant également sur les mesures de OC (total) et en considérant que la valeur de **f** ne peut pas être supérieure à la moyenne des 3 ratios journaliers (OC_{total}/lévoglucosan) les plus faibles. De cette manière, OC_{biomasse} reste logiquement inférieur à OC. Dans cette étude, la valeur **f** est calculée comme la moyenne des 3 ratios journaliers (OC/lévoglucosan) les plus faibles dont la valeur **f= 6.9** a été appliquée.

La concentration de **PM_{biomasse}** peut ensuite être estimée par application successive de 2 nouveaux facteurs multiplicatifs, permettant de convertir OC_{biomasse} en OM_{biomasse} puis OM_{biomasse} en PM_{biomasse} (en intégrant la part de carbone élémentaire provenant de la combustion de biomasse). Ces facteurs ont été choisis ici comme respectivement égaux à 1.8 et 1.1, se basant sur la littérature^{13,14} :

$$PM_{biomasse} = OC_{biomasse} \times 1.8 \times 1.1$$

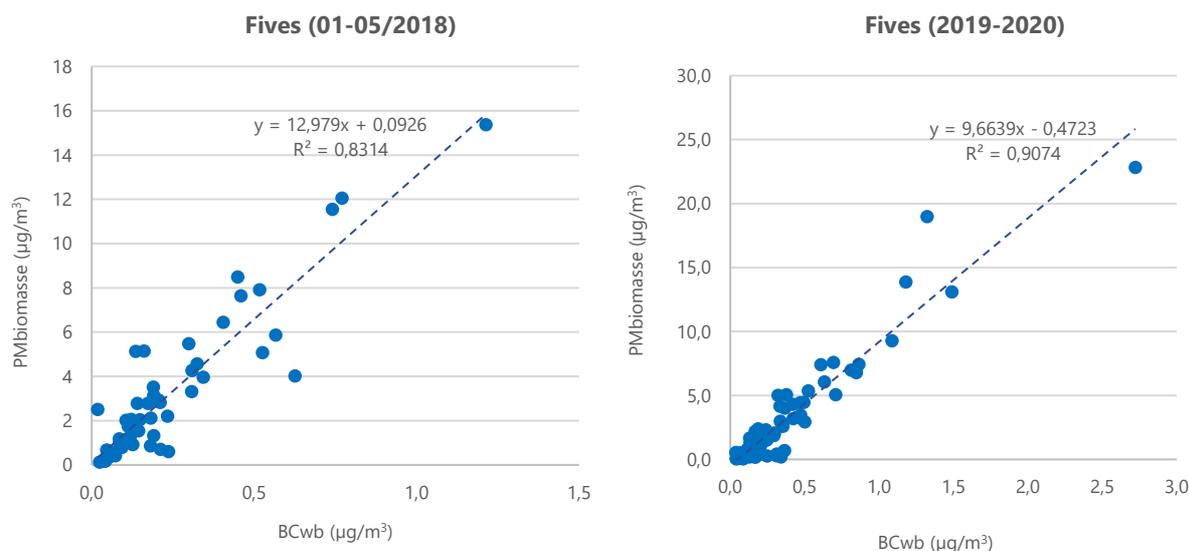


Figure 31 Comparaison PM_{biomasse}/BC_{wb} à Fives pour la période 01-05/2018 et pour la période 2019-2020

Sur la Figure 31, **les PM_{biomasse} calculées montrent une très bonne corrélation avec BC_{wb}** ($R^2=0.83$ pour 5 mois de données, et $R^2=0.9$ pour un an de données).

¹¹ Hans Puxbaum et al., « Levoglucosan levels at background sites in Europe for assessing the impact of biomass combustion on the European aerosol background », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 112, n° D23 (16 décembre 2007), <https://doi.org/10.1029/2006JD008114>.

¹² LCSQA, « Impact de la combustion de biomasse sur les concentrations de PM10 dans 10 agglomérations du programme CARA au cours de l'hiver 2014-2015 », 2016.

¹³ Favez et al., « Inter-comparison of source apportionment models for the estimation of wood burning aerosols during wintertime in an Alpine city (Grenoble, France). », *Atmospheric Chemistry and Physics* 10 (2010): 5295-9314.

¹⁴ Petit et al., « Submicron aerosol source apportionment of wintertime pollution in Paris, France by double positive matrix factorization (PMF²) using an aerosol chemical speciation monitor (ACSM) and a multi-wavelength Aethalometer », *Atmospheric Chemistry and Physics* 14 (2014): 13773-87.

Leur ratio permet de retrouver le coefficient **b** dans l'équation suivante (voir la section 3.2) pour convertir la concentration BC_{wb} en PM_{wb} :

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

La valeur **b=10** a été choisie par le LCSQA¹¹ pour toutes les stations de mesures du BC en France, en la raison de l'harmonisation de calcul. Selon la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, le ratio est à **12.9** pour la période 01-05/2018, et est à **9.6** pour l'année 2019-2020. Donc le choix du coefficient $b=10$ correspond bien l'estimation des PM_{wb} à Lille sur une longue période. En même temps, ce ratio peut varier dans le temps et en fonction du site de mesure.

En résumé, les résultats obtenus de ce type d'exercice (ratio PM_{wb}/BC_{wb}) peuvent ainsi être appliqués localement (pour un site de mesure) pour estimer la part de PM10 liée à la combustion de biomasse à partir des concentrations de BC_{wb} .

- *A Lille Fives, le ratio BC/EC s'établit à 1.3 pour les 5 premiers mois de l'année 2018, et le ratio augmente à 1.7 pour une année complète (2019-2020).*
- *La concentration de carbone organique (OC) liée à la combustion de biomasse ($OC_{biomasse}$) peut être estimée à partir de la concentration du lévoglucosan à l'aide d'un facteur multiplicatif (f). La valeur $f=6.9$ a été appliquée dans cette étude.*
- *Les $PM_{biomasse}$ calculées par cette méthode montrent une très bonne corrélation avec BC_{wb} . Leur ratio permet de calculer le coefficient b pour convertir la concentration BC_{wb} en PM_{wb} .*
- *La valeur $b=10$ a été choisie pour toutes les stations de mesures du BC en France, en la raison de l'harmonisation de calcul. Cette valeur correspond bien l'estimation des PM_{wb} à Lille.*

RETROUVEZ TOUTES
NOS **PUBLICATIONS** SUR :
www.atmo-hdf.fr

Atmo Hauts-de-France

Observatoire de l'Air

199, rue Colbert – Bâtiment Douai

59000 Lille

