

Rapport final



Mieux connaître l'air en altitude au Pays du Mont-Blanc



Octobre 2024



N° NOVA : 23-HF-0056

Produit conçu avec le système de management de la qualité certifié AFAQ ISO 9001

Le Cerema est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires, présent partout en métropole et dans les Outre-mer grâce à ses 26 implantations et ses 2 400 agents. Détenteur d'une expertise nationale mutualisée, le Cerema accompagne l'État et les collectivités territoriales pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires par l'élaboration coopérative, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport.

Doté d'un fort potentiel d'innovation et de recherche incarné notamment par son institut Carnot Clim'adapt, le Cerema agit dans 6 domaines d'activités : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

Site web : www.cerema.fr

Alti'Air : Mieux connaître l'air en altitude au Pays du Mont-Blanc

Commanditaire :

Jean-Marc PEILLEX – Président de la Communauté de Communes Pays du Mont-Blanc
 648, chemin des Prés Caton – P.A.E du Mont-Blanc, 74190 Passy
 Tél : 04 50 78 12 10

Responsable du rapport

Malika SOUADA – DTer HdF – Groupe ABV
Tél. : +33 (0) 6 65 83 25 68
Courrier : malika.souada@cerema.fr
Cerema Hauts-de-France – 42 bis rue Marais – Sequedin, 59320 Haubourdin

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
V0	25/10/2024	Envoi initial à la CCPMB avec quelques suggestions
V1	07/11/2024	Version finale

Références

N° d'affaire : 23-HF-0056

Partenaires : Particle Vision

Nom	Service	Rôle	Visa
Malika SOUADA (Responsable d'études qualité de l'air – Cheffe du projet)	Groupe Air Bruit Vibrations	Auteure principale	
Juanita RAUSCH (Directrice Particle Vision)	Particle Vision	Co-auteure	
Virginie DUNEZ (Chargée d'études Air et Santé)	Groupe Air Bruit Vibrations	Contributeur et relectrice	
Christine BUGAJNY (Cheffe de groupe ABV, experte en Risques Anthropiques)	Groupe Air Bruit Vibrations	Validation	
Corinne LAMPIN (Directrice du département)	TEER	Visa	

5 à 10 mots clés à retenir de l'étude

Micro-capteurs	Pollution atmosphérique
Mesures en temps réel	Sources
Particules	Aide à la décision politique
Caractérisation morpho-chimique	Mesures en altitude
Connaissances	CCPMB

Statut de communication de l'étude

Les études réalisées par le Cerema sur sa subvention pour charge de service public sont par défaut indexées et accessibles sur le portail documentaire du Cerema. Toutefois, certaines études à caractère spécifique peuvent être en accès restreint ou confidentiel. Il est demandé de préciser ci-dessous le statut de communication de l'étude.

- Accès libre : document accessible au public sur internet
- Accès restreint : document accessible uniquement aux agents du Cerema
- Accès confidentiel : document non accessible

Cette étude est capitalisée sur la plateforme documentaire [CeremaDoc](https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx), via le dépôt de document : <https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx>

Remerciements

Le projet Alti'Air subventionné/soutenu par la Communauté de Communes Pays du Mont-Blanc (CCPMB) s'inscrit dans le cadre de l'appel à projet de recherche lancé par les élus pour l'amélioration des connaissances de la qualité de l'air sur leur territoire.

Le Consortium du projet Cerema/Particle Vision remercie le président de la CCPMB **Jean-Marc Peillex**, le Vice-président **Raphaël Castera** ainsi que les élus de la CCPMB et notamment les maires des 10 communes (Combloux, Cordon, Demi-Quartier, Domancy, Les Contamines-Montjoies, Megève, Passy, Praz-sur-Arly, Saint-Gervais-les-Bains et Sallanches) pour l'opportunité de ce projet et leur confiance.

Le consortium remercie chaleureusement Jérémy Payen, chargé de mission et Charlotte Marx, responsable du pôle Développement Durable à la CCPMB pour leur suivi attentif du projet.

Le Consortium remercie également l'ensemble des participants ayant contribué au Comité de Suivi notamment la DDT Haute-Savoie et Atmo Aura.

Sommaire

1	Contexte et objectifs du projet	16
2	Enjeux qualité de l'air au Pays du Mont-Blanc	17
3	Stratégie de mesures innovante	19
3.1	Stratégie de mesures	19
3.2	Structuration du projet	20
3.3	Description de la zone d'étude	21
3.4	Localisation des sites de mesures	21
3.5	Le choix du capteur	25
4	Polluant mesurés et rappel de la réglementation	29
4.1	Polluants mesurés	29
4.1.1	Les particules en suspension PM ₁₀ et PM _{2.5}	29
4.1.2	Le dioxyde d'azote NO ₂	29
4.1.3	L'ozone O ₃	29
4.2	La réglementation	30
4.2.1	Recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS)	30
4.2.2	Directives européennes	30
4.2.3	La réglementation française	30
4.2.4	Définitions des différentes valeurs réglementaires	30
4.2.5	Récapitulatif des normes de qualité de l'air	31
5	Méthodologie des campagnes de mesures	32
6	Moyens de mesures	34
6.1	Les micro-capteurs	34
6.2	Les tubes passifs pour la mesure des gaz	34
6.3	Prélèvements passifs/actifs et caractérisation des matières particulaires	36
6.3.1	Prélèvement de particules en suspension	36
6.3.2	Analyse	37
6.4	Synthèse des moyens de mesures déployés	38
7	Validation métrologique des micro-capteurs	40
7.1	Caractéristiques des micro-capteurs Ellona WT1	40
7.2	Validation métrologique par inter-comparaison des capteurs WT1 avec Atmo	42
8	Campagnes de prélèvement de particules	45
8.1	Campagne de prélèvement estivale	45
8.1.1	Conditions météorologiques	45
8.1.2	Périodes de prélèvement	49
8.1.3	Résultats de la campagne estivale	50

8.2	Campagne de prélèvement hivernale	63
8.2.1	Conditions météorologiques	63
8.2.2	Périodes de prélèvement.....	65
8.2.3	Résultats de la campagne hivernale	66
8.3	Comparaison des deux campagnes estivale et hivernale	78
8.3.1	Concentrations PM _{10-2.5} , PM _{2.5} et PM ₁₀ mesurées au Pays du Mont-Blanc (été VS hiver) 78	
8.3.2	Comparaison de la composition des PM ₁₀ lors de la campagne estivale VS hivernale ..	79
8.3.3	Essai de différenciation et de quantification des particules de combustion du bois en utilisant le potassium et le lévoglucosan comme traceurs.....	81
9	Mesures en continu.....	83
9.1	Bilan de mise en œuvre du réseau de micro-capteurs	83
9.2	Suivi des particules PM₁₀ et PM_{2.5}.....	85
9.2.1	Moyenne annuelle	85
9.2.2	Evolution de la moyenne mensuelle	87
9.2.3	Evolution de la moyenne journalière	88
9.2.4	Profils journalier moyens	94
9.2.5	Comparaison PM _{2.5} /PM ₁₀	96
9.3	Le dioxyde d'azote NO₂	97
9.3.1	Moyenne annuelle	97
9.3.2	Evolution de la moyenne mensuelle	99
9.3.3	Profils journaliers moyens.....	99
9.4	L'ozone O₃	101
9.4.1	Moyenne annuelle	101
9.4.2	Profils journaliers moyens.....	102
9.5	Bilan qualité de l'air au Pays du Mont-Blanc	103
10	Conclusions.....	105
11	Limites des micro-capteurs WT1.....	106
12	Perspectives	106
13	Annexes	107
13.1	Bibliographie	107
13.2	Inter-comparaison avant déploiement des capteurs WT1 Ellona	109
13.3	Résultats des tubes passifs – validation métrologique.....	112
13.4	Composition élémentaire détaillée à partir de l'analyse MEB/EDX des particules individuelles	116

Glossaire

AASQA : Association agréée de surveillance de la qualité de l'air

Al : Aluminium

Ca: Calcium

CE : Carbone élémentaire

Cerema : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

CI : Chromatographie ionique

Cm% : Concentration massique relative

CnP% : Concentration du nombre de particules relative

CCPMB : Communauté de Communes Pays du Mont-Blanc

CO : Composés organiques

COV : Composés Organiques Volatils

Fe : Fer

HPLC-PAD : Chromatographie en phase liquide à haute performance avec détection par ampérométrie pulsée

ICP-MS/AES: Inductively Coupled Plasma

ICP-AES : ICP couplé à un spectromètre à émission atomique

ICP-MS : ICP couplé à un spectromètre de masse

IGE : Institut des Géosciences de l'Environnement

Mg : Magnésium

MEB/EDS : Microscopie électronique à balayage couplée à la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie

MO : Matière organique

Na : Sodium

NH₄ : Ammonium

NOx: Oxydes d'azote

NO: Monoxyde d'azote

NO₂: Dioxyde d'azote

NO₃ : Nitrate

O : Oxygène

O₃: Ozone

OFEV : Office fédéral de l'environnement

OMS : Organisation mondiale de la Santé

PC : Polycarbonate

PM₁ : Particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 1 micromètre

PM₁₀ : Particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 micromètres

PM_{2,5} : Particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 2,5 micromètres

PM_{10-2,5} : Particules dont le diamètre aérodynamique est compris entre 2,5 et 10 micromètres

PM_{80-2,5} : Particules dont le diamètre aérodynamique est compris entre 2,5 et 80 micromètres

PPA : Plan de Protection de l'Atmosphère

Si : Silicium

SO₂ : Dioxyde de soufre

Ti : Titane

TOT : Méthode thermo-optique en mode transmission

UE : Union Européenne

UV : Ultra-Violet

µg/m³ : Microgramme par mètre cube

Alti'Air : Chiffres clés

Alti'Air en chiffres

Sites de mesure

10 sites de mesures en continu (de 590 m à 1840 m d'altitude)

Dont **5** avec caractérisation morpho-chimique de particules

Polluants suivis

- Les particules (PM₁₀ et PM_{2,5})
- Le dioxyde d'azote NO₂
- L'ozone O₃

Moyens de mesure

10 micro-capteurs WT1 mesurant en continu

5 préleveurs passifs PM_{10-2,5}

5 préleveurs actifs PM_{2,5}

80 filtres/substrats analysés

180 tubes passifs NO₂

180 tubes passifs O₃

Données récoltées

330 240 données récoltées

8 256 de données horaires moyennes

344 jours de mesure en continu

11 mois de mesure en continu

Résumé

Ce rapport dresse un bilan du déploiement d'un réseau de capteurs qualité de l'air sur le territoire de la Communauté de Communes Pays du Mont-Blanc (CCPMB) de juillet 2023 à juin 2024. Les résultats, issus des mesures en temps réel par le réseau de micro-capteurs déployé sur différents points (notamment à différentes altitudes), seront présentés ainsi que les résultats de prélèvement et de caractérisation morpho-chimique de particules $PM_{10-2.5}$ et $PM_{2.5}$ des deux campagnes de mesure estivale et hivernale.

Dans le cadre du projet Alti'Air, il a été proposé d'évaluer les niveaux des polluants suivants les particules (PM_{10} et $PM_{2.5}$), le dioxyde d'azote (NO_2) et l'ozone (O_3). Les mesures en temps réel des gaz NO_2 et O_3 ont été complétées, en cours de campagnes et sur l'initiative du groupement Cerema/Particle Vision, par des échantillonnages passifs à l'aide de tubes Passam (permettant de fournir une moyenne sur la période de prélèvement avec une meilleure limite de détection).

La caractérisation des particules a fait l'objet de deux campagnes de prélèvement passif à l'aide des échantillonneurs passifs Sigma-2 (selon la norme VDI2119 :2013) pour la fraction grossière ($PM_{10-2.5}$), et des prélèvements actifs à l'aide d'échantillonneurs à faible volume Mini VC-S de la marque Leckel (selon la norme CEN EN12341) pour la fraction fine ($PM_{2.5}$) durant l'été (juillet-août 2023) et l'hiver (mi-décembre 2023 à mi-février 2024).

L'étude a permis de valider le déploiement d'un réseau de micro-capteurs pour approfondir la connaissance de la qualité de l'air sur le territoire et notamment les particules fines.

La caractérisation des particules a montré sa plus-value pour identifier les sources de pollution et mieux comprendre les émissions de celles-ci (sources locales, écart entre saisons...).

Les résultats issus des mesures en temps réel ont mis en évidence les principaux éléments suivants (les histogrammes en violets sont les données des stations Atmo et en orange les données capteurs) :

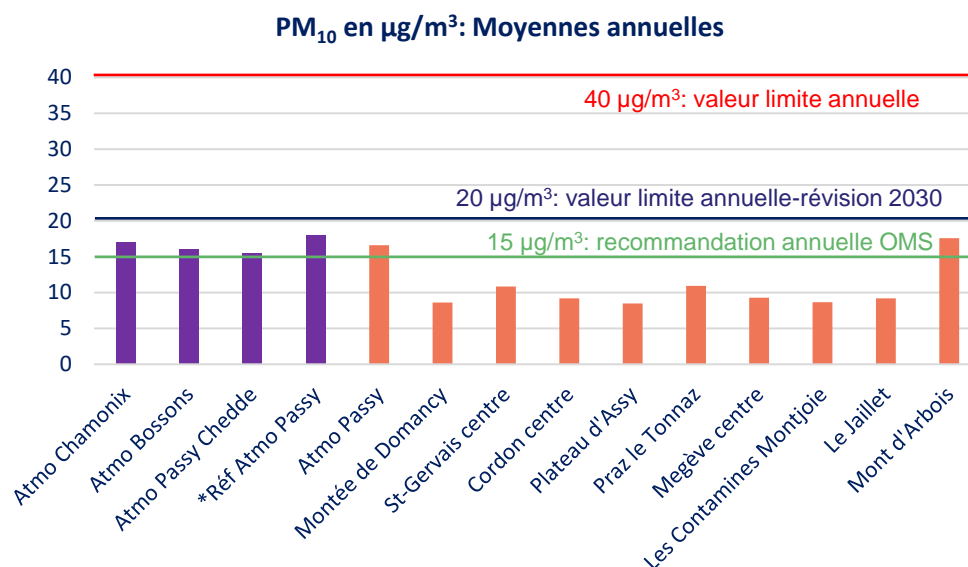


Figure 1: Moyennes annuelles en PM_{10} .

- **Les concentrations moyennes annuelles en PM_{10} sont sur tous les sites de mesure largement en dessous de la valeur limite annuelle ($40 \mu g/m^3$).**
- De même, les niveaux moyens de PM_{10} restent inférieurs à la valeur limite annuelle de la prochaine réglementation validée en octobre 2024 par l'Union Européenne (UE) ($20 \mu g/m^3$).
- Du point de vue des recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS 2021), l'ensemble des sites respecte la recommandation OMS annuelle ($15 \mu g/m^3$), sauf les sites de

Passy et Mont d'Arbois qui ont dépassé légèrement cette valeur. Le site Mont d'Arbois a subi une pollution locale liée aux travaux menés durant les étés 2023 et 2024.

- Le site du Mont d'Arbois a enregistré des valeurs anormalement élevées en raison des travaux de construction qui ont eu lieu durant l'été 2023 et l'été 2024 mais également à la présence de micro-gouttelettes d'eau (le capteur se trouvait souvent dans la couche de brume à 1840 mètres d'altitude). Par conséquent, ces valeurs élevées résultent d'un mélange entre une source locale supplémentaire de particules en été et une limitation méthodologique du capteur en hiver dans des conditions très humides.
- La caractérisation morpho-chimique des particules a montré que ces particules durant l'été sont principalement d'origine minérale et de grosse taille. Ceci confirme que ces particules proviennent d'une source locale (travaux à proximité).

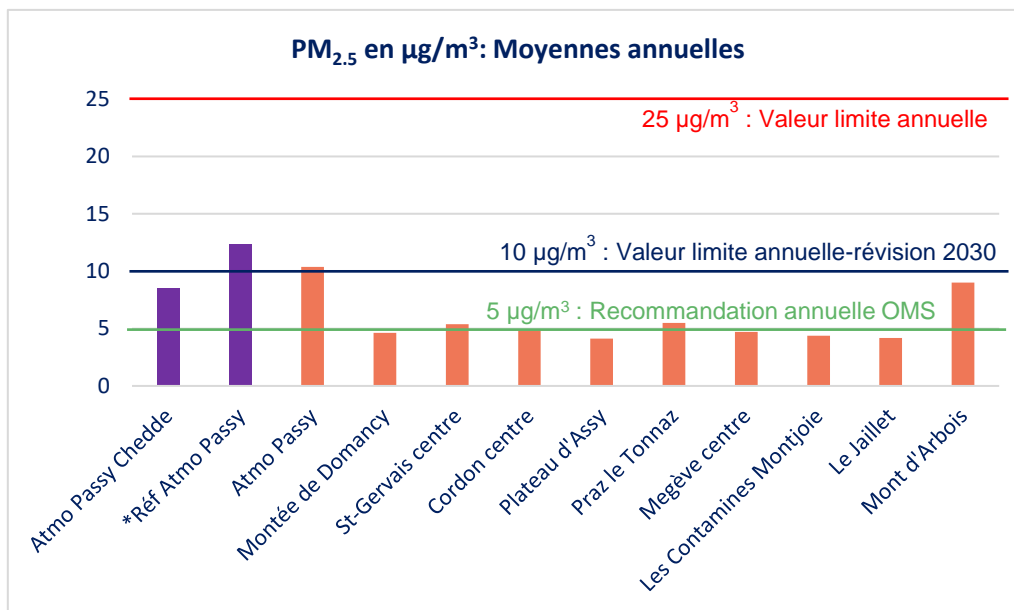


Figure 2: Moyennes annuelles en PM_{2.5}.

- **Les concentrations moyennes annuelles en PM_{2.5} sont sur tous les sites de mesure largement en dessous de la valeur limite annuelle (25 µg/m³).**
- De même, les niveaux moyens de PM_{2.5} restent inférieurs à la valeur limite annuelle de la prochaine réglementation validée en octobre 2024 par l'UE (10 µg/m³) sur tous les sites à l'exception du site de Passy où cette valeur a été légèrement franchie.
- Du point de vue des recommandations OMS, l'ensemble des sites respecte la recommandation OMS annuelle (5 µg/m³), sauf les sites de Passy et Mont d'Arbois qui ont dépassé cette valeur (10 µg/m³). Les sites de Saint-Gervais et Praz la Tonnaz ont légèrement franchi cette valeur. Le site Mont d'Arbois est un cas particulier pour les raisons déjà expliquées, ce résultat ne reflète pas la réalité de la qualité de l'air sur ce site.
- Il est important de noter que les concentrations moyennes annuelles sont plutôt homogènes sur les différents sites de mesure, à l'exception de Passy où la valeur annuelle est la plus élevée (environ deux fois plus élevée).

L'exploitation des ratios PM_{2.5}/PM₁₀ a permis de mettre en évidence les éléments suivants :

- **En été**, prédominance de la fraction **grossière des particules** (PM_{10-2.5}) (entre 33 et 53 % de PM_{2.5} dans PM₁₀). La caractérisation chimique a montré qu'il s'agit principalement de particules minérales.
- **En hiver**, prédominance de la **fraction fine** (PM_{2.5}) (entre 63 et 89 % de PM_{2.5} dans PM₁₀). La caractérisation chimique a montré qu'il s'agit principalement de particules organiques fines (matières organiques).

- Ce résultat met en évidence des contributions contrastées des différentes sources de particules en été et en hiver.

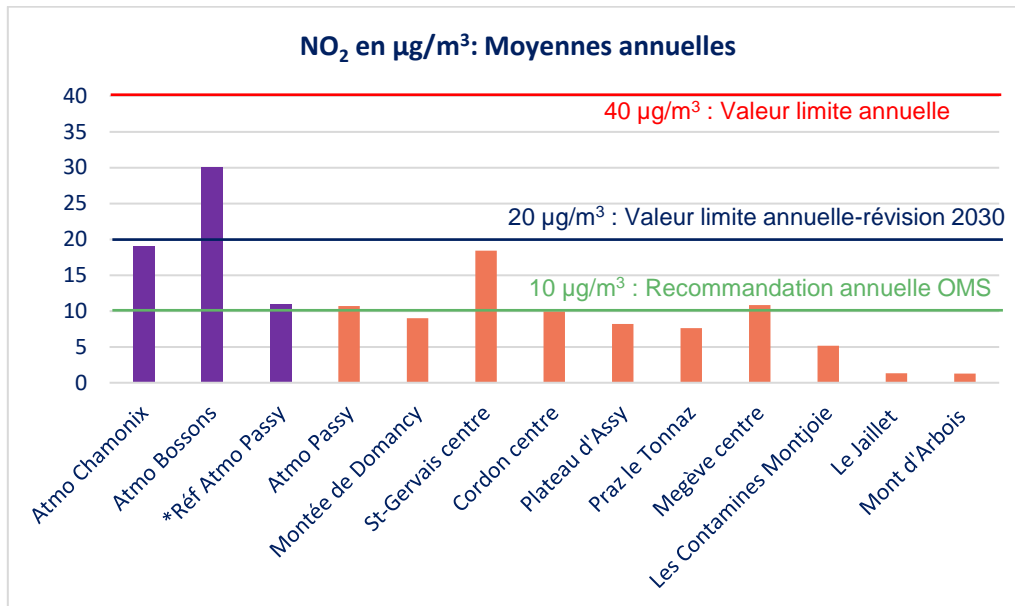


Figure 3: Moyennes annuelles en NO₂.

- **Les concentrations moyennes annuelles sont sur tous les sites de mesure largement en dessous de la valeur limite annuelle (40 µg/m³).**
- De même, les moyennes annuelles de NO₂ restent inférieures à la valeur limite annuelle de la prochaine réglementation validée en octobre 2024 par l'UE (20 µg/m³) sur tous les sites.
- En ce qui concerne les recommandations OMS, tous les sites respectent la valeur annuelle OMS (10 µg/m³), à l'exception des sites de Passy et Megève qui ont légèrement franchi cette valeur. Quant au site de Saint-Gervais, il a largement dépassé cette valeur (18,4 µg/m³), tout en étant en dessous de la valeur limite révisée, site influencé par le trafic local.
- Les capteurs ont tendance à surestimer les valeurs notamment sur les sites d'altitudes : Sur les sites du Jaillet et du Mont d'Arbois, les niveaux en NO₂ sont très faibles, inférieurs à 2 µg/m³ (pour les sites : Mont d'Arbois et le Jaillet, les résultats présentés sont issus des tubes passifs).

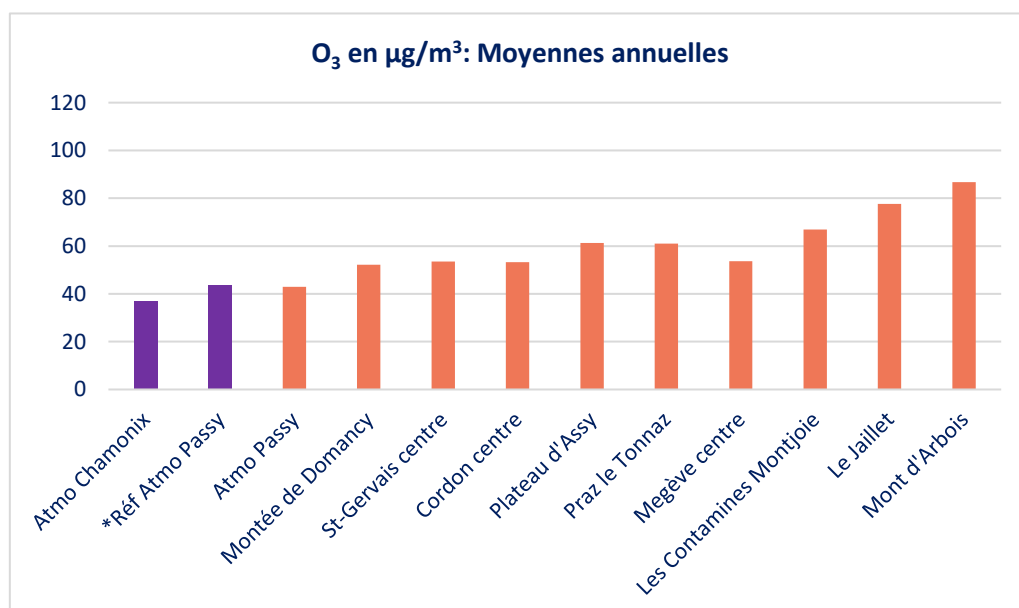


Figure 4: Concentration moyenne en O₃ sur la période juillet-octobre 2023.

- L’ozone O_3 est un polluant dit « polluant secondaire », il n’est pas émis directement par une source mais formé en présence de polluants primaires NO_2 et COV et d’un fort ensoleillement. Ce polluant se trouve généralement loin des centres villes, et, en plus importante proportion en milieu rural ou en altitude. Les mesures d’ozone effectuées sur l’ensemble du territoire de la CCPMB, ont montré des fortes concentrations sur les sites d’altitudes : Le Jailliet et Le Mont d’Arbois. Les valeurs les plus faibles ont été observées sur le site du fond à Passy.

Les résultats issus des deux campagnes estivale (du 27/06 au 24/08/23) et hivernale (du 15/12/23 au 15/02/24) de prélèvement et de caractérisation morpho-chimique des particules ont mis en évidence les principaux éléments suivants :

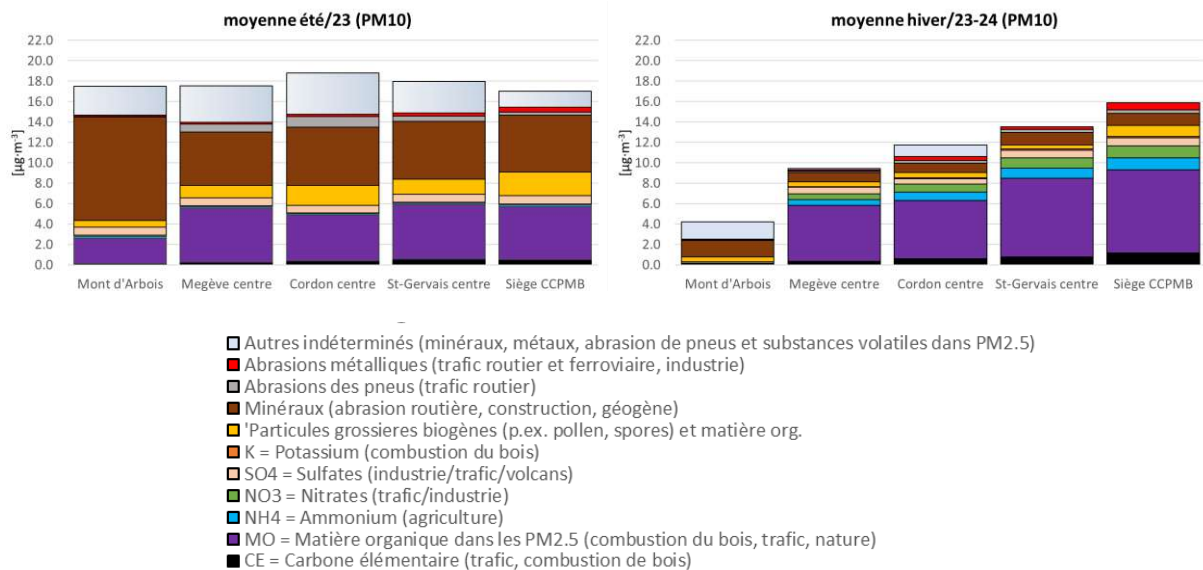


Figure 5: Les différents groupes morpho-chimiques des particules PM_{10} - Comparaison été et hiver.

- L’un des résultats les plus frappants de la différenciation morpho-chimique des particules $PM_{10-2.5}$ et $PM_{2.5}$ (donc PM_{10}) est la **grande différence de répartition des sources de particules** lorsque l’on compare les campagnes de mesure estivale et hivernale.
- Globalement, la concentration en PM_{10} était plus élevée en été qu’en hiver et ce sur tous les sites de mesure. Cela peut être expliqué principalement par la forte proportion de **particules minérales** (couleur marron figure 5) en été. Ces dernières peuvent provenir de différentes sources : abrasion des routes, érosion des sols, travaux de construction, etc. Ces activités sont plus fréquentes et plus intenses en été. En outre, les conditions sèches en été augmentent la remise en suspension de ces particules.
- De plus, **les particules biogéniques grossières** (fraction $PM_{10-2.5}$, couleur jaune figure 5) contribuent également à une partie importante des concentrations de PM_{10} en été dans la région du Mont-Blanc alors que celles-ci sont beaucoup plus faibles en hiver.
- La concentration et la **composition des PM_{10} sont homogènes en saison estivale quelque soit l’altitude** (sauf sur Mont d’Arbois concernant la répartition des sources de particules). En revanche, en **saison hivernale, la concentration en PM_{10} baisse progressivement avec l’altitude**. Ainsi, pendant l’été, il s’agit d’une pollution de fond régionale, tandis qu’en hiver, il s’agit d’une pollution causée par des sources émises localement, et aussi par les conditions météorologiques notamment les inversions de température même si elles étaient rares et de très courte durée durant cet hiver.
- **La matière organique (MO) fine** ($PM_{2.5}$) (couleur violette figure 5) est un groupe de particules très intéressant et complexe, car elle peut avoir des sources très différentes selon la saison. Les

MO fines représentent une part importante des PM₁₀ pendant les deux saisons, mais **en été**, les sources sont principalement **naturelles** (comme pour les particules biogéniques grossières) et les émissions dues au trafic. En revanche, **en hiver**, les principales sources de MO sont les **émissions de combustion du bois et le trafic** (et non la nature). En été, la répartition de cette fraction de particules est homogène et similaire sur les différents sites (pollution de fond). En hiver, elles diminuent progressivement avec l'altitude du site. Ce gradient de concentration indique que des masses d'air différentes à des altitudes diverses ont eu un impact sur la dispersion des polluants.

- Les particules secondaires (fraction fine PM_{2.5}) se forment dans l'atmosphère à partir d'autres polluants gazeux, notamment le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, l'ammoniac et les composés organique volatils. Un gradient par rapport à l'altitude du site a été observé en hiver également pour les **particules secondaires** (sulfates, nitrates, ammonium) et pour le **carbone élémentaire** (CE). Alors qu'en été leurs concentrations sont très faibles et similaires sur l'ensemble des sites.
- Concernant les **particules hors échappement**, en particulier les **particules métalliques** (en rouge sur la figure 5), qui sont issues des abrasions métalliques (trafic routier et ferroviaire, industrie), la concentration la plus élevée a été enregistrée sur le site siège CCPMB, et ce durant les deux saisons. Cela peut être expliqué par la proximité du site de l'autoroute A40 et aussi la présence de différentes industries aux alentours. Les plus fortes concentrations d'abrasion des pneus ont été enregistrées sur les sites de mesures de Cordon centre et Megève centre en été.
- Le contraste le plus important entre les deux campagnes été et hiver a été observé sur le site d'altitude Mont d'Arbois. La concentration la plus élevée a été enregistrée en été (principalement des particules minérale). Cela s'explique par les travaux de rénovation d'un restaurant situé à 100 mètre du site de mesure.
- Des **traceurs spécifiques à la combustion du bois** ont été recherchés (notamment le **potassium** et le **lévogluosan**). Leurs concentrations étaient **très faibles** durant la période d'étude (décembre 2023, janvier et février 2024) ce qui a rendu défilant la quantification de la part de PM_{2.5} provenant de la combustion du bois. Il faut noter que l'hiver 2023-2024 était le plus chaud jamais enregistré depuis 2020 où des concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5} plus faibles que d'habitude ont été enregistrées.

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

La qualité de l'air est un enjeu majeur pour la santé et l'environnement. En effet, la pollution atmosphérique est la 3e cause de mortalité en France après le tabac et l'alcool, responsable chaque année de 40 000 décès prématurés en lien avec les PM_{2,5} et à près de 7 000 décès attribuables à l'exposition au NO₂ (Santé Publique, 2021)[1]. Elle a également un coût pour la société qui est estimé à 100 milliards d'euros (Sénat, 2015), dont 20 à 30 milliards liés aux dommages sanitaires causés par les particules. En 2013, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a classé la pollution de l'air extérieur comme cancérigène pour l'homme.

La vallée de l'Arve est un territoire propice à la pollution atmosphérique en raison de sa géographie et de ses sources de pollution. En effet, au fond de la vallée se concentrent les activités humaines (habitats, transports, industrie), qui exposent les populations aux polluants, alors que sa topographie unique, bordée de nombreux massifs montagneux favorise l'accumulation des polluants et les inversions thermiques fréquentes qui limitent également la dispersion de polluants. Ces phénomènes d'inversions de température peuvent engendrer des concentrations élevées, en particulier en période de beau temps hivernal où les inversions de températures sont particulièrement accentuées et ne facilitent pas la circulation de l'air.

La pollution atmosphérique dans la vallée de l'Arve serait responsable de 8,8 % de mortalité attribuable aux particules fines (PM_{2,5}), soit l'équivalent de 93 décès prématurés par an, et 3,8 % de mortalité attribuable au NO₂ soit 40 décès (étude de Santé Publique France - 2021, sur la période 2016-2018, repris dans le rapport d'étape PPA2)[2].

A ce titre, la Communauté de Communes du Pays du Mont-Blanc (CCPMB) est impliquée depuis plusieurs années dans une démarche globale d'amélioration de la qualité de l'air. En effet, dans le cadre des deux Plans de Protection de l'Atmosphère : PPA1 (2012-2018) et PPA2 (2019-2023), adoptés avec d'autres intercommunalités de la Vallée de l'Arve, la CCPMB s'engage, par des actions concrètes, à améliorer la qualité de l'air et la santé des habitants.

Dans cet objectif, la CCPMB a souhaité approfondir et améliorer la connaissance de la qualité de l'air sur son territoire, en affinant les mesures en temps réel, notamment à différentes altitudes et la différenciation des types de particules et l'attribution des sources. En effet, les seules mesures disponibles aujourd'hui sont celles des stations ATMO positionnées en fond de vallée, elles pourraient être complétées par une connaissance de la qualité de l'air en temps réel sur d'autres endroits présentant des aérologies différentes.

Dans cette optique, le groupement Cerema Hauts-de-France en partenariat avec la société Particle Vision (Suisse), lauréat de l'appel à projet lancé par les élus de la CCPMB en juin 2022, a proposé un projet spécifique qui répond à la demande de la CCPMB. Ce projet a pour objectif :

- L'élaboration d'une stratégie d'observation innovante de la qualité de l'air sur l'ensemble du territoire, par la mise en place d'un **réseau de capteurs** adapté aux caractéristiques de la zone d'étude (à différentes altitudes) ;
- L'échantillonnage de particules en suspension dans l'air (PM_{10-2,5} et PM_{2,5}) et leurs caractérisations morpho-chimiques, ceci pour chacune des particules individuelles. Cela permettra d'identifier efficacement les sources de pollution et leur contribution pour ainsi proposer des mesures concrètes aux décideurs.

2 ENJEUX QUALITE DE L'AIR AU PAYS DU MONT-BLANC

La vallée de l'Arve située dans le département de la Haute Savoie, est un territoire propice à la pollution atmosphérique en raison des sources d'émission variées et de sa topographie.

Plusieurs actions ont été menées pour améliorer durablement la qualité de l'air dans la vallée de l'Arve, notamment la mise en œuvre des deux Plans de la Protection de l'Atmosphère : PPA1 et PPA2.

Le cas particulier de la vallée de l'Arve a été bien étudié et documenté (réf : rapports PPA1 et PPA2, rapport ATMO 2018), les sources d'émissions ont été bien identifiées ainsi que les différents facteurs aggravant l'accumulation des polluants au fond de la vallée : la topographie, les conditions météorologiques...etc.

Les trois principales sources d'émissions identifiées sont :

- **Le secteur résidentiel**, principale source d'émissions de **particules fines** avec 61 % des émissions, dont 90 % dus au chauffage domestique (pour la CCPMB, cela représente 75% des PM_{2.5} et 68 % des PM₁₀, inventaire 2024 - données 2022, Atmo Aura)
- **Le trafic routier**, incluant le trafic local et le trafic routier international avec notamment le transit routier international pour le transport de marchandises vers l'Italie via le tunnel Mont Blanc. Le secteur des transports demeure le principal émetteur de **NOx** avec près de 70 % des émissions (pour la CCPMB, cela représente 42%, inventaire 2024 - données 2022, Atmo Aura). Selon l'étude menée par Atmo suite à la fermeture du tunnel Mont-Blanc en automne 2023, la concentration en NO₂ n'a baissé que de 12 % ce qui représente un poids faible par rapport au trafic local.
- **Le secteur industriel**, avec la présence d'importantes industries (SGL Carbone) et de deux incinérateurs (avec un seul incinérateur sur la CCPMB). Ce secteur impacte surtout les émissions de SO₂ et métaux lourds ;

Les facteurs empêchant une bonne dispersion des polluants sont :

- **La topographie** très encaissée de la vallée de l'Arve en fait une zone régulièrement touchée par des épisodes de pollution. En effet, le relief montagneux limite la dispersion des polluants et favorise leur concentration au fond de la vallée ;
- **Les conditions météorologiques** jouent un rôle important dans le dépassement des seuils de pollution. La présence de vent peut permettre de disperser les polluants. En été, la configuration de la vallée joue un rôle positif avec une ventilation naturelle qui circule de la vallée vers les sommets en journée. En hiver, en revanche, il est fréquent d'observer des inversions de température, aux alentours de 900 m. Lors de ces épisodes, l'atmosphère étant stable, la circulation de l'air est très faible. Les polluants, s'accumulent en fond de vallée, là où se trouvent les zones habitées. Leurs concentrations augmentent et peuvent dépasser les valeurs seuils. Ce type de situation peut durer plusieurs jours.

Compte-tenu de ces éléments, le bassin d'air de la vallée de l'Arve connaît régulièrement des épisodes de pollution aux particules fines, notamment en hiver lors d'épisodes anticyclonique favorisant l'accumulation des polluants essentiellement issus de particules liées au chauffage au bois.

Selon le rapport d'ATMO [3] « Bilan des connaissances sur la qualité de l'air dans la vallée de l'Arve » datant de 2018, les habitants de la vallée ne sont pas plus émetteurs qu'ailleurs mais la pollution ne se diffusant pas suffisamment, ce territoire devient un territoire à enjeux spécifiques où les réductions doivent être plus importantes pour pouvoir atteindre les seuils réglementaires.

Pour faire face aux dépassements fréquents des seuils réglementaires des PM₁₀ en fond de la vallée en période hivernale, des mesures locales de réduction des émissions de particules ont été mises en place dans le cadre des deux Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) afin d'améliorer la qualité de

l'air d'une manière pérenne. Parmi ces mesures, une action phare porte sur la réduction des émissions liées au chauffage au bois résidentiel.

La pollution atmosphérique liée à ce type de source n'est pas propre à la région de la vallée de l'Arve ou des vallées alpines. De nombreuses publications ont démontré que la combustion de la biomasse contribuerait entre 15 et 60 % des concentrations de PM_{2.5} pour des sites de fonds urbains ou ruraux dans le monde [4].

De nombreuses études antérieures menées en Europe ont déjà signalé l'impact de la combustion de la biomasse sur les émissions de particules [5], [6].

Dans la vallée de l'Arve, l'étude DECOMBIO [7] a montré la contribution importante du chauffage au bois dans les valeurs élevées des concentrations en PM₁₀.

Concernant la Communauté de Communes Pays du Mont-Blanc, les seules mesures disponibles aujourd'hui sont celles des stations ATMO positionnées en fond de vallée. En 2007, Atmo Aura (Air-APS) a mené une étude[8] de surveillance de la qualité de l'air à Saint-Gervais-les-Bains en altitude et en zone touristique afin d'évaluer les niveaux de pollution atmosphérique. 3 sites ont été étudiés : un site « de proximité » en bord de route, un site « urbain » et un site en altitude. Cette étude a permis de conclure les éléments suivants :

- Pour le dioxyde d'azote, la contribution du trafic routier est importante (signature caractéristique sur le site de proximité). La concentration moyenne annuelle mesurée était de 41 µg/m³. Cette valeur respectait la réglementation de l'époque 2007 (46 µg/m³) mais ne respectait pas la valeur limite de 2010 (40 µg/m³).
- Pour les particules fines, les concentrations sont peu différentes entre le site de proximité et de fond urbain, ce qui indique que les émissions du trafic ne sont pas majoritaires et d'autres sources sont en cause, notamment le chauffage au bois. Sur le site d'altitude, les concentrations en PM₁₀ sont très faibles et qui sont sûrement liées à la pollution du fond régionale.
- Pour l'ozone, les concentrations en moyenne annuelle respectaient la valeur réglementaire de 2007 sauf l'objectif qualité (120 µg/m³ en moyenne sur 8 heures) ce qui était le cas dans la majorité des sites de la région.

3 STRATEGIE DE MESURES INNOVANTE

3.1 Stratégie de mesures

Le Cerema en partenariat avec Particle Vision (Suisse) a proposé une approche innovante qui s'appuie essentiellement sur des **mesures en temps réel** et à **différentes altitudes** complétées par des **caractérisations morpho-chimiques** des particules prélevées en atmosphère ambiante. En ciblant un site d'expérimentation couvrant l'ensemble des dix communes et à différentes altitudes et en visant les différentes sources d'émission : le trafic routier, l'industrie, le chauffage au bois et la nature pour permettre d'attribuer la part de chaque source de pollution.

Afin de répondre à ces objectifs, une **double stratégie** a été proposée:

- **Stratégie et implantation d'un réseau de micro-capteurs en temps réel** des polluants suivants : les particules (PM₁₀ et PM_{2.5}) le dioxyde d'azote (NO₂) et l'ozone (O₃), ainsi que les paramètres météorologiques tels que la température et l'humidité ;
- **Mise en place d'une méthode innovante de caractérisation morpho-chimique** au niveau des particules individuelles et une différenciation des types de particules à l'aide de l'intelligence artificielle pour les particules primaires [9], [10], [11], [12] et des analyses « bulk » par voie humide pour les particules secondaires et primaires dans PM_{2.5} [13]. En combinant ces méthodes, il est possible d'obtenir une caractérisation presque complète des PM₁₀ et PM_{2.5}, ainsi que la répartition des sources. Ces méthodes ont une résolution temporelle plus faible, mais permettent une caractérisation approfondie des concentrations moyennes des particules pendant l'intervalle d'échantillonnage (typiquement 1 à 4 semaines).

Cette méthodologie a déjà été mise en place dans le cadre de différents projets internationaux, qui ont donné lieu à 4 publications scientifiques [9], [10], [11], [12] et lors d'un précédent projet financé par l'Office Fédéral Suisse de l'Environnement [14] et récemment lors d'un projet de recherche financé par l'ADEME, et coordonné par le Cerema.

Le caractère innovant de notre projet porte sur la proposition de différencier davantage les trois principales sources d'émissions de particules identifiées jusqu'à présent dans des études précédentes. Cela signifie qu'il sera possible de préciser l'origine et la concentration des particules respectives qui contribuent à la pollution atmosphérique par les PM₁₀ et les PM_{2.5}. Ceci est notamment pertinent, dans un contexte où de nouvelles valeurs limites sont recommandées dans la dernière directive de l'OMS (2021). L'amélioration de la qualité de l'air nécessite effectivement une meilleure connaissance de la contribution des différentes sources pour son suivi et la mise en œuvre d'actions de réduction.

3.2 Structuration du projet

Le projet s'est déroulé en trois phase principales :

- **Phase 1** : une phase de réflexion qui a permis la mise en œuvre de la stratégie la mieux adaptée au contexte particulier du territoire Pays du Mont-Blanc. Cette étape cruciale a permis d'affiner la stratégie proposée avec la CCPMB et de définir ensemble les sites de mesures et de prélèvement de particules ;
- **Phase 2** : une phase d'expérimentation, qui a consisté à mettre en place un réseau de micro-capteurs mesurant en temps réel les polluants suivants : les particules fines (PM₁₀ et PM_{2.5}), le dioxyde d'azote et l'ozone sur une période d'un an (de juillet 2023 à juin 2024). Ces mesures en temps réel sont complétées par des prélèvements de particules en suspension sur deux périodes (estivale et hivernale pendant 8 semaine chacune) qui ont fait l'objet de caractérisations morpho-chimiques par de nombreuses méthodes analytiques ;
- **Phase 3** : une phase de traitement et d'analyse des données récoltées.

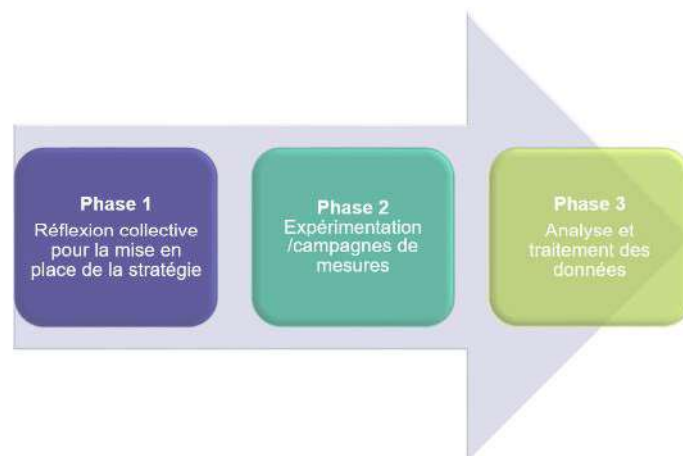


Figure 6: Principales phases du projet.

3.3 Description de la zone d'étude

La zone de l'étude couvre les dix communes du Pays du Mont-Blanc.

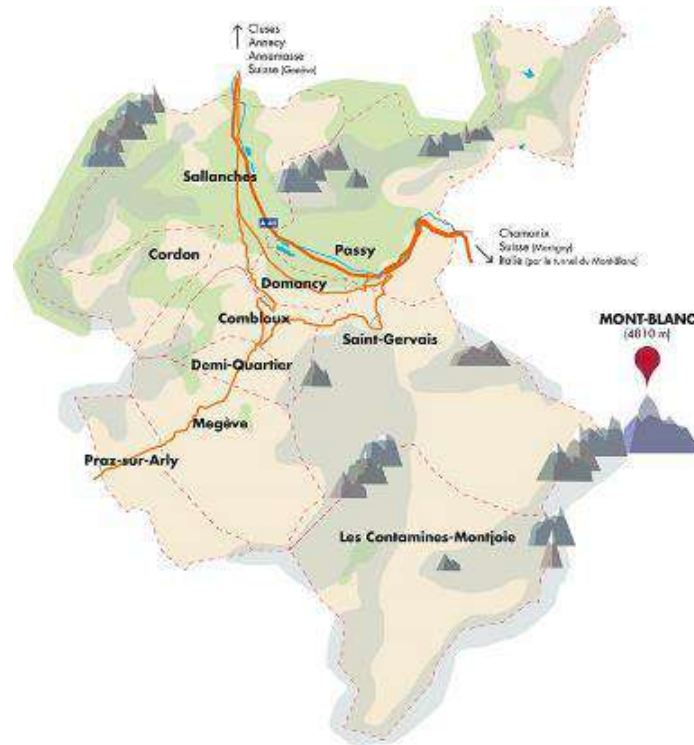


Figure 7: Cartographie du territoire de la CCPMB (source site web CCPMB).

Afin de mieux connaître le territoire de la CCPMB et choisir les sites qui recevront les instruments de mesures, **une visite du territoire a été effectuée par l'équipe projet Cerema-Particle Vision en mars 2023.**

L'équipe projet en concertation avec les élus a défini des sites susceptibles de recevoir des appareils de mesures, afin d'affiner la connaissance sur la qualité de l'air de la CCPMB et de mieux appréhender les évolutions de la pollution atmosphérique sur les coteaux de la vallée, dans les villages en moyenne altitude, dans les vallées secondaires et en haute altitude.

3.4 Localisation des sites de mesures

La cartographie (figure 8) montre la localisation des points de mesures. Les points en rouge sont équipés des micro-capteurs WT1 pour le suivi en temps réel et de préleveurs (passif et actifs) de particules. Les points jaunes sont équipés seulement de micro-capteurs WT1 pour la mesure en temps réels. L'ensemble des sites est équipé également de tubes passifs NO₂ et O₃, ce qui permettra d'avoir une concentration moyenne sur la durée de prélèvement et aussi de comparer les données remontées par les micro-capteurs.

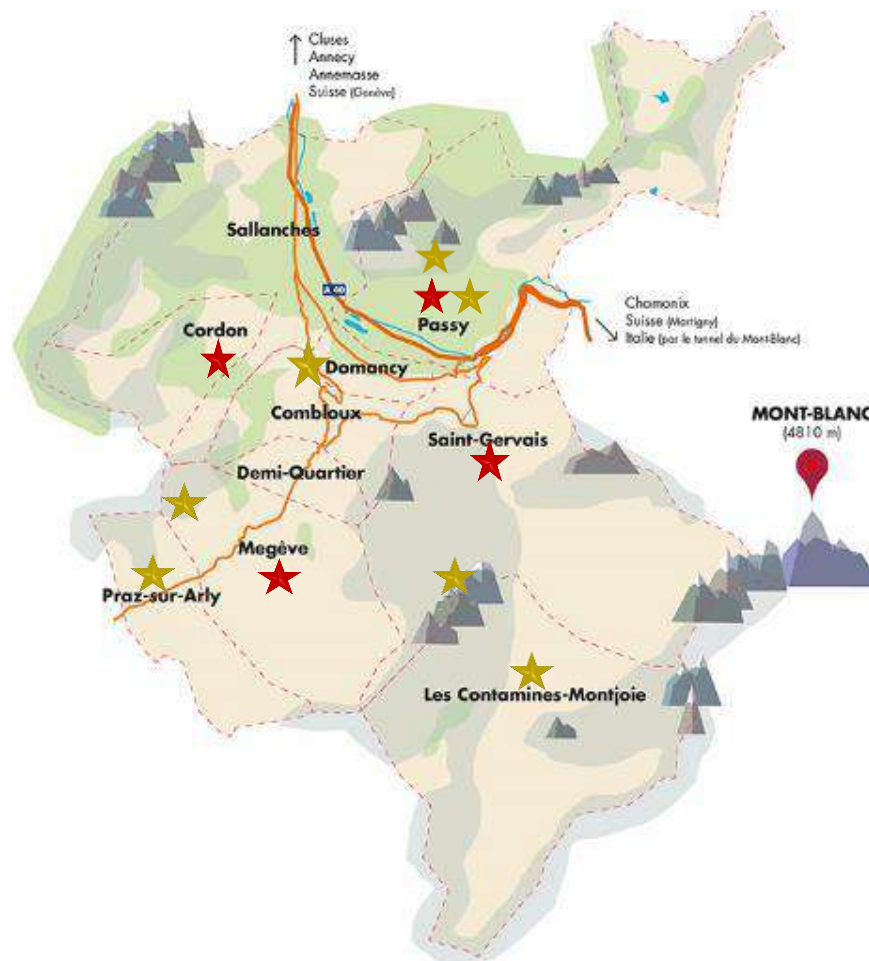


Figure 8: Localisation des sites de mesures.

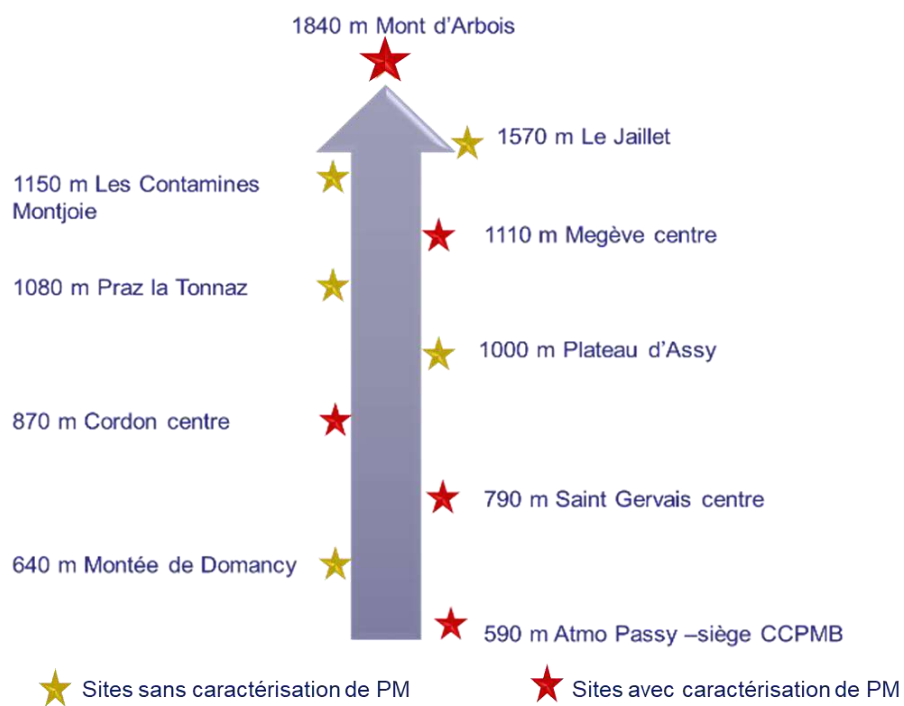







Figure 9: Altitude des différents points de mesures.

Ci-dessous les photos des sites de mesures équipés par les moyens de mesures.

<p>Atmo Passy</p>	<p>Siège CCPMB</p>
	
<p>Montée de Domancy</p>	<p>Saint-Gervais centre</p>
	
<p>Cordon centre</p>	<p>Plateau d'Assy</p>
	

Praz la Tonnaz



Megève centre



Les Contamines Montjoie



Le Jaillet



Mont d'Arbois



3.5 Le choix du capteur

Une importante attention au choix de micro-capteur a été accordée par le Cerema afin de garantir la meilleure fiabilité et performance de la mesure. Le Cerema s'est basé sur des **critères rigoureux** de sélection des micro-capteurs :

- Un retour d'expérience national que mène le Cerema depuis 2022 dans le cadre d'un projet qu'il porte sur l'évaluation des réseaux micro capteurs mis en place par les collectivités. Ce projet est réalisé dans le cadre d'un **programme national** (<https://www.cerema.fr/fr/programme-qualite-air>) mis en place par le Cerema dans le cadre d'une première astreinte de 10 millions d'euros versée par l'Etat pour le non-respect de ses engagements en matière de lutte contre la pollution de l'air à hauteur d'une enveloppe de 2,5 millions d'euros pour le Cerema qui a ainsi lancé 34 projets pour améliorer la qualité de l'air dans les territoires. Ce projet nous a permis d'avoir une vision globale sur les micro-capteurs largement déployés par les collectivités et leur performance, complété par une veille technologique. Le Cerema a ainsi pu identifier des fournisseurs potentiels de micro-capteurs.
- L'analyse et la prise en compte du **classement AirLab Challenge** (<https://airparif.shinyapps.io/ChallengeResultsFR/>) organisé par Airparif tous les ans. Le Cerema a porté particulièrement attention non seulement à la note globale donnée aux capteurs mais surtout à la note donnée sur la partie « pertinence » et « exactitude ».
- L'analyse et la prise en compte des résultats de l'étude menée par **l'INERIS en 2018[15]** sur l'évaluation des micro-capteurs sur le terrain pour la surveillance de la qualité de l'air en site fixe.

Pour le choix du capteur adapté au territoire de la CCPMB, le Cerema a mené une étude (dans le cadre du Programme National Qualité de l'air du Cerema) d'évaluation de 3 types de micro-capteurs commercialisés par 3 fournisseurs différents, dont les performances sont satisfaisantes.

Les 3 types de micro-capteurs étudiés sont les suivants que nous avons nommés A, B et C pour des raisons de confidentialité:

- Micro-capteurs A
- Micro-capteurs B
- Micro-capteurs C

Le tableau 1 présente le principe de mesures des polluants par les micro-capteurs.

Tableau 1: Principe de mesure des polluants par les micro-capteurs.

Polluants	Principe de mesure	Limites
Les particules	Comptage optique des particules présentes dans un volume d'air pompé à l'aide d'une micro-pompe (prélèvement actif). Ensuite, le nombre de particules est converti en une masse en appliquant une densité moyenne par particule selon sa taille afin d'obtenir une concentration massique ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).	<p>Le risque de compter des gouttelettes d'eau (surestimation) d'un brouillard ou brume étant des particules. Les capteurs ne font pas la différence entre particule solide et liquide. Globalement, les capteurs ne sont pas équipés d'un système de séchage de l'air comme pour les appareils réglementaires.</p> <p>Selon la source d'émission de particules leur masse/densité pour une même taille de particule diffère de la masse/densité moyenne utilisée pour la conversion nombre de particule/masse.</p>
Les gaz (NO_2 et O_3)	Réaction électrochimique liée au composé détecté qui va induire une variation de courant. Ce dernier permet de déterminer la quantité d'électrons en mouvement et de la relier à la concentration du gaz dans l'air.	<p>Ils sont fortement influencés par les conditions ambiantes (pression, humidité et température).</p> <p>Ils peuvent subir des interférences de molécule de même nature (par exemple, O_3 peut interférer sur les mesures de NO_2 et inversement).</p> <p>Leur durée de vie limité à 1 an généralement (consommation de l'électrolyte).</p> <p>Limite de détection qui reste élevé ($17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la mesure de NO_2).</p>

Pour ce faire, une étude d'inter-comparaison entre capteurs et analyseurs de référence a été réalisée spécifiquement au Pays du Mont Blanc, à proximité de la station Atmo Passy (étude réalisée dans le cadre du Programme National Air du Cerema).

Idéalement dans les études d'évaluation de micro-capteurs, il est recommandé d'utiliser 3 exemplaires pour le même système afin d'étudier la répétabilité entre les capteurs de même marque. Dans le cadre du projet, pour chaque fournisseur, 2 micro-capteurs identiques ont été déployés à chaque fois en parallèle (budget restreint).

L'expérimentation d'inter-comparaison, d'une durée de 3 semaines, a été réalisée entre le **17/03/23** et **11/04/23** à proximité de la station Atmo Passy (station de fond urbain).

La figure 10 montre l'emplacement des capteurs par rapport à la station Atmo Passy et la figure 11 une photographie des capteurs.



Figure 10: Emplacement des capteurs par rapport à la station Atmo Passy.

Un protocole strict d'évaluation des performances des micro-capteurs a été suivi. Ce dernier est issu de l'étude LCSQA «1^{er} essai national d'aptitude des micro-capteurs pour la surveillance de la qualité de l'air ». Il est à noter que dans cette étude, des évaluations en laboratoire et sur le terrain ont été effectuées avec l'analyse de plusieurs paramètres statistiques.

Dans notre protocole, trois paramètres ont été évalués :

- **La fiabilité** des capteurs qui correspond à la saisie minimale des données ou taux de recouvrement des données sur la période de mesures ;
- **La répétabilité** ou reproductibilité des capteurs qui correspond à la comparaison entre capteurs de même marque ;
- **La justesse** des capteurs qui correspond à la comparaison avec un instrument dit de référence.



Figure 11: Photographie des capteurs.

Synthèse des résultats de l'étude d'inter-comparaison pour le choix du capteur

- **Fiabilité**

L'ensemble des trois types de capteurs étudiés ont montré une très bonne fiabilité avec un taux de recouvrement de 100%. Il faut préciser que les capteurs ont été branchés sur secteur pour leur alimentation électrique afin d'assurer la continuité des mesures.

- **Reproductibilité**

Les particules (PM₁₀ et PM_{2,5}) : les trois types de capteurs évalués ont montré une reproductibilité satisfaisante avec un coefficient de détermination $R^2 > 0,75$ que ce soit pour les PM₁₀ ou PM_{2,5}.

Le dioxyde d'azote (NO₂) : les capteurs B et A ont montré une reproductibilité moyennement satisfaisante et satisfaisante respectivement avec un coefficient de détermination pour B de $0,5 < R^2 < 0,75$ et $R^2 > 0,75$ pour A. En revanche, l'évaluation de la reproductibilité des capteurs C n'a pas pu être effectué en raison de données insuffisantes de l'un des capteurs.

L'ozone (O₃) : les deux types de capteurs évalués (B& C), les comparaisons inter-capteurs ont montré une reproductibilité satisfaisante avec un coefficient de détermination $R^2 > 0,75$.

- **Justesse**

Les particules (PM₁₀ et PM_{2.5}) :

Pour les capteurs **B**, un capteur sur 2 a montré une corrélation moyennement satisfaisante avec $0,5 < R^2 < 0,75$ pour les PM₁₀ (avec possibilité d'appliquer une correction pour le 2ème capteur). Et une corrélation non satisfaisante pour les PM_{2.5} pour les 2 capteurs comparés à l'instrument de référence ($R^2 < 0,5$).

Pour les capteurs **A**, les 2 capteurs évalués ont montré des corrélations non satisfaisantes pour les PM₁₀ et PM_{2.5} ($R^2 < 0,5$).

Pour les capteurs **C**, les 2 capteurs évalués ont montré des corrélations moyennement satisfaisantes pour les PM₁₀ et PM_{2.5} ($0,5 < R^2 < 0,75$).

Le dioxyde d'azote (NO₂) :

Pour les capteurs B, les résultats de comparaison entre capteurs et instrument de référence ont montré des corrélations moyennement satisfaisantes ($0,5 < R^2 < 0,75$) pour les 2 capteurs B et un capteur sur deux pour le capteur C.

L'ozone (O₃) :

Les résultats de comparaison entre les capteurs et la référence ont montré une corrélation satisfaisante ($R^2 > 0,75$) pour les deux marques de capteurs évalués (B et C).

Au regard de ces résultats issus des comparaisons entre capteurs et les instruments de référence (Atmo Passy), le choix a été porté sur les capteurs WT1 d'Ellona (nommé B) qui répondaient à l'ensemble des critères d'évaluation, de plus, le fournisseur s'est montré plus réactif par rapport aux autres.

4 POLLUANT MESURES ET RAPPEL DE LA REGLEMENTATION

4.1 Polluants mesurés

Les polluants atmosphériques suivis dans le cadre de ce projet sont définis à partir des principales sources d'émissions identifiées sur le territoire de la Communauté de Communes Pays du Mont-Blanc.

Trois polluants réglementés ont été surveillés finement et témoignent de la qualité de l'air dans les zones urbaines :

4.1.1 Les particules en suspension PM₁₀ et PM_{2.5}

Les particules sont un mélange complexe de particules extrêmement petites de nature minérales et organiques, qui peuvent être d'origine naturelle ou anthropique. Les sources naturelles comprennent les volcans, les incendies, les tempêtes de poussières, érosion des sols, pollens, etc. Les sources anthropiques proviennent majoritairement de toutes les combustions incomplètes liées aux activités industrielles ou domestiques (chauffage par exemple), ainsi qu'aux transports, activités de construction/carrière/mine et l'agricultures (épandage par exemple). Leur origine influence leur composition chimique et leur taille.

Les particules sont classées en fonction de leur taille :

- PM₁₀ : particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 micromètres. Généralement, elles sont retenues au niveau du nez et les voies aériennes supérieures ;
- PM_{2.5} : particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 2,5 micromètres. Elles pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire jusqu'aux alvéoles pulmonaires et peuvent passer dans la circulation sanguine.

Les particules peuvent être émises directement dans l'air et sont alors qualifiées de **particules primaires**. Elles peuvent aussi être issues de réactions chimiques complexes à partir de gaz précurseurs dans l'atmosphère (combinaison de NH₃ et oxydes d'azote par exemple) et sont alors qualifiées de **particules secondaire**. Dans l'air ambiant, les particules présentes sont à la fois primaires et secondaires.

Les particules sont extrêmement préjudiciables à la santé. Chez les individus sensibles, elles entraînent des irritations et des troubles respiratoires et sont liées à une augmentation de la mortalité (affections respiratoires, maladies cardiovasculaires, cancers, etc.).

4.1.2 Le dioxyde d'azote NO₂

Le dioxyde d'azote est un gaz émis lors des phénomènes de combustion : chauffage, production d'électricité, moteurs thermiques des véhicules, etc. Le dioxyde d'azote peut être émis directement, mais est également produit dans l'air à partir des émissions de monoxyde d'azote (NO), sous l'effet de leur transformation chimique en NO₂.

Le dioxyde d'azote est nocif pour la santé respiratoire. En effet, c'est un gaz irritant pour les bronches et favorisant les crises d'asthme et les infections pulmonaires. Les personnes asthmatiques et les jeunes enfants sont plus sensibles à ce polluant.

4.1.3 L'ozone O₃

L'ozone est un gaz présent naturellement dans l'atmosphère, il forme une couche dans la stratosphère (de 12 à 50 km au-dessus du sol), qui protège des rayons ultraviolets (plus de 97 % des rayons UV sont interceptés par cette couche). Dans les basses couches de l'atmosphère, la troposphère (0 à 12 km au-dessus du sol), l'ozone est en revanche un polluant atmosphérique nocif pour la santé humaine et la végétation à cause de son caractère oxydant.

L'ozone troposphérique se forme à partir de polluants primaires (oxydes d'azotes, composés organiques volatils, etc.) en période estivale sous l'effet du rayonnement solaire et lorsque les températures sont élevées. C'est donc un polluant « secondaire » car il n'est pas directement émis par une source.

L'ozone est un polluant à longue durée de vie, qui peut voyager de très longues distances. C'est un polluant qu'on trouve en faible concentration au centre-ville car il a la particularité d'être détruit en présence de polluants primaires (cycle formation-destruction). Donc il se retrouve en forte proportion en périphérie des grandes agglomérations et aussi lorsque l'altitude s'élève.

4.2 La réglementation

Afin de réduire la pollution de l'air et notamment limiter les effets de cette pollution sur la santé, il existe trois cadres:

4.2.1 Recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS)

Un premier cadre mondial est défini par l'OMS. Cette dernière détermine les niveaux d'exposition (en concentration et durée) en dessous desquels il n'a pas été observé d'effets nuisibles sur notre santé ou sur les végétaux, c'est ce que l'on appelle « valeurs guides de qualité de l'air ». Ces lignes directrices visent à donner des conseils sur la façon de réduire les effets sanitaires de la pollution aux responsables de l'élaboration des politiques. Elles apportent un référentiel commun au niveau international et permettent des comparaisons malgré des réglementations nationales différentes. Ces recommandations de l'OMS ne sont pas juridiquement contraignantes.

La dernière publication de ces lignes directrices date de septembre 2021. De nouveaux seuils de qualité de l'air y sont recommandés pour protéger la santé humaine. Ces nouveaux seuils ont été revus à la baisse par rapport à ceux de 2005.

4.2.2 Directives européennes

Au niveau européen, deux directives (UE) 2004/107 et (UE) 2008/50 fixent les objectifs de qualité de l'air en concentration concernant plusieurs polluants. Ces directives s'inspirent des lignes directrices de l'OMS.

Le Parlement européen a adopté **le 16 septembre 2024 la nouvelle directive européenne** sur la qualité de l'air. Elle vise notamment à fixer des normes de qualité de l'air intermédiaires pour 2030, pour s'approcher des valeurs-guides de l'OMS de 2021, puis de s'aligner sur les valeurs-guides de l'OMS au plus tard en 2050

La nouvelle directive fixe des valeurs limites de concentration plus strictes par rapport à celles fixées par la directive 2008/50/CE, qui sont actuellement en vigueur. Ces normes sont à respecter au 1^{er} janvier 2030.

4.2.3 La réglementation française

En France, les directives européennes sont transposées en droit français par l'articles R 221-1 du code de l'environnement et par l'arrêté du 19 avril 2017 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant. La réglementation française peut ajouter des critères plus restrictifs que ceux imposés par la Commission Européenne.

4.2.4 Définitions des différentes valeurs réglementaires

La réglementation française fixe six valeurs pour juger de l'impact potentiel des polluants sur la santé humaine et sur l'environnement:

- **Valeur limite** : niveau à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser, et fixé sur la base des connaissances scientifiques afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble.
- **Valeur cible** : niveau à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné, et fixé afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou l'environnement dans son ensemble.
- **Objectif de qualité** : niveau à atteindre à long terme et à maintenir, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble.

- **Niveau critique** : niveau fixé sur la base des connaissances scientifiques, au-delà duquel des effets nocifs directs peuvent se produire sur certains récepteurs, tel que les arbres, les autres plantes ou écosystèmes naturels, à l'exclusion des êtres humains.
- **Seuil d'information et de recommandation** : niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine de groupes particulièrement sensibles au sein de la population et qui rend nécessaire l'émission d'informations immédiates et adéquates à destination de ces groupes et des recommandations pour réduire certaines émissions.
- **Seuil d'alerte** : niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de l'ensemble de la population ou de dégradation de l'environnement, justifiant l'intervention de mesures d'urgence.

4.2.5 Récapitulatif des normes de qualité de l'air

Le tableau 2 résume les normes de qualité de l'air pour la protection de la santé humaine fixées par la réglementation en vigueur, la nouvelle directive révisant l'actuelle et comparaison avec les valeurs guide de l'OMS 2021.

Tableau 2: Récapitulatif des normes qualité de l'air.

Polluant	Périodicité	Type de norme	Norme en vigueur	Dépassement autorisés	Norme révisée adoptée pour 2030	Dépassement autorisés	Valeurs guides de l'OMS 2021
PM _{2.5}	Annuelle	Valeur limite	25 µg/m ³	-	10 µg/m ³	-	5 µg/m ³
	24h	Valeur limite	Pas de norme	-	25 µg/m ³	18 fois / an	15 µg/m ³
PM ₁₀	Annuelle	Valeur limite	40 µg/m ³	-	20 µg/m ³	-	15 µg/m ³
	24h	Valeur limite	50 µg/m ³	35 fois / an	45 µg/m ³	18 fois / an	45 µg/m ³
NO ₂	Annuelle	Valeur limite	40 µg/m ³	-	20 µg/m ³	-	10 µg/m ³
	24h	Valeur limite	Par de norme	-	50 µg/m ³	18 fois / an	25 µg/m ³
	1h	Valeur limite	200 µg/m ³	3 fois / an	200 µg/m ³	3 fois / an	-
O ₃	Moy.jour.max.sur 8h	Valeur cible	120 µg/m ³	25 jours/ an (en moy. Sur 3 ans)	120 µg/m ³	18j/an (moy.sur 3 ans)	100 µg/m ³
	Moy.jour.max.sur 8h	Objectif à long terme	120 µg/m ³	-	100 µg/m ³ *	3 jours / an	

*A atteindre en 2050 et non 2030.

5 METHODOLOGIE DES CAMPAGNES DE MESURES

Le projet est basé sur des mesures en temps réel et en continu pour une durée d'un an avec 2 campagnes estivale et hivernale de prélèvement de particules. Des campagnes d'inter-comparaison des capteurs avec la station de référence Atmo Passy ont été réalisées avant et après chaque campagne.

La figure 12 présente le calendrier des campagnes de mesures ainsi que les différentes campagnes d'inter-comparaison des capteurs avec la station de référence Atmo Passy.

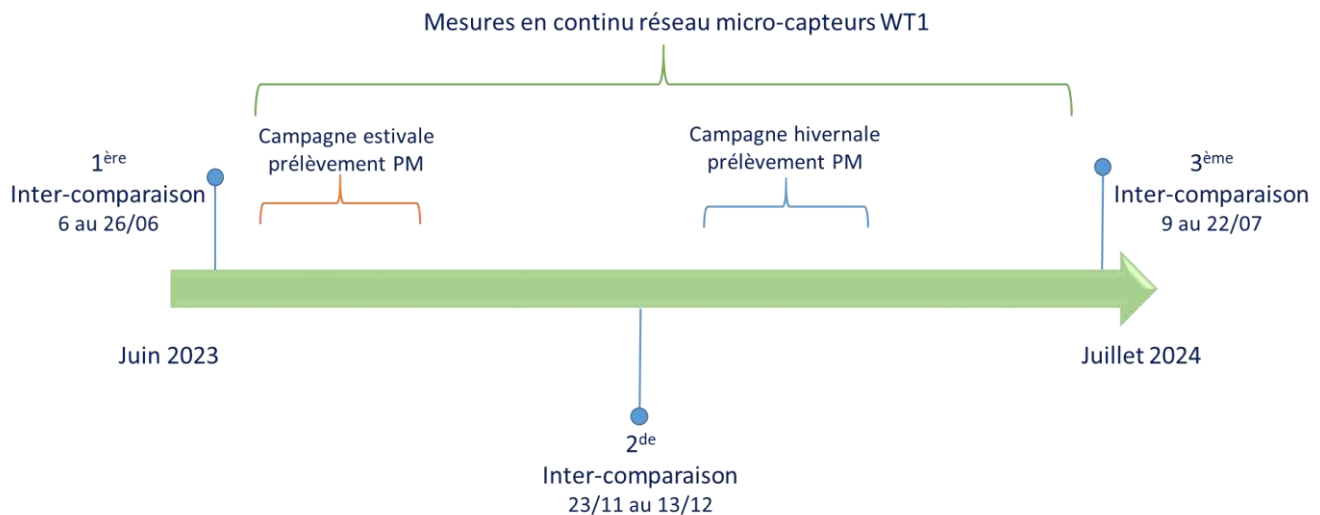


Figure 12: Calendrier des campagnes de mesures.

Les principales étapes méthodologiques sont les suivantes :

- 1^{ère} campagne d'inter-comparaison (du 6 au 26 juin 2023), avant le déploiement des dix capteurs sur les différents sites de mesures, une étude d'inter-comparaison, d'une durée de trois semaines (en juin 2023), a été réalisée sur la station Atmo Passy afin de s'assurer de la fiabilité des données remontées par les micro-capteurs.
- Les mesures en temps réel par déploiement d'un réseau de micro-capteurs WT1 (Ellona), ont été réalisées sur une durée d'un an de juillet 2023 à juin 2024. Les polluants mesurés sont : les particules (PM₁₀, PM_{2.5} et PM₁), le dioxyde d'azote (NO₂) et l'ozone (O₃).

En complément des mesures en temps réel par micro-capteurs, il a été décidé d'équiper les sites de mesures, en parallèle des capteurs, de tubes passifs pour le prélèvement du dioxyde d'azote et de l'ozone, ceci en cours de campagne et dans le contexte de mesures en dessous de limite de détection pour les capteurs WT1.

- Campagne estivale de prélèvement et caractérisation des particules en suspension dans l'air (du 27 juin au 24 août 2023), deux types de prélèvement ont été effectués : des prélèvements actifs à l'aide des préleveurs à faible volume de la marque Leckel pour la fraction fine (PM_{2.5}) et des prélèvements passifs à l'aide des échantillonneurs Sigma 2 pour la fraction grossière (PM_{10-2.5}). 8 semaines de prélèvement ont été effectuées avec changement des filtres toutes les deux semaines. Seuls deux filtres pour chaque site ont été sélectionnés pour la caractérisation. Le choix des filtres (périodes) à caractériser a été réalisé en tenant compte principalement des conditions météorologiques.
- 2^{ème} campagne d'inter-comparaison (du 23 novembre au 13 décembre 2023), avant le lancement de la campagne hivernale, elle a été effectuée pendant 3 semaines entre novembre-décembre 2023. Cette dernière a permis de valider les données de mesures estivales et de s'assurer de la qualité des données en amont de la campagne hivernale.
- Campagne hivernale de prélèvement et caractérisation des particules en suspension (du 14 décembre 2023 au 15 février 2024), même démarche que pour la campagne estivale.

- 3^{ème} campagne d'inter-comparaison (du 9 au 22 juillet 2024), cette dernière a permis la validation des données remontées par les capteurs et de vérifier s'il y a eu une dérive ou non après un an de mesure.

Pour les 2 campagnes de prélèvements de particules, 8 semaines d'échantillonnage ont été effectuées pour chaque campagne, avec changement des filtres toutes les 2 semaines, ce qui correspond au total 4 périodes. Seulement 2 périodes ont été caractérisées et ont été choisies en fonction des conditions météorologiques. Pour chacune des deux campagnes estivale et hivernale, 2 semaines en périodes scolaires et 2 autres en dehors des périodes scolaires ont été visées afin de voir, en plus de la saisonnalité, l'influence de la période touristique.

Avec cette proposition, la durée d'expérimentation proposée répond à la directive 2008/50/CE du Conseil, du 21 mai 2008, qui préconise que lors de mesures indicatives, la période minimale prise en compte doit correspondre à 14 % de l'année, soit 8 semaines également réparties sur l'année.

6 MOYENS DE MESURES

6.1 Les micro-capteurs

Les micro-capteurs pour la surveillance de la qualité de l'air ont connu une popularité croissante ces dernières années. Ces dispositifs miniaturisés ont de nombreux **avantages**:

- Leur coût réduit au regard des dispositifs dits « de référence » pour la mesure de la qualité de l'air ;
- Leur facilité d'installation et d'utilisation permettant de disposer d'une couverture spatiale plus importante (réseau de mesure à titre d'exemple) ;
- Leur capacité à fournir des données en temps réel et de manière simultanée plusieurs polluants dans la majorité des cas.

Cependant, ces micro-capteurs présentent également des **limites** :

- Leur précision est limitée par rapport aux instruments de référence utilisés notamment par Atmo ;
- Ils ne sont pas homologués (réglementés) contrairement aux instruments de référence ;
- Leur durée de vie est limitée en raison de la consommation de l'électrolyte pour les capteurs gaz et l'ancrage pour les capteurs optiques de particules (généralement un an pour les gaz et jusqu'à 2 ans pour les particules) ;
- Il est recommandé pour leur utilisation des inter-comparaisons régulières avec les instruments de référence afin de valider leur précision ;
- Ils ne sont pas tous équivalents en terme de performance et de qualité de mesure, et leur sélection peut être difficile pour les utilisateurs qui ne disposent pas de connaissances techniques nécessaires.

Dans le cadre de ce projet, une étude rigoureuse a été menée par le Cerema pour le choix du capteur et un protocole strict d'évaluation et de validation métrologique a été suivi (cf. Paragraphe 3.5).

Le choix du capteur a été porté sur la marque WT1 du fournisseur français Ellona.

6.2 Les tubes passifs pour la mesure des gaz

En complément des mesures en temps réel par micro-capteurs, le groupement Cerema –Particle Vision a souhaité déployer des tubes passifs pour l'échantillonnage des gaz NO₂ et O₃ sur l'ensemble des sites de mesures en raison des premiers résultats parfois inférieurs à la limite de détection des micro-capteurs. Cette technique d'échantillonnage passif a été largement éprouvée sur le terrain pour la mesure de NO₂ notamment (utilisée notamment par les AASQA et le Cerema lors de plusieurs campagnes de mesures). Cette technique permet d'équiper un nombre important de sites sans coût excessif, ce qui constitue un complément aux mesures en continu réalisées par les capteurs et permettre la comparaison des concentrations obtenues sur la même période des deux techniques. Ainsi, et au regard de la limite de détection des capteurs pour la mesure de NO₂ (17 µg/m³) qui ne semble pas adaptée car supérieure aux niveaux de fond mesurés à la station Atmo Passy (13,3 µg/m³ en moyenne annuelle 2022), les mesures de NO₂ par tube passif permettront de valider ou non les mesures de NO₂ par les micro-capteurs en particulier sur les concentrations en dessous de la limite de détection des capteurs. Toutefois, les tubes passifs fournissent uniquement une concentration mesurée moyenne sur la durée de prélèvement et non pas en temps réel.

Dans le cadre de ce projet, des tubes passifs développés et distribués par le laboratoire Suisse Passam AG ont été utilisés. La prestation de Passam AG inclut la fourniture du matériel ainsi que l'analyse chimique des tubes en laboratoire.

Le principe de mesure d'un polluant **par échantillonnage passif** est basé sur la diffusion passive de molécules de polluants à travers une couche d'air délimité par un tube jusqu'à un support adsorbant contenant le réactif chimique.

La quantité de molécules piégées sur l'adsorbant est proportionnelle à sa concentration dans l'air ambiant. Les supports adsorbant **sont ensuite analysés en laboratoire** et donnent une concentration moyenne (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur l'ensemble de la durée d'exposition.

Cette technique d'échantillonnage passif présente plusieurs intérêts :

- Ne nécessite pas d'alimentation électrique ;
- Mise en œuvre facile ;
- Faible coût ;
- Ne nécessite pas d'étalonnage sur le terrain ;
- Possibilité d'équiper un grand nombre de sites.



Figure 13: Photographie d'une installation des tubes NO_2 et O_3 (à gauche), tube NO_2 (au milieu) et tube O_3 (à droite).

Le tableau 3 ci-après présente les caractéristiques techniques des tubes passifs NO_2 et O_3 (fiches techniques jointes avec le rapport).

Tableau 3: Caractéristiques techniques des tubes passifs NO_2 et O_3 .

	NO_2	O_3
Gamme de mesure	1-200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	15-240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Limite de détection	0,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (pour 1 mois de prélèvement)	2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (pour 2 semaines de prélèvement)
Temps de prélèvement	1 à 4 semaines	1 à 4 semaines
Norme	EN 13528/EN16339	EN 13528
Analyse en laboratoire	Photométrie	Chromatographie ionique

Chaque site a été équipé de doublons, c'est-à-dire 2 échantillonneurs passifs identiques pour chacun des polluants mesurés NO_2 et O_3 qui permettent de vérifier la répétabilité des tubes. Si les deux résultats des doublons sont considérablement différents, la campagne de mesures est invalidée. Cette situation ne s'est pas présentée dans le cadre de cette étude lors de la campagne estivale. Dans le cas de sites bénéficiant de doublons, la concentration retenue correspondra à la moyenne des concentrations des 2 tubes passifs déployés (résultats des tubes passifs en **Annexe 13.3**).

Pour la validation métrologique des tubes, le site de la station Atmo Passy a été équipé à chaque fois de doublons pour la mesure du NO_2 et O_3 .

6.3 Prélèvements passifs/actifs et caractérisation des matières particulaires

La caractérisation détaillée des poussières fournit des informations sur l'origine des particules et la contribution des différentes sources. Les informations morpho-chimiques de l'analyse MEB/EDS en combinaison avec d'autres méthodes « bulk » (c'est-à-dire CI, TOT, etc.) permettent de définir la composition des $PM_{2.5}$ et PM_{10} , particules spécialement nocives à la santé.

En général, pour l'analyse des particules individuelles par microscopie, le prélèvement des particules est fractionné en fonction de leur taille afin d'éviter une surcharge des échantillons ce qui mènerait à un recouvrement des particules fines par des particules plus grossières. Ce fractionnement demande alors différentes méthodes d'échantillonnage sur des substrats/filtres distincts pour aboutir à des échantillons peu chargés. Au contraire, les échantillons destinés à l'analyse chimique par voie humide nécessitent une charge plus importante pour atteindre la limite de quantification.

6.3.1 Prélèvement de particules en suspension

L'échantillonnage passif a été effectué avec un préleveur Sigma-2 selon VDI2119 :2013 (Figure 14) sur des substrats de bore (produit chez Particle Vision) pour la quantification et la caractérisation de la fraction Coarse Mode/fraction grossière ($PM_{10-2.5}$). Les substrats de bore présentent un énorme avantage en permettant la caractérisation et la quantification des particules carbonées, ce qui n'est pas possible sur des substrats ordinaires qui contiennent eux-mêmes du carbone. Cet échantillonnage et la procédure analytique ont récemment été comparés et validés avec des méthodes de référence dans deux sites suisses (Zürich Kaserne et Bern Bollwerk) pour la fraction $PM_{10-2.5}$, dans le cadre d'une campagne de mesure annuelle mandatée par l'office fédéral de l'environnement suisse (OFEV). [14] [9]

Pour l'analyse chimique humide et la gravimétrie de la fraction $PM_{2.5}$, des échantillons ont été prélevés sur des filtres en fibre de quartz avec un débit de 200 l/h et en utilisant une tête d'impaction pour $PM_{2.5}$ (appareil Mini VS-C, Leckel) (Figure 14).



Figure 14: Collecteur passif Sigma-2 (en haut) pour l'échantillonnage passif des $PM_{10-2.5}$ et Mini VS-C Leckel (en bas) pour l'échantillonnage actif des $PM_{2.5}$ installés à la station de mesure Cordon centre.

La figure 15 montre le concept d'échantillonnage et ses méthodes analytiques correspondantes. Elle explique également de quelle manière les différents résultats sont finalement combinés et additionnés pour obtenir une caractérisation des $PM_{10-2.5}$, $PM_{2.5}$ et finalement PM_{10} la plus complète.

Le calcul de la concentration en PM_{10} est basé sur la somme des fractions grossière/coarse mode ($PM_{10-2.5}$) et fine ($PM_{2.5}$).

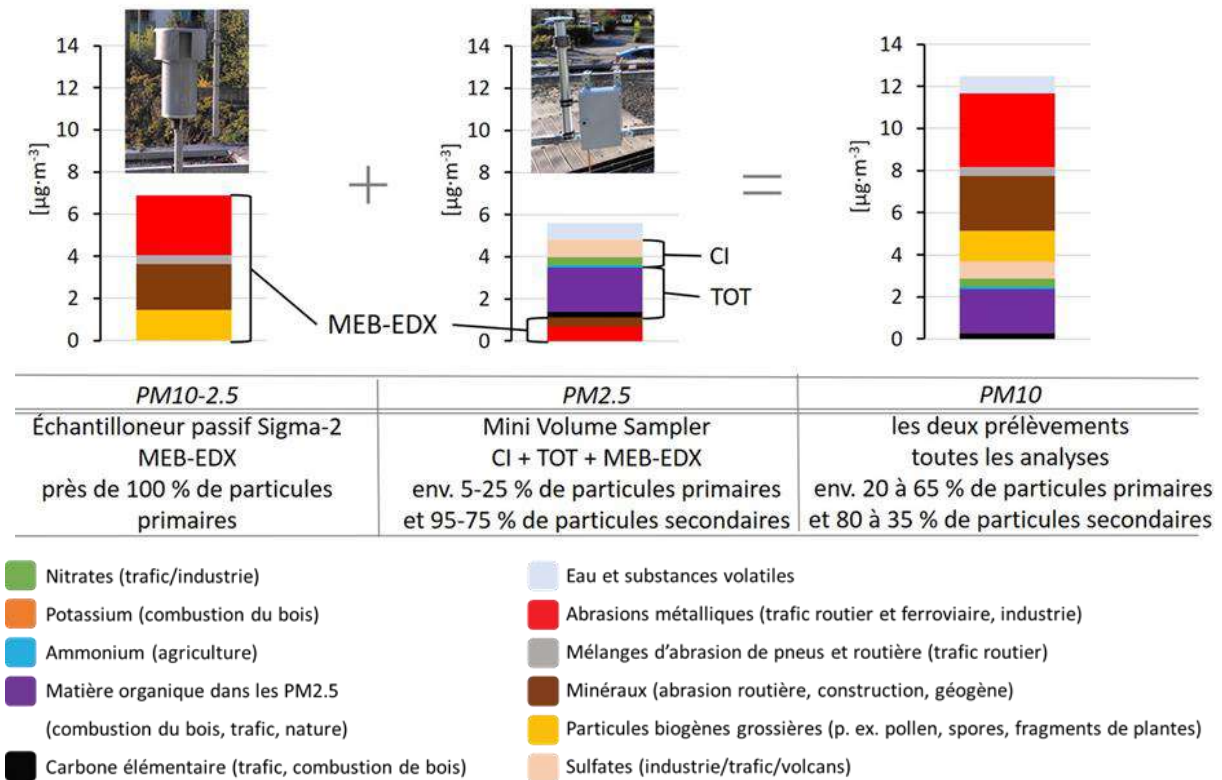


Figure 15: Vue d'ensemble des méthodes d'échantillonnage et analyse avec l'assemblage des données

MEB/EDS = microscopie électronique à balayage couplée à la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie, CI = chromatographie ionique, TOT = méthode thermo-optique en mode transmission, HPLC-PAD = high performance liquid chromatography with Pulsed Amperometric Detection.

6.3.2 Analyse

Les échantillons du Sigma-2 ($PM_{10-2.5}$, sur substrat de bore) ont été analysés par microscopie électronique MEB/EDS dans le laboratoire de Particle Vision Sarl à Fribourg. Les particules ont été classées en groupes morpho-chimiques à l'aide d'un classificateur de particules basé sur l'apprentissage automatique (IA). Les détails de cette méthode sont décrits en Rausch et al., 2022. Grâce à l'apprentissage machine, le nouveau classificateur prend en compte à la fois les paramètres morphologiques, propriétés de texture et la composition chimique des particules individuelles (67 paramètres au total). Il a été entraîné avec > 100000 particules provenant de différents endroits (urbains, rural, industriel, etc) et pays.

Les échantillons du mini volume sampler VS-C ($PM_{2.5}$, 200 l/h, sur filtre en quartz) ont été analysés par la méthode thermo-optique en mode transmission (TOT), par chromatographie ionique (CI) et par chromatographie liquide haute performance avec détection ampérométrique pulsée (HPLC-PAD) dans le laboratoire de l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) à Grenoble (France).

6.4 Synthèse des moyens de mesures déployés

Le tableau 4 résume l'ensemble des moyens de mesures déployés pour le suivi de la qualité de l'air au Pays du Mont-Blanc.

Tableau 4: Moyens de mesures mis en place pour le suivi de la qualité de l'air au Pays du Mont-Blanc.

Polluant mesuré	Type de prélèvement/ moyen de mesure	Description de la méthode	Norme	Analyse en laboratoire
Les particules PM ₁₀	Actif - Capteur WT1	Comptage optique des particules		
	Passif – échantillonneur Sigma 2 pour PM _{10-2,5}	Prélèvement sur substrat de bore	VDI2119 :2013	MEB/EDS des particules individuelles
Les particules PM _{2,5}	Actif - Capteur WT1	Comptage optique des particules		
	Actif – Mini VS-C	Prélèvement sur filtre en fibre de quartz	CEN EN12341	<u>Chromatographie ionique</u> pour quantifier les anions et les cations (sulfates, nitrates, ammonium); <u>Transmission thermo- optique</u> pour quantifier le carbone élémentaire et organique (CE/CO); <u>Chromatographie liquide haute performance (HPLC- PAD)</u> pour quantifier la fraction soluble des sucres (polyols), p.e. le lévoglucosan, qui est un traceur des particules générées par la combustion de biomasse.
Dioxyde d'Azote (NO ₂)	Actif – capteur WT1	Réaction électrochimique		
	Passif – tube Passam	Diffusion passive de polluant sur un adsorbant	EN16339/EN13528	Photométrie
Ozone (O ₃)	Actif – capteur WT1	Réaction électrochimique		
	Passif – tube Passam	Diffusion passive de polluant sur un adsorbant	EN13528	Chromatographie ionique

Le tableau ci-après présente les caractéristiques des différents points de mesures ainsi que les moyens déployés sur chacun des sites.

Tableau 5: Caractéristiques des points de mesures et les moyens de mesures déployés sur chacun des sites.

Site	Altitude (m)	Moyens de mesures	Polluants mesurés
Mont d'Arbois	1840	Capteurs WT1 Tubes passifs (gaz) Tube Sigma 2 (PM) Leckel mini-LVS	PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , O ₃ NO ₂ & O ₃ PM _{10-2.5} PM _{2.5}
Le Jaillet	1570	Capteurs WT1 Tubes passifs (gaz)	PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , O ₃ NO ₂ & O ₃
Les Contamines Montjoie	1150	Capteurs WT1 Tubes passifs (gaz)	PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , O ₃ NO ₂ & O ₃
Megève centre	1110	Capteurs WT1 Tubes passifs (gaz) Tube Sigma 2 (PM) Leckel mini-LVS	PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , O ₃ NO ₂ & O ₃ PM _{10-2.5} PM _{2.5}
Praz le Tonnaz	1080	Capteurs WT1 Tubes passifs (gaz)	PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , O ₃ NO ₂ & O ₃
Plateau d'Assy	1000	Capteurs WT1 Tubes passifs (gaz)	PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , O ₃ NO ₂ & O ₃
Cordon centre	870	Capteurs WT1 Tubes passifs (gaz) Tube Sigma 2 (PM) Leckel mini-LVS	PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , O ₃ NO ₂ & O ₃ PM _{10-2.5} PM _{2.5}
St-Gervais centre	790	Capteurs WT1 Tubes passifs (gaz) Tube Sigma 2 (PM) Leckel mini-LVS	PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , O ₃ NO ₂ & O ₃ PM _{10-2.5} PM _{2.5}
Montée de Domancy	640	Capteurs WT1 Tubes passifs (gaz)	PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , O ₃ NO ₂ & O ₃
Siège CCPMB	590	Tubes passifs (gaz) Tube Sigma 2 (PM) Leckel mini-LVS	NO ₂ & O ₃ PM _{10-2.5} PM _{2.5}
Atmo Passy	590	Capteurs WT1 Tubes passifs (gaz)	PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , O ₃ NO ₂ & O ₃

7 VALIDATION METROLOGIQUE DES MICRO-CAPTEURS

7.1 Caractéristiques des micro-capteurs Ellona WT1

Les capteurs Ellona WT1 (Watch Tower 1) sont des appareils de mesures conçus pour la surveillance de la qualité de l'air extérieur. Ils sont des capteurs multi-polluants, c-à-d, ils permettent la mesure de plusieurs polluants au même temps. Ils sont moins précis par rapport aux instrument de référence (site fixe), ce type de capteur permet d'avoir des mesures dites « indicatives » sur les niveaux de concentration.

Le tableau 6 montre les caractéristiques techniques des capteurs WT1.

Les caractéristiques techniques (gamme de mesure, limite de détection et la résolution) indiquées sur le tableau ci-dessus sont fournies par le fournisseur Ellona (fiche technique jointe avec le rapport).

Dans l'objectif d'évaluer les caractéristiques techniques des capteurs WT1, sont indiquées également sur le même tableau, les valeurs moyennes annuelles et le maximum annuel (valeur horaire) de 2022 de la station Atmo Passy (station de fond urbain), les valeurs réglementaires ainsi que les recommandations OMS.

Pour les autres polluants (PM_{10} et $PM_{2.5}$ et O_3), les capteurs WT1 présentent des caractéristiques adaptées et compatibles avec le contexte de la surveillance de la qualité de l'air au Pays du Mont Blanc.

Tableau 6: Caractéristiques techniques des capteurs WT1.

Polluants	Gamme de mesure	Résolution	Limite de détection	Station Atmo Passy (2022)		Réglementation			OMS	
				Moyenne annuelle	Max annuel (valeur horaire)	Annuelle	Journalière	Horaire	Annuelle	Journalière
				µg/m ³						
PM _{2,5}	0-1000	0,1	<0,1	14,6	126,5	10 (OQ)* 25 (VL)**			5	15
PM ₁₀				21,2	177,2	30 (OQ)* 40 (VL)**	50 (VL)** 80 (SA)****	15	45	
NO ₂	0-1000	6	17	13,3	72,6	40		200 (VL)** 400 (SA)****	10	25
O ₃		6	17	44,9	156,8		120 (OQ)*	180 (SIR)*** 240(SA)****		100

*OQ : Objectif qualité

**VL : Valeur limite

***SIR : Seuil d'information et recommandation

****SA : Seuil d'alerte

7.2 Validation métrologique par inter-comparaison des capteurs WT1 avec Atmo

Au regard des caractéristiques techniques des micro-capteurs WT1, il est indispensable de les calibrer sur le territoire de la CCPMB avant leur déploiement sur les sites de mesures mais aussi pendant et à la fin de la campagne de mesure en continu. Pour cela, trois campagnes d'inter-comparaison ont été effectuées (figure 16). Ces calibrations ont permis, si nécessaire, de corriger les données brutes des capteurs et de recalibrer les capteurs pour que la mesure soit au plus proche de celle relevée en simultanée par la station Atmo, prise comme référence, mais également de vérifier la non dérive des capteurs après chaque campagne de mesure et globalement après un an de mesures sur site.

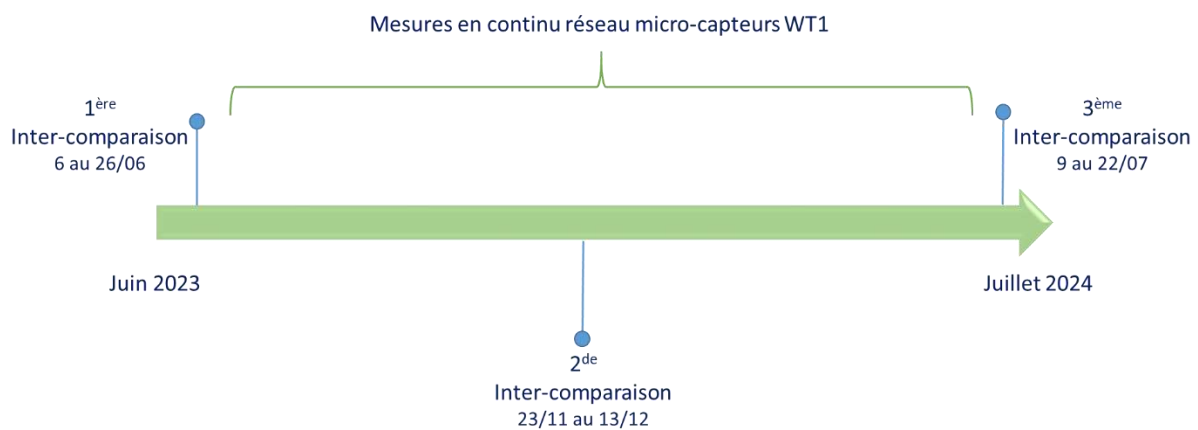


Figure 16: Calendrier des campagnes d'inter-comparaison.

Dans le cadre de ce projet, 10 micro-capteurs ont été déployés à proximité immédiate de la station Atmo Passy pour validation métrologique pour chacune des campagne d'inter-comparaison.

Pour chacune des campagnes d'inter-comparaison, les 10 capteurs WT1 ont été installés au niveau de la station Atmo Passy afin d'évaluer leur reproductibilité (comparaison inter-capteurs), leur fiabilité et leur justesse (comparaison aux instruments de référence). Les 10 capteurs ont été ensuite déployés sur les différents sites de mesures (hormis après la dernière inter-comparaison qui a permis la validation finale).

Le détail de cette étude d'inter-comparaison se trouve en **Annexe 13.2**. L'évaluation des différents paramètres a été étudiée sur l'ensemble du jeu de données horaires.

La figure 17 montre une photographie des micro-capteurs WT1 en inter-comparaison à la station Atmo Passy.



Figure 17: Photographie des micro-capteurs WT1 en inter-comparaison à la station Atmo Passy.

Synthèse des principaux résultats

- **La fiabilité**

L'ensemble des 10 capteurs WT1 étudiés ont montré une très bonne fiabilité avec un taux de recouvrement de 100% et ce pour les trois campagnes. Il faut préciser que les capteurs ont été branché sur secteur pour leur alimentation électrique afin d'assurer la continuité des mesures.

- **Reproductibilité et justesse**

Le tableau 7 résume les résultats des différentes campagnes d'inter-comparaison, en terme de reproductibilité (comparaison inter-capteurs) et de justesse (comparaison à la référence).

Tableau 7: Récapitulatifs des résultats des différentes campagnes d'inter-comparaison.

	1 ^{ère} inter-comparaison		2 ^{ème} inter-comparaison		3 ^{ème} inter-comparaison	
	Reproductibilité	Justesse	Reproductibilité	Justesse	Reproductibilité	Justesse
PM ₁₀	Satisfaisante (R ² > 0,90)	Moyennement satisfaisante (0,5 < R ² < 0,75)*	Satisfaisante (R ² > 0,90)	Moyennement satisfaisante (0,5 < R ² < 0,75)*	Satisfaisante (R ² > 0,90)**	Non satisfaisante (R ² < 0,5)
PM _{2.5}	Satisfaisante (R ² > 0,90)	Moyennement satisfaisante (0,5 < R ² < 0,75)*	Satisfaisante (R ² > 0,90)	Moyennement satisfaisante (0,5 < R ² < 0,75)*	Satisfaisante (R ² > 0,90)**	Non satisfaisante (R ² < 0,5)
NO ₂	Moyennement satisfaisante (0,5 < R ² < 0,75)	Moyennement satisfaisante (0,5 < R ² < 0,75)	Moyennement satisfaisante (0,5 < R ² < 0,75)	Moyennement satisfaisante (0,5 < R ² < 0,75)	Satisfaisante (R ² > 0,75)	Moyennement satisfaisante (0,5 < R ² < 0,75)
O ₃	Satisfaisante (R ² > 0,75)	Satisfaisante (R ² > 0,75)	Satisfaisante (R ² > 0,75)	Satisfaisante (R ² > 0,75)	Satisfaisante (R ² > 0,75)	Satisfaisante (R ² > 0,75)

*Des corrections ont été appliquées sur les 10 capteurs WT1 afin de les aligner aux données de référence.

** le capteur installé en permanence sur la station Atmo a enregistré des valeurs très faibles par rapport aux données Atmo et aux autres capteurs WT1.

8 CAMPAGNES DE PRELEVEMENT DE PARTICULES

Dans le cadre de ce projet, il a été décidé de réaliser deux campagnes pour le prélèvement des particules en suspension, une en été 2023 et une autre en hiver 2023-2024 pour obtenir une meilleure représentativité possible des résultats. En effet, durant les deux saisons, les sources peuvent être complètement différentes, notamment le chauffage résidentiel (au bois) en hiver. Donc la caractérisation des particules durant ces deux saisons a permis de différencier les sources et de déterminer la nature des particules (caractérisation morpho-chimique).

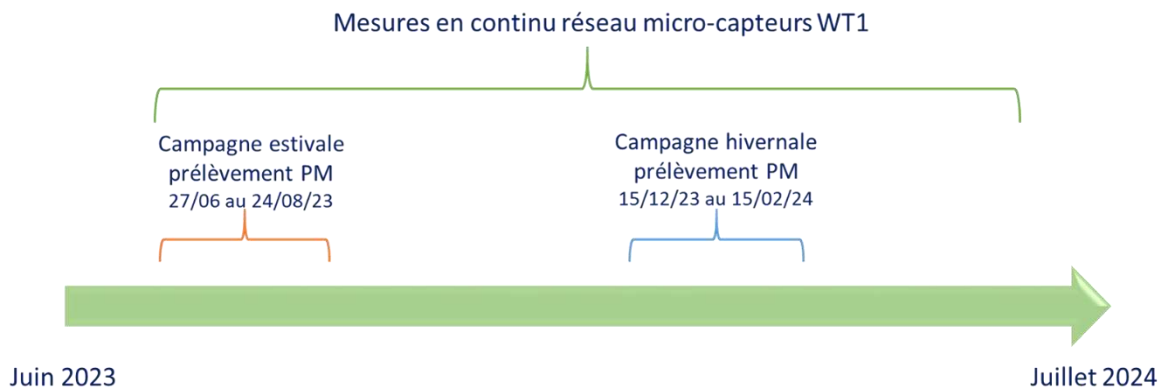


Figure 18: Calendrier des deux campagnes de prélèvement des particules en suspension, estivale et hivernale.

8.1 Campagne de prélèvement estivale

8.1.1 Conditions météorologiques

La concentration des polluants atmosphériques varie fortement selon les conditions météorologiques. Une connaissance de ces conditions lors des mesures permet de mieux comprendre et interpréter les niveaux des pollutions mesurées. Ces appréciations météorologiques s'appuient sur les données suivantes :

- Précipitations ou pluviométrie (paramètre déterminant pour le choix des périodes à caractériser : lessivage ou non de PM)
- Rose des vents (direction d'où vient le vent : détermination des sources)
- Humidité relative (pourrait avoir un impact sur la mesure des PM par les micro-capteurs)

4 stations météo à différentes altitudes ont été consultées sur le site infoclimat.fr et [météo France](https://météo.france.fr).

Tableau 8: Coordonnées des stations météo environnante.

Station	Altitude	Coordonnées	Remarques
Passy	890 m	45,92°N / 6,69°E	
Sallanches	571 m	45,94°N/ 6,63°E	
Mont d'Arbois	1833 m	45,86°N / 6,67°E	Pluviométrie non disponible
Chamonix-Mont-Blanc	1042 m	45,93°N / 6,88°E	Vents non disponibles

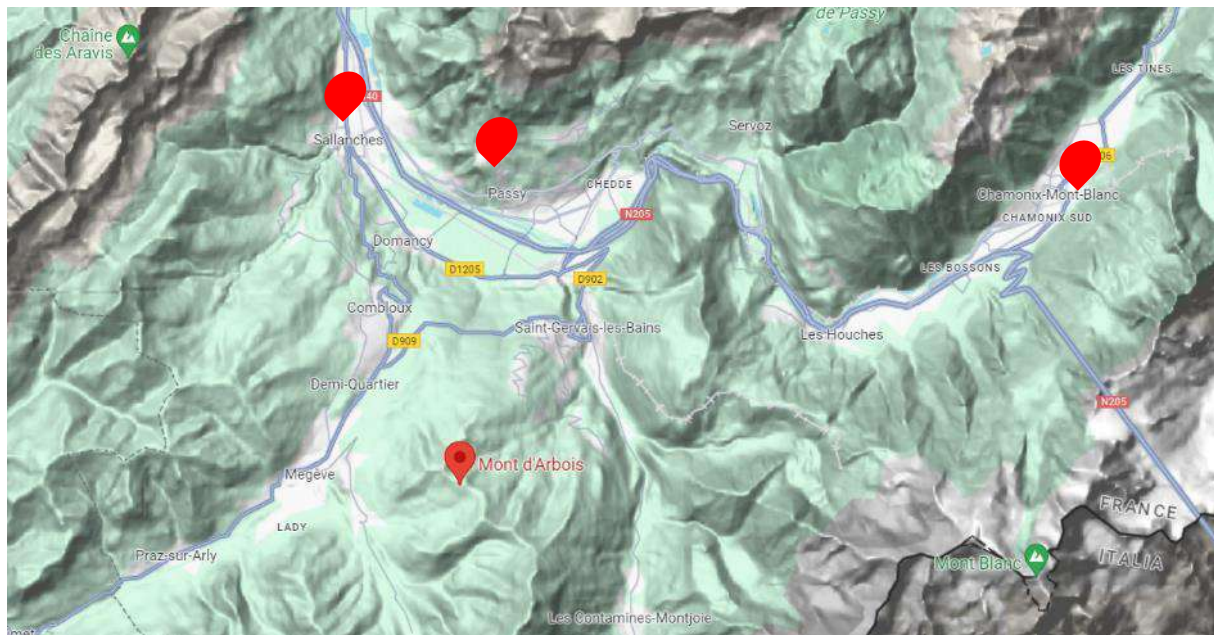


Figure 19: Localisation des stations météo environnantes dans le cadre du projet.

Sur cette partie, seront analysé les conditions météorologiques (précipitation et vents) pour les mois de juillet et août qui correspondent à la campagne estivale de prélèvement de particules.

- **Précipitations**

La figure 20 montre l'évolution des précipitations en moyenne journalière de juillet et août 2023 pour les stations de Sallanches, Passy et Chamonix (source Infoclimat.fr et météo France)

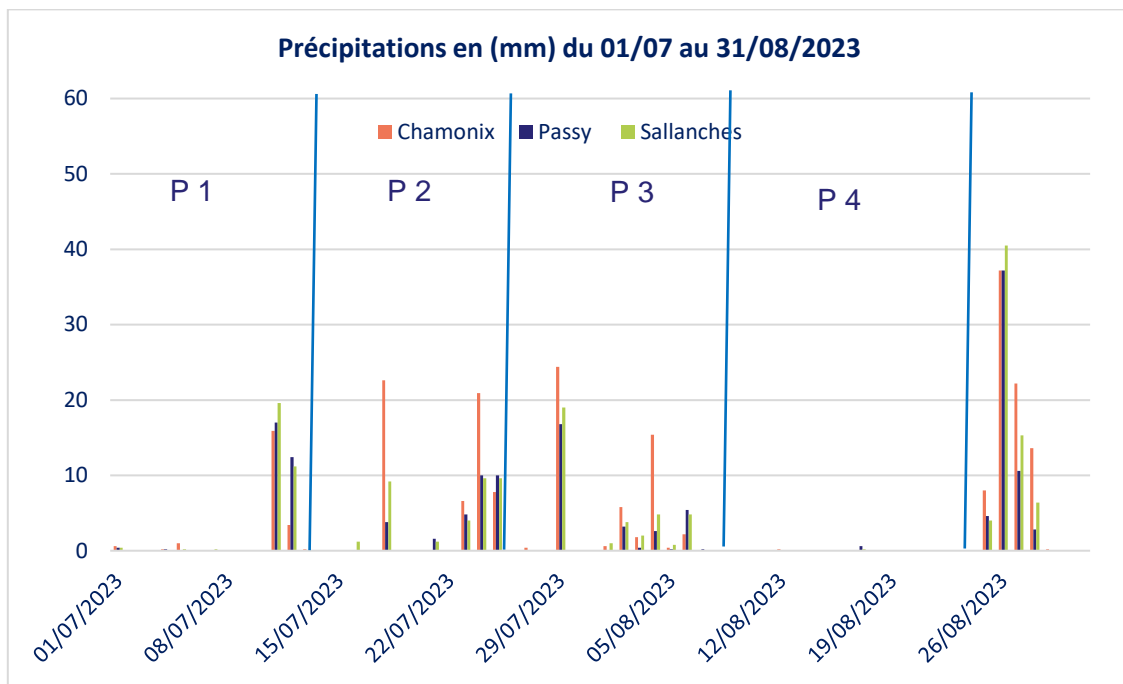
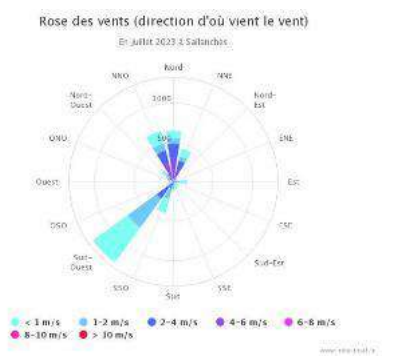
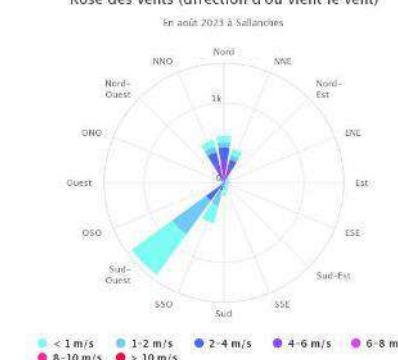
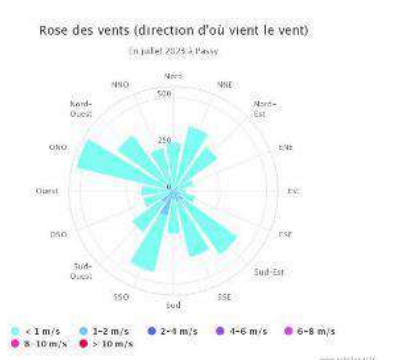
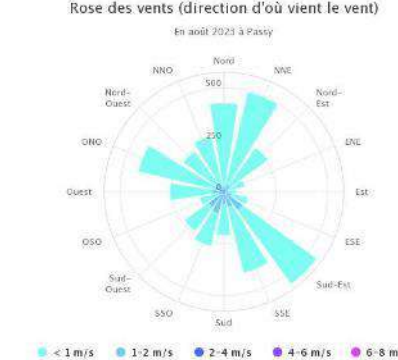


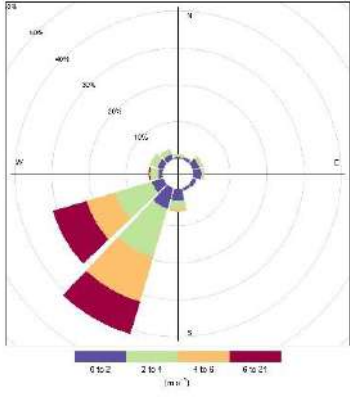
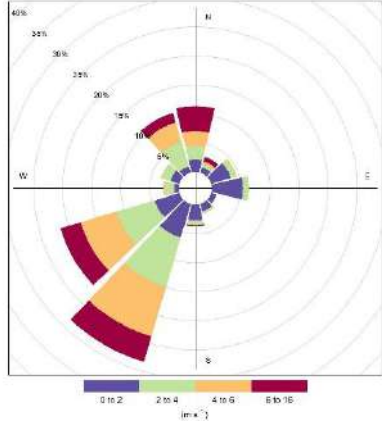
Figure 20: Précipitations en (MM) durant les mois de juillet et août 2023.

- Les 10 premiers jours du mois de juillet 2023 sont plutôt secs et le reste du mois a connu des précipitations avec un cumul allant de 72 à 96 mm (répartis sur 9 jours) pour les 3 stations météo consultées.
- Le mois d'août 2023 est plutôt sec du 7 au 24 et pluvieux la première et dernière semaine avec un cumul allant de 70 à 100 mm (répartis sur 10 jours) pour les 3 stations météo.

Vents

Sallanches	
Juillet 2023	Août 2023
	
Commentaires	
<ul style="list-style-type: none"> Les vents sont essentiellement de secteur Sud-Ouest pour la station de Sallanches, en majorité d'intensité faible à moyenne. 	

Passy	
Juillet 2023	Août 2023
	
Commentaires	
<ul style="list-style-type: none"> Pour la station de Passy, les vents observés sont de secteurs variables : SSO, ONO, NNE et SE. les vents sont en majorité d'intensité faible (inférieur à 4 m/s). 	

Mont d'Arbois	
Juillet 2023	Août 2023
	
Commentaires	
<ul style="list-style-type: none"> • Pour le mois de juillet, les vents sont de secteur SO avec intensité de moyenne à forte. • Pour le mois d'août, les vents sont de secteur SO et NO avec intensité de moyenne à forte. 	

8.1.2 Périodes de prélèvement

La campagne de prélèvement des particules estivale a eu lieu du 27 juin au 24 août 2023

En complément des mesures en temps réel, les sites ont été équipés, en parallèle des capteurs et des préleveurs de particules, de tubes passifs pour le prélèvement de NO₂ et O₃

La figure ci-après illustre les différentes périodes de prélèvement de particules.

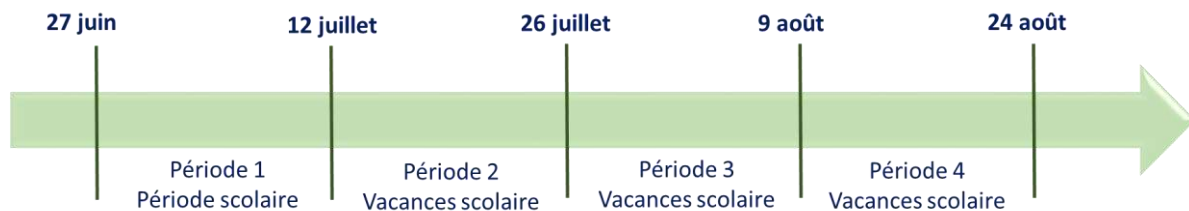


Figure 21: Périodes de prélèvement de particules lors de la campagne estivale.

Pour chaque site, 4 prélèvements ont été effectués toutes les deux semaines pendant deux mois du 27 juin au 24 août 2023, dont 2 périodes ont fait l'objet d'une caractérisation morpho-chimique.

Initialement 4 sites de prélèvement de particules ont été sélectionnés : Saint-Gervais centre, Cordon centre, Megève centre et siège CCPMB.

En plus des 4 sites de prélèvement choisis initialement, des prélèvements supplémentaires ont été réalisés sur le site Mont d'Arbois suite à l'observation de niveaux anormalement élevés en particules relevés par le micro-capteur. Afin de vérifier la fiabilité de ces données et comprendre l'origine des particules, le capteur Atmo Passy a été déplacé sur le site Mont d'Arbois du 9 au 24 août 2023, et des prélèvements de particules par Leckel et Sigma 2 ont été effectués durant la période du 26 juillet au 24 août 2023.

Le choix des 2 périodes à analyser parmi les 4 a été effectué en se basant sur les conditions météorologiques, notamment la pluviométrie ou précipitation qui est un paramètre déterminant pour le choix des périodes à caractériser : lessivage ou non de particules.

L'analyse des données de précipitation des différentes stations météo montre que les 10 premiers jours de juillet sont secs et le reste du mois a connu des précipitations plus au moins importantes. Le mois d'août est plutôt sec jusqu'à la fin de la campagne de prélèvement estivales (cf. Paragraphe 8.1.1).

De ce fait, les 2 périodes choisies pour la caractérisation chimique sont la période 1 qui correspond à la période scolaire et la période 4 qui correspond à la période vacances scolaire, à l'exception du site du Mont d'Arbois, où les périodes 3 et 4 ont été analysées car les mesures ont débuté le 26 juillet 2023 en période 3, suite à des niveaux en particules anormalement élevés comme indiqué plus haut.

8.1.3 Résultats de la campagne estivale

Cette partie synthétise les résultats de prélèvements et caractérisations morpho-chimiques des particules.

8.1.3.1 Concentrations mesurées au Pays du Mont-Blanc (campagne estivale)

Le tableau 9 reprend les concentrations, en $PM_{2.5}$ et $PM_{10-2.5}$, mesurées durant les périodes retenues.

Tableau 9: Moyennes périodiques pour les concentrations des $PM_{2.5}$ gravimétrique et $PM_{10-2.5}$ MEB-EDS Sigma-2.

Siège CCPMB		
Paramètres / Période	$PM_{2.5}$ - grav. Mini VS-C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$PM_{10-2.5}$ – MEB-EDS Sigma-2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Pér. 1	6,32	9,04
Pér. 4	8,53	8,24
Moyenne	7,43	8,64
Megève centre		
Paramètres / Période	$PM_{2.5}$ - grav. Mini VS-C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$PM_{10-2.5}$ – MEB-EDS Sigma-2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Pér. 1	9,67	6,7
Pér. 4	10,69	8,07
Moyenne	10,18	7,39
St-Gervais centre		
Paramètres / Période	$PM_{2.5}$ - grav. Mini VS-C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$PM_{10-2.5}$ – MEB-EDS Sigma-2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Pér. 1	9,43	6,79
Pér. 4	10,61	9,20
Moyenne	10,02	7,99
Cordon centre		
Paramètres / Période	$PM_{2.5}$ - grav. Mini VS-C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$PM_{10-2.5}$ – MEB-EDS Sigma-2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Pér. 1	9,58	7,65
Pér. 4	10,14	10,30
Moyenne	9,86	8,98
Mont d'Arbois		
Paramètres / Période	$PM_{2.5}$ - grav. Mini VS-C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$PM_{10-2.5}$ – MEB-EDS Sigma-2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Pér. 3	5,00	7,96
Pér. 4	7,70	14,06
Moyenne	6,35	11,01

Lors de la campagne de mesure estivale 2023, les plus fortes concentrations en mode grossier ($PM_{10-2.5}$) ont été mesurées sur le site du Mont d'Arbois ($14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant la période 4) (tableau 9 et figure 22).

Ce comportement a également été enregistré lors des mesures des capteurs en temps réel (voir chapitre 9). Les raisons de l'augmentation des concentrations de $PM_{10-2.5}$ dans cette fenêtre temporelle au Mont d'Arbois sont discutées en détail plus bas.

Cependant, il est intéressant de noter que c'est à cet endroit que les concentrations de $PM_{2.5}$ sont les plus faibles. Cela indique déjà que la source des concentrations élevées de PM_{10} se limite aux particules grossières et donc très probablement aux particules primaires (et non aux particules secondaires, qui sont principalement contenues dans la fraction $PM_{2.5}$).

La concentration de $PM_{10-2.5}$ dans les autres stations est relativement similaire, se situant entre $6,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Megève centre et St.-Gervais centre (tous deux lors la pér. 1) et $10,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Cordon centre (pér. 4).

La concentration de $PM_{2.5}$ montre une plus grande variation entre les stations, allant de $5,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au Mont d'Arbois (pér. 3) à $10,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à St. Gervais centre et Megève centre (tous deux au cours de la pér. 4).

En général, nous avons observé une tendance à des concentrations plus élevées de $PM_{10-2.5}$ et de $PM_{2.5}$ et donc de PM_{10} pendant la période 4 (3 au Mont d'Arbois) (figure 22).

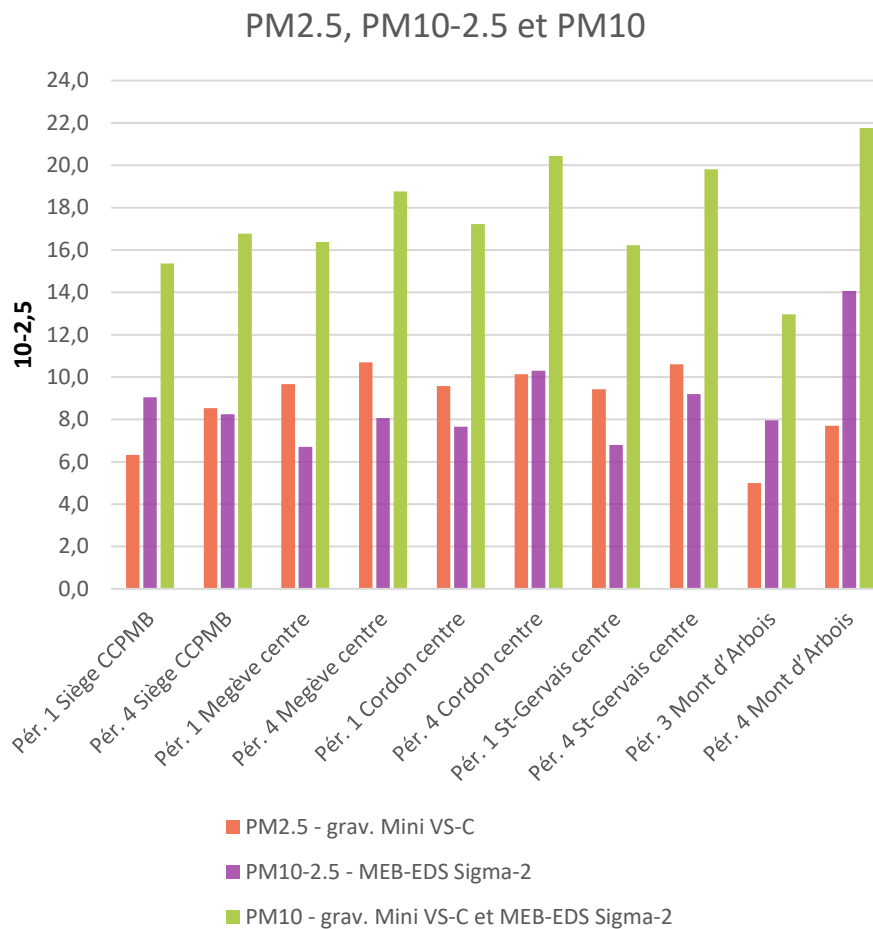


Figure 22: Comparaison des concentrations des $PM_{2.5}$ grav, $PM_{10-2.5}$ Sigma-2 et PM_{10} grav+Sigma-2 entre les différentes stations de mesure et périodes (sans différenciation des types de particules).

8.1.3.2 Caractérisation morpho-chimique par MEB-EDS de la fraction $PM_{10-2.5}$

Dans cette partie est présentée la différenciation des poussières grossières ($PM_{10-2.5}$).

Dans les figures 23 et 24, il est évident que la fraction du mode grossier est dominée par des particules minérales dans toutes les stations de mesure pendant la campagne de mesure estivale (notamment dans la période 4).

La domination des particules minérales est particulièrement présente au Mont d'Arbois, où la concentration des minéraux est également, contre toute attente, la plus élevée. Ces résultats seront discutés séparément ci-dessous.

Pendant la période 1, les particules biogéniques/matière organique grossière avaient une proportion nettement plus élevée dans les $PM_{10-2.5}$ (2 à 3 fois plus que dans la période 4). La diminution des particules biogènes se présente de manière relativement uniforme dans toutes les stations. Ce comportement est lié à l'activité biologique saisonnière (pour les $PM_{10-2.5}$, principalement les émissions de spores et partialement de pollen), qui semble ralentir vers la mi-/fin août (période 4).

La teneur en émissions de particules hors échappement (abrasion des pneus et des métaux) a eu tendance à être légèrement plus élevée pendant la période 4 que pendant la période 1 (mais pas à toutes les stations de mesure).

Les concentrations les plus élevées des particules d'usure de pneus sont mesurées sur le site de Cordon centre pendant les deux périodes de mesure estivales (0,8-1,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Les plus fortes concentrations de particules métalliques dans les $\text{PM}_{10-2.5}$ ont été mesurées à la station de mesure siège CCPMB pendant les deux périodes (0,4-0,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). La station qui montre la plus faible influence des particules de trafic est, comme on pouvait s'y attendre, le Mont d'Arbois.

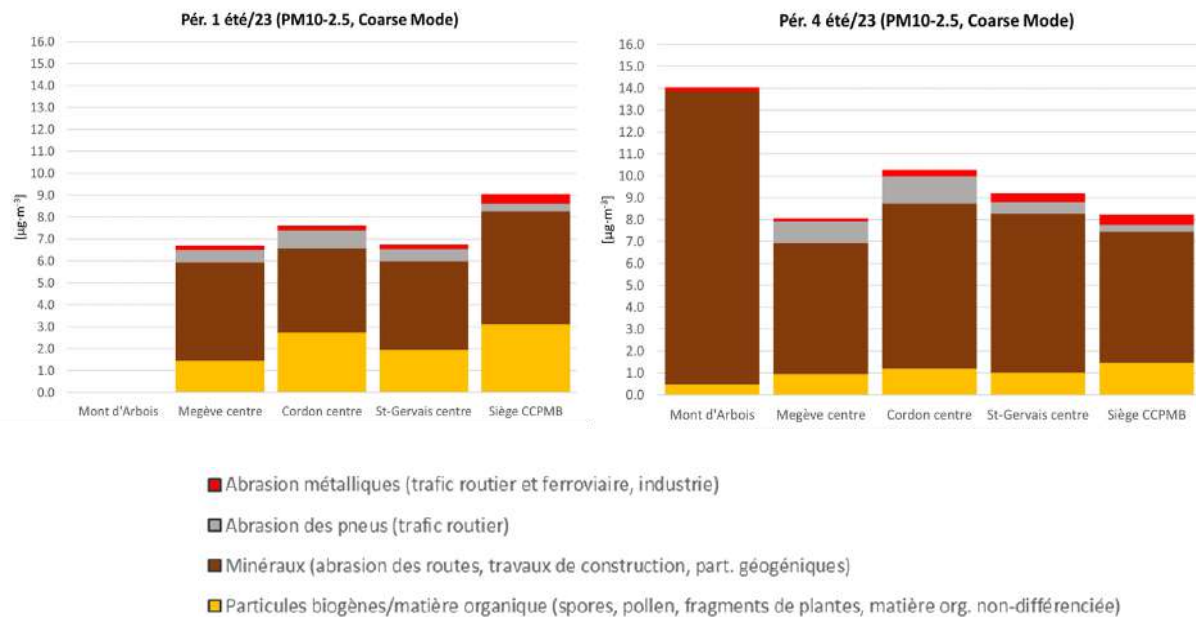


Figure 23 : Diagramme empilé des différents groupes morpho-chimiques de particules (PM_{10} - $\text{PM}_{2.5}$).

Les diagrammes ci-dessus montrent la teneur des différents groupes morpho-chimiques de particules parmi les poussières grossières (PM_{10} - $\text{PM}_{2.5}$). Ces diagrammes permettent de comparer les stations de mesure entre elles mais également de comparer les deux périodes sélectionnées (période 1 : à gauche et période 4 : à droite)

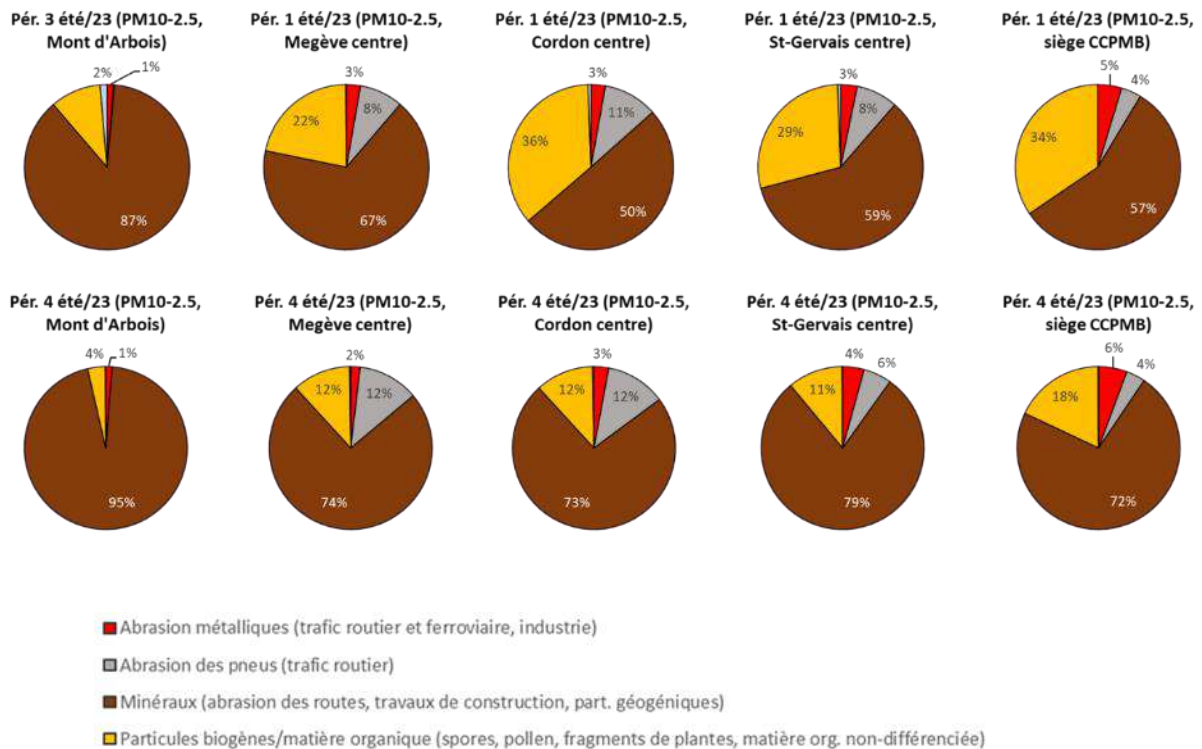


Figure 24: Contribution relative des différentes sources aux poussières grossières (PM₁₀- PM_{2,5}) pour les 5 stations de mesure et des périodes sélectionnées correspondantes.

Évaluation détaillée des concentrations élevées de PM_{10-2.5} au Mont d'Arbois

Au Mont d'Arbois, de fortes concentrations inattendues de PM₁₀ ont été mesurées par le capteur Ellona lors de la campagne de mesure estivale. Afin de comprendre l'origine des particules influençant ces valeurs élevées, il a été décidé d'effectuer une caractérisation supplémentaire des PM à cette station de mesure, analogue à la caractérisation des PM effectuée sur les autres stations de mesure.

Les données obtenues par le capteur suggéraient déjà une nature plutôt grossière des particules (PM₁₀>>> PM_{2.5}) (Fig. 22). Pour cette raison, on pouvait s'attendre à ce que les analyses des PM_{10-2.5} et non des PM_{2.5} fournissent les réponses à cette question.

Dans un premier stade, la comparaison entre les concentrations de PM_{10-2.5} obtenues à partir du capteur et les mesures Sigma-2 MEB-EDS montre une très bonne concordance (PM_{10-2.5}capteur = 14,3 et PM_{10-2.5} Sigma-2 MEB-EDS = 14,1, écart de 1,4 %, Fig. 25). Cela signifie que les valeurs mesurées avec les deux méthodes peuvent être utilisées avec confiance. Ce bon accord est particulièrement remarquable si l'on considère que les deux méthodes sont basées sur des principes de mesure différents.

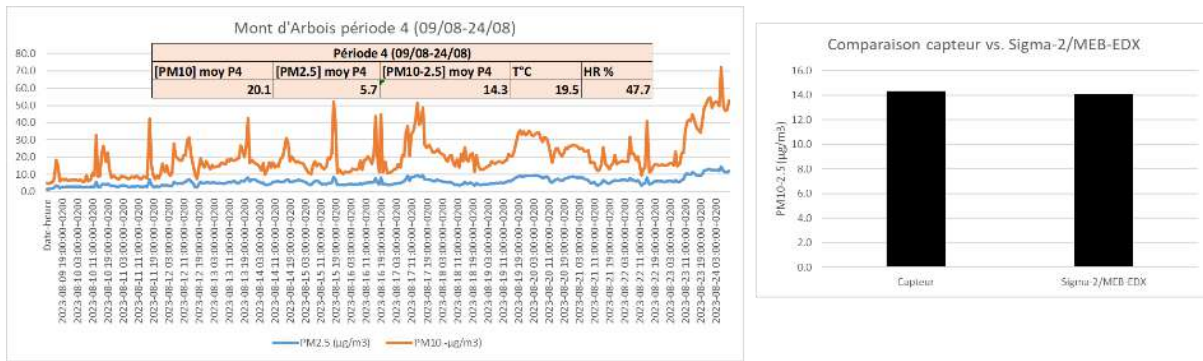


Figure 25: Valeurs PM₁₀ et PM_{2.5} mesurées au Mont d'Arbois par le capteur Ellona. Comparaison de la concentration de PM_{10-2.5} entre le capteur Ellona et la méthode Sigma-2/MEB-EDS.

La figure 25 ci-dessus reprend les PM₁₀ et PM_{2.5} mesurés par le capteur Ellona, lors de la période 4 (à gauche) et la comparaison, à droite, des PM_{10-2.5} mesurés par le Sigma 2 et le capteur Ellona.

L'étape suivante consistait à évaluer la composition de cet échantillon dans le but de comprendre les sources potentielles de pollution.

L'analyse MEB-EDS des particules individuelles a montré que la fraction des PM_{10-2.5} au Mont d'Arbois était largement dominée par les particules minérales (Fig. 25). Les particules minérales sont responsables des concentrations élevées.

Comparées aux autres sites, les concentrations de PM_{10-2.5} sont les plus élevées sur le site du Mont d'Arbois pendant cette période de mesure (Fig. 23). Et la principale différence de composition par rapport aux autres sites est la plus grande quantité de particules minérales au Mont d'Arbois.

En outre, la distribution des tailles de particules montre que les particules minérales sont très grossières (Fig. 25). C'est la raison pour laquelle elles influencent largement la fraction PM_{10-2.5} et même >PM₁₀. Les particules de grande taille suggèrent une source locale, ne pouvant être transportées sur de longues distances lorsqu'elles sédimentent en raison de leur vitesse de sédimentation relativement élevée.

En ce qui concerne la composition élémentaire déterminée, les particules minérales du Mont d'Arbois sont principalement composées de Si, O, Al, K, Fe ± Ca, Mg, Na, Ti (silicates). En outre, certaines particules sont des carbonates de calcium (Ca, C, O) et du quartz (Si, O dans la carte thermique). Cette minéralogie est typique des sols.

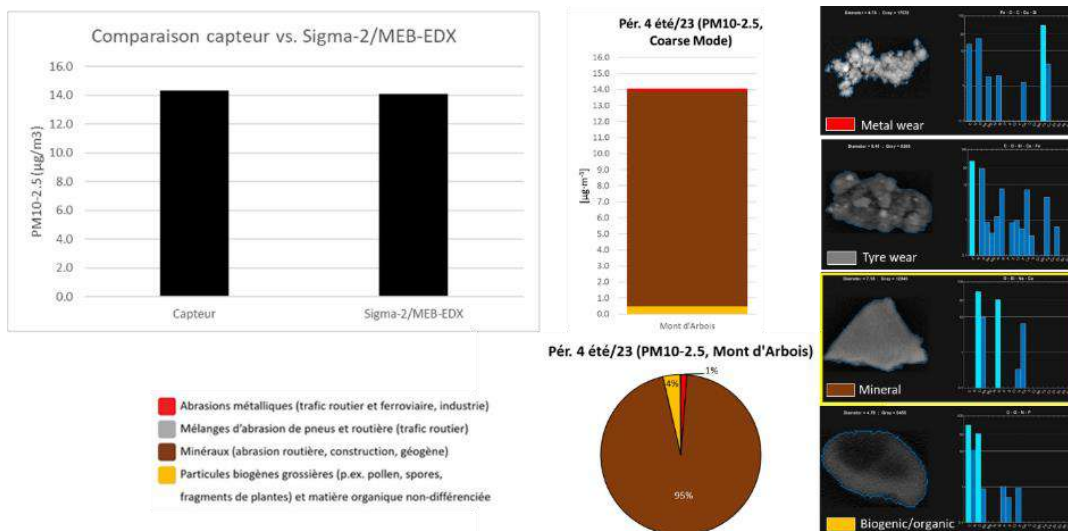


Figure 26: Compilation des résultats du Mont d'Arbois

La figure ci-dessus compile les différents résultats obtenus sur le Mont d'Arbois :

- Comparaison de $PM_{10-2.5}$ mesuré pour la période 4 par le capteur Ellona et la méthode Sigma-2 MEB-EDS (à gauche).
- Diagramme empilé et camembert montrant la teneur des différents groupes morpho-chimique de particules parmi les poussières $PM_{10-2.5}$ (au centre).
- Exemple d'images MEB pour les différents groupes de particules dans les $PM_{10-2.5}$ (à droite)

Hypothèse de travail sur les sources des particules minérales au Mont d'Arbois lors de la campagne de mesure estivale

Même si la composition élémentaire des particules minérales est très similaire sur tous les sites au cours de la période 4 (voir en annexe les cartes thermiques), la taille grossière frappante des particules au Mont d'Arbois suggère que les particules minérales doivent avoir une source locale.

Des particules aussi grosses ne peuvent pas être transportées de la vallée jusqu'au site surélevé du Mont d'Arbois en raison d'une déposition antérieure proche de la source.

Le même argument est valable pour une influence hypothétique de la poussière saharienne. Dans le cas d'un événement de la poussière saharienne, la distribution de la taille et la concentration des particules minérales devraient être similaires sur tous les sites. En outre, il est très peu probable que des particules aussi grosses soient transportées aussi loin.

Le jour où les mesures ont été arrêtées, un chantier de construction a été observé à quelques centaines de mètres de la station de mesure (Fig. 27). Il a été confirmé que ces constructions ont eu lieu pendant l'été sur ce site. Notre hypothèse est que la remobilisation des matériaux du sol, durant les travaux de construction, est certainement responsable de l'augmentation des particules minérales au Mont d'Arbois. Cette hypothèse sera confrontée aux données supplémentaires de la campagne de mesure hivernale pendant laquelle les travaux de construction n'auront pas lieu.

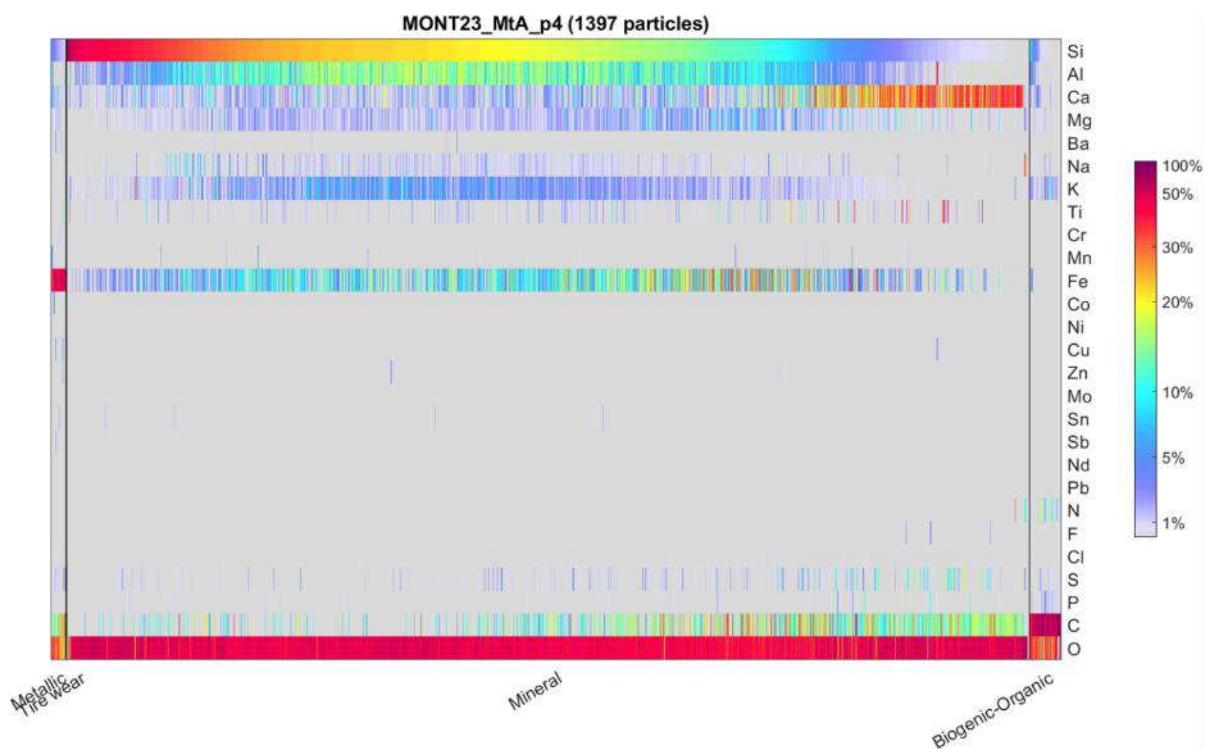
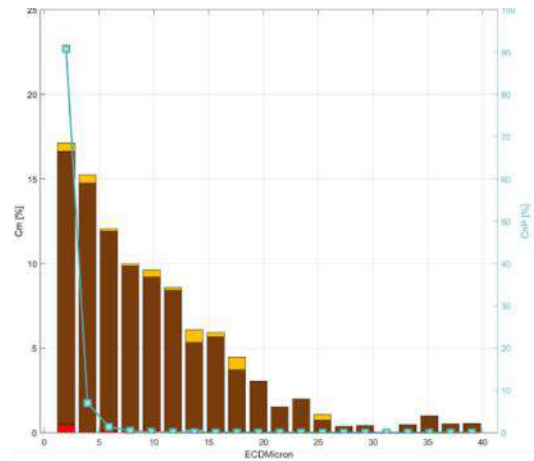


Figure 27: Photo prise depuis la station de mesure du Mont d'Arbois et les différents résultats obtenus

La figure ci-dessus reprend les différents résultats obtenus sur la station de mesure située au Mont d'Arbois :

- Sur la photo (en haut à gauche), prise depuis la station de mesure du Mont d'Arbois le jour du démontage de l'appareil, on aperçoit le chantier de construction à quelques centaines de mètres à l'ouest de la station de mesure.
- Sur le graphe (en haut à droite), est représenté la concentration massique relative (Cm%) résolue en fonction de la taille des particules (40-2,5 μm) pour les différents groupes morpho-chimiques ; données provenant de l'analyse de particules individuelles d'échantillons Sigma-2. ECDMicron (équivalent circular diameter des particules en μm). CnP (%) : concentration relative du nombre de particules (% du #P/m³).
- En bas, la représentation graphique (carte thermique) de la composition élémentaire de toutes les particules mesurées (1 397) sur l'échantillon Sigma-2 (fraction PM_{80-2.5}) pour la période 4 à Mont d'Arbois (graphe en bas). Les particules sont classées par groupes morpho-chimiques (voir exemple de lecture de carte thermique en annexe)

8.1.3.3 Caractérisation par des analyses chimiques humide « bulk » de la fraction PM_{2.5}

Dans cette partie est présentée la différenciation des poussières fines (PM_{2.5}).

Dans les figures 28 et 29, la fraction fine est dominée par des particules constituées de matière organique (MO) sur toutes les stations de mesure pendant la campagne de mesure estivale.

La concentration de ces particules est similaire sur tous les sites (3,9-5,8 µg/m³), la concentration MO la plus basse ayant été mesurée au Mont d'Arbois (comme on pouvait s'y attendre en raison de la haute altitude de ce site et donc plus grande distance des sources MO anthropogènes).

Les sulfates présentent les deuxièmes concentrations les plus élevées dans les PM_{2.5} et ce, dans toutes les stations de mesure. Ces valeurs sont très homogènes sur tous les sites étudiés (environ 0,8 µg/m³), ce qui indique une pollution de fond.

L'ammonium (NH₄) et les nitrates (NO₃) présentent des concentrations très faibles partout, avec des valeurs très similaires dans toutes les stations de mesure (0,1-0,2 µg/m³ pour chaque ion). Ainsi, ces deux substances sont également très probablement liées à la pollution de fond de la région.

La concentration de carbone élémentaire (CE) est faible à modérée (0,1-0,6 µg/m³), avec les valeurs les plus élevées à St-Gervais centre suivi du siège CCPMB et les valeurs les plus faibles à Mont d'Arbois. Cette tendance se répète dans les deux périodes. Il reste une part de particules dans les PM_{2.5} qui est indifférenciée (0,9-4,4 µg/m³ en fonction du lieu). Il est très probable qu'il s'agisse en partie de particules minérales, car celles-ci ne sont pas quantifiables avec les méthodes bulk utilisées.

Au vu des concentrations élevées de minéraux dans les PM_{10-2.5} de la campagne de mesure estivale, on peut s'attendre à ce que les particules minérales soient également représentées dans les PM_{2.5} avec une part importante. Ceci (plus la part de métaux) pourrait être conforté à l'aide d'analyses ICP-MS/AES sur les filtres PM_{2.5} existants ou, lors d'une éventuelle future campagne de mesure, vérifier et quantifier sur des filtres du polycarbonate (PC) de la fraction PM_{2.5} au moyen d'analyses des particules individuelles par MEB/EDS.

Il faut tenir compte du fait que la valeur de MO est basée sur une conversion de CO (composés organiques) (déterminée analytiquement) multipliée par un facteur. Ce calcul doit être effectué car la part d'hydrogène et d'oxygène n'est pas prise en compte dans l'analyse du CO. Et ces facteurs peuvent varier fortement selon le type de site et la saison (facteurs entre 1,2 et 3,2 mais typiquement entre 1,6-2,3 selon *Lim & Turpin (2002)*, *Daellenbach et al., 2017*, *Golly et al., 2019*, *Font et al., in prep*). Compte tenu des caractéristiques du site et de la saison, un facteur de conversion de 2,1 a été utilisé dans cette campagne de mesure. Si un facteur plus élevé ou plus bas était utilisé, cela exercerait une influence sur les valeurs MO.

Les diagrammes, représentés dans la figure 28, montrent la teneur des différents groupes morfo-chimiques de particules parmi les poussières fines (PM_{2.5}) ainsi que la comparaison entre les différentes stations de mesure et les deux périodes sélectionnées (période 1 : à gauche et période 4 : à droite).

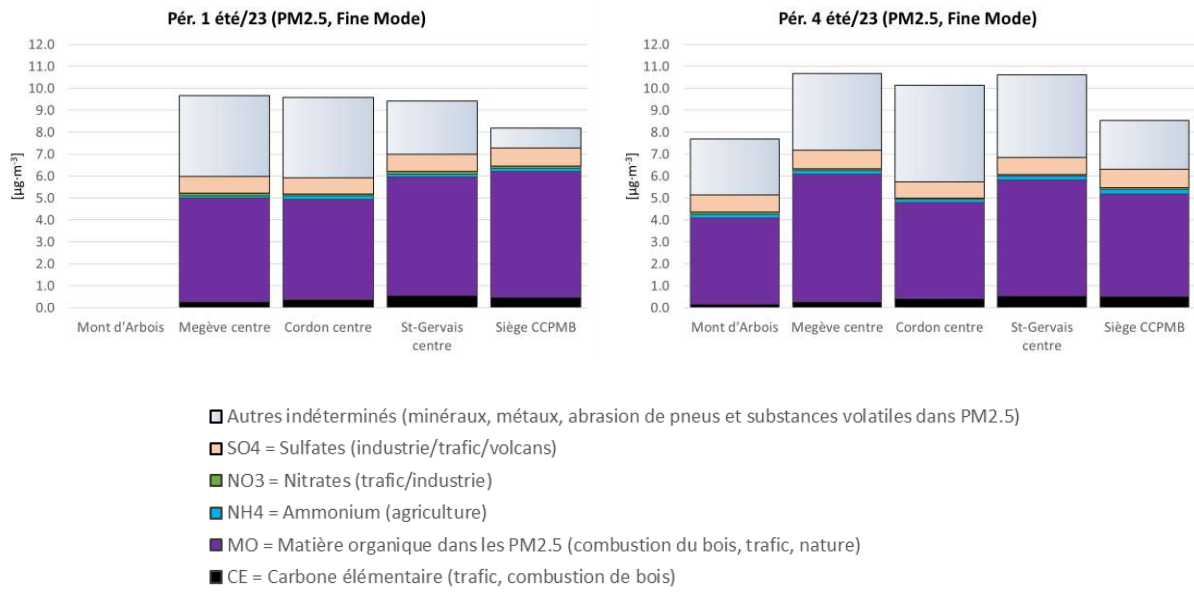


Figure 28: Diagramme des différents groupes morpho-chimiques de (PM_{2,5}).

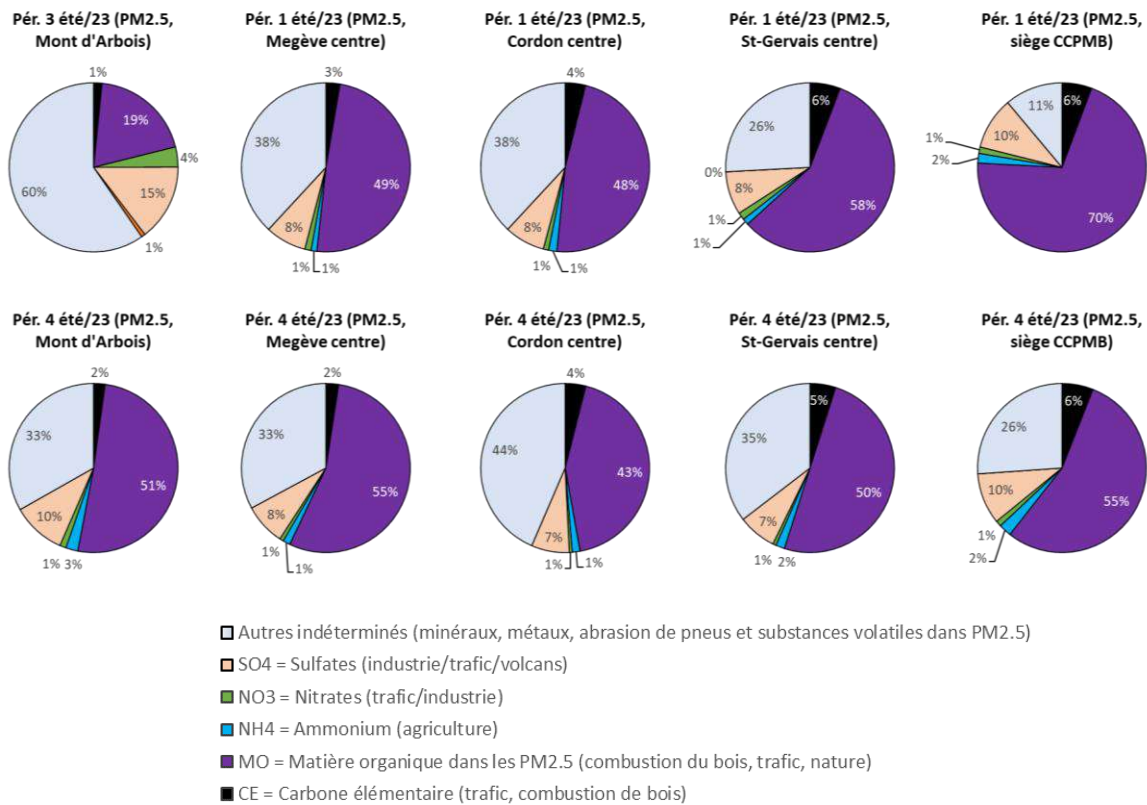


Figure 29: Contribution relative des différentes sources aux poussières fines (PM_{2,5}) pour les 5 stations de mesure et des périodes sélectionnées correspondantes.

8.1.3.4 Intégration des résultats pour l'ensemble des PM₁₀

Dans cette partie est présentée la différenciation des poussières PM₁₀.

Dans les figures 30 et 31, les deux composants, qui dominent pendant la campagne de mesure estivale sur toutes les stations de mesure, sont les particules minérales et la matière organique (> 50% ensemble).

Le pourcentage, le plus élevé dans les PM₁₀ de la période 4, est étonnamment représenté uniquement par les minéraux

La troisième source de particules la plus importante dans les PM₁₀ sont les particules biogènes (en particulier dans la période 1). Dans la période 4, ces particules naturelles perdent légèrement en importance. Cela est très probablement lié à un changement saisonnier de l'activité biologique, puisque la concentration diminue de manière uniforme sur tous les sites. Le fait que la concentration de particules biogènes soit aussi relativement homogène sur tous les sites pendant la période 1 confirme également que ces particules sont fortement influencées par les fluctuations saisonnières, qui se produisent dans ce cas au niveau régional. Avec une petite influence de la proximité des sources naturelles qui pourrait expliquer la différence de concentration p.ex. entre Megève centre et siège CCPMB.

Les concentrations de carbone élémentaire (CE) sont faibles pendant les mois d'été et ne représentent que quelques pourcents du total des PM₁₀. Pendant cette saison, il est très probable que le CE provienne principalement des émissions du trafic à l'échappement (notamment la suie).

Il est intéressant de noter que les émissions du trafic hors échappement (c'est-à-dire l'abrasion des pneus et des métaux, dû en particulier à l'abrasion des freins) représentent un pourcentage plus élevé des PM₁₀ dans toutes les stations de mesure (4-7%), Cordon centre ayant la concentration la plus élevée en µg/m³ et le pourcentage le plus élevé de particules d'abrasion de pneus et de métaux (en particulier dans la période 4 avec 1,5 µg/m³ et 7% des PM₁₀).

Le Mont d'Arbois présente, comme on pouvait s'y attendre, les concentrations les plus basses de particules CE (échappement) et hors échappement (1% des PM₁₀ chacune). Une particularité de la station de mesure du Mont d'Arbois est la concentration très élevée de particules minérales. Celle-ci a été discutée en détail dans le chapitre 8.1.3.2. Néanmoins, il est important de mentionner que le fait que les particules d'abrasion des pneus et des métaux soient si faibles dans le Mont d'Arbois est une indication supplémentaire que les particules minérales sont découplées d'une source de trafic comme typiquement l'abrasion des routes. Sinon, les concentrations de particules d'abrasion de pneus/métaux ainsi que de particules minérales auraient été élevées.

Enfin, les particules secondaires (c'est-à-dire les nitrates, l'ammonium et les sulfates) ne représentent que quelques pour cent des PM₁₀ et ont des concentrations homogènes dans toutes les stations de mesure. Ce comportement suggère fortement que ces substances/particules représentent une pollution de fond régionale et ne semblent pas d'indiquer de sources locales spécifiques.

La part de substances indifférenciées pourrait être minimisée par d'autres analyses supplémentaires si elles sont jugées intéressantes (voir chapitre 8.1.3.3). Il est probable qu'une partie importante soit constituée de particules minérales dans les PM_{2,5}, qui ne faisaient pas partie de la quantification prévue dans les analyses effectuées, car les minéraux sont généralement présents à des niveaux relativement bas dans les PM_{2,5} sur d'autres sites d'Europe centrale précédemment étudiées.

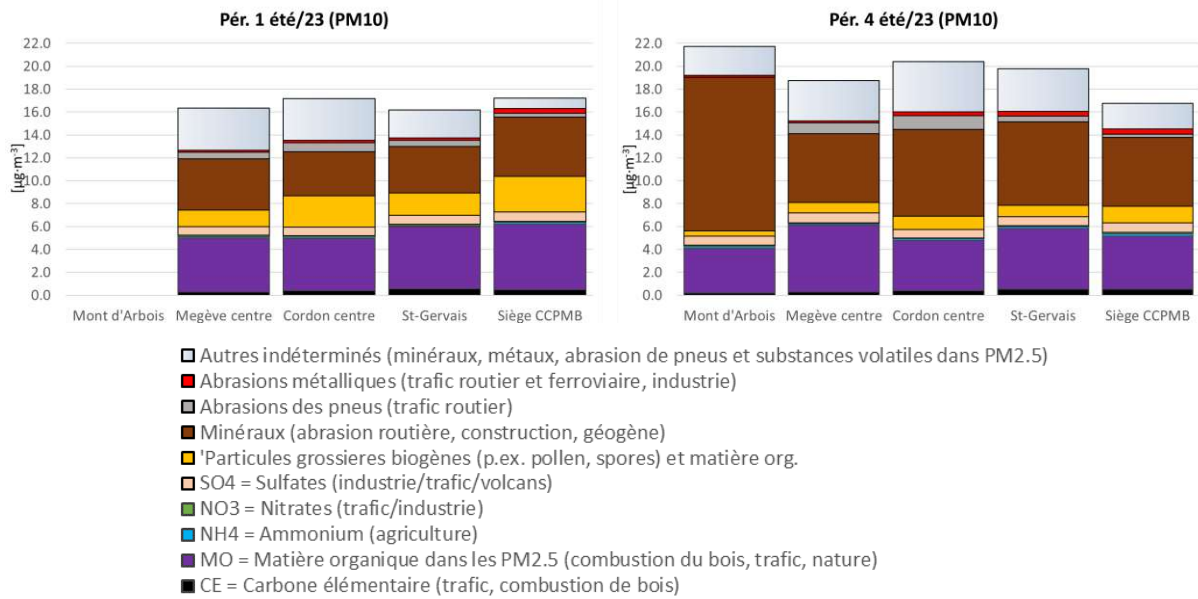


Figure 30: Diagramme empilé des différents groupes morpho-chimiques de PM_{10} .

Les diagrammes ci-dessus montrent la teneur des différents groupes morpho-chimiques de particules parmi les poussières (PM_{10}). Ces diagrammes permettent de comparer les stations de mesure entre elles mais également de comparer les deux périodes sélectionnées (période 1 : à gauche et période 4 : à droite)

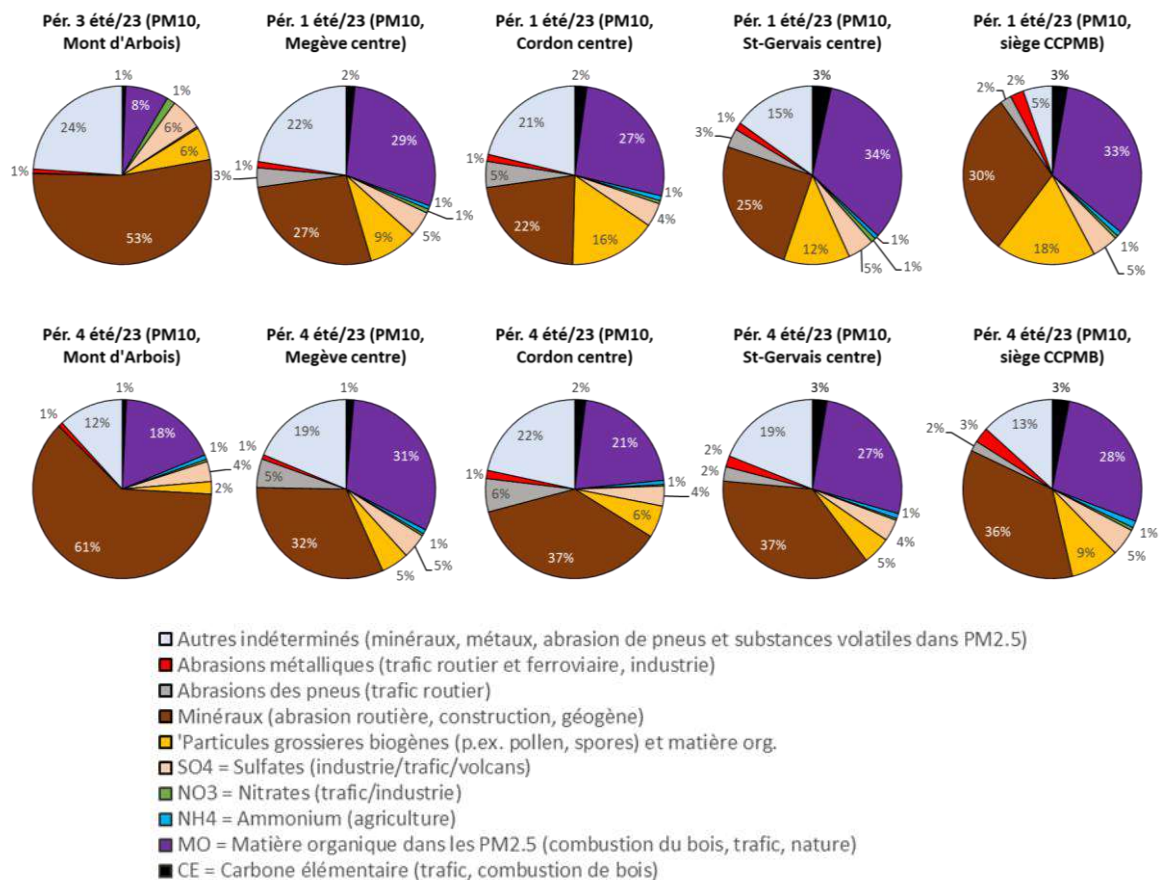


Figure 31: Contribution relative des différentes sources aux poussières PM_{10} pour les 5 stations de mesure et des périodes sélectionnées correspondantes.

A retenir

Durant la campagne estivale :

- Prédominance de la fraction grossière des particules ($PM_{10-2.5}$)
- Principalement des particules minérales et biogéniques (donc en partie des sources naturelles)
- Concentrations et composition morpho-chimique des particules similaires quel que soit l'altitude ce qui correspond à une pollution de fond régionale.

8.2 Campagne de prélèvement hivernale

8.2.1 Conditions météorologiques

Sur cette partie, seront analysés les conditions météorologiques (précipitation et vents), pour les mois de décembre 2023, janvier 2024 et février 2024, qui correspondent à la campagne hivernale de prélèvement de particules.

L'hiver pendant ces trois mois (décembre 2023, janvier et février 2024) a été le plus chaud jamais enregistré depuis 2020. (Source Atmo Aura)

- **Précipitations**

La figure 32 montre l'évolution des précipitations en moyenne journalière de décembre 2023 au 15 février 2024 pour les stations de Sallanches, Passy et Chamonix (source Infoclimat.fr).

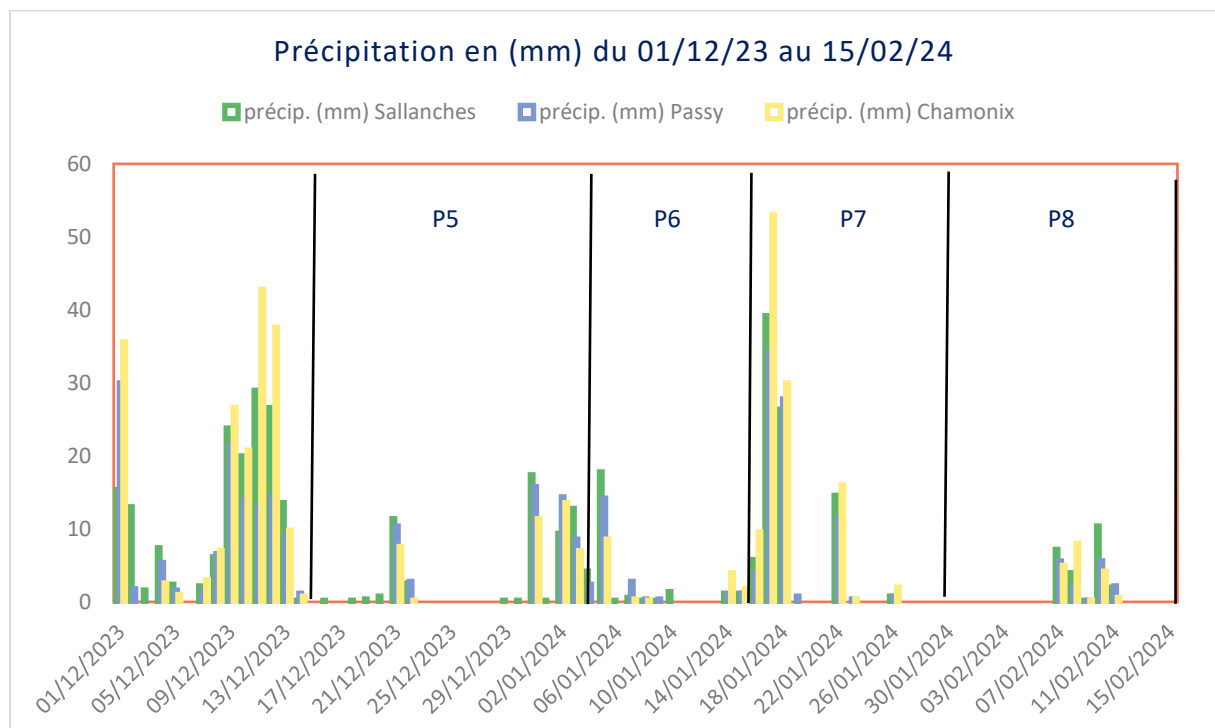


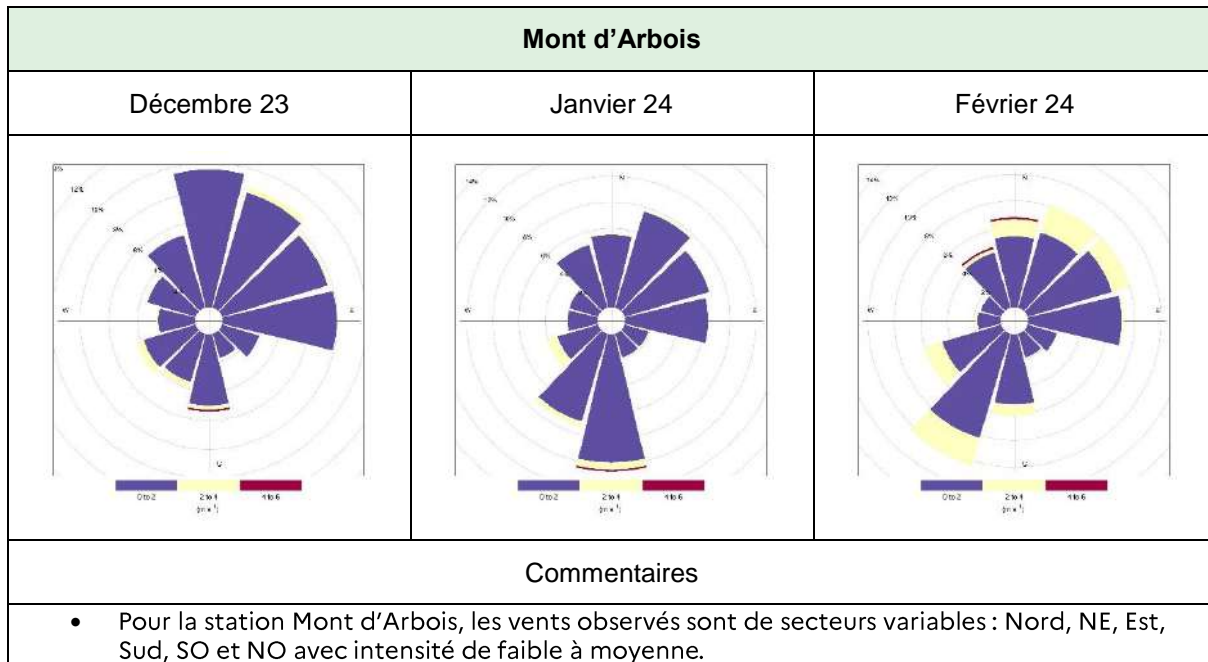
Figure 32: Précipitations du 01/12/23 au 15/02/2024.

Les 2 dernières semaines de décembre sont plutôt sèches. La première semaine de janvier a connu des précipitations avec un cumul allant de 30 à 45 mm pour les 3 stations météo consultées. La 2^{ème} semaine de janvier est plutôt sèche et la 3^{ème} semaine de janvier a connu des précipitations avec un cumul allant de 80 à 115 mm pour les stations météo consultées. Quant au deux premières semaine de février, elles sont plutôt sèches avec des précipitations faibles entre le 7 et le 10 février avec un cumul allant de 16 à 24 mm.

- Vents

Sallanches		
Décembre 23	Janvier 24	Février 24
<p>Rose des vents (direction d'où vient le vent) En décembre 2023 à Sallanches</p>	<p>Rose des vents (direction d'où vient le vent) En janvier 2024 à Sallanches</p>	<p>Rose des vents (direction d'où vient le vent) En février 2024 à Sallanches</p>
Commentaires		
<ul style="list-style-type: none"> Les vents sont essentiellement de secteur Sud-Ouest pour les mois de décembre et février et de secteur Sud-Ouest et Nord pour le mois de janvier. Les vents sont en majorité d'intensité faible (inférieur à 4 m/s). 		

Passy		
Décembre 23	Janvier 24	Février 24
<p>Rose des vents (direction d'où vient le vent) En décembre 2023 à Passy</p>	<p>Rose des vents (direction d'où vient le vent) En janvier 2024 à Passy</p>	<p>Rose des vents (direction d'où vient le vent) En février 2024 à Passy</p>
Commentaires		
<ul style="list-style-type: none"> Les vents observés sont de secteurs variables : ONO, NO, S et SSE pour les mois de décembre et janvier et sont de secteur NO majoritairement pour le mois de février. Les vents sont en majorité d'intensité très faible (inférieur à 1 m/s). 		



8.2.2 Périodes de prélèvement

En complément des mesures en temps réel, les sites ont été équipés, en parallèle de préleveurs de particules.

La figure ci-après illustre les différentes périodes de prélèvement de particules.



Figure 33: Périodes de prélèvement de particules lors de la campagne estivale.

Pour chaque site, 4 prélèvements ont été effectués toutes les deux semaines pendant deux mois, du 15 décembre 2023 au 15 février 2024, dont 2 périodes ont fait l'objet d'une caractérisation morpho-chimique.

Le choix des 2 périodes à analyser parmi les 4 a été effectué en se basant sur les conditions météorologiques :

- Précipitations/ pluviométrie : paramètre déterminant pour le choix des périodes à caractériser : lessivage ou non de particules.
- Inversion des températures : paramètre important pour voir s'il y a surconcentration de particules (PM) près du sol.

Nous avons également pris en compte l'affluence touristique pendant les périodes de prélèvement qui est plus forte pour la période 5.

L'analyse des données de précipitation des différentes stations météo montre que pendant les deux mois de prélèvement de particule, le temps est plutôt sec avec quelques précipitations faibles durant la 1^{ère} et la 3^{ème} semaine de janvier. Les deux premières semaines de février sont plutôt sèches (cf. figure 30).

La figure 34 ci-dessous montre l'évolution de la température moyenne journalière relevée sur trois sites à différentes altitudes : Passy (590 m), Saint-Gervais centre (790 m) et Le Mont d'Arbois (1840 m). L'évolution de la température est corrélée à la concentration de PM₁₀ en moyenne journalière enregistrée pendant les différentes périodes de prélèvement de particules pour chacun des sites.

L'analyse de ce graphique met en évidence les éléments suivants :

- Les inversions de température observées sont de très courtes durées (quelques heures) du 12 au 14 janvier (P6) et du 28 au 30 janvier (P7). Généralement, elles se produisaient la nuit et se levaient la journée.
- La période 6 correspondant aux dates du 04/01 au 16/01 a connu un pic de pollution aux particules notamment sur les sites de Saint-Gervais centre et Passy.

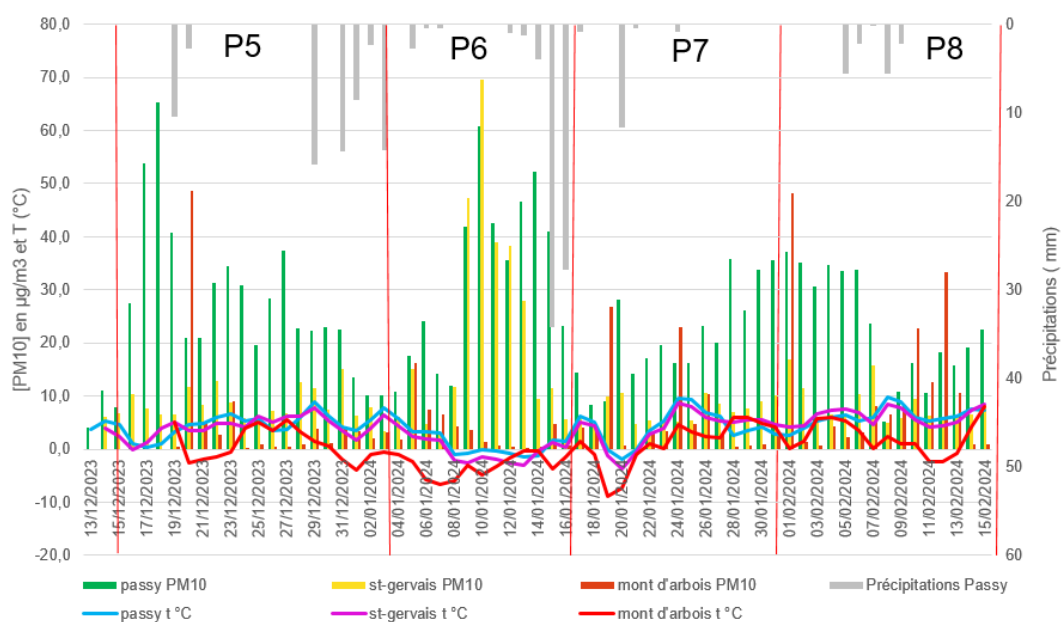


Figure 34: Evolution de la moyenne journalière en PM₁₀, précipitations et températures du 15/12/23 au 15/02/24.

Sur la base de ces éléments, les 2 périodes choisies pour la caractérisation chimique sont les périodes 5 et 6 pour les sites de Saint-Gervais centre, Cordon centre, Megève centre et Siège CCPMB. Concernant le site du Mont d'Arbois, les périodes 5 et 8 (la période 8 a connu des températures plus élevées que celle de la période 6 et sans inversion de température) ont été analysées, le substrat de prélèvement de la période 6 ayant été couvert par une couche de neige ce qui a empêché son analyse.

8.2.3 Résultats de la campagne hivernale

Cette partie synthétise les résultats de prélèvements et caractérisations morpho-chimiques des particules lors de la campagne hivernale.

8.2.3.1 Concentrations mesurées au Pays du Mont-Blanc (campagne hivernale)

Le tableau 10 reprend les concentrations en PM_{2.5} et PM_{10-2.5}, mesurées durant les périodes retenues.

Tableau 10: Moyennes périodiques pour les concentrations des $PM_{2.5}$ gravimétrique et $PM_{10-2.5}$ MEB-EDS Sigma-2.

Siège CCPMB		
Paramètres / Période	$PM_{2.5}$ - grav. Mini VS-C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$PM_{10-2.5}$ – MEB-EDS Sigma-2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Pér. 5	11,16	4,58
Pér. 6	12,40	2,04
Moyenne	11,78	3,31
Megève centre		
Paramètres / Période	$PM_{2.5}$ - grav. Mini VS-C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$PM_{10-2.5}$ – MEB-EDS Sigma-2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Pér. 5	5,30	1,37
Pér. 6	9,89	1,95
Moyenne	7,59	1,66
St-Gervais centre		
Paramètres / Période	$PM_{2.5}$ - grav. Mini VS-C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$PM_{10-2.5}$ – MEB-EDS Sigma-2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Pér. 5	7,94	2,86
Pér. 6	12,98	1,56
Moyenne	10,46	2,21
Cordon centre		
Paramètres / Période	$PM_{2.5}$ - grav. Mini VS-C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$PM_{10-2.5}$ – MEB-EDS Sigma-2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Pér. 5	6,39	1,92
Pér. 6	12,19	2,25
Moyenne	9,29	2,09
Mont d'Arbois		
Paramètres / Période	$PM_{2.5}$ - grav. Mini VS-C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$PM_{10-2.5}$ – MEB-EDS Sigma-2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Pér. 5	1,63	0,88
Pér. 8	2,38	3,50
Moyenne	2,01	2,19

Lors de la campagne de mesure hivernale 2023/2024, les concentrations de $PM_{2.5}$ étaient nettement plus élevées que celles de la fraction $PM_{10-2.5}$ (figure 35) et en partie que les concentrations de $PM_{2.5}$ de la campagne de mesure estivale (selon la période). Ainsi, les rapports $PM_{10-2.5}/PM_{2.5}$ étaient très différents pour les deux campagnes de mesure. Ceci est expliqué plus en détail dans le chapitre 8.3.1.1.

Au cours de la période 6, des concentrations de $PM_{2.5}$ nettement plus élevées que celles de la période 5 ont été mesurées sur tous les sites de mesure. Les niveaux de $PM_{2.5}$ étaient également plus proches les uns des autres sur la période 6 que sur la période 5 (distribution plus homogène des $PM_{2.5}$ sur les différents sites). Le site du Mont d'Arbois constitue une exception, avec des concentrations de $PM_{2.5}$ 3 à 5,5 fois plus faibles que sur tous les autres sites.

Pendant la période 5, par contre, il y a eu des différences significatives entre tous les sites avec un quasi-doublement de la concentration de $PM_{2.5}$ sur le site siège CCPMB par rapport à Megève centre, et, une augmentation de près de 30% sur le site siège CCPMB par rapport à St-Gervais (distribution des polluants qui constituent les $PM_{2.5}$ plus hétérogène, voir le chapitre 8.3.1.2 pour plus de détails sur les proportions des différents polluants).

En général, les concentrations de la fraction grossière ($PM_{10-2.5}$) ont été faibles lors de la campagne de mesure hivernale ($4,6 - 0,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Les plus fortes concentrations $PM_{10-2.5}$ ont été mesurées sur le site du siège CCPMB à Passy ($4,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant la période 5) (tableau 10 et figure 35). De façon étonnante, la deuxième valeur la plus élevée de $PM_{10-2.5}$ a été mesurée au Mont d'Arbois (sur la période 8) ($3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Une hypothèse pour cette concentration plus élevée de $PM_{10-2.5}$ au Mont d'Arbois est présentée au chapitre 8.2.3.2.

La somme des deux fractions (c'est-à-dire PM_{10} totales) était partout plus élevée pendant la période 6, à l'exception du site CCPMB, où les valeurs de PM_{10} étaient similaires pendant les deux périodes (avec une valeur légèrement plus faible pendant la période 6). Ces observations laissent supposer que les conditions météorologiques n'étaient pas identiques durant les deux périodes et que, par conséquent, la répartition des particules n'était pas la même à différentes altitudes. Ceci est discuté en détail dans les parties suivantes sur la différenciation des particules.

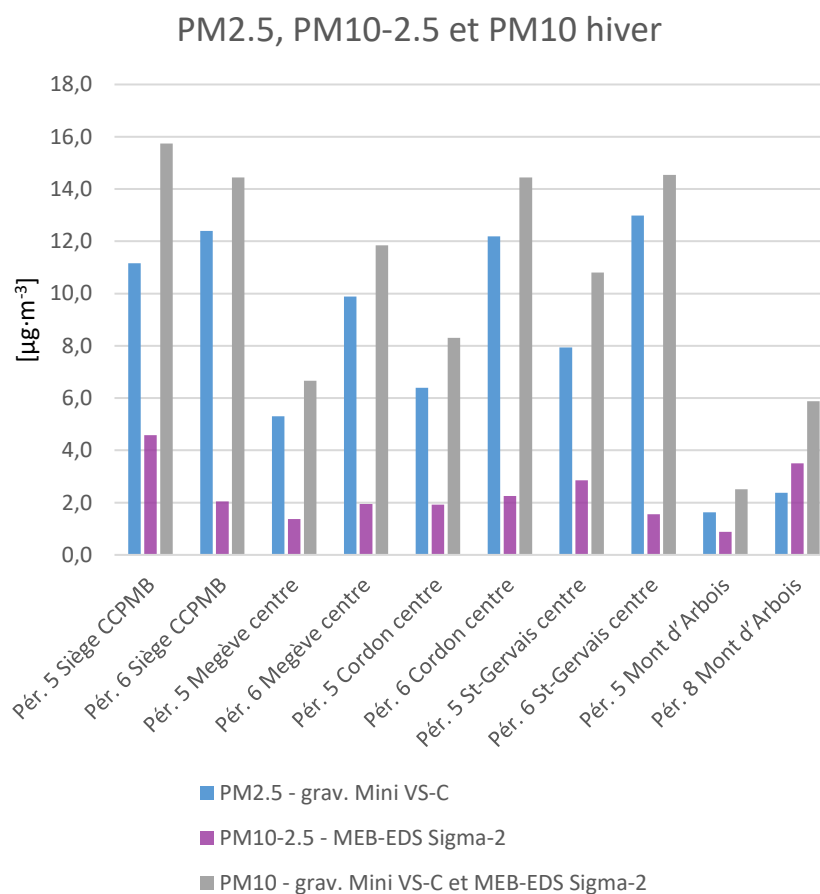


Figure 35: Comparaison des concentrations des $PM_{2.5}$ grav, $PM_{10-2.5}$ Sigma-2 et PM_{10} grav+Sigma-2 entre les différentes stations de mesure et périodes (sans différenciation des types de particules).

8.2.3.2 Caractérisation morpho-chimique par MEB-EDS de la fraction $PM_{10-2.5}$

Dans cette partie est présentée la différenciation des poussières grossières ($PM_{10-2.5}$).

Pour faciliter la comparaison avec les résultats de la campagne de mesure estivale, les résultats de la campagne de mesure hivernale sont présentés avec la même échelle. Dans les figures 36 et 37, il est évident que la fraction du mode grossier se compose d'un mélange de particules où les minéraux sont légèrement dominants. Il existe cependant quelques exceptions, comme par exemple :

- Au siège CCPMB, les particules biogéniques/organiques sont à peu près aussi importantes que les minéraux lors de la campagne de mesure hivernale 2023/2024.
- Les particules métalliques sont à peu près aussi importantes que les minéraux dans la station de mesure Cordon centre pendant la période 6 et seulement légèrement plus basses dans siège CCPMB pendant les deux périodes.

Il est très intéressant de constater qu'au cours de la période 5, les concentrations totales de $PM_{10-2.5}$ et de tous les types de particules séparées (en particulier celles provenant des émissions hors échappement, telles que l'abrasion des métaux, l'abrasion des pneus et, en partie, l'abrasion des minéraux) ont diminué graduellement avec l'augmentation de l'altitude des sites (figure 34). Ainsi, les plus fortes concentrations de particules d'abrasion provenant du trafic ont été mesurées pendant la période 5 (période de forte affluence touristique) dans la station de mesure siège CCPMB ($0,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ des particules métalliques ; $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de particules d'abrasion des pneus). Pour les sites les plus élevés en altitude, les concentrations de particules métalliques sont supérieures à 10 fois plus faibles que sur le site siège CCPMB pendant la période 5. Pour les particules d'usure des pneus, les différences de concentration sont un peu moins marquées (1,3 à 3 fois plus faibles que dans le siège CCPMB) pour la même période.

Dans la période 6, les concentrations de $PM_{10-2.5}$ totales et des différents types de particules ne suivent pas de gradient avec l'altitude comme dans la période 5. Les concentrations de chaque groupe sont beaucoup plus homogènes parmi les sites étudiés. Une autre différence par rapport à la période 5 est que la concentration de particules métalliques est la plus élevée sur le site Cordon centre ($0,62 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et non plus au siège CCPMB ($0,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

La station qui montre la plus faible influence des particules hors-échappement provenant du trafic est - comme déjà constaté lors de la campagne de mesure estivale – le Mont d'Arbois.

L'échantillon de la période 6 au Mont d'Arbois n'a pas été analysé l'échantillon ayant été saturé en eau par des conditions très humides (fortes chutes de neige). Il a donc été décidé d'analyser l'échantillon de la période 8 en remplacement. Les résultats de cet échantillon sont décrits séparément (voir ci-dessous et figure 38).

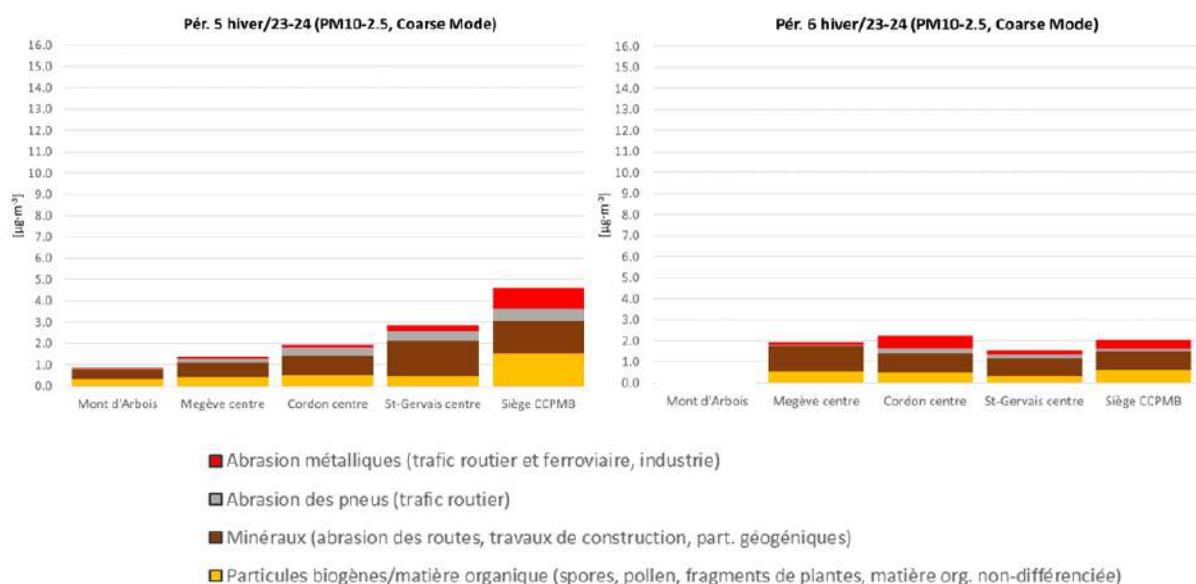


Figure 36: Diagramme empilé des différents groupes morpho-chimiques de particules (PM_{10} - $PM_{2.5}$).

Les diagrammes ci-dessus montrent la teneur des différents groupes morpho-chimiques de particules parmi les poussières grossières (PM_{10} - $PM_{2.5}$). Ces diagrammes permettent de

comparer les stations de mesure entre elles mais également de comparer les deux périodes sélectionnées (période 1 : à gauche et période 4 : à droite).

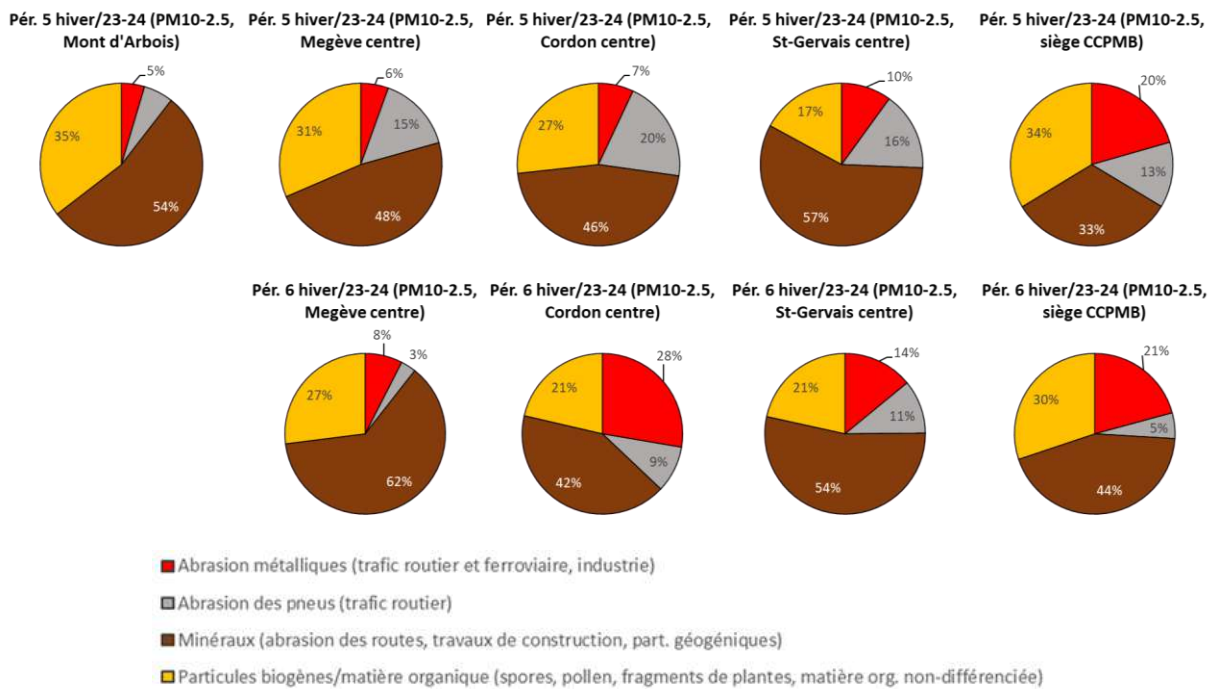


Figure 37: Contribution relative des différentes sources aux poussières grossières (PM₁₀-PM_{2.5}) pour les 5 stations de mesure et des périodes sélectionnées correspondantes.

Évaluation séparée de la période 8 à Mont d'Arbois

Pendant la période 8 au Mont d'Arbois, la concentration de PM_{10-2.5} était significativement plus élevée que durant la période 5. La caractérisation des PM_{10-2.5} et la différenciation morpho-chimique des particules ont montré que la principale raison de cette augmentation de la valeur des PM_{10-2.5} était due à une augmentation de la concentration des particules minérales (figure 38) (0,5 µg/m³ pendant la période 5 vs. 2,8 µg/m³ pendant la période 8, soit un facteur de 5,6 entre les deux).

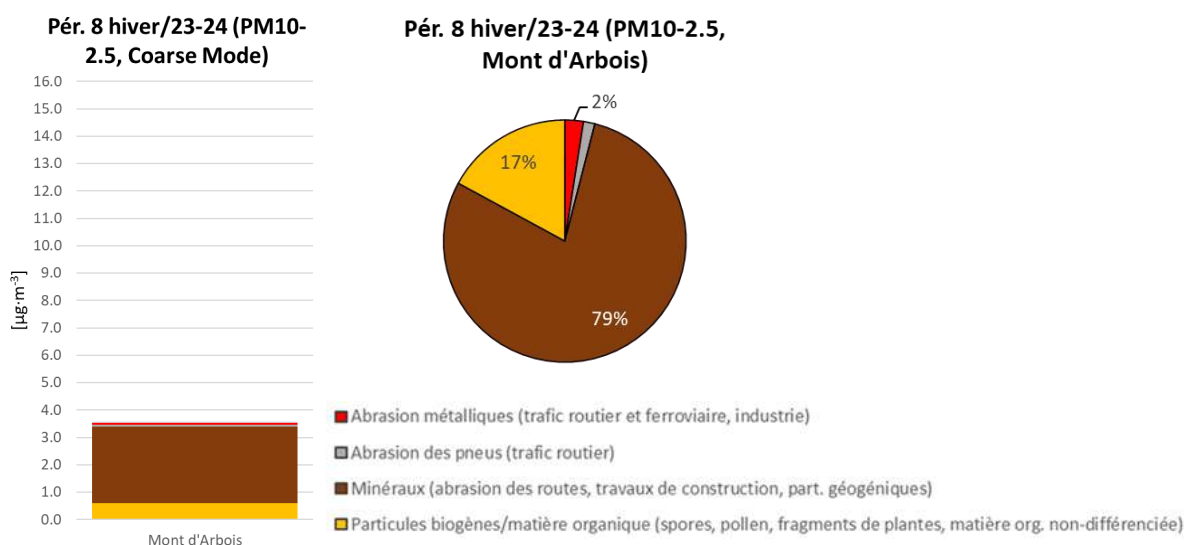


Figure 38: Compilation des résultats obtenus au Mont d'Arbois.

Les diagrammes ci-dessus montrent sur le Mont d'Arbois durant la période 8 :

- la teneur des différents groupes morpho-chimiques de particules parmi les poussières grossières ($PM_{10-2.5}$) mesuré (diagramme de gauche),
- la contribution relative des différentes sources aux poussières grossières ($PM_{10-2.5}$) (camembert à droite).

L'étape suivante consistait à évaluer la composition élémentaire spécifique des minéraux dans le but de comprendre les sources potentielles de cette pollution. La figure 38 présente les résultats obtenus à partir de l'analyse MEB-EDS des particules individuelles.

Bien qu'à première vue, les minéraux présentent une empreinte chimique similaire dans la période d'été 4 et la période d'hiver 8, une différence peut être observée. Les minéraux de la période 8 contiennent moins souvent du calcium (Ca sur la carte de chaleur, figure 32). En ce qui concerne la composition élémentaire, les particules minérales du Mont d'Arbois lors de la période estivale 4 étaient principalement composées de Si, O, Al, K, Fe, Ca, Mg \pm Na, Ti. Cette minéralogie représente principalement des silicates. En outre, certaines particules étaient des carbonates de calcium (Ca, C, O) et du quartz (Si, O sur la carte thermique).

Les minéraux de la période 8 contiennent pratiquement les mêmes éléments, mais souvent sans Ca. Cette différence semble subtile pour indiquer avec certitude une autre source d'émission. Néanmoins, il existe un second argument qui indique une autre source et non la remise en suspension de particules provenant d'une source proche (comme pour la période 4 en raison des travaux de construction sur le Mont d'Arbois). Une comparaison des distributions de tailles de particules de l'échantillon de la période 4 et de la période 8 montre qu'elles sont très différentes.

Les particules minérales, lors de la période 4 au Mont d'Arbois étaient très grossières, alors que les minéraux de la période 8 sont beaucoup plus fins (Fig. 39). Les particules de grande taille suggèrent une source locale, ne pouvant être transportées sur de longues distances lorsqu'elles sédimentent en raison de leur vitesse de sédimentation relativement élevée. En revanche, le caractère fin des minéraux de la période 8 indique une source étendue, les particules fines peuvent être transportées sur de plus longue distance.

En résumé, les différences observées dans la minéralogie et dans la distribution de tailles de particules pourraient indiquer que les minéraux des deux périodes/saisons proviennent de sources différentes :

- Période 4 (été) : minéraux locaux remis en suspension en raison des travaux de construction.
- Période 8 (hiver) : minéraux provenant d'une source étendue transportés par un événement de poussière saharienne jusqu'au Mont d'Arbois. Un événement de poussière du Sahara ayant été notifié dans la région au cours de cette période.

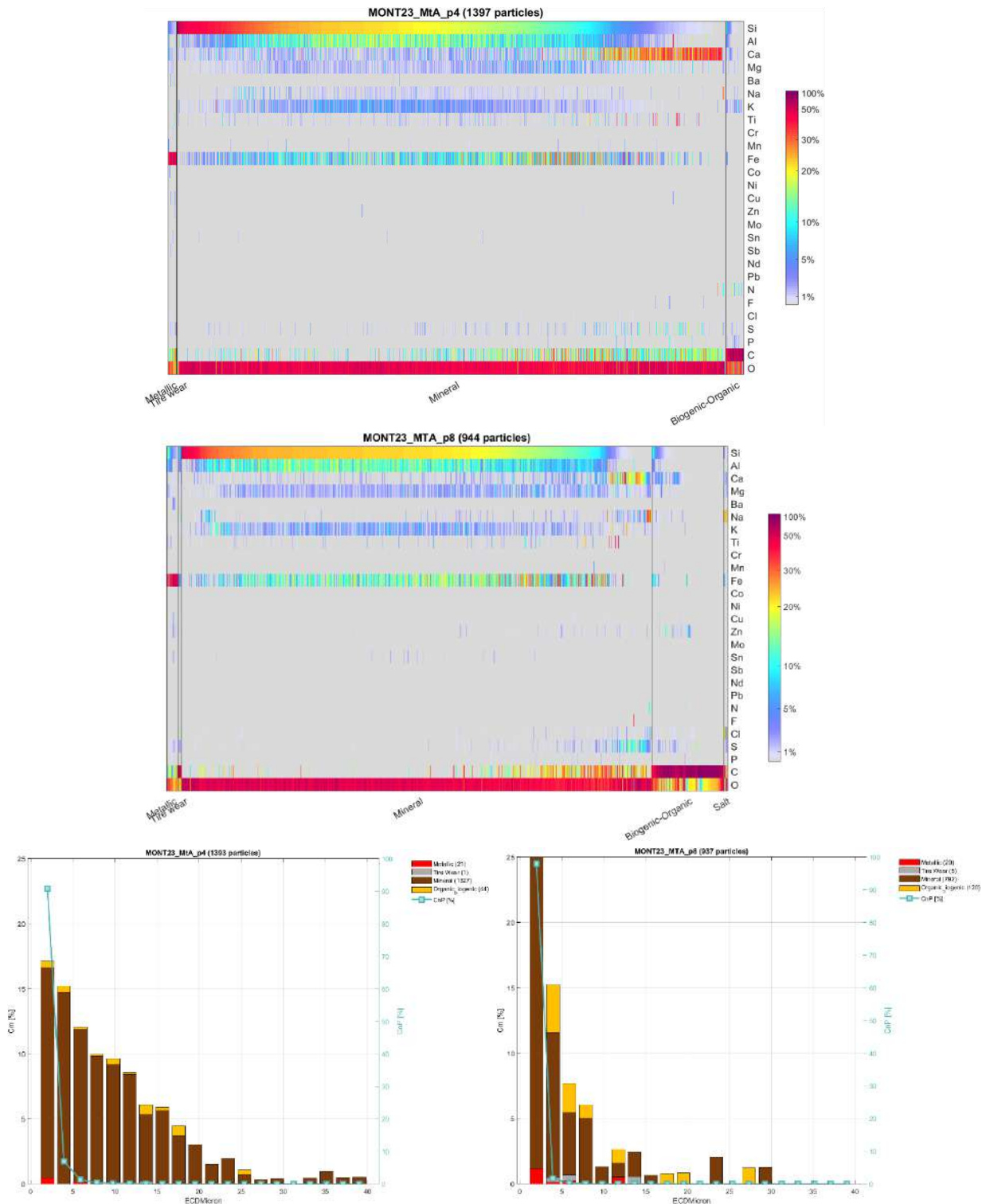


Figure 39: Résultats obtenus sur la station de mesure du Mont d'Arbois

La figure ci-dessus reprend les différents résultats obtenus sur la station de mesure située au Mont d'Arbois :

- En haut, les représentations graphiques (carte thermique) de la composition élémentaire de toutes les particules mesurées sur l'échantillon Sigma-2 (la fraction $PM_{10-2.5}$) sur la période 4 (1 397 particules) et sur la période 8 (944 particules). Les

particules sont classées par groupes morpho-chimiques (voir exemple de lecture de carte thermique en annexe)

- Sur les graphes (en bas), sont représentés les concentrations massiques relatives (Cm%) résolue en fonction de la taille des particules (10-2,5 μm) pour les différents groupes morpho-chimiques ; données provenant de l'analyse de particules individuelles d'échantillons Sigma-2. ECDMicron (équivalent circular diameter des particules en μm). CnP (%) : concentration relative du nombre de particules (% du #P/m³).

8.2.3.3 Caractérisation par des analyses chimiques humide « bulk » de la fraction PM_{2.5}

Dans cette partie est présentée la différenciation des poussières fines (PM_{2.5}).

Dans les figures 40 et 41, la fraction fine est dominée par des particules constituées de matière organique (MO) sur toutes les stations de mesure pendant la campagne de mesure hivernale.

Il est intéressant de constater que, comme pour la fraction grossière (PM_{10-2.5}), au cours de la période 5, les concentrations de PM_{10-2.5} totales et de tous les types de particules séparées ont diminué graduellement avec l'augmentation de l'altitude des sites (figure 40). Ainsi, les plus fortes concentrations de matière organique (MO) pendant cette période 5 ont été mesurées dans la station de mesure siège CCPMB (7,38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Cette concentration de MO était au moins 1,3 fois plus élevée que les valeurs de MO des autres sites.

Bien que présentes à des concentrations nettement plus faibles, un comportement similaire (une diminution progressive avec l'altitude) s'applique à toutes les autres particules (sulfates, nitrates, potassium, ammonium). Surtout pour le carbone élémentaire avec une concentration de 1,37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au siège CCPMB, qui est 1,7 fois plus élevée qu'à St. Gervais centre, 2,3 fois plus élevée qu'à Cordon centre et 4.5 fois plus élevée qu'à Megève centre.

Au cours de la période 6, la concentration de tous les composants des PM_{2.5}, à l'exception du CE, était nettement plus élevée sur toutes les stations de mesure (figure 40). Il est intéressant de noter que le gradient de concentration mentionné précédemment est également présent dans cette période, mais pas entre St. Gervais centre et le siège CCPMB, qui présentent des rapports de composants pratiquement identiques dans la période 6.

Pour le Mont d'Arbois, aucune valeur MO n'a pu être déterminée, la concentration étant inférieure à la limite de quantification analytique. Pour les autres composants (CE, et particules secondaires), les concentrations sont soit nulles, soit extrêmement faibles. Cela confirme la faible concentration de PM_{2.5} obtenue par la mesure gravimétrique. Il est très probable que la majorité des particules non mesurables (en gris sur la figure 40) correspondent à des MO, qui étaient en dessous de la limite de quantification en raison de leur faible concentration.

Les explications possibles des différences de concentrations des composants PM_{2.5} entre les périodes 5 et 6 sont expliquées au chapitre 8.3.1.2.

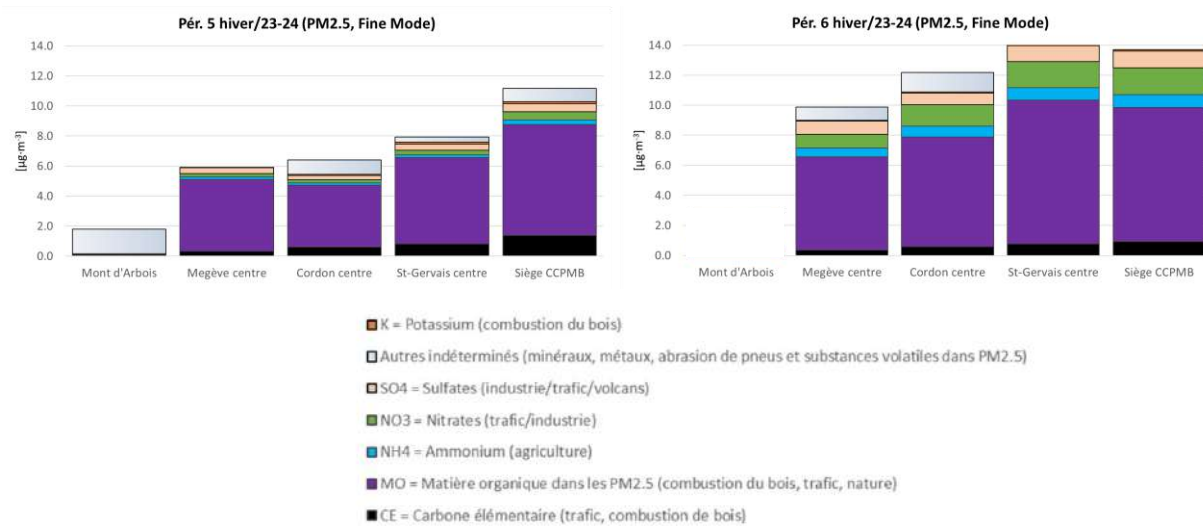


Figure 40: Diagramme des différents groupes morpho-chimiques de particules (PM_{2,5}).

Les diagrammes, présentés dans la figure ci-dessus, montrent la teneur des différents groupes morpho-chimiques de particules parmi les poussières fines (PM_{2,5}) ainsi que la comparaison entre les différentes stations de mesure et les deux périodes sélectionnées (période 5 : à gauche et période 6 : à droite).

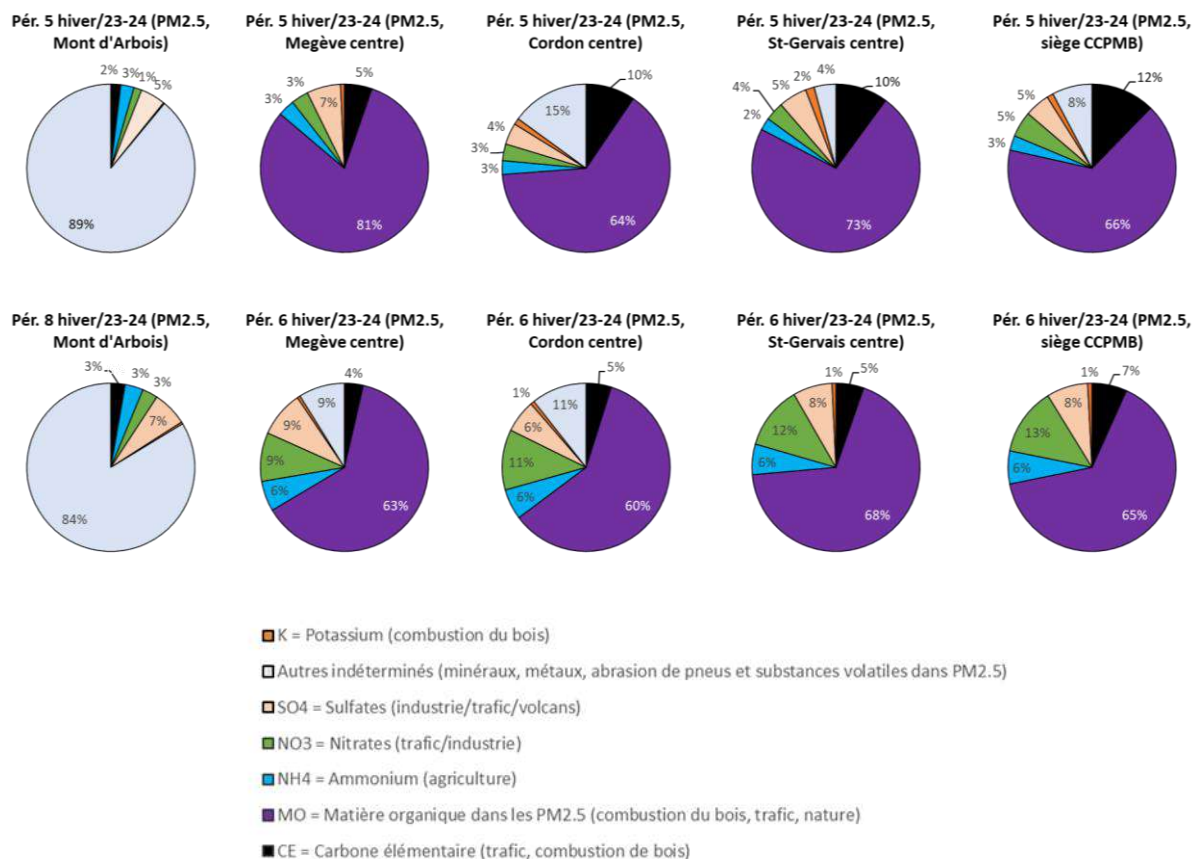


Figure 41: Contribution relative des différentes sources aux poussières fines (PM_{2,5}) pour les 5 stations de mesure et des périodes sélectionnées correspondantes.

8.2.3.4 Intégration des résultats pour l'ensemble des PM₁₀

Dans cette partie est présentée la différenciation des poussières PM₁₀.

Dans les figures 42 et 43, la matière organique (MO) est dominante pendant la campagne de mesure hivernale sur toutes les stations de mesure (> 47 wt.% en poids).

Sur la période 5, les particules minérales, suivies par les grosses particules biogènes (PM_{10-2.5}) et le carbone élémentaire (CE), représentent également une part importante. Les particules hors échappement (c.-à-d. l'abrasion des pneus + l'abrasion des métaux) représentent de quelques wt.% à 10 wt.%. Les concentrations les plus élevées de ces particules ont été mesurées au niveau du site siège CCPMB.

Au cours de la période 5, les concentrations les plus basses ont été enregistrées pour les particules secondaires (c'est-à-dire sulfates, nitrates, ammonium).

Comme décrit dans les chapitres précédents sur les PM_{10-2.5} et PM_{2.5}, on observe la même diminution progressive de la concentration des différents composants des PM₁₀ avec l'augmentation de l'altitude du site de mesure, pendant la période 5 (figure 42). C'est un résultat particulièrement intéressant, qui sera discuté plus en détail ultérieurement.

Au cours de la période 6, nous observons une augmentation des concentrations de MO, de nitrate, de sulfate et d'ammonium, composants pratiquement exclusifs des PM_{2.5}. Alors qu'une légère diminution des particules issues du trafic routier (usure des pneus, usure des métaux et une partie du CE) a été constatée au cours de la période 6 par rapport à la période 5. Les particules métalliques, sur la station de mesure Cordon centre (un virage), constituent une exception, leur concentration est plus élevée sur la période 6 que sur la période 5. La majorité de ces particules semblent avoir une signature d'abrasion de freins (comme lors de la période 5). Par conséquent, aucune indication claire d'une source supplémentaire de particules métalliques dans la période 6 n'a été trouvée pour Cordon centre.

La diminution des concentrations des différents composants a également été observée durant la période 6, mais uniquement pour les composants des PM_{2.5} (MO, CE, et particules secondaires) et non pour les PM_{10-2.5}. De plus, il n'y a pas de gradient entre la station de mesure du siège CCPMB et celle de St Gervais centre, où les proportions de concentration des différents types de particules sont pratiquement identiques durant la période 6 (figure 42).

Pour le Mont d'Arbois, aucune valeur MO n'a pu être déterminée car la concentration était inférieure à la limite de quantification analytique. Et pour les autres composants les concentrations étaient soit nulles, soit très faibles. Cela se traduit par des niveaux de PM₁₀ et de leurs composants nettement plus faibles à Mont d'Arbois que sur les autres sites. Il est très probable que la majorité des particules non mesurables (en gris sur les figures 42 et 43) correspondent à des MO, qui étaient en dessous de la limite de quantification.

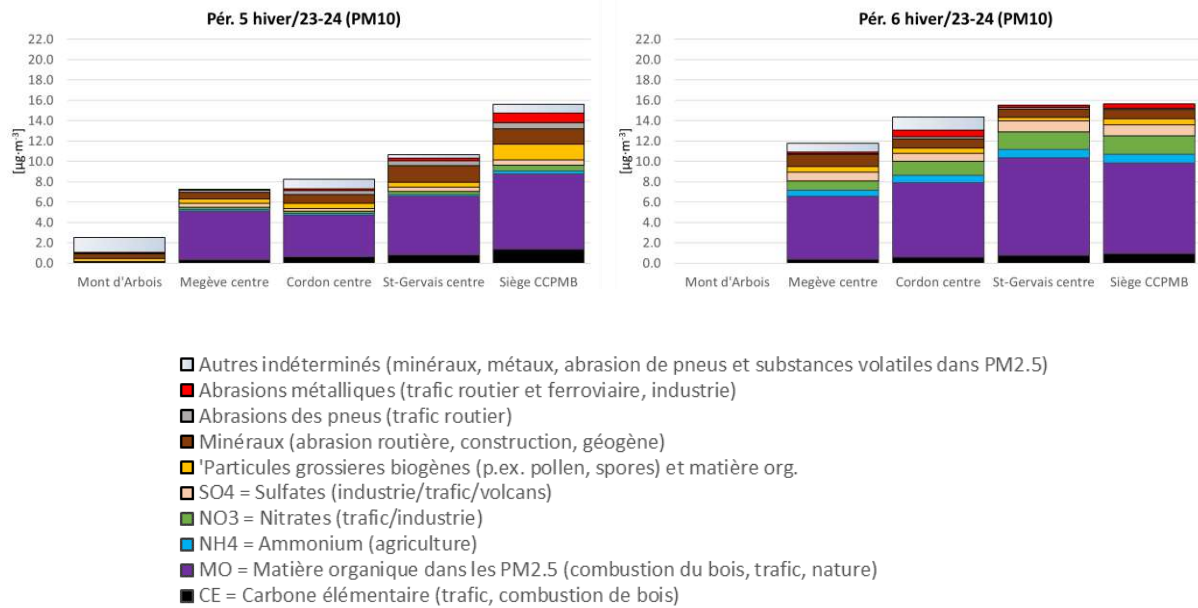


Figure 42: Diagramme des différents groupes morpho-chimiques de PM₁₀.

Les diagrammes, représentés dans la figure ci-dessus, montrent la teneur des différents groupes morpho-chimiques de particules parmi les poussières fines (PM₁₀) ainsi que la comparaison entre les différentes stations de mesure et les deux périodes sélectionnées (période 5 : à gauche et période 6 : à droite).

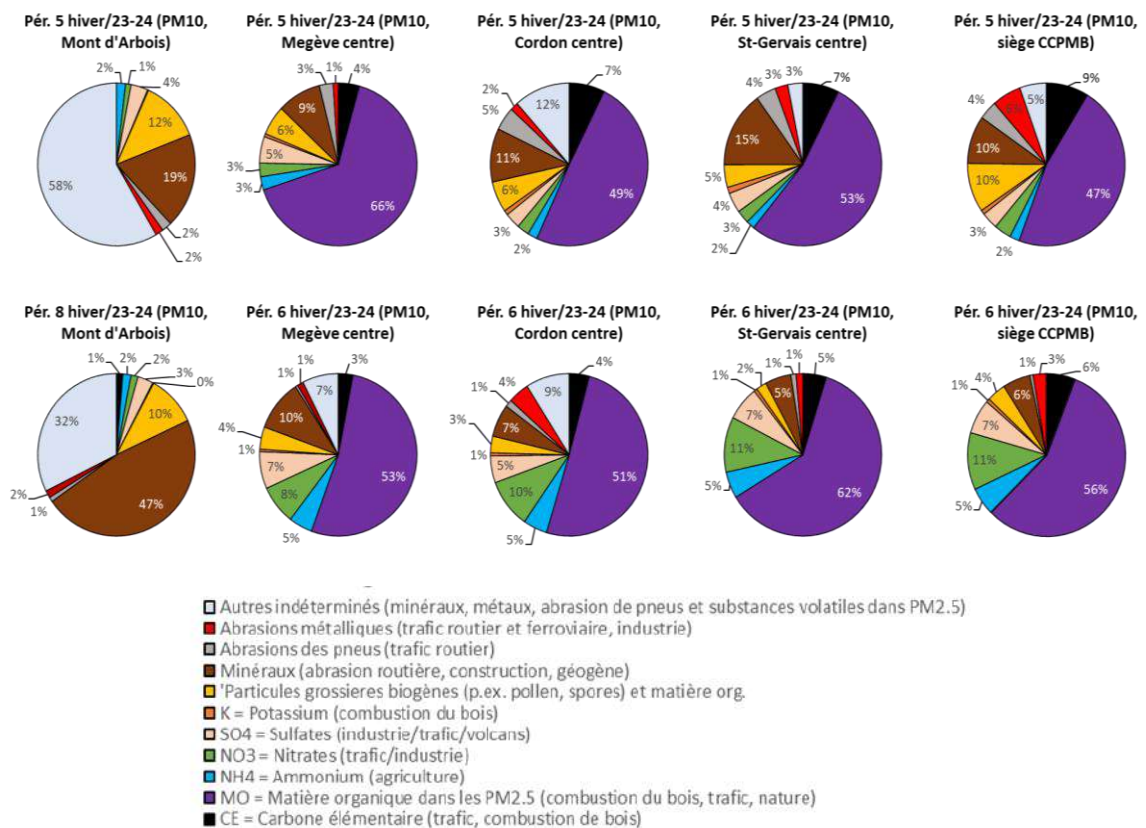


Figure 43: Contribution relative des différentes sources aux poussières grossières (PM₁₀ - PM_{2.5}) pour les 5 stations de mesure et des périodes sélectionnées correspondantes.

A retenir

Durant la campagne hivernale :

- Prédominance de la fraction fine $PM_{2.5}$
- Principalement de la matière organique provenant de la combustion du bois et du trafic local (pourcentage supérieur à 47 %)
- La concentration en PM diminue progressivement avec l'altitude ce qui traduit l'influence de sources anthropiques locales telles que le chauffage résidentiel notamment pour cette saison.

8.3 Comparaison des deux campagnes estivale et hivernale

8.3.1 Concentrations $PM_{10-2.5}$, $PM_{2.5}$ et PM_{10} mesurées au Pays du Mont-Blanc (été VS hiver)

Lors de la campagne de mesure estivale, les concentrations de $PM_{10-2.5}$ (moyenne de deux périodes) étaient nettement plus élevées dans toutes les stations de mesure (facteur allant de 2,6 à 5) que lors de la campagne de mesure hivernale (figure 45). Le plus petit facteur a été mesuré sur la station de mesure siège CCPMB et le plus grand au Mont d'Arbois.

Par contre, les moyennes de $PM_{2.5}$ étaient très similaires entre les campagnes de mesure estivale et hivernale. Sauf au Mont d'Arbois, où la concentration moyenne de $PM_{2.5}$ était nettement plus faible en hiver qu'en été (facteur de 3,2).

A la station de mesure siège CCPMB, la moyenne des $PM_{2.5}$ était légèrement plus élevée en hiver (+ 40%), ce qui était probablement lié à sa situation dans la vallée proche des émissions anthropiques (plus de détails seront discutés en comparant la caractérisation des PM).

A Megève, la moyenne des concentrations de $PM_{2.5}$ était même plus basse en hiver qu'en été (-25 %). Il convient toutefois de noter que si les deux périodes estivales présentaient des niveaux élevés très similaires, les deux périodes hivernales étaient caractérisées par des concentrations de $PM_{2.5}$ très différentes. Ceci est probablement dû aux conditions météorologiques différentes des deux périodes hivernales (figure 34).

Si l'on fait la somme des deux fractions (grossière $PM_{10-2.5}$ et fine $PM_{2.5}$), on obtient une concentration de PM_{10} qui était en moyenne plus élevée en été qu'en hiver sur tous les sites de mesure. Ce résultat est un peu surprenant, il est généralement considéré que les particules de combustion du bois sont élevées en hiver en particulier dans la région du Mont-Blanc. Ceci serait peut-être dû à un hiver 2023-2024 ayant été relativement doux et que les $PM_{10-2.5}$ (et en particulier la différenciation des particules) ont été moins étudiées jusqu'à présent.

Les résultats décrits ci-dessus pour les différentes fractions ont pour conséquence que les rapports $PM_{2.5}/PM_{10-2.5}$ sont opposés en été et en hiver (figure 44). Le rapport $PM_{2.5}/PM_{10-2.5}$ en été est de 1-1,4 (0,6 au Mont d'Arbois). En revanche, ce rapport est beaucoup plus élevé en hiver avec des valeurs comprises entre 3,6 et 4,7 (au Mont d'Arbois, il n'est que légèrement supérieur avec 0,9).

Ces proportions très différentes de particules grossières et fines dans les deux saisons montrent déjà que les contributions des différents types de particules aux deux saisons doivent être très différentes. Ces différences sont expliquées dans la partie suivante.

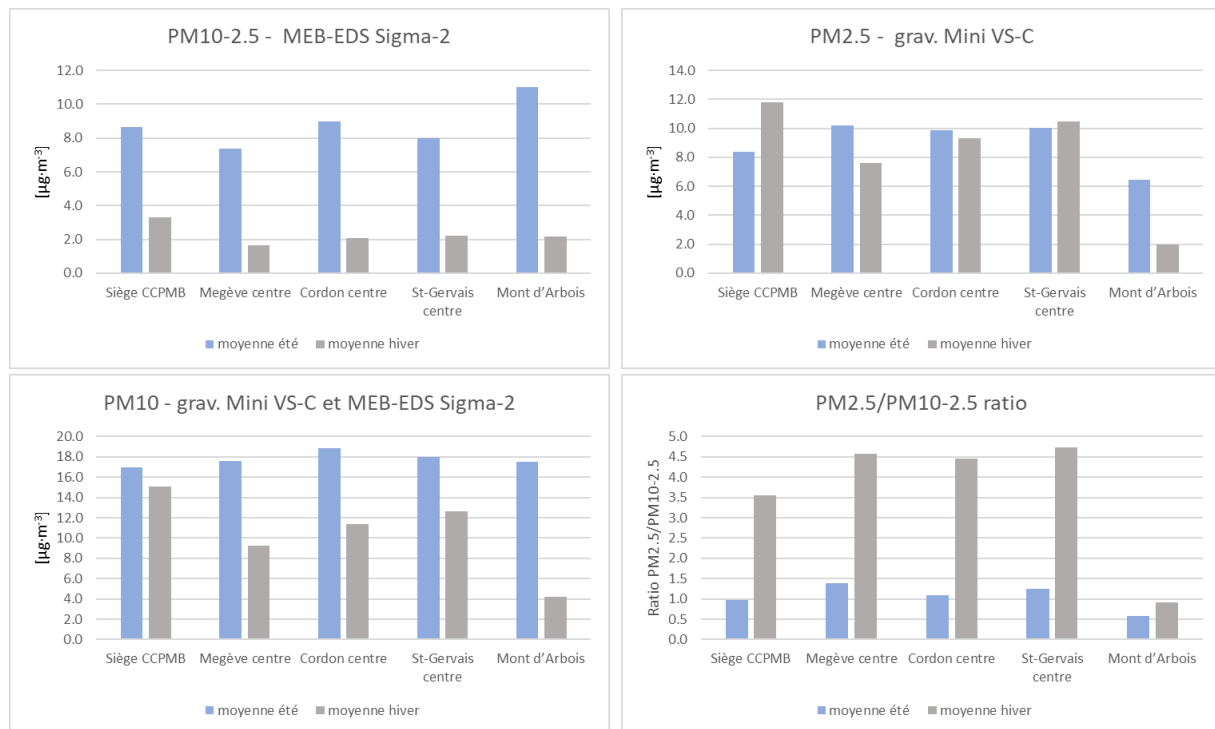


Figure 44: Comparaison des concentrations des $PM_{10-2.5}$ Sigma-2, $PM_{2.5}$ grav, PM_{10} grav+Sigma-2 et des $PM_{2.5}/PM_{10-2.5}$ et du ratio entre les deux campagnes de mesure pour les différentes stations de mesure (sans différenciation des types de particules).

Les valeurs, dans les graphiques ci-dessus, correspondent aux moyennes des deux périodes sélectionnées pour chaque campagne de mesure.

8.3.2 Comparaison de la composition des PM_{10} lors de la campagne estivale VS hivernale

Afin de comparer les proportions de sources de particules entre la campagne de mesure estivale et la campagne de mesure hivernale, les valeurs moyennes ont été calculées à partir des deux périodes analysées de chaque campagne de mesure. Les concentrations moyennes sont présentées dans la figure 45, et les principales conclusions sont les suivantes :

- Les concentrations plus élevées de PM_{10} pendant la campagne de mesure estivale sur tous les sites étudiés s'expliquent principalement par la forte proportion de **particules minérales** en été. Les particules minérales peuvent provenir de différentes sources, telles que l'abrasion des routes, les travaux de construction, les activités de carrières et de mines, les particules de sol provenant des activités agricoles ou l'érosion des particules géogènes. Ces activités sont plus fréquentes et plus intenses en été. En outre, les conditions sèches en été augmentent la remise en suspension de ces particules. L'interaction de ces paramètres défavorables explique les concentrations nettement plus élevées de particules minérales lors de la campagne de mesure estivale.
- De plus, **les particules biogéniques grossières** (fraction $PM_{10-2.5}$, couleur jaune dans la figure 46) contribuent également à une partie importante des concentrations de PM_{10} en été dans la région du Mont-Blanc alors que celles-ci sont représentées par des concentrations beaucoup plus faibles en hiver. De grandes fluctuations saisonnières de particules biogènes ont déjà été observées dans plusieurs sites de mesure en Europe, avec les concentrations les plus élevées en été et en automne (par exemple Rausch et al., 2022). Une grande partie de ces particules sont des spores.

- La matière organique (MO) fine (PM_{2.5})** (couleur violette dans la figure 46) est un groupe de particules très intéressant et complexe, car elle peut avoir des sources très différentes selon la saison. Les MO fines représentent une part importante des PM₁₀ pendant les deux saisons, mais en été, les sources sont principalement d'origine naturelle (comme pour les particules biogéniques grossières) et les émissions dues au trafic. En revanche, en hiver, les principales sources de MO sont les émissions de combustion du bois et le trafic (et non la nature). Dans ce contexte, il est très intéressant de constater qu'en été les concentrations de MO sont réparties de manière plutôt homogène sur l'ensemble des sites sauf au Mont d'Arbois où la concentration est moins élevée par rapport aux autres sites. Alors qu'en hiver, elles diminuent progressivement avec l'altitude du site. La répartition homogène en été indique une pollution de fond régionale qui se répartit de manière relativement similaire sur les différents sites. En revanche, le gradient de concentration en hiver indique que des masses d'air différentes à des altitudes diverses ont eu un impact sur la dynamique de la distribution des polluants sur les sites. C'est au Mont d'Arbois que cela est le plus visible, même si l'on suppose que toute la masse indéterminée correspond très probablement à de la matière organique.

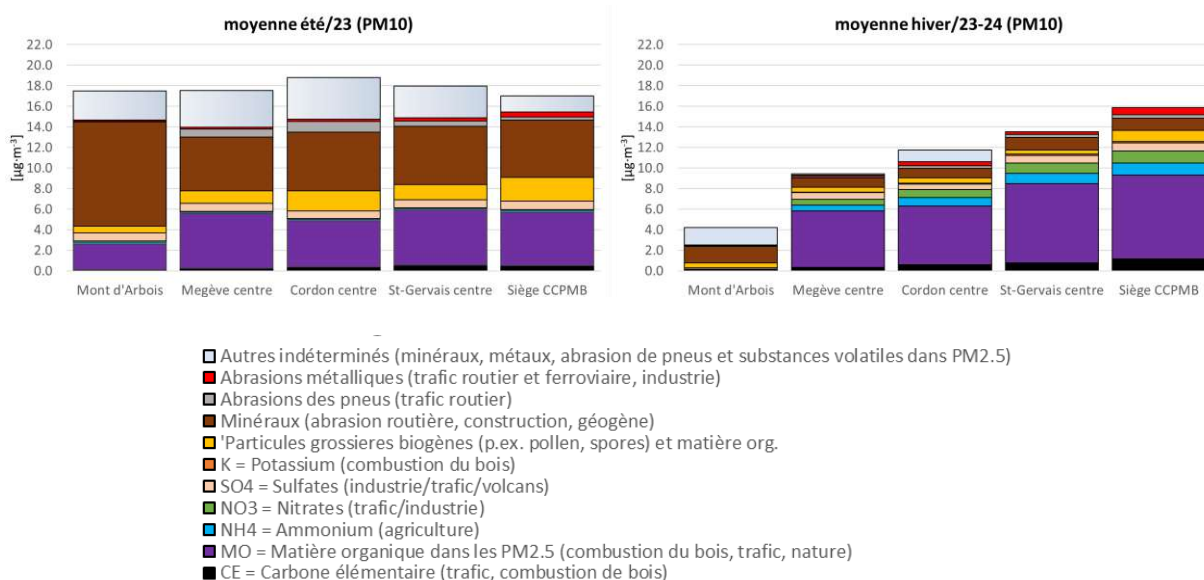


Figure 45: Diagramme empilé des différents groupes morpho-chimiques de particules PM₁₀ .

Les diagrammes ci-dessus montrent, pour toutes les stations de mesure, la teneur des différents groupes morpho-chimiques de particules parmi les poussières (PM₁₀). Ces diagrammes permettent de comparer les stations de mesure entre elles mais également de comparer les moyennes des deux campagnes de mesure (été : à gauche et hiver : à droite)

- Bien que moins prononcé, ce gradient de concentration est présent pour **les particules secondaires (sulfate, nitrate, ammonium), pour le carbone élémentaire (CE) et pour les particules hors échappement** (usure des pneus et usure des métaux) en hiver. Alors qu'en été, les concentrations de nitrate, d'ammonium et de sulfate sont uniformément faibles.

- **Les particules hors échappement** ont tendance à être plus élevées en été qu'en hiver, en raison de la remise en suspension due aux conditions plus sèches qu'en hiver. C'est particulièrement valable pour les particules d'abrasion des pneus, dont les concentrations les plus élevées ont été observées sur le site de Cordon centre en été.
- En revanche, **les particules métalliques** (en rouge sur le graphique) présentent les concentrations les plus élevées sur le site siège CCPMB, et ce durant les deux saisons. Cela est très probablement dû à la proximité de l'autoroute et aussi la proximité avec la zone industrielle.
- Le site de mesure du **Mont d'Arbois** a montré le plus grand contraste entre les deux campagnes de mesure. La concentration de particules minérales la plus élevée de toute la campagne de mesure a pu être mise en relation avec des travaux de construction à proximité de la station de mesure pendant l'été. Bien qu'en concentration beaucoup plus faible, la proportion de particules minérales sur le Mont d'Arbois était à nouveau en hiver plus élevée en moyenne que sur tous les autres sites. Ceci est cependant dû à la forte concentration de particules minérales de la période 8, qui n'a été analysée qu'au Mont d'Arbois et ne peut donc pas être comparée directement avec les autres sites. Un épisode de poussière du Sahara a été signalé durant cette période, ce qui est très probablement la cause de cette concentration plus élevée de particules minérales par rapport à la période 5.

8.3.3 Essai de différenciation et de quantification des particules de combustion du bois en utilisant le potassium et le lévoglucosan comme traceurs.

Une tentative pour différencier les MO dans les différentes parties de sources (en particulier la part de particules provenant de combustion du bois) a été envisagée.

Pour cela, des traceurs spécifiques à la combustion du bois ont été déterminés (c'est-à-dire le potassium et le lévoglucosan).

Les résultats de ce premier essai ont montré que les concentrations de potassium (K) et de lévoglucosan sont à un niveau très bas par rapport à un site où une forte charge d'émissions de combustion du bois est identifiée et quantifiée avec la même méthodologie utilisée ici (San Vittore, vallée du Misox, Suisse).

La période hivernale étudiée (mi-décembre 2023 - mi-février 2024) a été assez douce et a donc eu un impact plus faible sur les PM_{10} et $PM_{2.5}$ que celle attendue.

Les détails de ces résultats se trouvent dans la figure 46. Afin de pouvoir différencier la part de combustion du bois dans la région du Mont-Blanc, il est recommandé de réaliser une étude avec une plus grande résolution temporelle en hiver (c'est-à-dire des échantillons journaliers) et avec une période de mesures allant jusqu'en mars. Ainsi, en permettant une étude des concentrations des pics et donc un spectre de données plus large pour une régression linéaire solide comme dans le cas de San Vittore (figure 46).

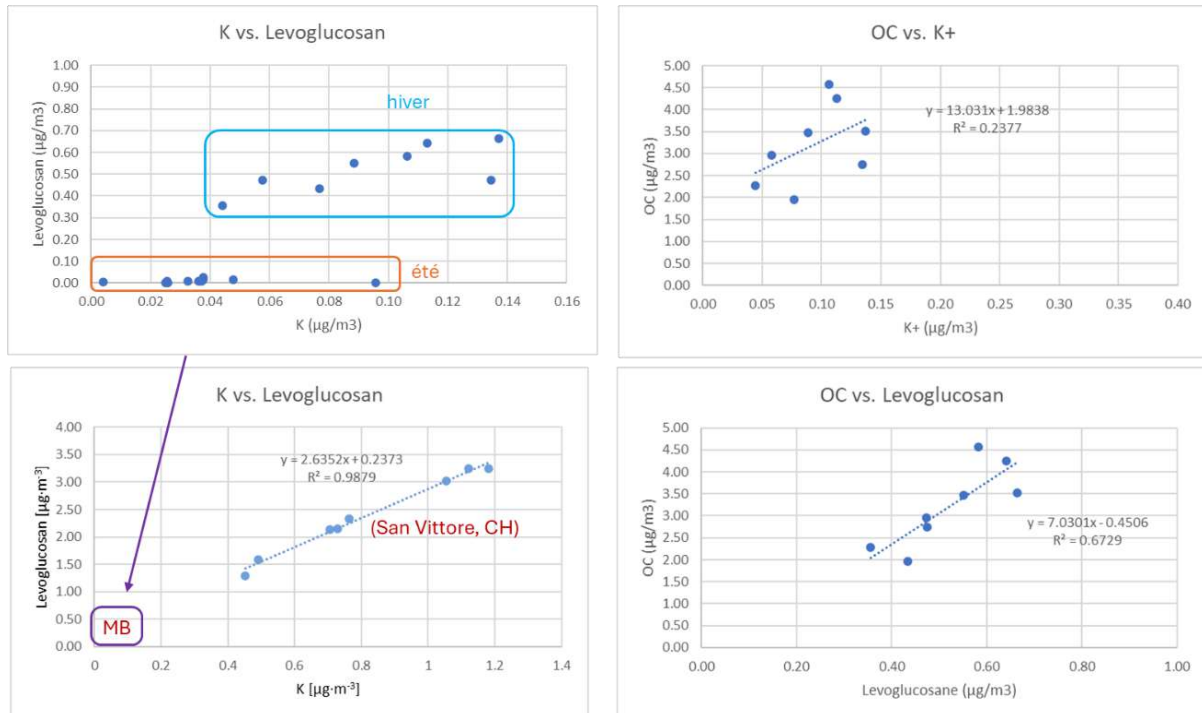


Figure 46: Valeurs de potassium et de lévoglucosan pour la campagne de mesure estivale et hivernale dans la région du Mont-Blanc (en haut à gauche) et à titre de comparaison, valeurs d'une campagne de mesure hivernale (2022/2023) à San Vittore, vallée du Misox, Suisse.

Sur la campagne de mesure hivernale, faite à San Vittore, la régression linéaire montre une excellente corrélation entre le potassium (K) et le lévoglucosan (L) ($R^2= 0,99$). Le spectre des valeurs K et L du Mont-Blanc pour l'hiver 2023/2024 sont indiquées dans la case rouge et étiquetées MB (en bas à gauche). Les valeurs, CO vs. K et CO vs. lévoglucosan de la campagne de mesure hivernale, présentent une mauvaise corrélation (en particulier OC vs. K) (à droite). Cela est très probablement lié aux valeurs globalement très basses.

9 MESURES EN CONTINU

Cette partie regroupe l'analyse des résultats issus des mesures en temps réel par le réseau de micro-capteurs WT1 déployé sur les différents points de mesures du **01 juillet 2023 au 30 juin 2024**.

9.1 Bilan de mise en œuvre du réseau de micro-capteurs

Dans l'ensemble, la mise en place du réseau de micro-capteurs WT1 s'est déroulée dans de bonnes conditions. Les capteurs ont été connectés directement au réseau électrique afin d'assurer un bon fonctionnement.

Pendant l'année de mesure, quelques imprévus ont eu lieu et sont répertoriés ci-dessous :

- Sur le site du Jailliet, les mesures ont commencé qu'à partir du 05/07/2023 en raison d'un problème électrique
- Le capteur installé sur le site de Atmo Passy a été déplacé sur le site Mont d'Arbois afin de vérifier les données du capteur sur place en raison des niveaux anormalement élevés sur ce site d'altitude. Cette opération a eu lieu entre le 9 juillet et le 24 août 2023. Le capteur n'a été remis sur le site de la station Atmo que le 01 septembre 2024.
- Le capteur de particules sur le site de Megève centre n'a pas fonctionné depuis le 30 mai 2024 (21 h). Par conséquent, aucune donnée sur les particules durant le mois de juin à Megève.

Dans le cadre de la validation métrologique, il a été nécessaire de déplacer tous les capteurs vers la station Atmo Passy afin de mener une campagne d'inter-comparaison de 3 semaines, du 23 novembre au 14 décembre 2023.

Par conséquent, les moyennes mensuelles sont calculées sur des données de mois incomplet pour les mois de novembre du 1 au 22 et de décembre du 15 au 31 pour tous les sites. A l'exception des sites de Cordon centre où la remise sur place du capteur a eu lieu le 19 décembre, tandis que celle du Jailliet n'a eu lieu que le 20 décembre 2023.

Le tableau 11 montre les taux de fonctionnement des capteurs pour les différents polluants mesurés sur l'ensemble des sites. Ils varient entre 91 et 100 %, ce qui est un résultat très satisfaisant dû au branchement direct au réseau électrique.

Cette observation de la qualité de l'air au Pays du Mont-Blanc a pu générer :

330 240 données récoltées

8256 de données horaires moyennes

344 jours de mesure en continu

11 mois de mesure en continu

Tableau 11: Récapitulatif des taux de fonctionnement des mesures par le réseau de micro-capteurs pour l'ensemble des mesures 2023-2024.

	Atmo Passy	Montée de Domancy	St-Gervais centre	Cordon centre	Plateau d'Assy	Praz la Tonnaz	Megève centre	Les Contamines Montjoie	Le Jaillet	Mont d'Arbois
Taux de fonctionnement PM ₁₀	91 %	100 %	98,5 %	98,5 %	100 %	100 %	91 %	99,5 %	97 %	98,3 %
Taux de fonctionnement PM _{2.5}	91 %	100 %	98,5 %	98,5 %	100 %	100 %	91 %	99,5 %	97 %	98,3 %
Taux de fonctionnement NO ₂	91 %	100 %	98,5 %	98,5 %	99,9 %	100 %	100 %	99,5 %	97 %	98,6 %
Taux de fonctionnement O ₃	91 %	100 %	98,5 %	98,5 %	100 %	100 %	100 %	99,5 %	97 %	98,6 %

9.2 Suivi des particules PM₁₀ et PM_{2.5}

9.2.1 Moyenne annuelle

La figure 47 présente la moyenne annuelle en PM₁₀ pour les différents sites de mesure et l'ensemble des stations Atmo environnantes.

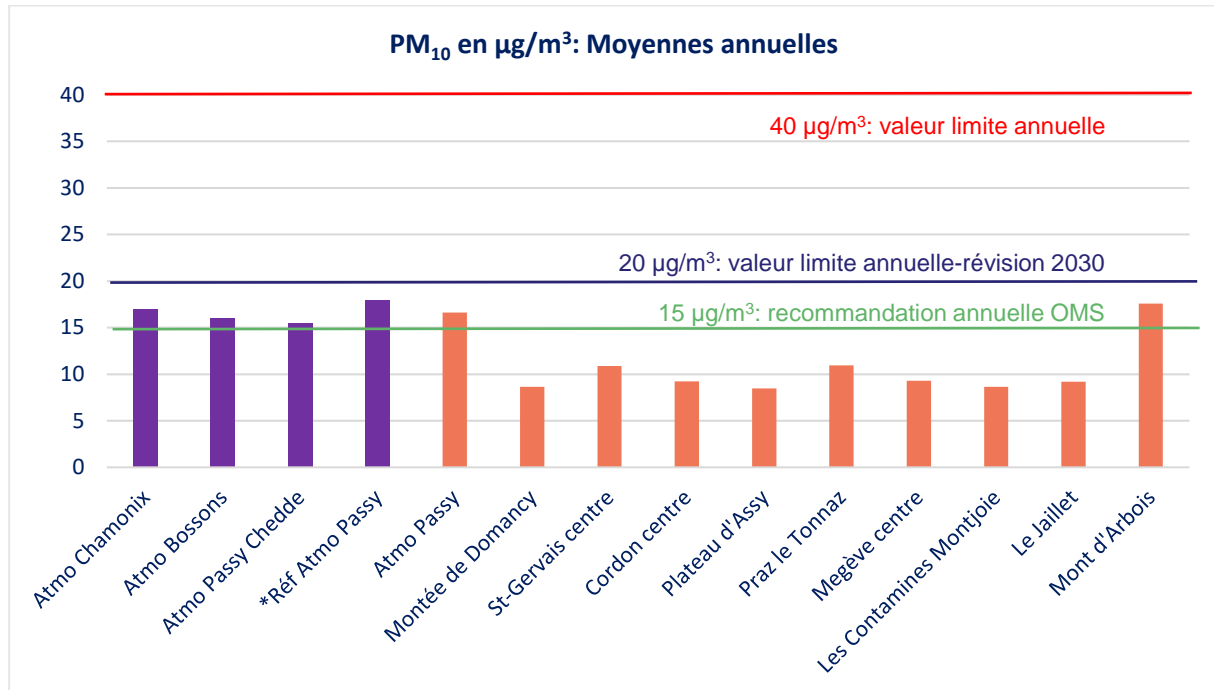


Figure 47: Moyennes annuelles en PM₁₀

Légende

- Stations Atmo
- Capteurs WT1

Situation vis-à-vis de la réglementation

Les concentrations moyennes annuelles sont largement en dessous de la valeur limite annuelle (40 µg/m³).

De même, les niveaux moyens de PM₁₀ restent inférieurs à la valeur limite annuelle de la prochaine réglementation validée en octobre 2024 par l'UE (20 µg/m³).

Du point de vue des recommandations OMS, l'ensemble des sites respecte la recommandation OMS annuelle (15 µg/m³), sauf le site de Passy qui a dépassé légèrement cette valeur. Le site Mont d'Arbois est un cas particulier qui a subi une pollution locale liée aux travaux menés durant l'été 2023 et début d'été 2024.

Il est important de noter que les concentrations moyennes annuelles sont plutôt homogènes sur les différents sites de mesure, à l'exception de Passy où la valeur annuelle est légèrement supérieure.

Le site du Mont d'Arbois a enregistré des valeurs anormalement élevées en raison des travaux qui ont eu lieu durant l'été 2023 et début d'été 2024 et aussi à l'impact de présence de micro-gouttelettes d'eau (le capteur se trouvait souvent dans la couche de brume à 1840 mètres d'altitude).

La figure 48 présente la moyenne annuelle en PM_{2.5} pour les différents sites de mesure.

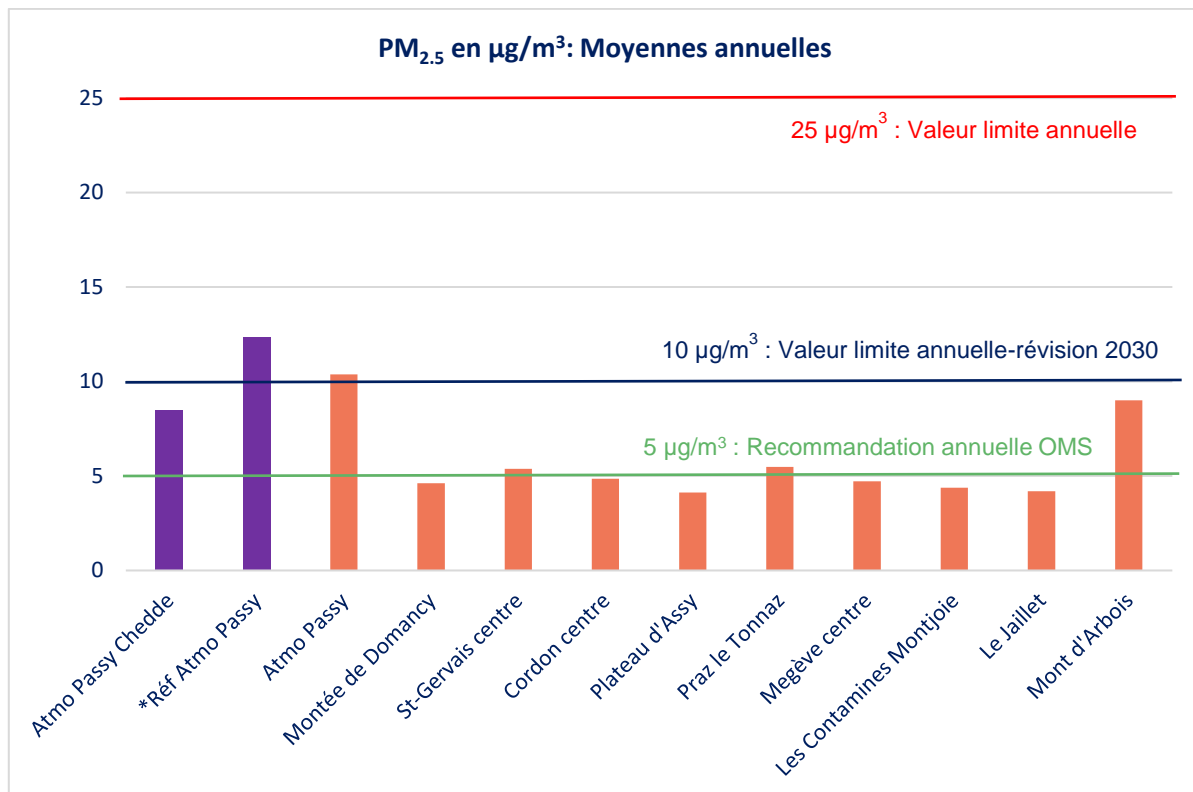


Figure 48: moyenne annuelle en PM_{2.5}.

Situation vis-à-vis de la réglementation

Les concentrations moyennes annuelles en PM_{2.5} sont largement en dessous de la valeur limite annuelle (25 µg/m³).

De même, les niveaux moyens de PM_{2.5} restent inférieurs à la valeur limite annuelle de la prochaine réglementation validée en octobre 2024 par l'UE (10 µg/m³) sur tous les sites à l'exception du site de Passy où cette valeur a été légèrement franchie.

Du point de vue des recommandations OMS, l'ensemble des sites respecte la recommandation OMS annuelle (5 µg/m³), sauf le site de Passy qui a doublement dépassé cette valeur. Les sites de Saint-Gervais et Praz la Tonnaz ont légèrement franchi cette valeur. Le site Mont d'Arbois est un cas particulier pour les raisons déjà expliquées, donc ce résultat ne reflète pas la réalité de la qualité de l'air sur ce site.

Il est important de noter que les concentrations moyennes annuelles sont plutôt homogènes sur les différents sites de mesure, à l'exception de Passy où la valeur annuelle est plus élevée.

9.2.2 Evolution de la moyenne mensuelle

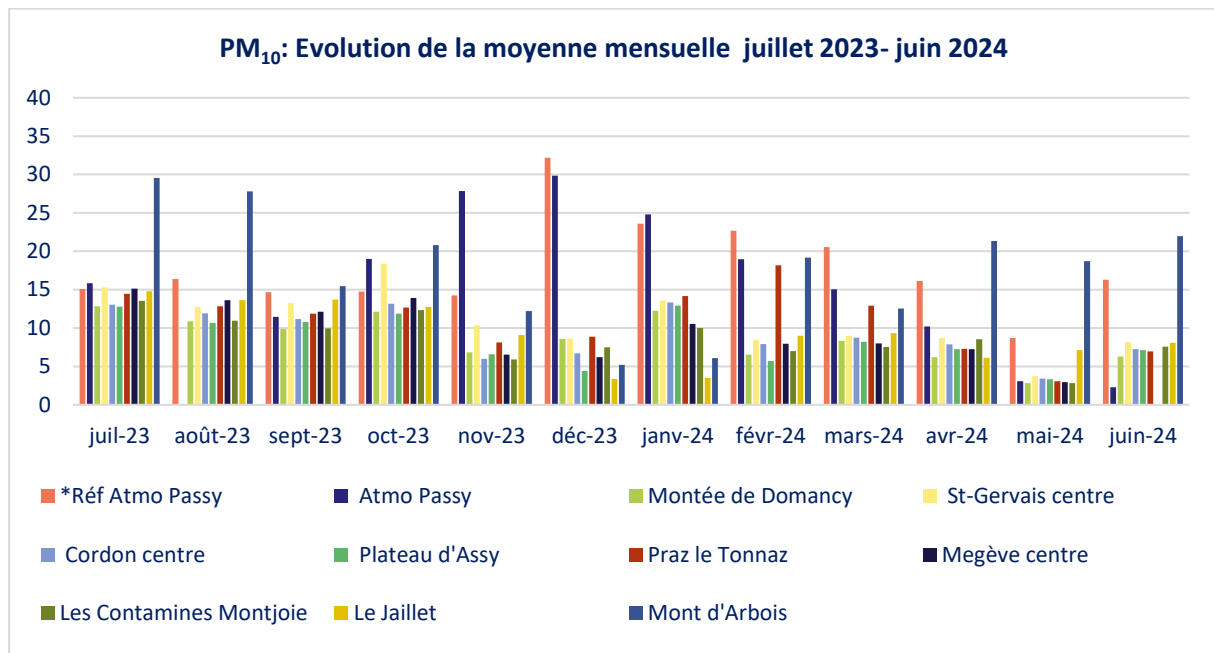


Figure 49: Evolution de la moyenne mensuelle en PM₁₀.

La figure 49 illustre l'évolution de la moyenne mensuelle des particules PM₁₀. On constate des niveaux assez homogènes pour l'ensemble des sites de juillet à octobre 2023. A partir de novembre, qui marque le début de la saison de chauffe, des niveaux élevés ont été enregistrés sur le site de Passy, cette tendance se poursuit tout au long de l'hiver jusqu'en mars 2024.

Le site de Praz la Tonnaz a enregistré la concentration la plus élevée en février qui correspond à la saison touristique.

Sur le site Mont d'Arbois, des niveaux élevés ont été relevés en juillet et août 2023 en raison des travaux de rénovation du restaurant situé à 100 mètres du site de mesure. Même constat durant l'été 2024 (avril à juin), poursuite des travaux. Les concentrations élevées enregistrées en hiver sont dues à la présence de micro-goulettes d'eau (le capteur se trouvait souvent dans la couche de brume à 1840 mètres d'altitude).

Globalement, sur tous les sites à l'exception de Passy, les niveaux en particules PM₁₀ sont moins élevés en hiver par rapport à l'été 2023. Cela pourrait être induit à la fois par la re-suspension de particules induites pendant les périodes sèches fréquentes en été, mais aussi aux conditions climatiques qui ont induit un hiver plutôt doux.

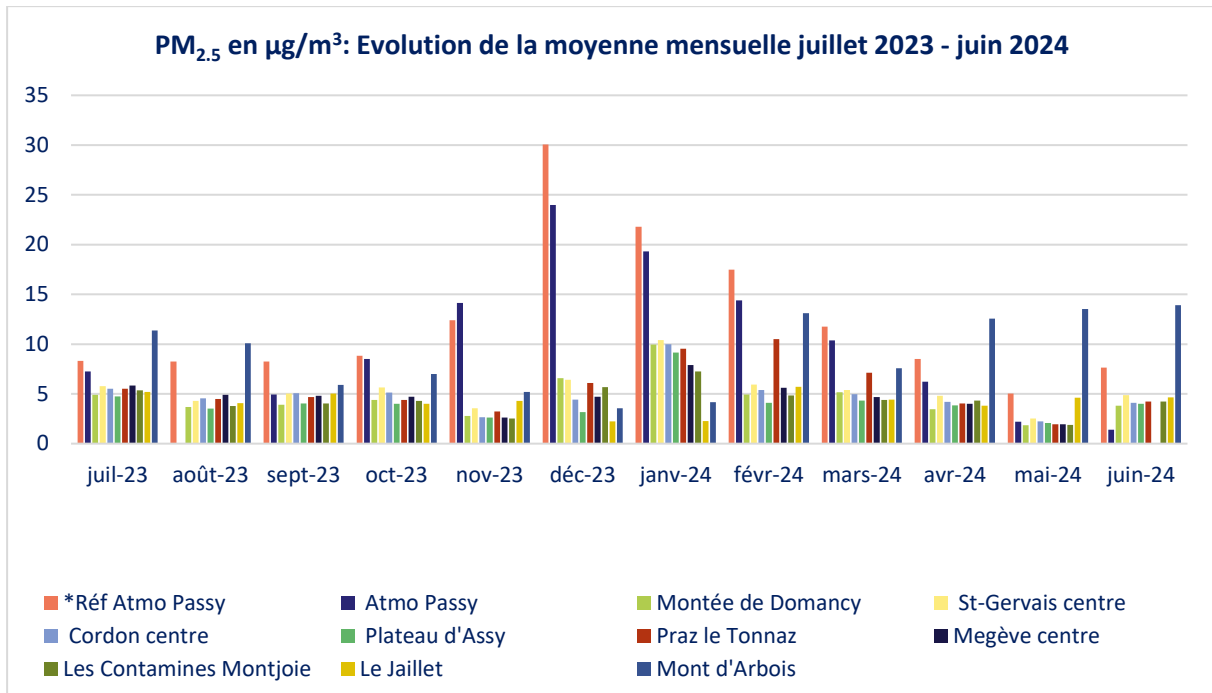


Figure 50: Evolution de la moyenne mensuelle en PM_{2.5}.

La figure 50 illustre l'évolution de la moyenne mensuelle des particules PM_{2.5}. Des niveaux assez homogènes ont été observés pour l'ensemble des sites et pour tous les mois de mesure. Des niveaux élevés ont été relevés en janvier 2024 pour l'ensemble des sites sauf sur les sites d'altitude le Jaillet et Mont d'Arbois.

Des niveaux élevés par rapport aux autres sites ont été enregistrés sur le site de Passy notamment avec le début de la saison de chauffage (novembre 2023), cette tendance se poursuit tout au long de l'hiver jusqu'en mars.

Sur le site Mont d'Arbois, même constat qu'avec les PM₁₀ pour les mêmes raisons déjà expliquées plus haut.

9.2.3 Evolution de la moyenne journalière

Les figures 51 et 52 présentent l'évolution de la moyenne journalière de PM₁₀ sur les différents sites de juillet 2023 à juin 2024. A noter que du 22/11/23 au 14/12/23, l'ensemble des capteurs ont été déplacés au niveau de la station Atmo Passy pour inter-comparaison.

Les sites d'altitudes sont présentés sur un graphique à part pour une meilleure lisibilité (figure 52).

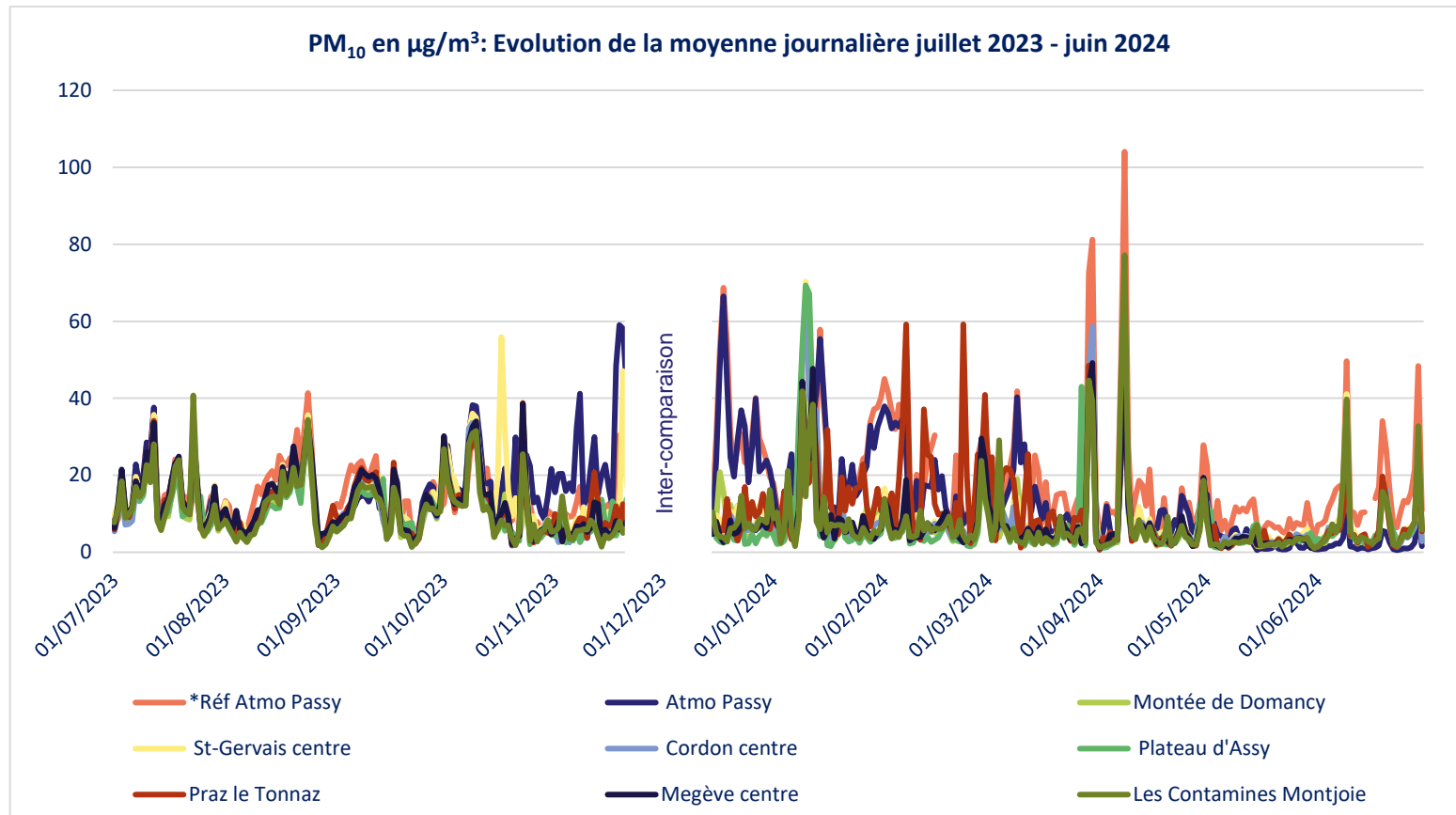


Figure 51: Evolution de la moyenne mensuelle de particules PM₁₀ juillet 23 - juin 2024.

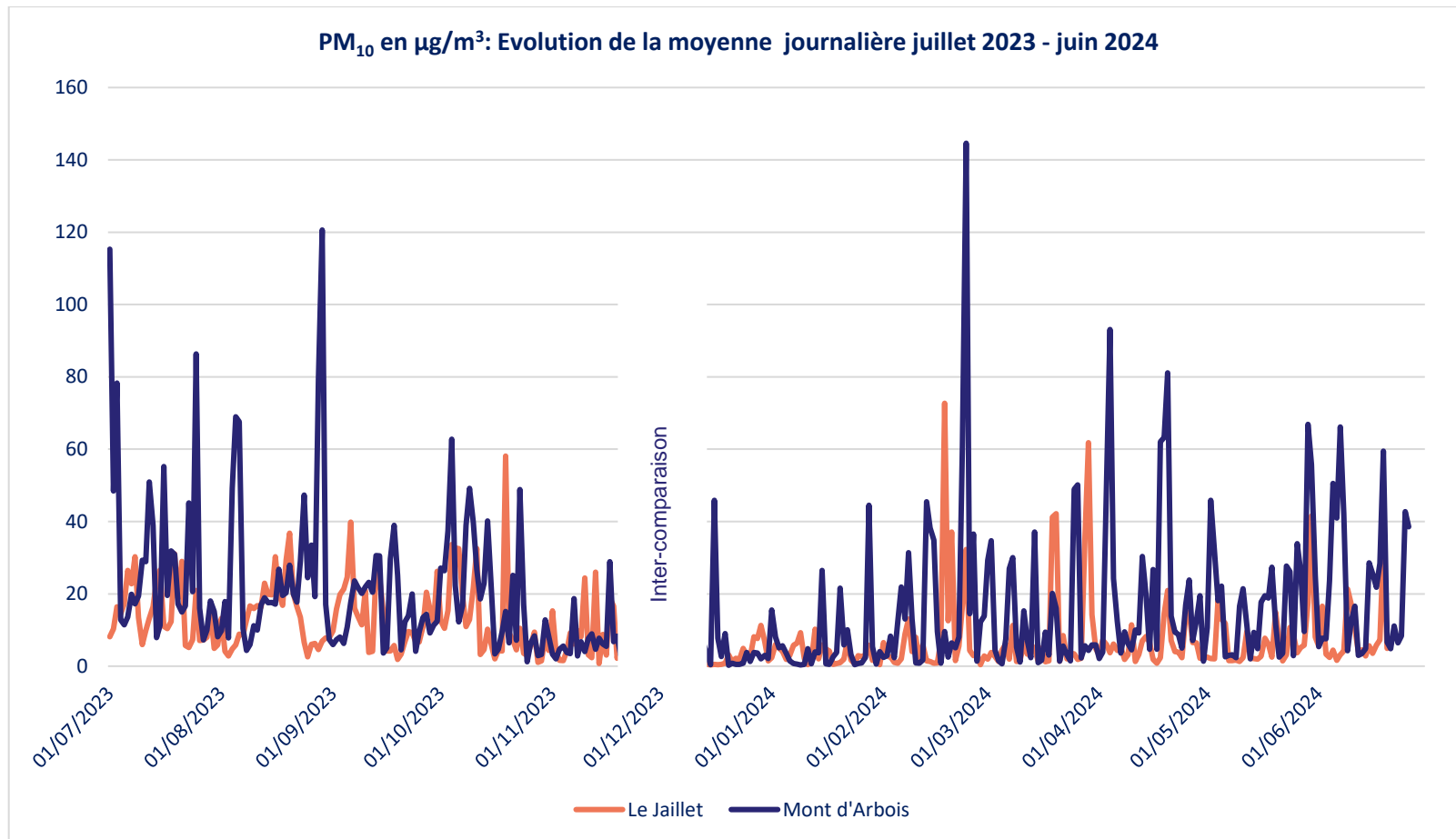


Figure 52: Evolution de la moyenne mensuelle de particules PM₁₀ sur les sites d'altitude: Le Jaillet et Mont d'Arbois.

De juillet à octobre 2023, les niveaux en PM_{10} sont assez homogènes (figure 51). Cette période correspond à la période estivale (absence de chauffage), les concentrations sont souvent similaires sur tous les sites.

En saison hivernale, de novembre 2023 à mars 2024, des différences significatives apparaissent, notamment sur le site de Passy, où plusieurs pics ont été relevés. Entre le 10 et le 14 janvier 2024, des pics assez proches de particules ont été enregistrés sur l'ensemble des sites.

Des concentrations assez élevées ont été enregistrées sur le site de Praz la Tonnaz en février, période de forte affluence touristique.

Le 8 avril 2024, des pics assez importants ont été observés sur tous les sites. Le survol de la région par des poussières désertiques est responsable de ces pics.

De mi-avril à fin juin 2024 (saison estivale), les niveaux en PM_{10} sont assez homogènes sur tous les sites.

Concernant les sites d'altitude Le Jaillet et Mont d'Arbois, l'évolution de la moyenne journalière en PM_{10} n'est pas similaire sur les deux sites. En effet, plusieurs pics ont été relevés sur Mont d'Arbois notamment en été 2023 et été 2024 en raison des travaux de rénovation d'un restaurant situé à une centaine de mètres du site de mesures. Des pics importants ont été relevés également en février, ces derniers sont corrélés avec la présence de brume (présence de fines gouttelettes dans l'air) que le capteur a comptabilisé car il ne fait pas la différence entre particules solides et liquides. Ce phénomène a été rarement observé sur le site du Jaillet car à une altitude plus faible mais phénomène amenant quand même des valeurs élevées de PM_{10} certains jours.

Concernant les PM_{2.5}, le même constat a été observé, des différences entre sites apparaissent en saison hivernale. En effet, hors la saison de chauffage, l'ensemble des sites présentent des niveaux similaires et faibles (niveau de fond régionale).

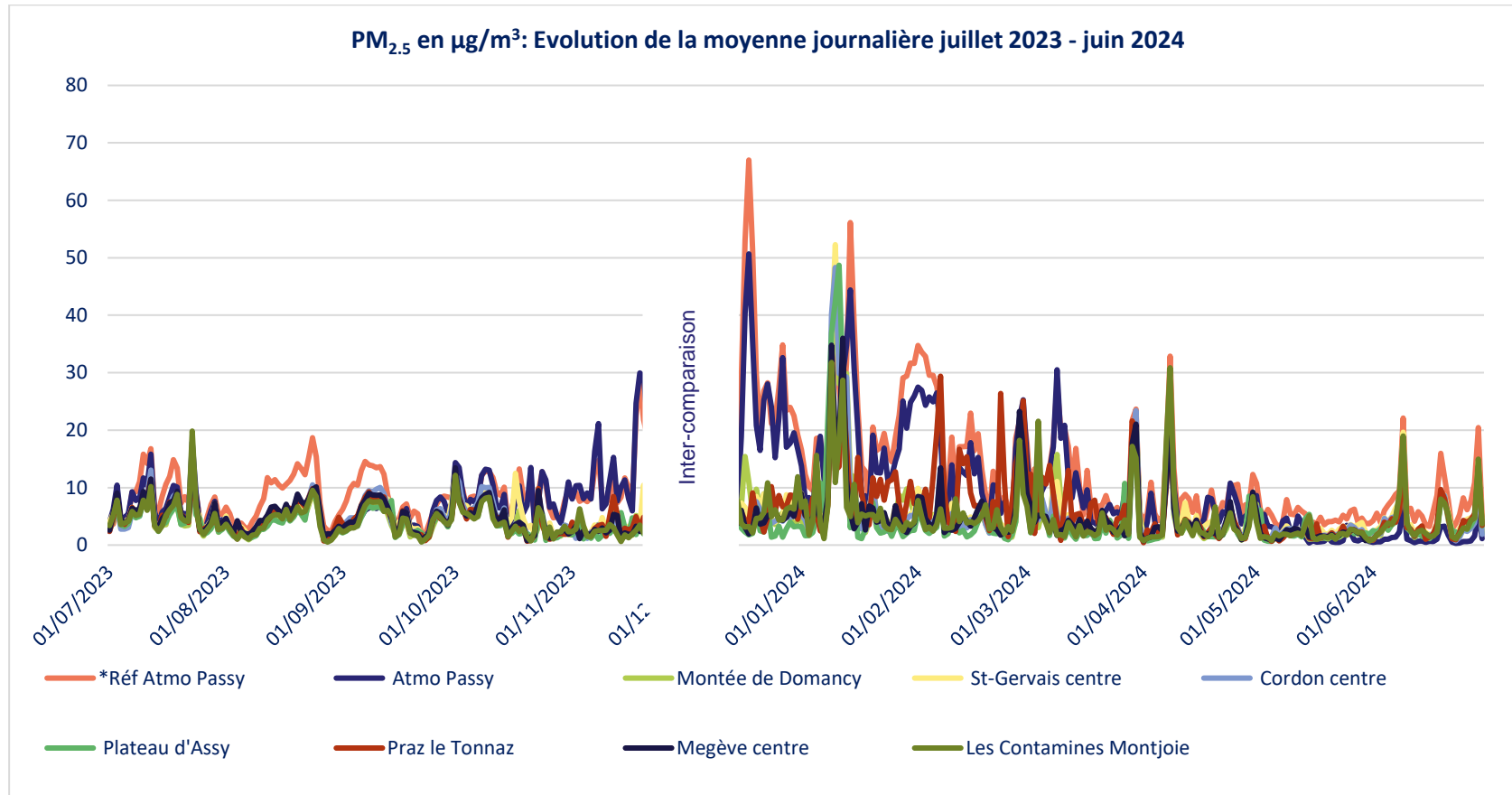


Figure 53: Evolution de la moyenne journalière en PM_{2.5}

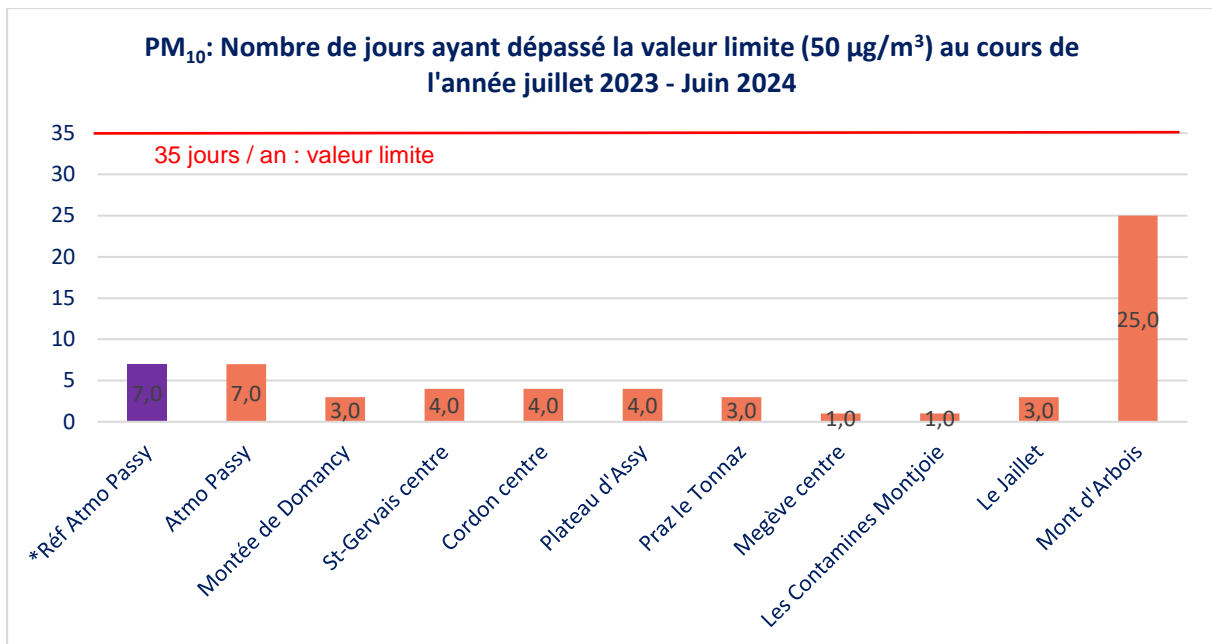


Figure 54: Nombre de dépassements de la valeur limite journalière (50 µg/m³ à ne pas dépasser 35 fois par an), Juillet 2023-Juin 2024.

Le nombre de jours ayant dépassé la valeur limite journalière est nettement en dessous de la valeur limite fixée à 35 jours à ne pas dépasser par an.

La plupart des dépassements ont eu lieu en janvier et février 2024 et aussi en avril 2024, notamment le 08 avril 2024 où la région a été survolée par des poussières désertiques d'où l'enregistrement de concentrations importantes en particules fines comme le montre le tableau ci-dessous.

Le site du Mont d'Arbois fait une exception avec un nombre important de dépassement de la limite journalière en raison des travaux qui ont eu lieu en été 2023 et été 2024 à proximité du site de mesure et aussi à l'impact de présence de micro-goulettes d'eau (le capteur se trouvait souvent dans la couche de brouillard à 1840 mètres d'altitude). Pour le site du Jaillet, ce phénomène a été rarement observé.

Tableau 12: Récapitulatif des valeurs moyenne journalière maximale et le jour où elles ont été enregistrées.

	Maximum journalier (µg/m ³)	Date correspondante au maximum journalier	Nombre de jours ayant dépassé la limite journalière 50 µg/m ³
*Ref Atmo Passy	104,1	08 /04/2024	7
Atmo Passy	66,5	18/12/2023	7
Montée de Domancy	56,7	10/01/2024	3
St-Gervais centre	70,2	10/01/2024	4
Cordon centre	65,9	10/01/2024	4
Plateau d'Assy	69,3	10/01/2024	4
Praz la Tonnaz	59,2	Le 7 et 23/02/2024	3
Megève centre	52	08/04/2024	1
Les Contamines Montjoie	77,2	08/04/2024	1
Le Jaillet	72,7	18/02/2024	3
Mont d'Arbois	144,6	24/02/2024	25

9.2.4 Profils journalier moyens

Les profils journaliers moyens décrivent l'évolution de la concentration du polluant heure par heure.

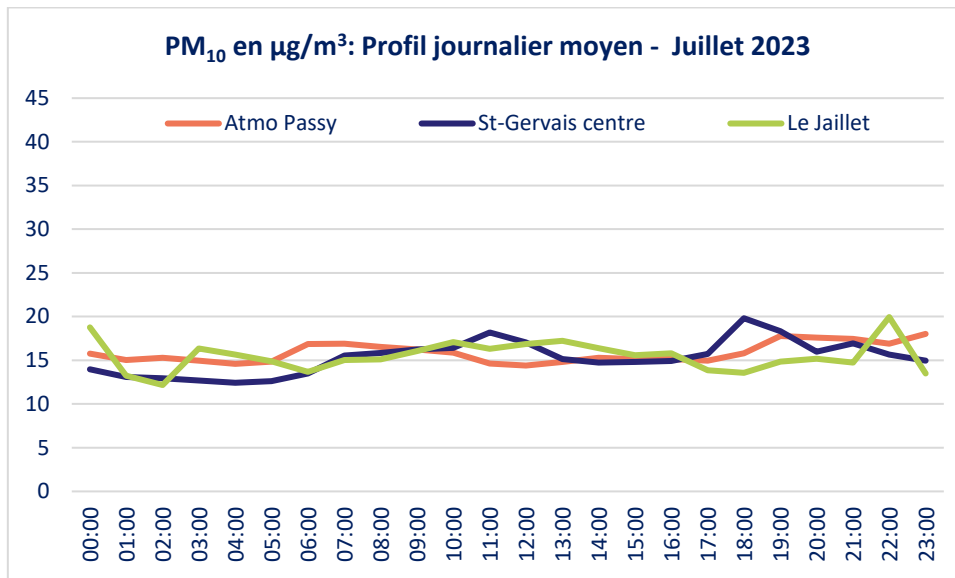


Figure 55: Profil journalier moyen PM₁₀ - Juillet 2023.

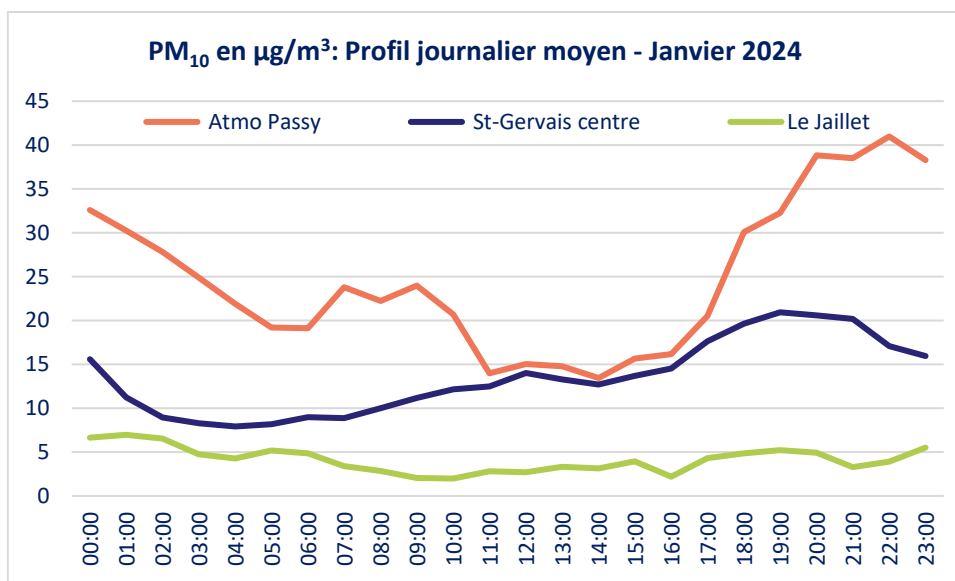


Figure 56: Profil journalier moyen PM₁₀ - Janvier 2024.

Les figures 56 et 57 illustrent les profils journaliers moyens pour les mois de juillet 2023 (été) et janvier 2024 (hiver) des sites de Passy (fond de la vallée), Saint-Gervais (centre bourg – moyenne altitude) et le Jaillet (site d'altitude). Ce choix des mois et sites est à titre d'exemple pour illustration. Tous les profils pour tous les sites et mois seront transmis avec le rapport sous format Excel à la CCPMB.

En été, quel que soit le site, le profil journalier ne suit aucune tendance particulière, cela met en évidence une pollution homogène (fond régionale).

En hiver, le profil journalier est typique pour chaque site. En effet, sur le site de fond de la vallée (Passy), un profil journalier moyen spécifique par rapport aux autres sites a été enregistré. Les concentrations sont plus élevées à partir de la soirée et elles diminuent le jour. Ceci pourrait être induit par une activité de chauffage plus forte et peut-être des conditions de

dispersion diminuées en période nocturne. Pour le site de Saint-Gervais, une légère augmentation de la concentration est également observée à partir de la soirée. En revanche, sur le site d'altitude le Jaillet, aucune tendance particulière (loin de sources d'émission).

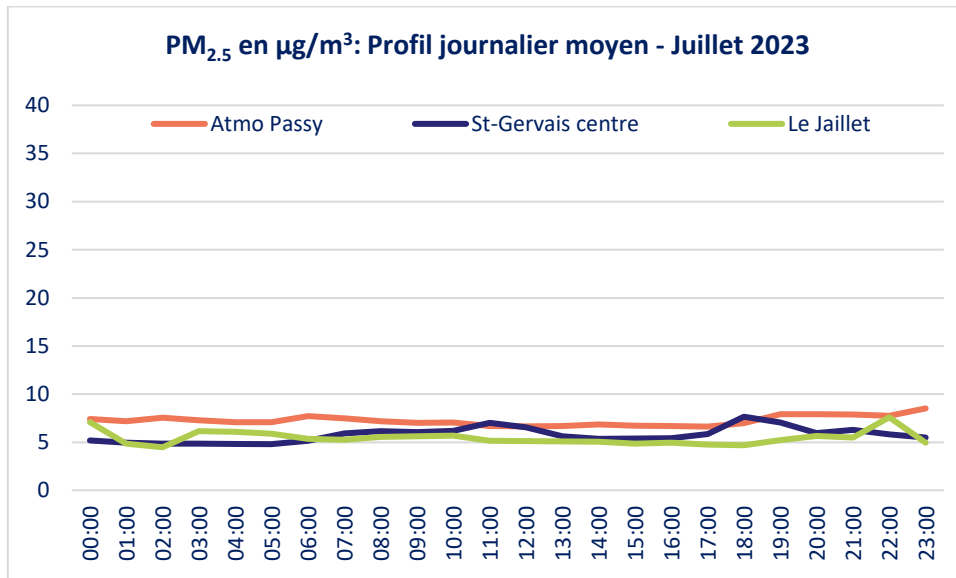


Figure 57: Profil journalier moyen PM_{2.5} - Juillet 2023.

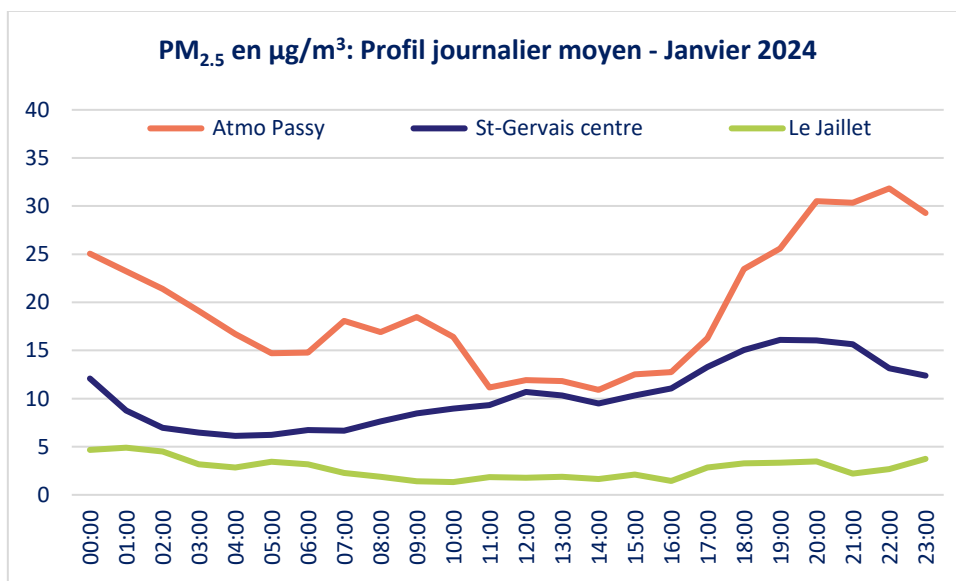


Figure 58: Profil journalier moyen PM_{2.5} - Janvier 2024.

Le constat est le même concernant les PM_{2.5}. En été, aucune tendance particulière n'a été observé pour les trois sites présentés.

En hiver, sur le site de Passy, le profil moyen journalier présente deux pics, le premier début de la matinée et le second à partir de la soirée, ces pics sont sûrement dû à l'impact du chauffage résidentiel qui semble bien visible.

Pour le site de Saint-Gervais, une légère augmentation de la concentration est observée la nuit. En revanche, sur le site d'altitude le Jaillet, aucune tendance particulière (loin de sources d'émission).

9.2.5 Comparaison PM_{2.5}/PM₁₀

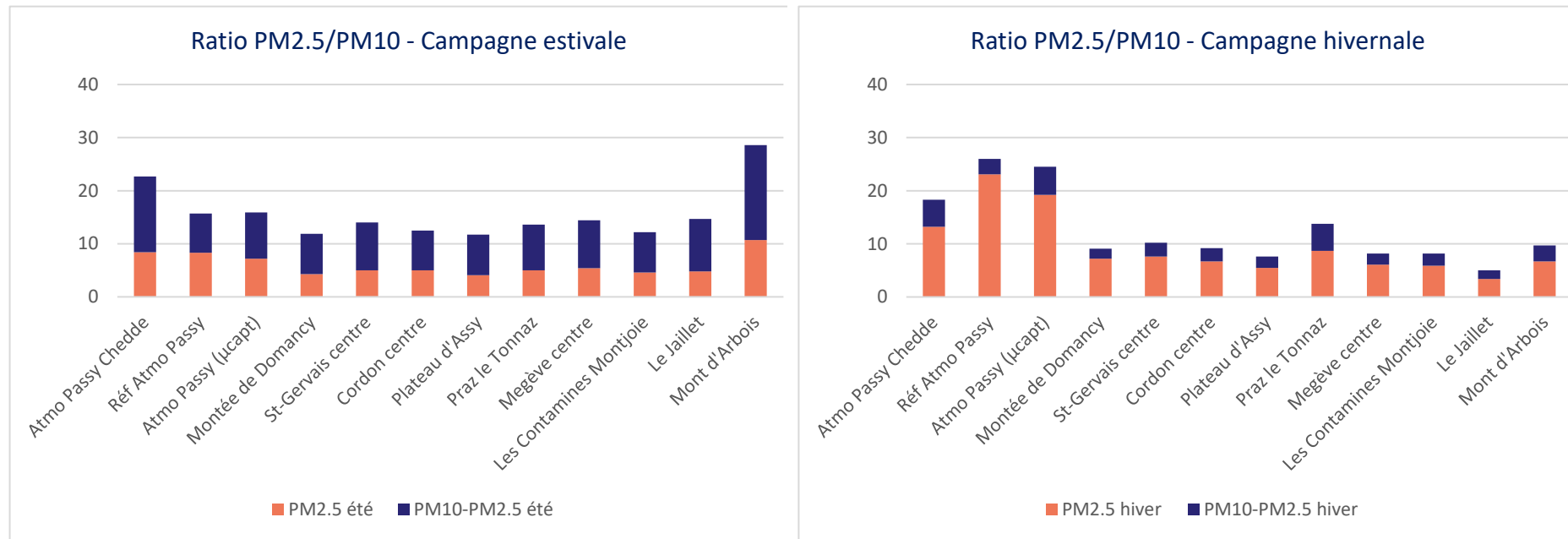


Figure 59: Comparaison du ration PM_{2.5}/PM₁₀ lors des deux campagne été et hiver.

L'exploitation des ratios PM_{2.5}/PM₁₀ a permet de mettre en évidence les éléments suivants :

- **En été**, prédominance de la fraction **grossière des particules** (PM_{10-2.5}) (entre 33 et 53 % de PM_{2.5} dans PM₁₀). La caractérisation chimique a montré qu'il s'agit globalement de particules minérales.
- **En hiver**, prédominance de la **fraction fine** (PM_{2.5}) (entre 63 et 89 % de PM_{2.5} dans PM₁₀). La caractérisation chimique a montré qu'il s'agit globalement de particules organiques (matières organiques et carbone élémentaire).
- Ce résultat met en évidence des sources différentes en été et en hiver, notamment re-suspension probable des particules en période estivale et chauffage en période hivernale.

Note : Campagne estivale juillet et août 2023

Campagne hivernale mi-décembre 2023 à mi-février 2024

9.3 Le dioxyde d'azote NO₂

9.3.1 Moyenne annuelle

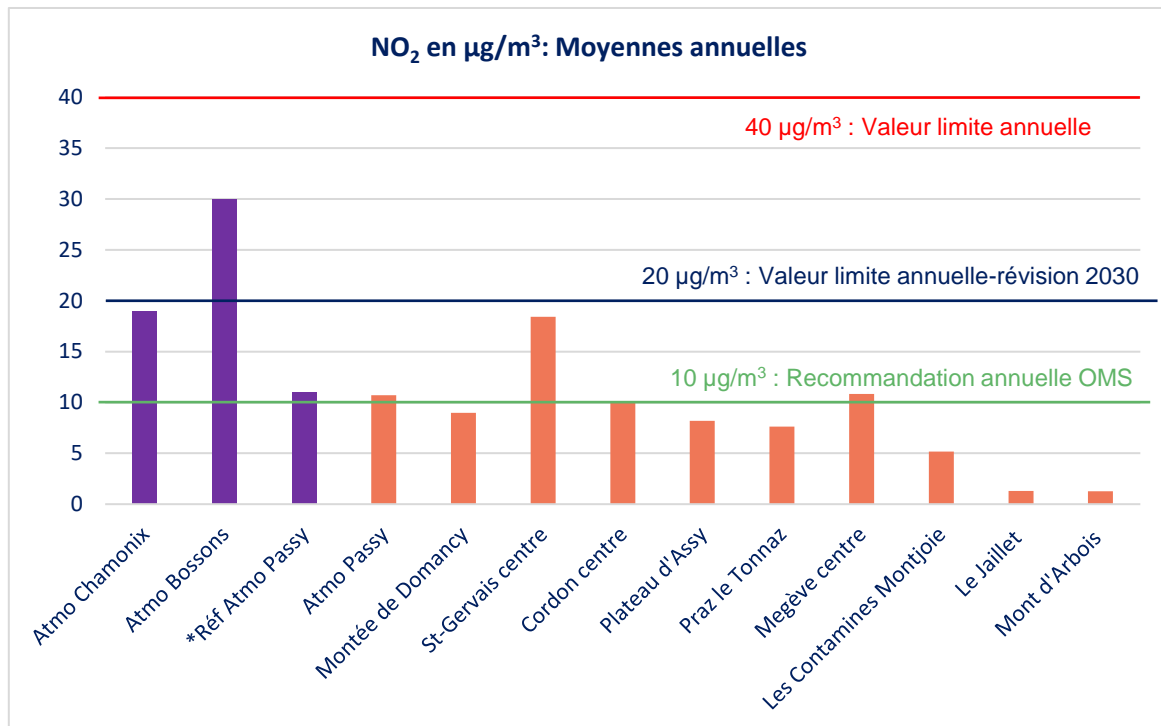


Figure 60: Moyenne annuelle en NO₂.

Les capteurs ont tendance à surestimer les valeurs où les niveaux en NO₂ sont très faibles notamment sur les sites d'altitude : le Jaillet et Mont d'Arbois. La limite de détection des capteurs étant très élevées (17 µg/m³). Les valeurs enregistrées par les micro-capteurs WT1 ne sont pas représentatives des valeurs réelles. Pour les sites d'altitude, le Jaillet et Mont d'Arbois, les moyennes annuelles présentées sur le graphique ci-dessus sont issues des mesures par tubes passifs.

Situation vis-à-vis de la réglementation

Les concentrations moyennes annuelles en NO₂ sont largement en dessous de la valeur limite annuelle (40 µg/m³).

De même, les moyennes annuelles de NO₂ restent inférieures à la valeur limite annuelle de la prochaine réglementation validée par l'UE (20 µg/m³) sur tous les sites.

En ce qui concerne les recommandations OMS, tous les sites respectent la valeur annuelle OMS (10µg/m³), à l'exception des sites de Passy et Megève qui ont légèrement franchi cette valeur. Quant au site de Saint-Gervais, il a largement dépassé cette valeur (18,4 µg/m³), site influencé par le trafic local.

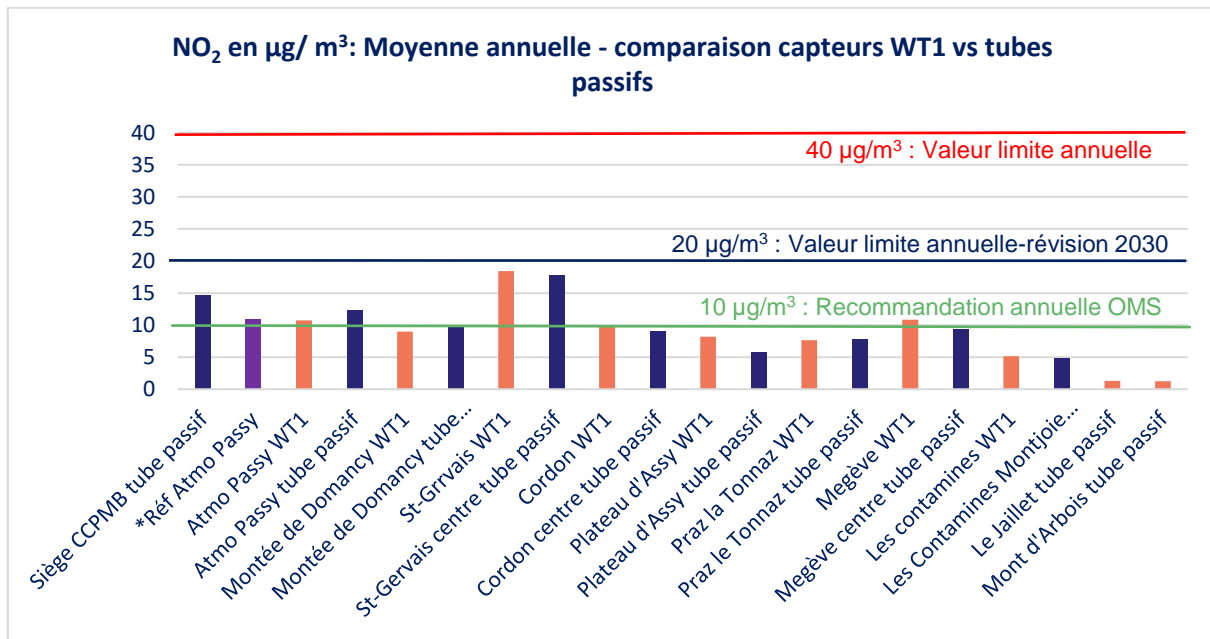


Figure 61: Moyenne annuelle en NO₂ -comparaison données capteurs WT1 vs tubes passifs.

Légende

- Référence Atmo Passy
- Capteurs WT1
- Tubes passifs

Pour la mesure de NO₂, les capteurs ont tendance à surestimer les valeurs quand le niveau ne dépasse pas 10 µg/m³. En effet, les données de mesures WT1 montrent pour la plupart des valeurs inférieures à 10 µg/m³ (dans le bruit du capteur ± 5 µg/m³), ce qui ne permet pas une quantification suffisamment fiable et interprétable dû à l'incertitude de ces valeurs sous la limite de détection (17 µg/m³).

Pour faire face à cette limite des capteurs WT1, des tubes passifs NO₂ ont été déployés sur l'ensemble des sites de mesures pendant la campagne de mesure estivale (juillet et août 2023) et décembre 2023 à juin 2024 avec une fréquence de prélèvement mensuelle comme indiqué sur le tableau 12.

Suite aux différentes campagnes d'inter-comparaison et en se basant sur les résultats des tubes passifs, le fournisseur Ellona a apporté des corrections/calages sur les données des capteurs pour s'approcher au mieux aux valeurs réelles pour chacun des sites de mesure.

Comme on peut le constater sur la figure 61, les valeurs mesurées par les capteurs WT1 après correction et les tubes passifs sont similaires.

Les tubes passifs déployés au niveau de la station Atmo Passy, en parallèle avec le capteur WT1, ont donné des valeurs similaires avec celle de l'instrument de référence avec deux méthodes de mesures différentes. Cela permet la validation métrologique de ces tubes et aussi les capteurs WT1 après cette phase de calage.

Tableau 13: Périodes de prélèvement de NO₂ par tubes passifs.

Du 27/06 au 26/07/23	Du 27/07 au 24/08/23	Du 23/11/23 au 04/01/24	Du 04/01 au 31/01/24	Du 31/01 au 28/02/24	Du 28/02 au 26/03/24	Du 26/03 au 25/04/24	Du 25/04 au 03/06/24	Du 03/06 au 09/07/24
----------------------------	----------------------------	----------------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

9.3.2 Evolution de la moyenne mensuelle

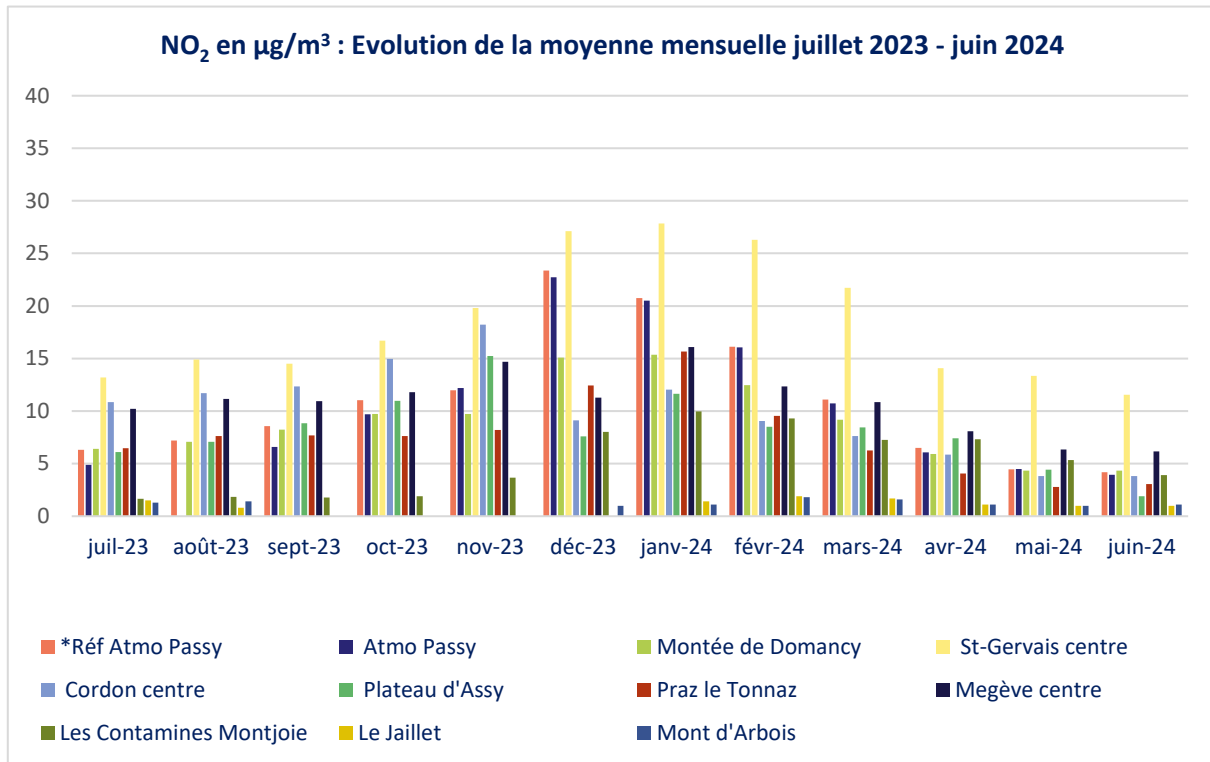


Figure 62: Evolution de la moyenne mensuelle en NO₂.

La figure 62 illustre l'évolution de la moyenne mensuelle de NO₂ sur l'ensemble des sites de mesure. Pour les sites : le Jaillet et Mont d'Arbois, ce sont les données des tubes passifs qui sont présentées sur le graphique.

Globalement, les concentrations les plus importantes en NO₂ sont enregistrées entre novembre 2023 et mars 2024. Ce constat est observé pour tous les sites sauf les sites d'altitude qui ne montrent aucune évolution avec le temps, les concentrations restant très faibles.

Les valeurs les plus importantes ont été observées sur le site de Saint-Gervais centre qui est impacté par le trafic local.

En période estivale, de juillet à octobre 2023 et d'avril à juin 2024, les concentrations moyennes en NO₂ sont moins importantes qu'en période hivernale. Cela peut être expliqué en partie par les réactions de transformation chimiques des oxydes d'azote (NO_x) et des composés organiques volatils (COV) pour former l'ozone sous l'effet du rayonnement solaire. Ces réactions ne se produisent pas en période hivernale d'où les concentrations élevées en NO₂.

9.3.3 Profils journaliers moyens

Les figures 64 et 65 illustrent les profils journaliers moyens pour les mois de juillet 2023 (été) et janvier 2024 (hiver) des sites de Passy (fond de la vallée), Saint-Gervais (centre bourg – impacté par le trafic local) et le Jaillet (site d'altitude). Ce choix des mois et sites est à titre d'exemple pour illustration. Tous les profils pour tous les sites et mois seront transmis avec le rapport sous format Excel à la CCPMB.

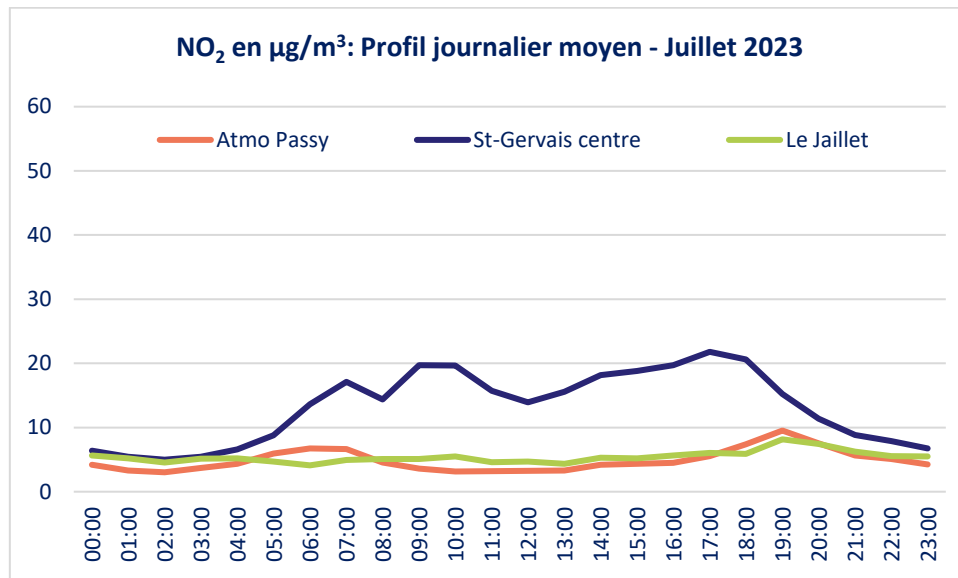


Figure 63: Profil journalier moyen NO₂ - Juillet 2023.

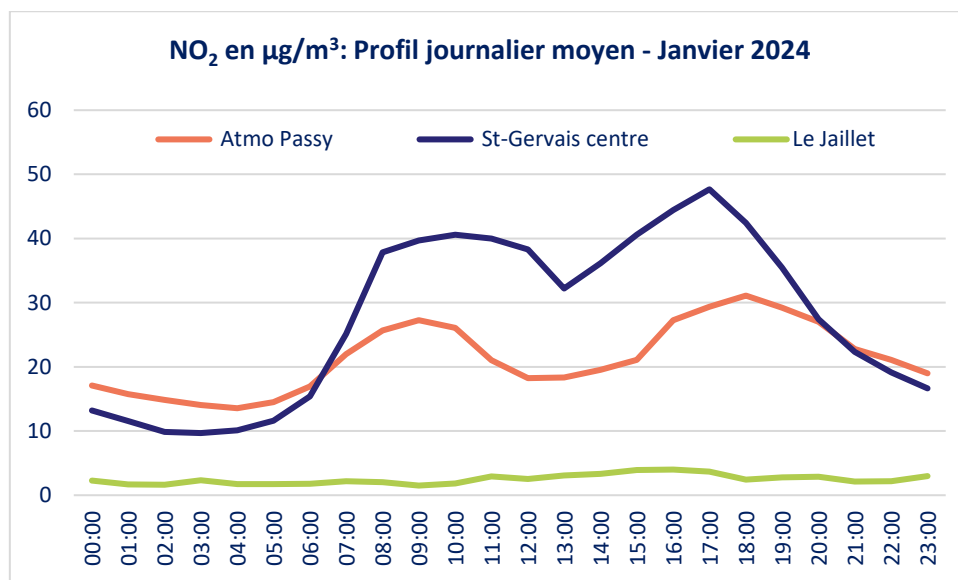


Figure 64: Profil journalier moyen NO₂ - Janvier 2024.

Le site d'altitude, le Jaillet, ne montre aucune tendance particulière, que ce soit en période estivale (juillet 2023) ou hivernale (janvier 2024) et les concentrations sont très faibles.

Les sites de Passy et Saint-Gervais montrent un profil avec deux maxima journaliers légèrement prononcés en été (figure 63) avec des concentrations plus importantes pour le site de Saint-Gervais par rapport au site du fond urbain (Passy).

Ces deux maxima sont plus marqués en période hivernale (figure 64) et ils sont observés le matin entre 7h et 10h et l'après-midi entre 16h et 19h. Ces pics sont plus étendus dans le temps sur le site de Saint-Gervais.

Ces maxima traduisent la temporalité des déplacements et donc l'impact direct du trafic routier pour ces sites.

9.4 L'ozone O₃

9.4.1 Moyenne annuelle

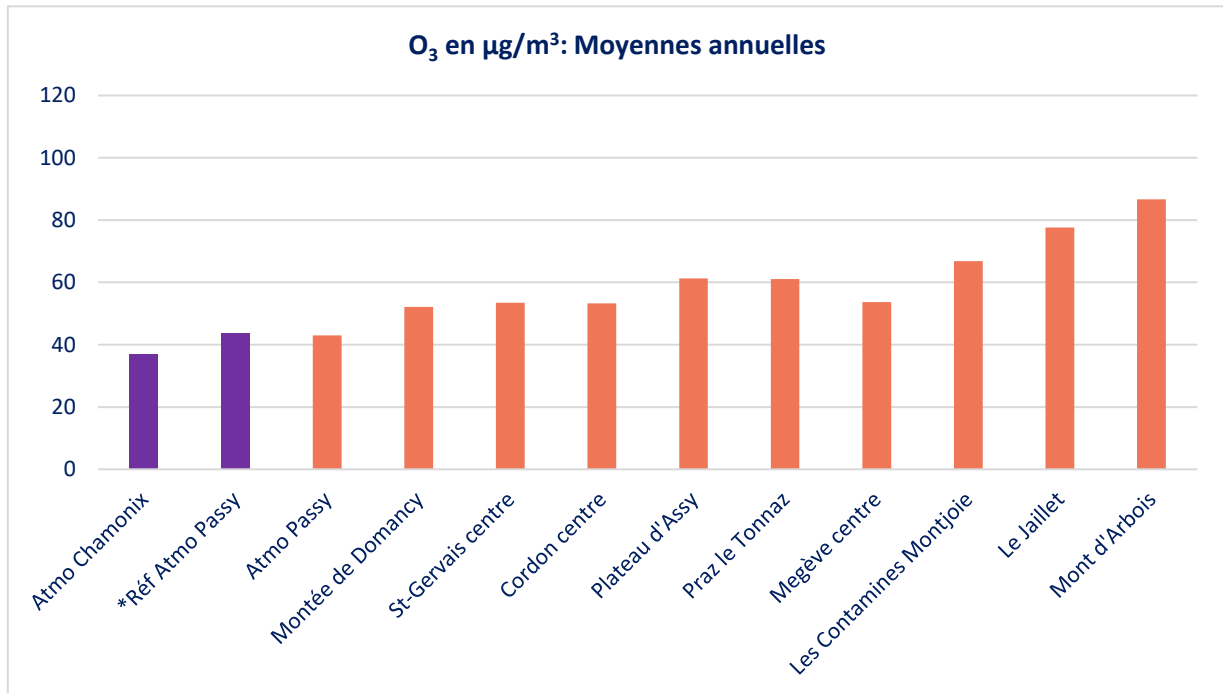


Figure 65: Moyenne annuelle en O₃.

Les concentrations moyennes annuelles de l'ozone sont presque similaires sur l'ensemble des sites de mesure et varient entre 40 et 60 µg/m³. Pour les sites d'altitude, le Jaillet, Mont d'Arbois et les Contamines Montjoie, les concentrations relevées sont plus élevées par rapport aux autres sites et dépassent 60 µg/m³.

Les valeurs les plus faibles ont été observées sur le site du fond à Passy.

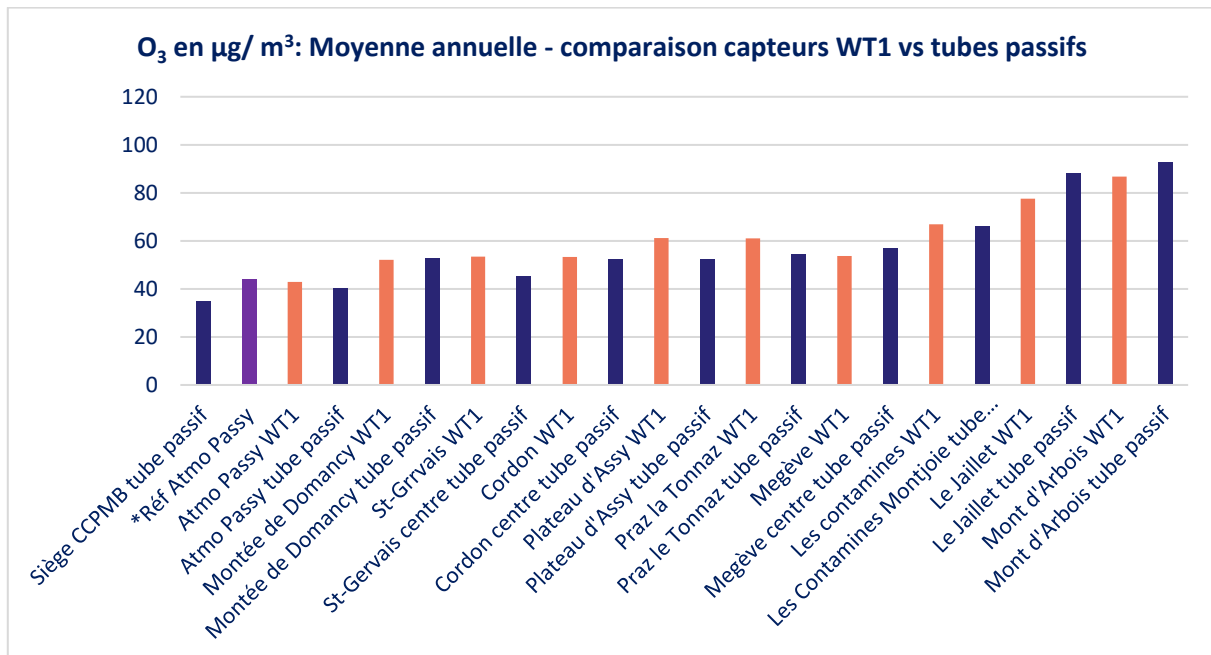


Figure 66: Moyenne annuelle en O₃ - comparaison données micro-capteurs WT1 vs tubes passifs.

Comme pour le dioxyde d'azote (NO₂), des tubes passifs ont été déployés également pour la mesure de la concentration de l'ozone en parallèle des capteurs WT1.

Les valeurs mesurées par les capteurs WT1 et les tubes passifs sont semblables, comme on peut le voir sur la figure 66.

9.4.2 Profils journaliers moyens

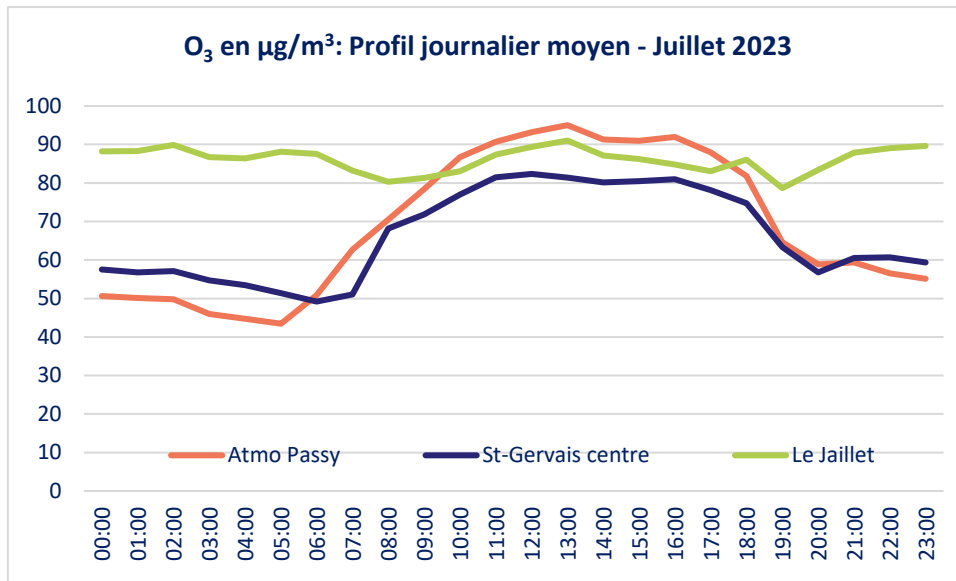


Figure 67: Profil journalier moyen O₃ - Juillet 2023.

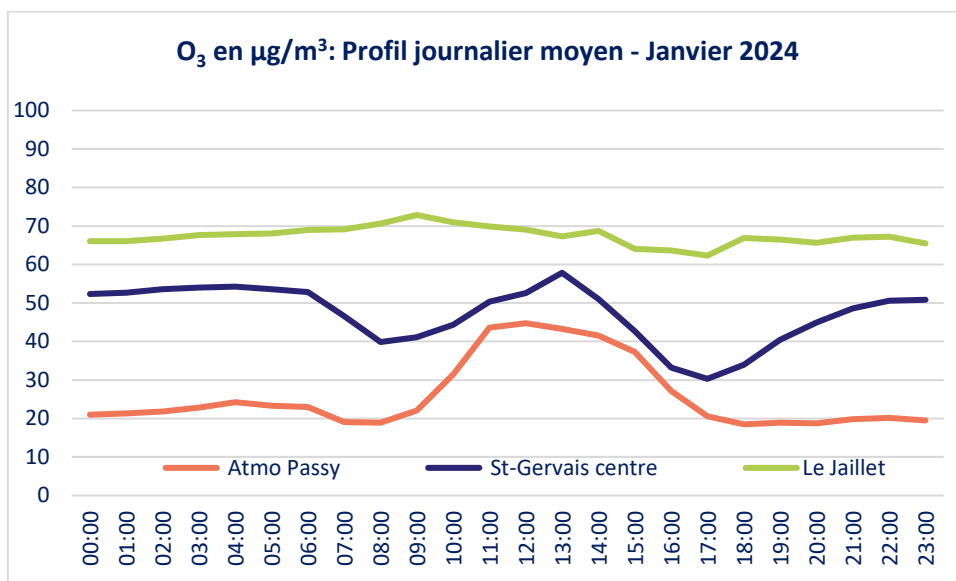


Figure 68: Profil journalier moyen O₃ - Janvier 2024.

Les profils journaliers de l’ozone montrent les concentrations les plus importantes en milieu d’après-midi pour les sites de Passy et Saint-Gervais, l’ozone se formant à partir des polluants primaires émis par les activités humaines dès le matin. Le site d’altitude, le Jaillet, ne montre aucun profil particulier.

Les niveaux d’ozone sont plus élevés en été qu’en hiver pour les trois sites présentés, ce qui est attendu en raison de la photochimie plus intense qui influence la formation de ce polluant oxydant initié par les rayonnements UV.

9.5 Bilan qualité de l'air au Pays du Mont-Blanc

Le tableau 14 présente une synthèse des informations de mesure recueillies grâce au réseau micro-capteurs WT1 mis en place sur le territoire de la CCPMB. Les moyennes annuelles pour chaque polluant sont présentées, accompagnées de l'indication de la réglementation en vigueur.

Tableau 14: Récapitulatif des données qualité de l'air au Pays du Mont-Blanc et comparaison à la réglementation en vigueur.

	Particules			Gaz	
	PM ₁₀		PM _{2.5}	NO ₂	O ₃
	Nombre de jours > 50 µg/m ³	Moyenne annuelle (µg/m ³)	Moyenne annuelle (µg/m ³)	Moyenne annuelle (µg/m ³)	Moyenne annuelle (µg/m ³)
Réglementation en vigueur	35 jours à ne pas dépasser	40	25	40	
Atmo Passy	7	16,6	10,4	10,7	43
Montée de Domancy	3	8,6	4,6	9	52,2
Saint-Gervais centre	4	10,9	5,4	18,4	53,5
Cordon centre	4	9,2	4,9	10	53,3
Plateau d'Assy	4	8,5	4,1	8,2	61,2
Praz la Tonnaz	3	10,9	5,5	7,6	61,1
Megève centre	1	9,3	4,7	10,8	53,6
Les Contamines Montjoie	1	8,6	4,4	5,2	66,9
Le Jaillet	3	9,2	4,2	1,3	77,6
Mont d'Arbois	25	17,6	9	1,3	86,7

A retenir

Sur l'ensemble des sites et pour l'ensemble des polluants mesurés, pour la période de juillet 2023 à juin 2024, l'évaluation des concentrations, à partir du réseau de micro-capteurs déployés au moyen d'une métrologie rigoureuse, permet de conclure le respect de la réglementation qualité de l'air au Pays du Mont-Blanc.

Tableau 15: Récapitulatif des données qualité de l'air au Pays du Mont-Blanc et comparaison aux valeur guides OMS 2021.

	Particules				Gaz		
	PM ₁₀		PM _{2.5}		NO ₂		O ₃
	Nombre de jours > 45 µg/m ³	Moyenne annuelle (µg/m ³)	Nombre de jours > 15 µg/m ³	Moyenne annuelle (µg/m ³)	Nombre de jours > 25 µg/m ³	Moyenne annuelle (µg/m ³)	Moyenne annuelle (µg/m ³)
Valeurs guides OMS	3 à 4 jours à ne pas dépasser	15	3 à 4 jours à ne pas dépasser	5	3 à 4 jours à ne pas dépasser	10	
Atmo Passy	11	16,6	79	10,4	17	10,7	43
Montée de Domancy	3	8,6	11	4,6	1	9	52,2
Saint-Gervais centre	5	10,9	11	5,4	55	18,4	53,5
Cordon centre	5	9,2	12	4,9	2	10	53,3
Plateau d'Assy	4	8,5	12	4,1	2	8,2	61,2
Praz la Tonnaz	5	10,9	15	5,5	3	7,6	61,1
Megève centre	3	9,3	9	4,7	4	10,8	53,6
Les Contamines Montjoie	1	8,6	12	4,4	0	5,2	66,9
Le Jaillet	3	9,2	8	4,2	--	1,3	77,6
Mont d'Arbois	37	17,6	62	9	--	1,3	86,7

10 CONCLUSIONS

Dans cette étude, un réseau de dix micro-capteurs du fournisseur Ellona a été déployé avec une métrologie rigoureuse et a mesuré en temps réel les polluants : les particules (PM₁₀ et PM_{2.5}), le dioxyde d'azote NO₂ et l'ozone O₃. 5 sites ont bénéficié, en parallèle, de prélèvement de particules pour une caractérisation morfo-chimique durant les saisons estivale (juillet – août 2023) et hivernale (mi-décembre 23 – mi-février 24).

En parallèle et sur l'initiative du groupement Cerema-Particle Vision, l'ensemble des sites de mesures ont été équipés de tubes passifs PASSAM pour la mesure de NO₂ et O₃ (moyenne sur la durée d'exposition). Ces tubes ont l'avantage d'avoir une limite de détection très faible par rapport à celle des micro-capteurs (0,3 µg/m³ contre 17 µg/m³ pour les capteurs WT1).

Les mesures en continu ont eu lieu entre juillet 2023 et juin 2024.

Les résultats de mesures en temps réel via le réseau de micro-capteurs ont permis de mettre en évidence les principaux éléments suivants :

- **Les valeurs réglementaires annuelles sont respectées sur l'ensemble des sites** pour les mesures de particules (PM₁₀ et PM_{2.5}), NO₂ et O₃.
- Pour les **PM₁₀**, l'ensemble des sites respecte la recommandation OMS annuelle (15 µg/m³), sauf le site de Passy qui a dépassé légèrement cette valeur. Le site Mont d'Arbois a subi une pollution locale liée aux travaux menés durant les étés 2023 et 2024.
- Pour les **PM_{2.5}**, l'ensemble des sites respecte la recommandation OMS annuelle (5 µg/m³), sauf le site de Passy qui a doublement dépassé cette valeur. Les sites de Saint-Gervais et Praz la Tonnaz ont légèrement franchi cette valeur. Le site Mont d'Arbois a été exposé à une pollution locale qui a pu être identifié grâce à la caractérisation des particules. Le résultat ne reflète donc pas la qualité de l'air généralement constaté sur ce site.
- Pour le **NO₂**, tous les sites respectent la valeur annuelle OMS (10 µg/m³), à l'exception des sites de Passy et Megève qui ont légèrement franchi cette valeur. Quant au site de Saint-Gervais, il a largement dépassé cette valeur (18,4 µg/m³), site influencé par le trafic local.
- Mise en évidence de l'impact potentiel des travaux sur la qualité de l'air localement (cas du Mont d'Arbois)

La caractérisation morfo-chimique des particules a mis en évidence les éléments suivant :

- La concentration en PM₁₀, sur les périodes de prélèvement de PM ainsi que sur les périodes complètes de 3 mois d'été 2023 (de juillet à septembre) et trois mois d'hiver (de décembre 2023 à février 2024) de mesures en continu par les micro-capteurs, est plus élevée en été qu'en hiver et ce sur tous les sites de mesure sauf sur le site de Passy où la concentration en PM₁₀ est plus élevée en hiver qu'en été.
- La concentration en PM₁₀ est homogène en saison estivale quel que soit l'altitude. En saison hivernale, la concentration en PM₁₀ diminue progressivement avec l'altitude.
- En été, prédominance de la fraction grossière PM_{10-2.5} (particules minérales)
- En hiver, prédominance de la fraction fine PM_{2.5} (matière organique)
- Impact des **conditions météorologiques**, notamment la **canicule-sécheresse**, sur la composition chimique des particules (érosion des sols et travaux de construction – cas du Mont d'Arbois) → **sources des particules minérales**
- Les plus fortes concentrations de **particules métalliques** (trafic routier et ferroviaire, industrie): mesurées sur le site **siège CCPMB**.
- Des **traceurs spécifiques à la combustion du bois** ont été recherchés (notamment le **potassium** et le **lévoglucosan**). Leurs concentrations sont très faibles durant la période d'étude (décembre 2023, janvier et février 2024), l'hiver le plus chaud jamais enregistré depuis 2020 où des concentrations plus faibles en PM₁₀ et PM_{2.5} ont été enregistrées.

11 LIMITES DES MICRO-CAPTEURS WT1

Le suivi en continu de la qualité de l'air au Pays du Mont-Blanc a été réalisé grâce au déploiement d'un réseau de micro-capteurs WT1. Globalement, les micro-capteurs ont fonctionné correctement avec un excellent taux de fonctionnement. Un grand intérêt a été porté le groupement Cerema/Particle Vision sur la validation métrologique des données remontées par les capteurs. Pour ce faire des campagnes d'inter-comparaison avec la station Atmo Passy ont été réalisées, en amont, à mi-campagne et à la fin des mesures. Ces inter-comparaison ont permis de faire des calages/corrections des données si nécessaires.

L'étude a donc permis de valider le déploiement d'un réseau de micro-capteurs pour approfondir la connaissance de la qualité de l'air sur le territoire et notamment les particules très fines. La caractérisation des particules a montré sa plus-value pour identifier les sources de pollution et mieux comprendre les émissions de celles-ci (sources locales, écart entre saisons...)

En parallèle, des tubes passifs NO₂ et O₃ ont été déployés, à l'initiative du groupement Cerema /Particle Vision sur les différents sites de mesures. L'avantage de cette technique de mesure, notamment pour le NO₂ est que la limite de détection est très faible (0,3 µg/m³ pour un mois de prélèvement) par rapport à celle des capteurs WT1(17 µg/m³).

Etant donné que les niveaux en NO₂ sont faibles sur le territoire de la CCPMB et plus particulièrement sur les sites d'altitude, les mesures par tubes passifs ont permis de fournir des concentrations plus représentatives de la qualité de l'air sur le territoire.

En se basant sur les données des différentes campagnes d'inter-comparaison et les données des tubes passifs NO₂, un grand travail de calage des données a été effectué avec le fournisseur Ellona.

Les mesures en continu, et pendant un an, via le réseau de micro-capteurs WT1 a révélé quelques limites de ces derniers, notamment :

- **Une limite de détection élevé** pour la mesure de NO₂, d'où le déploiement des tubes passifs en parallèle ;
- Pour la mesure des particules, le **risque de compter les gouttelettes d'eau (surestimation)** d'un brouillard ou brume comme étant des particules (cas observé souvent au Mont d'Arbois et quelques fois sur le Jaillet). Les capteurs ne font pas la différence entre particules solide et liquide. Globalement les capteurs ne sont pas équipés d'un système de séchage de l'air comme pour les appareils réglementaires.
- La **durée de vie limitée** à 1 an que ce soit pour la mesure des gaz ou des particules. C'est pour cette raison que le Cerema ne recommande pas l'achat des micro-capteurs mais conseille de privilégier la location afin de bénéficier du service après-vente (SAV). La qualité métrologique des micro-capteurs est discutable notamment pour la mesure de NO₂, ce qui a nécessité des ajustements réguliers, notamment sur l'application d'algorithme de correction des données brutes apporté par le fournisseur Ellona. Ces algorithmes ont été varié au cours de l'expérimentation afin d'ajuster les données à chaque campagne d'inter-comparaison (notamment pour l'été et l'hiver).

12 PERSPECTIVES

Vue les conditions météorologiques de cet hiver 2023-2024, le plus chaud jamais enregistré depuis 2020, il serait pertinent, d'un point de vue scientifique, de poursuivre l'étude en se focalisant sur la période hivernale avec approfondissement de la caractérisation des particules. Ainsi, le groupement Cerema/Particle Vision propose une approche globale basée sur une optimisation des sites de mesures et la poursuite et approfondissement de la caractérisation des particules notamment avec des prélèvements journaliers durant l'hiver 2024-2025.

13 ANNEXES

13.1 Bibliographie

- [1] SPF, « Impact de pollution de l'air ambiant sur la mortalité en France métropolitaine. Réduction en lien avec le confinement du printemps 2020 et nouvelles données sur le poids total pour la période 2016-2019 ». Consulté le: 28 septembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.santepubliquefrance.fr/import/impact-de-pollution-de-l-air-ambiant-sur-la-mortalite-en-france-metropolitaine.-reduction-en-lien-avec-le-confinement-du-printemps-2020-et-nouvelle>
- [2] « DP-PPA-BILAN-DECEMBRE2021.pdf ». Consulté le: 1 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.haute-savoie.gouv.fr/contenu/telechargement/38196/223112/file/DP-PPA-BILAN-DECEMBRE2021.pdf>
- [3] « synthese_connaissances_arve_v1_150dpi_comok.pdf ». Consulté le: 29 septembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/sites/aura/files/content/migrated/atoms/files/synthese_connaissances_arve_v1_150dpi_comok.pdf
- [4] E. D. Vicente et C. A. Alves, « An overview of particulate emissions from residential biomass combustion », *Atmospheric Research*, vol. 199, p. 159-185, janv. 2018, doi: 10.1016/j.atmosres.2017.08.027.
- [5] K. Dimitriou et P. Kassomenos, « A meteorological analysis of PM10 episodes at a high altitude city and a low altitude city in central Greece – The impact of wood burning heating devices », *Atmospheric Research*, vol. 214, p. 329-337, déc. 2018, doi: 10.1016/j.atmosres.2018.08.014.
- [6] D. Smółka-Danielowska et M. Jabłońska, « Chemical and mineral composition of ashes from wood biomass combustion in domestic wood-fired furnaces », *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 19, n° 6, p. 5359-5372, juin 2022, doi: 10.1007/s13762-021-03506-9.
- [7] J. Allard, « Qualité de l'air dans la Vallée de l'Arve: météorologie locale et mesures des réductions des émissions liées au chauffage au bois », p. 195.
- [8] Atmo Aura (Air APS), « Caractérisation de la qualité de l'air à Saint-Gervais-les-Bains en 2007 ». 2008.
- [9] J. Rausch, D. Jaramillo-Vogel, S. Perseguers, N. Schnidrig, B. Grobéty, et P. Yajan, « Automated identification and quantification of tire wear particles (TWP) in airborne dust: SEM/EDX single particle analysis coupled to a machine learning classifier », *Science of The Total Environment*, vol. 803, p. 149832, janv. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149832.
- [10] I. Järllskog *et al.*, « Differentiating and Quantifying Carbonaceous (Tire, Bitumen, and Road Marking Wear) and Non-carbonaceous (Metals, Minerals, and Glass Beads) Non-exhaust Particles in Road Dust Samples from a Traffic Environment », *Water Air Soil Pollut*, vol. 233, n° 9, p. 375, sept. 2022, doi: 10.1007/s11270-022-05847-8.
- [11] I. Järllskog, D. Jaramillo-Vogel, J. Rausch, M. Gustafsson, A.-M. Strömvall, et Y. Andersson-Sköld, « Concentrations of tire wear microplastics and other traffic-derived non-exhaust particles in the road environment », *Environment International*, p. 107618, nov. 2022, doi: 10.1016/j.envint.2022.107618.
- [12] Z. Gao *et al.*, « On airborne tire wear particles along roads with different traffic characteristics using passive sampling and optical microscopy, single particle SEM/EDX, and μ -ATR-FTIR analyses », *Frontiers in Environmental Science*, vol. 10, 2022, Consulté le: 8 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2022.1022697>
- [13] C. Hüglin et S. K. Grange, « Chemical characterisation and source identification of PM10 and PM2.5 in Switzerland », p. 118.
- [14] « Schlussbericht_Charakterisierung_und_Herkunftsbestimmung_von_Grobstaub_im_PM10_2020_30.10.2020_final (1).pdf ».

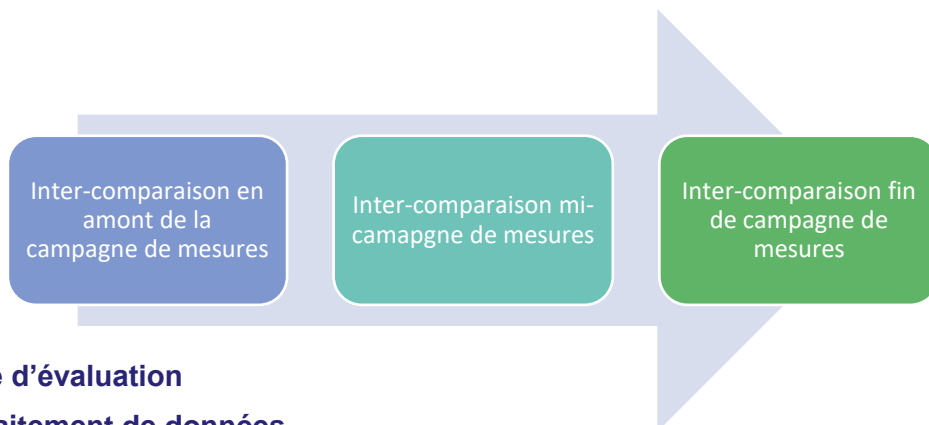
[15] « Premier essai national d'aptitude des micro-capteurs (EA μ C) pour la surveillance de la qualité de l'air : synthèse des résultats | LCSQA ». Consulté le: 13 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/premier-essai-national-daptitude-des-micro-capteurs-eamc-pour-la-surveillance-de-la-qualite>

13.2 Inter-comparaison avant déploiement des capteurs WT1 Ellona

Méthodologie de suivi de fiabilité des micro-capteur

A l'instar de l'étalonnage régulier des appareils de mesures lors de campagnes de mesures, l'utilisation de micro-capteurs implique de les comparer à des instruments de référence pour s'assurer de la validité et de la fiabilité des mesures et d'une vérification de la non dérive des mesures en continu. Ainsi, une étude d'inter-comparaison des 10 micro-capteurs (Ellona) avec la station de référence ATMO Passy, a été effectuée pendant trois semaines en amont de la pose des micro-capteurs sur les sites, pour validation des mesures.

Des vérifications en cours d'expérimentation sont prévues également. L'ensemble des micro-capteurs déployés sur le domaine de l'étude seront déplacés provisoirement près de la station ATMO Passy durant trois semaines, à mi-campagne, pour en assurer la validation métrologique in situ. De plus, un micro-capteur a été placé à la station ATMO Passy durant les 12 mois d'expérimentation, en raison de son emplacement stratégique mais aussi pour la pertinence de pouvoir à tout moment comparer les données remontées par les micro-capteurs avec celles des analyseurs référence.



Protocole d'évaluation

1- Traitement de données

Il est essentiel de noter que les données des micro-capteurs ont été enregistrées avec des intervalles de temps très variables, allant de quelques secondes à quelques minutes. Afin de faciliter le traitement des données, les intervalles de temps des capteurs ont été rendus uniformes en les alignant sur les intervalles de temps des instruments de référence. Par conséquent, les moyennes horaires ont été directement calculées à partir des plateformes pour les comparer aux données de référence.

Ensuite, les données des micro-capteurs ont été soumises à un processus de validation, en supprimant les valeurs aberrantes et les valeurs négatives. Une fois cette étape terminée, une analyse statistique a été réalisée pour évaluer de manière quantitative les paramètres décrits ci-dessous.

2- Critères d'évaluation

Durant cette campagne d'évaluation des 3 marques de micro-capteurs, les critères suivants ont été vérifiés :

- **Fiabilité** des capteurs : saisie minimale des données ou taux de recouvrement des données sur la période de mesures ;
- **Répétabilité** ou reproductibilité des capteurs : comparaison entre capteurs de même marque ;
- **Justesse** des capteurs : comparaison avec la référence.

a) Fiabilité – saisie minimale des données ou taux de recouvrement (tr)

Ce paramètre permet d'évaluer la qualité du système d'envoi et de partage des données. Dans les meilleurs cas, lorsque le taux atteint 100 %, cela signifie que le capteur n'a connu aucune déconnexion ni perte de données, et qu'un volume suffisant de données est disponible pour être exploité. Il est calculé comme suit :

$$\text{Taux de recouvrement (tr)} = \frac{\text{nombre de données capteur valide}}{\text{nombre total de données durant la campagne}} * 100$$

Le tableau... synthétise les critères d'évaluation de fiabilité des capteurs issus de l'étude LCSQA (réf) « 1^{er} essai national d'aptitude des micro-capteurs pour la surveillance de la qualité de l'air ».

Période minimale de couverture mesure indicative Directive européenne 2008/50/CE	tr ≤ 14%
Peu de données, représentativité de la dynamique faible	14 % < tr ≤ 45 %
Pertes raisonnables Représentativité acceptable	45 % < tr ≤ 75 %
Couverture dynamique équivalente site fixe Directive européenne 2008/50/CE – situation hivernale	75 % < tr ≤ 90 %
Couverture dynamique équivalente site fixe Directive européenne 2008/50/CE	tr >90 %

b) Répétabilité et justesse

Pour chaque marque, les micro-capteurs ont été déployés en duplicata. Les données de mesures des capteurs ont été comparées entre elles (comparaison de capteurs de même marque), et avec la référence selon une régression linéaire ($y = ax + b$) déterminée sur les courbes de corrélation entre les mesures capteurs et les mesures de référence pour la justesse.

Trois paramètres ont été évalués :

- Coefficient de détermination « R² »

Il caractérise la capacité du capteur à produire des mesures fidèles au regard des mesures de référence. Appelé aussi « la dispersion des mesures ». **R² = 1** signifie que le capteur et la méthode de référence sont parfaitement synchrones.

Un faible R² traduit le fait que le capteur et l'instrument de référence ne sont pas synchrones. De ce fait, la valeur de la pente devient secondaire.

En revanche, dans le cas d'un R² proche de 1, même si la valeur de la pente s'éloigne de l'idéal (trop élevée ou trop faible), le comportement du capteur est répétable dans le temps, il est donc possible de lui attribuer une fonction de correction linéaire.

- Pente « p »

Elle caractérise le décalage des mesures entre capteurs. Dans le cas où les mesures sont identiques, la pente sera égale $p = 1$. La corrélation est dite parfaite et forme une droite de forme $y = x$.

La valeur de la pente caractérise également la capacité du capteur à produire des mesures justes par rapport à la référence. Si les deux mesures sont identiques, la pente idéale sera égale à 1.

- L'ordonnée à l'origine « Offset » :

Ce paramètre montre le décalage que peut avoir un appareil par rapport à un autre. Ce dernier peut être plus ou moins acceptable en fonction du polluant mesuré. Dans le cas où les paramètres de corrélation « R² et p » sont satisfaisants, l'ordonnée à l'origine sera interprétée en fonction du polluant mesuré et de sa concentration.

Ensuite, la performance des différents capteurs testés en fonction des différents paramètres évalués, a été classée selon les critères décrits dans le tableau... ci-après (inspiré de l'étude LCSQA réf LCSQA et rapport air Breizh).

Il est à noter que ce classement a été attribué par capteur et par polluant.

Le tableau ci-après représente le classement des capteurs en fonction des résultats d'évaluation métrologiques.

Critères	Satisfaisant	Moyennement satisfaisant	Non satisfaisant
Taux de recouvrement « tr »	$tr > 90 \%$	$45 \% < tr \leq 90 \%$	$tr < 45 \%$
Coefficient de détermination « R ² »	$R^2 > 0,75$	$0,5 < R^2 \leq 0,75$	$R^2 < 0,5$
Pente « p »	$1,3 < p < 0,7$	$0,5 < p \leq 0,7$ ou $1,3 \geq p > 1,5$	$p \leq 0,5$ ou $p \geq 1,5$

En fonction des résultats d'évaluation métrologique, les capteurs ont été classés en 3 classes :

Classe 1 : la reproductibilité des capteurs entre eux (duplicata) et la comparaison à la référence (justesse) sont satisfaisantes (ou moyennement satisfaisantes), les capteurs peuvent être comparés entre eux et à la station de référence (dans notre cas la station Atmo Passy). Cette situation pourrait être idéale pour la surveillance de la qualité de l'air.

Classe 2 : la reproductibilité est satisfaisante (ou moyennement satisfaisante), mais la justesse n'est pas satisfaisante. Dans ce cas, la comparaison des niveaux entre capteurs est possible mais ne peuvent pas être comparés à la station de référence Atmo Passy.

Classe 3 : la reproductibilité et la comparaison à la référence (justesse) ne sont pas satisfaisantes. Dans cette situation, l'utilisation des capteurs est déconseillée pour la surveillance de la qualité de l'air.

	Reproductibilité satisfaisante	Justesse satisfaisante
Classe 1	✓	✓
Classe 2	✓	✗
Classe 3	✗	✗

13.3 Résultats des tubes passifs – validation métrologique

Le dioxyde d'azote NO₂

La comparaison des concentrations moyennes relevées lors des différentes de mesure par la station ATMO et le tube sont les suivantes :

	Concentration moyenne en NO ₂ du 27 juin au 26 juillet 2023	Concentration moyenne en NO ₂ du 26 juillet au 09 Août 2023	Concentration moyenne en NO ₂ du 09 Août au 24 Août 2023
Tube passif	6,7 µg/m ³	5,4 µg/m ³	9,1 µg/m ³
Station ATMO Passy	6,2 µg/m ³	5,9 µg/m ³	8,3 µg/m ³
Écart	8,1%	9,3%	9%

Les tableaux suivants présentent la comparaison des concentrations en NO₂ pour les doublons disposés durant les campagnes de mesures.

Campagnes	Répétabilité des tubes			
	Point	Valeur 1 (en µg/m ³)	Valeur 2 (en µg/m ³)	Écart (%)
Du 27 juin au 26 juillet 2023	Mont d'Arbois	1,3	1,4	7,1%
	Le Jaillet	1,4	1,6	12,5%
	Les Contamines Montjoie	5,4	2,7	Non pris en compte – contamination tube
	Praz la Tonaz	4,5	4,4	2,3%
	Montée de Domancy	6,0	6,1	1,6%
	Plateau d'Assy	4,2	4,0	5,0%
	Atmo Passy	6,6	6,8	2,9%
	Moyenne des écarts			4,7%
Du 27 juin au 12 juillet 2023	Point	Valeur 1 (en µg/m ³)	Valeur 2 (en µg/m ³)	Écart (%)
	Megève centre	5,7	5,2	9,6%
	Cordon centre	6,9	6,8	1,5%
	St Gervais les Bains	15,3	14,5	5,5%
	Siège CCPMB	9,2	10,9	15,6%
Moyenne des écarts			8%	
Du 12 au 26 juillet 2023	Point	Valeur 1 (en µg/m ³)	Valeur 2 (en µg/m ³)	Écart (%)
	Megève centre	6,8	7,0	2,9%
	Cordon centre	7,4	7,9	6,3%
	St Gervais les Bains	13,6	17,0	20,0%
	Siège CCPMB	11,7	11,0	6,4%
Moyenne des écarts			8,9%	
Du 26 juillet au 09 Aout 2023	Point	Valeur 1 (en µg/m ³)	Valeur 2 (en µg/m ³)	Écart (%)
	Mont d'Arbois	1,4	1,3	7,7%
	Le Jaillet	0,8	< 0,6	-
	Les Contamines Montjoie	1,7	1,7	0,0%
	Megève centre	5,0	5,2	3,8%
	Cordon centre	4,6	5,3	13,2%

	St Gervais les Bains	14,3	14,5	1,4%
	Montée de Domancy	4,9	4,7	4,3%
	Plateau d'Assy	1,9	2,2	13,6%
	Atmo Passy	5,4	5,3	1,9%
	Siège CCPMB	10,7	10,6	0,9%
	Moyenne des écarts			7,3%
Du 09 au 24 Aout 2023	Point	Valeur 1 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valeur 2 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Écart (%)
	Mont d'Arbois	<0,6	<0,6	-
	Le Jaillet	<0,6	<0,6	-
	Les Contamines Montjoie	3,0	3,4	11,8%
	Megève centre	8,0	7,7	3,9%
	Praz la Tonaz	8,3	7,8	6,4%
	Cordon centre	8,6	8,0	7,5%
	St Gervais les Bains	18,7	18,8	0,5%
	Montée de Domancy	8,7	8,1	7,4%
	Plateau d'Assy	4,8	4,6	4,3%
	Atmo Passy	8,9	9,2	3,3%
	Siège CCPMB	16,3	16,1	1,2%
	Moyenne des écarts			5,2%

L'ozone O₃

La comparaison des concentrations moyennes relevées lors des différentes de mesure par la station ATMO et le tube sont les suivantes :

	Concentration moyenne en O ₃ du 27 juin au 26 juillet 2023	Concentration moyenne en O ₃ du 26 juillet au 09 Août 2023	Concentration moyenne en O ₃ du 09 Août au 24 Août 2023
Tube passif	55,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	47,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	48,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Station ATMO Passy	68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	56,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	72,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Écart	18,5%	15,6%	34%

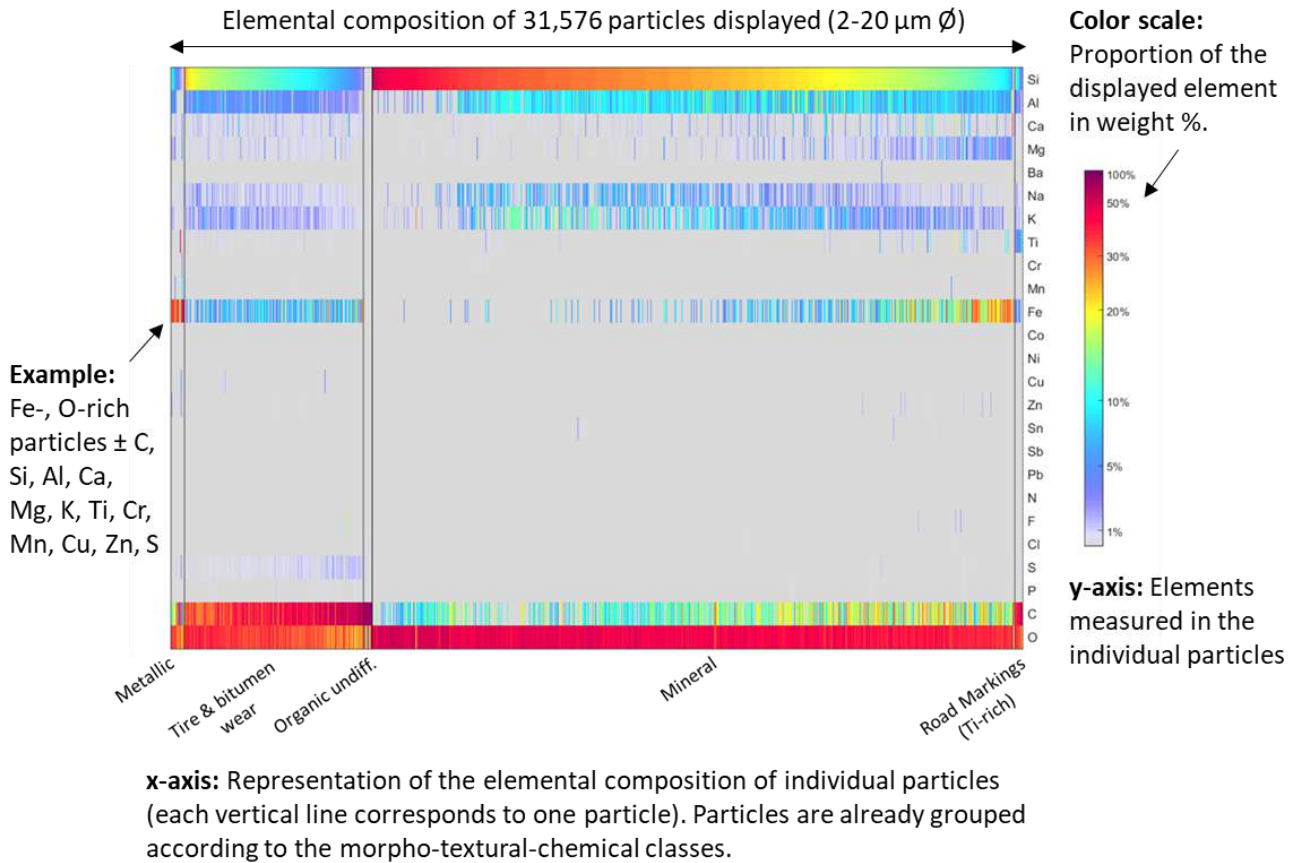
Les tableaux suivants présentent la comparaison des concentrations en O₃ pour les doublons disposés durant les campagnes de mesures.

Campagnes	Répétabilité des tubes			
	Point	Valeur 1 (en µg/m ³)	Valeur 2 (en µg/m ³)	Écart (%)
Du 27 juin au 26 juillet 2023	Mont d'Arbois	96,2	102,9	6,5%
	Le Jaillet	86,5	89,8	3,7%
	Les Contamines Montjoie	69,1	69,0	0,1%
	Praz la Tonaz	64,0	67,4	5,0%
	Montée de Domancy	72,4	66,4	9,0%
	Plateau d'Assy	59,4	52,3	13,6%
	Atmo Passy	54,1	56,8	4,8%
	Moyenne des écarts			6,1%
Du 27 juin au 12 juillet 2023	Point	Valeur 1 (en µg/m ³)	Valeur 2 (en µg/m ³)	Écart (%)
	Megève centre	52,0	62,8	17,2%
	Cordon centre	59,9	62,6	4,3%
	St Gervais les Bains	57,2	54,0	5,9%
	Siège CCPMB	48,0	46,1	4,1%
Moyenne des écarts			7,9%	
Du 12 au 26 juillet 2023	Point	Valeur 1 (en µg/m ³)	Valeur 2 (en µg/m ³)	Écart (%)
	Megève centre	71,4	65,5	9,0%
	Cordon centre	57,0	68,9	17,3%
	St Gervais les Bains	59,9	50,5	18,6%
	Siège CCPMB	49,2	47,0	4,7%
Moyenne des écarts			12,4%	
Du 26 juillet au 09 Aout 2023	Point	Valeur 1 (en µg/m ³)	Valeur 2 (en µg/m ³)	Écart (%)
	Mont d'Arbois	85,2	92,8	8,2%
	Le Jaillet	85,7	90,7	5,5%
	Les Contamines Montjoie	65,1	67,0	2,8%
	Megève centre	55,5	66,5	16,5%
	Praz la Tonaz	57,3	50,5	13,5%
	Cordon centre	56,8	58,1	2,2%
	St Gervais les Bains	43,1	45,9	6,1%
	Montée de Domancy	66,6	57,7	15,4%
	Plateau d'Assy	54,1	49,8	8,6%
	Atmo Passy	43,7	51,5	15,1%
Siège CCPMB	38,3	44,5	13,9%	
Moyenne des écarts			9,8%	
Du 09 au 24 Aout 2023	Point	Valeur 1 (en µg/m ³)	Valeur 2 (en µg/m ³)	Écart (%)
	Mont d'Arbois	102,5	111,7	8,2%
	Le Jaillet	106,0	93,9	12,9%
	Les Contamines Montjoie	81,5	73,8	10,4%
	Megève centre	46,9	55,0	14,7%
	Praz la Tonaz	57,8	53,6	7,8%
	Cordon centre	56,5	58,9	4,1%
St Gervais les Bains	57,8	57,8	0,0%	

	Montée de Domancy	69,7	68,3	2,0%
	Plateau d'Assy	52,1	55,5	6,1%
	Atmo Passy	46,3	49,8	7,0%
	Siège CCPMB	37,1	37,1	0,0%
			Moyenne des écarts	6,7%

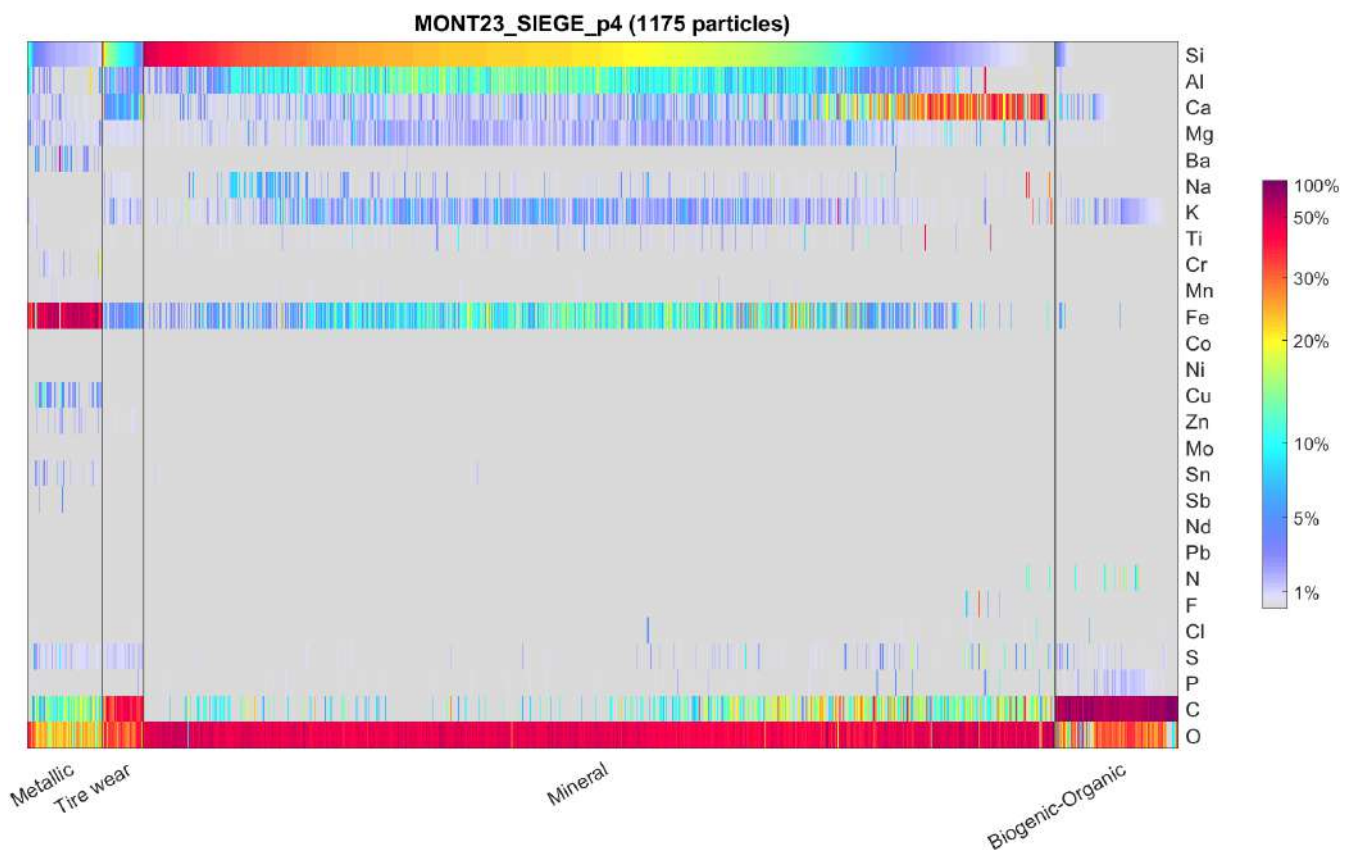
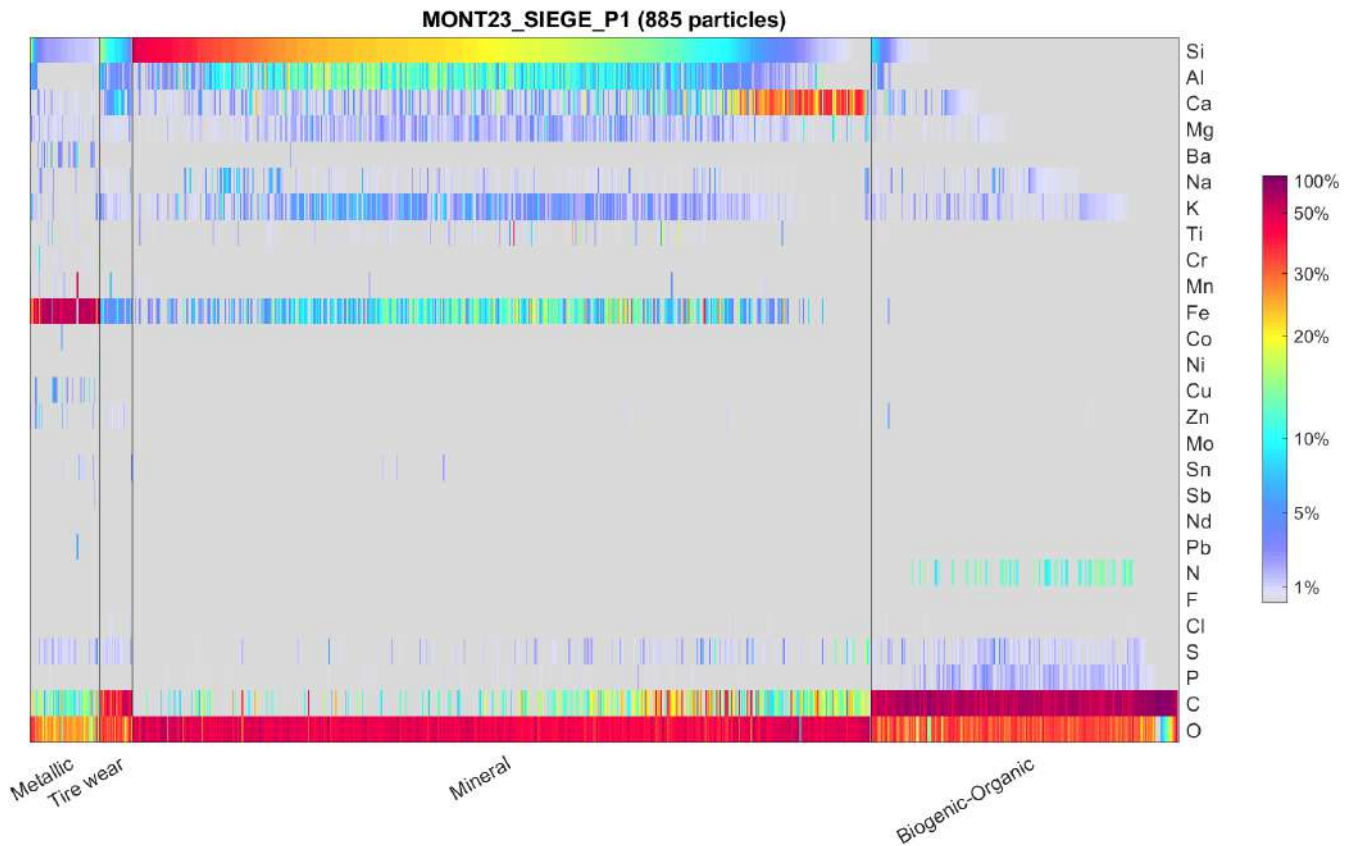
13.4 Composition élémentaire détaillée à partir de l'analyse MEB/EDX des particules individuelles

Exemple de lecture pour le heatmap

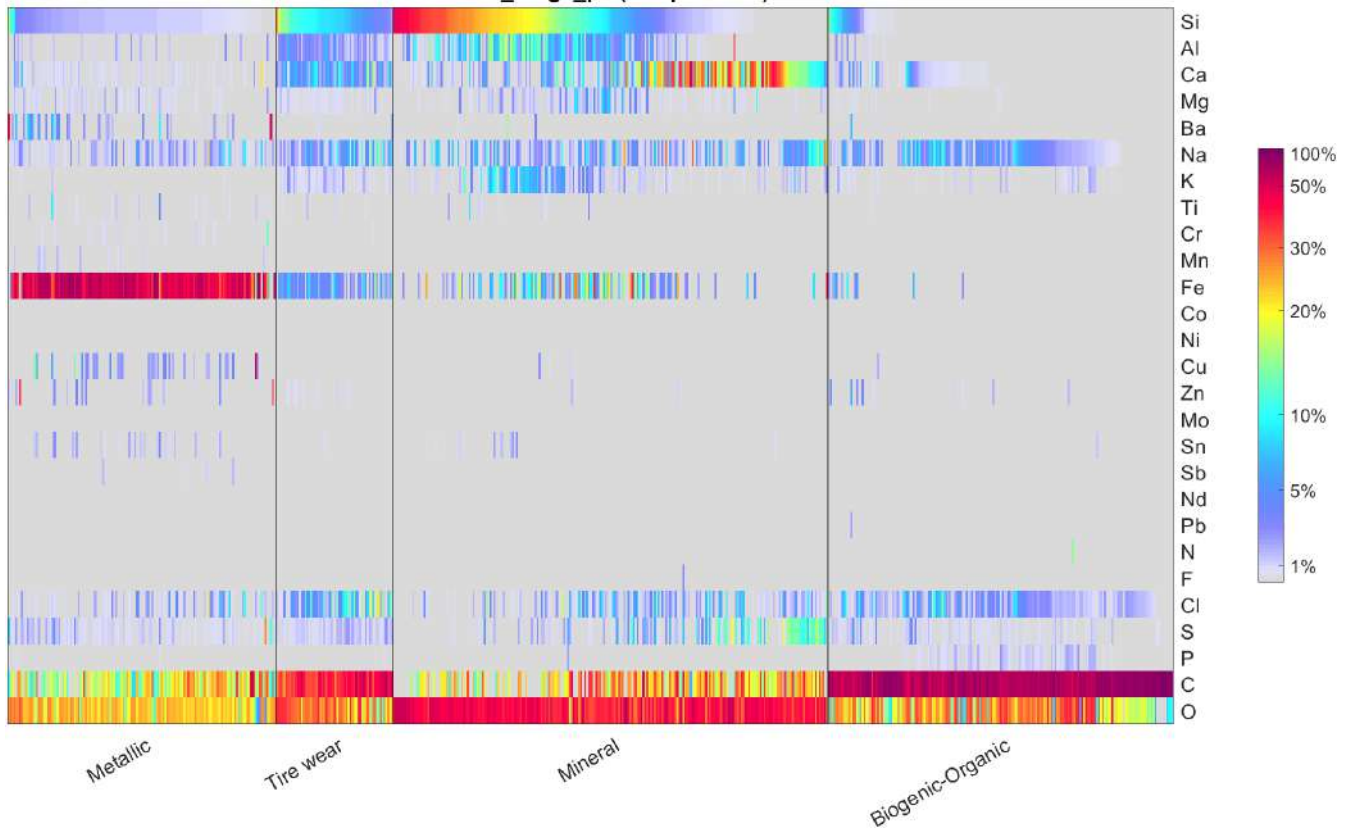


Cartes thermiques avec la composition élémentaire détaillée des particules individuelles pour chaque échantillon Sigma-2 analysé

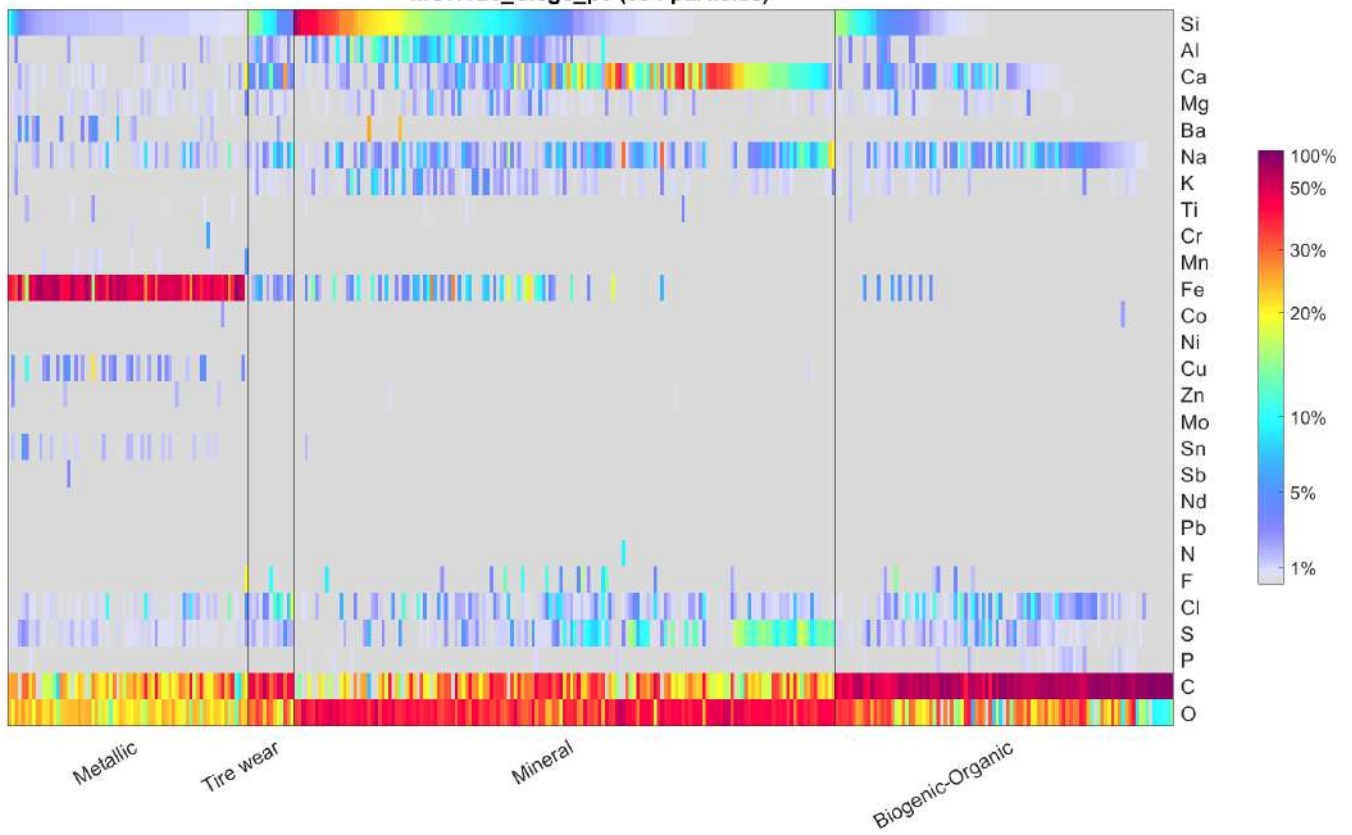
Siège CCPMB



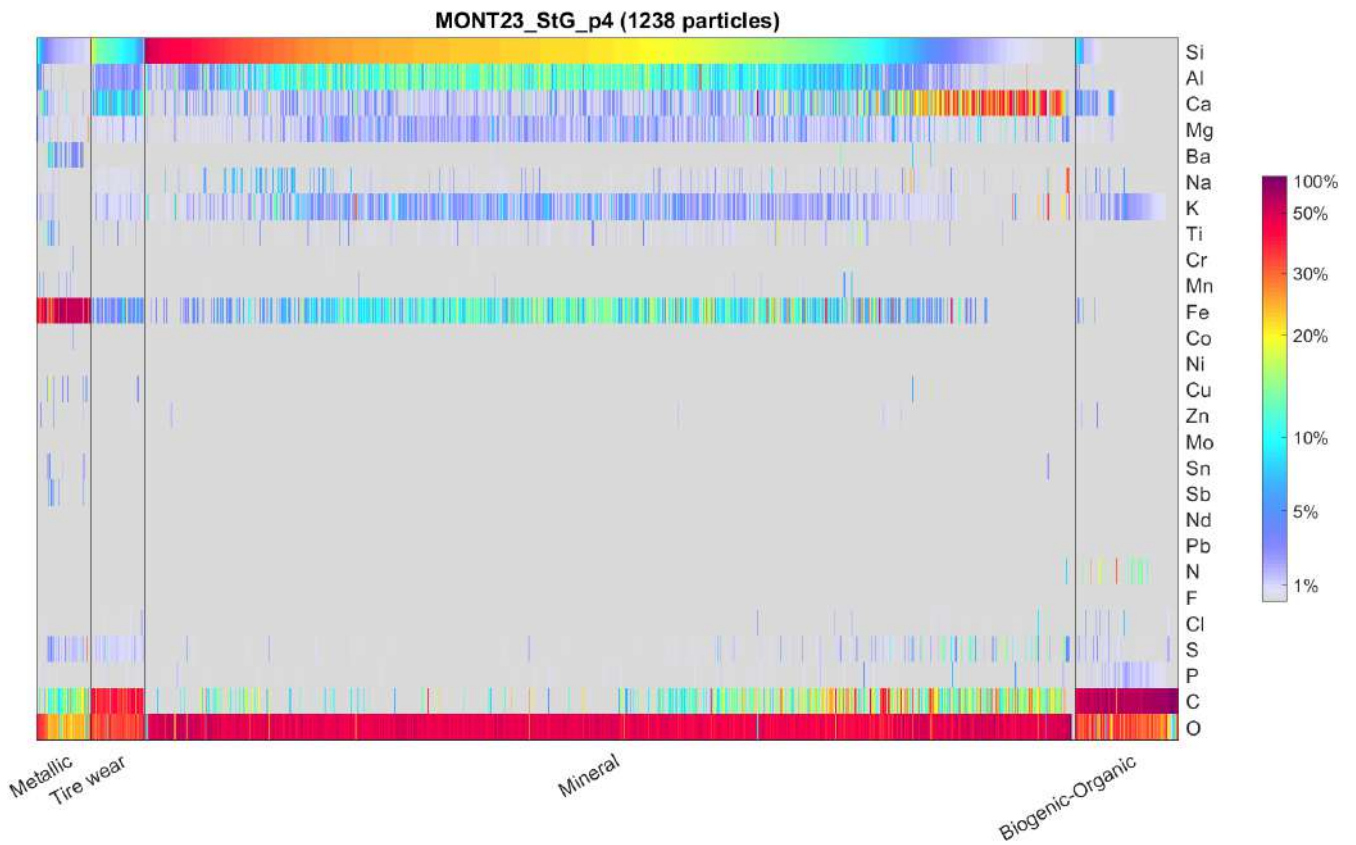
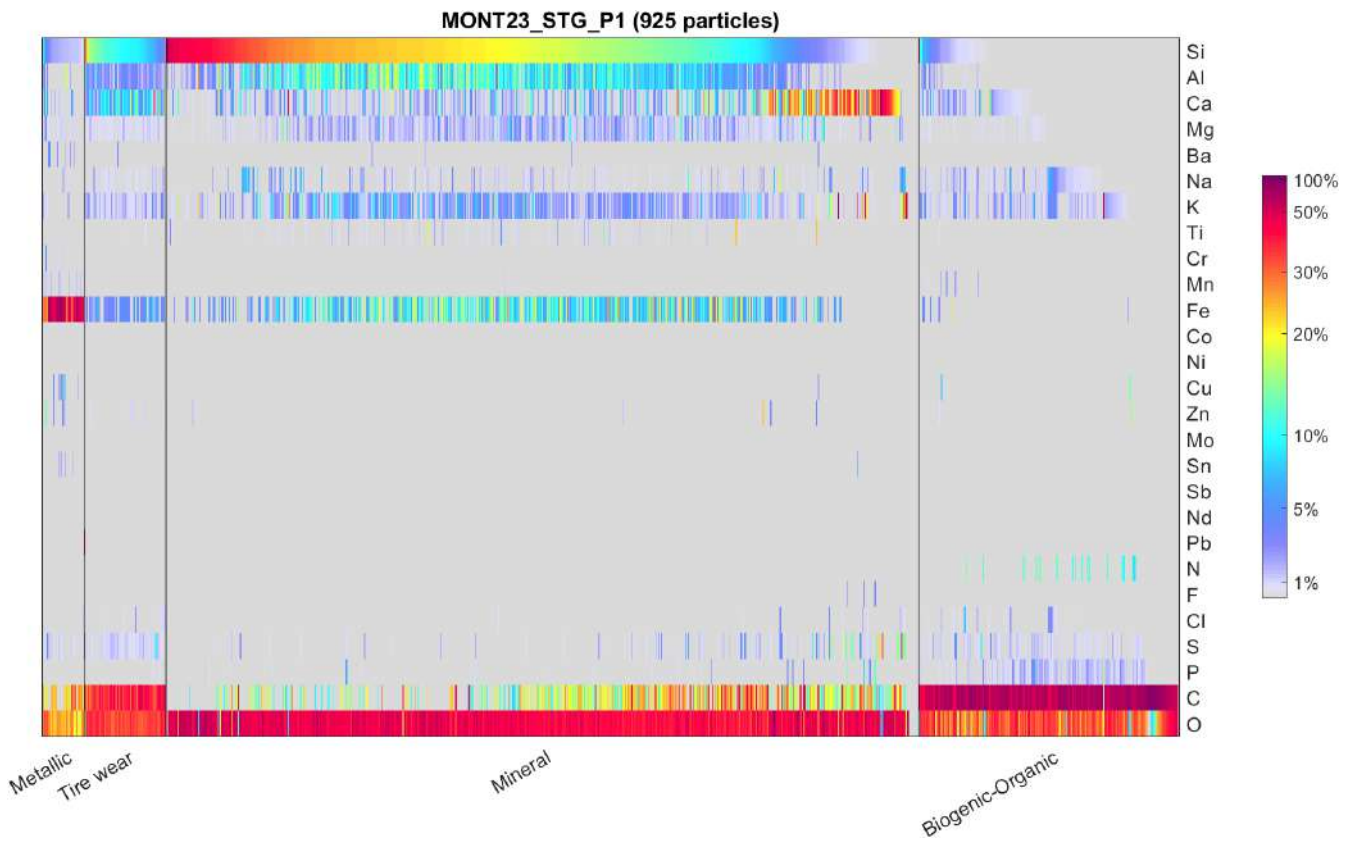
MONT23_Siege_p5 (617 particles)



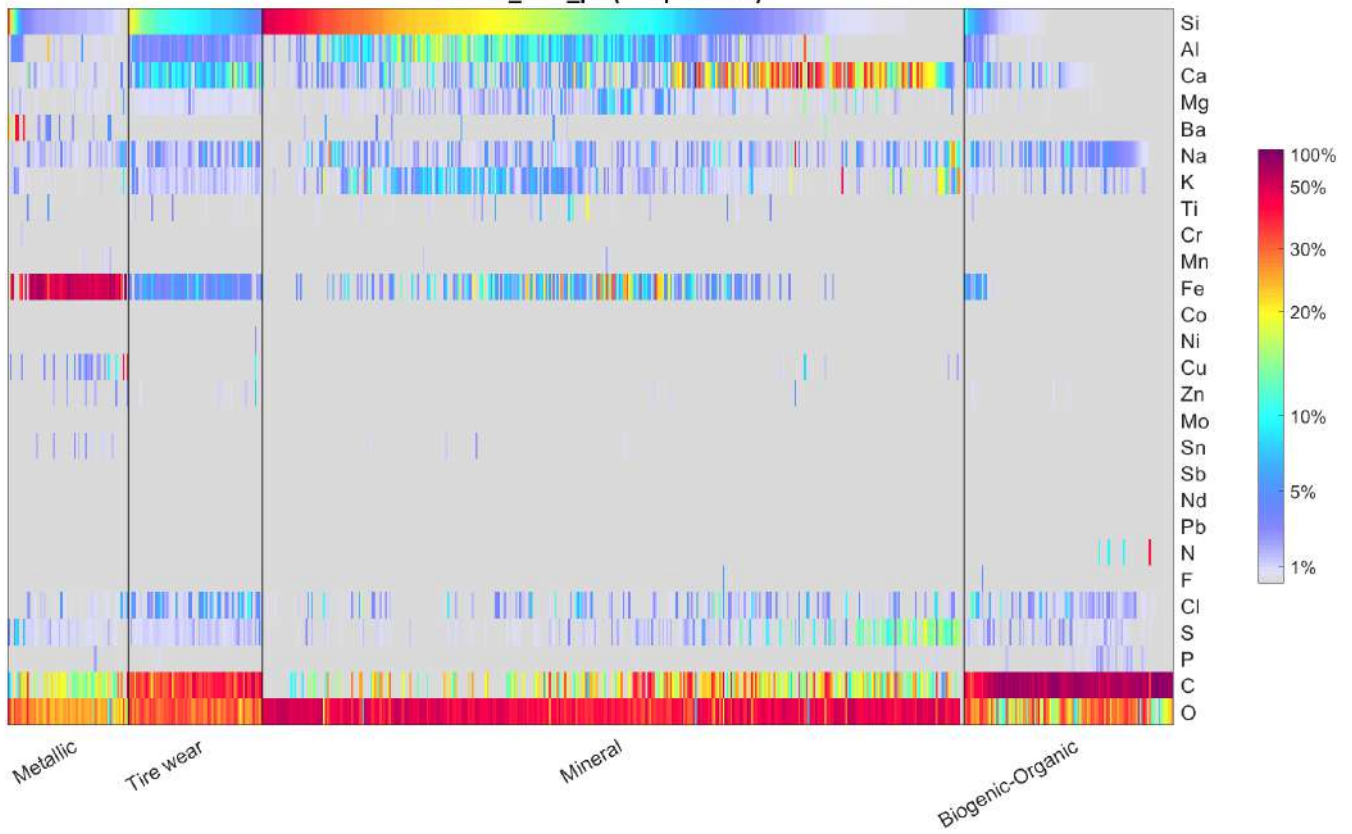
MONT23_Siege_p6 (334 particles)



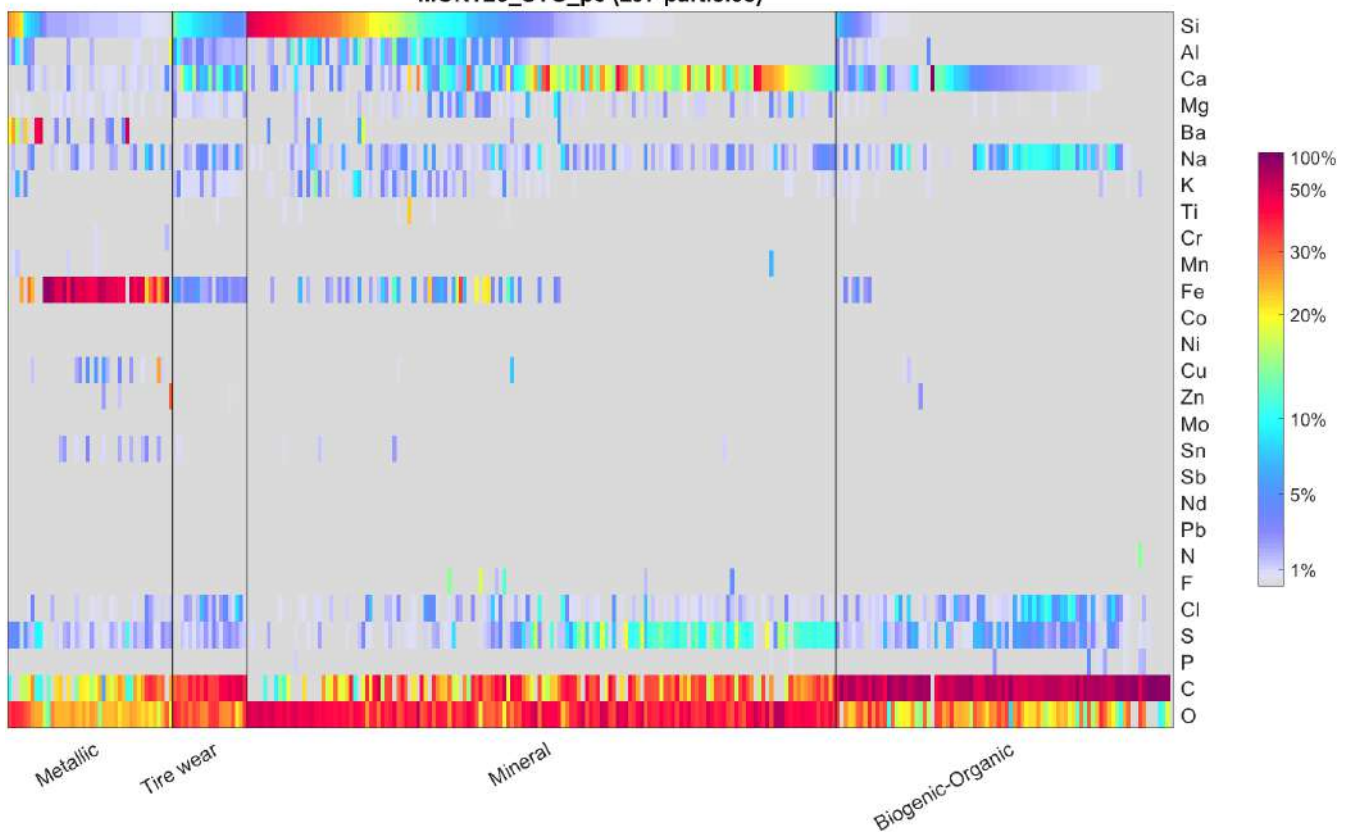
St. Gervais centre



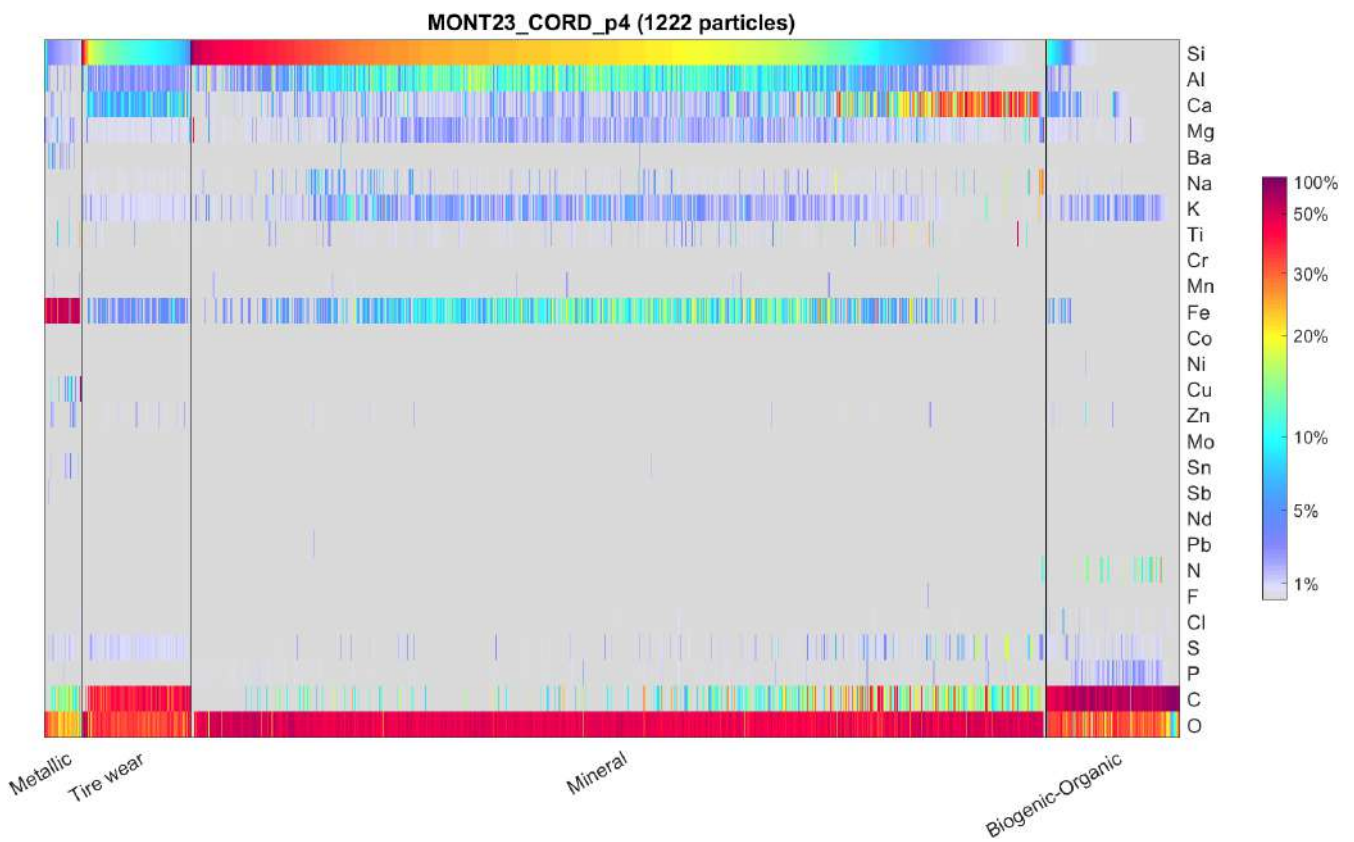
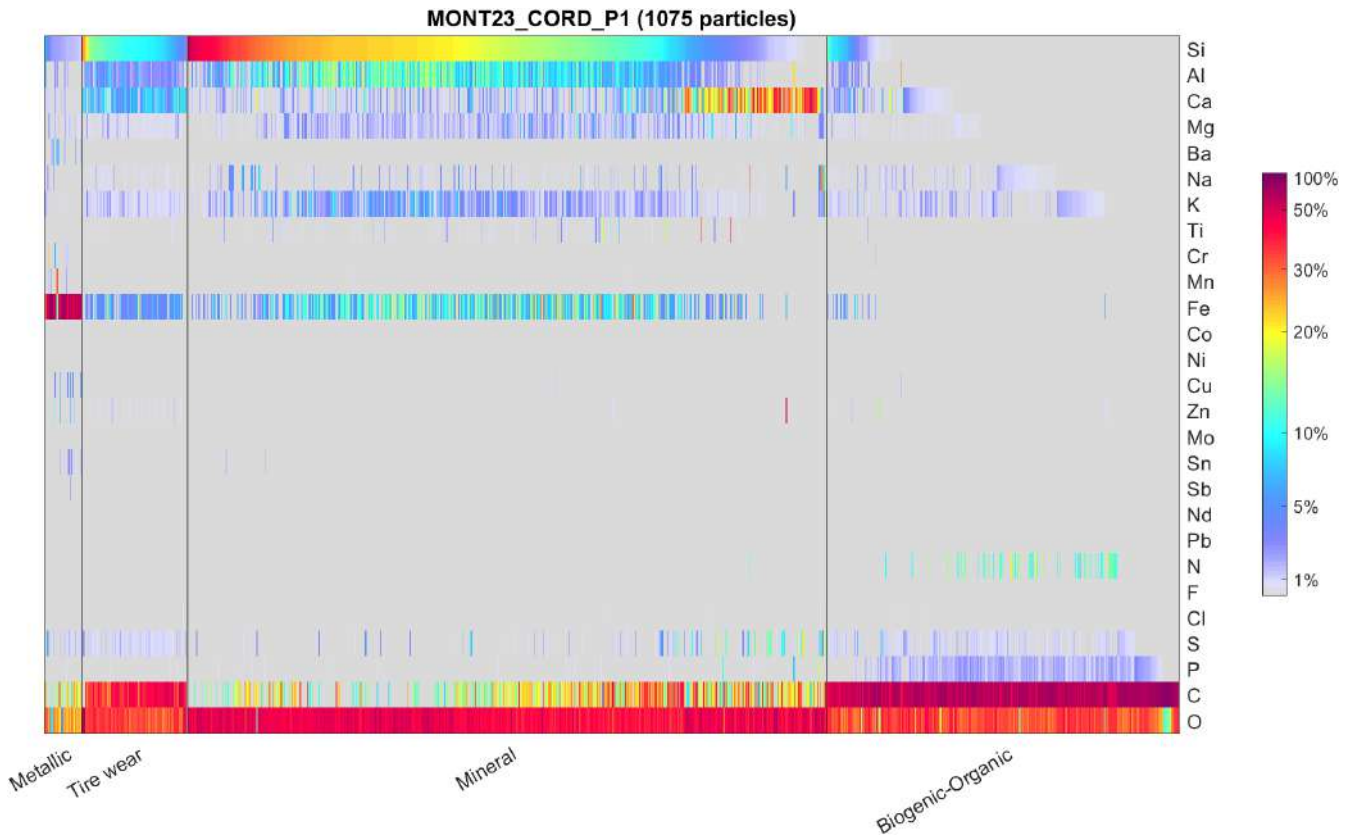
MONT23_STG_p5 (618 particles)



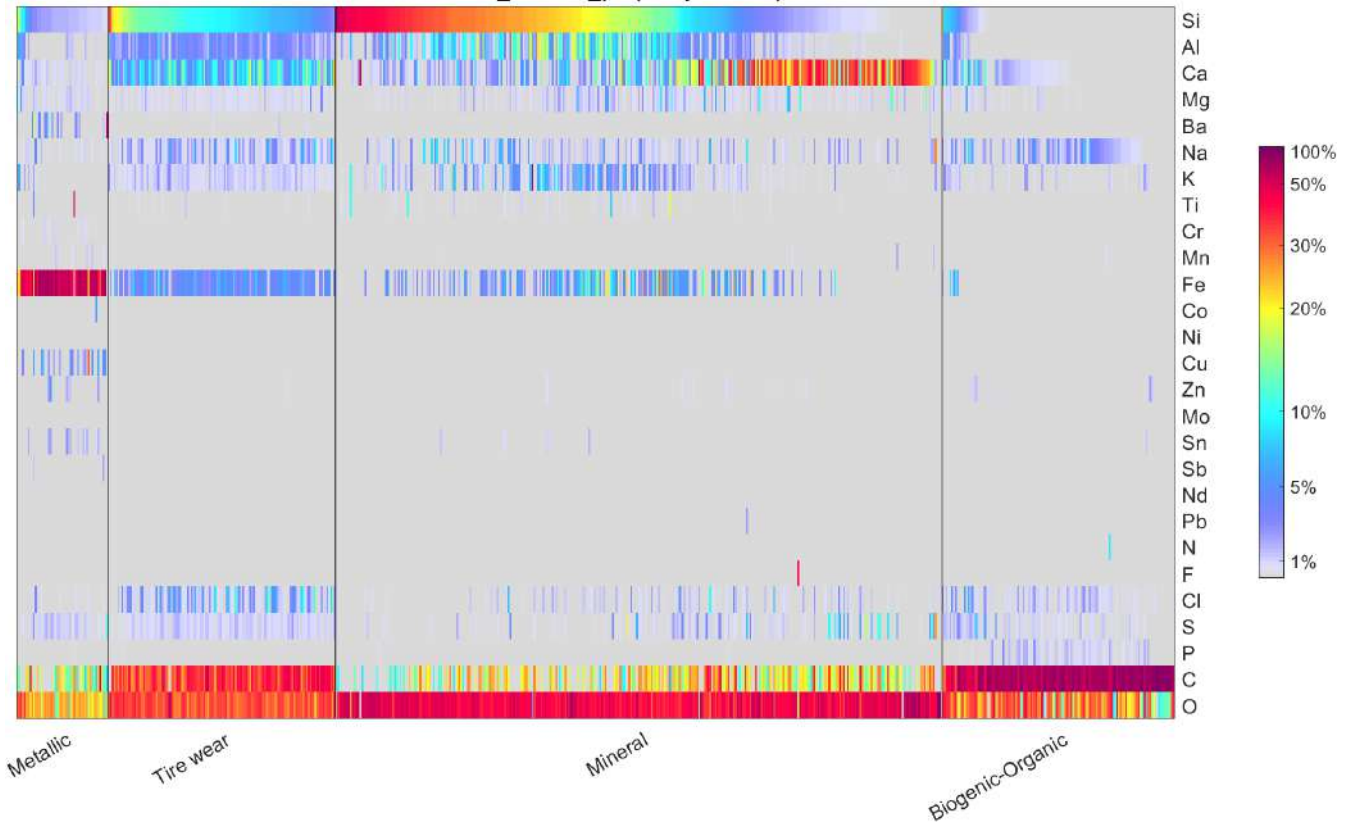
MONT23_STG_p6 (297 particles)



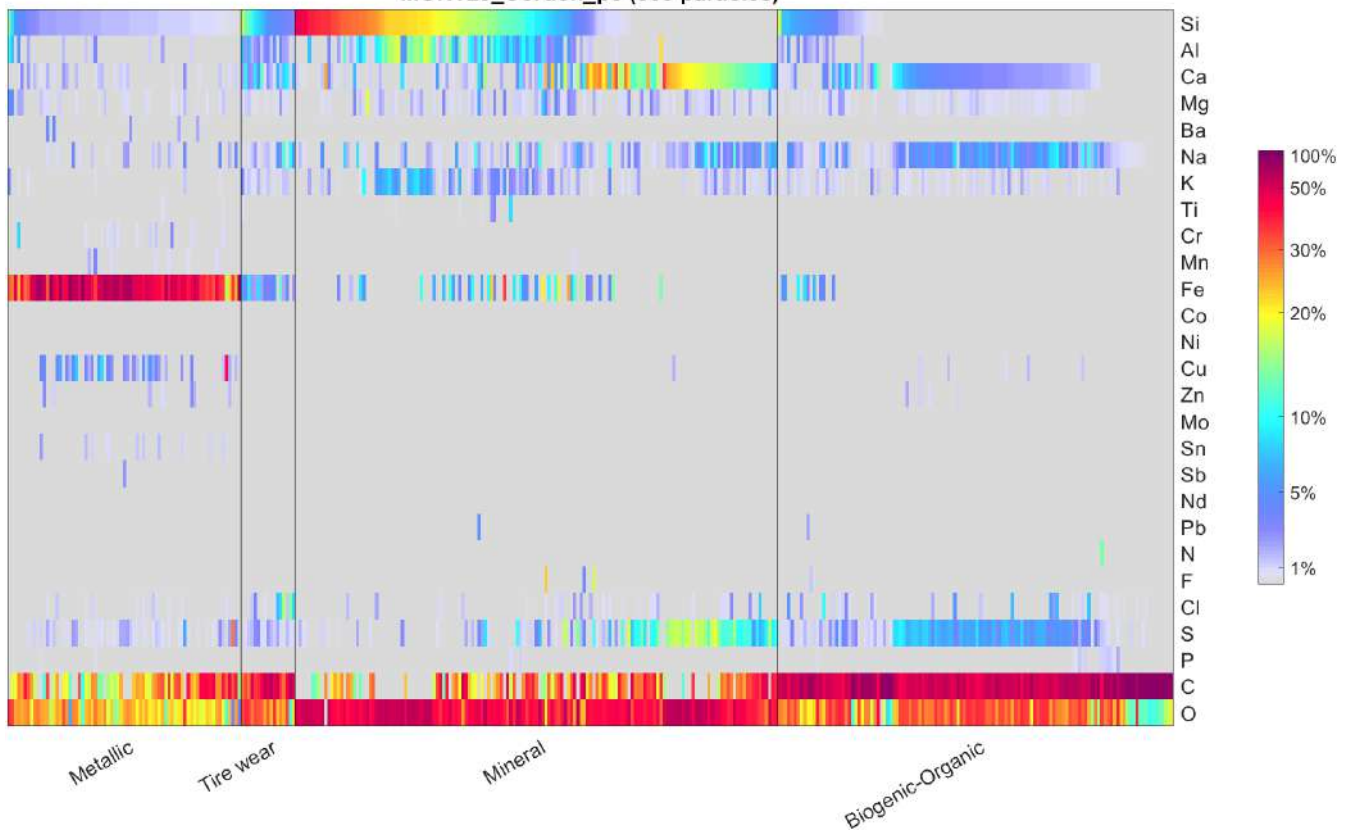
Cordon centre



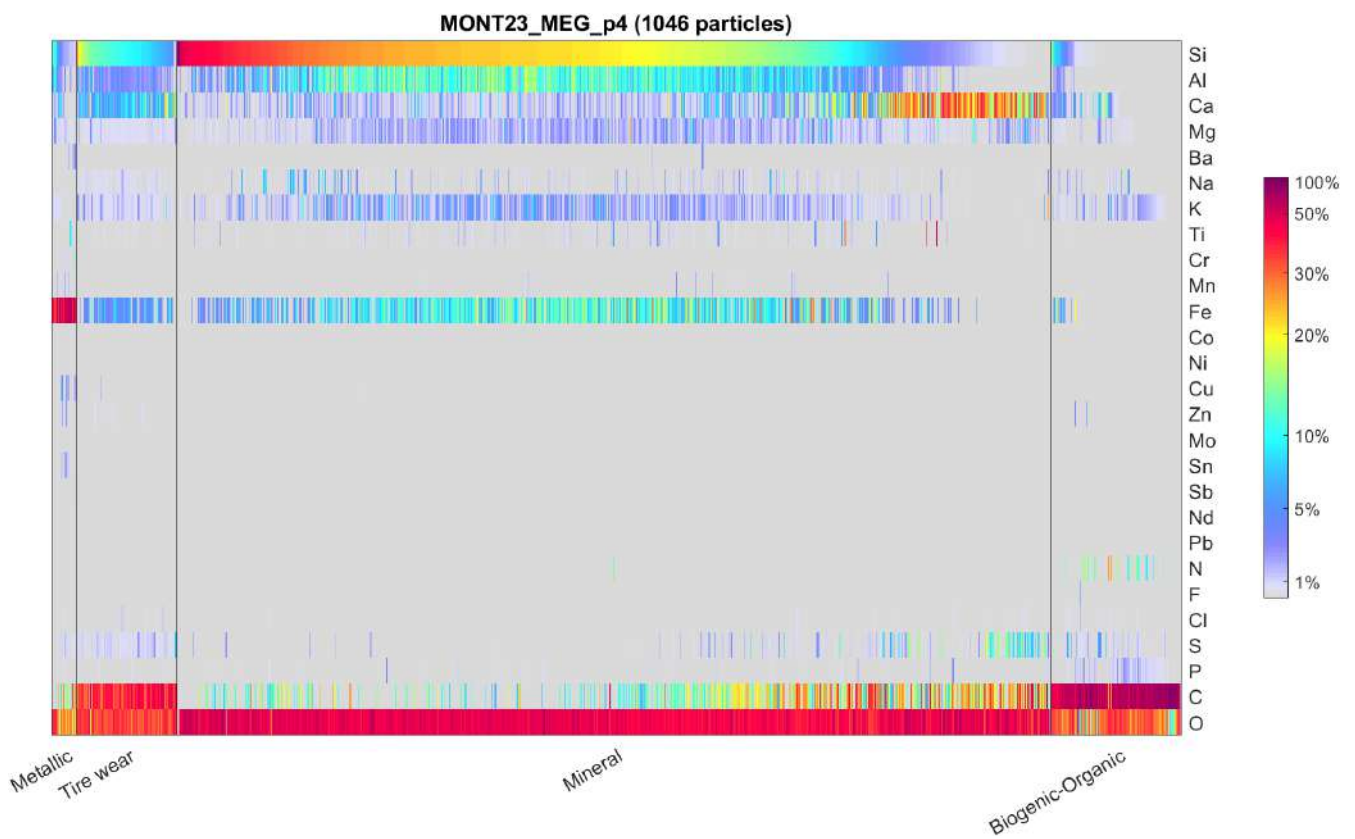
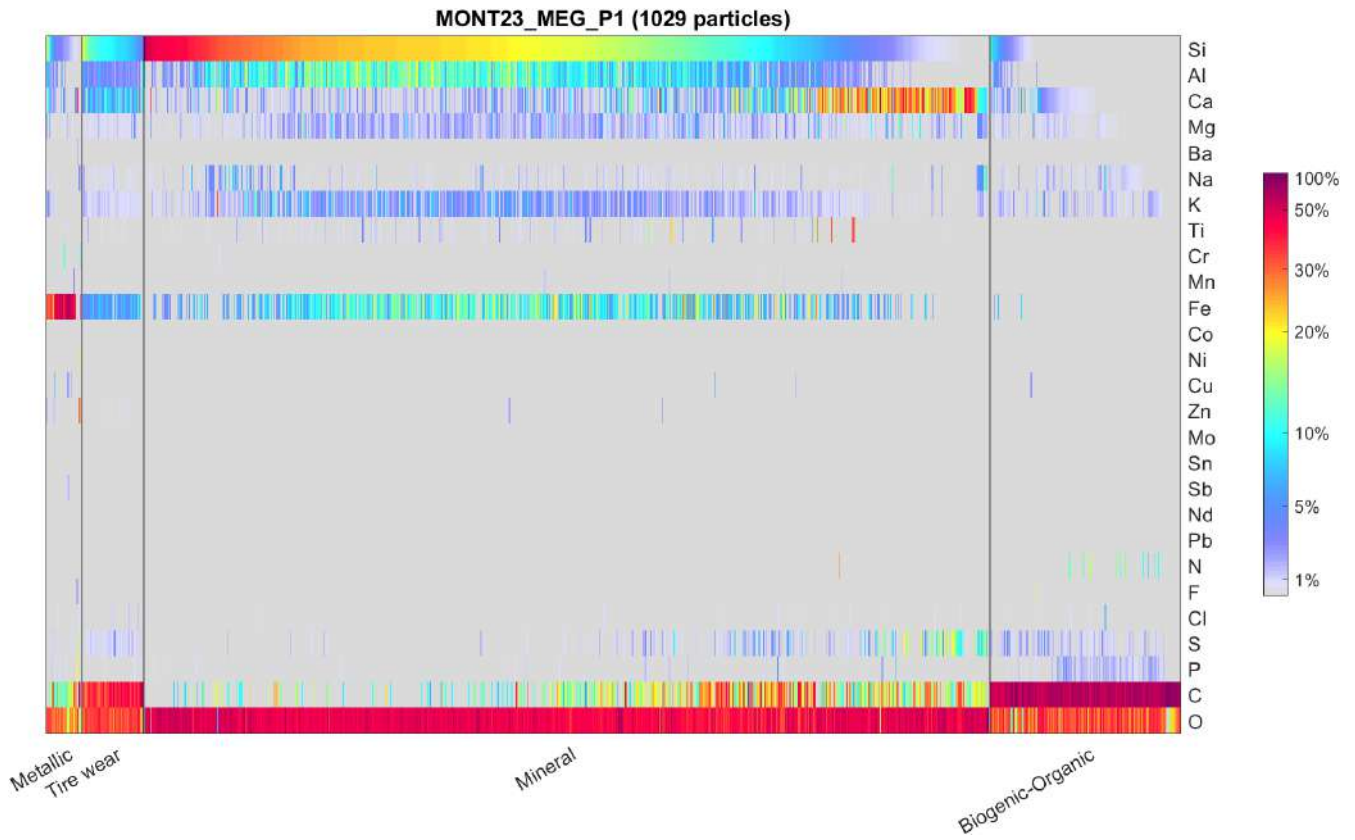
MONT23_Cordon_p5 (632 particles)



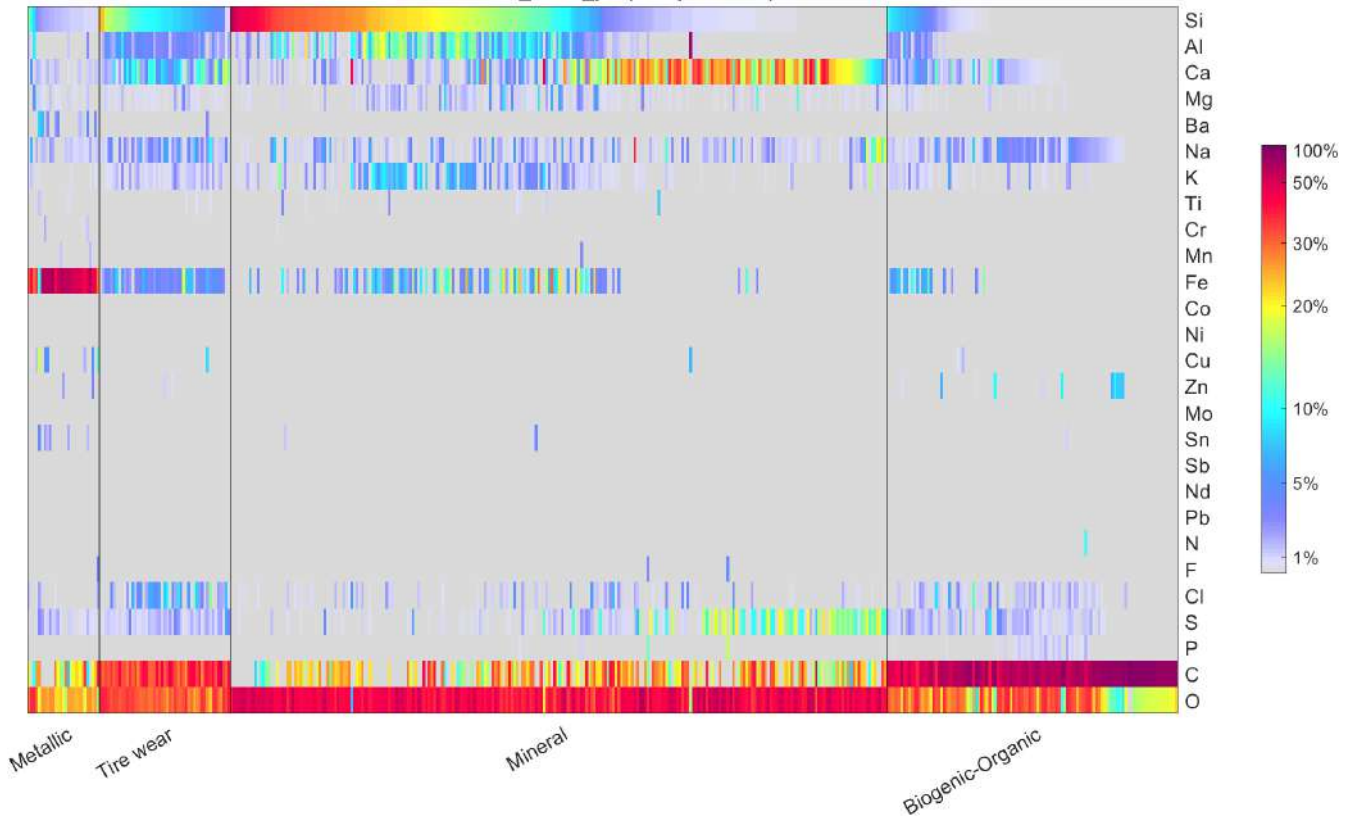
MONT23_Cordon_p6 (365 particles)



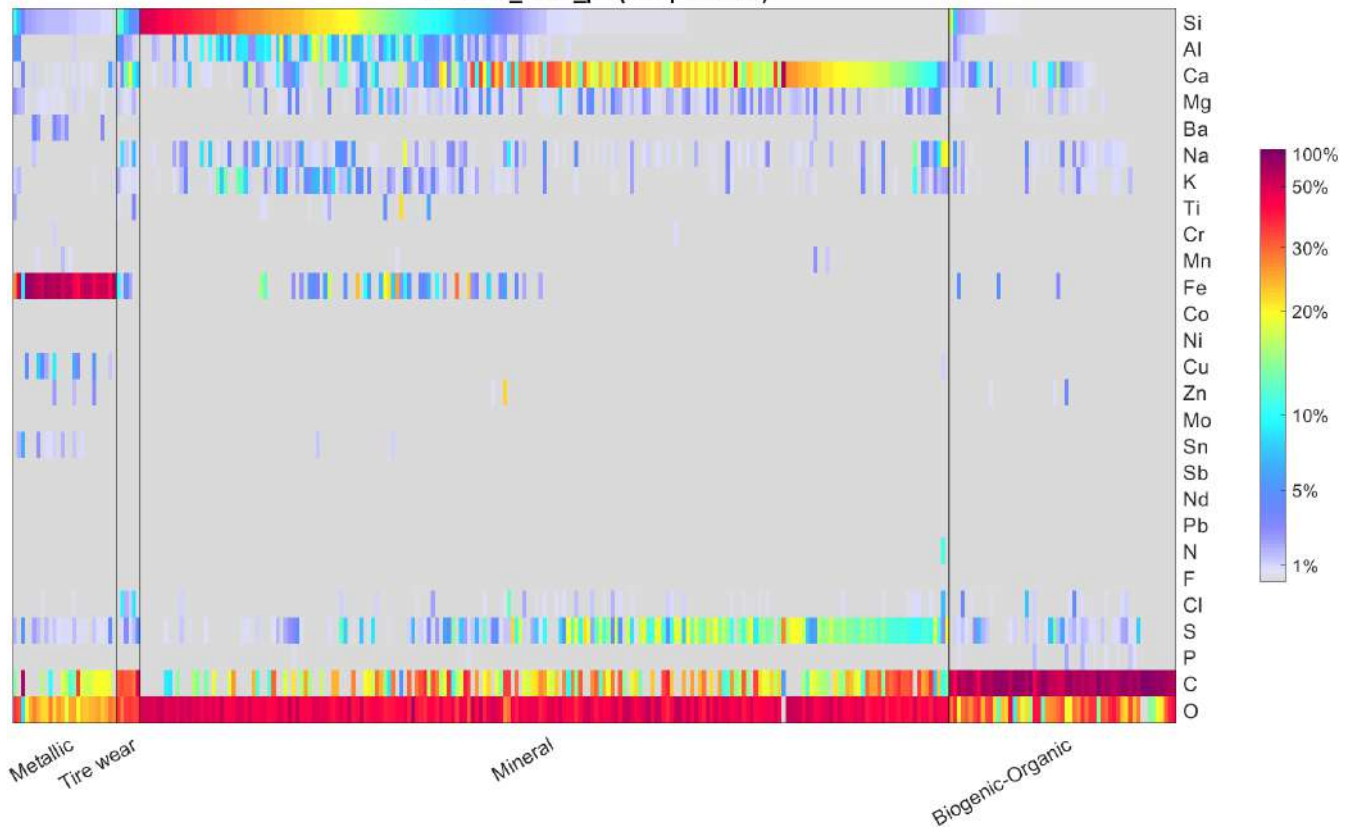
Megève centre



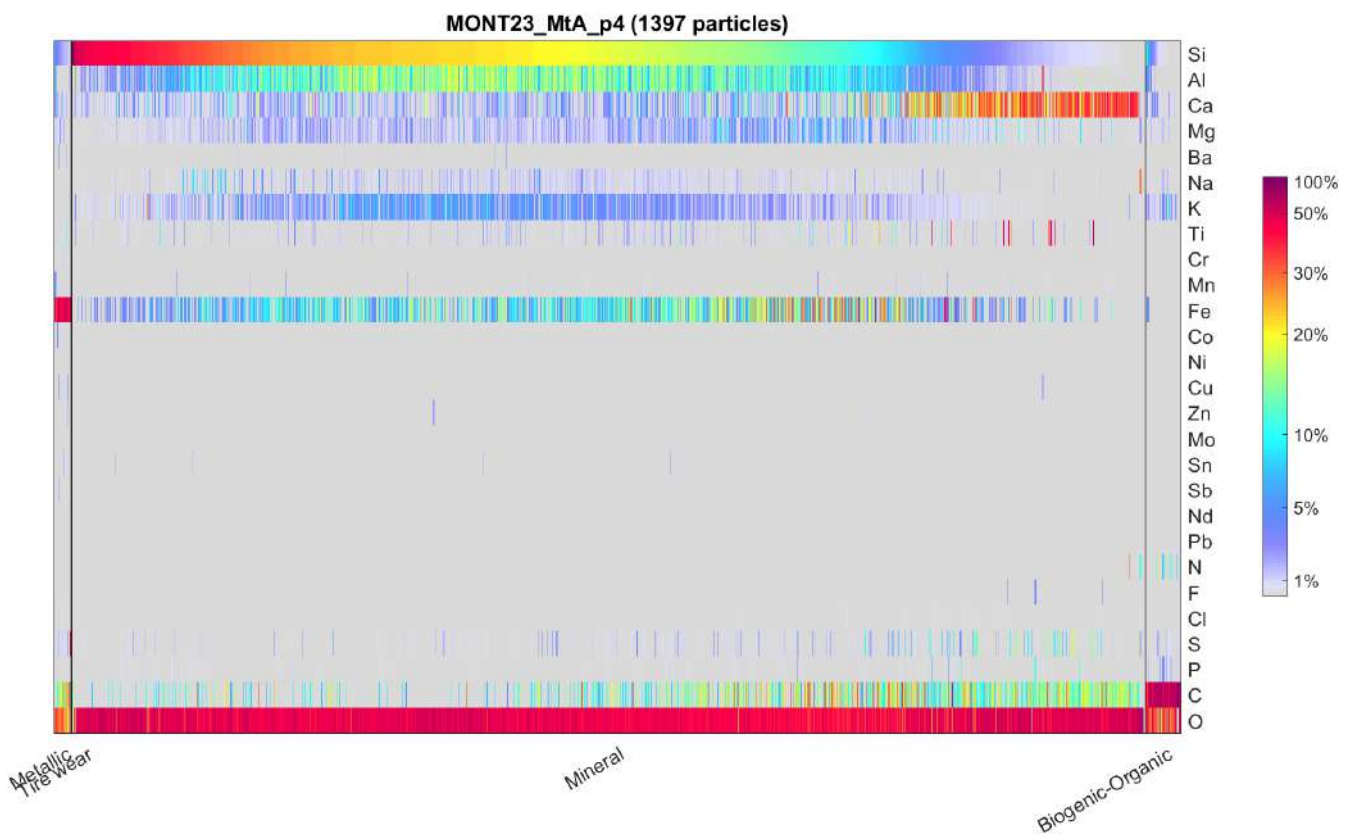
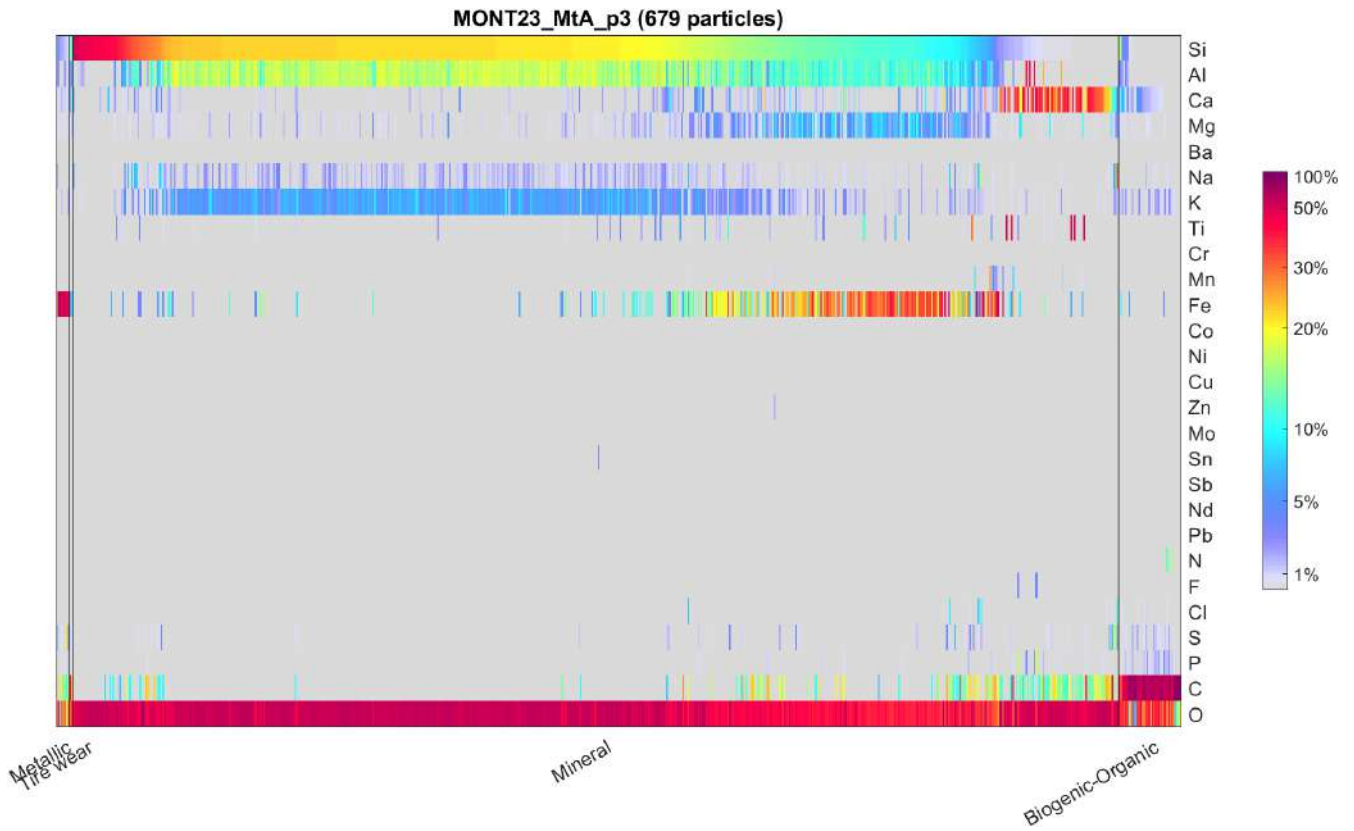
MONT23_MEG_p5 (431 particles)



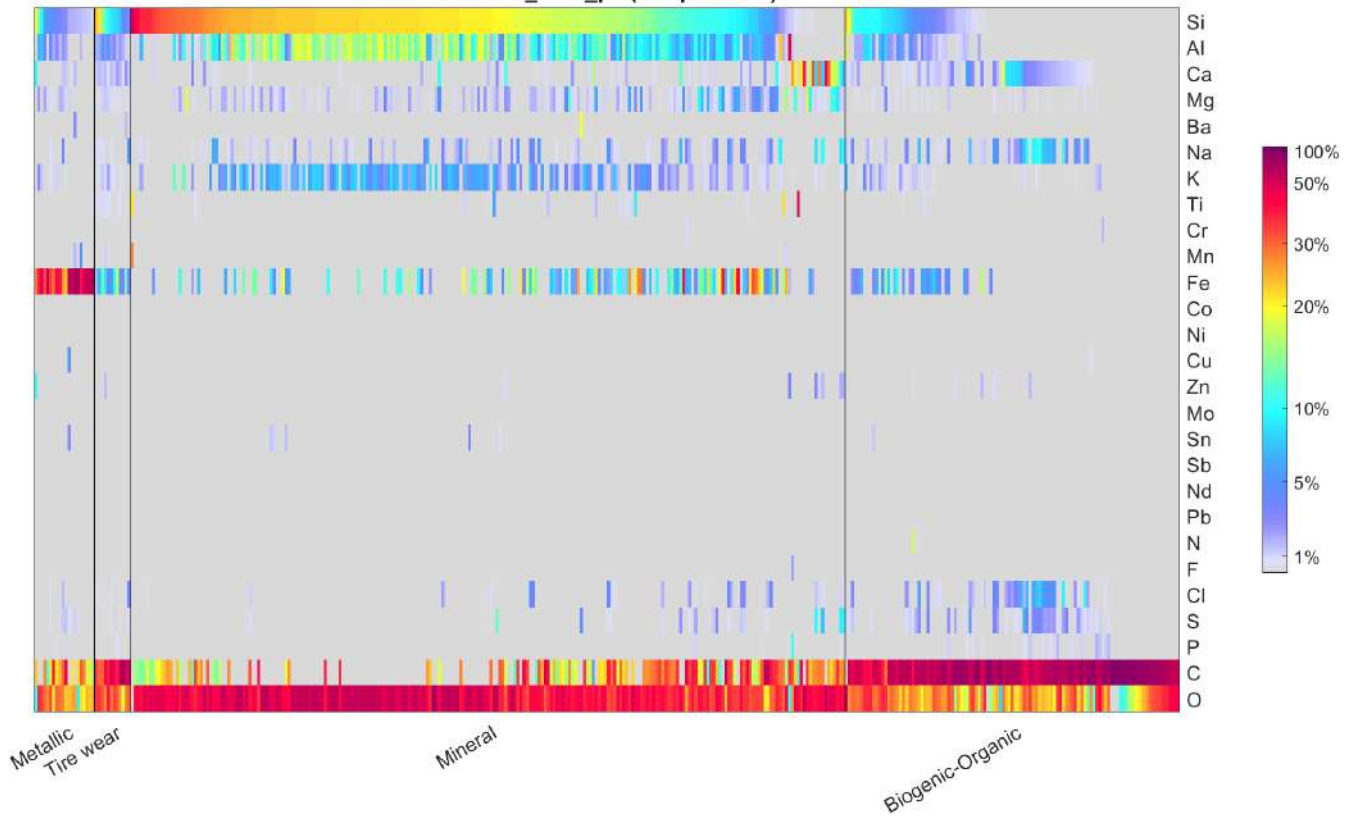
MONT23_MEG_p6 (292 particles)



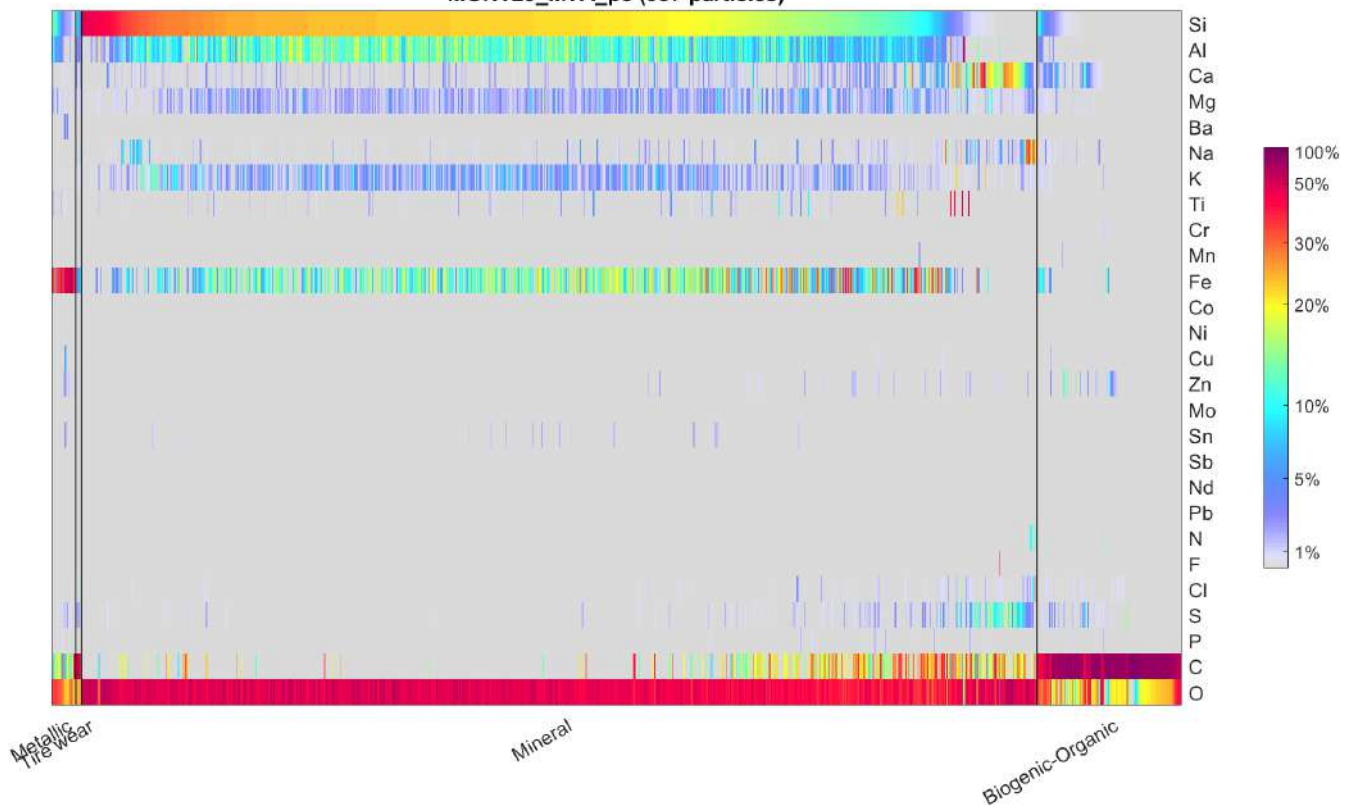
Mont d'Arbois



MONT23_MTA_p5 (380 particles)



MONT23_MTA_p8 (937 particles)





**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN