



Étude de la part du chauffage au bois sur la concentration en particules fines $2.5\mu\text{m}$ en France

Table des matières

1. Abstract.....	3
2. Zones Géographiques	4
2.1. Paramètres pris en compte dans le choix des zones d'étude	4
2.2. Zones choisies	4
2.3. France métropolitaine.....	5
3. Étude des zones	10
3.1. Les saisons météorologiques.....	10
3.2. Rose des vents.....	24
3.3. Comparaison zones résidentielles vs routes	30
3.4. Comparaison période confinement 2020 vs 2023	46
3.5. Comparaison entre zones.....	54
4. Discussion et conclusion	56
5. Limites.....	58
6. Annexes méthodologiques	59
6.1. Annexe modélisation CAMS	59
6.2. Données corrigées de l'humidité	60
6.3. Phénomène d'inversion thermique.....	65
7. Références	65



1. Abstract

Introduction :

De nombreuses publications attribuent au chauffage au bois, en général, et au chauffage au bois domestique, en particulier, une contribution très importante des émissions en $PM_{2.5}$: 43 % en 2021, puis 64 % à la suite de la révision des facteurs d'émission proposée par l'étude INERIS-CITEPA. Ces chiffres élevés se basent sur des émissions, or ce sont les particules fines effectivement respirées qui impactent la santé des populations, soit la concentration en $PM_{2.5}$ dans l'air.

Méthodologie :

Les données de concentration en $PM_{2.5}$ mesurées, sur l'année 2023, par des capteurs basés en France ont été utilisées pour reconstruire la contribution maximale annuelle que peut avoir le chauffage au bois sur la concentration en $PM_{2.5}$. Pour cela, 6 zones ont été choisies pour leurs caractéristiques particulières liées aux conditions météorologiques, l'utilisation de chauffage au bois, leur proximité avec des frontières étrangères, ou leurs activités portuaires, industrielles ou trafic. Les concentrations de ces zones ont également été modélisées pour les années 2020 et 2023 afin de les comparer, notamment lors de l'arrêt de nombreuses activités, durant le confinement 2020.

Résultats :

Le chauffage au bois en France métropolitaine représente au maximum une part de 15,3% sur la concentration annuelle pouvant être mesurée ; contribution variant de 3,9% à 22,3% sur les zones étudiées. Les zones présentant les concentrations les plus élevées ne sont pas forcément celles qui sont le plus utilisatrices de chauffage au bois. L'interdiction des cheminées à foyer ouvert semble permettre une forte diminution des concentrations en $PM_{2.5}$ qui peuvent être attribuées au chauffage au bois.

Conclusion :

En termes de part sur la concentration en $PM_{2.5}$ en France, le chauffage au bois a un impact bien moindre par rapport à ce qui lui est attribué en termes d'émission. Ainsi, le chauffage au bois peut être une source ponctuelle et majeure certains jours de grand froid sous conditions météorologiques stables mais la diminution de la concentration en $PM_{2.5}$ ne peut reposer sur des actions le concernant uniquement. Durant l'étude, il a été constaté que de nombreuses autres sources ont un impact plus important que le chauffage au bois sur la concentration en $PM_{2.5}$.

Mots clés : Chauffage au bois, concentration en $PM_{2.5}$, pollution, conditions météorologiques, données capteurs, modélisation

2. Zones Géographiques

2.1. Paramètres pris en compte dans le choix des zones d'étude

Le choix des six zones résulte de divers critères et besoins :

- Diversité de lieu sur l'utilisation plus ou moins importante du chauffage au bois
- Lieu urbain et rural d'une même région pour comparaison
- Lieu proche d'une frontière pour attester de potentielles pollutions provenant de voisins européens
- Lieu avec des conditions météorologiques variables
- Lieu pollué au PM_{2.5} (concentrations élevées)
- Lieu peu pollué au PM_{2.5} (concentrations faibles)

2.2. Zones choisies

Tableau 1 : Récapitulatif des zones choisies et de leurs caractéristiques

Zone	Région	Caractéristiques	Potentielle utilisation chauffage au bois	% régional connu de maisons utilisatrices de chauffage au bois (2020)
Mulhouse	Grand Est	Proche de la frontière allemande	Faible-moyenne	41 %
Brest	Bretagne	Climat humide	Élevée	43 %
Nancy	Grand Est	Zone urbaine pour comparaison	Faible-moyenne	41 %
Jonville-en-Woëvre	Grand Est	Zone rurale pour comparaison	Élevée	41 %
Vallée de l'Arve	AURA	Zone connue pour sa forte pollution due au chauffage au bois	Très élevée	45 %
Toulon	PACA	Zone polluée mais peu d'utilisation chauffage au bois et condition météo chaude avec peu de précipitations	Faible	38 %

2.3. France métropolitaine

Les mesures capteurs

Les mesures des capteurs du réseau ATMO présents sur toute la France (229 capteurs) ont été prises en compte pour l'année 2023 afin d'établir des concentrations moyennes de PM_{2.5} en fonction des périodes et des influences (pollution de fond, trafic, industries). Ces concentrations pourront servir de référence pour comparer aux zones qui vont être étudiées par la suite. Étudier toute la France permet d'avoir une idée de la concentration moyenne en sachant que certaines zones vont effectivement être davantage soumises à des pollutions dues au chauffage au bois alors que d'autres zones en seront exemptes. Ainsi, dans la suite de l'étude on s'attend pour les zones où la présence de chauffage au bois est avérée à des concentrations hivernales qui soient supérieures aux concentrations moyennes françaises. Dans ce cas, cela impliquera que le chauffage au bois est une source majeure de particules fines et impacte la concentration nationale en particules fines PM_{2.5}.

Les périodes météorologiques

Les périodes météorologiques ont été divisées en six catégories dépendant de la température et de l'humidité :

- La catégorie « Froid » correspond à une température extérieure inférieure à 15°C la nuit et la journée et peut donc être associée à la période hivernale soit l'utilisation de chauffage.
- La catégorie « Tempéré » correspond à une température supérieure à 15°C la journée mais inférieure à 15°C la nuit. L'utilisation du chauffage est soit absent soit fortement réduit.
- La catégorie « Chaud » correspond à une température supérieure à 15°C de jour comme de nuit. Ce qui implique qu'il n'y a pas d'utilisation de chauffage.
- Un temps sec est un temps où l'humidité est inférieure à 75 % et sans précipitation.
- Un temps humide est un temps pour lequel il y a soit eu des précipitations soit une humidité supérieure à 75 %.

L'humidité impacte la concentration en particules puisqu'elle aura tendance à les faire retomber au sol et donc diminuer la concentration dans l'air.

Dans la suite du rapport la période dite « Froide » sera référée comme « période hivernale » ou plus simplement « hiver ». La période dite « Tempéré » associée à la période dite « Chaud » seront référées comme « période estivale » ou plus simplement « été ».

Calcul de la part maximale annuelle du chauffage au bois sur la concentration en PM_{2.5}

Les concentrations ainsi que le nombre de jours sont calculés pour les 3 catégories « Froid », « Tempéré » et « Chaud ». On considère qu'en catégorie « Froid » il y a l'utilisation de chauffage dont le chauffage au bois. En catégorie « Tempéré » il peut y avoir l'utilisation de chauffage mais beaucoup plus ponctuellement et en catégorie « Chaud » il n'y a pas d'utilisation de chauffage.

Ainsi la formule pour calculer la part maximale annuelle du chauffage au bois sur la concentration en PM_{2.5} est :

$$\text{Part max annuelle chauffage au bois} = \frac{C_{\text{chauffage}}}{C_{\text{annuelle}}}$$

Avec :

$C_{\text{chauffage}}$: $[(C_{\text{hiver}} - C_{\text{été}}) * J_{\text{hiver}} + 0.05 * C_{\text{tempéré}} * J_{\text{tempéré}}] / 365$: concentration maximale en PM_{2.5} du chauffage au bois (µg/m³)

C_{annuelle} = $(C_{\text{hiver}} * J_{\text{hiver}} + C_{\text{été}} * J_{\text{été}}) / 365$: concentration en PM_{2.5} annuelle (µg/m³)

Ce qui donne après simplification par le nombre de jours annuel :

$$\begin{aligned} \text{Part max annuelle chauffage au bois} \\ = \frac{(C_{\text{hiver}} - C_{\text{été}}) * J_{\text{hiver}} + 0.05 * C_{\text{tempéré}} * J_{\text{tempéré}}}{C_{\text{hiver}} * J_{\text{hiver}} + C_{\text{été}} * J_{\text{été}}} \end{aligned}$$

Avec :

$C_{\text{été}}$: Concentration estivale en PM_{2.5} (µg/m³)

C_{hiver} : Concentration hivernale en PM_{2.5} (µg/m³)

$C_{\text{tempéré}}$: Concentration catégorie « Tempéré » en PM_{2.5} (µg/m³)

$J_{\text{tempéré}}$: Nombre de jours de catégorie « Tempéré »

J_{hiver} : Nombre de jours de catégorie « Froid »

$J_{\text{été}}$: Nombre de jours de catégorie « Tempéré » + « Chaud »

0.05 : (5%) part du chauffage au bois considérée les jours tempérés afin de ne pas sous-estimer la part annuelle.

Résultats sur la France

En France, en période estivale la concentration moyenne en PM_{2.5} est de 7.11 µg/m³ et celle hivernale est de 9.46 µg/m³. L'écart moyen entre la période estivale et hivernale est de 2.35 µg/m³. On constate également que la différence de concentration est supérieure lorsque la période est sèche en hiver (Figure 1). En effet, en période hivernale dans des conditions sèches, la rétention des particules fines dans l'atmosphère est plus importante à cause des phénomènes d'inversion thermique (Annexe 6.3).

Figure 1 : Graphiques des concentrations en $PM_{2.5}$ en fonction de la météo (périodes, température, humidité) en France — *Le nombre de jours a été recalculé en prenant la répartition en pourcentage des mesures capteurs en fonction de chaque période

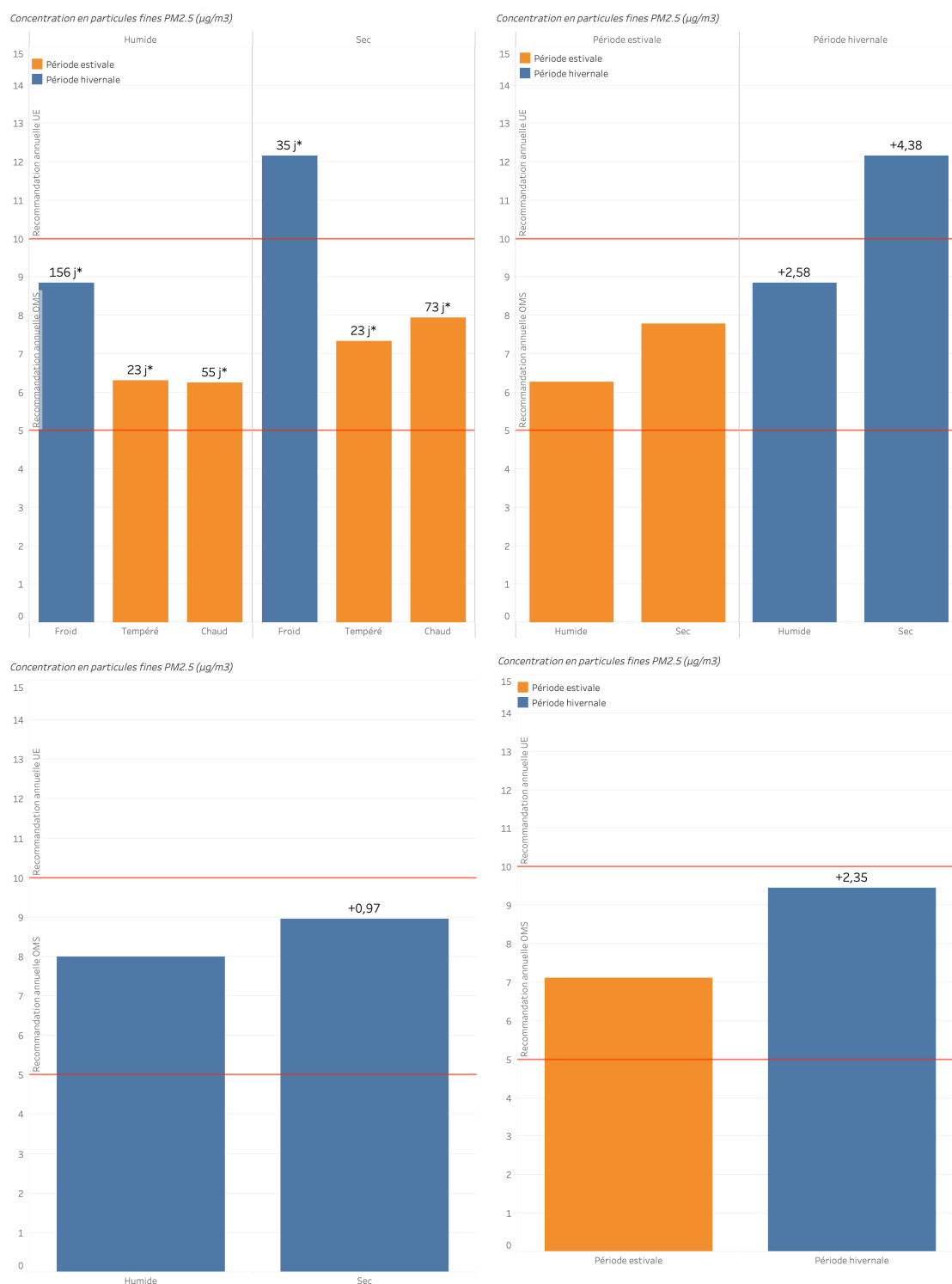


Figure 2 : Comparaison effet du trafic, industrie et pollution de fond sur les écarts été/hiver en PM_{2.5} en France

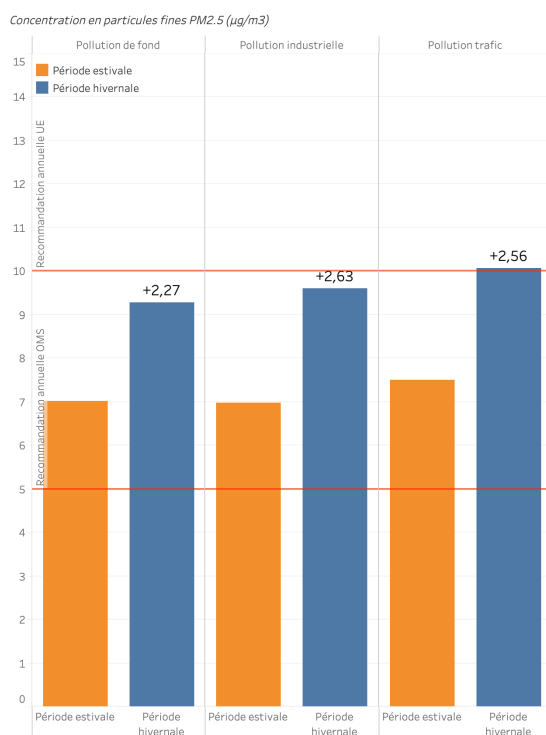
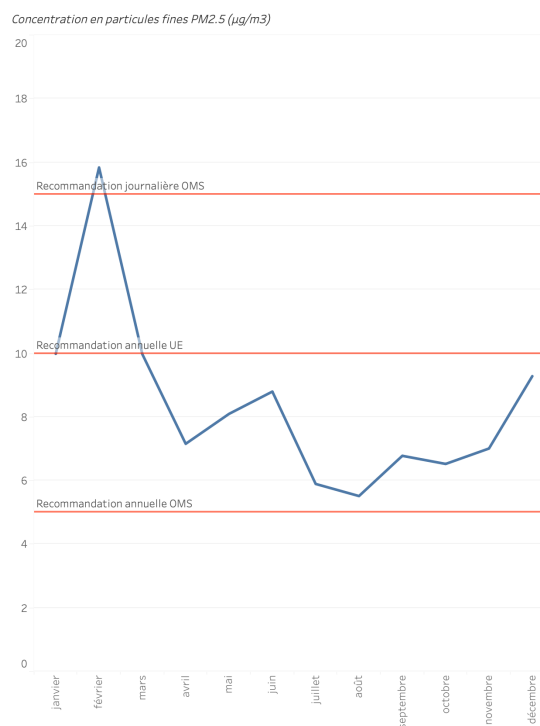
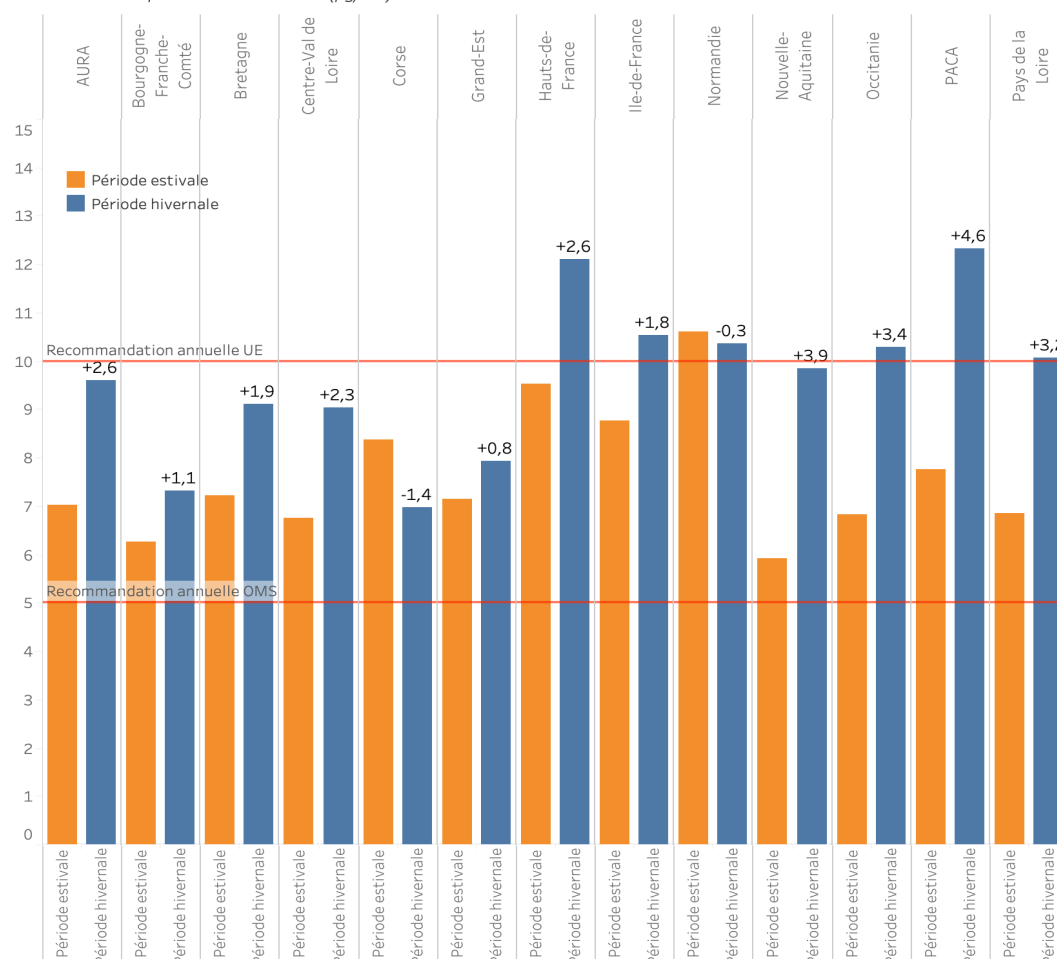


Figure 3 : Concentration en PM_{2.5} par mois en France



En fonction des influences auxquelles sont rattachés les capteurs, il est possible de comparer les écarts en fonction des capteurs pollution de fond, trafic et industrie. On constate dans la Figure 2 que les écarts sont relativement proches et d'environ 2.4 µg/m³, soit équivalente de l'écart moyen national de 2.35 µg/m³ indiquée en Figure 1. Ainsi à l'échelle de la France, il ne semble pas que les zones répertoriées comme « de fond » en hiver (zone proche potentiellement de chauffage au bois) soient plus ou moins impactantes que le trafic ou l'industrie. Ces résultats sont étayés à l'aide de l'étude de zones spécifiques utilisant le chauffage au bois.

Le mois le plus impacté par les particules fines PM_{2.5} en France est tout particulièrement le mois de février. Le mois de janvier et mars présentent également des concentrations élevées et un pic en décembre et juin est également observé mais avec des concentrations un peu inférieures aux mois précédemment cités. Les mois les plus froids sont les mois qui présentent les concentrations de PM_{2.5} les plus élevées (Figure 3).

Figure 4 : Comparaison des concentrations en PM_{2.5} à l'échelle des régionsConcentration en particules fines PM_{2.5} (µg/m³)

A l'échelle des régions, les plus gros écarts observés entre les périodes estivales et hivernales sont pour les régions suivantes : PACA (différence de 4.58 µg/m³), la Nouvelle-Aquitaine (3.94 µg/m³), l'Occitanie (3.44 µg/m³), les Pays de la Loire (3.22 µg/m³) et les Hauts-de-France (2.58 µg/m³). Les écarts les plus importants ne se retrouvent pas dans les régions *a priori* les plus utilisatrices de chauffage au bois sur la durée, contrairement à ce qui aurait pu être imaginé.

Tableau 2 : Part annuelle maximale du chauffage au bois

	Concentration (µg/m ³)	Nombre de jours
Froid	9.46	191
Tempéré	6.82	46
Chaud	7.22	128
Part maximale annuelle du chauffage au bois (%)	$(2.35 \cdot 191 + 0.05 \cdot 6.82 \cdot 46) / (9.46 \cdot 191 + 7.11 \cdot 174) = 15.3$	

En France, la contribution maximale du chauffage au bois sur la concentration en PM_{2.5} est de 15.3 %. Ce chiffre sera utilisé comme référence française pour comparer avec les six zones sélectionnées dans la suite de l'étude.

3. Étude des zones

3.1. Les saisons météorologiques

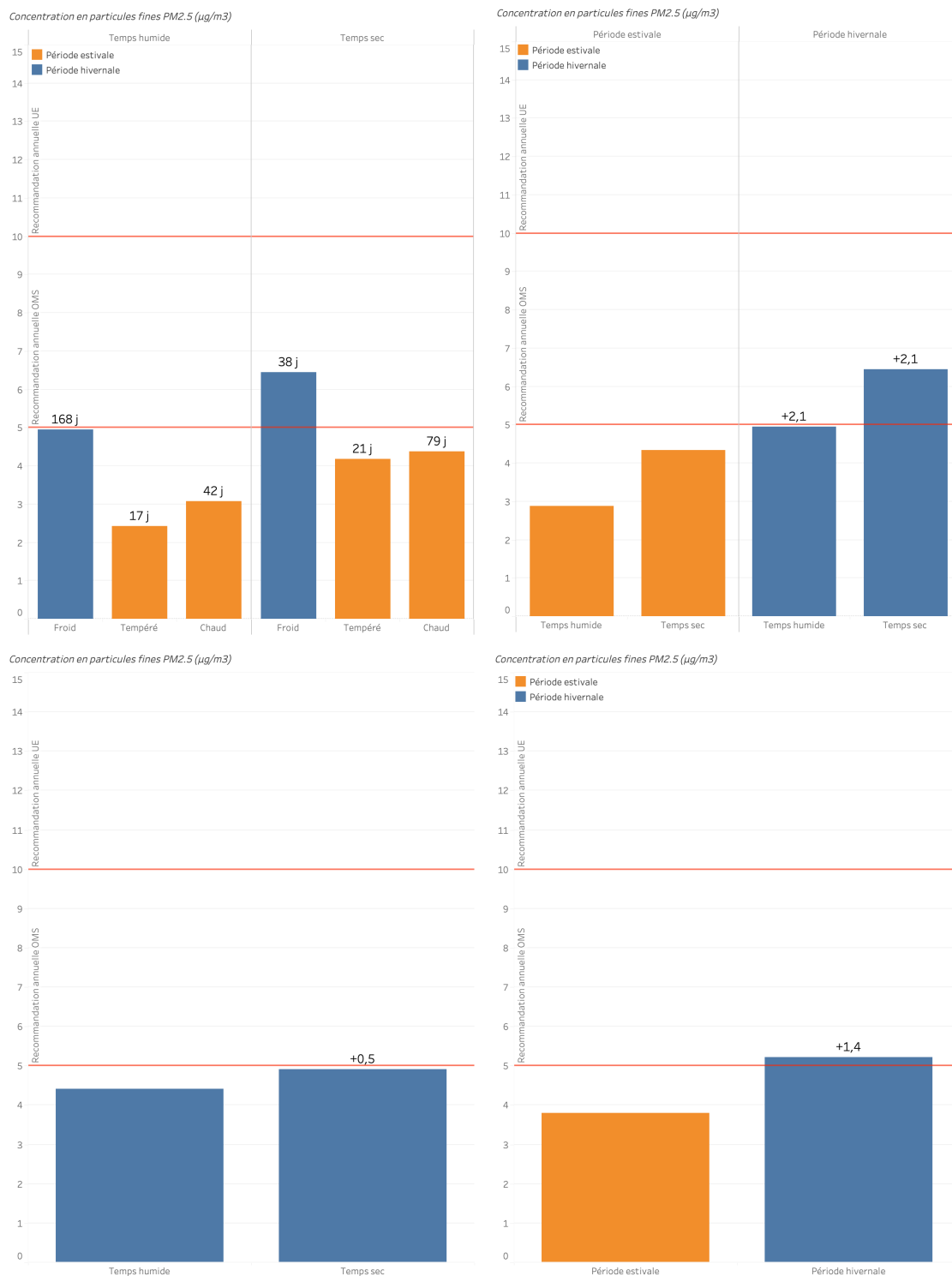
Résumé des six zones

Tableau 3 : Résultats compilés des analyses sur les 6 zones d'étude et comparaison avec les résultats moyennés pour la France

Zone	Total concentration PM _{2.5} (µg/m³) hiver	Total concentration PM _{2.5} (µg/m³) été	Écart absolu (µg/m³) entre été et hiver	% potentiel du chauffage au bois max sur l'année 2023
Mulhouse	5.2	3.8	+1.4	17.6%
Brest	6.4	5.9	+0.4	4.6%
Nancy	8.3	7.8	+0.5	3.9%
Jonville-en-Woëvre	8.4	7.7	+0.7	5.7%
Vallée de l'Arve	8.4	6	+2.4	22.1%
Toulon	11.0	6.35	+4.7	22.3%
France	9.46	7.1	+2.4	15.3 %

Mulhouse

Figure 5 : Graphiques des concentrations en $PM_{2.5}$ en fonction de la météo (périodes, température, humidité) à Mulhouse



On constate que la concentration moyenne journalière en $PM_{2.5}$ est plus élevée en période hivernale qu'en période estivale. Par temps humide, les concentrations de $PM_{2.5}$ pour les deux périodes restent en deçà de la concentration annuelle préconisée par l'OMS de $5 \mu g/m^3$.

Par temps sec, la concentration en $PM_{2.5}$ est plus élevée en période froide que chaude avec une différence absolue à $2.2 \mu g/m^3$.

En valeur absolue, on constate qu'un temps humide permet d'abaisser la concentration en $PM_{2.5}$ de $0.5 \mu g/m^3$.

En période hivernale, la concentration en $PM_{2.5}$ augmente en valeur absolue de $1.4 \mu g/m^3$ ce qui est peu. A noter que l'augmentation de $1.4 \mu g/m^3$ fait passer la période hivernale juste au-dessus du seuil recommandé par l'OMS (Tableau 4).

NB : Le nombre de jours de période hivernale par temps humide est majoritaire alors que le nombre de jour de période estivale par temps humide est minoritaire. Bien qu'une météo plus humide soit tout à fait caractéristique d'une période hivernale à Mulhouse, on pourrait imaginer que cette différence peut engendrer un biais (Annexe 6.2).

Tableau 4 : Concentrations en $PM_{2.5}$ en fonction de la période à Mulhouse

	Total concentration $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	Écart absolu ($\mu g/m^3$) entre été et hiver
Période hivernale	5.2	+1.4
Période estivale	3.8	réf

Dans l'hypothèse pour laquelle le chauffage au bois est seul responsable de la différence de pollution aux $PM_{2.5}$ entre l'été et l'hiver, alors sa contribution maximale à Mulhouse est de **36.8 %** et en valeur absolue de **$1.4 \mu g/m^3$** .

Tableau 5 : Part annuelle maximale du chauffage au bois à Mulhouse

	Concentration ($\mu g/m^3$)	Nombre de jours
Froid	5.22	206
Tempéré	3.39	38
Chaud	3.93	121
Part maximale annuelle du chauffage au bois (%)	$(1.4 \cdot 206 + 0.05 \cdot 3.39 \cdot 38) / (5.22 \cdot 206 + 3.8 \cdot 159) = 17.6 \%$	

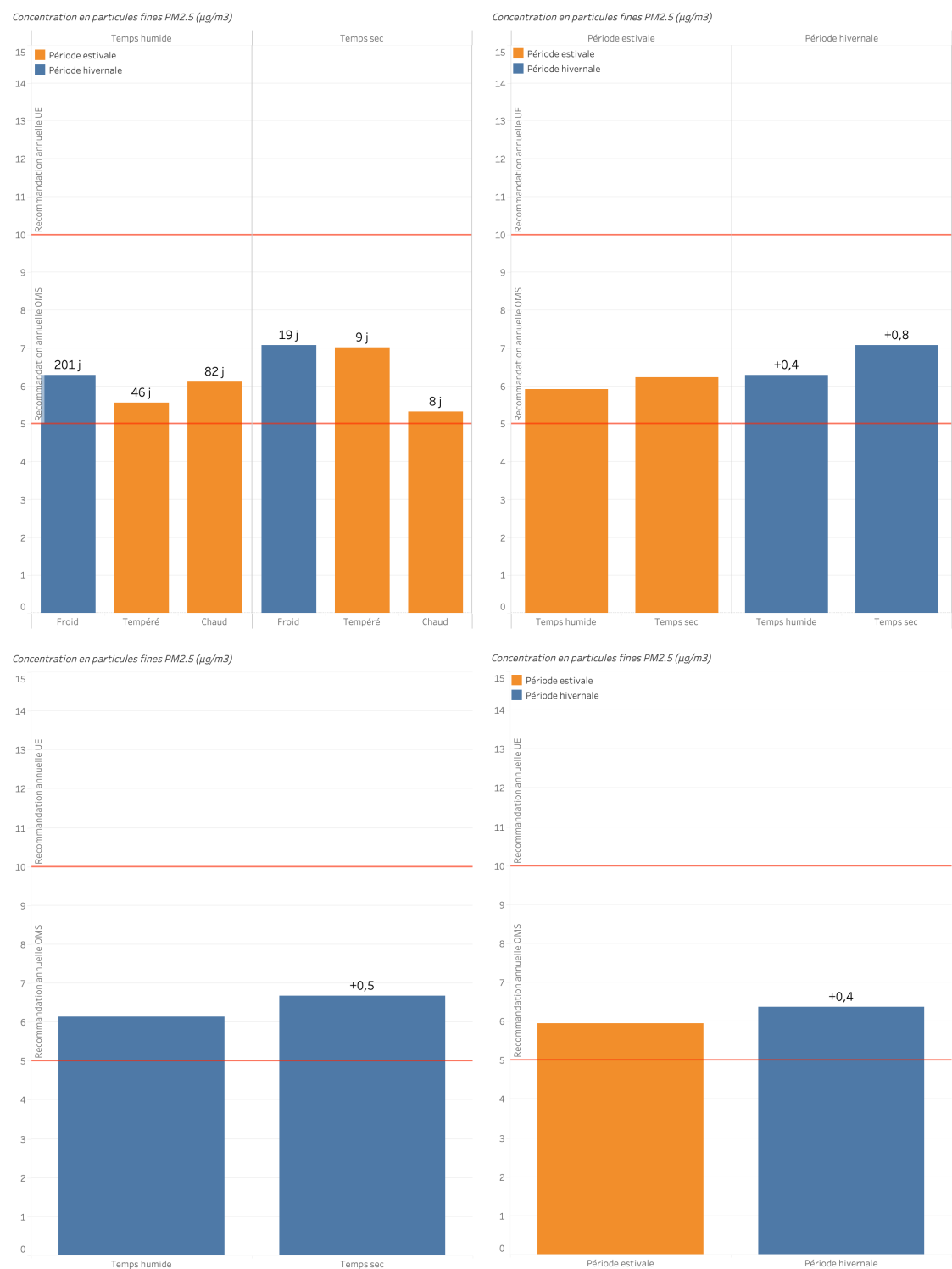
Ainsi à Mulhouse, dans le cas où la différence de concentration en $PM_{2.5}$ entre l'hiver et l'été ne serait attribuée qu'au chauffage au bois, alors sa part à la concentration en particules fines annuelle serait de **17.6 %**. En d'autres mots, le chauffage au bois ne peut pas être tenu pour responsable de plus de **17.6 %** de la concentration en $PM_{2.5}$ à l'année à Mulhouse. Cette valeur est supérieure à la moyenne française de **15.3 %**, cependant, en valeur de concentration en $\mu g/m^3$, celles-ci sont bien inférieures.

La concentration de particules la plus importante en période hivernale est mesurée en février. C'est le mois enregistrant les plus faibles précipitations et c'est aussi potentiellement le mois où des épandages d'engrais ont pu être réalisés et donc générés des particules fines. Dans ce cas, le bois de ne serait pas le seul contributeur et la part de 17.6 % lui étant attribuée s'en verrait déjà réduite. Le mois de février est également le mois où des pics de concentrations en $PM_{2.5}$ ont été mesurées pour toute la France due à des conditions météorologiques propices à l'accumulation des particules dans l'atmosphère (vent faible, peu de précipitations, phénomène d'inversion de température).



Brest

Figure 6 : Graphiques des concentrations en PM_{2.5} en fonction de la météo (périodes, température, humidité) à Brest



On constate que la concentration moyenne journalière en $PM_{2.5}$ est légèrement plus élevée en période hivernale qu'en période estivale. Par temps humide, les concentrations de $PM_{2.5}$ pour les deux périodes sont supérieures à la concentration annuelle préconisée par l'OMS de $5 \mu g/m^3$.

Par temps sec, la concentration en $PM_{2.5}$ est plus élevée en période froide que chaude avec une différence absolue à $0.4 \mu g/m^3$.

En valeur absolue, on constate qu'un temps humide permet d'abaisser la concentration en $PM_{2.5}$ de $0.4 \mu g/m^3$ par rapport à un temps sec.

En période hivernale, la concentration en $PM_{2.5}$ augmente en valeur absolue de $0.4 \mu g/m^3$ ce qui est peu (Tableau 6).

NB : Le nombre de jours par temps humide est largement majoritaire alors que le nombre de jour par temps sec est minoritaire. Bien qu'une météo humide soit tout à fait caractéristique de la Bretagne, on pourrait imaginer que cette différence permet de diminuer la concentration de $PM_{2.5}$ émises en hiver comme en été (Annexe 6.2).

Tableau 6 : Concentrations en $PM_{2.5}$ en fonction de la période à Brest

	Total concentration $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	Écart absolu ($\mu g/m^3$) entre été et hiver
Période hivernale	6.4	+0.4
Période estivale	5.9	réf

Dans l'hypothèse pour laquelle le chauffage au bois est seul responsable de la différence de pollution aux $PM_{2.5}$ entre l'été et l'hiver, alors sa contribution maximale à Brest est en valeur absolue de **$0.4 \mu g/m^3$** .

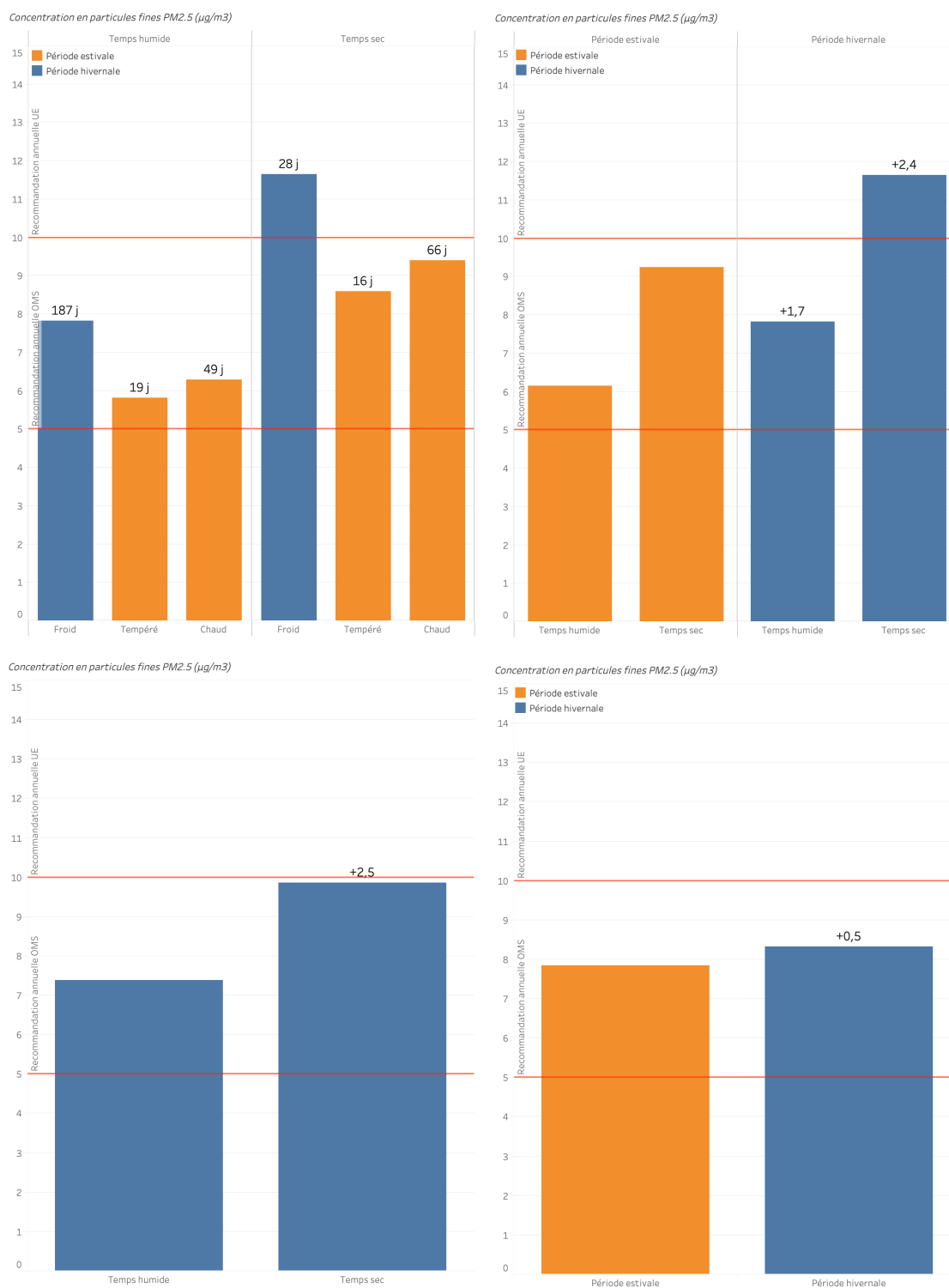
Tableau 7 : Part annuelle maximale du chauffage au bois à Brest

	Concentration ($\mu g/m^3$)	Nombre de jours
Froid	6.36	220
Tempéré	5.8	55
Chaud	6.03	90
Part maximale annuelle du chauffage au bois (%)	$(0.4 \cdot 220 + 0.05 \cdot 5.8 \cdot 55) / (6.4 \cdot 220 + 5.9 \cdot 145) = 4.6 \%$	

Ainsi à Brest, dans le cas où la différence de concentration en $PM_{2.5}$ entre l'hiver et l'été ne serait attribuée qu'au chauffage au bois, alors sa contribution à la concentration en particules fines annuelle serait de 4.6 %. En d'autres mots, le chauffage au bois ne peut pas être tenu pour responsable de plus de **4.6 %** de la concentration en $PM_{2.5}$ à l'année à Brest. Cette valeur reste bien inférieure à la valeur moyenne française de 15.3 %.

La concentration de particules les plus importantes sont mesurées en février, juin et septembre. Dans ce cas, notamment pour juin le bois ne serait donc pas le seul contributeur et la part de 4.6 % lui étant attribuée s'en verrait déjà réduite.

Nancy

Figure 7 : Graphiques des concentrations en $PM_{2.5}$ en fonction de la météo (périodes, température, humidité) à Nancy

On constate que la concentration moyenne journalière en $PM_{2.5}$ est légèrement plus élevée en période hivernale qu'en période estivale. Par temps humide, les concentrations de $PM_{2.5}$ sont inférieures à la concentration en période sèche mais excèdent la valeur préconisée par l'OMS de $5 \mu g/m^3$.

Par temps sec, la concentration en $PM_{2.5}$ est plus élevée en période froide avec une différence absolue à $2.4 \mu g/m^3$. Par temps humide, la concentration est également plus élevée en période froide avec une différence de $1.7 \mu g/m^3$.

En valeur absolue, on constate qu'un temps humide permet d'abaisser la concentration en $PM_{2.5}$ de $2.5 \mu g/m^3$ par rapport à un temps sec.

En période hivernale, la concentration en $PM_{2.5}$ augmente en valeur absolue de $0.48 \mu g/m^3$ ce qui est peu (Tableau 8).

NB : Le nombre de jours de période hivernale par temps humide est largement majoritaire. La météo est plutôt humide, 255 jours humides contre 110 jours secs, on pourrait imaginer que cette différence permet de diminuer la concentration de $PM_{2.5}$ émises en hiver comme en été (Annexe 6.2).

Tableau 8 : Concentrations en $PM_{2.5}$ en fonction de la période à Nancy

	Total concentration $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	Écart absolu ($\mu g/m^3$) entre été et hiver
Période hivernale	8.32	+0.5
Période estivale	7.84	réf

Dans l'hypothèse pour laquelle le chauffage au bois est seul responsable de la différence de pollution aux $PM_{2.5}$ entre l'été et l'hiver, alors sa contribution maximale hivernale à Nancy est en valeur absolue de **$0.48 \mu g/m^3$** .

Tableau 9 : Part annuelle maximale du chauffage au bois à Nancy

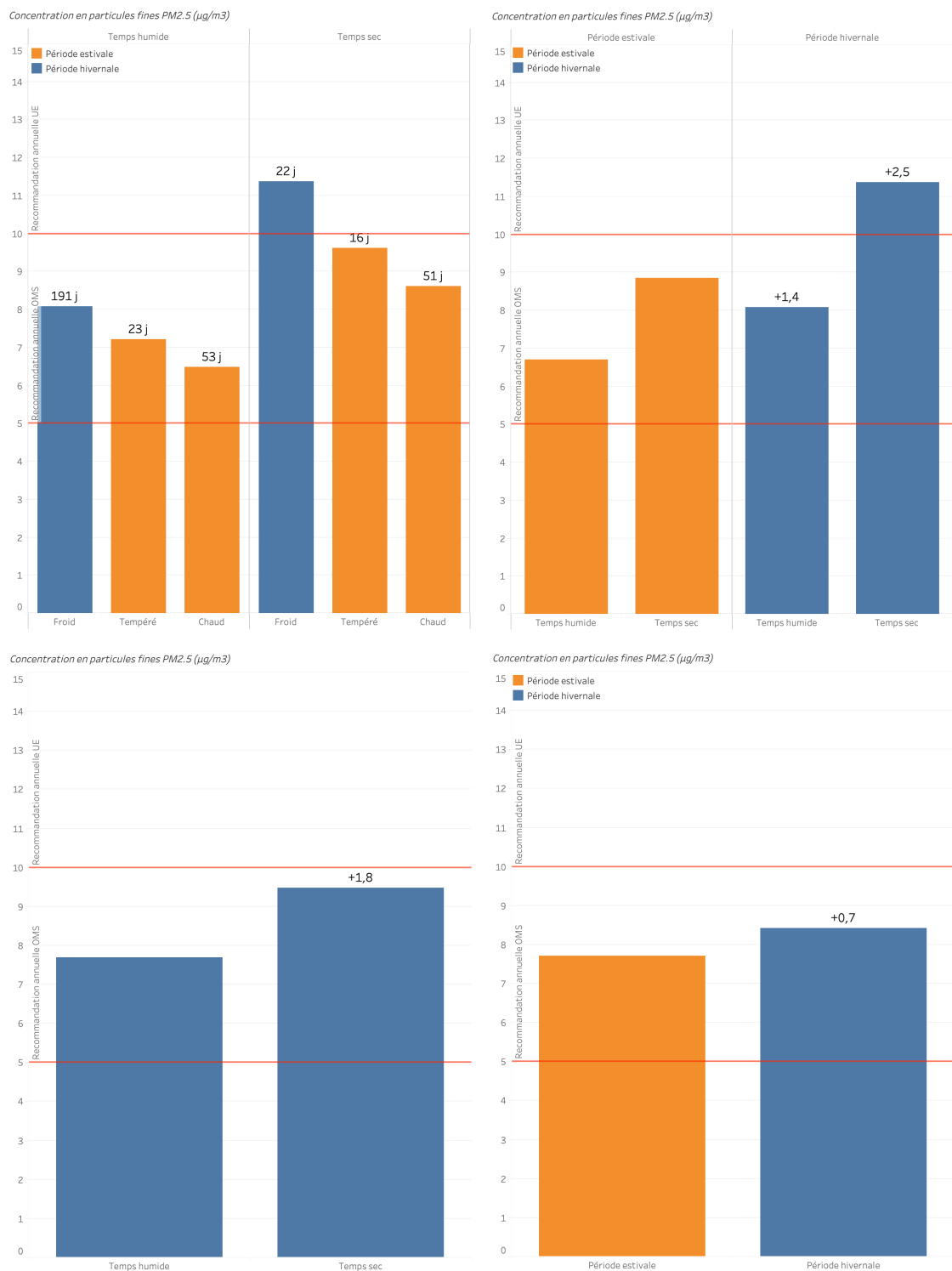
	Concentration ($\mu g/m^3$)	Nombre de jours
Froid	8.32	215
Tempéré	7.09	35
Chaud	8.07	115
Part maximale annuelle du chauffage au bois (%)	$(0.5 \cdot 215 + 0.05 \cdot 7.09 \cdot 35) / (8.32 \cdot 215 + 7.84 \cdot 150) = 3.9 \%$	

Ainsi à Nancy, dans le cas où la différence de concentration en $PM_{2.5}$ entre l'hiver et l'été ne serait attribuée qu'au chauffage au bois, alors sa contribution à la concentration en particules fines annuelle serait de 3.9 %. En d'autres mots, le chauffage au bois ne peut pas être tenu pour responsable de plus de **3.9 %** de la concentration en $PM_{2.5}$ à l'année à Nancy. Cette valeur reste bien inférieure à la valeur moyenne française.

La concentration de particules les plus importantes sont mesurées en février, mai, juin et septembre. Le mois de février enregistre un pic très important avec des concentrations avoisinant les $14 \mu g/m^3$.

Jonville-en-Woëvre

Figure 8 : Graphiques des concentrations en PM_{2.5} en fonction de la météo (périodes, température, humidité) à Jonville-en-Woëvre



On constate que la concentration moyenne journalière en $PM_{2.5}$ est légèrement plus élevée en période hivernale qu'en période estivale. Par temps humide, les concentrations de $PM_{2.5}$ pour les deux périodes sont inférieures à la concentration en période sèche mais excèdent la valeur préconisée par l'OMS de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Par temps sec, la concentration en $PM_{2.5}$ est plus élevée en période froide avec une différence absolue à $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En période humide, la concentration est également plus élevée en période froide avec une différence absolue à $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En valeur absolue, on constate qu'un temps humide permet d'abaisser la concentration en $PM_{2.5}$ de $1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à un temps sec.

En période hivernale, la concentration en $PM_{2.5}$ augmente en valeur absolue de $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ce qui est peu (Tableau 10).

NB : Le nombre de jours par temps humide est largement majoritaire : 267 jours humides contre 89 jours secs, on pourrait imaginer que cette différence permet de diminuer la concentration de $PM_{2.5}$ émise en hiver comme en été (Annexe 6.2).

Tableau 10 : Concentrations en $PM_{2.5}$ en fonction de la période à Jonville-en-Woëvre

	Total concentration $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Écart absolu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre été et hiver
Période hivernale	8.4	+0.7
Période estivale	7.7	réf

Dans l'hypothèse pour laquelle le chauffage au bois est seul responsable de la différence de pollution aux $PM_{2.5}$ entre l'été et l'hiver, alors sa contribution maximale à Jonville-en-Woëvre est en valeur absolue de **$0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$** .

Tableau 11 : Part annuelle maximale du chauffage au bois à Jonville-en-Woëvre

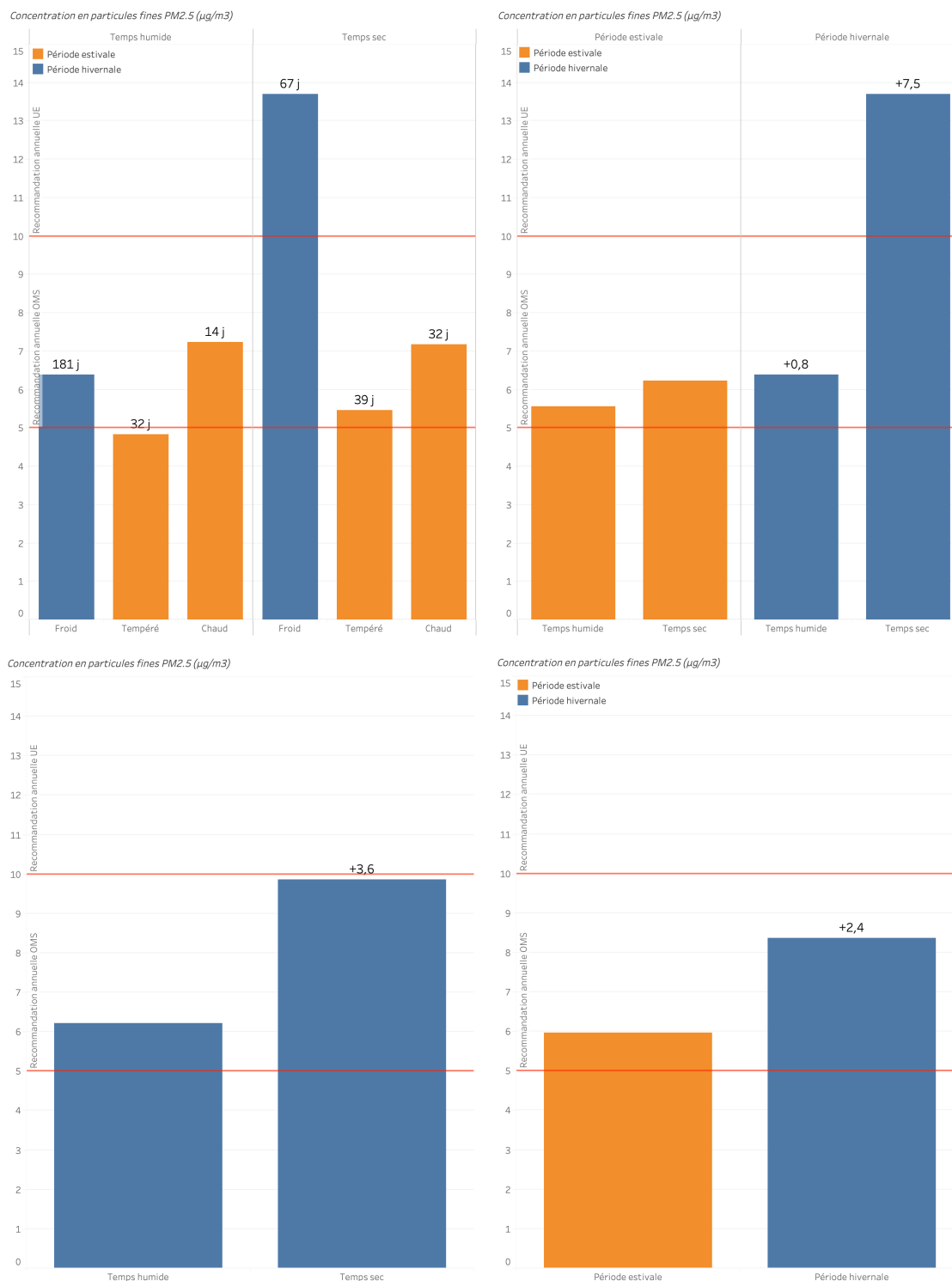
	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nombre de jours
Froid	8.41	213
Tempéré	8.20	39
Chaud	7.53	104
Part maximale annuelle du chauffage au bois (%)	$(0.7 \cdot 213 + 0.05 \cdot 8.2 \cdot 39) / (8.41 \cdot 213 + 7.7 \cdot 143) = 5.7 \%$	

Ainsi à Jonville-en-Woëvre, dans le cas où la différence de concentration en $PM_{2.5}$ entre l'hiver et l'été ne serait attribuée qu'au chauffage au bois, alors sa contribution à la concentration en particules fines annuelle serait de 5.7 %. En d'autres mots, le chauffage au bois ne peut pas être tenu pour responsable de plus de **5.7 %** de la concentration en $PM_{2.5}$ à l'année. Cette valeur reste inférieure à la valeur moyenne française de 15.3 %.

La concentration de particules les plus importantes sont mesurées en février et juin. Le mois de février enregistre un pic très important avec des concentrations avoisinant les $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le mois de juin est le second pic avec une concentration dépassant $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Vallée de l'Arve

Figure 9 : Graphiques des concentrations en $PM_{2.5}$ en fonction de la météo (périodes, température, humidité) dans la vallée de l'Arve



On constate que la concentration moyenne journalière en $PM_{2.5}$ est plus élevée en période hivernale qu'en période estivale de $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Par temps humide, les concentrations de $PM_{2.5}$ pour les deux périodes sont inférieures à la concentration en période sèche mais excèdent la valeur préconisée par l'OMS de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Par temps sec, la concentration en $PM_{2.5}$ est plus élevée en période froide avec une différence absolue à $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En période humide, la concentration est également plus élevée en période froide avec une différence absolue à $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En valeur absolue, on constate qu'un temps humide permet d'abaisser la concentration en $PM_{2.5}$ de $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à un temps sec.

En période hivernale, la concentration en $PM_{2.5}$ augmente en valeur absolue de $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ce qui est élevé (Tableau 12).

NB : Le nombre de jours de période hivernale par temps humide est largement majoritaire. La météo est plutôt humide, 227 jours humides contre 138 jours secs, on pourrait imaginer que cette différence permet de diminuer la concentration de $PM_{2.5}$ émise en hiver comme en été (Annexe 6.2).

Tableau 12 : Concentrations en $PM_{2.5}$ en fonction de la période dans la vallée de l'Arve

	Total concentration $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Écart absolu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre été et hiver
Période hivernale	8.36	+2.4
Période estivale	5.96	réf

Dans l'hypothèse pour laquelle le chauffage au bois est seul responsable de la différence de pollution aux $PM_{2.5}$ entre l'été et l'hiver, alors sa contribution maximale dans la vallée de l'Arve est en valeur absolue de $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tableau 13 : Part annuelle maximale du chauffage au bois dans la vallée de l'Arve

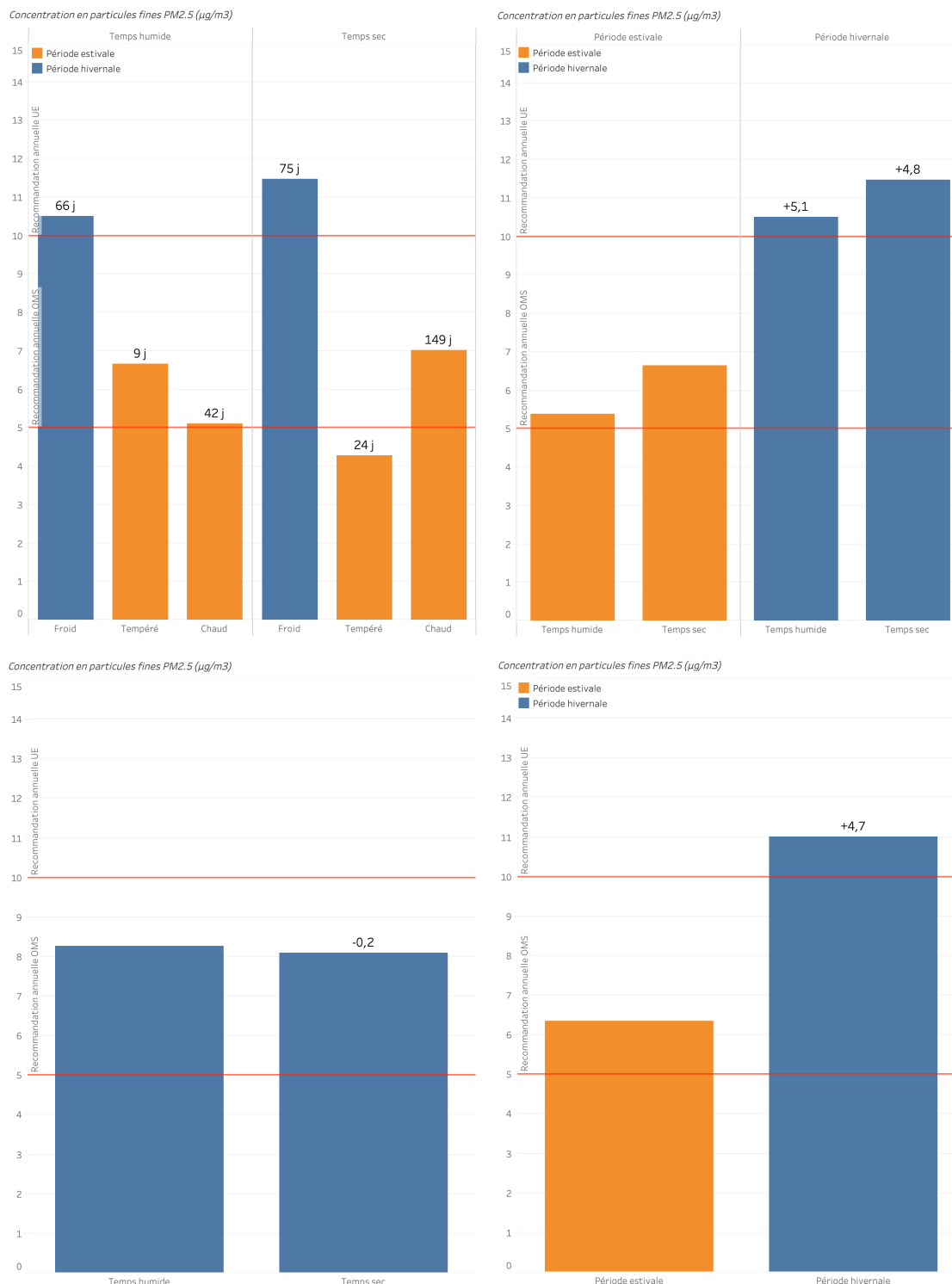
	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nombre de jours
Froid	8.36	248
Tempéré	5.17	71
Chaud	7.19	46
Part maximale annuelle du chauffage au bois (%)	$(2.4 \times 248 + 0.05 \times 5.17 \times 71) / (8.36 \times 248 + 5.96 \times 117) = 22.1 \%$	

Ainsi dans la vallée, dans le cas où la différence de concentration en $PM_{2.5}$ entre l'hiver et l'été ne serait attribuée qu'au chauffage au bois, alors sa contribution à la concentration en particules fines annuelle serait de 22.1 %. En d'autres mots, le chauffage au bois ne peut pas être tenu pour responsable de plus de **22.1 %** de la concentration en $PM_{2.5}$ à l'année dans la vallée de l'Arve. Cette valeur est supérieure à la moyenne française de 15.3 %.

Les concentrations de particules les plus importantes sont mesurées de novembre à février avec une chute à partir d'avril. Les mois de décembre et janvier enregistrent des pics très importants avec des concentrations pouvant dépasser les $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Toulon

Figure 10 : Graphiques des concentrations en PM_{2.5} en fonction de la météo (périodes, température, humidité) à Toulon



On constate que la concentration moyenne journalière en $PM_{2.5}$ est bien plus élevée en période hivernale qu'en période estivale.

Par temps sec, la concentration en $PM_{2.5}$ est plus élevée en période froide avec une différence absolue à $4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En période humide, la concentration est également plus élevée en période froide avec une différence absolue à $5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

On constate que l'humidité n'entraîne pas de diminution de la concentration en $PM_{2.5}$.

En période hivernale, la concentration en $PM_{2.5}$ augmente en valeur absolue de $4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ce qui est très élevée (Tableau 14).

Tableau 14 : Concentrations en $PM_{2.5}$ en fonction de la période à Toulon

	Total concentration $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Écart absolu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) et été et hiver
Période hivernale	11.0	+4.7
Période estivale	6.35	réf

Dans l'hypothèse pour laquelle le chauffage au bois est seul responsable de la différence de pollution aux $PM_{2.5}$ entre l'été et l'hiver, alors sa contribution maximale à Toulon est en valeur absolue de **$4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$** .

Tableau 15 : Part annuelle maximale du chauffage au bois à Toulon

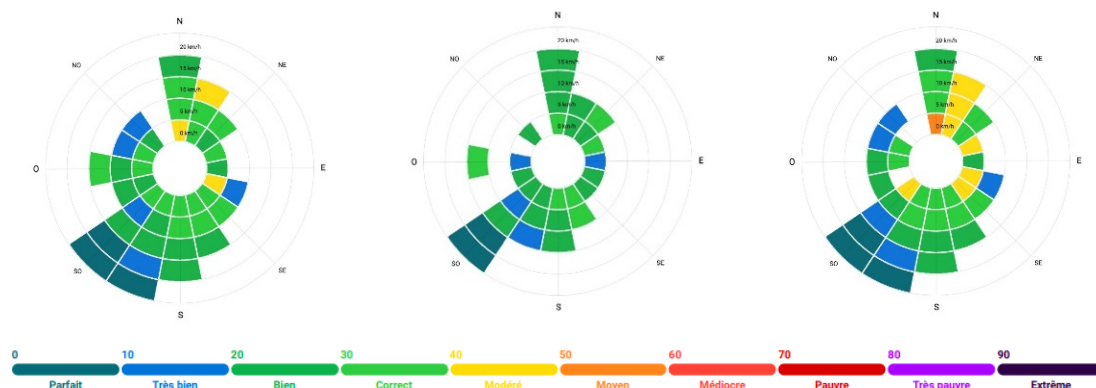
	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nombre de jours
Froid	11.02	141
Tempéré	4.92	33
Chaud	6.60	191
Part maximale annuelle du chauffage au bois (%)	$(4.7 \times 141 + 0.05 \times 4.92 \times 33) / (11.02 \times 141 + 6.35 \times 224) = 22.3 \%$	

Ainsi à Toulon, dans le cas où la différence de concentration en $PM_{2.5}$ entre l'hiver et l'été ne serait attribuée qu'au chauffage au bois, alors sa contribution à la concentration en particules fines annuelle serait de 22.3 %. En d'autres mots, le chauffage au bois ne peut pas être tenu pour responsable de plus de **22.3 %** de la concentration en $PM_{2.5}$ à l'année à Toulon. Cette valeur est supérieure à la moyenne française de 15.3 %, alors que la zone a été choisie pour sa faible utilisation du chauffage au bois.

Les concentrations de particules les plus importantes sont mesurées en février et décembre. Le mois de février enregistre un pic très important avec des concentrations avoisinant les $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les conditions météorologiques en février ont été particulièrement propices à la rétention des particules $PM_{2.5}$ dans l'atmosphère avec notamment très peu de précipitations et des phénomènes d'inversion thermique.

3.2. Rose des vents Mulhouse

Figure 11 : Roses des vents - annuelle, pour la période estivale et pour la période hivernale en 2023 (de gauche à droite)



Avec les roses des vents combinées au graphique ci-dessous, on constate que les vents au cours d'une année viennent majoritairement du Nord-Est et du Sud-Ouest, avec de la pollution au $PM_{2.5}$ majoritairement amenée du Nord-Nord-Est de la zone de Mulhouse en période hivernale contrairement au vent du Sud-Ouest.

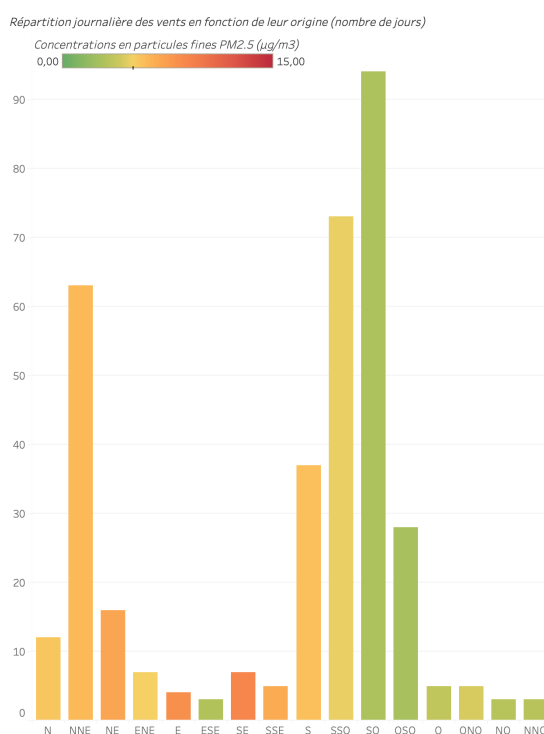


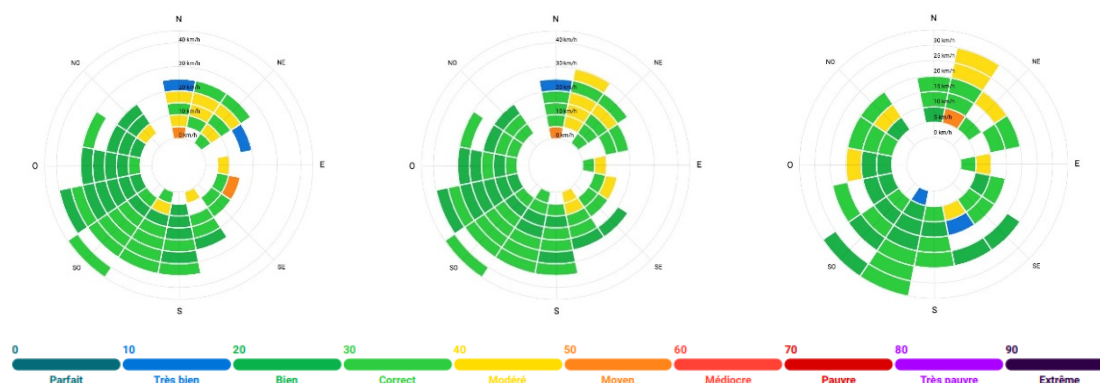
Figure 12 : nombre de jours en fonction de la direction du vent et de la concentration en $PM_{2.5}$ à Mulhouse

Les vents du Nord-Est sont associés à une pollution plus élevée, notamment en hiver, émanant de sources plutôt rapprochées. Ce sont les vents de provenance du Nord-Nord-Est qui ont le plus d'impact, car les plus fréquents durant l'année (+60 jours).

Les graphiques semblent indiquer qu'il pourrait y avoir une pollution provenant d'Allemagne en période hivernale impactant la concentration en $PM_{2.5}$ à Mulhouse. Cette pollution resterait non majoritaire car les vents apportant le plus de pollution sont des faibles vitesses, déplaçant alors la pollution de sources plutôt rapprochées.

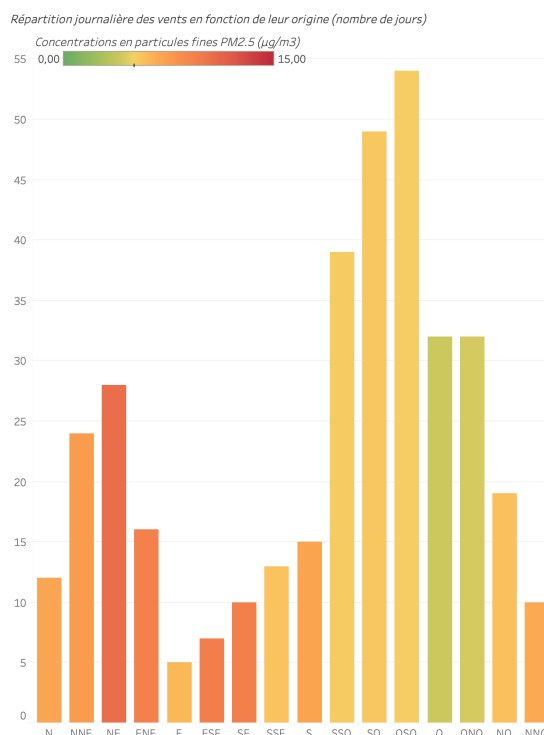
Brest

Figure 13 : Roses des vents - annuelle, pour la période estivale et pour la période hivernale en 2023 (de gauche à droite) à Brest



Avec les roses des vents combinées au graphique ci-dessous, on constate que les vents au cours d'une année viennent majoritairement du Nord-Est et du Sud-Ouest, avec de la pollution au $PM_{2.5}$ majoritairement amenée du Nord-Est. Les vents du Nord-Est sont associés à une pollution plus élevée émanant de sources proches mais également plus éloignées.

Figure 14 : nombre de jours en fonction de la direction du vent et de la concentration en $PM_{2.5}$ à Brest

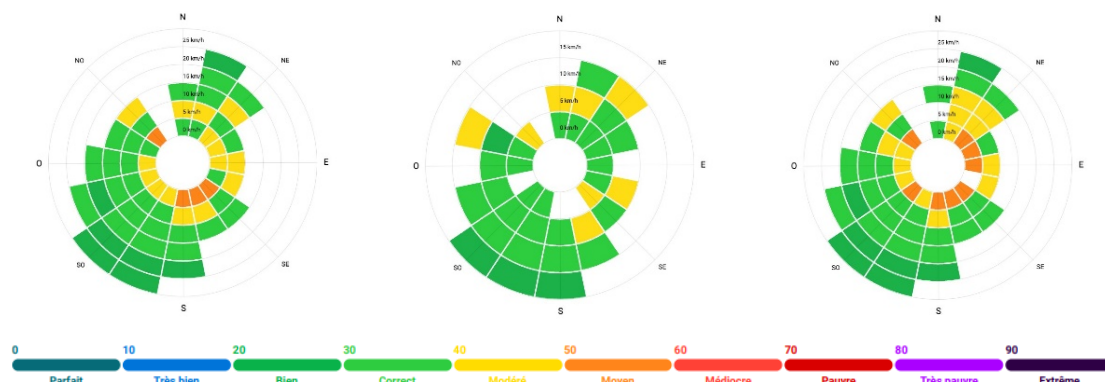


On constate que ce sont aussi bien les vents en période hivernale qu'estivale qui amènent à une qualité de l'air dégradée, ce qui empêche d'affirmer que le vent ne transporte que des particules issues du chauffage au bois.

Les graphiques semblent indiquer que la pollution aux $PM_{2.5}$ pourrait venir à la fois de la zone au nord de Brest mais également des activités portuaires avec les vents du Sud-Ouest.

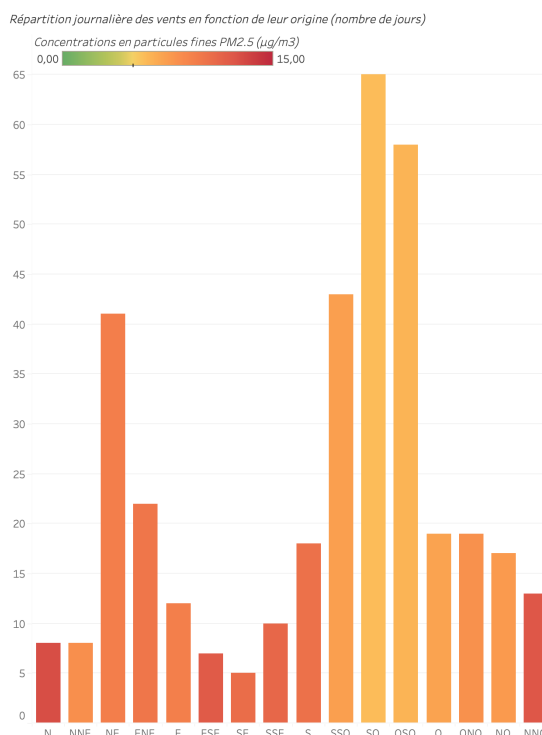
Nancy

Figure 15 : Roses des vents - annuelle, pour la période estivale et pour la période hivernale en 2023 (de gauche à droite) à Nancy



Avec les roses des vents combinées au graphique ci-dessous, on constate que les vents de toutes directions semblent contribuer à la pollution aux $PM_{2.5}$. A l'année les vents les plus contributeurs sont ceux d'Est et Sud et en hiver le vent du Nord-Est amène également de la pollution d'une zone proche.

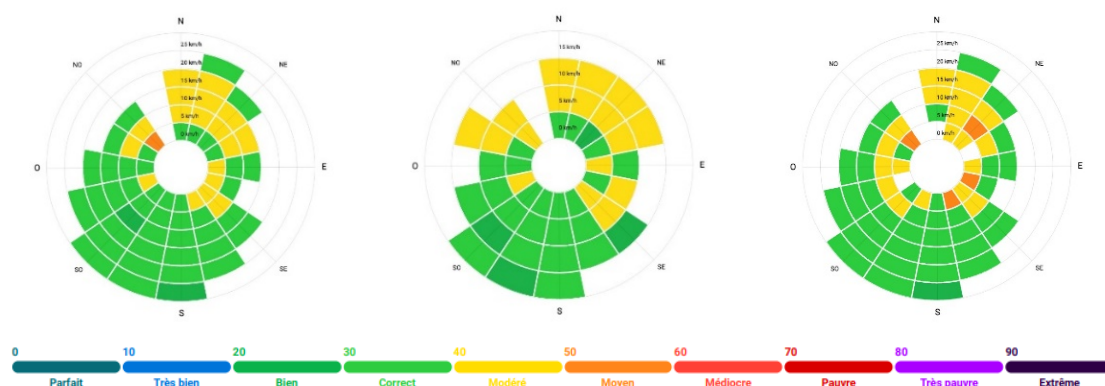
Figure 16 : nombre de jours en fonction de la direction du vent et de la concentration en $PM_{2.5}$ à Nancy



On constate que les sources de $PM_{2.5}$ semblent proches et ça sur toute l'année, même si on constate quelques variations de direction du vent et de pollution entre été et hiver. Les graphiques semblent indiquer que la pollution aux $PM_{2.5}$ pourrait provenir de sources proches.

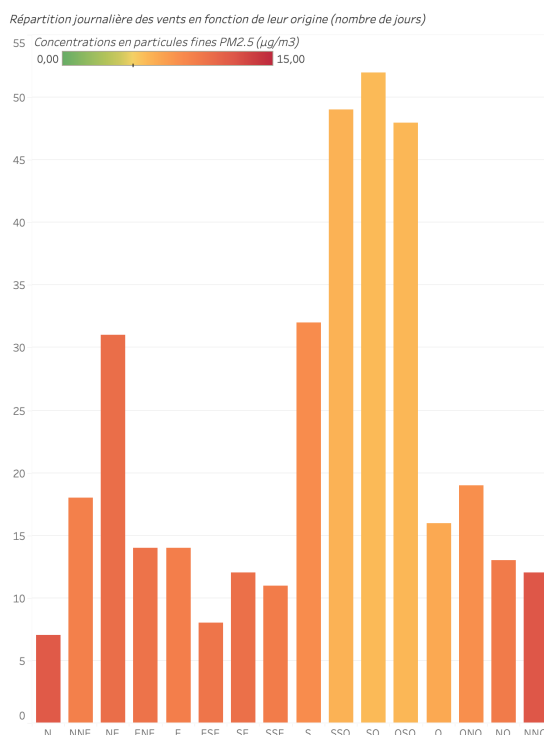
Jonville-en-Woèvre

Figure 17 : Roses des vents - annuelle, pour la période estivale et pour la période hivernale en 2023 (de gauche à droite) à Jonville-en-Woèvre



Avec les roses des vents combinées au graphique ci-dessous, on constate que les vents dont la provenance se situe entre l'Ouest et l'Est principalement apportent le plus de pollution ; notamment des particules fines provenant du Nord et pouvant venir de sources éloignées.

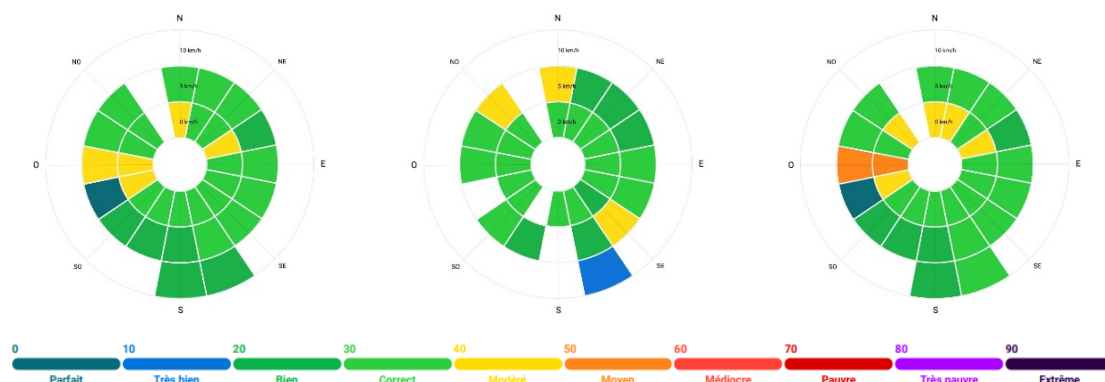
Figure 18 : nombre de jours en fonction de la direction du vent et de la concentration en $PM_{2.5}$ à Jonville-en-Woèvre



On constate que les vents majoritaires sont ceux du Sud-Ouest mais les plus polluants sont ceux venant des trois autres points cardinaux. Les graphiques semblent indiquer que la pollution aux $PM_{2.5}$ pourrait également provenir de sources externes à Jonville-en-Woèvre.

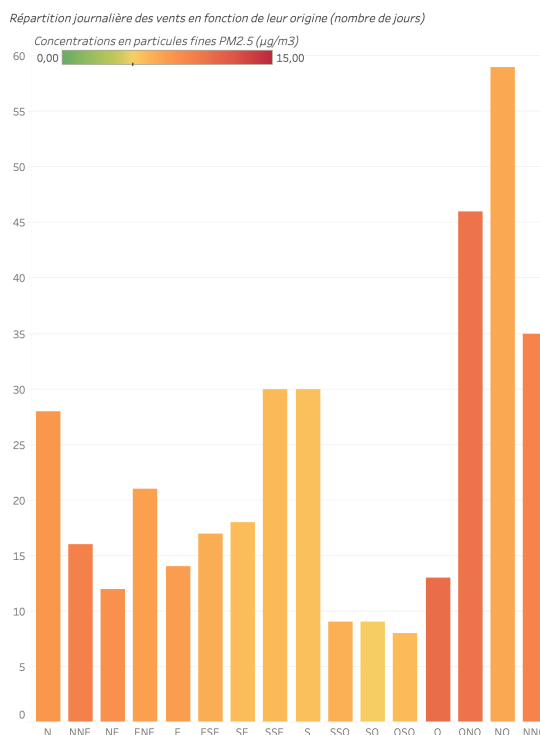
Vallée de l'Arve

Figure 19 : Roses des vents - annuelle, pour la période estivale et pour la période hivernale en 2023 (de gauche à droite) dans la vallée de l'Arve



Avec les roses des vents combinées au graphique ci-dessous, on constate que les vents de l'Ouest semblent contribuer à la pollution aux $PM_{2.5}$. A l'année les vents les plus contributeurs sont l'Ouest et le Nord et en hiver le vent de l'Ouest amène également de la pollution de zones rapprochées.

Figure 20 : nombre de jours en fonction de la direction du vent et de la concentration en $PM_{2.5}$ dans la vallée de l'Arve

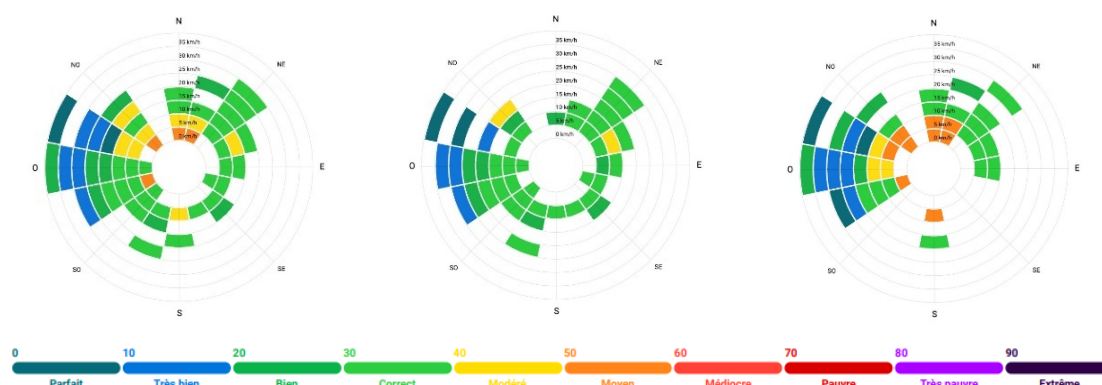


On constate que les sources de $PM_{2.5}$ semblent proches et ça sur toute l'année, même si on remarque quelques variations de direction du vent et de pollution entre été et hiver.

Les graphiques semblent indiquer que la pollution aux $PM_{2.5}$ pourrait provenir de sources plutôt proches.

Toulon

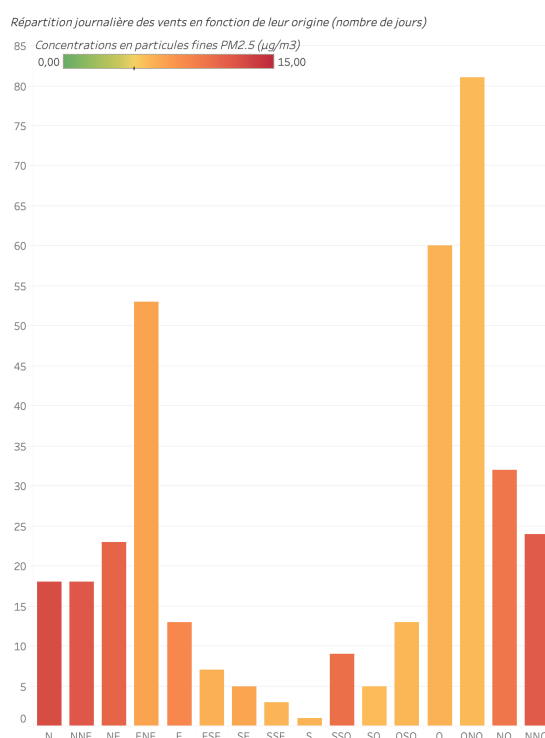
Figure 21 : Roses des vents - annuelle, pour la période estivale et pour la période hivernale en 2023 (de gauche à droite) à Toulon



Avec les roses des vents combinées au graphique ci-dessous, on constate que les vents du Nord-Ouest au Nord-Est semblent contribuer à la pollution aux $PM_{2.5}$. A l'année les vents les plus contributeurs sont ceux du Nord-Nord-Ouest et en hiver le vent du Nord amène également de la pollution d'une zone proche.

La zone Nord/Nord-Est de Toulon est plus en altitude est présente plutôt des habitations de type maison. La pollution du Nord pourrait donc provenir des activités résidentielles en période hivernale telles que le chauffage au bois. La pollution provenant du Sud/Sud-Ouest serait susceptible d'être liée à des activités portuaires.

Figure 22 : nombre de jours en fonction de la direction du vent et de la concentration en $PM_{2.5}$ à Toulon



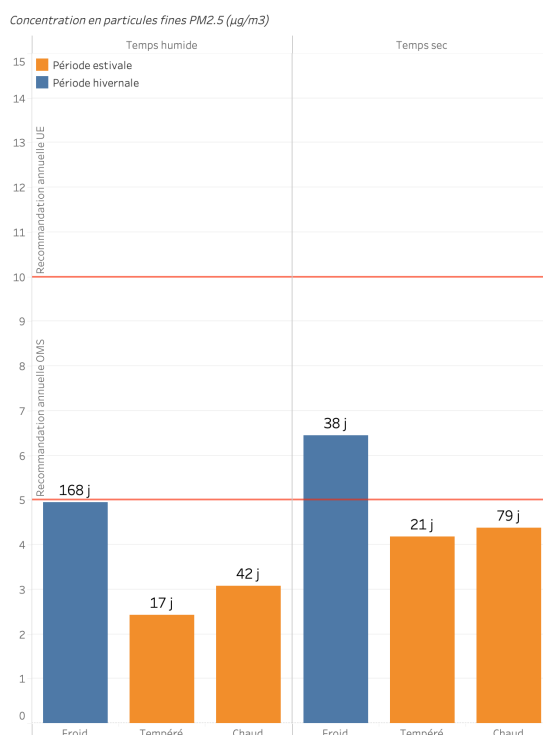
On constate que les sources de $PM_{2.5}$ semblent proches (hypothèses du chauffage et de l'activité portuaire) et ça sur toute l'année, même si on constate quelques variations de direction du vent et de pollution entre été et hiver. Les graphiques semblent indiquer que la pollution aux $PM_{2.5}$ pourrait provenir de sources proches.

3.3. Comparaison zones résidentielles vs routes

Afin d'étudier l'environnement dans lequel se trouvent les différents capteurs choisis pour notre étude, une zone de 500 mètres a été prise autour de ceux-ci. Il est ensuite étudié à l'intérieur de la zone la démographie, l'étendu du réseau routier et l'utilisation des sols.

Mulhouse

Figure 23 : Comparaison des concentrations en $PM_{2.5}$ entre stations de fond et de trafic à Mulhouse



On voit que la station de trafic a un fort impact ($+ 4 \mu g/m^3$) puisque sans cette station, la concentration hivernale est supérieure de seulement $0.9 \mu g/m^3$ par rapport à la période estivale, contre $1.4 \mu g/m^3$ quand on fait la moyenne avec tous les capteurs (Tableau 4).

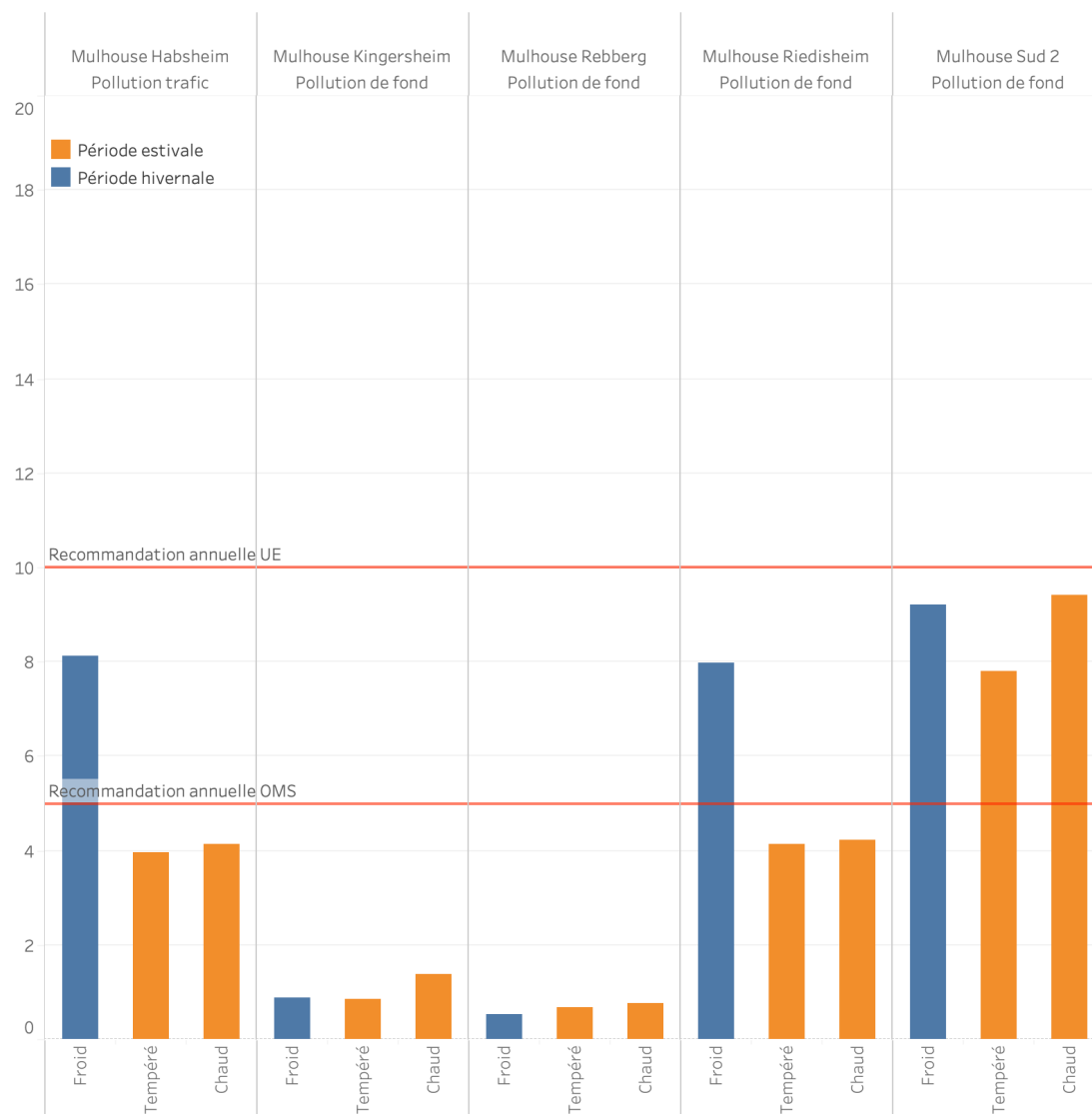
Le trafic semble avoir un fort impact l'hiver à Mulhouse.

A ce stade plusieurs hypothèses sont possibles :

- Si on considère que l'augmentation de la pollution est liée majoritairement au trafic, cette différence été/hiver peut s'expliquer par une hausse des particules émises l'hiver par les véhicules car les pneus hiver sont plus souples et se dégradent plus rapidement [1]. De plus, des activités de salage pourraient également être contributrices d'une augmentation des particules.
- L'augmentation hivernale n'est pas ou peu due au trafic ainsi d'autres sources de pollution pourraient impacter la concentration en $PM_{2.5}$, notamment en période hivernale (épandage d'engrais, activités industrielles, chauffage au bois...).

Figure 24 : Concentration $PM_{2.5}$ en fonction des stations de mesure et des périodes météorologiques à Mulhouse

Concentration en particules fines $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)



Deux stations de fond présentent des concentrations faibles aussi bien l'hiver que l'été (station au Nord et Sud/Sud-Est), une station de fond présente des valeurs élevées aussi bien l'hiver que l'été (station au Sud-Ouest) et une station de fond seulement présente une concentration de $PM_{2.5}$ bien plus élevée l'hiver (station à l'Est de Mulhouse).

Les deux stations de fond, qui présentent des concentrations très basses, appartiennent au réseau de Sensor Community. Ces capteurs qui présentent des mesures fiables peuvent cependant être placés dans des zones particulières qui pourraient potentiellement ne pas être totalement représentatives de la pollution de la zone (placement dans un recoin par exemple). Dans ce cas, et en comparaison des cinq autres zones étudiées, les concentrations mesurées à Mulhouse sont relativement basses du fait de ces deux capteurs.

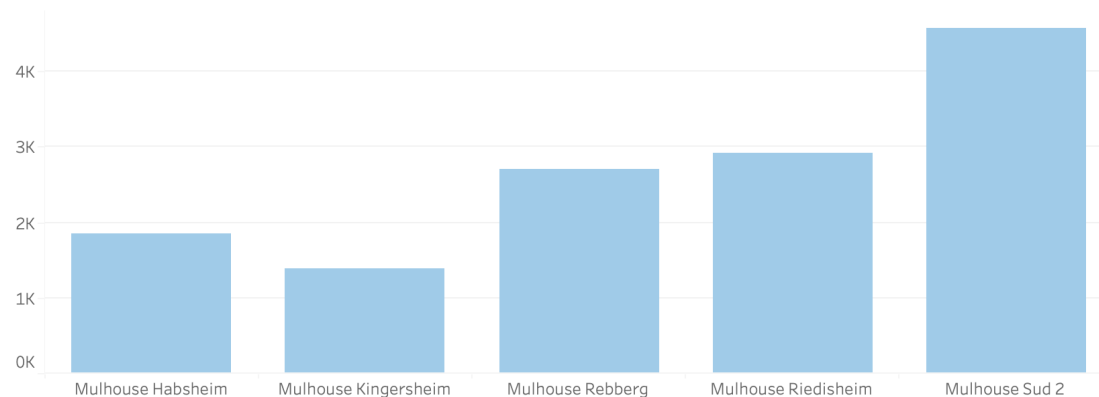
Dans le cas où l'on ferait l'hypothèse que le placement de ces capteurs n'est pas

représentatif, on obtient une moyenne hivernale de $8.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et une moyenne estivale autour de $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, soit des moyennes qui sont proches des concentrations moyennes mesurées en France. En termes d'impact, cela ne change pas l'interprétation, la concentration hivernale est toujours plus élevée mais en termes de concentration absolue, ces moyennes sont plus en adéquation avec ce qui est mesuré sur le reste de la France.

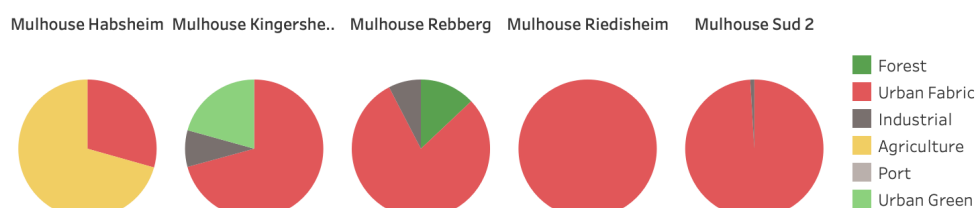
NB : Les concentrations les plus élevées sont mesurées par une station de fond (« Mulhouse Sud 2 ») cependant ces valeurs de fond sont aussi bien élevées l'été que l'hiver donc d'autres facteurs, au moins l'été, impactent la concentration en $\text{PM}_{2.5}$. Cette station de fond est proche d'une route primaire et dans une zone densément peuplée où l'on peut retrouver des maisons de faubourg, c'est la seule dans ce cas.

Figure 25 : Densité de population, usage du sol et réseau routier dans un rayon de 500 m autour des stations à Mulhouse

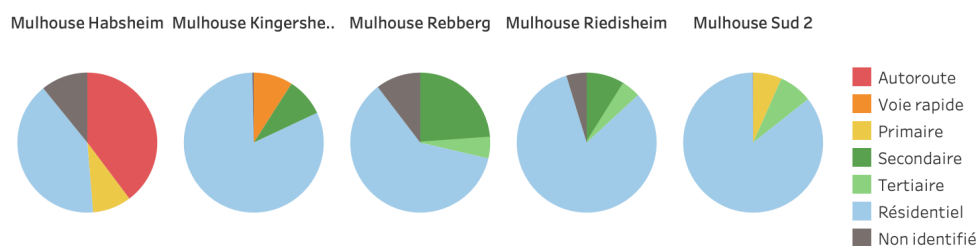
Densité de population (habitants/km²)



Usage des sols



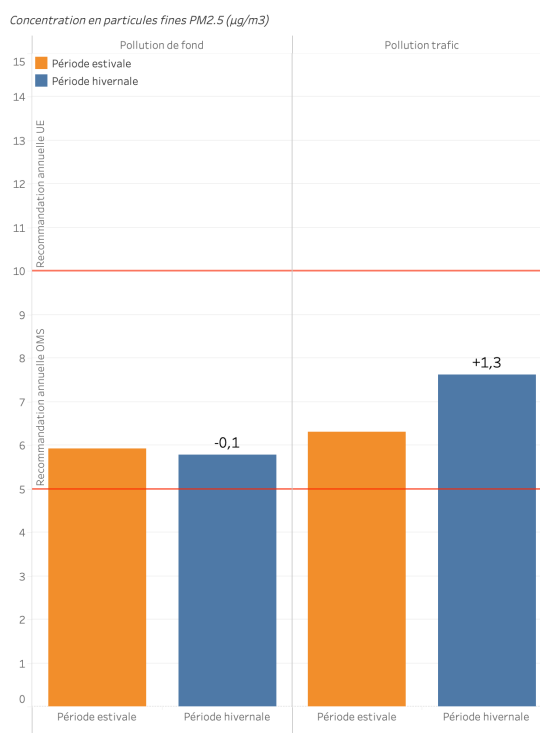
Routes



La station associée au trafic est dans une zone majoritairement occupée par de l'agriculture et proche d'une zone urbaine, composée principalement de maisons. Cette station se situe à l'ouest de l'autoroute A35 et se trouve également proche d'une route primaire. Ainsi, il est important d'avoir en tête que l'augmentation *a priori* due au trafic peut également être due à des travaux agricoles (épandage...) ou au chauffage dans les maisons des environs. Néanmoins quand on compare avec la rose des vents, l'autoroute étant à l'Est de la station, cela peut correspondre à la pollution amenée par les vents de l'Est en hiver.

Les quatre capteurs de fonds sont placés dans des zones résidentielles avec parfois des espaces verts ou une partie de forêt. Seul un capteur des stations de fond se retrouve proche d'une route primaire. Ce capteur présente d'ailleurs des concentrations plus élevées de PM_{2.5} aussi bien en période estivale qu'hivernale par rapport aux autres capteurs de fond.

Brest

Figure 26 : Comparaison des concentrations en $PM_{2.5}$ entre stations de fond et de trafic à Brest

On voit que la station de trafic a un impact (+ 1.3 $\mu g/m^3$) puisque sans cette station, la concentration hivernale est inférieure -0.1 $\mu g/m^3$ par rapport à la période estivale contre +0.4 $\mu g/m^3$ quand on fait la moyenne avec tous les capteurs (Tableau 6).

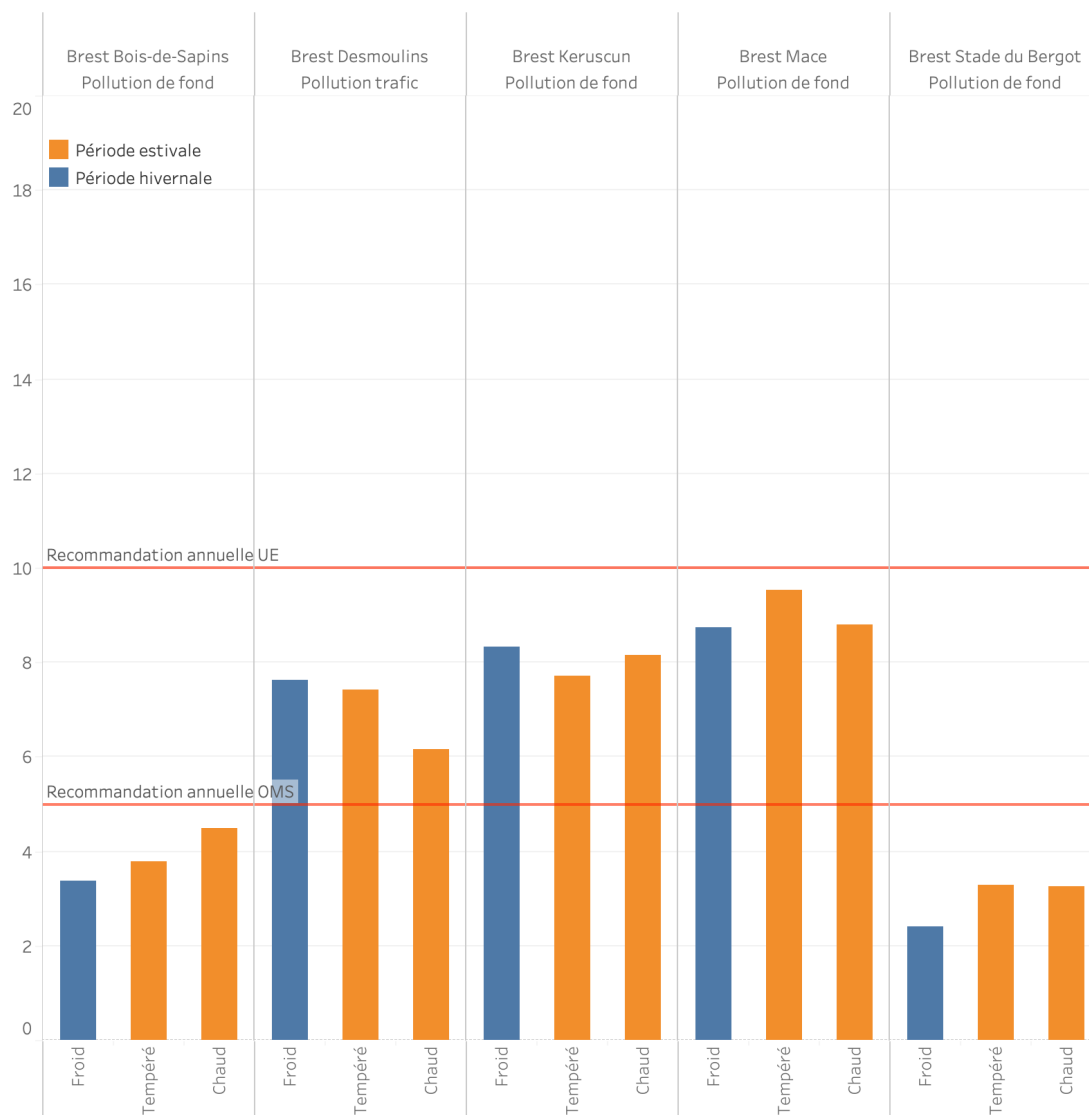
Le trafic semble avoir un certain impact l'hiver, comme cela a pu être le cas dans l'analyse de la zone de Mulhouse.

A ce stade plusieurs hypothèses sont possibles :

- Si on considère que l'augmentation de la pollution est liée majoritairement au trafic, cette différence été/hiver peut s'expliquer par une hausse des particules émises l'hiver par les véhicules car les pneus hiver sont plus souples et se dégradent plus rapidement [1].
- L'augmentation hivernale n'est pas ou peu due au trafic et une/des autre(s) source(s) de pollution aux $PM_{2.5}$ pourraient impacter la concentration en $PM_{2.5}$ notamment en période hivernale (épandages d'engrais, activités industrielles et portuaires, chauffage au bois...).

Figure 27 : Concentration $PM_{2.5}$ en fonction des stations de mesure et des périodes météorologiques à Brest

Concentration en particules fines $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)

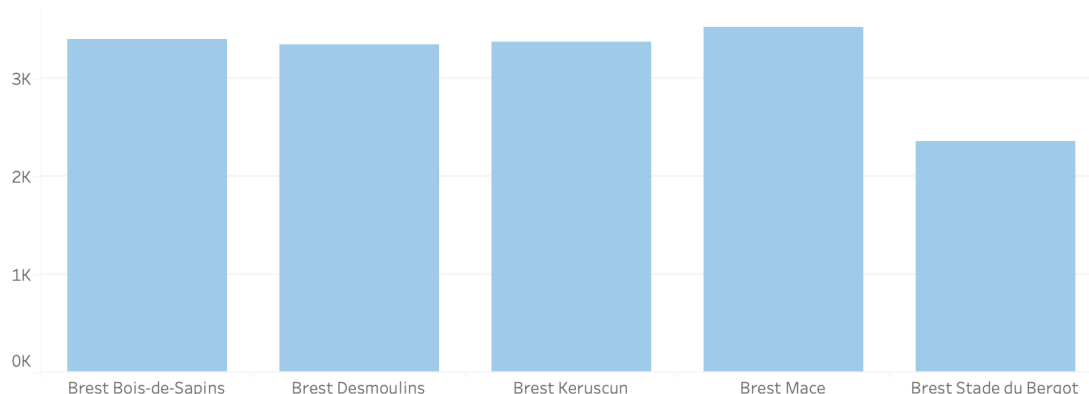


Deux stations de fond présentent des concentrations faibles aussi bien l'hiver que l'été (station Brest Bois-de-Sapins et Brest stade du Bergot, les deux stations les plus éloignées de l'océan/port), deux stations de fond plus proches du port présentent des concentrations soient légèrement supérieures en période chaude soit légèrement inférieures. Dans les deux cas, la concentration annuelle en $PM_{2.5}$ est élevée. La station trafic présente une concentration en $PM_{2.5}$ plus élevée l'hiver.

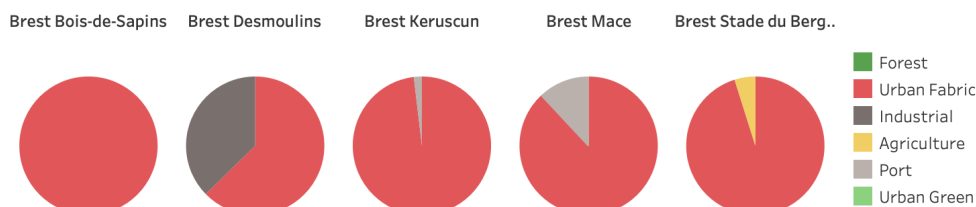
NB : Les concentrations les plus élevées sont mesurées par deux stations de fond. Cependant, ces valeurs de fond sont aussi bien élevées l'été que l'hiver donc d'autres facteurs, au moins l'été, impactent la concentration en $PM_{2.5}$ mesurée. Ces stations de fond sont proches du port.

Figure 28 : Densité de population, usage du sol et réseau routier dans un rayon de 500 m autour des stations à Brest

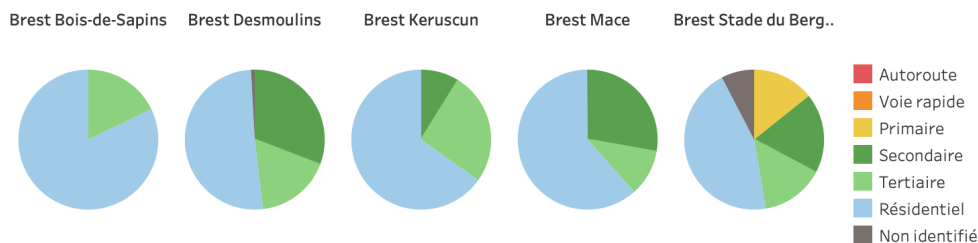
Densité de population (habitants/km²)



Usage des sols



Routes

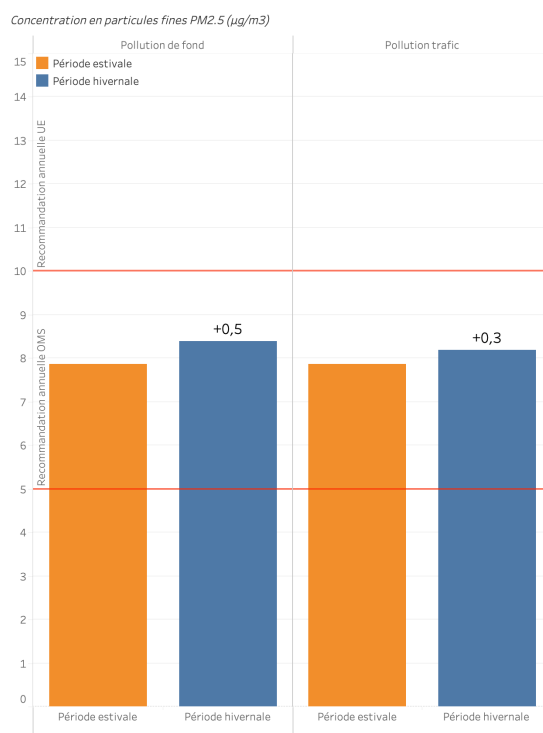


La station associée au trafic est dans une zone majoritairement occupée par de l'industrie. Cette station se situe proche d'une route secondaire mais n'a pas de route primaire ou d'autoroute dans les environs. Ainsi, il est important d'avoir en tête que l'augmentation due au trafic peut également être due à des activités industrielles.

Les quatre capteurs de fonds sont placés dans des zones de tissus urbains avec pour deux d'entre eux le port à proximité. Seul un capteur de fond se trouve proche d'une route primaire. Ce capteur présente néanmoins des concentrations faibles en PM_{2.5}.

Nancy

Figure 29 : Comparaison des concentrations en $PM_{2.5}$ entre stations de fond et de trafic à Nancy



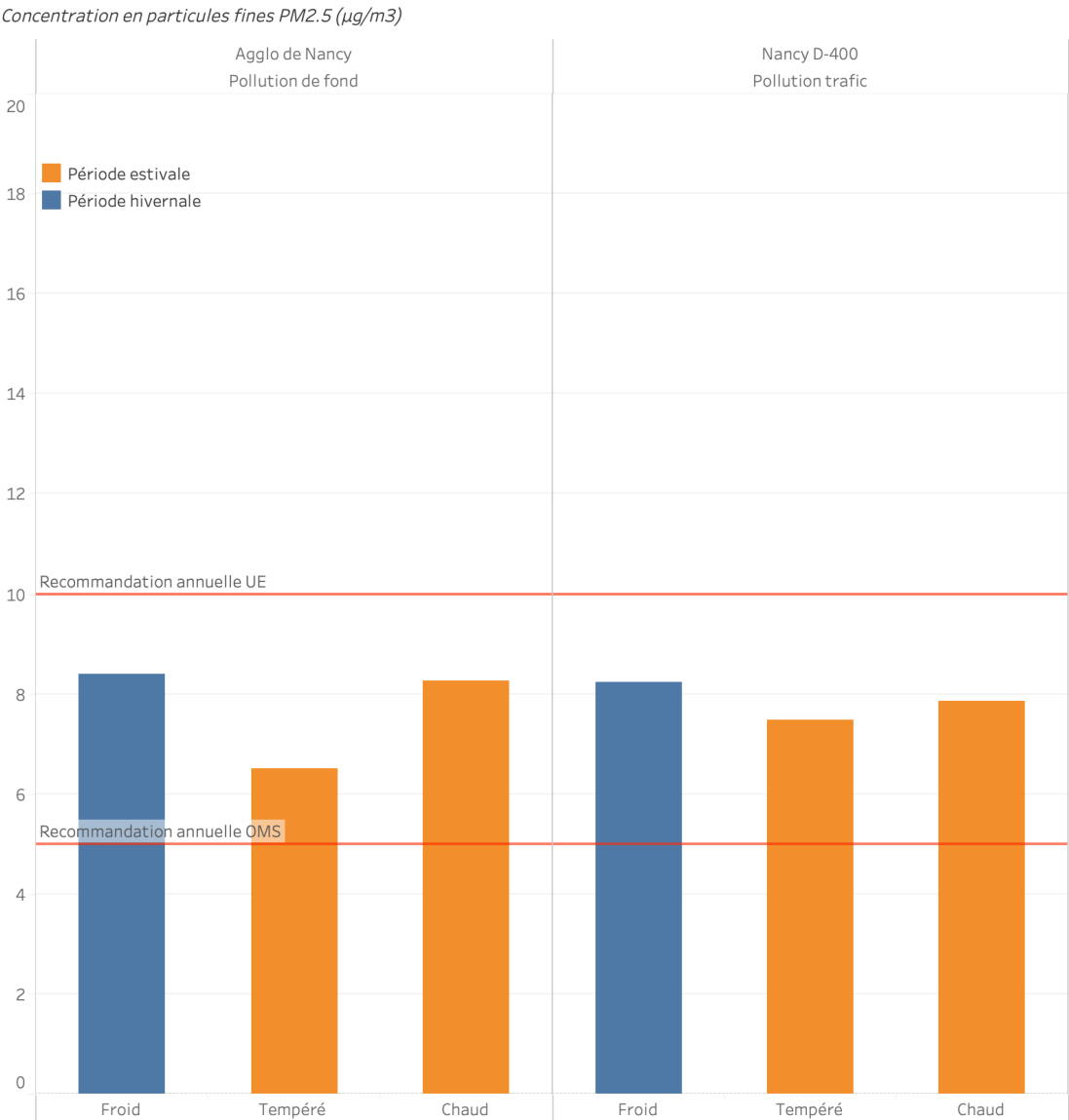
On voit que la station de trafic n'a pas d'impact puisque celle-ci enregistre des concentrations très proches de la station urbaine. A noter que la station cataloguée comme de fond possède plus de routes autour que la station officiellement rattachée au trafic.

Le trafic pourrait avoir un très léger impact l'hiver puisque des concentrations supérieures ont été enregistrées.

A ce stade plusieurs hypothèses sont possibles :

- Si on considère que l'augmentation de la pollution est liée majoritairement au trafic, cette différence été/hiver peut s'expliquer par une hausse des particules émises l'hiver par les véhicules car les pneus hiver sont plus souples et se dégradent plus rapidement [1].
- L'augmentation hivernale n'est pas ou peu due au trafic ce qui dans ce cas pourrait être le plus probable car les concentrations sont inférieures à celles de la station de fond.

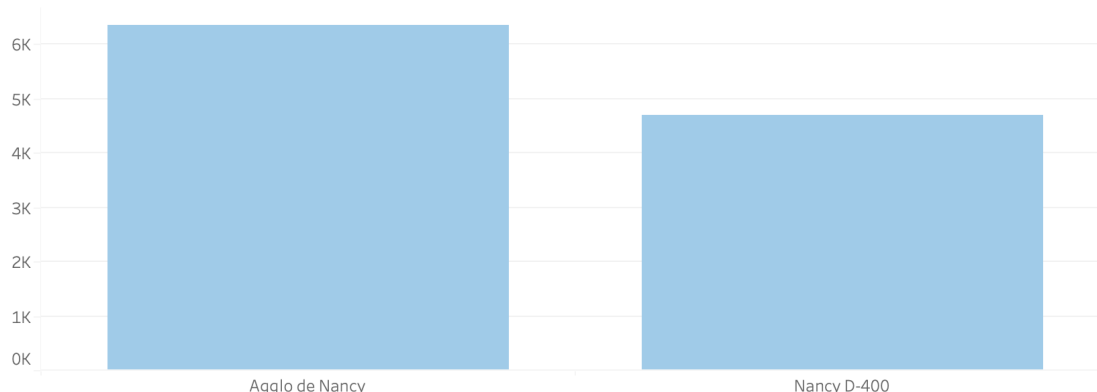
Figure 30 : Concentration PM_{2.5} en fonction des stations de mesure et des périodes météorologiques à Nancy



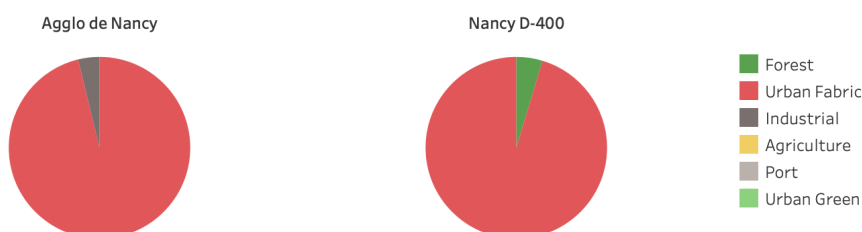
La station trafic présente une concentration au PM_{2.5} légèrement plus élevée l’hiver à l’instar de la station de fond.

Figure 31 : Densité de population, usage du sol et réseau routier dans un rayon de 500 m autour des stations à

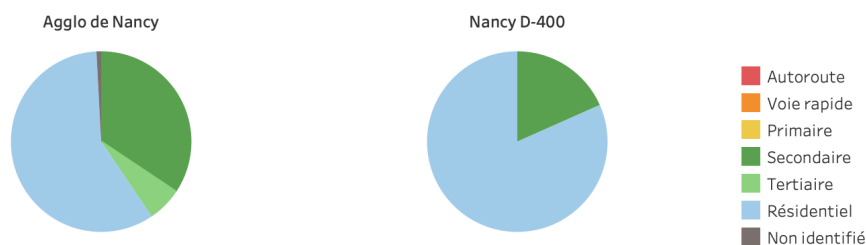
Densité de population (habitants/km²)



Usage des sols



Routes



Nancy

La station associée au trafic est dans une zone majoritairement occupée par du tissu urbain et est proche d'une route secondaire. La densité de population y est plus faible que dans la zone du capteur de fond. La station de fond est également placée dans une zone de tissu urbain et est entourée de routes primaires et tertiaires avec une petite zone industrielle.

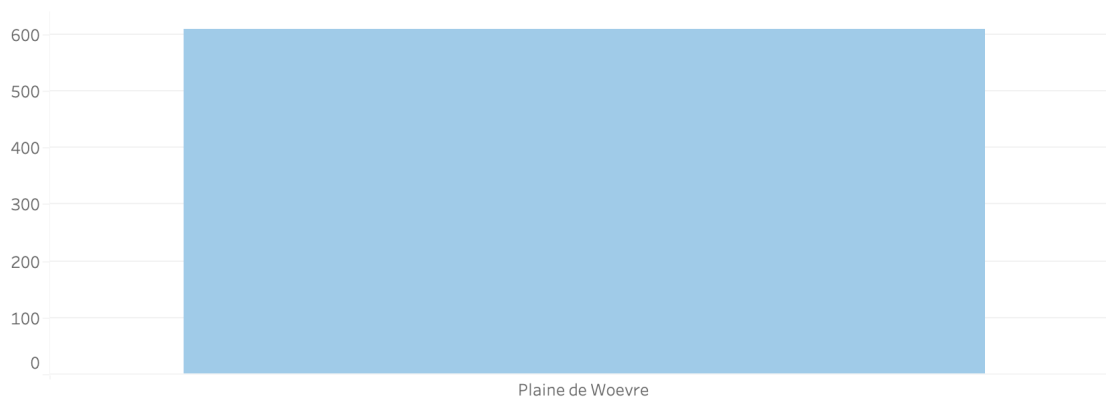
Le capteur de fond se trouve dans un contexte qui pourrait expliquer pourquoi ses valeurs sont supérieures à celles de la station trafic (beaucoup de routes, industrie, forte densité de population).

Jonville-en-Woëvre

Comme Jonville-en-Woëvre ne possède qu'une seule station de fond, les mesures de cette station sont égales aux mesures moyennées pour la zone entière. On peut donc se référer directement à la Figure 8. La station présente des concentrations en PM_{2.5} équivalentes en été et en hiver.

Figure 32 : Densité de population, usage du sol et réseau routier dans un rayon de 500 m autour des stations à Jonville-en-Woëvre

Densité de population (habitants/km²)



Usage des sols

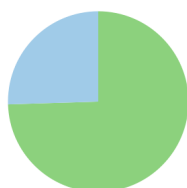
Plaine de Woëvre



- Forest
- Urban Fabric
- Industrial
- Agriculture
- Port
- Urban Green

Routes

Plaine de Woëvre

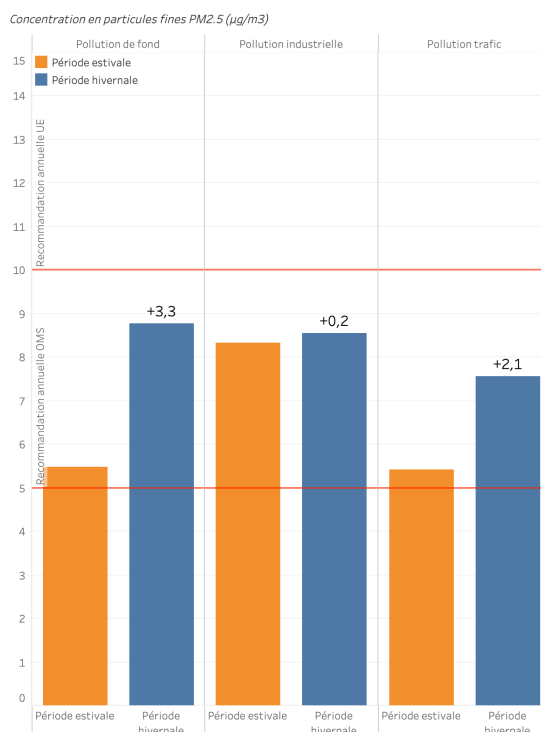


- Autoroute
- Voie rapide
- Primaire
- Secondaire
- Tertiaire
- Résidentiel
- Non identifié

La station se situe dans une zone majoritairement occupée par du tissu urbain et de l'agriculture. La densité de population y est très faible, à titre de comparaison celle-ci est 10 fois moins élevée qu'à Nancy dans la zone urbaine. Il n'y a pas d'axes majeurs proches.

Vallée de l'Arve

Figure 33 : Comparaison des concentrations en $PM_{2.5}$ entre stations de fond, de trafic et industrielle dans la vallée de l'Arve



Ce sont les stations de fond qui mesurent les concentrations les plus élevées l'hiver et la différence hiver/été la plus importante également.

Le trafic pourrait avoir un impact l'hiver puisque des concentrations supérieures ont été enregistrées.

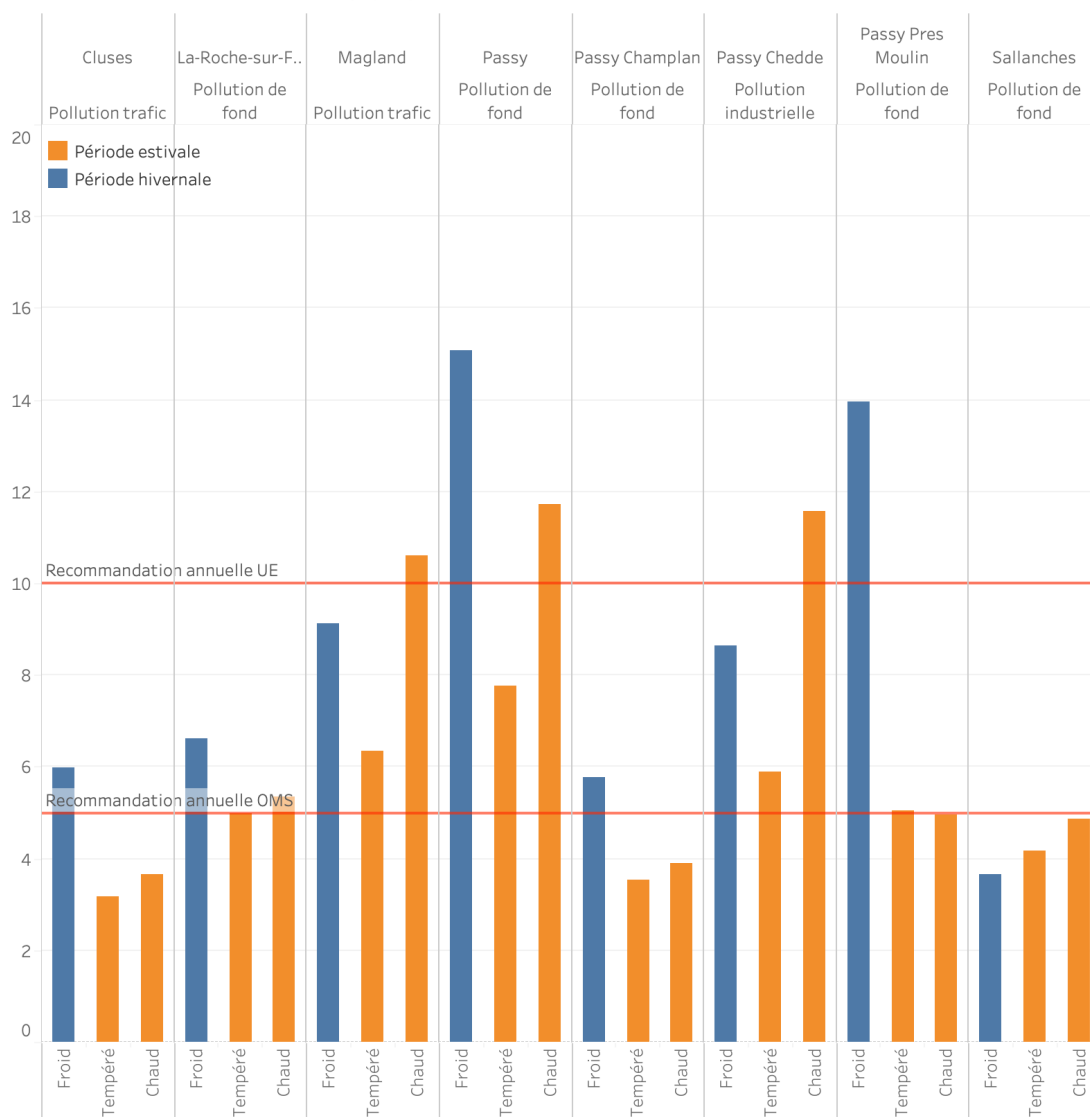
La différence entre été et hiver pour la station industrielle n'est que peu significative.

A ce stade plusieurs hypothèses sont possibles :

- On considère que l'augmentation l'hiver vient du chauffage au bois, le trafic n'ayant pas d'impact et l'industrie ayant un impact égal en été comme en hiver.
- On considère que l'augmentation l'hiver est un mélange entre la pollution due au trafic et au chauffage au bois et que l'industrie impacte de manière identique l'été comme l'hiver.

Figure 34 : Concentration $PM_{2.5}$ en fonction des stations de mesure et des périodes météorologiques dans la vallée de l'Arve

Concentration en particules fines $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)

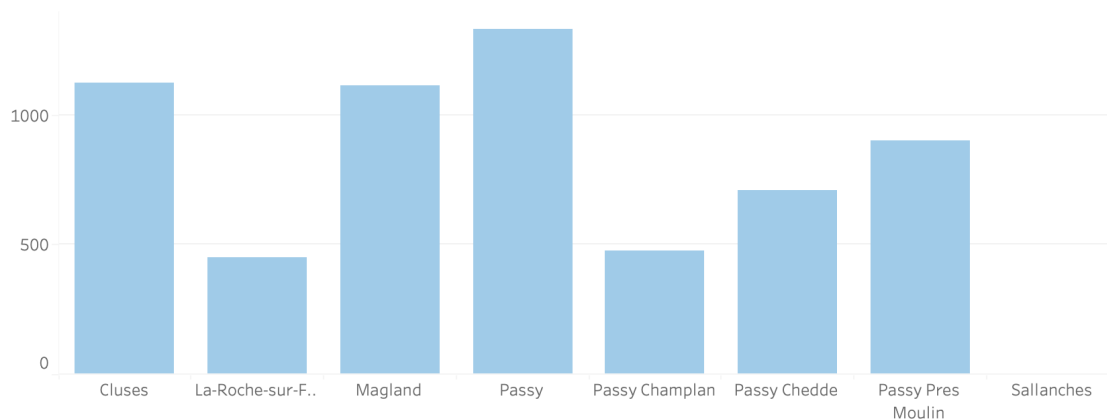


Deux des stations pollution de fond mesurent les concentrations les plus élevées, ces stations font parties de celles situées majoritairement en tissu urbain.

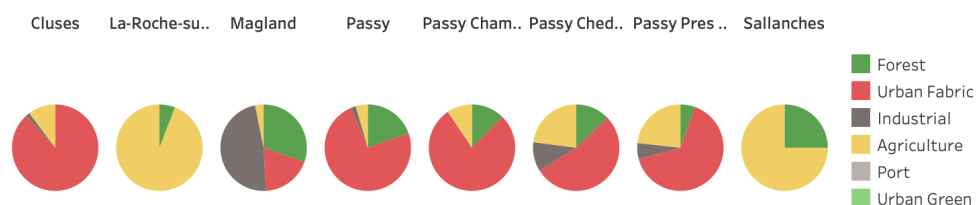
La station de fond de Sallanches présente une concentration moindre l'hiver par rapport à l'été, c'est également une station qui n'est pas située en zone résidentielle. La station industrielle, à l'instar de la station trafic, présente également des concentrations supérieures en temps chaud par rapport au temps froid.

Figure 35 : Densité de population, usage du sol et réseau routier dans un rayon de 500 m autour des stations dans la vallée de l'Arve

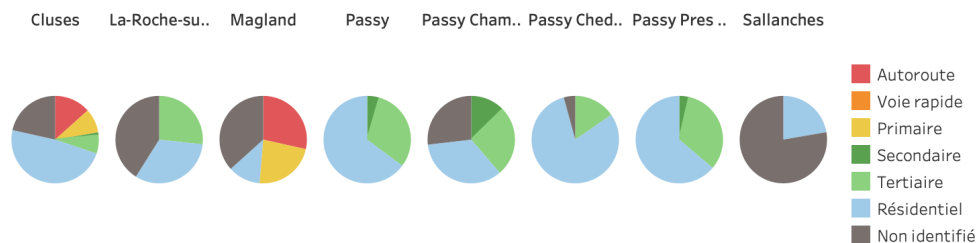
Densité de population (habitants/km²)



Usage des sols



Routes



La station associée au trafic est dans une zone groupant de l'industrie, tissu urbain et forêts. Elle est à côté d'une autoroute ainsi que d'une voie primaire.

Les stations de fond sont placées dans des zones de tissu urbain et sont entourées majoritairement de routes tertiaires et résidentielles. Sallanches est l'exception puisqu'elle n'est entourée que de zones agricoles et forêts.

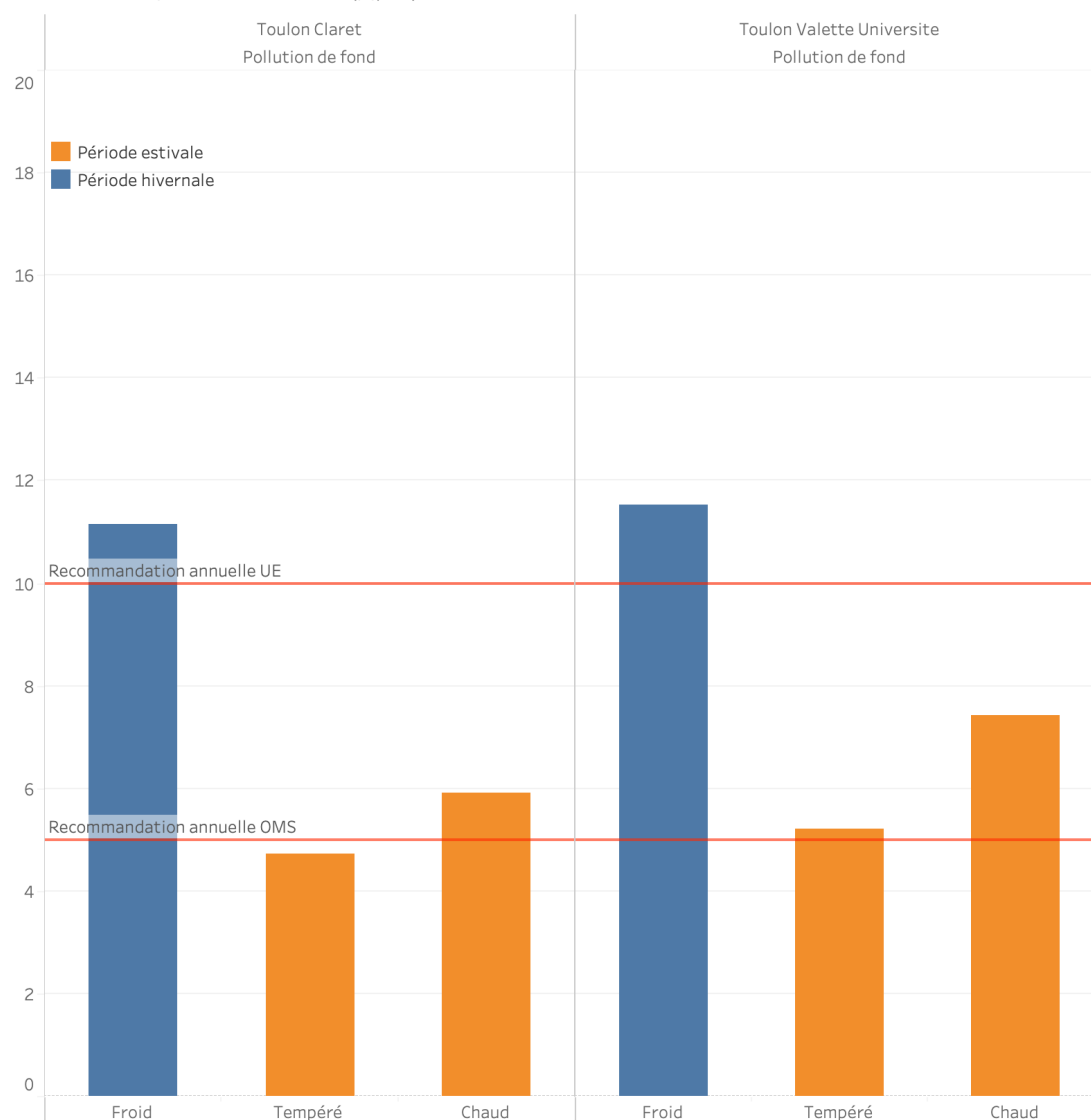
La station industrielle est entourée de tissu urbain, d'industries, de zones agricoles et de forêt.

Toulon

Comme Toulon ne possède que deux stations de fond, on ne peut pas comparer différentes influences. Les moyennes des mesures de ces stations sont égales à celles de la zone entière. On peut donc se référer directement à la Figure 10.

Figure 36 : Concentration $PM_{2.5}$ en fonction des stations de mesure et des périodes météorologiques à Toulon

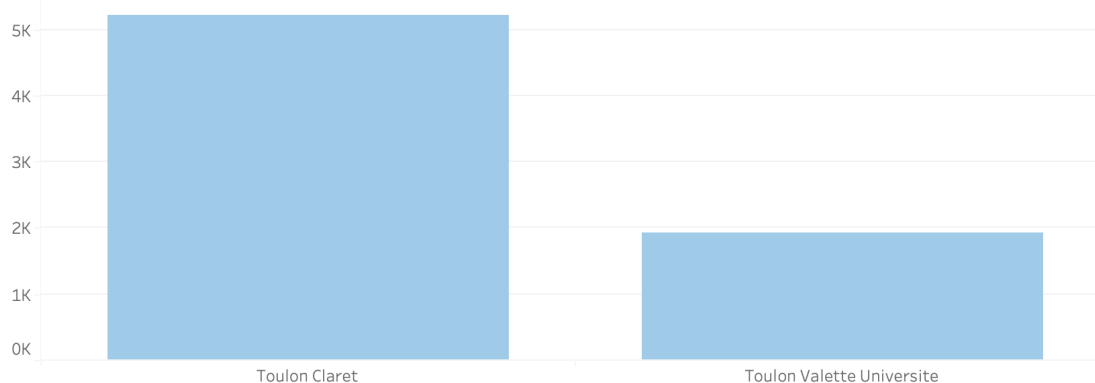
Concentration en particules fines $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)



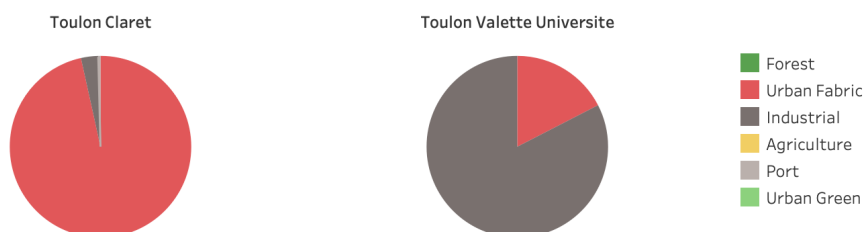
Les deux stations de fond présentent des tendances et concentrations assez similaires. A noter que la station Valette est proche d'une grande zone commerciale, on peut faire l'hypothèse que l'été avec le tourisme, la zone subit un passage important, menant à des valeurs légèrement plus élevées l'été par rapport à la station Toulon Claret.

Figure 37 : Densité de population, usage du sol et réseau routier dans un rayon de 500 m autour des stations à Toulon

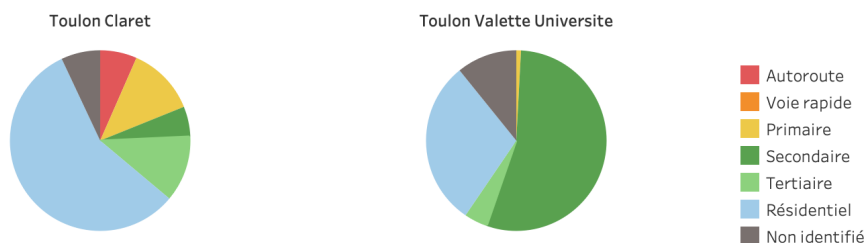
Densité de population (habitants/km²)



Usage des sols



Routes



Une des stations est située en zone résidentielle avec une densité de population importante, des axes majeurs et une autoroute sont présents dans un rayon assez proche du capteur. Le second capteur est plus proche d'une zone industrielle caractérisée par la présence d'une grande zone commerciale et d'une université avec un axe secondaire proche. Le tissu urbain y étant moins développé la densité de population s'en trouve réduite.

Malgré ces différences de contexte les capteurs affichent des concentrations hivernales similaires en termes de concentration de PM_{2.5}.

3.4. Comparaison période confinement 2020 vs 2023

En 2020, la période du confinement s'est étendue du 17 mars au 11 mai ainsi que du 30 octobre au 15 décembre. Hors période de confinement les activités et notamment le trafic sont restés faibles du fait de la recrudescence du télétravail.

Pour 2020, aucune données mesurées par des capteurs n'ont pu être récupérées ; afin de comparer l'année 2020 et l'année 2023, les données résultant du modèle CAMS 2020 et 2023 ont été utilisées. Ces données ont ensuite été corrigées à partir des mesures capteurs réalisées en 2023 afin d'obtenir des valeurs de concentrations absolues comparables aux données de la 1^{ère} partie de l'étude (Annexe 6.1).

Pour l'ensemble des zones, on émet l'hypothèse que les principales différences entre 2020 et 2023 sont les différences d'activités anthropiques qui peuvent avoir un impact sur la pollution aux PM_{2.5} :

- En 2020, le chauffage (sous toutes ses formes) a particulièrement été présent du fait de l'adoption très générale du télétravail et du chômage partiel. Les activités agricoles ont également été maintenues. En revanche, les activités industrielles, portuaires et le trafic ont été fortement réduites voire absentes pendant quelques mois.
- En 2023, toutes les activités (chauffages, industries, ports, aéroports...) sont présentes. L'année 2023 sert donc de témoin.

Le but de cette comparaison est de déduire la contribution du chauffage au bois sur la pollution aux PM_{2.5} de manière plus fine, en déduisant la contribution des autres sources potentielles.

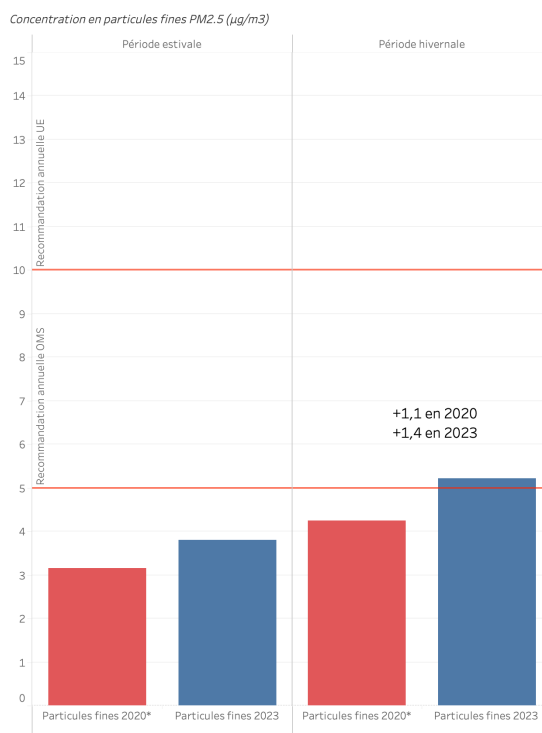
Résumé des six zones

Tableau 16 : Résumé comparatif année 2020 versus année 2023

Zone	Écart absolu (µg/m ³) entre hiver et été 2020	Écart absolu (µg/m ³) entre hiver et été 2023	% potentiel du chauffage au bois max sur l'année 2020	% potentiel du chauffage au bois max sur l'année 2023
Mulhouse	+1.1 µg/m ³	+1.4 µg/m ³	19.0 %	17.6 %
Brest	+0.7 µg/m ³	+0.4 µg/m ³	9.5 %	4.6 %
Nancy	+0.5 µg/m ³	+0.5 µg/m ³	5.4 %	3.9 %
Jonville-en-Woëvre	+2.4 µg/m ³	+0.7 µg/m ³	20.6 %	5.7 %
Vallée de l'Arve	+4.2 µg/m ³	+2.4 µg/m ³	43.6 %	22.1 %
Toulon	+2.6 µg/m ³	+4.7 µg/m ³	15.9 %	22.3 %

Mulhouse

Figure 38 : Comparaison année 2020 et 2023 en fonction de la période à Mulhouse (*les concentrations présentées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été corrigées par rapport aux valeurs capteurs 2023)



La comparaison des années 2020 et 2023 permet de mettre en lumière plusieurs éléments sur l'évolution de la concentration en $\text{PM}_{2.5}$:

- En 2020, le chauffage au bois présente une différence été-hiver de $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lorsque les autres activités qui polluent toute l'année sont arrêtées.
- En 2023, le chauffage au bois présente une différence été-hiver de $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lorsque toutes les activités sont présentes (chauffage, industries, trafic...).
- La concentration en $\text{PM}_{2.5}$ en 2023 est plus élevée de manière globale et la différence absolue entre période hivernale et estivale est également plus élevée en 2023.

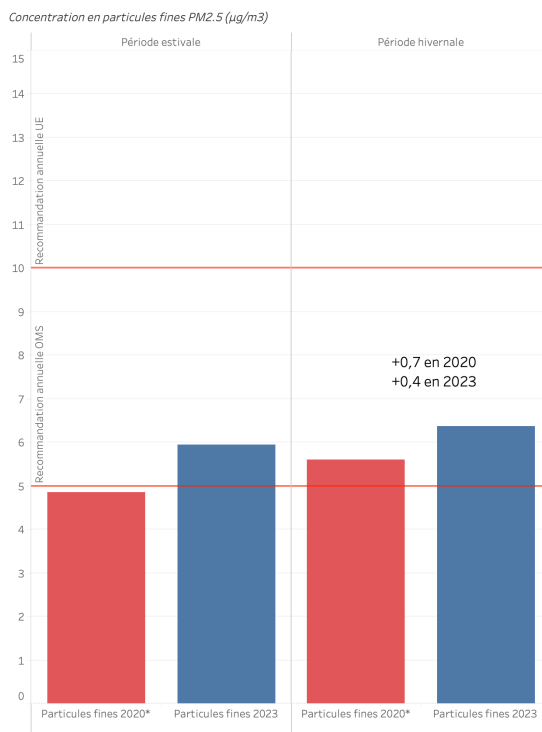
A Mulhouse, on peut conclure que les activités qui ont été arrêtées ou ralenties en 2020 ont un impact sur la concentration annuelle en $\text{PM}_{2.5}$. Cela renforce l'hypothèse que le trafic et ou les activités industrielles impactent de manière non négligeable la pollution sur la région de Mulhouse notamment en hiver.

Tableau 17 : Pourcentage maximal de contribution du chauffage au bois sur la concentration en $\text{PM}_{2.5}$ en 2020 à Mulhouse

	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nombre de jours
Froid	4.24	228
Tempéré	3.28	99
Chaud	2.84	39
Part maximale annuelle du chauffage au bois (%)	$(1.1 \cdot 228 + 0.05 \cdot 3.28 \cdot 99) / (4.24 \cdot 228 + 3.16 \cdot 138) = 19.0 \%$	

Brest

Figure 39 : Comparaison année 2020 et 2023 en fonction de la période à Brest (*les concentrations présentées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été corrigées par rapport aux valeurs capteurs 2023)



La comparaison des années 2020 et 2023 permet de mettre en lumière plusieurs éléments sur l'évolution de la concentration en $\text{PM}_{2.5}$:

- En 2020, le chauffage au bois présente une différence été-hiver de $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lorsque les autres activités qui polluent toute l'année sont arrêtées.
- En 2023, le chauffage au bois présente une différence été-hiver de $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lorsque toutes les activités sont présentes (chauffage, industries, trafic...).
- La concentration en $\text{PM}_{2.5}$ en 2023 est plus élevée de manière globale mais la différence période hivernale et estivale est plus faible.

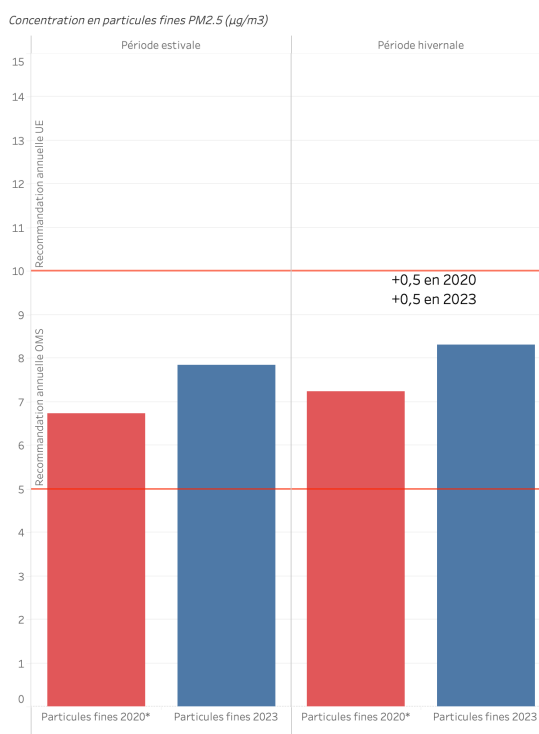
A Brest, on peut conclure que les activités qui ont été arrêtées ou ralenties en 2020 ont un impact sur la concentration annuelle en $\text{PM}_{2.5}$. La différence de pollution entre les périodes estivales et hivernales reste faible et le trafic et les activités industrielles et portuaires ont tendance à diluer la pollution potentiellement due au chauffage au bois.

Tableau 18 : Pourcentage maximal de contribution du chauffage au bois sur la concentration en $\text{PM}_{2.5}$ en 2020 à Brest

	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nombre de jours
Froid	5.61	230
Tempéré	4.70	105
Chaud	5.35	31
Part maximale annuelle du chauffage au bois (%)	$(0.7 \times 230 + 0.05 \times 4.7 \times 105) / (5.61 \times 230 + 4.85 \times 136) = 9.5 \%$	

Nancy

Figure 40 : Comparaison année 2020 et 2023 en fonction de la période à Nancy (*les concentrations présentées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été corrigées par rapport aux valeurs capteurs 2023)



La comparaison des années 2020 et 2023 permet de mettre en lumière plusieurs éléments sur l'évolution de la concentration en $\text{PM}_{2.5}$:

- En 2020, le chauffage au bois présente une différence été-hiver de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lorsque les autres activités qui polluent toute l'année sont arrêtées.
- En 2023, le chauffage au bois présente une différence été-hiver de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lorsque toutes les activités sont présentes (chauffage, industries, trafic...).
- La concentration en $\text{PM}_{2.5}$ en 2023 est plus élevée de manière globale et la différence absolue période hivernale et estivale est équivalente.

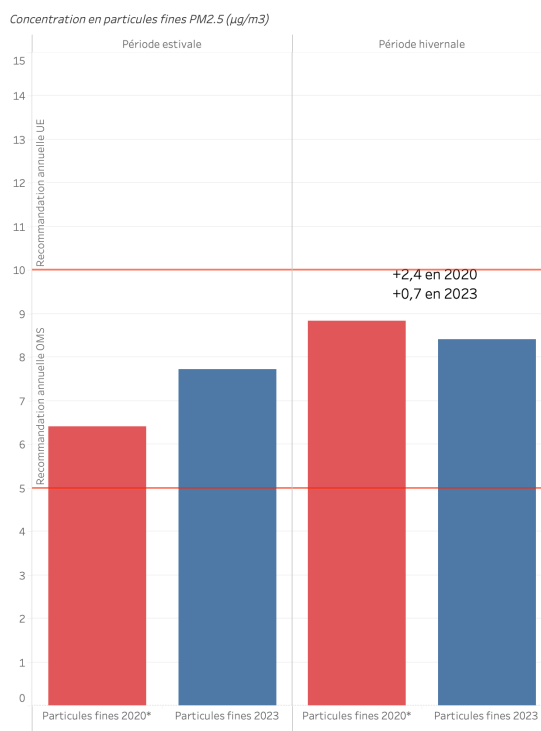
A Nancy, on peut conclure que les activités qui ont été arrêtées ou ralenties en 2020 ont un impact sur la concentration annuelle en $\text{PM}_{2.5}$. La différence de pollution entre les périodes estivales et hivernales reste faible et stable entre les deux années étudiées.

Tableau 19 : Pourcentage maximal de contribution du chauffage au bois sur la concentration en $\text{PM}_{2.5}$ en 2020 à Nancy

	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nombre de jours
Froid	7.23	225
Tempéré	7.61	70
Chaud	5.87	71
Part maximale annuelle du chauffage au bois (%)	$(0.5 \times 225 + 0.05 \times 7.61 \times 70) / (7.23 \times 225 + 7.61 \times 141) = 5.4 \%$	

Jonville-en-Woëvre

Figure 41 : Comparaison année 2020 et 2023 en fonction de la période à Jonville-en-Woëvre (*les concentrations présentées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été corrigées par rapport aux valeurs capteurs 2023)



La comparaison des années 2020 et 2023 permet de mettre en lumière plusieurs éléments sur l'évolution de la concentration en $\text{PM}_{2.5}$:

- En 2020, le chauffage au bois présente une différence été-hiver de $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lorsque les autres activités qui polluent toute l'année sont arrêtées.
- En 2023, le chauffage au bois présente une différence été-hiver de $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lorsque toutes les activités sont présentes (chauffage, industries, trafic...).
- La concentration en $\text{PM}_{2.5}$ en 2023 est plus élevée en été mais équivalente en période hivernale. De fait, il y a un écart entre été et hiver plus faible en 2023 qu'en 2020.

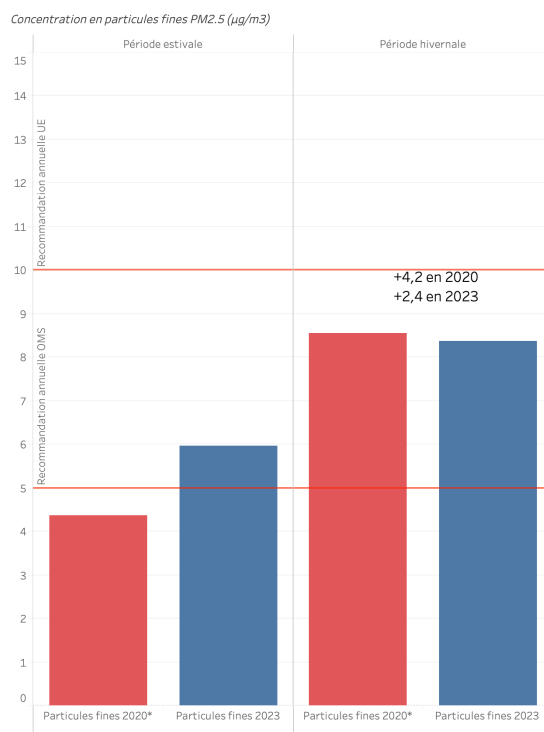
A Jonville-en-Woëvre, on peut conclure que les activités qui ont été arrêtées ou ralenties en 2020 ont un impact sur la concentration en $\text{PM}_{2.5}$, au moins en période estivale. La différence de pollution entre été et hiver en 2020 est largement plus élevée qu'en 2023, ce qui pourrait être expliqué par un usage plus fréquent du chauffage au bois du fait du confinement et du caractère rural de cette zone.

Tableau 20 : Pourcentage maximal de contribution du chauffage au bois sur la concentration en $\text{PM}_{2.5}$ en 2020 à Jonville-en-Woëvre

	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nombre de jours
Froid	8.83	238
Tempéré	6.61	90
Chaud	5.93	38
Part maximale annuelle du chauffage au bois (%)	$(2.4 \times 238 + 0.05 \times 6.61 \times 90) / (8.82 \times 238 + 6.40 \times 128) = 20.6 \%$	

Vallée de l'Arve

Figure 42 : Comparaison année 2020 et 2023 en fonction de la période dans la vallée de l'Arve (*les concentrations présentées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été corrigées par rapport aux valeurs capteurs 2023)



La comparaison des années 2020 et 2023 permet de mettre en lumière plusieurs éléments sur l'évolution de la concentration en PM_{2.5} :

- En 2020, le chauffage au bois présente une différence été-hiver de $4.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lorsque les autres activités qui polluent toute l'année sont arrêtées.
- En 2023, le chauffage au bois présente une différence été-hiver de $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lorsque toutes les activités sont présentes (chauffage, industries, trafic...).
- La concentration en PM_{2.5} en 2023 est plus élevée en été mais équivalente en période hivernale, voire légèrement plus faible. De fait, il y a un écart entre été et hiver plus faible en 2023 qu'en 2020.

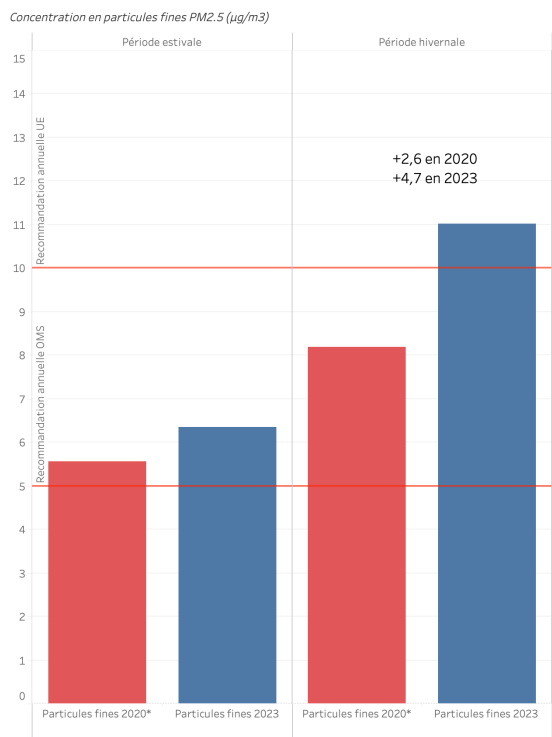
Dans la vallée de l'Arve, on peut conclure que les activités qui ont été arrêtées ou ralenties en 2020 ont un impact sur la concentration en PM_{2.5}, au moins en période estivale. La différence de pollution entre été et hiver en 2020 est largement plus élevée qu'en 2023, ce qui pourrait être expliqué par un usage plus fréquent du chauffage au bois du fait du confinement et du caractère rural de cette zone, mais également d'un usage plus polluant. En effet, ce n'est que depuis 2021 que les cheminées à foyer ouvert, réputées pour être une source majeure de pollution aux PM_{2.5}, ont été interdites dans la vallée de l'Arve. Depuis, grand nombre de foyers de cette zone ont dû basculer sur des nouveaux systèmes de chauffage (au bois ou non).

Tableau 21 : Pourcentage maximal de contribution du chauffage au bois sur la concentration en PM_{2,5} en 2020 dans la vallée de l’Arve

	Concentration (µg/m³)	Nombre de jours
Froid	8.43	281
Tempéré	4.38	83
Chaud	5.83	2
Part maximale annuelle du chauffage au bois (%)	$(4.2*281+0.05*4.38*83) / (8.43*281+4.41*85) = 43.6 \%$	

Toulon

Figure 43 : Comparaison année 2020 et 2023 en fonction de la période à Toulon (*les concentrations présentées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été corrigées par rapport aux valeurs capteurs 2023)



La comparaison des années 2020 et 2023 permet de mettre en lumière plusieurs éléments sur l'évolution de la concentration en $\text{PM}_{2.5}$:

- En 2020, le chauffage au bois présente une différence été-hiver de $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lorsque les autres activités qui polluent toute l'année sont arrêtées.
- En 2023, le chauffage au bois présente une différence été-hiver de $4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lorsque toutes les activités sont présentes (chauffage, industries, trafic...).
- La concentration en $\text{PM}_{2.5}$ en 2023 est plus élevée de manière globale. Et l'écart entre été et hiver est largement plus élevé en 2023 qu'en 2020.

A Toulon, on peut conclure que les activités qui ont été arrêtées ou ralenties en 2020 ont un fort impact sur la concentration en $\text{PM}_{2.5}$ en été mais surtout en hiver. La différence de pollution entre été et hiver en 2023 est largement plus élevée qu'en 2020, ce qui pourrait être expliqué par le retour des activités portuaires et touristiques.

Tableau 22 : Pourcentage maximal de contribution du chauffage au bois sur la concentration en $\text{PM}_{2.5}$ en 2020 à Toulon

	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nombre de jours
Froid	8.09	134
Tempéré	6.61	90
Chaud	4.9	142
Part maximale annuelle du chauffage au bois (%)	$(2.6 \times 134 + 0.05 \times 6.61 \times 90) / (8.09 \times 134 + 5.56 \times 232) = 15.9 \%$	

3.5. Comparaison entre zones

Tableau 23 : Comparaison des résultats entre zones et la France métropolitaine

Zone	Région	Caractéristiques	Potentielle utilisation chauffage au bois	Concentration période estivale vs hivernale PM _{2.5} (µg/m ³) 2023	Part maximale de PM _{2.5} en 2020 et 2023 due au chauffage au bois
Mulhouse	Grand Est	Proche de la frontière allemande	Faible - moyenne	3.8 - 5.2	19.0 - 17.6 %
Brest	Bretagne	Climat humide	Élevée	5.9 - 6.4	9.5 - 4.6 %
Nancy	Grand Est	Zone urbaine pour comparaison avec zone rurale	Faible - moyenne	7.8 - 8.3	5.4 - 3.9 %
Jonville-en-Woëvre	Grand Est	Zone rurale pour comparaison avec zone urbaine	Élevée	7.7 - 8.4	20.6 - 5.7 %
Vallée de l'Arve	AURA	Zone connue pour sa forte pollution due au chauffage au bois	Très élevée	6 - 8.4	43.6 - 22.1 %
Toulon	PACA	Zone polluée avec peu d'utilisation chauffage au bois et condition météo chaude avec peu de précipitations	Faible	6.4 - 11.0	15.9 - 22.3 %
France	/	France métropolitaine	/	7.1 - 9.45	2023 : 15.3 %

La moyenne française de concentration en PM_{2.5} est plus élevée que sur la majorité des zones étudiées notamment en période hivernale (excepté pour Toulon).

Globalement sur toutes les zones, on constate que les concentrations en PM_{2.5} en période estivale sont inférieures à celles en période hivernale. Or, toutes les zones n'utilisent pas le chauffage au bois dans les mêmes proportions. De plus, la zone avec le plus d'écart entre période estivale et hivernale est Toulon, or cette zone est peu utilisatrice de chauffage au bois. Ainsi, il semblerait que d'autres facteurs puissent expliquer l'origine de cette différence de concentration. De plus, on constate que Toulon est la seule ville où la moyenne hivernale dépasse la moyenne française.

Impact des conditions météo

Une des hypothèses qui peut être mise avant est qu'en période hivernale les conditions météorologiques sont plus propices pour la rétention des particules fines ; ceci implique qu'à émission égale entre période chaude et froide, les concentrations en période hivernale sont plus élevées, en présence de chauffage au bois ou non.

L'étude montre qu'il y a bien des pics (généralement février), on les constate les jours où les températures sont basses et les conditions météo propices à la stagnation des polluants dans l'atmosphère, dont les sources majeures en hiver sont le chauffage au bois, le trafic et les activités industrielles et portuaires.

A l'année cela représente une contribution à la concentration en PM_{2.5} se situant entre 3.9 % et 22.3 % en fonction des lieux et de l'utilisation du chauffage. En moyenne, sur les six zones on arrive à une concentration aux alentours de **12.7 %** qui pourrait être due au chauffage au bois sur l'année, soit une valeur proche de la moyenne française de concentration aux PM_{2.5} maximale se situant à 15.3 %.

Impact d'une zone rurale ou montagnarde

Le chauffage au bois étant utilisé qu'en période froide, on suppose que son utilisation impacte la différence de concentration été/hiver. Cela est par exemple visible sur la vallée de l'Arve, où en 2020, la différence de pollution entre été et hiver rapportée à l'année représente 43.6 % (avant interdiction des foyers ouverts). De même à Jonville-en-Woëvre, la part atteint 20.6 % soit plus de trois fois plus qu'en 2023 où toutes les activités sont maintenues. Ces deux zones ont justement été choisies pour leur utilisation connue du chauffage au bois. Et sur ces deux zones le constat est intéressant : lorsque toutes les autres activités sont arrêtées, on remarque une forte pollution hivernale aux PM_{2.5} pour laquelle le chauffage au bois doit contribuer en grande partie. En revanche, dès la reprise de toutes les activités, la pollution hivernale reste équivalente alors que la pollution estivale augmente : la contribution du chauffage au bois est diluée par la contribution des autres sources de pollution. Ainsi, il n'est pas possible de conclure que, de manière générale, la majeure partie des particules fines en hiver incombe au chauffage au bois sur ces zones connue pour leur utilisation prépondérante de ce système de chauffage.

Globalement sur les six zones choisies en 2023, les concentrations maximales qui peuvent être dues au chauffage au bois vont de 3.9 % à 22.3 %. En 2020, elles vont de 5.4 % à 43.6 %. Si on exclut la valeur 43.6 % qui correspond à la vallée de l'Arve avant interdiction des foyers ouverts, les concentrations maximales vont de 5.4 % à 20.6 %, soit des pourcentages similaires avec 2023.

4. Discussion et conclusion

L'étude a permis de mettre en lumière plusieurs résultats :

- A l'échelle de la France la contribution annuelle moyenne du chauffage au bois à l'augmentation de la concentration en $PM_{2.5}$ est d'au maximum 15.3 %. En fonction des zones, cette contribution moyenne maximale peut varier de 3.9 % jusqu'à 22.3 % (sur les zones choisies durant l'étude).
- La région la plus polluée en termes de concentration de $PM_{2.5}$ est l'Ile-de-France, mais sa différence de concentration entre période estivale et période hivernale n'est pas très élevée. Ce qui signifie que la contribution du chauffage au bois en Ile-de-France n'est pas la source majoritaire de pollution aux $PM_{2.5}$.
- Les régions présentant des différences entre la période estivale et la période hivernale les plus importantes sont les régions PACA, Nouvelle Aquitaine et Occitanie. Ces régions ont des conditions climatiques plutôt douces l'hiver, elles ne sont donc pas connues pour un usage très fort du chauffage au bois. Ceci impliquerait que les différences périodes estivales et hivernales pourraient également être due à d'autres facteurs.
- Les deux zones qui ont été choisies pour leur forte utilisation du chauffage au bois (vallée de l'Arve et Jonville-en-Woëvre) sont les seules à présenter des différences de concentration entre période estivale et période hivernale plus importantes en 2020 que 2023. Ceci paraît cohérent avec le fait qu'en 2020, le chauffage au bois est une des seules activités maintenues avec l'agriculture. Il est à noter que pour la vallée de l'Arve, la différence de contribution est très importante avec 43.6 % en 2020 et 22.1 % en 2023. Cette différence pourrait s'expliquer par l'interdiction de l'utilisation de foyers ouverts dans la vallée à partir de 2021. Les foyers ouverts sont connus pour contribuer grandement aux concentrations en $PM_{2.5}$. Cela impliquerait que l'interdiction de ce type de foyer est une mesure efficace de réduction de la concentration en $PM_{2.5}$.
- La zone de Toulon, qui a été choisie pour sa faible utilisation du chauffage au bois, présente la concentration en $PM_{2.5}$ la plus élevée en période hivernale mais également l'écart le plus important avec la période estivale. Ces résultats restent cohérents avec les concentrations et les différences mesurées dans la région PACA. Cette région n'étant pas connue pour son utilisation de chauffage au bois, on peut faire l'hypothèse que les valeurs élevées ainsi que les différences été/hiver proviennent d'autres sources (activités industrielles, commerciales, portuaires...) que le chauffage au bois.
- La zone de Brest, qui a été choisie pour sa forte utilisation du chauffage au bois présente une différence absolue entre période hivernale et estivale faible. La contribution à la pollution du chauffage au bois n'impacte que peu la qualité de l'air. Cependant, le cas de Brest n'est pas généralisable à la France puisque les conditions météorologiques (humides et pluvieuses) aident à lessiver l'atmosphère et à éviter la rétention de $PM_{2.5}$. Ceci montre en revanche qu'une forte utilisation du chauffage au bois dans un climat propice à l'élimination des $PM_{2.5}$ provoque une augmentation très réduite de la concentration aux $PM_{2.5}$. De plus, la Bretagne enregistre un grand nombre de ventes d'appareils récents qui sont connus pour émettre moins de particules fines que les appareils plus

anciens.

- Les zones du Grand Est telles que Mulhouse et Nancy ont des concentrations et un écart absolu entre les périodes estivale et hivernale qui sont plus faibles que la moyenne française. Pourtant dans cette région, l'utilisation du chauffage au bois est commune. Ainsi, le chauffage au bois ne semble pas avoir un impact continu permettant d'augmenter de façon durable les concentrations en $PM_{2.5}$.
- Le chauffage au bois, s'il ne semble pas avoir d'impact continu, semble en revanche avoir des impacts ponctuels sur les concentrations aux $PM_{2.5}$. Le mois de février tout particulièrement mais également janvier et décembre présentent des concentrations de $PM_{2.5}$ très élevées les jours où les conditions météorologiques sont réunies pour entraîner une stagnation de celles-ci dans l'atmosphère. Le trafic semble également avoir un impact augmenté l'hiver.

Pour conclure la contribution maximale à l'augmentation de la concentration aux $PM_{2.5}$ qui semble pouvoir être attribuée au chauffage au bois est de 15.3 % à l'échelle de la France ; or on a vu que le chauffage au bois n'est pas le seul responsable des écarts entre période hivernale et estivale. Ainsi, considérer la valeur 15.3 % revient déjà à surestimer la contribution du chauffage au bois. Les conditions météorologiques ont également leur importance, une zone humide et pluvieuse aura une concentration faible en particules fines alors qu'une zone aux conditions sèches et propices aux inversions de température en hiver aura des concentrations bien plus élevées. Le type de chauffage au bois semble également avoir un fort impact puisque l'interdiction des foyers ouverts, dans la vallée de l'Arve notamment, contribue très probablement à la diminution des concentrations hivernales en $PM_{2.5}$ qui a pu être observée entre 2020 et 2023.

Ainsi pour diminuer la concentration aux $PM_{2.5}$, se focaliser uniquement sur le chauffage au bois n'est pas la solution. Concernant celui-ci, pour réduire sa contribution le renouvellement du parc semble avoir une forte importance ainsi que l'utilisation d'un combustible adéquat. Il est également nécessaire de se focaliser sur les autres sources d'émissions telles que le trafic, le brûlage à l'air libre (encore pratiqué même si interdit), l'agriculture et l'industrie.

5. Limites

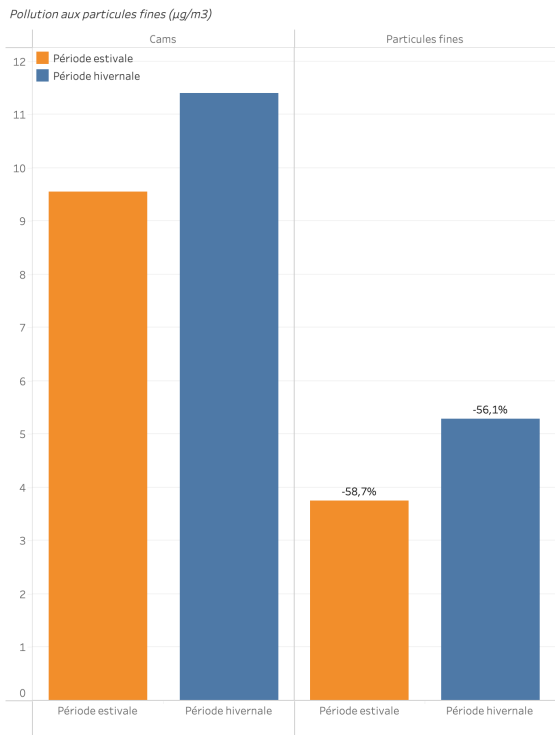
Pour réaliser l'étude des hypothèses ont été faites et des méthodologies choisies ce qui implique certaines limites :

- Pour les moyennes 2023, des données capteurs ont été prises : ces données impliquent des mesures à des endroits ponctuels et statiques qui pourraient entraîner de manquer certaines pollutions sur des zones proches.
- Les capteurs sélectionnés sont des capteurs ATMO et Sensor Community. Les capteurs Community ne sont pas positionnés par des ATMO ce qui pourrait amener à manquer certaines pollutions par un choix de placement non stratégique.
- La comparaison 2020 et 2023 a été faite avec des données modélisées pour les deux années en utilisant un facteur de correction pour que les concentrations moyennes 2023 correspondent aux données capteurs 2023 et ce même facteur de correction a été appliqué à 2020 pour permettre la comparaison.
- Nous n'avons pas la part d'utilisation réelle du chauffage au bois sur les zones étudiées.
- Les sources potentielles d'émission utilisées dans les hypothèses ont été considérées d'après l'usage de sols.
- Dans l'analyse de la concentration des PM_{2.5}, il n'y a pas eu d'analyses spécifiques sur le type de particules, par exemple la part en lévoglucosane qui permet d'identifier des actions de combustion de bois.
- La contribution de l'agriculture et du trafic n'ont pas pu être déterminée de manière quantitative pour toutes les zones. De même, que la part due au brûlage des déchets verts.
- Le type de chauffage au bois sur les zones étudiées n'a pas pu être pris en compte, or il a été vu que l'interdiction des foyers ouverts par exemple dans la vallée de l'Arve semble avoir un impact sur la diminution de la concentration aux particules fines.

6. Annexes méthodologiques

6.1. Annexe modélisation CAMS

Figure 44 : Comparaison des concentrations en $PM_{2.5}$ en fonction de la modélisation CAMS vs valeurs capteurs à Mulhouse



Les modèles CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) de qualité d’air permettent d’évaluer en tout point de l’Europe les concentrations en différents polluants, dont les particules fines de diamètre inférieure à 2.5 µm, avec une résolution de 0.1 x 0.1° (environ 11 x 11km).

En 2020, les données journalières mesurées par les capteurs ATMO et Sensor Community n’ont pas pu être récupérées car trop anciennes. En revanche, les données modélisées par CAMS en 2020 sont disponibles. Il a donc été choisi de porter nos analyses pour comparer 2020 et 2023 sur ce type de données.

Dans un premier temps, il s’agit de déterminer la qualité des données CAMS. En effet, de par leur résolution, on s’attend à observer une différence certaine avec les données mesurées par les capteurs. La comparaison des données CAMS et capteurs en 2023 montre qu’il y a un écart entre les concentrations en $PM_{2.5}$ mesurées et les valeurs estimées par le modèle (Figure 44).

Dans un second temps, cet écart est utilisé comme facteur de correction sur les données modélisées en 2020. Ainsi, cela permet d’obtenir une estimation des concentrations qui auraient pu être mesurées par les capteurs qui peut être comparée aux concentrations mesurées en 2023. Les tendances étant respectées cela revient au même que de comparer directement les données du modèle entre 2020 et 2023, avec l’avantage de pouvoir estimer une différence de concentration absolue entre période hivernale et estivale et de ne pas se limiter à des pourcentages.

6.2. Données corrigées de l'humidité

Mulhouse

Tableau 24 : Nombre de jours par période à Mulhouse

	Période hivernale	Période estivale
Nbr jours temps sec	38	100
% jours temps sec	$(38 \cdot 100 / 206) = 18.4$	$(100 \cdot 100 / 159) = 62.9$
Nbr jours temps humide	168	59
% jours temps humide	$(168 \cdot 100 / 206) = 81.6$	$(59 \cdot 100 / 159) = 37.1$

Tableau 25 : Concentrations en $PM_{2.5}$ observées et corrigées de l'humidité en fonction de la période à Mulhouse

	Total concentration $PM_{2.5}$ non corrigée ($\mu g/m^3$)	Temps humide (+0.5 $\mu g/m^3$) facteur de correction ($\mu g/m^3$)	Total concentration $PM_{2.5}$ corrigée de l'humidité ($\mu g/m^3$)	Ecart absolu $\mu g/m^3$ et en %
Période hivernale corrigée	5.2	$0.5 \cdot 0.816 = 0.4$	$5.2 + 0.4 = 5.6$	+ 1.61
Période estivale corrigée	3.8	$0.5 \cdot 0.371 = 0.2$	$3.8 + 0.2 = 4.0$	réf
Période hivernale	5.2	/	5.2	+1.4
Période estivale	3.8	/	3.8	réf

Si on considère que le chauffage au bois est seul responsable de la différence de pollution aux $PM_{2.5}$ entre l'été et l'hiver, alors sa contribution maximale à Mulhouse est en valeur absolue de 1.61 $\mu g/m^3$ après correction avec l'humidité.

Tableau 26 : Impact annuel maximal observé et corrigé de l'humidité du chauffage au bois à Mulhouse

% potentiel du chauffage au bois max sur l'année	
Impact max annuel corrigé (%)	18.9 %
Impact max annuel (%)	17.6 %

Cette contribution hivernale peut être ramenée à une contribution annuelle en pondérant en fonction du nombre de jour observées en période hivernale et en période estivale.

Ainsi à Mulhouse, dans le cas où la différence de concentration en $PM_{2.5}$ entre l'hiver et l'été ne serait attribuée qu'au chauffage au bois, alors sa contribution à la concentration en particules fines annuelle serait de **18.9 %** corrigé avec l'humidité.

Brest

Tableau 27 : Nombre de jours par période à Brest

	Période hivernale	Période estivale
Nbr jours temps sec	19	17
% jours temps sec	$(19 \times 100 / 220) = 8.6$	$(17 \times 100 / 145) = 11.7$
Nbr jours temps humide	201	128
% jours temps humide	$(201 \times 100 / 220) = 91.4$	$(128 \times 100 / 145) = 88.3$

Tableau 28 : Concentrations en PM_{2.5} observées et corrigées de l'humidité en fonction de la période à Brest

	Total concentration PM _{2.5} non corrigée (µg/m³)	Temps humide (+0.5 µg/m³) facteur de correction (µg/m³)	Total concentration PM _{2.5} corrigée de l'humidité (µg/m³)	Ecart absolu µg/m³ et en %
Période hivernale corrigée	6.4	$0.4 \times 0.914 = 0.4$	$6.4 + 0.4 = 6.8$	+0.55
Période estivale corrigée	5.9	$0.4 \times 0.883 = 0.35$	$5.9 + 0.35 = 6.25$	réf
Période hivernale	6.36	/	6.36	+0.4
Période estivale	5.95	/	5.95	réf

Si on considère que le chauffage au bois est seul responsable de la différence de pollution aux PM_{2.5} entre l'été et l'hiver, alors sa contribution maximale à Brest en valeur absolue de 0.5 µg/m³ après correction avec l'humidité.

Tableau 29 : Impact annuel maximal observé et corrigé de l'humidité du chauffage au bois à Brest

% potentiel du chauffage au bois max sur l'année	
Impact max annuel corrigé (%)	5.7%
Impact max annuel (%)	4.6%

Cette contribution hivernale peut être ramenée à une contribution annuelle en pondérant en fonction du nombre de jour observées en période hivernale et en période estivale.

Ainsi à Brest, dans le cas où la différence de concentration en PM_{2.5} entre l'hiver et l'été ne serait attribuée qu'au chauffage au bois, alors sa contribution à la concentration en particules fines annuelle serait de **5.7 %** corrigé avec l'humidité.

Nancy

Tableau 30 : Nombre de jours par période à Nancy

	Période hivernale	Période estivale
Nbr jours temps sec	28	44
% jours temps sec	$(28 \times 100 / 215) = 13$	$(44 \times 100 / 112) = 39.3$
Nbr jours temps humide	187	68
% jours temps humide	$(187 \times 100 / 215) = 87.0$	$(68 \times 100 / 112) = 60.7$

Tableau 31 : Concentrations en PM_{2.5} observées et corrigées de l'humidité en fonction de la période à Nancy

	Total concentration PM _{2.5} non corrigée (µg/m ³)	Temps humide (+0.5 µg/m ³) facteur de correction (µg/m ³)	Total concentration PM _{2.5} corrigée de l'humidité (µg/m ³)	Ecart absolu µg/m ³ et en %
Période hivernale corrigée	8.3	$2.5 \times 0.87 = 2.2$	$8.3 + 2.2 = 10.5$	+1.2
Période estivale corrigée	7.8	$2.5 \times 0.607 = 1.5$	$7.8 + 1.5 = 9.3$	réf
Période hivernale	8.3	/	8.3	+ 0.5
Période estivale	7.8	/	7.8	réf

Si on considère que le chauffage au bois est seul responsable de la différence de pollution aux PM_{2.5} entre l'été et l'hiver, alors sa contribution maximale à Nancy est en valeur absolue de 1.2 µg/m³ après correction avec l'humidité.

Tableau 32 : Impact annuel maximal observé et corrigé de l'humidité du chauffage au bois à Nancy

% potentiel du chauffage au bois max sur l'année	
Impact max annuel corrigé (%)	7.4%
Impact max annuel (%)	3.9 %

Cette contribution hivernale peut être ramenée à une contribution annuelle en pondérant en fonction du nombre de jour observées en période hivernale et en période estivale.

Ainsi à Nancy, dans le cas où la différence de concentration en PM_{2.5} entre l'hiver et l'été ne serait attribuée qu'au chauffage au bois, alors sa contribution à la concentration en particules fines annuelle serait de **7.4 %** corrigé avec l'humidité.

Jonville-en-Woëvre

Tableau 33 : Nombre de jours par période à Jonville-en-Woëvre

	Période hivernale	Période estivale
Nbr jours temps sec	22	67
% jours temps sec	$(22 \times 100 / 213) = 10.3$	$(67 \times 100 / 143) = 46.8$
Nbr jours temps humide	191	76
% jours temps humide	$(191 \times 100 / 213) = 89.7$	$(76 \times 100 / 143) = 53.2$

Tableau 34 : Concentrations en PM_{2.5} observées et corrigées de l'humidité en fonction de la période à Jonville-en-Woëvre

	Total concentration PM _{2.5} non corrigée (µg/m³)	Temps humide (+0.5 µg/m³) facteur de correction (µg/m³)	Total concentration PM _{2.5} corrigée de l'humidité (µg/m³)	Ecart absolu µg/m³ et en %
Période hivernale corrigée	8.4	$1.8 \times 0.897 = 1.61$	$8.4 + 1.61 = 10.01$	+1.35
Période estivale corrigée	7.7	$1.8 \times 0.532 = 0.96$	$7.7 + 0.96 = 8.66$	réf
Période hivernale	8.4	/	8.4	+ 0.7
Période estivale	7.7	/	7.7	réf

Si on considère que le chauffage au bois est seul responsable de la différence de pollution aux PM_{2.5} entre l'été et l'hiver, alors sa contribution maximale à Jonville-en-Woëvre est en valeur absolue de 1.35 µg/m³ après correction avec l'humidité.

Tableau 35 : Impact annuel maximal observé et corrigé de l'humidité du chauffage au bois à Jonville-en-Woëvre

% potentiel du chauffage au bois max sur l'année	
Impact max annuel corrigé (%)	9 %
Impact max annuel (%)	5.7 %

Cette contribution hivernale peut être ramenée à une contribution annuelle en pondérant en fonction du nombre de jour observées en période hivernale et en période estivale. Il est considéré que le chauffage au bois possède une contribution à la pollution de 1% en période estivale pour vraiment évaluer un impact maximal.

Ainsi à Jonville-en-Woëvre, dans le cas où la différence de concentration en PM_{2.5} entre l'hiver et l'été ne serait attribuée qu'au chauffage au bois, alors sa contribution à la concentration en particules fines annuelle serait de **9 %** corrigé avec l'humidité.

Vallée de l'Arve

Tableau 36 : Nombre de jours par période dans la vallée de l'Arve

	Période hivernale	Période estivale
Nbr jours temps sec	67	71
% jours temps sec	$(67 \cdot 100 / 248) = 27$	$(71 \cdot 100 / 117) = 60.7$
Nbr jours temps humide	181	46
% jours temps humide	$(181 \cdot 100 / 248) = 72.9$	$(46 \cdot 100 / 117) = 39.3$

Tableau 37 : Concentrations en $PM_{2.5}$ observées et corrigées de l'humidité en fonction de la période dans la vallée de l'Arve

	Total concentration $PM_{2.5}$ non corrigée ($\mu g/m^3$)	Temps humide (+0.5 $\mu g/m^3$) facteur de correction ($\mu g/m^3$)	Total concentration $PM_{2.5}$ corrigée de l'humidité ($\mu g/m^3$)	Ecart absolu $\mu g/m^3$ et en %
Période hivernale corrigée	8.4	$3.6 \cdot 0.729 = 2.6$	$8.4 + 2.6 = 11$	+3.6
Période estivale corrigée	6.0	$3.6 \cdot 0.393 = 1.4$	$6.0 + 1.4 = 7.4$	réf
Période hivernale	8.4	/	8.4	+ 2.4
Période estivale	6.0	/	6.0	réf

Si on considère que le chauffage au bois est seul responsable de la différence de pollution aux $PM_{2.5}$ entre l'été et l'hiver, alors sa contribution maximale dans la vallée de l'Arve est en valeur absolue de 3.6 $\mu g/m^3$ après correction avec l'humidité.

Tableau 38 : Impact annuel maximal observé et corrigé de l'humidité du chauffage au bois dans la vallée de l'Arve

% potentiel du chauffage au bois max sur l'année	
Impact max annuel corrigé (%)	25.4 %
Impact max annuel (%)	22.1 %

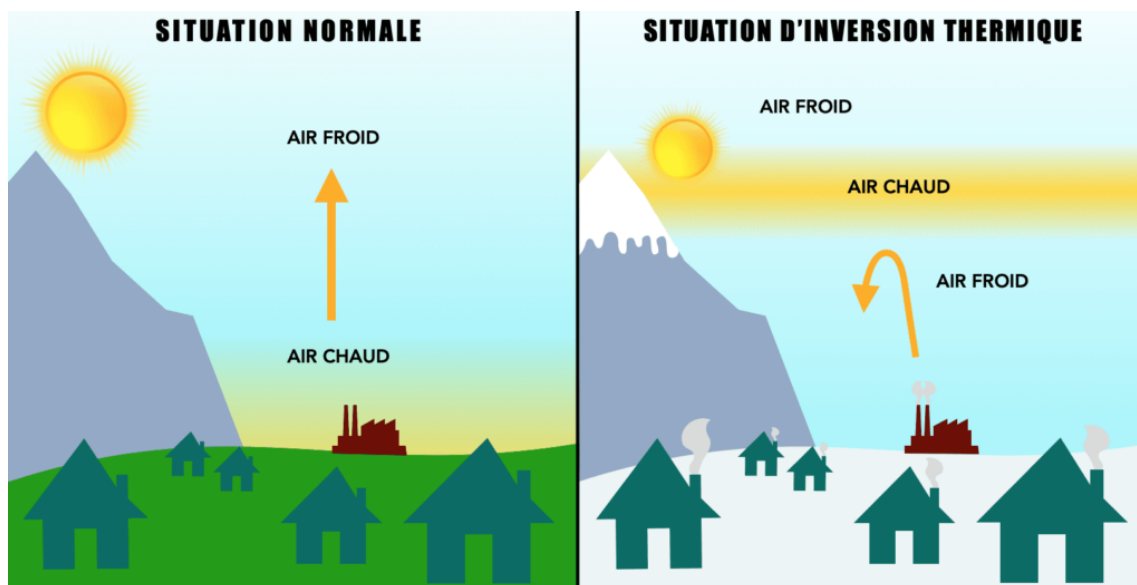
Cette contribution hivernale peut être ramenée à une contribution annuelle en pondérant en fonction du nombre de jour observées en période hivernale et en période estivale.

Ainsi dans la vallée de l'Arve, dans le cas où la différence de concentration en $PM_{2.5}$ entre l'hiver et l'été ne serait attribuée qu'au chauffage au bois, alors sa contribution à la concentration en particules fines annuelle serait de **25.4 %** corrigé avec l'humidité.

6.3. Phénomène d'inversion thermique

L'inversion thermique est un phénomène météorologique pour lequel la température de l'air augmente avec l'altitude au lieu de diminuer. Lors d'une inversion thermique, une couche d'air chaud est piégée entre deux couches d'air froid, empêchant les flux d'air et bloquant la dispersion des polluants et notamment des particules fines [3]. Ce phénomène est particulièrement présent en hiver par temps sec et peu venteux.

Figure 45 : Schéma d'inversion thermique



7. Références

<https://www.naturvardsverket.se/4ad013/globalassets/media/publikationer-pdf/1300/978-91-620-1309-7.pdf>

<https://atmosphere.copernicus.eu/>

<https://meteofranccomtoise.fr/project/les-inversions-thermiques/>

(1)

(2)

(3)



meersens

www.meersens.com

sales@meersens.com