



Démonstrateur chauffage bois

Mai 2020

1. Contexte

Les émissions de polluants atmosphériques liées au secteur résidentiel proviennent du chauffage, de la climatisation, de la cuisson, du lavage, de la production d'eau chaude sanitaire, etc.

Dans les Bouches-du-Rhône, les émissions résidentielles représentent environ 19 % pour les PM_{2.5} et 16 % pour les PM₁₀ (source : inventaire AtmoSud 2016, édition 2019). Une partie des particules fines est constituée de carbone suie (black carbon) dont l'origine est principalement la combustion de produits pétroliers ou de biomasse. Même si les émissions de particules suivent une tendance à la baisse depuis une dizaine d'année (-27 % de 2007 à 2016), la part du secteur résidentiel ne diminue pas d'autant (-8 %).

Dans cette part résidentielle, le chauffage au bois est à l'origine de 92 % des émissions de particules en air extérieur.

L'utilisation du « bois-énergie » devrait encore se développer selon les orientations du Schéma Régional Biomasse¹, d'où la nécessité d'une vigilance relative aux émissions liées à cette énergie. En effet si cette dernière est développée au travers de systèmes peu performants, elle pourrait produire une dégradation de la qualité de l'air.

Un foyer ouvert émet environ 60 fois plus de particules à l'extérieur qu'un système de chauffage au bois performant.

L'évolution du parc de chauffage est donc un levier intéressant pour la réduction des émissions de particules et l'amélioration de la qualité de l'air ambiant. Le taux de renouvellement est toutefois lent. Ainsi, l'accélération de ce renouvellement du parc existant dans le résidentiel est une priorité.

Le Conseil départemental a signé avec l'ADEME une convention Prime Air Bois destinée à favoriser le remplacement des vieux appareils de chauffage au bois par des équipements plus performants, labélisés flamme verte 7 étoiles².

La qualité de l'air intérieur des logements est également impactée par les appareils de chauffage au bois.

Plus la combustion est complète, moins les émissions de polluants atmosphériques sont importantes. Les émissions à l'intérieur du logement dépendent du rendement de l'appareil, de son entretien et de celui de la cheminée d'évacuation, du mode d'allumage, du type de bois utilisé. Elles dépendent également de la capacité de l'appareil à éviter les inversions de tirage lorsque le tirage thermique n'est pas important (phase d'allumage, fin de combustion, fonctionnement à allure réduite). Selon l'INERIS, « environ 80 % des émissions polluantes ont lieu durant les 10 à 15 minutes après l'allumage de la charge »³.

Les principaux polluants émis sont les particules fines, le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote et les composés organiques volatils (COV) comme le benzène et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Les foyers ouverts impactent fortement l'air intérieur. C'est aussi le cas des foyers fermés anciens non performants. De nos jours, les systèmes sont plus performants, en particulier ceux labélisés flamme verte. Ce label est basé sur le rendement énergétique et les émissions de monoxyde de carbone, particules fines et d'oxydes d'azote. A noter que, quel que soit l'appareil de chauffage utilisé, l'évacuation des cendres et le nettoyage du foyer peuvent être des phases significativement émissives, même si celles-ci restent ponctuelles.

¹ prévu par la [Loi sur la transition énergétique](#) du 17 août 2015, encadré par le décret du 19 août 2016

² www.flammeverte.org/decouvrir-flamme-verte/comprendre-etiquette

³ Synthèse des études à l'émission réalisées par l'INERIS sur la combustion du bois en foyers domestiques – Mai 2018

2. Objectif

Le Conseil Départemental 13 et AtmoSud souhaitent porter à connaissance et communiquer sur les bénéfices attendus sur la qualité de l'air des modes de chauffage au bois récents et performants. Afin d'avoir une approche quantitative et pédagogique de cet impact, AtmoSud et le CD13 mettent en place une expérimentation dite « démonstrateur chauffage bois » auprès d'un particulier volontaire, ciblant la pollution intérieure. Cette opération consiste en des mesures d'air intérieur dans un logement qui fait l'objet du remplacement de son foyer ouvert par un insert Flamme Verte 7 étoiles.

3. Méthodologie de l'expérimentation

3.1 Principe

L'objectif de cette expérimentation est de mettre en évidence les améliorations de qualité de l'air intérieur apportées par un système de chauffage au bois performant. Cela nécessite la mise en place de deux campagnes de mesures comparatives dans un même logement en période froide :

- l'une en présence d'un système à foyer ouvert (avant travaux),
- l'autre après la mise en place d'un insert labellisé « flamme verte 7 étoiles ».

Le bois utilisé sera de la même essence. Au cours des deux périodes de test, les quantités de bois utilisées sont renseignées afin d'évaluer les gains de bois pour un confort de chauffe identique.

3.2 Description des locaux

La campagne de mesure est réalisée au sein de la maison forestière de Marseilleveyre située avenue Colgate dans le 9^{ème} arrondissement de Marseille. Elle est située dans un large espace arboré, avec des bâtiments de logements à l'ouest à une distance de 50 mètres.



Figure 1 : Emplacement de la maison forestière dans son environnement de proximité

Il s'agit d'une maison ancienne de plein pied constituée de 4 pièces, sans isolation murale mais avec une isolation des combles. Les menuiseries sont récentes, performantes sur le plan énergétique. Le système de chauffage principal au bois est situé dans le salon/salle à manger. Des chauffages d'appoint électriques sont situés dans chaque pièce de vie. Le renouvellement d'air n'est réalisé que par la simple ouverture des fenêtres.



Figure 2 : Façade nord de la maison

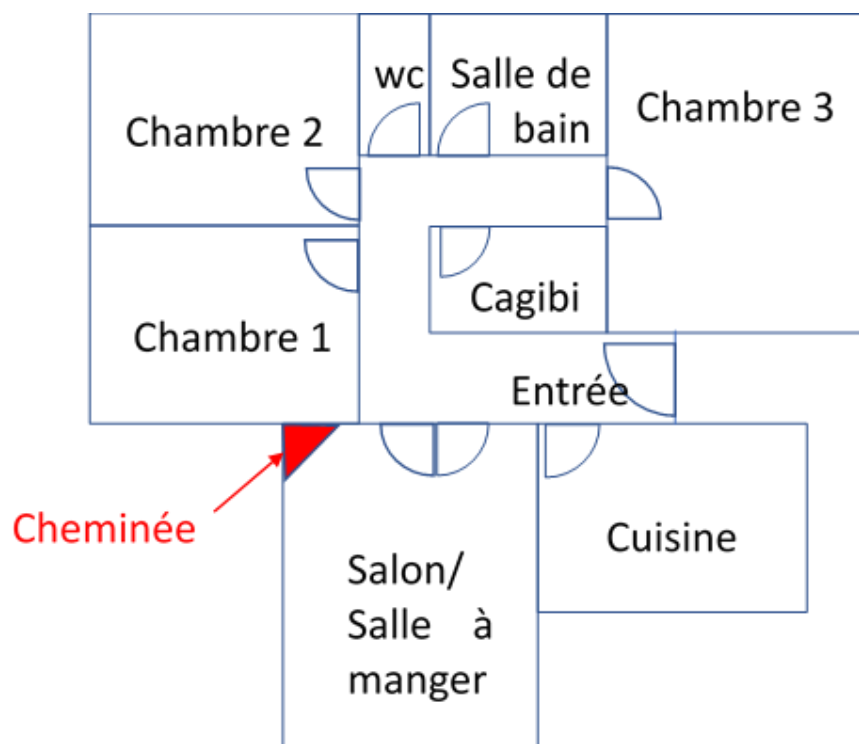


Figure 3 : Plan de la maison

La pièce du salon/salle à manger, dans laquelle est situé le système de chauffage au bois, représente une surface de 25 m², avec une hauteur sous plafond de 2,5 m, soit un volume de 61 m³. Elle est ouverte sur l'entrée et la cuisine et donne accès au jardin côté nord. Les revêtements sont du carrelage au sol et des enduits peints aux murs et au plafond. L'ameublement de la pièce est constitué essentiellement de meubles composés de panneaux de particules de bois.

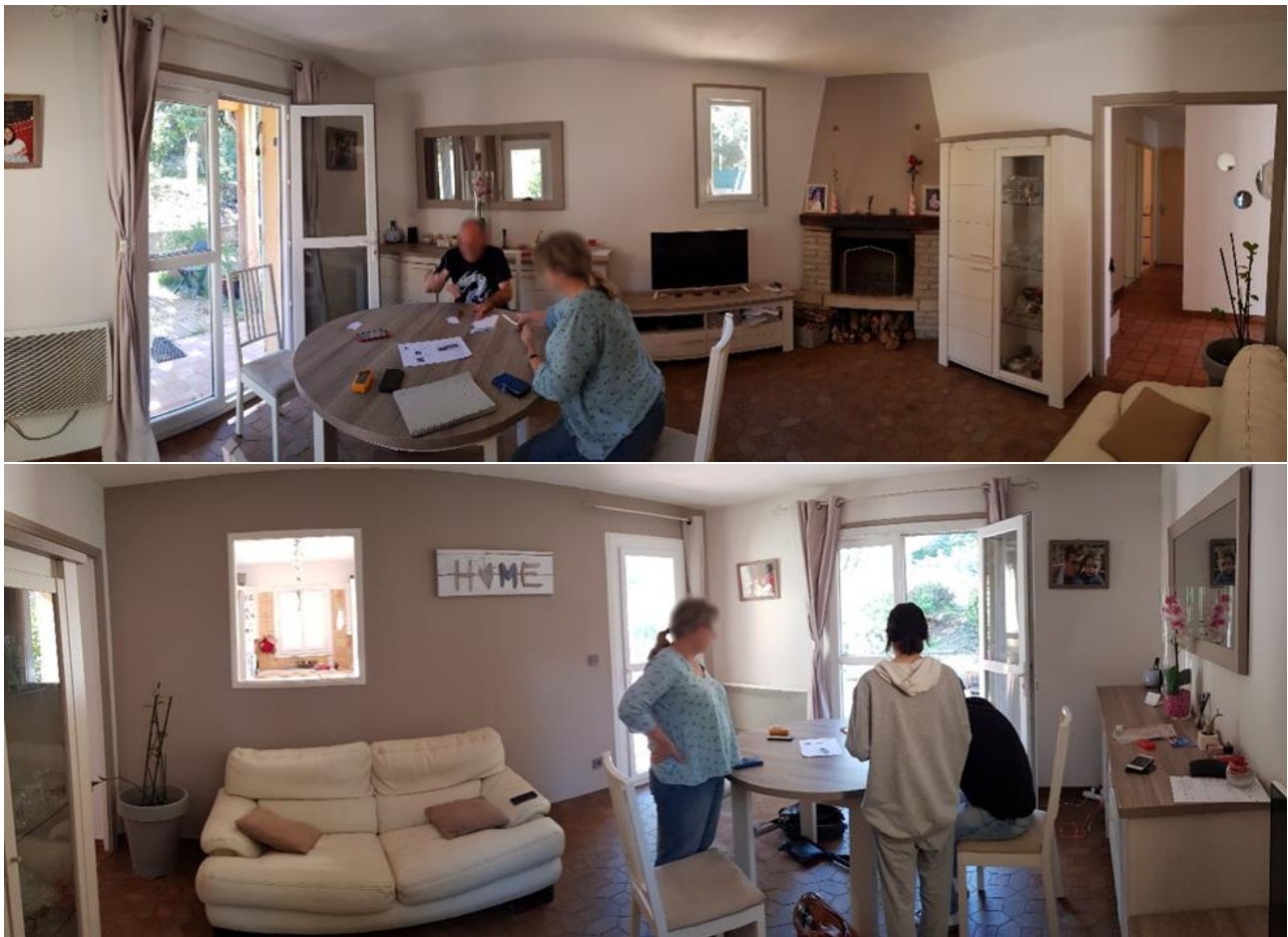


Figure 4 : Aménagement intérieur du salon

Le système de chauffage initial est une ancienne cheminée à foyer ouvert qui a été remplacée mi-janvier pour un insert haute performance labellisé flamme verte.



Figure 5 : Foyer ouvert à gauche, insert fermé labellisé flamme verte à droite

3.3 Périodes et paramètres de mesures

Deux campagnes de mesure de deux semaines chacune ont été réalisées en période hivernale :

- Du 21 novembre au 6 décembre 2019 : en présence du système de chauffage au bois par foyer ouvert,
- Du 22 janvier au 7 février 2020 : après changement du système de chauffage par un insert labélisé flamme verte 7 étoiles.

Les paramètres de mesure retenus ont été choisis en fonction des connaissances sur les émissions de polluants intérieurs des systèmes de chauffage à combustion de bois :

- Particules fines :
 - Concentrations des particules fines PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁
 - Nombre et distribution statistique des tailles de particules (granulométrie) de 10 nm à 35 µm
- Black carbon ou carbone suie
- Dioxyde d'azote
- Monoxyde de carbone
- Paramètres de confort :
 - Dioxyde de carbone (CO₂), pour évaluer le confinement
 - Température (°C) et Humidité relative (%)

Le matériel utilisé est décrit en annexe 1.

3.4 Emplacement des dispositifs de mesure

L'ensemble des appareils de mesure ont été disposés sur le buffet du salon situé côté cheminée à une distance approximative de 3 mètres. Les tubes passifs ont été disposés au niveau du lustre du plafond, au centre de la pièce.



Figure 6 : Emplacement des différents dispositifs de mesure

3.5 Suivi des pratiques

Le suivi des activités des occupants est réalisé par le renseignement d'un document permettant de tracer :

- La présence d'occupants
- La mise en marche du système de chauffage
- La méthode d'allumage
- Les périodes d'ouverture des fenêtres
- Les activités potentiellement polluantes autres que le système de chauffage (cuisson, ménage...)

4. Evolution de la qualité de l'air extérieur pendant les deux campagnes

Les paramètres de mesure de la qualité de l'air en air ambiant ont été suivis en parallèle de ceux de l'air intérieur, de deux manières :

- Concentrations de fond urbain à la station de Marseille/Longchamps (températures, NO₂, PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, black carbon)
- Concentrations extérieures sur le site du logement de la maison forestière (NO₂)

Les paramètres de températures, NO₂ et black carbon ont présenté des concentrations extérieures similaires entre les deux périodes de mesures. Pour ces paramètres, les concentrations extérieures semblent avoir influencé la qualité de l'air intérieur de la même manière pour les deux périodes de mesures.

Les concentrations extérieures en particules fines PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁ ont présenté des concentrations plus importantes pendant la seconde période (augmentation de l'ordre de 40 %). La contribution de l'air ambiant à la qualité de l'air intérieur doit avoir été plus importante lors de la seconde période.

Paramètres de mesure extérieurs	Période Foyer ouvert (novembre/décembre 2019)		Période Insert flamme verte (janvier/février 2020)	
	Mesures sur site En extérieur	Station de fond urbain Longchamp	Mesures sur site En extérieur	Station de fond urbain Longchamp
Températures (°C)	-	12.9	-	12.5
NO ₂ (µg/m ³)	13.6	33.3	13.2	32.1
PM ₁₀	-	13.3	-	19.4
PM _{2,5}	-	7.9	-	11.3
PM ₁	-	6.1	-	8.6
Black carbon	-	2.1	-	2.1

Les températures, ainsi que les concentrations en dioxyde d'azote et en black carbon ont montré des concentrations similaires entre les deux périodes. Cela signifie que, pour ces paramètres, les contributions extérieures aux concentrations intérieures étaient les mêmes. Les concentrations des différentes fractions de particules fines ont présenté une augmentation de l'ordre de 40% lors de la deuxième période par rapport à la première. La contribution de l'air ambiant à la qualité de l'air intérieur doit avoir été plus importante lors de la seconde période pour les particules fines.

5. Résultats

La majorité des paramètres de mesure ont montré une évolution significative entre les deux périodes : une diminution de la plupart des polluants (particules fines et ultrafines, black carbon, et dioxyde d'azote) mais une augmentation de certains paramètres comme l'humidité relative et le confinement. Les résultats des différents paramètres de mesure sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Evolution des différents paramètres de mesure de la campagne entre les deux périodes de mesure

Moyennes sur la période	Période Foyer ouvert	Période Insert flamme verte	Evolution
Température (°C)	21,6	22,3	
Humidité relative (%)	57,7	65,4	
CO ₂ (ppm)	614	1441	
Indice de confinement (Indice ICONE)	0	3	
NO ₂ (µg/m ³)	9,7	5,3	
CO (ppm)	0,7	0,9	
PM ₁₀ (µg/m ³)	29,1	21,7	
PM _{2,5} (µg/m ³)	18,1	11,7	
PM ₁ (µg/m ³)	15,3	8,5	
Particules ultrafines (nb.part/cm ³)	4742	372	
Black carbon total (µg/m ³)	1,12	0,76	
Black carbon issu de la combustion de bois (µg/m ³)	0,57	0,27	
Black carbon issu de la combustion de fuel fossile (µg/m ³)	0,55	0,49	

5.1 Les conditions hygrothermiques intérieures

Les mesures des conditions hygrothermiques prises dans le salon, lieu où se trouve le système de chauffage, montrent une très légère augmentation de la température moyenne et minimale après changement du système de chauffage. Sur ces mêmes périodes, les températures extérieures à la station de fond urbain Marseille/Longchamp étaient similaires.

Les taux d'humidité relative intérieurs montrent une augmentation des niveaux.

Tableau 2 : Température et humidité relative des deux périodes de mesure

	Période Foyer ouvert (nov/déc 2019)			Période Insert flamme verte (janvier/février 2020)		
	Moyenne	Minimum (10 min.)	Maximum (10 min.)	Moyenne	Minimum (10 min.)	Maximum (10 min.)
Température (°C)	21.6	19.1	23.8	22.3	20.2	24
Humidité relative (%)	57.7	42	68	65.4	53	72

5.2 Dioxyde de carbone intérieur

Les mesures de CO₂ permettent d'évaluer le renouvellement d'air en période d'occupation des pièces et de calculer l'indice de confinement ou indice ICONÉ (cet indice de confinement d'air dans les écoles a été élaboré par le CSTB⁴). Il prend en compte à la fois la fréquence des situations de confinement, mais également leur intensité. Cet indice est compris entre 0 et 5, la note 0 correspondant à l'absence de confinement (situation la plus favorable), et la note 5 à un confinement extrême (situation la plus défavorable).

Les deux périodes de mesure montrent des conditions de confinement différentes, avec une augmentation des concentrations en CO₂ après mise en place de l'insert flamme verte, impliquant un indice ICONÉ plus important.

Tableau 3 : Concentrations en CO₂ des deux périodes de mesure

ppm	Période Foyer ouvert (nov./déc. 2019)				Période Insert flamme verte (janvier/février 2020)			
	Moyenne	Minimum (10 minutes)	Maximum (10 minutes)	Indice ICONÉ ⁴	Moyenne	Minimum (10 minutes)	Maximum (10 minutes)	Indice ICONÉ ⁵
CO ₂	614	421	1 003	0	1 441	625	2 579	3

⁴ Centre scientifique et technique du bâtiment : <http://www.cstb.fr>

⁵ L'indice de confinement ICONÉ est fonction du pourcentage de dépassement des seuils de 1000 et 1700 ppm : de 0 (confinement nul) à 5 (confinement extrême) - Indice de confinement de l'air intérieur : des écoles aux logements - POLLUTION ATMOSPHERIQUE N° 228 - JANVIER-MARS 2016

5.3 Dioxyde d'azote intérieur

Les concentrations en dioxyde d'azote observées après changement du système de chauffage ont significativement baissé, alors que les concentrations extérieures sont quasiment identiques entre les deux périodes de mesure.

Tableau 4 : Concentrations intérieures et extérieures en dioxyde d'azote des deux périodes de mesure

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Période Foyer ouvert (nov./déc. 2019)	Période Insert flamme verte (janvier/février 2020)
NO₂	9.7	5.3

5.4 Monoxyde de carbone intérieur

Pour le monoxyde de carbone, il n'est pas observé de différences significatives des concentrations moyennes entre les deux périodes de mesure. Seuls les maximums observés sont moins importants après changement du système de chauffage.

Tableau 5 : Concentrations en monoxyde de carbone des deux périodes de mesure

ppm	Période Foyer ouvert (nov./déc. 2019)		Période Insert flamme verte (janvier/février 2020)	
	Moyenne (de la période)	Max. (10 minutes)	Moyenne (de la période)	Max. (10 minutes)
CO	0.7	4.6	0.9	1.4

5.5 Les particules fines intérieures

Les résultats obtenus au cours des deux périodes montrent une diminution significative des concentrations moyennes intérieures en PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁ après changement du système de chauffage, alors que les concentrations de fond urbain de Marseille/Longchamp ont augmenté. Les concentrations maximales à la minute en PM₁₀ et PM_{2,5} sont supérieures lors de la deuxième période alors que les concentrations du percentile 99 sont moins importantes.

Tableau 6 : Concentrations intérieures et extérieures en particules fines des deux périodes de mesure

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Période Foyer ouvert (nov./déc. 2019)			Période Insert flamme verte (janvier/février 2020)		
	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moyenne	29.1	18.1	15.3	21.7	11.7	8.5
Minimum (minute)	1.9	1.9	1.6	1.8	1.8	0.9
Percentile 99 (minute)⁶	200	128	119	150	61	47
Maximum (minute)	902	444	440	1394	754	110

5.6 Les particules ultrafines intérieures

La mesure des particules ultrafines a montré une diminution importante des concentrations du nombre total de particules et plus particulièrement des fractions de 10 nm à 250 nm.

Tableau 7 : Concentrations en nombre des particules ultrafines des deux périodes de mesure

⁶ Percentile 99 : Les percentiles sont les valeurs de la variable qui divisent la population ou la variable continue en 100 groupes égaux en nombre. Le percentile 99 correspond au 99^{ème} rang le plus important. Cela permet de ne pas prendre en compte les 1% de valeurs les plus importantes.

Nb. part./cm ³	Période Foyer ouvert (nov./déc. 2019)			Période Insert flamme verte (janvier/février 2020)		
	Moyenne	P99 horaire	Max horaire	Moyenne	P99 horaire	Max horaire
Total count (10 nm-40 µm)	4742	29455	58919	372	2062	4196
10 - 14 nm	16.7	103	220	0.7	4	12
14 - 19 nm	56.0	314	737	2.3	15	42
19 - 27 nm	124.1	686	1604	4.9	33	96
27 - 37 nm	276.4	1539	3556	10.2	77	221
37 - 52 nm	529.6	3044	6778	17.9	158	434
52 - 72 nm	757.5	4531	9743	24.0	255	631
72 - 100 nm	958.5	5939	12282	30.5	383	821
100 - 139 nm	894.4	5691	11488	31.5	425	766
139 - 193 nm	673.8	4492	8512	28.3	359	579
193 - 253 nm	250.3	1683	3002	13.1	144	261
253 - 298 nm	102.2	652	1321	102.4	387	665
298 - 352 nm	53.7	405	962	55.5	264	423
352 - 414 nm	27.3	216	570	29.1	158	258
414 - 488 nm	12.5	97	282	12.2	72	116
488 - 576 nm	5.5	40	138	5.5	38	58
576 - 679 nm	2.1	13	44	1.9	13	21

5.7 Black carbon intérieur

Les concentrations moyennes en black carbon ont diminué après le changement du système de chauffage alors que les concentrations de fond urbain de Marseille/Longchamp sont restées identiques.

Avec le dispositif de mesure utilisé, il est possible d'estimer la part de black carbon issue de la combustion du fuel fossile (BC_{ff}) et celle issue la combustion de bois (BC_{wb}). Alors que la part de BC_{ff} est restée similaire d'une période à l'autre, la part de BC_{wb} a chuté de moitié lors de la période avec insert flamme verte.

Tableau 8 : Concentrations en black carbon des deux périodes de mesure

µg/m ³	Période Foyer ouvert (nov./déc. 2019)	Période Insert flamme verte (janvier/février 2020)
Moyenne BC (ensemble de la période)	1.12	0.76
Moyenne BC_{wb}	0.57	0.27
Moyenne BC_{ff}	0.55	0.49

6. Interprétations

En 2008, l'INERIS a réalisé une étude d'impact sur l'air intérieur de différents systèmes de chauffages au bois. Elle a consisté à la mise en place d'une campagne de mesure dans six logements avec des systèmes de chauffage différents (poêles, inserts, foyers ouverts, plus au moins récents)⁷ et à l'analyse des données statistiques de la campagne nationale logement de l'OQAI⁸. Les résultats des campagnes de mesure de cette étude étaient influencés par les caractéristiques spécifiques de chaque logement (notamment en termes de renouvellement d'air). Ce n'est pas le cas de ce démonstrateur, puisque seul le système de chauffage au bois a été changé entre les deux campagnes de mesures.

Les résultats de mesures de cette expérimentation sont cependant cohérents avec ceux de l'étude de l'INERIS (pour les polluants en communs), qui montre les éléments suivants :

- Les concentrations intérieures en particules fines PM₁₀ et PM_{2,5} sont influencées par les systèmes de chauffage au bois, avec des concentrations plus importantes lors des périodes d'utilisation du chauffage. Les concentrations moyennes restent cependant dans la gamme des concentrations observées en PM₁₀ et PM_{2,5} dans l'environnement domestique en France,
- Les concentrations intérieures en NO₂ mesurées en présence d'un appareil de chauffage au bois semblent marquées lors de son fonctionnement. Elles restent néanmoins dans la gamme des concentrations moyennes en NO₂ mesurées depuis 2000 dans les logements Français,
- Les concentrations en monoxyde de carbone sont influencées par certains systèmes de chauffage au bois. Cependant, dans les maisons étudiées, cet impact n'apparaît pas préoccupant,
- Dans les 6 logements étudiés, le renouvellement d'air semble globalement plus important dans les logements à foyers ouverts ou à poêle ancien que pour les foyers fermés ou poêle récents.

Dans le cadre de leurs campagnes de mesures, les auteurs n'ont pas pu dégager de tendance sur les différences de concentrations en particules fines et dioxyde d'azote entre les différents types de systèmes de chauffage.

6.1 Retour d'expérience des occupants

Les occupants ont utilisé le même type de bois lors des deux périodes de mesures.

Après le changement du système de foyer ouvert par un insert fermé flamme verte, les occupants nous ont fait part des différences significatives de confort et de consommation de bois.

Lors de la période avec le foyer ouvert

Avec le foyer ouvert, bien qu'étant le système de chauffage principal, la cheminée ne suffisait pas pour chauffer l'ensemble des pièces de la maison. Des chauffages d'appoint électriques muraux étaient systématiquement utilisés dans les autres pièces en dehors du salon.

Après changement du système de chauffage

Depuis la mise en place du foyer fermé flamme verte, les occupants n'ont plus besoin d'utiliser les chauffages électriques d'appoint. Ils ressentent une chaleur agréable et bien plus homogène dans l'ensemble du logement. Ils ressentent parfois même que le chauffage est trop important. La combustion d'une bûche de bois est bien plus lente qu'avec le foyer ouvert.

Avec le nouveau système de chauffage, la consommation de bois de chauffe a été **réduite de deux tiers**. Les occupants ont réduit de manière significative leur facture d'énergie tout en améliorant leur confort thermique ressenti.

⁷ Etude d'évaluation de l'impact des appareils de chauffage domestiques à bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur » (INERIS, 2008)

⁸ Campagne nationale Logements Etat de la qualité de l'air dans les logements français Rapport final – (OQAI, 2006)

6.2 Les conditions hygrothermiques

Les mesures de confort hygrothermiques n'ont été faites que dans le salon, elles ne sont donc représentatives que de cette pièce, dans laquelle est située le système de chauffage.

Lors de la période avec le foyer ouvert

Dans le salon, les températures moyenne (21,6 °C) et minimale de (19 °C) ne montrent pas de souci d'inconfort thermique lié à la température de l'air. Le taux d'humidité relative moyen (57,7 %) était situé dans la fourchette haute des recommandations en air intérieur : 40 à 60 %. En utilisant le diagramme de l'air humide (figure 7), on peut observer que les conditions hygrothermiques de la première période de mesure (foyer ouvert) correspondent à la zone de confort hygrothermique.

Après changement du système de chauffage

Les mesures des conditions hygrothermiques prises dans le salon, lieu de mesure, montrent une légère augmentation de la température moyenne et minimale. Le taux d'humidité relative a légèrement augmenté pour dépasser les 60% (65,4 %). Sur le diagramme de l'air humide, on sort très légèrement de la zone de confort, en raison de l'augmentation de l'humidité relative, sans toutefois atteindre la zone de développement de microorganismes.

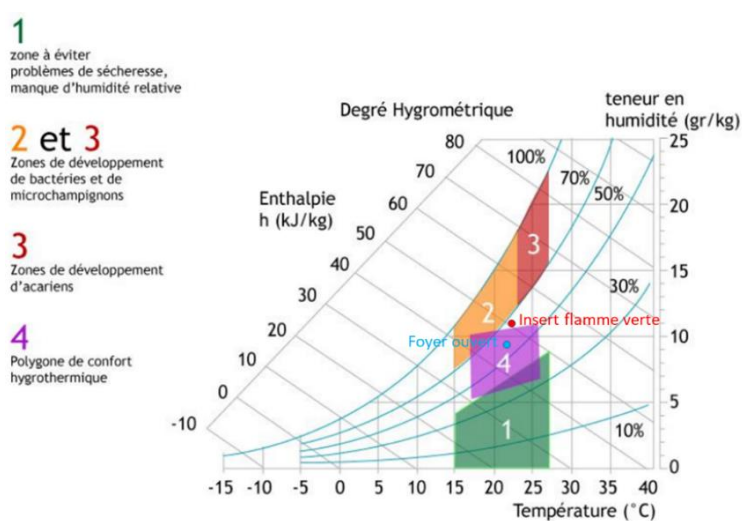


Figure 7 : Confort température-humidité des périodes avec le foyer ouvert et avec l'insert flamme verte sur le diagramme de l'air humide

Discussions

Ces mesures des conditions hygrothermiques de l'air peuvent paraître contradictoires avec le retour des occupants dont le confort ressenti s'est apparemment amélioré. Les occupants ont surtout témoigné de l'amélioration du confort thermique dans les autres pièces que la salon (meilleure homogénéité des températures). Un autre facteur est à prendre en compte pour le ressenti des occupants : la température des parois. La température ressentie correspond à la moyenne de la température de l'air et de celle des parois. Un système d'insert à haut rendement est beaucoup plus performant qu'un système à foyer ouvert. Son efficacité de chauffage par radiation s'en voit décuplé, ce qui chauffe plus efficacement les parois. Dans ces conditions, le confort thermique ressenti peut s'être amélioré sans avoir de grosses différences sur les conditions hygrothermiques de l'air.

Malgré des températures légèrement à la hausse, il n'est pas observé de différences importantes des températures à l'intérieur du salon entre la première et la deuxième période de mesure. La mesure des conditions hygrothermiques de l'air dans le salon ne permet pas de témoigner de la meilleure homogénéité des températures dans tout le logement avec l'insert flamme verte. Avec celui-ci, on observe une augmentation de l'humidité relative qui fait sortir de la zone de confort hygrothermique selon le diagramme de l'air humide.

6.3 Dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone est mesuré afin d'évaluer les modalités de renouvellement d'air pouvant influencer la dilution des polluants intérieurs vers l'extérieur mais également l'entrée des polluants extérieurs. Les deux périodes de mesure montrent des conditions de confinement différentes.

Lors de la période avec le foyer ouvert

Les concentrations en CO₂ étaient basses tout au long de la campagne de mesure, avec une concentration maximale sur 10 minutes à peine supérieure à 1 000 ppm. La concentration minimum sur 10 minutes correspond aux concentrations habituelles en air ambiant. La concentration moyenne sur la période (614 ppm) est inférieure à la médiane des concentrations dans les logements français de 755 ppm (campagne nationale logement OQAI 2005). L'indice de confinement ICONe, correspondant à l'ensemble des concentrations en présence des occupants, est de 0 (nul). Cela indique l'absence de confinement.

Après changement du système de chauffage

La concentration moyenne en CO₂ a plus que doublé. La concentration maximale sur 10 minutes est supérieure à 2 500 ppm. La concentration minimum sur 10 minutes ne descend pas en-dessous de 625 ppm. La concentration moyenne sur la période (1441 ppm) est significativement supérieure à la médiane des concentrations dans les logements français. L'indice de confinement ICONe est calculé à 3, qualifiant le confinement d'élevé.

Discussions

Pour expliquer la différence de confinement entre les deux périodes, deux hypothèses peuvent être avancées :

Hypothèse 1 :

- La fréquence d'ouverture des fenêtres peut avoir été différente entre les deux périodes. Les températures extérieures sur les deux périodes sont sensiblement les mêmes et les occupants n'ont pas déclaré de différence d'ouverture des fenêtres sur les deux périodes.

Hypothèse 2 :

- L'installation du nouveau système de chauffage peut avoir augmenté l'étanchéité à l'air du logement. L'étude de l'INERIS⁷ présente également une tendance à l'augmentation du confinement dans les logements à foyers fermés récents par rapport à ceux équipés de foyers ouverts. . Eléments qui pourraient expliquer la différence d'étanchéité à l'air entre foyer ouvert et fermé :
 - Avec un foyer ouvert, le conduit de cheminée est un accès direct à l'extérieur. En dehors des périodes d'utilisation du chauffage (sans tirage thermique), des mouvements d'air peuvent se créer en fonction des équilibres de pression.
 - L'insert possède également un conduit de cheminée, mais la très grande majorité de temps le foyer est fermé, ce qui limiterait les mouvements d'air en période de non utilisation du système.

Depuis le changement du système de chauffage, les niveaux observés de CO₂ témoignent d'un renouvellement d'air insuffisant pour évacuer efficacement les polluants d'origine intérieure. AtmoSud recommande donc aux occupants de d'améliorer leurs habitudes d'aération en augmentant la fréquence d'ouverture des fenêtres.

Le confinement observé après changement du système de chauffage est plus important que lors de la période avec foyer ouvert. Les conditions hygrothermiques extérieures et les habitudes des occupants étant vraisemblablement similaires entre les deux périodes, il est possible que l'installation du foyer fermé ait augmenté significativement l'étanchéité à l'air du conduit de cheminée et donc du salon.

AtmoSud recommande aux occupants d'améliorer leurs habitudes d'aération pour diluer les polluants d'origine intérieure qui peuvent s'accumuler par effet de confinement.

6.4 Dioxyde d'azote

Comme toute source de combustion de matière organique, le chauffage au bois peut être émetteur de dioxyde d'azote (NO₂). Les concentrations intérieures de NO₂ ont montré des différences significatives entre les deux périodes, malgré une concentration extérieure similaire.

Lors de la période avec le foyer ouvert

La concentration intérieure en dioxyde d'azote ($9,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) respecte la valeur guide en air intérieur de l'ANSES⁹ pour une exposition annuelle : $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Elle est supérieure à la médiane des concentrations des établissements scolaires en France de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (campagne nationale écoles de l'OQAI 2013). Elle est inférieure à la concentration extérieure de $13,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Après changement du système de chauffage

La concentration intérieure en dioxyde d'azote observées après changement du système de chauffage ($5,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a baissé de près de 50 % alors que la concentration extérieure est similaire à première période ($13,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Elle est similaire à la médiane des concentrations des écoles en France.

Discussions

Le fait d'avoir observé une diminution significative de la concentration intérieure en dioxyde d'azote, alors que la concentration extérieure est resté presque constante, démontre que l'insert flamme verte permet de réduire les émissions de dioxyde d'azote en lien avec la combustion du bois de chauffage.

Néanmoins, un autre facteur peut avoir influencé cette différence de concentration : l'augmentation du confinement induite par le foyer fermé. En effet, en augmentant le confinement, on réduit les échanges avec l'air intérieur, limitant l'évacuation des polluants d'origine intérieure vers l'extérieur, mais aussi et surtout dans ce cas-là, l'entrée des polluants d'origine extérieure.

Le changement du système de chauffage par un insert flamme verte a occasionné une baisse de la concentration moyenne intérieure en dioxyde d'azote de 50 %. Le système d'insert fermé semble être moins émetteur de dioxyde d'azote en air intérieur.

6.5 Monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone (CO) est émis par toutes les sources de combustion incomplètes. En cas de dysfonctionnement d'un système de chauffage à combustion, il peut provoquer une intoxication des occupants par asphyxie. La valeur guide en air intérieur (VGAI) de l'ANSES¹⁰ est de $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ pour une exposition de 8h.

Il n'est pas observé de différences significatives des concentrations moyennes entre les deux périodes de mesure. Seuls les maximums observés sont moins importants après changement du système de chauffage. Les concentrations intérieures ($< 1 \text{ ppm}$) sont significativement inférieure à la VGAI de l'ANSES.

Cela signifie que l'ancien système à foyer ouvert et le nouveau système d'insert permettent une bonne combustion limitant les émissions en monoxyde de carbone.

Les concentrations en monoxyde de carbone étant faibles avec l'ancien foyer ouvert, le changement du système de chauffage par un insert flamme verte n'a pas apporté d'amélioration sur les concentrations moyennes. Néanmoins, les concentrations ponctuelles maximales sont inférieures avec l'insert fermé.

6.6 Les particules fines

Les systèmes de chauffage au bois sont connus pour leurs émissions intérieures et extérieures de particules fines. Les concentrations intérieures ont montré des différences significatives entre les deux périodes de mesure.

Lors de la période avec le foyer ouvert

Les concentrations moyennes intérieures en particules fines PM_{10} ($29 \mu\text{g}/\text{m}^3$), $\text{PM}_{2,5}$ ($18 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et PM_{1} ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont plus de deux fois supérieures aux concentrations de fond urbain observées à Marseille / Longchamp sur la même période. Les concentrations en PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$ dépassent les valeurs de gestion du Haut Conseil de Santé Publique (HSCP)

⁹ Proposition de valeurs guides de qualité d'air intérieur - Le dioxyde d'azote - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective - Février 2013

¹⁰ Valeurs guides de qualité d'air intérieur - Le monoxyde de carbone - Avis de l'Afsset - Rapport du groupe d'experts - Juillet 2007

pour une exposition intérieure long-terme¹¹, respectivement de 24 et 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La concentration moyenne en PM_{10} est légèrement supérieure à la médiane des concentrations dans les logements français de 31,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (campagne nationale logement OQAI 2005). La concentration moyenne en $\text{PM}_{2,5}$ est du même ordre que la médiane dans les logements français de 19,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Après changement du système de chauffage

Alors que les niveaux de fond urbain ont augmenté sur cette période, les concentrations intérieures moyennes de chaque fraction de particules fines ont montré une décroissance significative :

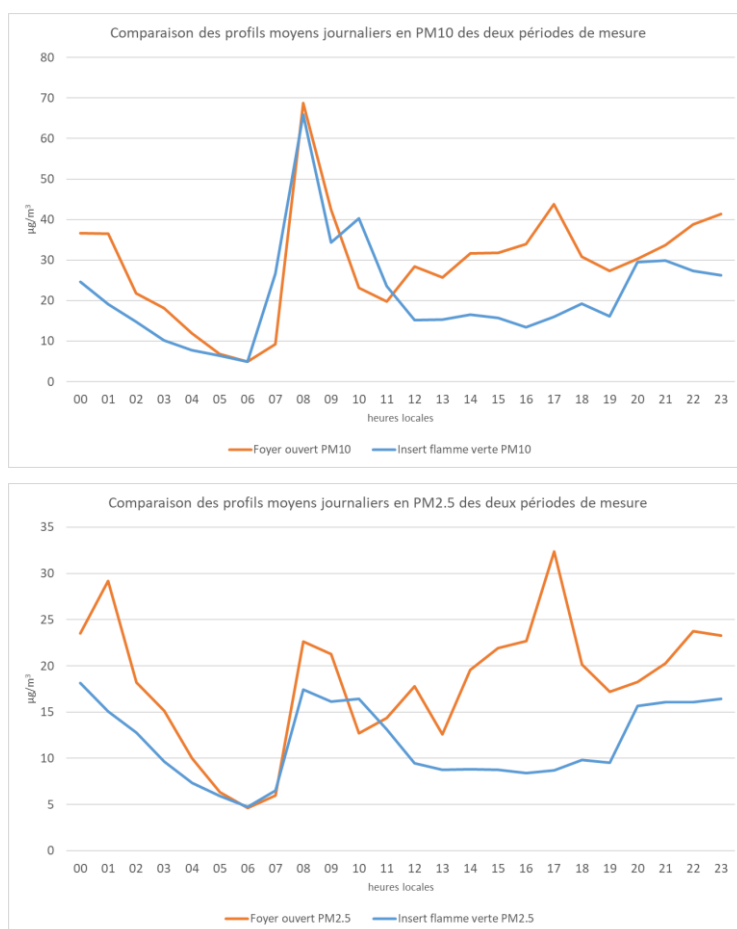
- **PM_{10} : Diminution de la concentration moyenne de 25 % (21,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),**
- **$\text{PM}_{2,5}$: Diminution de la concentration moyenne de 35 % (11,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),**
- **PM_1 : Diminution de la concentration moyenne de 45 % (8,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).**

Les concentrations intérieures de PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ et PM_1 sont du même ordre que les concentrations de fond urbain de Marseille Longchamp sur la même période. Les concentrations en PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$ sont, cette fois-ci, inférieures aux valeurs de gestion du Haut Conseil de Santé Publique pour une exposition intérieure long-terme. Elles sont également significativement inférieures aux médianes de concentrations dans les logements français.

Discussions

L'impact de l'air extérieur ne semble pas avoir participé à la diminution des concentrations intérieures en particules fines lors de la période avec insert flamme verte puisque les concentrations de fond urbain de Marseille / Longchamps ont présenté des concentrations plus importantes sur la seconde période.

Les profils journaliers comparatifs des fractions PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ et PM_1 des deux périodes montrent des dynamiques différentes.



¹¹ Valeurs repères d'aide à la gestion dans l'air des espaces clos : les particules – Haut Conseil de Santé Publique – Juillet 2013

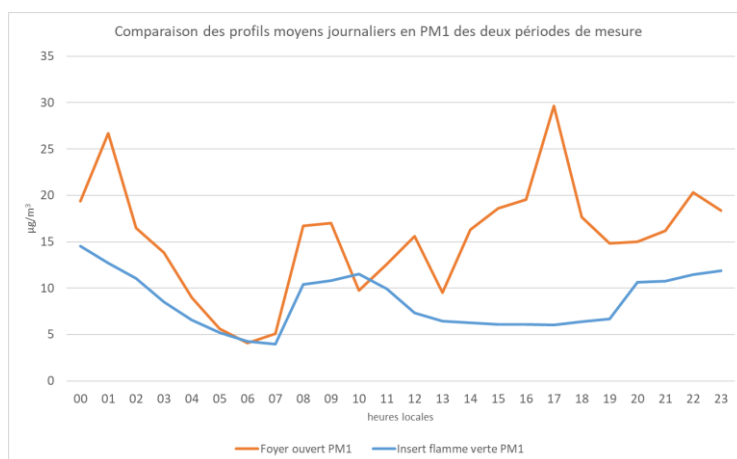


Figure 8 : profil moyen journalier des concentrations en PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁ des deux périodes de mesure

Avec le foyer ouvert, il est observé de multiples périodes présentant une augmentation des concentrations : Vers 8h, 12h, 17h et 22h et entre minuit et 1h du matin. Elles correspondent aux périodes de chauffage déclarées par les occupants.

Avec l'insert flamme verte, il est également observé un pic vers 8h, similaire à la première période en PM₁₀, mais avec des concentrations inférieures et plus étalées dans le temps en PM_{2,5} et PM₁. Le reste de la journée montre des concentrations stables jusqu'à 20h, avec une augmentation des concentrations et un maximum entre minuit et 1h du matin.

L'installation du nouveau système de chauffage au bois occasionne moins d'émissions en PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁. Cette diminution des émissions de particules peut être due

- aux caractéristiques de l'insert,
- à une moindre utilisation du chauffage grâce à sa performance plus élevée.

Sur l'ensemble de chaque période de 2 semaines de mesure, les concentrations moyennes de chaque fraction de particules fines ont montré une décroissance des niveaux avec l'insert flamme verte :

- PM₁₀ : Diminution de la concentration moyenne de 25 %,
- PM_{2,5} : Diminution de la concentration moyenne de 35 %,
- PM₁ : Diminution de la concentration moyenne de 45 %.

Les émissions en PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁ de l'insert flamme verte semblent inférieures, mais il semble que la différence soit principalement liée à une moindre utilisation du chauffage grâce à sa performance plus élevée.

6.7 Les particules ultrafines

Les phénomènes de combustion, en plus d'émettre des particules fines, produisent des particules ultrafines. Les deux périodes, avant et après changement du système de chauffage au bois, montrent une granulométrie et un nombre différents de particules ultrafines.

Lors de la période avec le foyer ouvert

Au cours de cette période, les particules les plus nombreuses sont celles dont le diamètre est compris entre 72 et 100 nm. On observe régulièrement une augmentation du nombre total de particules (10 nm à 40 µm). L'évolution des concentrations des différentes fractions au cours du temps est disponible en annexe 2. Elle permet de visualiser les périodes auxquelles les concentrations sont les plus importantes qui correspondent aux périodes d'utilisation du chauffage au bois.

Après changement du système de chauffage

Pour la seconde période, avec l'insert flamme verte, les particules ultrafines sont beaucoup moins nombreuses. **Le nombre total moyen de particules de 10 nm à 40 µm a présenté concentrations moyennes 12 fois inférieures après**

le changement de système de chauffage. Pour la fraction la plus nombreuse de la première période de mesure (72 à 100 nm), la concentration moyenne après changement du système approximativement 30 fois inférieure.

Les fractions les plus représentées, lors de cette seconde période sont les particules de 250 nm à 300 nm. L'évolution des concentrations des différentes fractions au cours du temps est disponible en annexe 2.

Discussions

Pour la période avec foyer ouvert, le profil moyen journalier montre plusieurs périodes de la journée où les particules sont plus nombreuses. Elles correspondent aux périodes de mise en route du chauffage au bois déclarées par les occupants :

- La principale période, le soir entre minuit et 1 heure du matin, qui correspond à la dernière flambée avant la nuit ;
- Vers 8h du matin, la première chauffe au réveil ;
- Vers midi ;
- Dans l'après-midi à partir de 14h, avec un pic vers 17h ;
- En soirée à partir de 22h.

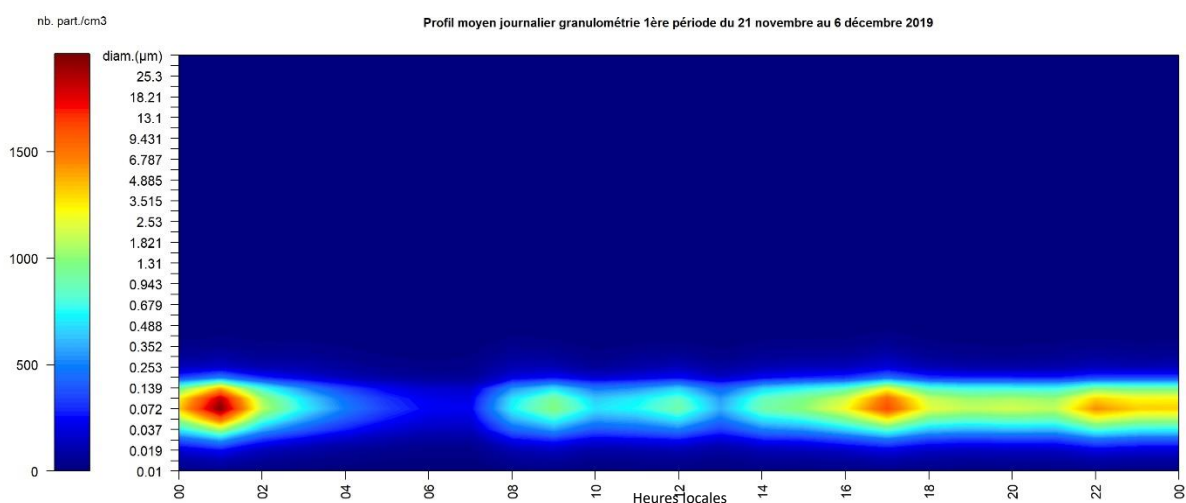


Figure 9 : Profil moyen journalier des concentrations en particules ultrafines de la 1^{ère} période - par diamètre (nuancier de couleur) et total (trait plein blanc)

Pour la période avec insert flamme verte, le profil moyen journalier est plus étalé dans le temps pour les particules dont le diamètre est compris entre 250 à 300 nm. Les niveaux plus importants sont observés de 20 heures à 3 heures du matin et de 8 heures à 12 heures. Ces périodes de concentrations plus importantes sont compatibles avec les périodes d'utilisation déclarées par les occupants.

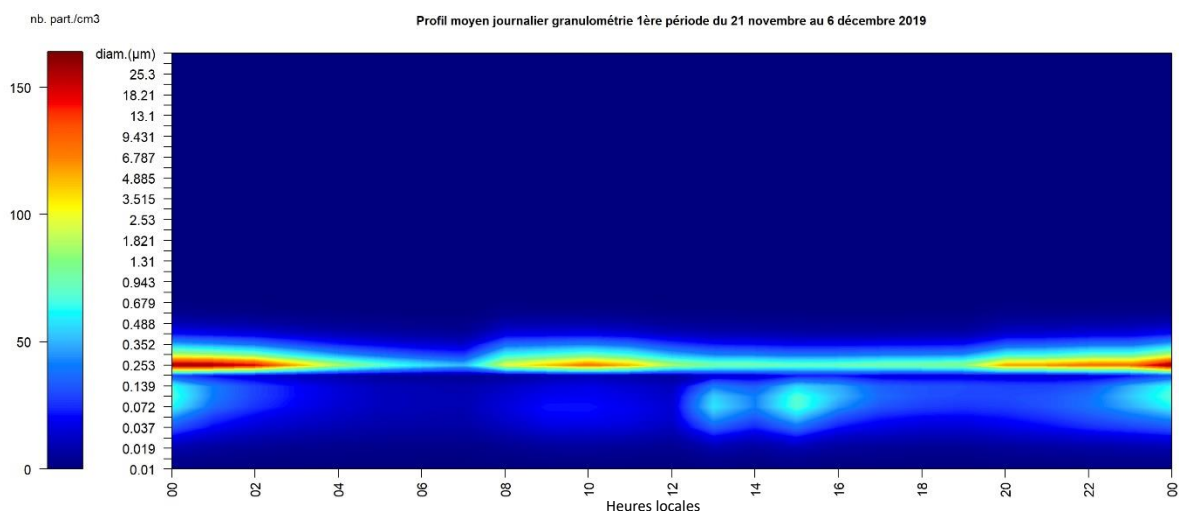


Figure 10 : Profil moyen journalier des concentrations en particules ultrafines de la période insert flamme verte - par diamètre (nuancier en couleur) et total (trait plein blanc)

Comme avec le profil journalier des concentrations en PM_{10} , $PM_{2,5}$ et PM_{10} , il est observé un étalement du pic de 8h du matin et des périodes d'émissions de particules au cours de la journée différentes, ce qui témoigne d'une utilisation différente du système de chauffage. Les différences très importantes des concentrations en particules ultrafines semblent indiquer que le nouveau système de chauffage est significativement moins émetteur de particules ultrafines inférieures à 250 nm.

Pour les fractions supérieures à 250 nm, le nombre moyen de particules avant et après changement du système est similaire, même s'il est tout de même observé une différence sur la concentration maximale horaire.

La différence d'émission de particules ultrafines entre le foyer ouvert et l'insert performant en énergie semble concerner essentiellement les particules inférieures à 250 nm.

Nb : Les systèmes de chauffage au bois performants permettent une meilleure combustion, ce qui a tendance à réduire la taille de particules émises. On aurait pu s'attendre à obtenir une réduction significative des particules les plus grossières, et moins des particules ultrafines. Dans cette situation, on compare un foyer ouvert et un insert fermé, l'hypothèse est donc que ce soit le caractère fermé du foyer qui soit à l'origine de la différence significative du nombre de particules ultrafines.

Les concentrations moyennes en particules ultrafines inférieures à 250 nm ont fortement diminué après le changement du système de chauffage : 15 à 30 fois inférieures selon les fractions. Ces différences significatives semblent témoigner d'une capacité beaucoup moins importante du nouveau système à émettre des particules ultrafines inférieures à 250 nm.

6.8 Black carbon

Une partie des particules fines est constituée de black carbon (carbone suie), dont l'origine est principalement la combustion de produits pétroliers ou de biomasse.

Lors de la période avec le foyer ouvert

Les concentrations en black carbon total ($1,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) présentent des niveaux presque deux fois inférieurs à ceux observés à la station de fond urbain de Marseille / Longchamp ($2,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Les proportions de black carbon issu de la combustion du fuel fossile (BC_{ff}) et de la combustion de bois (BC_{wb}) sont équivalentes : 49,2 % pour le BC_{ff} ($0,55 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 50,8 % pour le BC_{wb} ($0,57 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Après changement du système de chauffage

Les concentrations moyennes en black carbon total ont diminué de plus de 30 % ($0,76 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Lors de cette période, la contribution de la combustion bois (BC_{wb}) a significativement diminué pour atteindre une part de 35,7 % du black carbon total, soit $0,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La concentration de la part liée à la combustion de fuel fossile est restée similaire à la première période ($0,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Discussions

La comparaison du suivi des concentrations à la minute au cours du temps permet de visualiser que les niveaux de fond de la deuxième période sont similaires à la première et que ce sont les pics, qui correspondent à l'utilisation du chauffage bois, qui sont significativement moins importants.

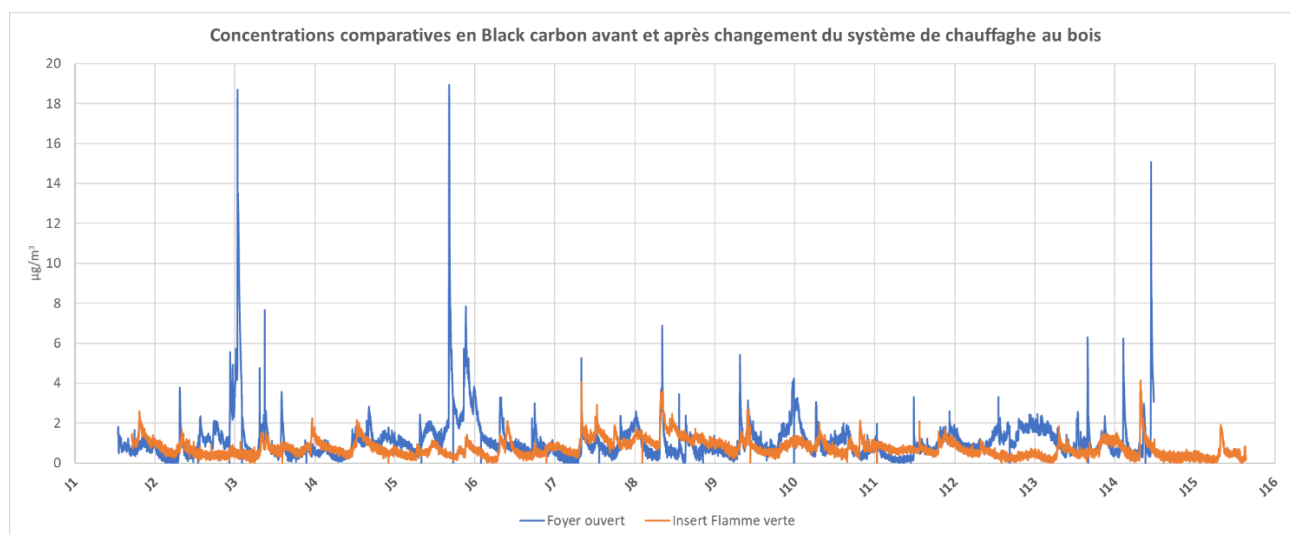


Figure 11 : Evolution des concentrations en black carbon des deux périodes de mesure

Les profils moyens journaliers des deux périodes sont différents, à l'exception du pic du matin vers 8h. Alors que l'on retrouve des pics vers 12h, 17h et à partir de 21h avec le foyer ouvert, le profil après changement du système de chauffage reste en décroissance jusqu'à 19h, où l'on observe une augmentation des concentrations. Cette différence de profil est similaire à ce qui est observée avec les fractions PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1 et les particules ultrafines.

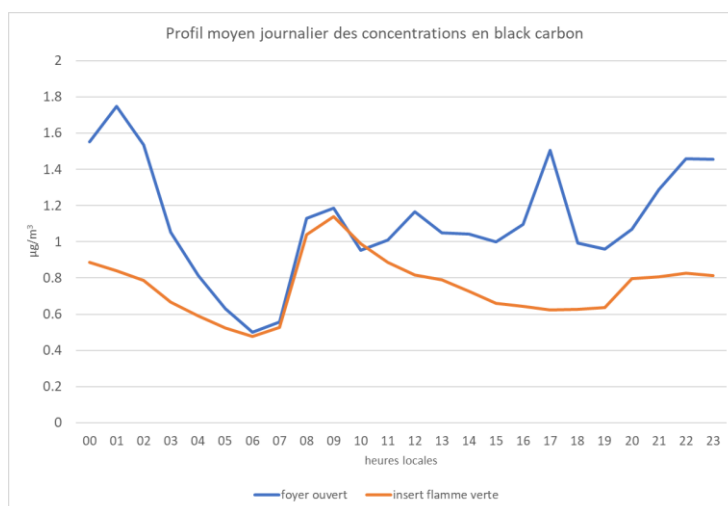


Figure 12 : Profil moyen journalier des concentrations en black carbon des deux périodes de mesure (échelle adaptée au profil moyen journalier)

Le suivi des concentrations du black carbon issu de la combustion du bois et de fuel fossile est disponible en annexe 3, il permet de mettre en évidence les différences de proportion de l'un par rapport à l'autre au cours du temps.

La différence observée entre les proportions de black carbon signifie que la baisse observée de black carbon total après le changement du système de chauffage est bien expliquée par une baisse de la part issue de la combustion de bois. L'utilisation du nouveau système d'insert flamme verte est donc significativement moins émettrice de black carbon que celle du foyer ouvert.

Après changement du système de chauffage, les concentrations en black carbon ont baissé de 30 % à l'intérieur du logement des occupants. Cette diminution des concentrations semble être liée à une émission moins importante du nouveau système, confirmée par une part moins importante de black carbon lié à la combustion de bois.

7. Conclusion

Le Conseil Départemental 13 et AtmoSud souhaitent porter à connaissance et communiquer sur les bénéfices attendus sur la qualité de l'air des modes de chauffage au bois récents et performants. Les foyers ouverts impactent fortement l'air intérieur. De nos jours, les systèmes sont plus performants, en particulier ceux labélisés flamme verte. Afin d'avoir une approche quantitative et pédagogique de cet impact, AtmoSud et le CD13 mettent en place une expérimentation dite « démonstrateur chauffage bois » auprès d'un particulier volontaire, ciblant la pollution intérieure. Cette opération consiste en des mesures d'air intérieur dans un logement qui fait l'objet du remplacement de son foyer ouvert par un insert Flamme Verte 7 étoiles.

Des économies d'énergie et un meilleur confort ressenti

Avec le nouveau système de chauffage, la consommation de bois de chauffe a été réduite de deux tiers. Ainsi, avec un tiers du bois qui était utilisé avant, les occupants réduisent de manière significative leur facture d'énergie en améliorant grandement leur confort thermique ressenti. Malgré des températures légèrement à la hausse, il n'est pas observé de différences significatives des températures du salon entre la première et la deuxième période de mesure.

Augmentation de l'indice de confinement

Après changement du système de chauffage, l'indice de confinement est plus important que lors de la période avec foyer ouvert. Les conditions hygrothermiques extérieures et les habitudes des occupants étant vraisemblablement similaires entre les deux périodes, il est possible que l'installation du foyer fermé ait augmenté l'étanchéité à l'air du conduit de cheminée et donc du salon.

Baisse significative des polluants particuliers

Les particules fines ont montré une diminution significative des concentrations moyennes lors de la période avec l'insert flamme verte :

- PM₁₀ : Diminution de 25 %
- PM_{2,5} : Diminution de 35 %
- PM₁ : Diminution de 45 %

Les émissions en particules fines du nouveau système en fonctionnement apparaissent inférieures, mais il semble que cette différence soit également liée à sa moindre utilisation en raison de sa performance plus élevée.

Pour les particules ultrafines, les concentrations moyennes des fractions inférieures à 250 nm ont fortement diminué après le changement du système de chauffage : 15 à 30 fois moins selon les fractions. Ces différences significatives semblent témoigner d'une émission de particules ultrafines inférieures à 250 nm beaucoup moins importante pour le nouveau système de chauffage.

Le black carbon total à l'intérieur du logement a montré une baisse de 30% après changement du système de chauffage. La part du black carbon issu de la combustion de bois est passée de 50% à 35% avec l'insert flamme verte. Ces diminutions de black carbon semblent être liées à une émission moins importante du nouveau système mais également à son utilisation moins fréquente en lien avec sa performance thermique plus élevée.

Baisse des concentrations intérieures en NO₂

Pour le dioxyde d'azote, le changement du système de chauffage par un insert flamme verte a occasionné une baisse de la concentration moyenne intérieure de 50%. Le système d'insert fermé semble donc être moins émetteur de dioxyde d'azote en air intérieur.

Pas de changement pour le monoxyde de carbone

Les concentrations en monoxyde de carbone étant faibles avec l'ancien foyer ouvert, le changement du système de chauffage par un insert flamme verte n'a pas apporté d'amélioration sur les concentrations moyennes. Néanmoins, les concentrations ponctuelles maximales sont inférieures avec l'insert fermé.

Le remplacement du foyer ouvert par un insert labélisé flamme verte 7 étoiles a permis de réduire significativement les concentrations moyennes intérieures de particules fines, de black carbon et de dioxyde d'azote mais également des particules ultrafines inférieures à 250 nm. Cela n'a pas changé significativement les concentrations intérieures en monoxyde de carbone mais a occasionné un confinement plus important qu'auparavant. Le confort ressenti des occupants s'est fortement amélioré et a occasionné une économie d'énergie significative par la réduction de deux tiers du volume de bois de chauffe utilisé et la non-utilisation des chauffages d'appoint électriques.

ANNEXE 1 : MATERIEL UTILISE

Particules fines et ultrafines

La mesure des concentrations de particules fines et ultrafines est réalisée à l'aide d'un granulomètre GRIMM MINI WRAS. Ce dernier permet la mesure de la distribution statistique des tailles de particules allant de 10 nm à 40 μm (en nombre de particules par cm^3), ainsi que la mesure des concentrations massiques en PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ et PM_1 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les mesures sont réalisées en continu sur un pas de temps d'une minute.

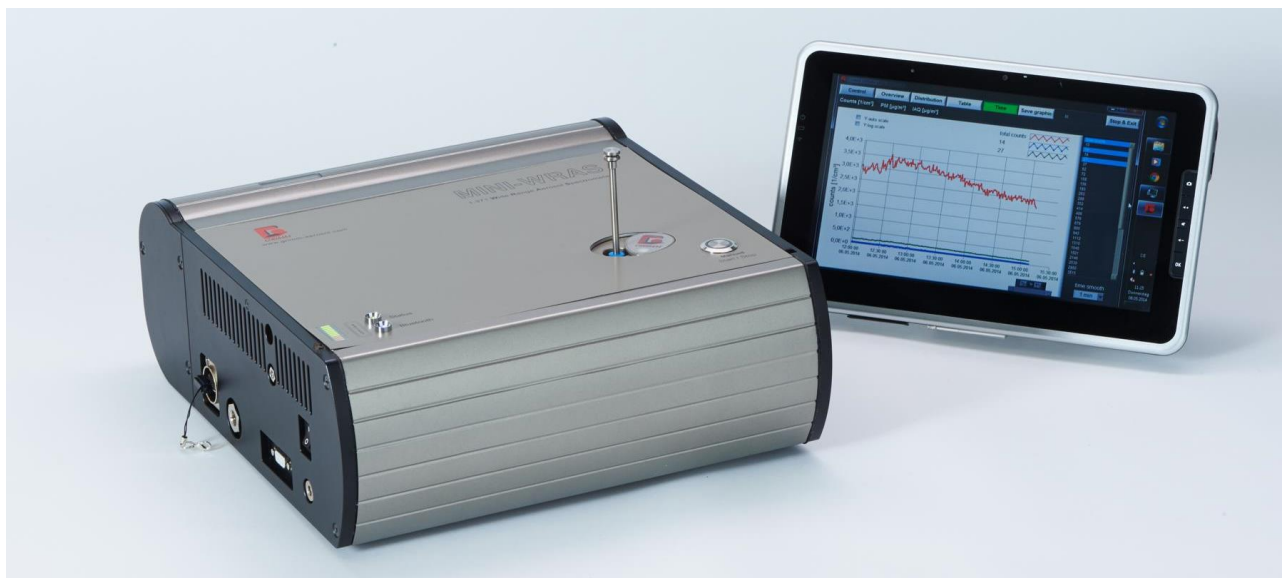


Figure 13 : Granulomètre GRIMM MINI WRAS

Black Carbon ou carbone suie

Les mesures des concentrations en black carbon sont réalisées avec l'aéthalomètre microAeth MA200. Le pas de temps est d'une minute sur l'ensemble de la période de mesure. Le dispositif permet de différencier de black carbon issu de la combustion de fuel fossile (BC_{ff}) du black carbon issu de la combustion de bois (BC_{wb}).



Figure 14 : Aéthalomètre microAeth MA200

Dioxyde d'azote

Les concentrations en dioxyde d'azote seront mesurées à l'aide de tubes à diffusion passive de type PASSAM. Ces tubes seront exposés pendant les deux semaines de mesure de chaque campagne :

- Dans la pièce de vie où est situé le système de chauffage au bois
- A l'extérieur

Cela permet d'obtenir la concentration moyenne sur chaque période de mesure dans chaque environnement ciblé.



Figure 15 : Echantillonneur passif de NO₂ - Passam

Monoxyde de carbone et paramètres de confort

La température, l'humidité relative et les concentrations en dioxyde et monoxyde de carbone sont mesurés en temps réel à l'aide d'un Q-Track 7565-X associé à la sonde 982 Probe (fabricant TSI).

Les principes de mesure sont les suivants :

- Température (T°) : Thermistor
- Humidité relative (HR%) : Film fin capacitif
- CO₂ (ppm) : Capteur infrarouge non dispersif (NDIR)
- CO (ppm) : Capteur électro-chimique



Figure 16 : Q-Track 7565-X TSI

Les mesures sont réalisées en continu sur un pas de temps de dix minutes.

ANNEXE 2 : SUIVI DES CONCENTRATIONS EN PARTICULES ULTRAFINES

Lors de la première période de mesure, le suivi des concentrations en nombre de particules/cm³ des particules ultrafines, montre des évolutions qui sont fonction essentiellement des périodes d'utilisation du système de chauffage au bois par foyer ouvert. Les fractions les plus nombreuses sont celles situées entre 50 et 140 nm de diamètre.

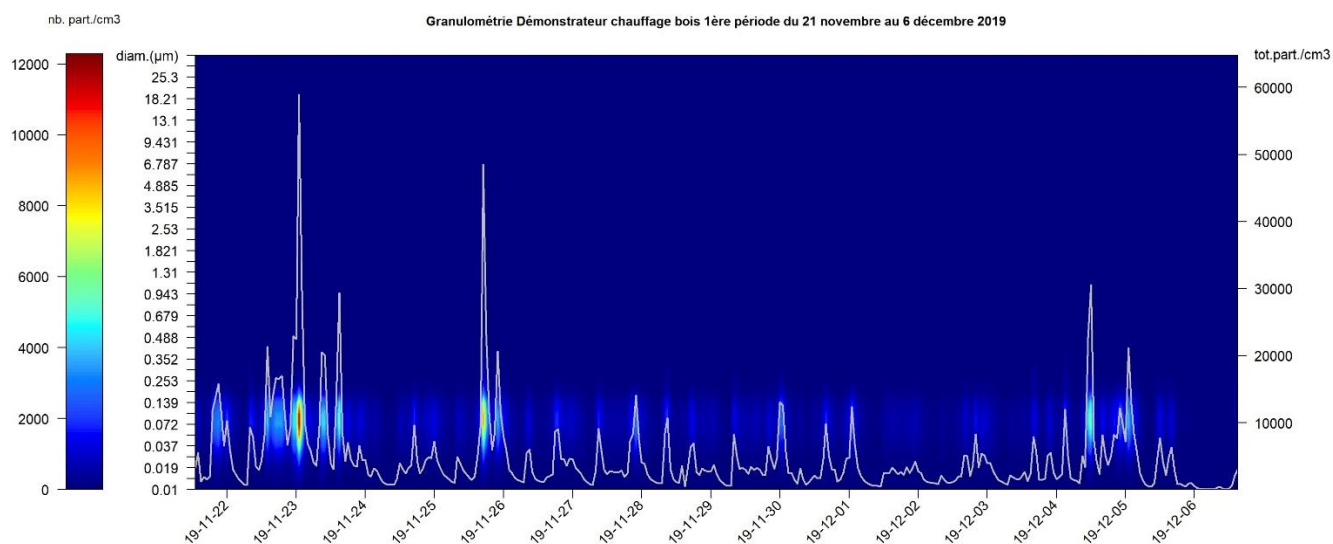


Figure 17 : Evolution des concentrations en nombre de particules ultrafines de la période foyer ouvert - par diamètre (nuancier de couleur) et total (trait plein blanc)

Lors de la deuxième période de mesure, le suivi des concentrations des particules ultrafines, montre des évolutions qui sont également en lien avec les périodes d'utilisation du système de chauffage au bois par insert flamme verte. Les concentrations en nombre de particules/cm³ sont 15 à 30 fois inférieures à la période précédente en fonction des fractions. Les fractions les plus représentées sont les particules de 250 nm à 300 nm.

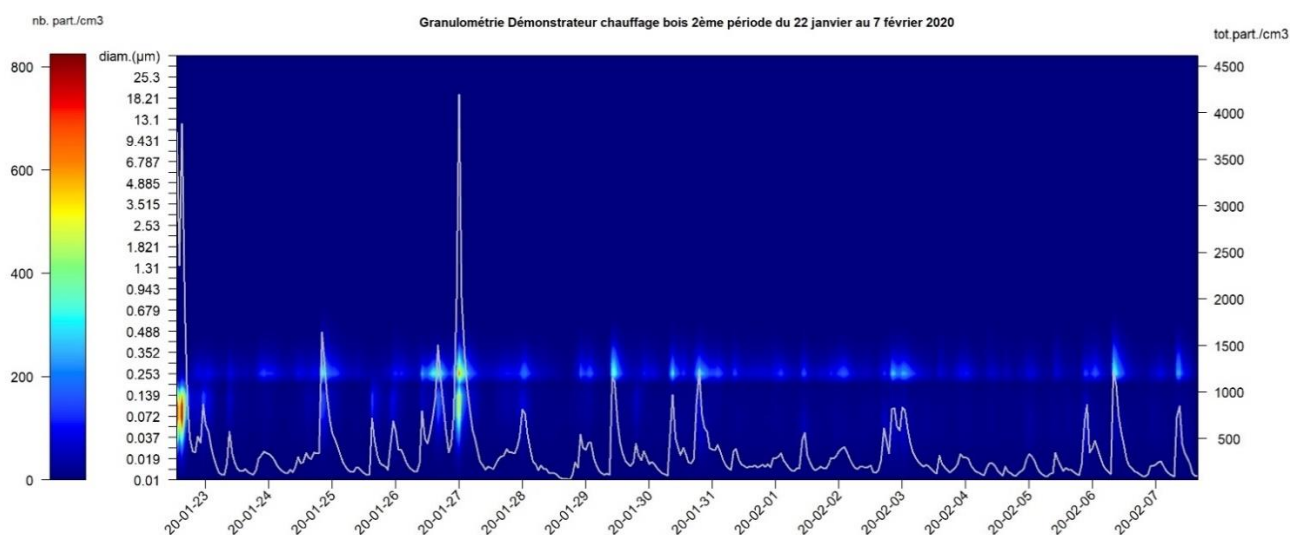
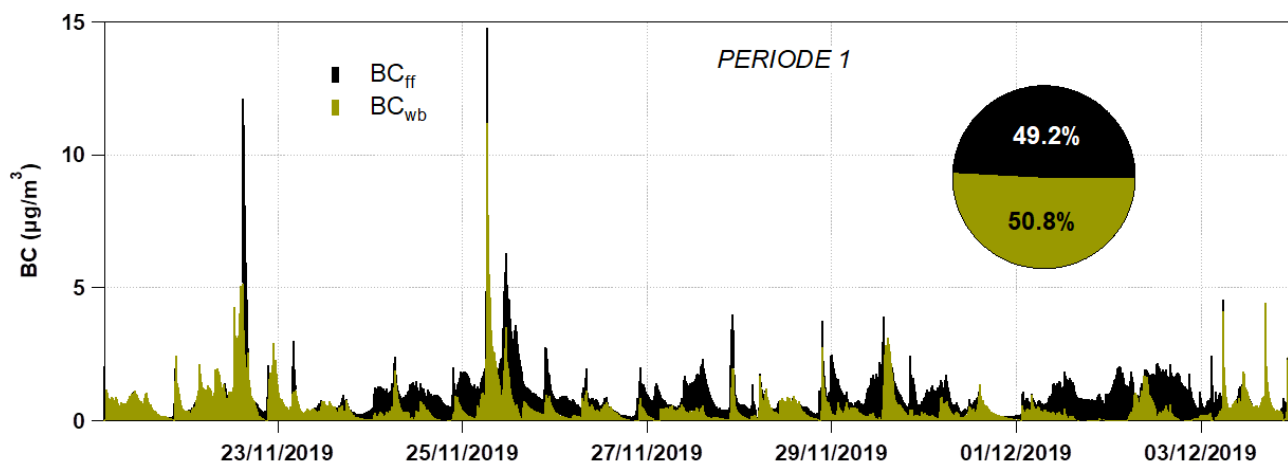


Figure 18 : Evolution des concentrations en particules ultrafines de la 2^{ème} période - par diamètre (nuancier en couleur) et total (trait plein blanc)

ANNEXE 3 : SUIVI DES CONCENTRATIONS EN BLACK CARBON ISSU DE LA COMBUSTION DE BOIS ET DE FUEL FOSSILE

Le suivi des concentrations de black carbon issu de la combustion de bois (BC_{wb}) et de fuel fossile (BC_{ff}) de la période avec foyer ouvert permet de visualiser qu'à certaines périodes le BC_{wb} est majoritaire, à d'autres, c'est le BC_{ff} qui est plus important. Sur l'ensemble de la période la proportion de l'un par rapport à l'autre est similaire.



Lors de la seconde période de mesure, le BC_{wb} n'est quasiment jamais majoritaire, confirmant une émission beaucoup moins importante de black carbon issu de la combustion du bois.

