

Etat des connaissances :

Impact de l'ozone sur la végétation

émissions de COV biogéniques

2021



Auteur : Cécile TREBUCHON

Diffusion : Mai 2022

Siège social :
3 allée des Sorbiers 69500 BRON
Tel. 09 72 26 48 90
contact@atmo-aura.fr

Conditions de diffusion

Dans le cadre de la réforme des régions introduite par la Nouvelle Organisation Territoriale de la République (loi NOTRe du 16 juillet 2015), les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air de l'Auvergne (ATMO Auvergne) et de Rhône-Alpes (Air Rhône-Alpes) ont fusionné le 1er juillet 2016 pour former Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est une association de type « loi 1901 » agréée par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (décret 98-361 du 6 mai 1998) au même titre que l'ensemble des structures chargées de la surveillance de la qualité de l'air, formant le réseau national ATMO.

Ses missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. La structure agit dans l'esprit de la charte de l'environnement de 2004 adossée à la constitution de l'Etat français et de l'article L.220-1 du Code de l'environnement. Elle gère un observatoire environnemental relatif à l'air et à la pollution atmosphérique au sens de l'article L.220-2 du Code de l'Environnement.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes communique publiquement sur les informations issues de ses différents travaux et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ses travaux.

A ce titre, les rapports d'études sont librement disponibles sur le site www.atmo-auvergnerhonealpes.fr

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Toute utilisation partielle ou totale de ce document (extrait de texte, graphiques, tableaux, ...) doit faire référence à l'observatoire dans les termes suivants : © Atmo Auvergne-Rhône-Alpes **(2022 Etat des connaissances : impact de l'ozone sur la végétation - Emissions de COV biogénique.)**

Les données ne sont pas rediffusées en cas de modification ultérieure.

Par ailleurs, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes n'est en aucune façon responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses résultant de ses travaux et pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

- depuis le [formulaire de contact](#)
- par mail : contact@atmo-aura.fr
- par téléphone : 09 72 26 48 90

Financement

Cette étude d'amélioration de connaissances a été rendue possible grâce à l'aide financière particulière du *Conseil Départemental de l'Isère*.

Toutefois, elle n'aurait pas pu être exploitée sans les données générales de l'observatoire, financé par l'ensemble des membres d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

Résumé

Atmo Auvergne Rhône-Alpes a proposé de travailler en partenariat avec le Conseil Départemental de l'Isère, sur un projet dédié **aux impacts de l'ozone sur la végétation, dans et autour des espaces naturels**, comprenant les Espaces Naturels Sensibles (ENS), et plus largement à l'évaluation de l'impact du changement climatique sur la biodiversité.

L'ozone est un polluant en augmentation ces dernières années et notamment sur le sud de la Région. Ce polluant a un impact sur la santé des populations mais également sur le développement de la flore, que ce soit au niveau des cultures mais également des espèces sauvages.

Cette étude comprend :

- Un état des connaissances sur les impacts de l'ozone sur la biodiversité, notamment les végétaux et sur les émissions de COV, précurseurs de l'ozone, issues de la végétation dans les milieux naturels.
- La définition d'un plan de mesures avec les acteurs locaux de la biodiversité, permettant d'évaluer la sensibilité de ces espaces naturels à la pollution à l'ozone et estimer la contribution de ces milieux à la formation des émissions de COV.
- Les résultats d'une étude de faisabilité réalisée à partir de prélèvements par canister durant l'été 2021 sur deux stations de mesures fixes.

Les résultats de recherche montrent que les **degrés de sensibilité** peuvent être très **différents d'une espèce à l'autre**. C'est pourquoi, la pollution de l'air par l'ozone peut modifier les relations de compétition entre espèces et **altérer la composition des écosystèmes**, affectant ainsi leur biodiversité.

On observe divers phénomènes :

- **A court terme : Après un « pic » de pollution, des dégâts foliaires** (tâches ou nécroses) peuvent apparaître à la surface des feuilles, car la plante n'a pas le temps de mettre en place des systèmes de défense.
- **Sur le long terme : Une période d'exposition prolongée** à l'ozone, entraîne des perturbations du métabolisme et peuvent conduire à une **diminution de la croissance ou de la productivité des plantes**.

La météo joue également un rôle : Les plantes absorbent moins d'ozone en période de sécheresse (fermeture des stomates) **que par temps humide**. Un **faible impact** de ce polluant sur la végétation a pu être observé **durant les périodes de canicule** malgré les fortes concentrations en ozone. Ce polluant semble avoir un **plus fort impact sur les forêts d'altitude** que sur les forêts de plaine à cause de l'humidité et des plus fortes concentrations d'ozone observées dans ces zones (faible variation entre jour-nuit).

La méthode de **bioindication** est utilisée pour évaluer les impacts de l'ozone troposphérique sur l'environnement selon **2 approches**. La première dite « **passive** » consiste à **repérer les dégâts foliaires** sur la **végétation présente** naturellement dans l'environnement étudié. La deuxième dite « **active** » consiste à **mettre en place des plantes sensibles** comme le **tabac** (végétal de référence pour l'ozone) en différents points du territoire afin de cartographier les impacts et effectuer un suivi temporel.

L'ozone est un polluant secondaire qui résulte de transformations chimiques sous l'effet du rayonnement solaire. Les deux principaux polluants précurseurs de l'ozone sont les oxydes d'azote (NOx) et les composés organiques volatils (COV) dont le méthane (CH₄).

En Isère, environ **2/3 des émissions** de COVNM (Composés Organiques Volatils Non Méthaniques) du département proviennent des **sources naturelles** (COV biogéniques, dits « COVB ») et notamment des **territoires boisés** comme les **forêts de feuillus et de conifères**, ainsi que des prairies mais dans une moindre mesure. **Certaines espèces de chênes ou sapins** qui ont des **densités foliaires** ou un **potentiel d'émission**

des feuilles élevées ont une **plus grande influence** sur les émissions de COVB. **Le rayonnement solaire** agit sur les **émissions de COVB** qui vont être **maximales** sur la **période estivale**. Parmi les COV produits dans la nature, on peut citer **l'isoprène** comme espèce majoritairement rencontrée (environ 70% des émissions de COV biogéniques).

Deux espaces naturels où les émissions de COVB étaient plus importantes (le plateau de la Molière et les Isles du Drac) ont été ciblés pour réaliser des mesures de COVNM, afin d'améliorer nos connaissances sur les composés mesurés au niveau de ces territoires lors des épisodes de pollution à l'ozone.

L'ensemble des résultats des prélèvements réalisés dans le cadre de l'étude de faisabilité sont supérieurs à la limite de détection. Les **niveaux moyens de COV mesurés sur le site du sud lyonnais en proximité industrielle**, sont, pour la plupart des composés, **nettement supérieurs** à ceux observés sur le site de fond périurbain de Grenoble. Néanmoins, les **niveaux maximums d'Isoprène** ($4,6 \mu\text{g.m}^{-3}$) ont été mesurés **sur la station du sud grenoblois**. Les concentrations d'**Isoprène augmentent** pendant la **période estivale**, cependant les **concentrations maximales** ne sont **pas** observées **aux heures les plus chaudes de la journée**.

Même si des composés majoritaires ont pu être identifiés sur chaque sites, ceux-ci n'ont pas la même réactivité dans l'atmosphère ni le même « pouvoir » de formation de l'ozone. Dans le cadre du plan régional ozone mené par la DREAL, à partir de 2022, des études complémentaires permettront de préciser et quantifier les composés les plus impactant et ensuite de mener des actions de réduction sur ces composés.

Contexte

L'ozone est le seul parmi les polluants réglementés sur le plan européen¹ qui voit ses concentrations augmenter ces dernières années au niveau de la région Auvergne-Rhône-Alpes, mais aussi dans d'autres régions françaises. Les valeurs cible pour la santé comme pour la végétation ne sont pas respectées et les épisodes estivaux de pollution photochimique sont en recrudescence alors qu'ils avaient diminué après la mise en place des plans de réduction d'émissions de COV industriels notamment.

l'INERIS a réalisé en 2015, une étude visant à déterminer l'ampleur de l'impact du changement climatique sur la pollution à l'ozone². Les résultats confirment que le changement climatique aura un effet pénalisant sur la pollution à l'ozone pour une grande partie de l'Europe continentale, avec une augmentation prévisionnelle des concentrations d'ozone en été de l'ordre de 2 à 3 µg/m³ en moyenne. Par ailleurs, les impacts de ce polluant sur la biodiversité et l'économie sont peu documentés bien que connus sur le rendement des cultures.

Afin d'approfondir les connaissances sur l'ozone, qui est un polluant à fort impact sur la santé de l'homme et, plus globalement, sur l'ensemble des espèces végétales et animales de la région Auvergne-Rhône-Alpes, Atmo Auvergne Rhône-Alpes s'implique dans divers projets de Recherche & Développement portant sur ce polluant complexe et ses précurseurs.

Un premier travail sur ce polluant et ses précurseurs a été réalisé en 2020, afin de mieux comprendre les processus de formation et destruction de l'ozone et d'apporter un état des connaissances aux autorités en charge de la mise en place des plans visant à réduire l'exposition des populations.

Dans la continuité de ce cadre, Atmo Auvergne Rhône-Alpes a proposé de travailler en partenariat avec le Conseil Départemental de l'Isère, sur un projet dédié aux impacts de l'ozone sur la végétation et la flore, dans et autour des espaces naturels, comprenant les Espaces Naturels Sensibles (ENS), et plus largement à l'évaluation de l'impact du changement climatique sur la biodiversité.

Le département de l'Isère apparaît comme un territoire d'expérimentation intéressant, de par sa composition de milieux divers et variés (villes, plaines, montagnes, agricoles, forestiers...) et du fait que c'est un des territoires les plus concernés par le dépassement des seuils d'ozone recommandés.

Il a été proposé de mener dans un premier temps, une recherche bibliographique et d'établir un état des connaissances sur les impacts de l'ozone sur la biodiversité et sur les émissions de COV, précurseurs de l'ozone, issues de la végétation dans les milieux naturels.

Et dans un deuxième temps d'identifier et définir un plan d'échantillonnage de mesures avec les acteurs locaux de la biodiversité, permettant d'évaluer la sensibilité de ces espaces naturels à la pollution à l'ozone et estimer la contribution de ces milieux à la formation des émissions de COV.

Une étude de faisabilité a d'abord été réalisée durant l'été 2021, sur un site de fond périurbain à Grenoble et un site de proximité industriel à Lyon. Des mesures de COV ont été effectués sur 2 journées où les conditions météorologiques étaient propices à la formation d'ozone, afin notamment d'évaluer les niveaux mesurés en situation de fond avec des prélèvements par canister sur un pas de temps courts. Les résultats de ces mesures sont présentés à la fin de ce rapport.

¹Directives 2004/107/CE et 2008/50/CE

² Is the ozone climate penalty robust in Europe ? <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-01862932/document>

L'analyse des mesures des taux d'ozone (historiques et actuels), couplée aux observations des professionnels de la biodiversité, devrait permettre d'identifier des types de végétation et de flore qui pourront être, in fine, des bio-indicateurs efficaces pour suivre et évaluer les effets de l'ozone et de ses précurseurs sur le long terme.

Ces éléments devront également permettre à Atmo Auvergne Rhône-Alpes de produire des propositions pour aller plus loin dans la connaissance de l'impact du changement climatique sur la biodiversité dans les années à venir.

Sommaire

1. Etat des connaissances	10
1.1. Les impacts de l’ozone sur la biodiversité	10
1.1.1. Définitions	10
1.1.2. Les impacts de l’ozone sur la végétation	10
1.2. Les émissions de COVNM précurseurs de l’ozone	13
1.2.1. Définitions	13
1.2.2. Les émissions de COVNM	13
2. Identification et planification d’un plan de mesures des COVNM au sein des espaces naturels	15
2.1. Méthodologie	16
2.1.1. Identification des zones d’études à partir d’analyses cartographiques	16
2.1.2. Définition d’un plan d’échantillonnage de mesures avec les acteurs locaux et biosurveillance	18
3. Préfiguration d’une campagne de mesures été 2021	19
3.1. Méthodologie	19
3.1.1. Dispositif de prélèvement et d’analyse	19
3.1.2. Choix des sites de mesure	20
3.1.3. Niveaux d’ozone et données météorologiques	20
3.2. Présentation des résultats de mesure	21
3.2.1. Les substances majoritaires	21
3.2.2. Les niveaux observés	26
3.2.3. Comparaison des mesures canisters et perkin	28
3.2.4. Variation temporelle des niveaux de COVNM biogéniques	29

Annexes

Annexes 1 : Méthodes de prélèvement des COVNM	34
Annexes 2 : Resultats prélèvements	35
Annexe 3 : La biosurveillance passive : Comment reconnaître les symptômes de l’ozone sur la végétation ?	37
Pour les espèces de feuillues :	37
Pour les espèces de conifères :	39
Annexe 4 : Bibliographie	41
Impact de l’ozone sur végétaux et biosurveillance	41
Les précurseurs de l’ozone	41

Illustrations

Figure 1 : Répartition des émissions de COVNM.....	13
Figure 2 : Evolution des émissions de COVNM en Auvergne Rhône-Alpes.....	14
Figure 3 : Concentrations d'ozone (AOT40 2015-2019) au niveau de la région Auvergne Rhône-Alpes	15
Figure 4 : Carte des espaces et parcs naturels en Isère.....	16
Figure 5 : Les émissions de COVNM au niveau des espaces naturels en Isère (en tonne/an)	17
Figure 6 : Répartition des émissions de COV (biogénique /anthropique) au sein des espaces naturels sensibles (en tonne)	17
Figure 7 : répartition des émissions de COVNM (biogénique/anthropique) au sein des réserves naturelles régionales.....	18
Figure 8 : Zoom sur les émissions de COVNM au sein de 2 espaces naturels	18
Figure 9 : Niveaux d'ozone mesurés sur l'agglomération grenobloise les jours de prélèvements	21
Figure 10 : Rayonnement solaire et températures mesurés les jours de prélèvement.....	21
Figure 11 : Profil des concentrations de COVNM.....	23
Figure 12 : Concentrations et poids relatif de chaque composé par rapport à la somme totale des COV mesurés sur les sites d'étude.....	24
Figure 13 : Concentrations et poids relatif de chaque composé par rapport à la somme totale des COV mesurés en moyenne sur 5ans sur la station fixe de référence de Grenoble les Frênes et de Feyzin.....	25
Figure 14 : Niveaux moyens de COVNM mesurés sur les sites d'étude et sur le site de référence de Grenoble les Frênes (moyenne sur 5 ans)	26
Figure 15 : Niveaux maximum de COVNM mesurés sur les sites d'étude lors des prélèvements.....	27
Figure 16 : Comparaison des concentrations moyennes de COVNM mesurées lors des 2 jours de prélèvements	28
Figure 17 : Comparaison des concentrations moyennes de COVNM mesurés entre perkin et canister	29
Figure 18 : Profil journalier des concentrations d'isoprène et des températures mesurées lors des prélèvements et en moyenne sur 5 ans	30
Figure 19 : Evolution comparées des moyennes mensuelles d'Isoprène et de benzène.....	31

1. Etat des connaissances

1.1. Les impacts de l'ozone sur la biodiversité

1.1.1. Définitions

1.1.1.1. L'ozone troposphérique

L'ozone (O₃) n'est pas directement émis par des sources de pollution mais est produit chimiquement dans l'atmosphère. Il est qualifié d'espèce secondaire. C'est une espèce relativement stable. Le temps de vie de l'ozone dans la troposphère dépend des concentrations de ses précurseurs, de la température et de l'ensoleillement. En situation estivale, son temps de vie chimique est de l'ordre d'une à quelques semaines, il est de quelques mois en situation hivernale.

L'oxydation photochimique des composés organiques volatils (COV) en présence d'oxydes d'azote (NOx) est une source majeure d'ozone, aussi bien aux échelles locales et régionales qu'à l'échelle globale. Ces deux familles de composés constituent donc les précurseurs chimiques de l'ozone. La production d'ozone et de façon plus générale la pollution photo-oxydante, sont gouvernées par les NOx, les COV et les radicaux HOx.

Une description exhaustive des mécanismes de formation de l'ozone est disponible dans un rapport de juillet 2020 réalisé dans le cadre du plan régional.

https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/sites/ra/files/atoms/files/travauxozonetropospherique_connaissances_et_actions_juillet2020.pdf

1.1.1.2. La biodiversité

La **biodiversité** désigne l'ensemble des êtres vivants ainsi que les écosystèmes dans lesquels ils vivent. Ce terme comprend également les interactions des **espèces** entre elles et avec leurs milieux. L'indice le plus courant de biodiversité est la richesse des espèces, c'est-à-dire le nombre d'espèces représentées en un lieu donné.

Les **facteurs de changement** directs qui influencent de manière non équivoque les processus des écosystèmes comprennent les changements dans l'affectation des sols, le **changement climatique**, les espèces envahissantes, la surexploitation et **la pollution**.

1.1.2. Les impacts de l'ozone sur la végétation

La pollution de l'air peut entraîner une altération des écosystèmes. En effet, les interactions entre les milieux et le dépôt de polluants atmosphériques (dioxyde d'azote, dioxyde de soufre), notamment par les pluies, conduisent à des phénomènes d'acidification ou d'eutrophisation des espaces naturels.

Certains polluants comme l'ozone, en modifiant la physiologie et la biochimie des végétaux, perturbent les relations plantes-insectes et par conséquent ont un effet déterminant sur les écosystèmes. [HTTPS://WWW.ENCYCLOPEDIE-ENVIRONNEMENT.ORG/VIVANT/IMPACTS-POLLUANTS-AIR-SUR-VEGETATION](https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/impacts-polluants-air-sur-vegetation) (GARREC JEAN-PIERRE, DIRECTEUR DE RECHERCHE INRA, LABORATOIRE POLLUTION ATMOSPHERIQUE, INRA, CENTRE DE RECHERCHES DE NANCY, CHAPITRE 5).

Même si des programmes de recherche se mettent en place notamment sur les prairies, on n'a encore que très peu d'informations sur les impacts de l'ozone à l'échelle des écosystèmes. Les premiers résultats montrent que les degrés de sensibilité peuvent être très différents d'une espèce à l'autre. C'est pourquoi, la pollution de l'air

par l'ozone peut modifier les relations de compétition entre espèces et altérer la composition des écosystèmes, affectant ainsi leur biodiversité. [HTTPS://WWW.AIRPARIF.ASSO.FR/EFFETS-SUR-LA-VEGETATION](https://www.airparif.asso.fr/effets-sur-la-vegetation), P7.

Les végétaux sont en première ligne face à la pollution atmosphérique car ils vivent fixés et constituent la base du fonctionnement des écosystèmes terrestres et aquatiques.

C'est pourquoi, cette analyse bibliographique et scientifique a été ciblée sur l'impact de l'ozone sur les végétaux.

1.1.2.1. Les effets de l'ozone sur le fonctionnement des plantes :

La plupart des espèces sont sensibles à l'ozone, mais cette sensibilité s'exprime à des degrés très différents d'une espèce à l'autre et même entre individus d'une même espèce. [HTTPS://WWW.AIRPARIF.ASSO.FR/EFFETS-SUR-LA-VEGETATION](https://www.airparif.asso.fr/effets-sur-la-vegetation).

Les espèces les plus vulnérables sont le blé, le soja, la laitue, l'oignon, la tomate, le tournesol et certaines légumineuses comme le haricot alors que le riz et la vigne sont assez peu sensibles. Les effets de l'ozone sur les espèces « sauvages » restent encore assez mal connus.

Les origines de ces différences sont multiples. Le plus souvent, elles sont liées à une plus ou moins grande aptitude à mettre en œuvre des mécanismes de détoxication.

Les impacts sur les végétaux sont de deux types :

- De manière ponctuelle **après un pic de pollution, des dégâts foliaires** se manifestent par l'apparition de taches ou de nécrose à la surface des feuilles. Cependant, l'impact sur le fonctionnement des plantes reste limité si seulement une faible proportion de la surface des feuilles est endommagée.

- Sur une **période d'exposition prolongée**, ce sont des **perturbations du métabolisme** sans dégâts apparents, mais qui conduisent à une diminution de la croissance ou de la productivité des cultures (90% des pertes de rendement liées à la pollution atmosphérique dans le monde végétal proviennent de l'ozone).

[HTTPS://WWW.ENCYCLOPEDIE-ENVIRONNEMENT.ORG/VIVANT/IMPACTS-POLLUANTS-AIR-SUR-VEGETATION](https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/impacts-polluants-air-sur-vegetation), P8.

L'ozone **perturbe l'activité photosynthétique des plantes** et **altère leur résistance**.

Les impacts varient en fonction des conditions environnementales :

L'ozone attaque les plantes par leurs stomates³. La quantité de polluant absorbée dépend à la fois de la concentration en polluant dans l'air et du degré d'ouverture des stomates, qui est contrôlé par de nombreux facteurs physiques et physiologiques (rayonnement solaire, température, humidité de l'air, état hydrique, etc.).

Les plantes absorbent moins d'ozone par temps sec que par temps humide. En effet, les stomates se referment par temps sec pour protéger la plante de la sécheresse et la protège de ce fait de l'ozone. **OZONE TROPOSPHERIQUE : ETAT DES CONNAISSANCES ET SENSIBILITE DE REDUCTIONS DES EMISSIONS DE PRECURSEURS ET DES SECTEURS D'ACTIVITES SUR LES CONCENTRATIONS D'OZONE, ATMOAURA, JUILLET 2020, P12.**

L'évolution journalière de l'ozone va aussi se répercuter sur la réponse des plantes.

Durant les **périodes de canicule**, les fortes chaleurs entraînent de très fortes concentrations en ozone dans l'air mais parallèlement une **fermeture des stomates**. Le résultat est alors un très **faible impact** de ce polluant sur la végétation durant ces périodes. C'est ce qui a été constaté au niveau des forêts durant la canicule de 2003.

Durant les périodes estivales, les concentrations d'ozone dans l'air autour des **forêts d'altitude** sont fortes avec de faibles variations jour-nuit. Comme parallèlement **la forte humidité** de l'air dans ces zones entraîne une **large ouverture des stomates**, on observe alors un **fort impact de l'ozone** présent.

Par contre, au niveau des forêts de plaine, la pollution de l'air se caractérise par des concentrations d'ozone avec cette fois de fortes variations jour-nuit. Comme parallèlement dans ces zones l'humidité de l'air est plus

³ Minuscules orifices présents au niveau des feuilles où se réalisent les échanges avec l'atmosphère.

faible, l'ouverture des stomates sera moins importante : pour ces deux raisons, on observe un plus faible impact de l'ozone. <https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/impacts-polluants-air-sur-vegetation>, p6.

Au cours de ces dernières années des programmes de recherche ont été initiés en France et en Europe pour estimer les effets de l'ozone sur le rendement des plantes cultivées. On dispose aujourd'hui de modèles d'impact très performants de l'ozone sur le fonctionnement et le rendement de certaines cultures comme le blé, la pomme de terre et sur certaines essences forestières comme le hêtre ou le chêne. En ce qui concerne les plantes sauvages, l'état des connaissances est plus limité. Même si quelques espèces paraissent aussi sensibles que les plantes cultivées (c'est notamment le cas du trèfle), il semblerait toutefois que la plupart soient assez tolérantes à l'ozone. <https://www.airparif.asso.fr/effets-sur-la-vegetation>, p3/4.

1.1.2.2. La biosurveillance de l'ozone

La biosurveillance de la qualité de l'air est un outil simple et peu coûteux, complémentaire des mesures physico-chimiques réalisées par les réseaux de surveillance. Elle ne permet pas de connaître la concentration de l'air en polluants, mais elle donne des indications sur les impacts potentiels que ces polluants atmosphériques peuvent avoir sur les végétaux. En ce qui concerne l'ozone, c'est la **méthode de bioindication** qui est utilisée avec 2 types d'approches :

- **Passive** qui consiste à **repérer des dégâts foliaires sur la végétation spontanée** (utilisation des végétaux présents). Identification d'une ou plusieurs espèces sensibles à un polluant et bien représentées sur le territoire étudié (noisetier et ozone, par exemple). Elle permet de faire une cartographie des impacts et un suivi temporel néanmoins difficile à interpréter.

- **Active** qui consiste à **mettre en place des plantes sensibles cultivées en pots** en différents points du territoire (utilisation de biostations). Cette méthode permet de réaliser une cartographie des impacts et un suivi temporel (à l'échelle de la semaine). Certains **végétaux comme Le tabac, le trèfle et les haricots** sont utilisés pour effectuer cette biosurveillance. <http://biosurveillance-air.info/>

-Les indices d'exposition à l'ozone

La relation entre la concentration en ozone de l'air et les impacts sur les êtres vivants est parfois difficile à comprendre. Les indices d'exposition ont été mis au point pour aider à traiter cette question. A partir de quelle concentration en ozone les dégâts foliaires apparaissent sur les plantes ? Pour le tabac Bel-W3 qui est utilisée pour la biosurveillance de l'ozone, on estime que c'est à partir de 30 ppb. Cependant, les **impacts observés ne dépendent pas seulement de la concentration en ozone** de l'air, mais aussi **de la durée pendant laquelle les plantes sont exposées**.

A partir des résultats de diverses études, les scientifiques européens ont fixé ce seuil à 40 ppb. C'est ainsi qu'on a défini l'**AOT40** qui est l'expression d'un seuil de concentration d'ozone dans l'air ambiant visant à protéger la végétation sur une période assez longue.

AOT 40 (exprimé en microgrammes par mètre cube et par heure) signifie la somme des concentrations horaires supérieures à 40 parties par milliard (40 ppb soit $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), durant une période donnée (mai à juillet) mesurées quotidiennement entre 8 heures et 20 heures (en moyenne sur 5 ans). Plus précisément, si la concentration horaire en ozone est de 50 ppb, on ne prendra en compte dans le cumul que les 10 ppb en excès. La valeur limite de l'AOT 40, pour la protection de la végétation est égale à $18\,000 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$.

Cet **indice d'exposition** est bien pour **évaluer les pertes de rendements** mais **imprécis pour évaluer les impacts sur les végétaux**.

-Les seuils de sensibilité à l'ozone

Les **modèles actuels** visent à **estimer l'ouverture des stomates des feuilles** et la **quantité d'ozone** entrée pendant un **temps donné**. Des approches complémentaires visent également à évaluer « **la capacité de détoxification des feuilles** », c'est-à-dire le flux d'ozone absorbé sans subir de dégâts. Leurs systèmes de défense détruisent l'ozone au fur et à mesure qu'il pénètre dans les feuilles. A partir de là, il est possible de calculer, le cumul des flux d'ozone toxiques entrés dans les feuilles et d'établir avec précision des relations doses-impacts. Plus la dose est obtenue sur un temps court plus les dégâts sont sévères.

La variété de tabac 'Bel-W3' sensible à l'ozone à de faibles capacités de détoxification. Le seuil de sensibilité du tabac "Bel-W3" se situe à une concentration comprise entre 20 et 30 ppb. Cela permet de conclure qu'il est peu probable d'observer des nécroses foliaires sur des plants de tabac exposés à des teneurs en ozone inférieures à 20 ppb (cette concentration est très basse par rapport à ce qu'on peut mesurer en été dans la plupart de nos régions). Par contre, dès que la teneur en ozone dépasse 30 ppb pendant quelques heures, l'apparition de dégâts foliaires est très probable. La présence d'autres polluants comme le dioxyde de soufre (SO₂) peuvent modifier la valeur du seuil d'apparition des nécroses.

1.2. Les émissions de COVNM précurseurs de l'ozone

1.2.1. Définitions

Cette famille de polluant regroupe une très grande diversité de composés (typiquement plusieurs centaines d'espèces). Selon la directive 1999/13/CE du Conseil européen du 11 mars 1999, est COV « tout composé organique contenant au moins l'élément carbone et un ou plusieurs des éléments suivants : hydrogène, halogènes, oxygène, soufre, phosphore, silicium ou azote, à l'exception des oxydes de carbone et des carbonates et bicarbonates inorganiques) ayant une pression de vapeur de 0,01 kPa ou plus à une température de 293,15 K.

Les COV sont principalement des hydrocarbures d'origine primaire, liés aux activités biogéniques et anthropogéniques et en proportion évidemment dépendante du milieu considéré. À l'échelle globale, environ **90 % des hydrocarbures émis dans la troposphère proviennent de sources naturelles.**

Les COV ont un temps de vie très variable, allant de quelques heures pour les espèces les plus réactives (par exemple, l'isoprène émis par la végétation) à plusieurs années (par exemple, le méthane) pour les COV les moins réactifs.

1.2.2. Les émissions de COVNM

1.2.2.1. Une part prépondérante des émissions de COV biogéniques (COVB)

Emissions COVNM	COVNM totaux	Biogéniques	Anthropiques
Rhône-Alpes en kt/an(2017)	307	218	89
	100%	71%	29%
PACA en kt/an (2016)	157	112	45
	100%	71%	29%
Isère en kt/an (2018)	38	24	13
	100%	64%	36%

Figure 1 : Répartition des émissions de COVNM

En Auvergne Rhône-Alpes, la quantité de COVNM rejetée dans l'atmosphère pour l'année 2017 est de 307 Kt. Un peu plus des **2/3 des émissions** de COVNM de la région proviennent des **sources naturelles** (COV biogéniques, dits « COVB »). En effet, Les **forêts de feuillus et de conifères rejettent des quantités significatives de COVNM lors de la photosynthèse** (estimées à 213 kt en 2017), ainsi que les prairies mais dans une moindre mesure (5 kt). La part des émissions naturelles est également prépondérante au niveau de la région PACA, même si les émissions de COVNM sont moins importantes sur cette région (157 KT en 2016) Cette répartition varie peu à l'échelle du département de l'**Isère**, où la **part des COVB** représente **65%** des émissions.

Hors émissions naturelles, les rejets de COVNM sont majoritairement issus du secteur résidentiel (63% ; sources : peintures et solvants à usage domestique) devant l'industrie (24% ; sources : traitements de surfaces, process industriels).

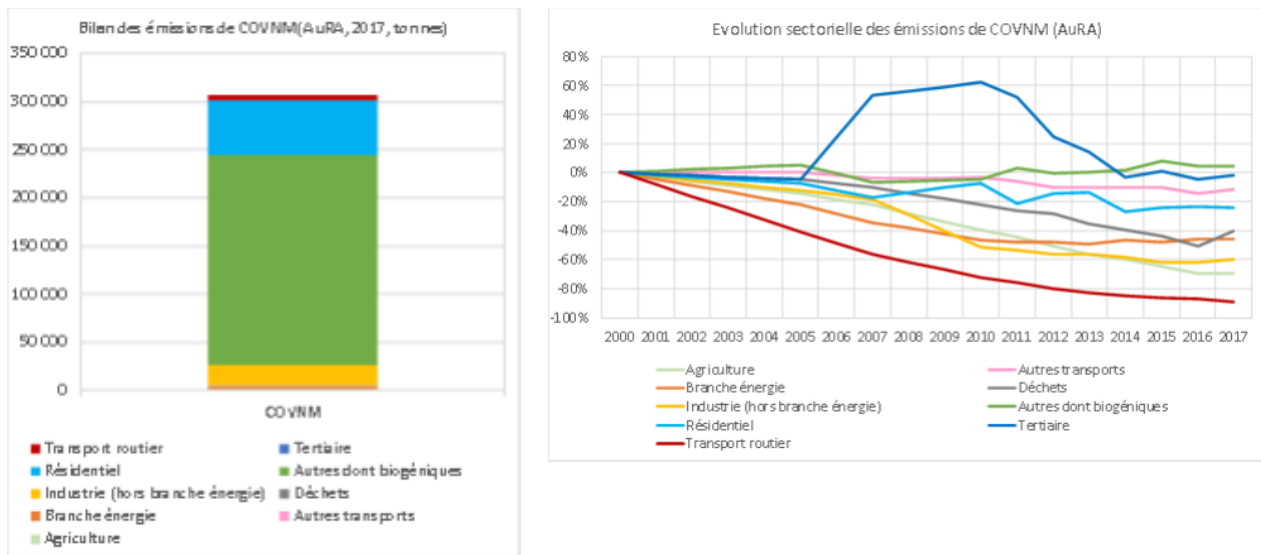


Figure 2 : Evolution des émissions de COVNM en Auvergne Rhône-Alpes

Les émissions de COVNM d'origine anthropique diminuent en moyenne de 4% par an depuis l'année 2000. Cette baisse devrait se poursuivre dans le temps, grâce notamment à la réduction des composés organiques volatils contenus dans les produits industriels mais également ménagers comme les peintures et les solvants domestiques.

Les COV biogéniques sont produits par les espèces végétales (forêts, arbustes, prairies). Leurs **émissions** dans l'atmosphère **varient** principalement **en fonction des conditions météorologiques**. Au sein d'une même région et d'une année sur l'autre, les émissions peuvent croître ou décroître en fonction du rayonnement global annuel reçu par les feuilles. **Depuis l'année 2000, les émissions de COV biogéniques sont relativement stables** dans le temps **en Auvergne-Rhône-Alpes** (évolution de l'ordre de +0,3% par an).

Tous les composés organiques volatils n'ont pas la même réactivité dans l'atmosphère ni le même « pouvoir » de formation de l'ozone. Dans le cadre du plan régional ozone mené par la DREAL des études complémentaires permettront de préciser et quantifier les composés les plus impactant et ensuite de mener des actions de réduction sur ces composés.

1.2.2.2. Paramètres qui influencent les émissions de COV biogéniques

Plusieurs paramètres influencent les émissions de COVB :

- Le **potentiel d'émissions des feuilles** (certaines espèces de chênes ou de peupliers ont des potentiels d'émissions particulièrement élevés de l'ordre de 100 µg.g-1.h-1),
- La **densité foliaire des espèces** (certaines espèces de conifères comme le sapin de douglas ou certains épicéas, ont des densités foliaires élevées de l'ordre de 10 m².m-1),
- Les conditions météorologiques et notamment le **rayonnement solaire**. Les émissions de COVB vont ainsi être **maximales** durant la **période estivale**.

Parmi les COV produits dans la nature, on peut citer **l'isoprène** comme espèce majoritairement rencontrée (environ 70% des émissions de COV biogéniques), les composés oxygénés (18%) ou encore **les monoterpènes** (environ 11%)⁴.

2. Identification et planification d'un plan de mesures des COVNM au sein des espaces naturels.

Le département de l'Isère apparaît comme un territoire d'expérimentation intéressant, de par sa composition de milieux divers et variés (villes, plaines, montagnes, forestiers...) et du fait que c'est un territoire les plus concernés par le dépassement des seuils d'ozone recommandés.

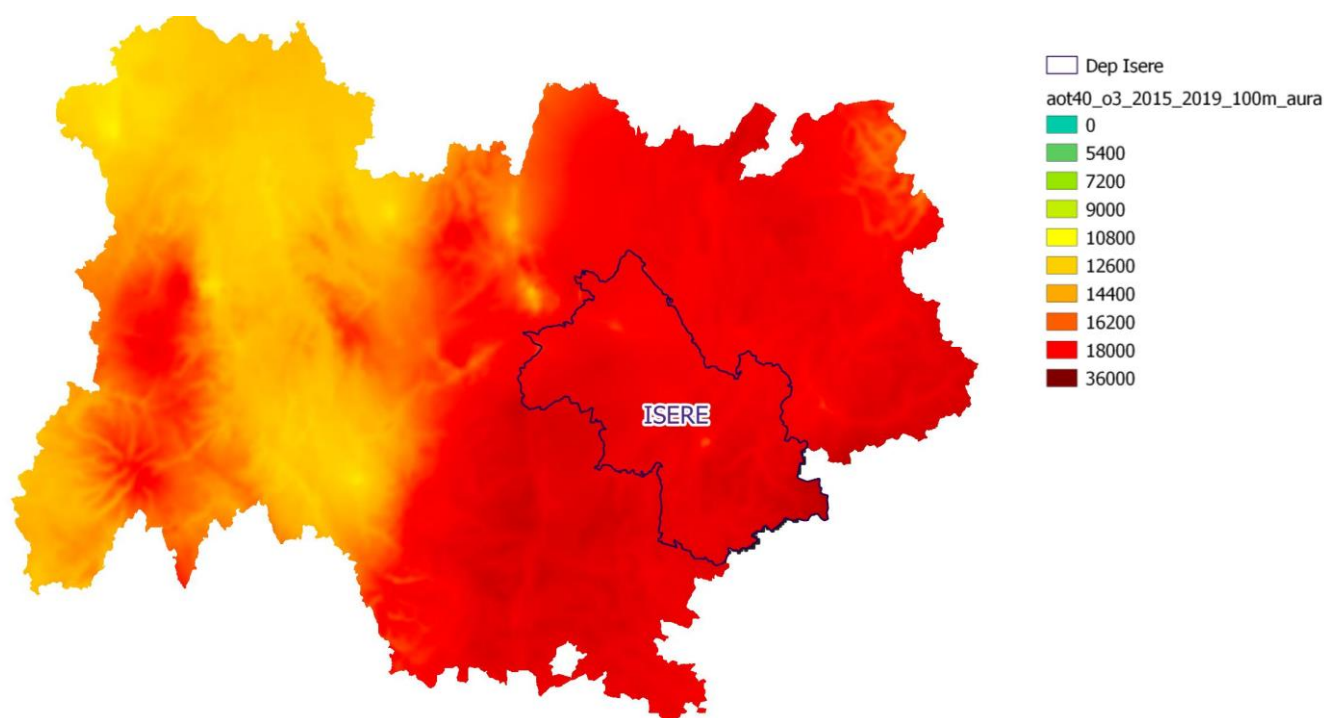


Figure 3 : Concentrations d'ozone (AOT40 2015-2019) au niveau de la région Auvergne Rhône-Alpes

Cette étude a pour principal objectif d'évaluer les impacts de l'ozone sur la végétation et la flore au niveau des espaces naturels et notamment les espaces naturels sensibles (ENS). Comme il a été évoqué précédemment, les émissions biogéniques de COVNM sont prépondérantes au niveau de la région et du département de l'Isère, notamment dans des territoires boisés comme le Parc naturel Régional du Vercors. Par conséquent, il nous a semblé pertinent de réaliser en parallèle, des mesures de COVNM afin d'améliorer les connaissances sur les composés mesurés au niveau de ces territoires lors de périodes de pollution à l'ozone. Ces mesures constitueront un complément important pour la validation des modèles et pour la connaissance de la variation spatiale des niveaux de pollution.

⁴ Source : émissions régionales de l'Auvergne en 2012 (méthode ICARE version 3.2 (2017), couvert forestier : BD Forêt v2 ® de l'IGN).

Ce chapitre présente les paramètres qui ont été pris en compte pour identifier les zones potentiellement pertinentes pour réaliser ces mesures, avant qu'un plan d'échantillonnage plus précis soit définis avec les acteurs locaux.

2.1. Méthodologie

2.1.1. Identification des zones d'études à partir d'analyses cartographiques

Le département de l'Isère comporte un réseau important d'espaces naturels sensibles (17 ENS départementaux et 124 ENS locaux) et de réserves naturelles pour protéger la biodiversité. La carte ci-dessous présente le contour des espaces naturels sensibles d'observation⁵ locaux et départementaux, les réserves naturelles régionales et nationales et les parcs naturels régionaux et nationaux.

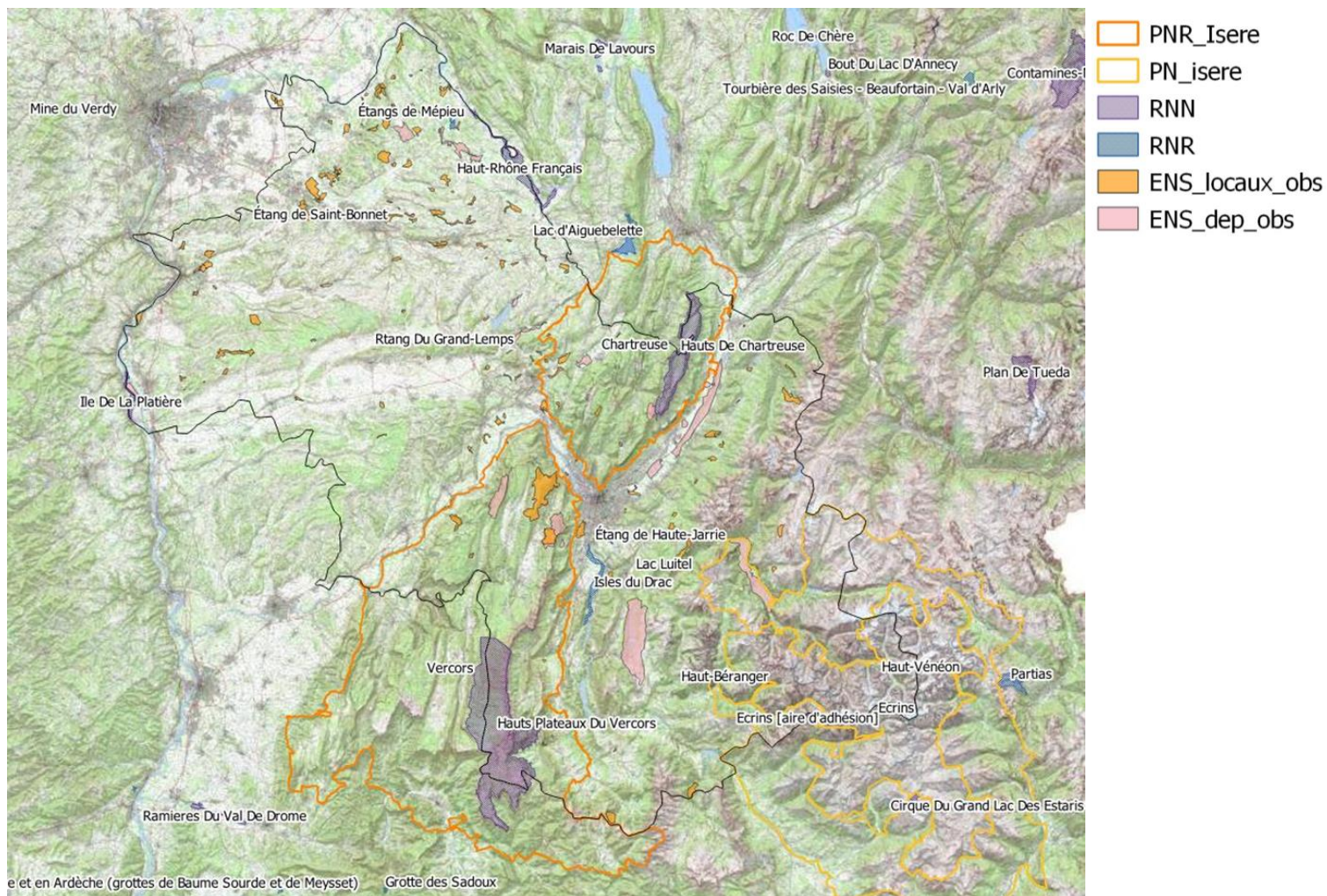


Figure 4 : Carte des espaces et parcs naturels en Isère

L'identification des zones d'études potentiellement pertinentes a été réalisée à partir du croisement de la carte des espaces naturels protégés et de la carte du cadastre des émissions de COVNM du département. Cette analyse permet d'estimer la part des émissions de COVNM biogéniques et anthropiques sur chaque espace naturel.

⁵ La zone d'observation est l'espace de veille écologique. Cet espace peut être supérieur ou égal à la zone d'intervention.

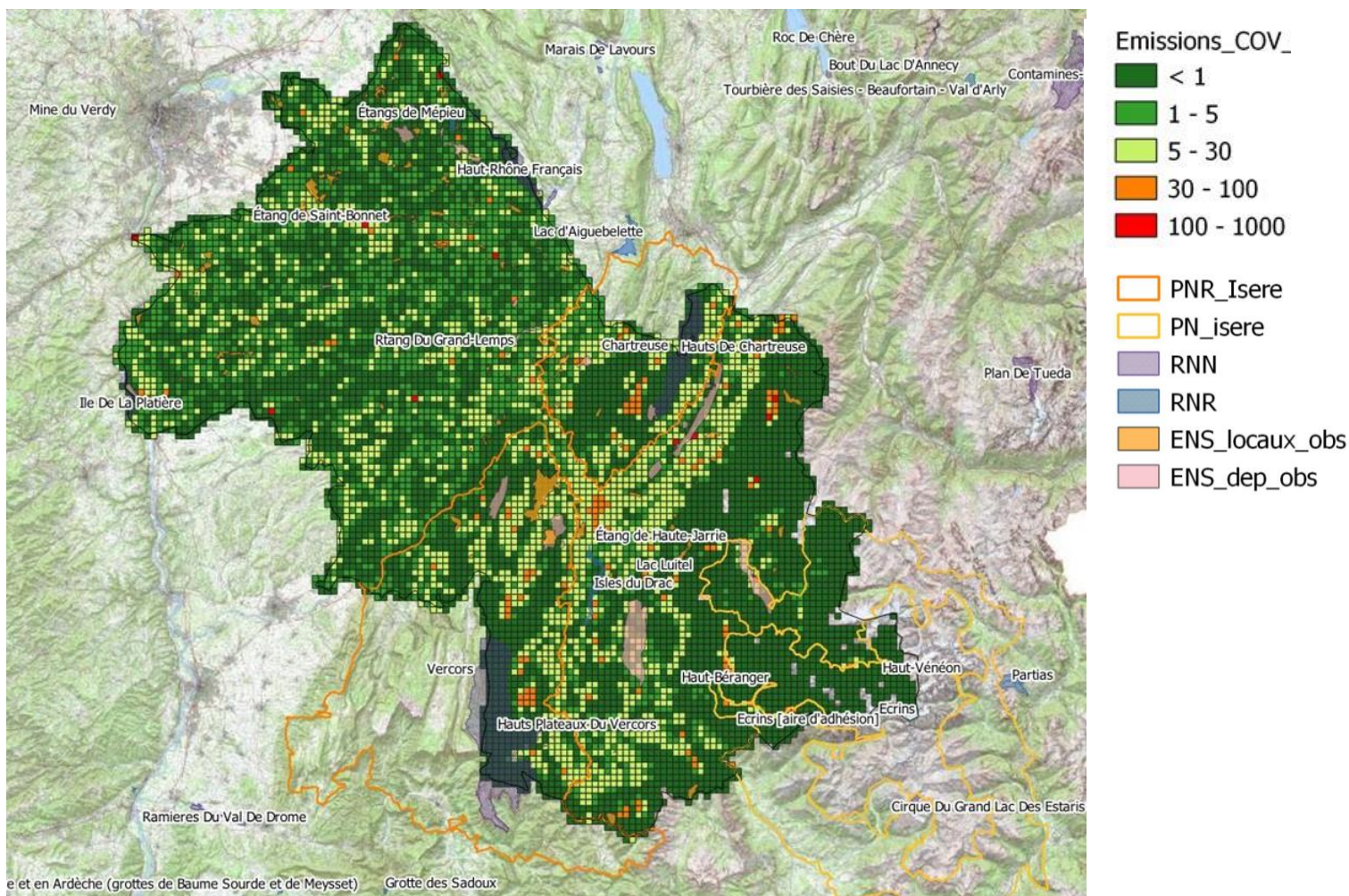


Figure 5 : Les émissions de COVNM au niveau des espaces naturels en Isère (en tonne/an)

Les émissions de COVNM anthropiques en Isère se concentrent principalement au niveau de l'agglomération grenobloise et dans des zones où sont implantées les industries chimiques. Les émissions biogéniques de COVNM sont prépondérantes en milieu rural et notamment sur des territoires boisés, au niveau des prairies et des marais.

Espaces naturels sensible locaux	COV biogénique	COV anthropique	COV totaux
Plateau de la Molière et du Sornin	127	7	134
Pelouses et coteaux secs des Adrets	55	6	61
Coteaux de Saint-Roch	52	10	63
Marais de Berland	45	2	47
Etang de Bas	42	4	46
Marais des Sagnes	39	2	41
Marais du Serre du Peyraret	37	1	38
Col des Mouilles	36	3	38
tourbière du Poutaz	35	4	39
Marais des Bruns	34	3	37
Marais de Sailles	33	9	42

Figure 6 : Répartition des émissions de COV (biogénique /anthropique) au sein des espaces naturels sensibles (en tonne)

Réserves naturelles régionales	COVbiog.	COVanth.	COV totaux
Isles du Drac	81	162	243
Étang de Haute-Jarrie	10	3	13
Étang de Saint-Bonnet	0	60	60
Étangs de Mépieu	0	5	5

Figure 7 : répartition des émissions de COVNM (biogénique/anthropique) au sein des réserves naturelles régionales

Suite à cette analyse **2 zones d'intérêt** ont été **ciblées** en accord avec le conseil général de l'Isère : **L'espace naturel sensible du plateau de la Molière et du Sornin** et la **réserve naturelle régionale des Isles du Drac**. La première, car la part de COV biogéniques est plus beaucoup plus importante sur cette zone que sur les autres ENS locaux du département. La seconde, car la part des émissions de COVNM est prépondérante sur cette zone par rapport aux autres réserves naturelles du département et car la part des émissions de COV anthropiques sur cette zone naturelle, située dans la vallée, est importante. Ces deux zones sont également assez accessibles et proches de l'agglomération.

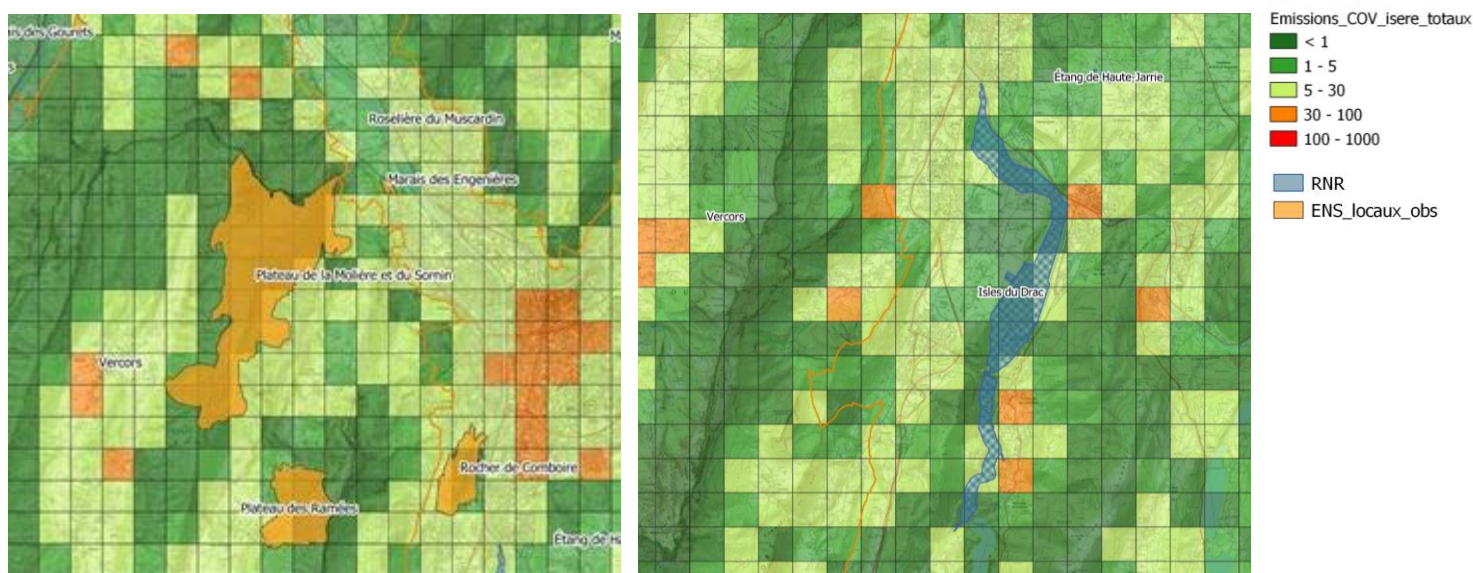


Figure 8 : Zoom sur les émissions de COVNM au sein de 2 espaces naturels

Une deuxième analyse cartographique a été réalisée à partir du croisement de la carte des espaces naturels protégés et de la carte d'occupation des sols de corin land cover de l'année 2012 afin de calculer la part de chaque type de végétation sur ces zones et notamment sur les zones d'étude. L'ENS du plateau de la Molière et du Sornin se compose majoritairement de forêt de feuillus et de conifères, de pelouse et prairie. D'où l'importance des émissions biogéniques.

2.1.2. Définition d'un plan d'échantillonnage de mesures avec les acteurs locaux et biosurveillance

Avant de définir un plan d'échantillonnage de mesures de COVNM au sein des deux zones ciblées précédemment, il a été décidé de réaliser en accord avec le conseil général, une étude de faisabilité sur deux sites de mesures durant l'été 2021. En parallèle, une note a été transmis aux acteurs locaux afin de les aider à identifier l'impact de l'ozone sur la végétation sur leurs territoires.

3. Préfiguration d'une campagne de mesures été 2021

3.1. Méthodologie

3.1.1. Dispositif de prélèvement et d'analyse

-L'ozone :

Il existe sur le marché un certain nombre de capteurs permettant la mesure des polluants atmosphériques. Les améliorations techniques sur les capteurs (miniaturisation, connectivité...) sont rapides et nombreuses. Aussi il est important pour les AASQA d'avoir la connaissance de la pertinence des capteurs en termes de qualité de la mesure, polluant par polluant. Un challenge mené entre les constructeurs et les AASQA est mené et permet d'avoir une référence nationale partagée : c'est le challenge AIRLAB.

Les résultats de ce challenge (https://www.airparif.asso.fr/sites/default/files/pdf/brochure2021_fr.pdf) qui peuvent être satisfaisant pour les poussières et le NO2 en site fixe montrent des résultats trop incertains pour l'ozone pour le moment. De plus les coûts sont très élevés par rapport à l'incertitude de la mesure avec des capteurs de 5000 à 10000€. Le parc d'analyseur ozone d'ATMO pourrait être mobilisé puisqu'une dizaine d'appareils sont mobilisables à l'échelle de la région.

-Les COV :

Les mesures des concentrations de COV dans l'air sont réalisées grâce à des prélèvements atmosphériques. Il existe plusieurs méthodes de prélèvement des COV dans l'air (**cf. annexe1**) :

-Prélèvement en continu à partir d'analyseur de type Perkin.

-Prélèvement à diffusion passive à l'aide de tube passif. Les temps d'exposition possible vont de 8 heures à 30 jours avec une durée optimale de 7 jours. Les outils métrologiques les plus performants permettent à l'heure actuelle de rechercher une quarantaine de COV différents. Cette méthode peu onéreuse permet de multiplier les points de mesure et d'obtenir une information spatiale, néanmoins cette méthode donne des concentrations moyennes sur une semaine plutôt que des données horaires.

-Prélèvement actif par canister. Ce type de prélèvement présente l'avantage de pouvoir analyser un grand nombre de polluants simultanément sur une journée de 24h ou bien sur quelques heures. Cette méthode moins onéreuse que les mesures par analyseur en continu présente l'avantage de pouvoir multiplier les points de mesures et d'approcher finement la répartition spatiale et temporelle des concentrations de nombreux COV.

Par conséquent, c'est cette méthode de prélèvement par canister qui a été retenue pour réaliser les mesures. La méthode d'analyse des prélèvements par canister d'apparence simple, présente toutefois des limites. En effet il existe une limite de quantification, valeur en dessous de laquelle une quantification des concentrations n'est pas possible, bien que le composé en question puisse être néanmoins présent dans l'échantillon. Cette limite est différente d'une molécule à une autre.

Les composés analysés :

La mesure de l'ensemble des COV susceptibles d'être présent dans l'air n'est pas envisageable en raison de leur grand nombre et des coûts d'analyses que cela induirait. Par conséquent, **une liste de 47 composés** analysés à partir des prélèvements par canister a été définie par le laboratoire d'analyse d'Atmo Auvergne selon les critères suivants :

- Potentiel de formation d'ozone élevé : les 31 COV précurseurs de l'ozone cités dans la directive européenne (Directive 2008/50/CE,2008) dont l'isoprène.
- Potentiel de nocivité pour l'homme : une dizaine de composés chlorés et toxiques.
- Autres composés analysables par chromat.

3.1.2. Choix des sites de mesure

Le choix des sites de mesure vise à répondre aux objectifs suivants :

- **Evaluer les niveaux de COV** mesurés sur un **site de fond** avec des **prélèvement par canister** sur un **pas de temps court**.
- **Comparer les mesures** de COV réalisées par **canister** avec des **mesures en continu (perkin)**
- Etudier la **variation temporelle des COV**.

Les préleveurs canister ont été **implantés sur deux stations fixes de référence**. Le premier à la station de **Grenoble périurbain sud**, situé sur la commune de vif au sud de l'agglomération grenobloise correspondant à un environnement de « **fond périurbain** » et le **second à Feyzin** stade, au sein de la plateforme pétrochimique à proximité directe d'un **environnement industriel** où une surveillance de 31 COV en continue à partir d'analyseur de type perkin est déjà réalisée. Les mesures ont été comparées également à la station de fond de Grenoble les Frênes où une surveillance de 45 COV à partir de canister est réalisée depuis 2008.

Les prélèvements ont été effectués par **pas de 2 heures**, de **6h à 22h** sur **le site de Grenoble** avec 2 rampes de 4 canisters et de **10h à 18h** sur **le site de Lyon** avec une rampe de 4 canisters.

Les mesures ont été réalisées le **22 juillet** et le **12 août 2021**, deux jours où les conditions météorologiques (ensoleillement et fortes chaleurs) étaient propices à la formation de l'ozone.

3.1.3. Niveaux d'ozone et données météorologiques

Les graphiques suivants représentent l'évolution des niveaux d'ozone mesurés lors des deux journées de prélèvement le 22/07 et le 12/08/21 sur les sites de fond urbain et périurbain de Grenoble et les profils des températures et du rayonnement solaire observés sur ces deux journées.

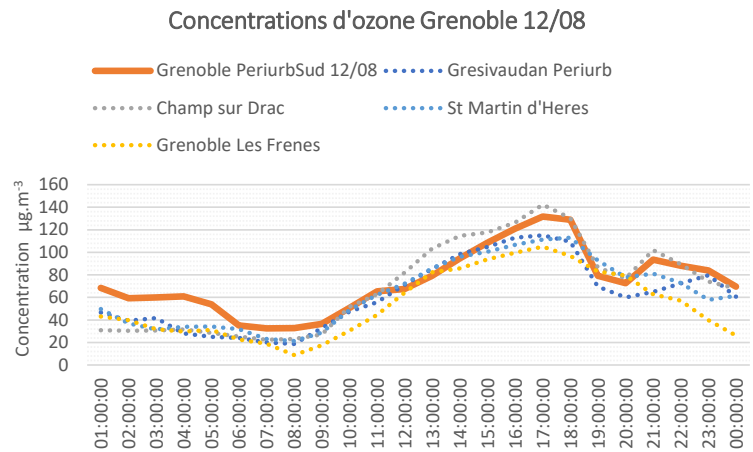
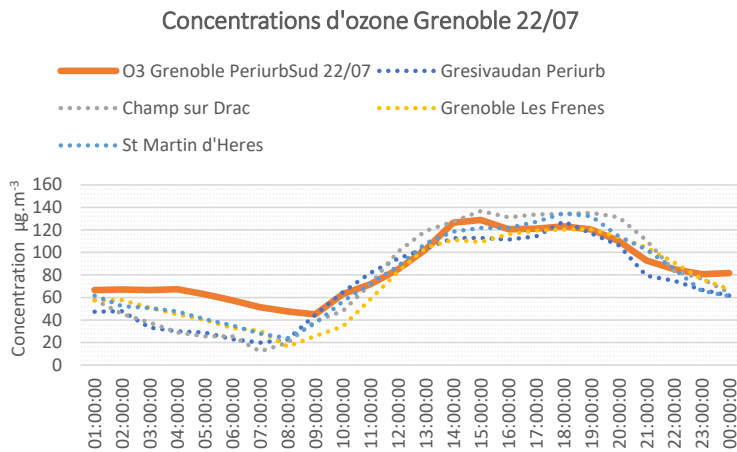


Figure 9 : Niveaux d'ozone mesurés sur l'agglomération grenobloise les jours de prélèvements

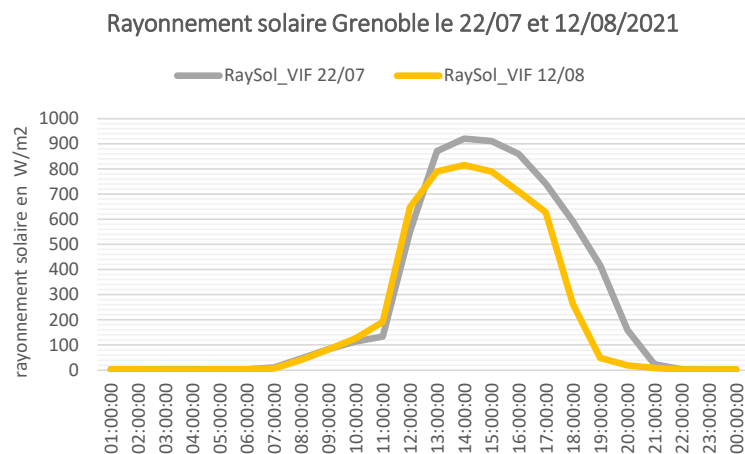
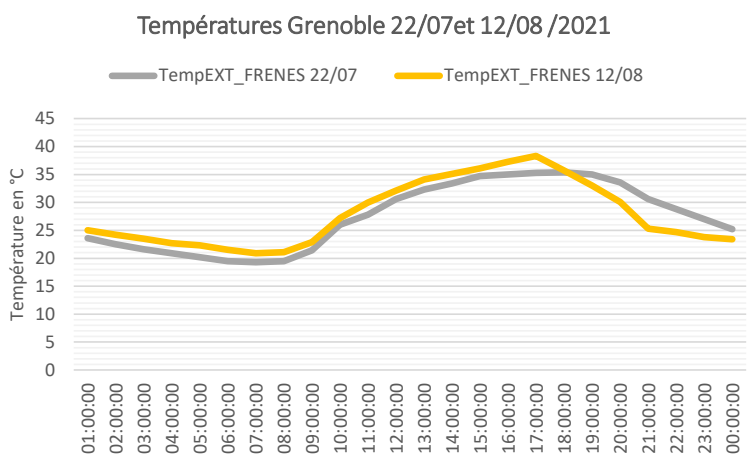


Figure 10 : Rayonnement solaire et températures mesurés les jours de prélèvement

Les concentrations d'ozone mesurées au niveau de l'agglomération grenobloise, sur la journée du 12/07 sont en moyenne plus élevées que celles mesurées le 12/08. Néanmoins, la valeur maximale a été observée le 12/08 sur le site de Champ sur Drac ($142 \mu\text{g.m}^{-3}$ à 17h contre $137 \mu\text{g.m}^{-3}$ le 22/07 à 15h). Les températures ont été globalement plus élevées le 12/08, mais elles ont diminué plus rapidement dans la soirée et le rayonnement solaire a été moins important durant cette journée.

Du 11 au 15 août 2021, la région Auvergne-Rhône-Alpes et plus largement un grand quart sud-est du pays a subi un épisode de canicule. Ces conditions météorologiques ont été propices à la formation d'ozone et à l'élévation progressive des concentrations. Cependant, compte tenu de la période, avec certainement un effet des congés et une activité amoindrie, les concentrations n'ont pas dépassés le seuil d'information et de recommandation de $180 \mu\text{g.m}^{-3}$.

3.2. Présentation des résultats de mesure

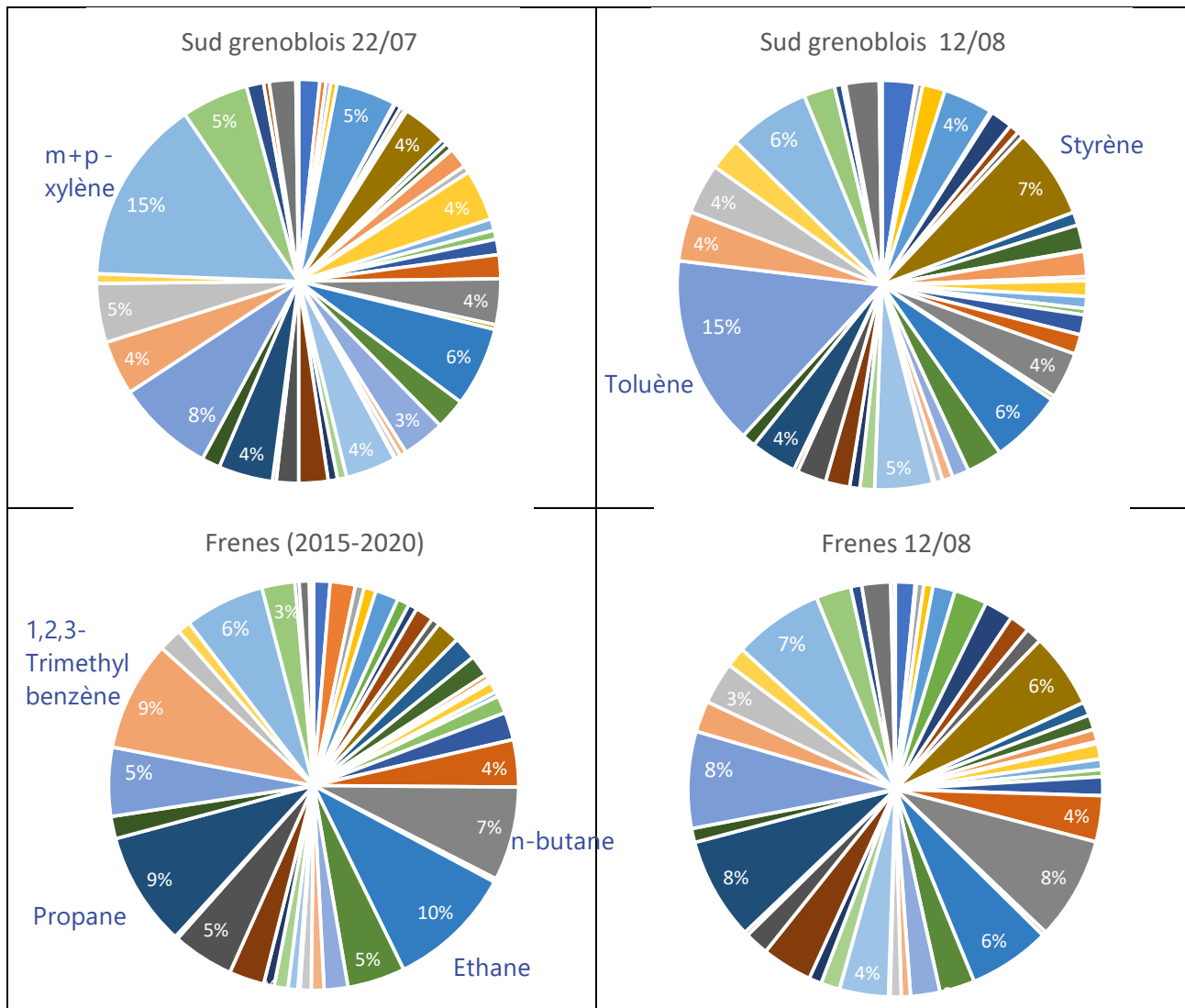
3.2.1. Les substances majoritaires

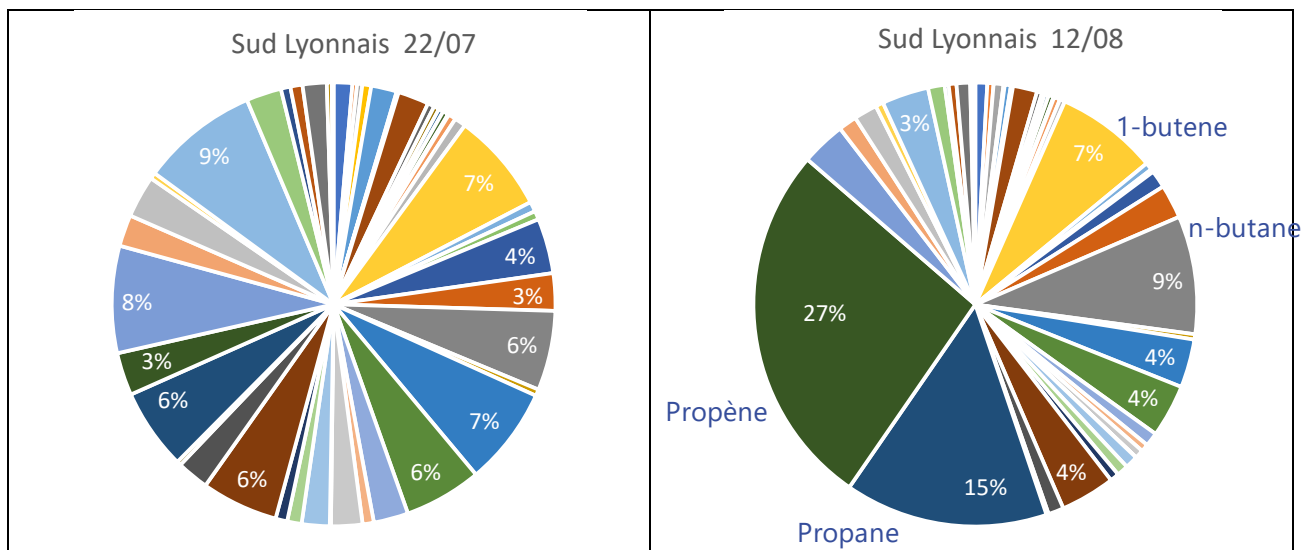
Au total les 24 prélèvements initialement prévus sont disponibles, aucun problème technique n'est survenu sur les appareils lors des prélèvements. Les résultats sont pour tous les prélèvements réalisés supérieurs à la limite de détection de la chaîne d'analyse.

Une première analyse vise à étudier les profils de concentration des sites de mesures afin d'identifier les composés de COVNM majoritaires et d'observer la relation entre la proportion des différents COVNM et les types ou la localisation géographique des sites de mesure.

Les graphiques précédents représentent la proportion moyenne de chaque COVNM mesuré pour les sites de mesure :

- en milieu périurbain à Grenoble périurbain sud le 22/07 et le 12/08 de 6h à 22h ;
- en proximité industrielle à Feyzin stade le 22/07 et le 12/08 de 10h à 18h ;
- en milieu urbain à Grenoble les Frênes le 12/08 et en moyenne sur 5 ans (2015-2020/prélèvement sur 24h)





- | | | | |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| ■ 1,1,1-trichloroethane | ■ tetrachloromethane | ■ trichloroethene | ■ tetrachloroethene |
| ■ 1,1,2-trichloroethane | ■ 1,1-dichloroethane | ■ 1,2-dichloroethylene | ■ 1,2-dichloroethane |
| ■ cyclohexane | ■ styrene | ■ 1,4-dichlorobenzene | ■ chlorobenzene |
| ■ 1,1-dichloroethylene | ■ limonène | ■ 1,3-butadiene | ■ 1-butene |
| ■ trans-2-butene | ■ acetylene | ■ C6H6 | ■ isobutane |
| ■ n-butane | ■ cis-2-butene | ■ ethane | ■ ethene |
| ■ ethylbenzene | ■ n-heptane | ■ n-hexane | ■ 1-hexene |
| ■ isoprene | ■ isooctane | ■ n-octane | ■ isopentane |
| ■ n-pentane | ■ 1-pentene | ■ propane | ■ propene |
| ■ toluène | ■ 1,2,3-trimethylbenzene | ■ 1,2,4-trimethylbenzene | ■ 1,3,5-trimethylbenzene |
| ■ m+p-xylene | ■ o-Xylene | ■ cumene | ■ i-hexane |
| ■ 3-ethyltoluene | ■ trans-2-pentene | ■ cis-2-pentene | |

Figure 11 : Profil des concentrations de COVNM

En milieu périurbain dans le sud grenoblois, les composés majoritaires sont le toluène, le m + p xylène et l'éthane. Il faut souligner toutefois, une différence de proportion des concentrations moyennes pour ces 3 composés entre le prélèvement du 22/07 et du 12/08. Le profil des concentrations de COVNM du 12/08 sur ce site se rapproche de celui du site urbain de Grenoble les Frênes, néanmoins, les proportions de n butane et de propane sont plus importantes sur ce dernier et celle de toluène moins importante. On observe également un écart de proportion de **styrène** et de **1,2,3 triméthylbenzène** entre le prélèvement du 12/08 et le profil sur 5 ans de Grenoble les Frênes. **En proximité industrielle dans le sud Lyonnais, les composés majoritaires sont le propène, le propane et le n-butane** sur le prélèvement du 12 août alors que ces proportions varient fortement notamment pour propène et le propane lors du prélèvement du 22 juillet.

Des composés majoritaires ont pu être identifiés sur les trois sites à partir de ces profils, cependant leur proportion est variable d'un prélèvement à l'autre. Il est difficile d'établir un profil des concentration moyennes de COVNM en fonction de leur typologie ou de la localisation géographique avec seulement deux prélèvements.

Une deuxième analyse vise à étudier à partir **de diagramme de Pareto** le poids relatif de chaque composé par rapport à la somme totale des COV mesurés.

La « loi de Pareto » énonce le principe suivant : « dans tout groupe de choses contribuant à un effet commun, la majeure partie de l'effet est attribuable à un nombre relativement faible de ces choses ». Cette loi, aussi connue sous le nom de « loi des 80/20 », est souvent utilisée dans les prises de décisions car elle permet d'agir sur 20 % de causes qui produisent 80 % des effets.

Les résultats sont illustrés à l'aide de diagrammes de Pareto qui présentent, sur chaque site de mesure, l'histogramme des concentrations classées selon les valeurs décroissantes (sur l'échelle de gauche), avec la courbe des valeurs cumulées en pourcentage relatif à la somme totale des COV (sur l'échelle de droite).

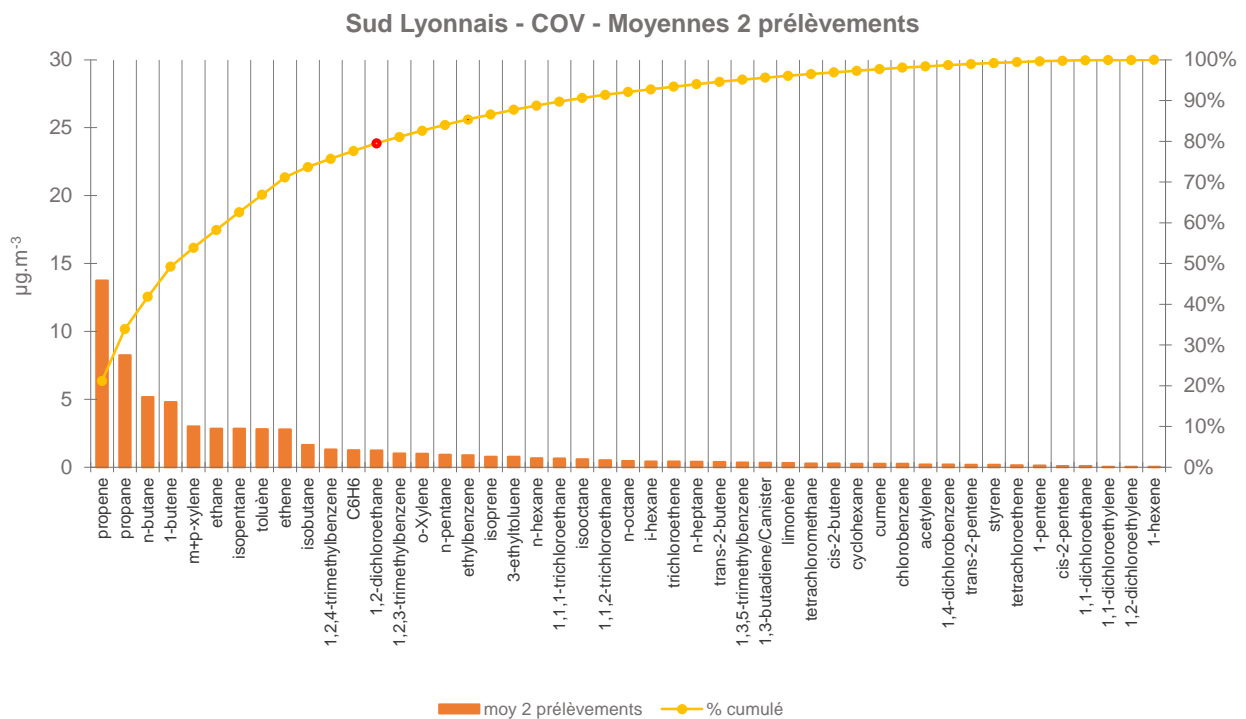
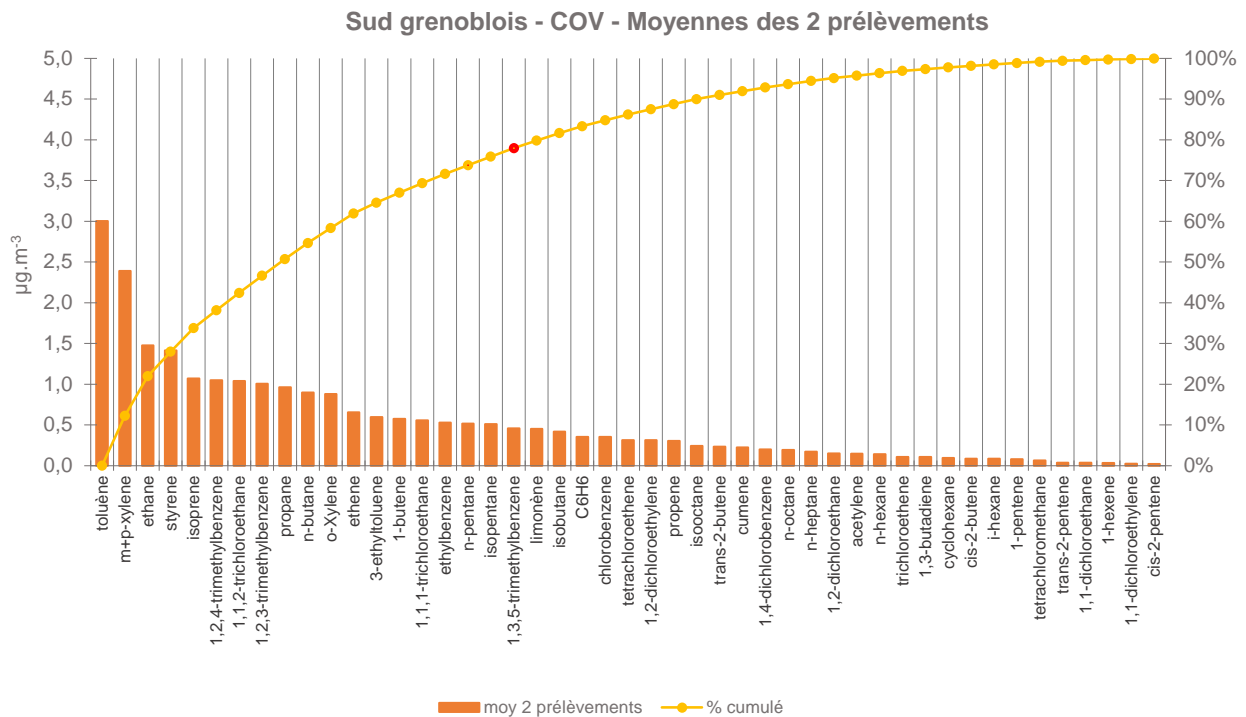


Figure 12 : Concentrations et poids relatif de chaque composé par rapport à la somme totale des COV mesurés sur les sites d'étude

Au niveau du sud grenoblois, trois groupes homogènes se dégagent et représentent à eux trois, une vingtaine de composés et 80% de la concentration total des COV. Le premier groupe dont les concentrations moyennes sont supérieures à $1\mu\text{g.m}^{-3}$, compte **3 composés lourds** de la famille des **aromatiques** : **le toluène, le m+p xylène et le styrène** et **un composé léger** de la famille des **alcane**s : **l'éthane**. Le deuxième groupe dont les valeurs sont proches de $1\mu\text{g.m}^{-3}$ est constitué de 7 composés dont **l'isoprène**. Les autres composés ont des valeurs plus faibles inférieures à $1\mu\text{g.m}^{-3}$.

Au niveau du sud lyonnais, les composés en tête : **propène, propane, n-butane, 1-butène** sont des composés **légers** de la famille des **alcane**. Les concentrations moyennes de **ces 4 composés représentent 50% de la concentration totale des COV**.

Un deuxième groupe dont les concentrations sont un peu plus faibles (< à 5µg.m⁻³) contient majoritairement des composés légers de la famille des alcanes (éthane, isopentane) et alcène (éthène) et 2 composés lourds de la famille des aromatiques (m+p- xylène et toluène).

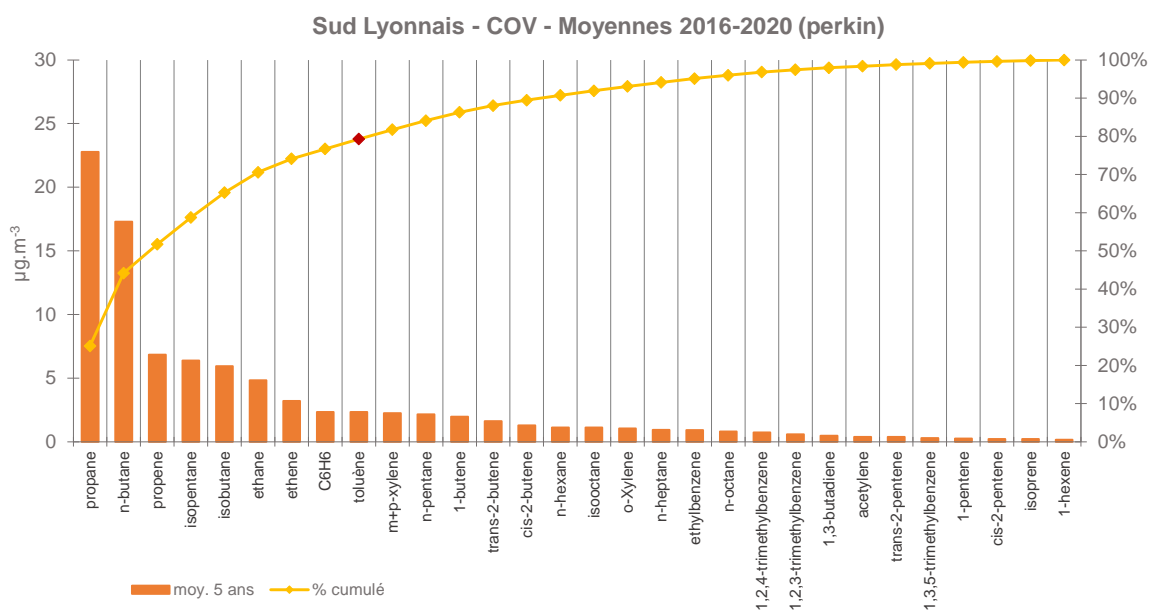
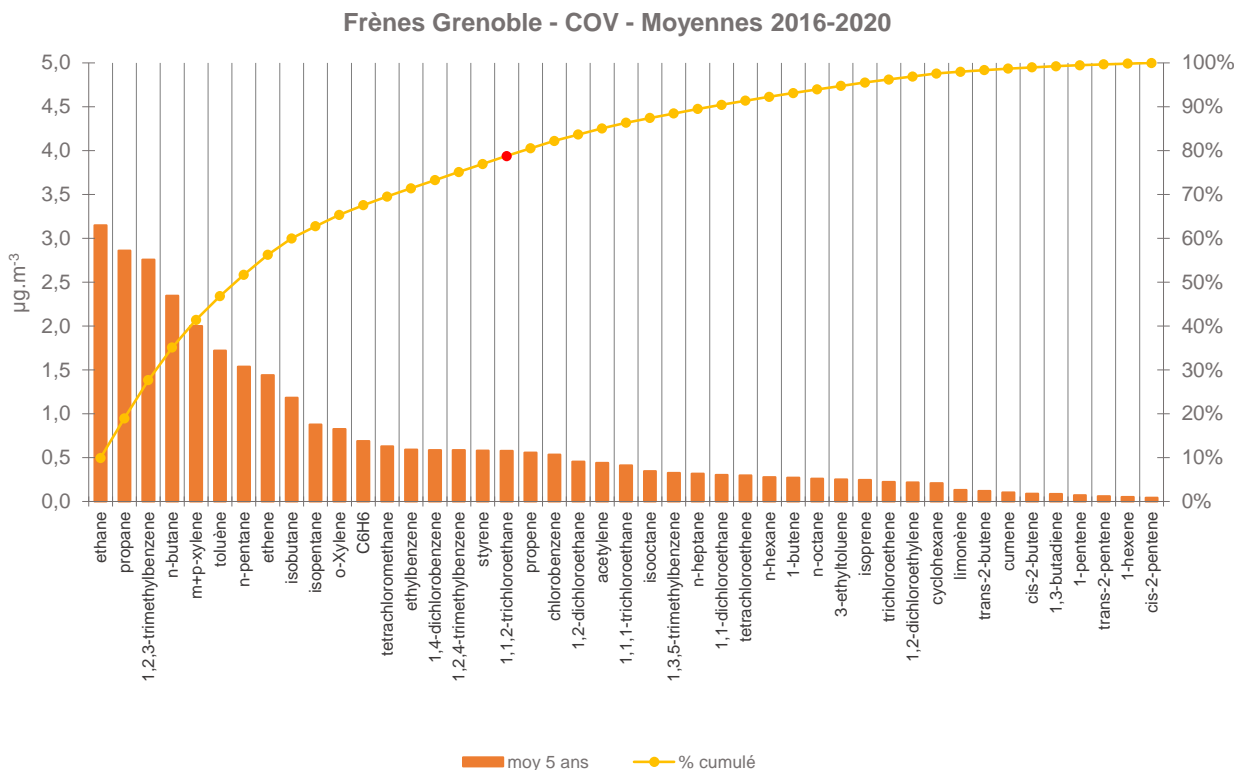


Figure 13 : Concentrations et poids relatif de chaque composé par rapport à la somme totale des COV mesurés en moyenne sur 5ans sur la station fixe de référence de Grenoble les Frères et de Feyzin.

Sur le site de fond de Grenoble les Frênes, les composés en tête : **éthane, propane, n-butane** sont des composés **légers** de la famille des **alcane**s et le 1,2,3- triméthylbenzène est un composé lourd de la famille des aromatiques.

Sur le site de proximité industrielle, les composés en tête : **propane, n-butane, isopentane et isobutane** sont des composés **légers** de la famille des **alcane**s et le **propène** de la famille des **alcène**s.

Ces données peuvent être utilisées notamment pour savoir sur quels composés il serait préférable d'agir en priorité pour réduire les concentrations de COV dans l'air ambiant.

A noter que cet exercice est pratiqué sur la concentration des composés et que le même type de raisonnement pourrait être tenu en tenant compte du potentiel global de création d'ozone de chaque composés (PCOP)⁶.

En effet, on observe des composés qui ont un **fort potentiel de création d'ozone photochimique** parmi les composés majoritaires mesurées sur les sites d'étude comme le **m+p-xylène (106) et l'isoprène (109) à Grenoble** et le **propène (112) et le 1-butène (108) à Lyon**.

3.2.2. Les niveaux observés

Les valeurs des résultats des prélèvements sont présentées en annexe 2.

Afin de faciliter la lecture des graphiques, seuls les 31 composés précurseurs de l'ozone ont été représentés ainsi que trois autres substances (styrène, 1-2-dichloroéthane, 1,1,2- trichloroéthane) qui figurent parmi les composés majoritaires mesurées sur les sites d'étude à Grenoble ou à Lyon.

Le graphique suivant compare les concentrations moyennes des prélèvements de COVNM mesurées sur les sites d'études avec les concentrations moyennes annuelles mesurées de 2016 à 2020, sur le site fixe de Grenoble les Frênes (prélèvement 24h).

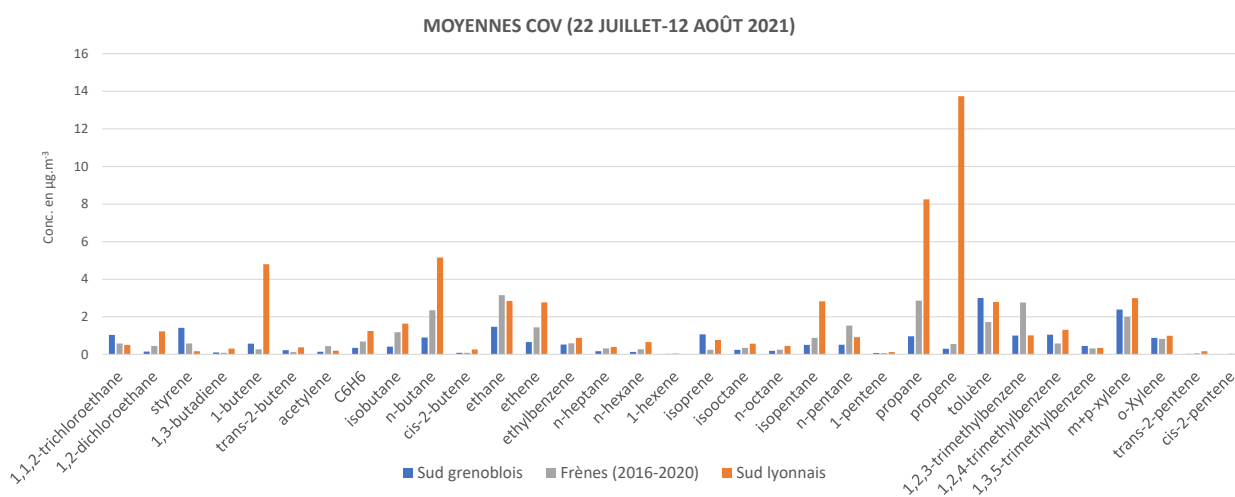


Figure 14 : Niveaux moyens de COVNM mesurés sur les sites d'étude et sur le site de référence de Grenoble les Frênes (moyenne sur 5 ans)

La figure suivante compare les valeurs maximales mesurées sur un pas de temps de 2 heures lors des prélèvements sur les 2 sites d'études.

⁶ Potentiel de création d'ozone photochimique.

MAX HORAIRE COV (22 JUILLET-12 AOÛT 2021)

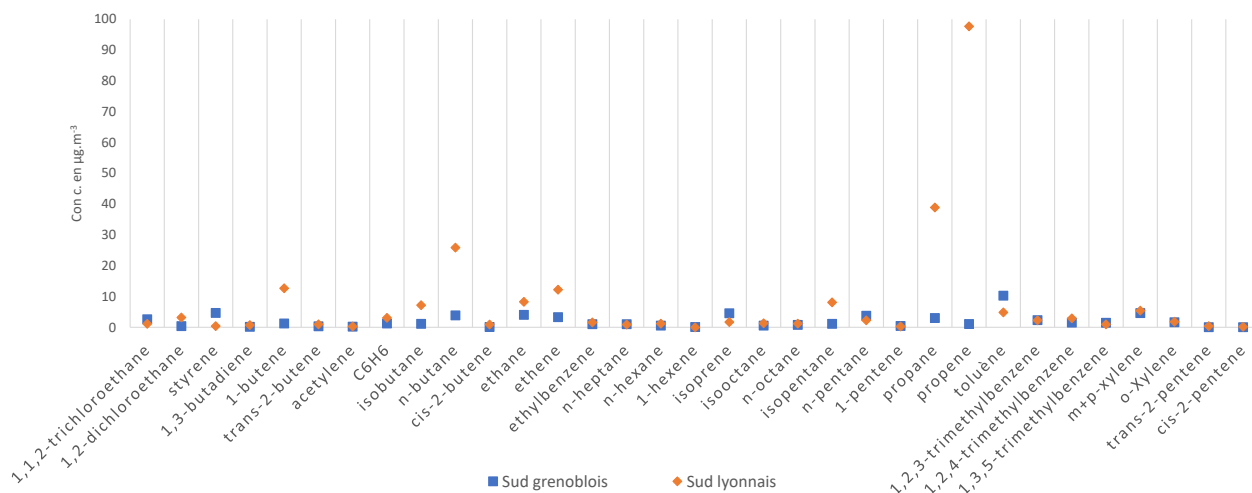


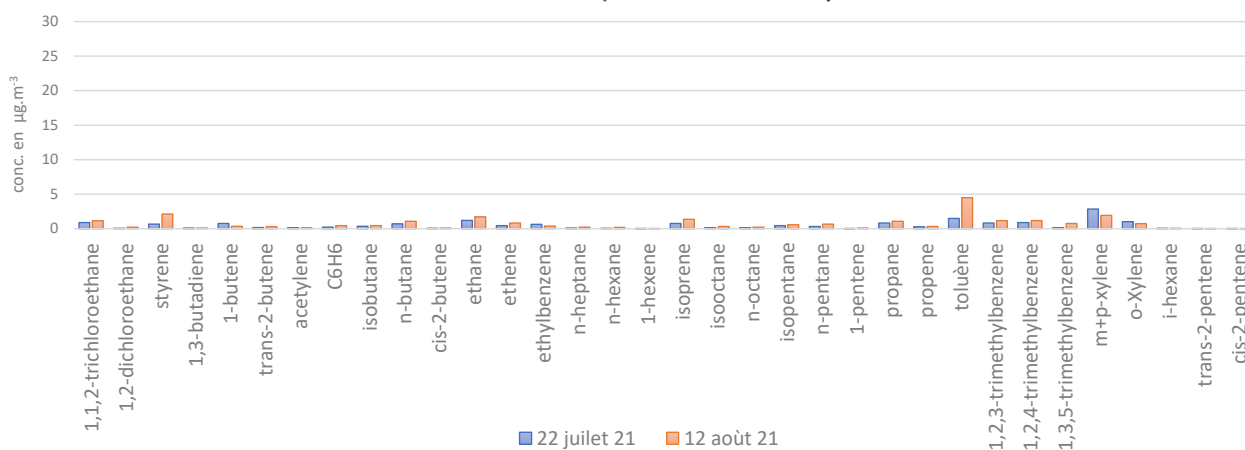
Figure 15 : Niveaux maximum de COVNM mesurés sur les sites d'étude lors des prélèvements

Les concentrations moyennes de COVNM mesurées sur le site du sud Grenoblois sont faibles, majoritairement inférieures à $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. En effet, ces dernières sont pour la plupart des composés comparables aux niveaux de la station urbaine de fond de Grenoble les Frênes. La valeur maximale observée est de $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pour le toluène.

Les concentrations moyennes de COVNM sur le site du sud Lyonnais sont nettement supérieures aux autres sites. La valeur maximale observée est de $98 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pour le propène. Ces plus fortes concentrations s'expliquent notamment par la présence de la raffinerie et des autres industries du secteur. Il faut souligner que **les niveaux maximums d'isoprène ($4,6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)** ont été mesurés sur la station du **sud grenoblois** sur le prélèvement du **12 août entre 18h et 20h**.

Les graphiques suivants comparent les concentrations moyennes de COVNM mesurées lors des deux jours de prélèvements sur chaque site.

SUD GRENOBLOIS (PÉRIURBAINE FOND)



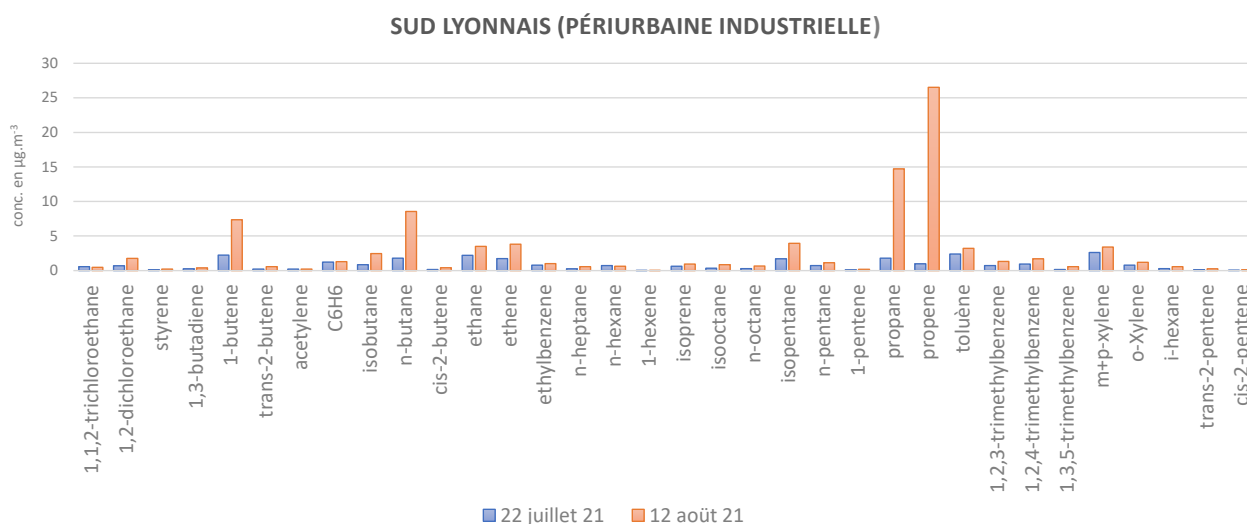


Figure 16 : Comparaison des concentrations moyennes de COVNM mesurées lors des 2 jours de prélèvements

Les niveaux moyens de COV mesurés sur le site du sud lyonnais, à proximité d'industries, sont pour la plupart des composés nettement supérieurs à ceux observés sur le site de fond périurbain de Grenoble. Les prélèvements effectués le 12 août présentent des niveaux moyens plus élevés que ceux du 22 juillet, à l'exception de 4 composés (m+p-xylène, oxylène, 1-butène et éthylbenzène) sur le site de Grenoble, où les concentrations sont plus importantes sur le prélèvement de juillet.

3.2.3. Comparaison des mesures canisters et perkin

Afin de comparer les prélèvements réalisés sur le site de Feyzin sur un pas de temps de 2 heures, avec les mesures en continu, ces dernières ont été moyennées sur le même pas de temps. Une liste de 30 composés mesurés en continue avec le Perkin ont pu être comparés.

Le graphique suivant compare les concentrations moyennes des prélèvements mesurés sur le site de Feyzin stade avec le canister et le perkin.

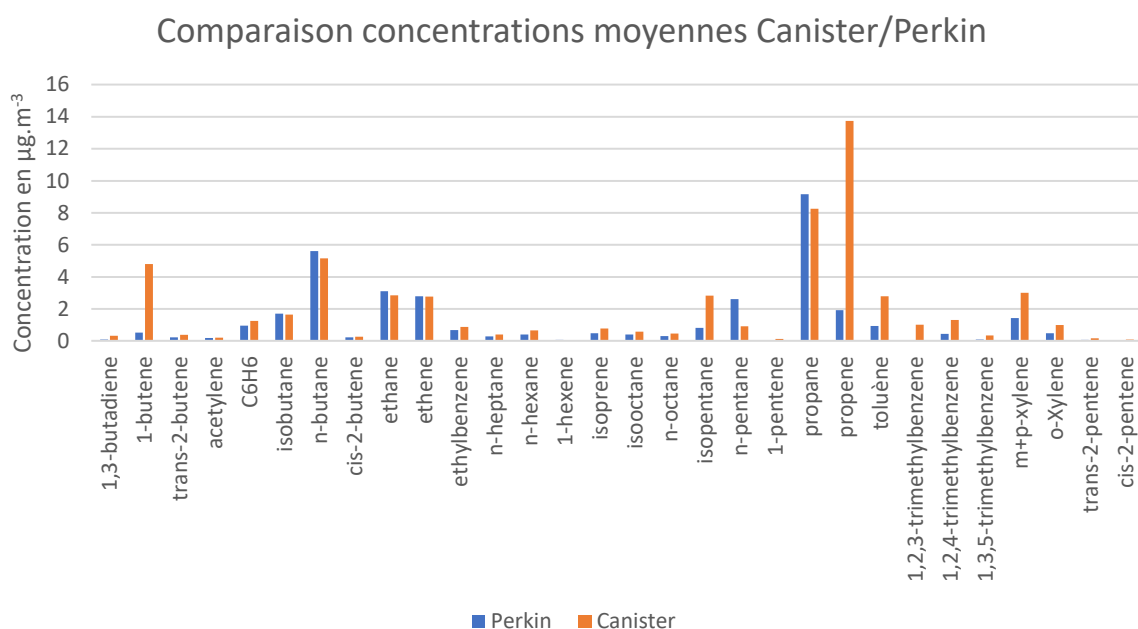


Figure 17 : Comparaison des concentrations moyennes de COVNM mesurés entre perkin et canister

Les concentrations mesurées avec les **2 méthodes de prélèvements** sont **globalement comparables** sauf pour certains composés comme le **propène** où le **1-butène** où l'on observe des écarts importants. Les concentrations mesurées par canister pour ces deux polluants sont 7 à 9 fois plus élevées. Ces écarts sont probablement liés à des rejets très ponctuels que le perkin n'a pas mesuré car en réalité cet appareil n'a prélevé que 80 minutes sur les 120 minutes prélevées par canister.

3.2.4. Variation temporelle des niveaux de COVNM biogéniques

Comme il a été évoqué précédemment, la végétation émet des COV parmi lesquels l'Isoprène est considéré comme la substance la plus abondante. Ces émissions qui dépendent de la densité de biomasse foliaire et de la météorologie (température, rayonnement solaire...) varient en fonction de facteurs divers tels que la période de l'année, l'heure de la journée, l'altitude, l'exposition, etc. Ainsi en France les émissions sont notables de mars à octobre avec un maximum lors des mois de juin, juillet, août. Elles sont en revanche très faibles à nulles le reste de l'année.

Afin d'apporter des éléments permettant l'identification des sources d'émissions de COVB et de pouvoir déterminer leur degré d'implication dans les niveaux mesurés, les profils moyens journalier et saisonniers ont été réalisés notamment pour l'Isoprène.

3.2.4.1. Variation horaire des niveaux

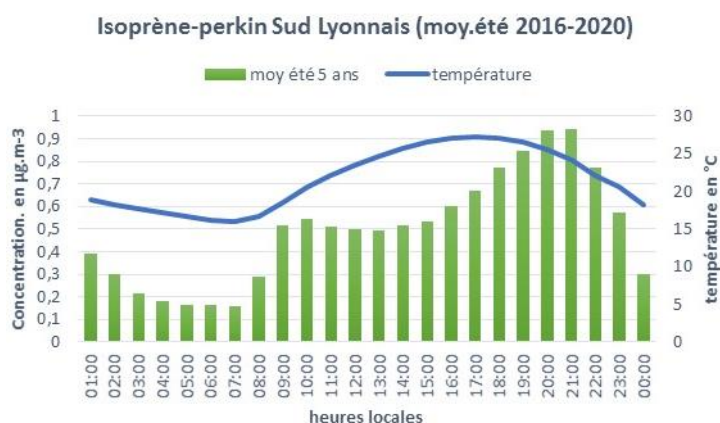
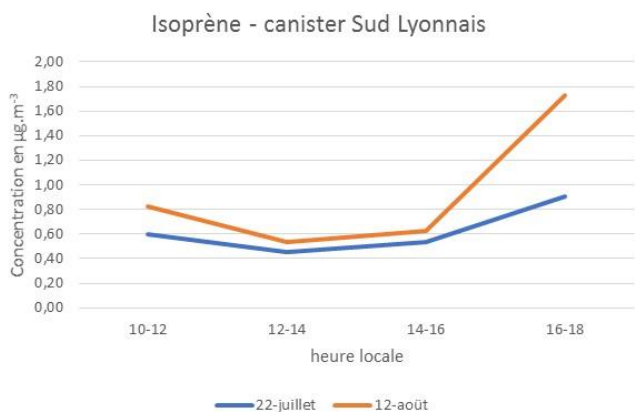
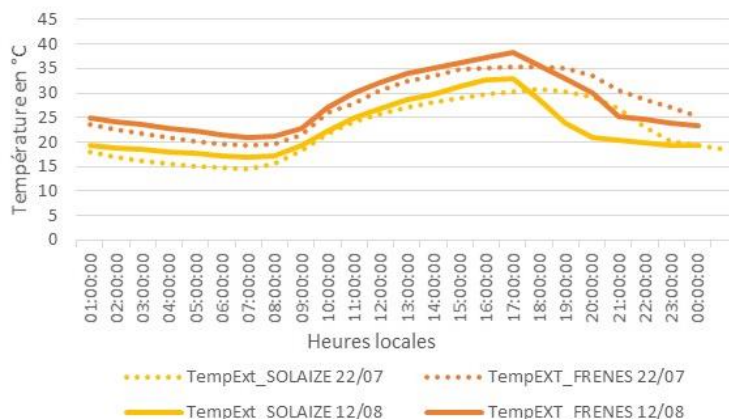
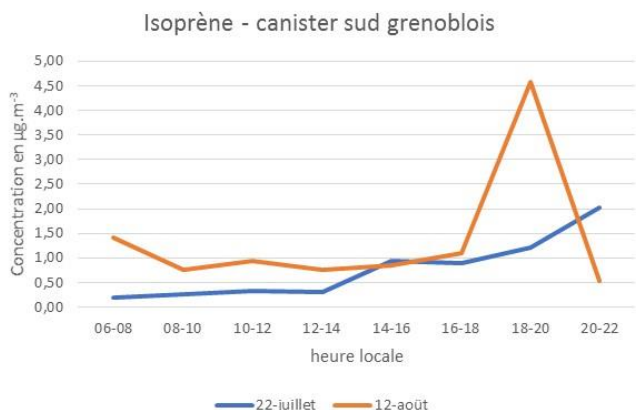


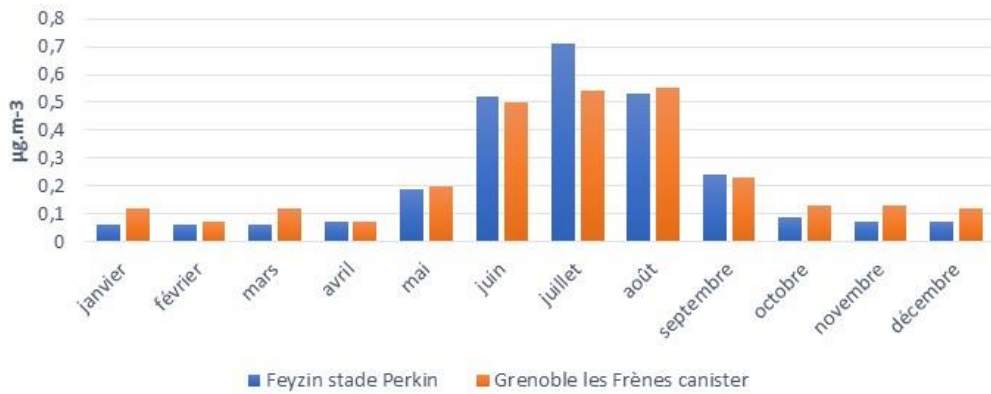
Figure 18 : Profil journalier des concentrations d'isoprène et des températures mesurées lors des prélèvements et en moyenne sur 5 ans

L'évolution journalière des concentrations d'Isoprène met en évidence une **hausse des niveaux plus marquée** entre **18h et 20h** qui ne correspond **pas aux heures où la température est la plus élevée**. Le profil des concentrations moyennes estivales d'isoprène réalisé à partir des données du perkin sur le site du sud Lyonnais de 2016 à 2020 confirme cette tendance. Les concentrations d'Isoprène augmentent à partir de 8h avec l'évolution des températures mais ne présentent pas de maxima aux heures les plus chaudes de la journée. D'après la bibliographie les émissions biogéniques d'isoprène sont fonction du rayonnement et de la température, néanmoins le fait que le profil ne présente pas de maxima aux heures de rayonnement intense et de température élevée serait dû à la réactivité chimique de l'isoprène vis-à-vis du radical OH (formé par photochimie)⁷.

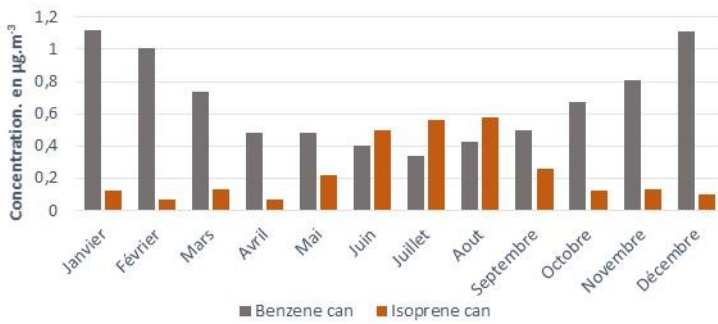
⁷ Analyse de 31 COVNM précurseurs d'ozone mesurés en continu en Alsace en 2004, ASPA p.24

3.2.4.2. Variations saisonnières des niveaux

Evolution des moyennes mensuelles Isoprène (2015/2020)



Evolution des moyennes mensuelles d'Isoprène et de benzène (Grenoble les Frères 2016-2020)



Evolution des moyennes mensuelles d'Isoprène et de benzène (Feyzin stade 2016-2020)

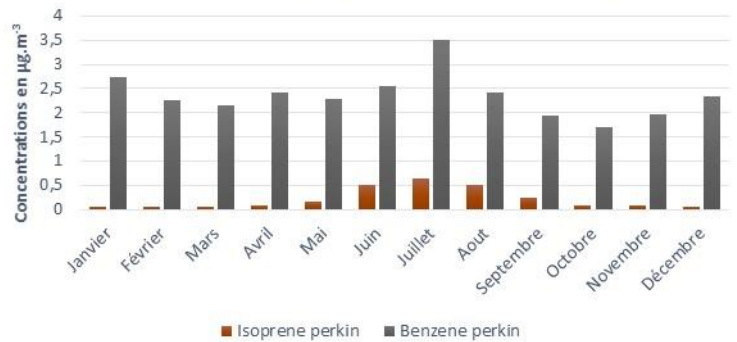


Figure 19 : Evolution comparées des moyennes mensuelles d'Isoprène et de benzène

L'évolution des moyennes mensuelles met en évidence une **augmentation des concentrations d'isoprène pendant la période estivale** sur les 2 sites alors que les concentrations de benzène sont plus élevés durant la période hivernale sur le site de fond urbain de Grenoble les Frères mais pas en proximité industrielle sur le site de Feyzin stade. L'isoprène contrairement à la plupart des COVNM présente des teneurs plus importantes en période estivales qu'en période hivernale.

Conclusion

Les premiers résultats de recherche sur l'impact de l'ozone à l'échelle des écosystèmes, montrent que les degrés de sensibilité peuvent être très différents d'une espèce à l'autre. C'est pourquoi, la pollution de l'air par l'ozone peut modifier les relations de compétition entre espèces et altérer la composition des écosystèmes, affectant ainsi leur biodiversité.

Les végétaux sont en première ligne face à la pollution atmosphérique car ils vivent fixés et constituent la base du fonctionnement des écosystèmes terrestres et aquatiques. Cette analyse bibliographique a été ciblée principalement sur l'impact de l'ozone sur les végétaux.

Les **impacts de l'ozone sur les végétaux** sont de **deux types**. **Des dégâts foliaires** (tâches ou nécroses) peuvent apparaître à la surface des feuilles, après un « pic » de pollution. Également, des perturbations du métabolisme, après une période d'exposition prolongée à l'ozone, peuvent conduire à une **diminution de la croissance ou de la productivité des plantes**.

Les impacts de l'ozone **varient en fonction des conditions environnementales** et notamment de **l'humidité**. Les plantes absorbent moins d'ozone par temps sec que par temps humide. Par conséquent, un faible impact de ce polluant sur la végétation a pu être observé durant les périodes de canicule comme en 2003, malgré les fortes concentrations en ozone. Ce polluant semble avoir **un plus fort impact sur les forêts d'altitude** que sur les forêts de plaine à cause de l'humidité et des plus fortes concentrations d'ozone observées dans ces zones (faible variation entre jour-nuit).

En Isère, la **quantité de COVNM** rejetée dans l'atmosphère pour l'année **2017** est de **38 Kt**. Environ **2/3 des émissions** de COVNM du département proviennent des **sources naturelles** (COV biogéniques, dits « COVB »). Ces émissions de COVB sont prépondérantes en milieu rural et notamment sur des territoires boisés comme le parc naturel régional du Vercors. Deux espaces naturels ont été ciblés en partenariat avec le conseil départemental de l'Isère, pour réaliser des mesures de COV (le plateau de la Molière et les Isles du Drac), afin d'améliorer nos connaissances sur les composés mesurés au niveau de ces territoires lors des épisodes de pollution à l'ozone.

Une étude de faisabilité a été réalisée durant l'été 2021 sur 2 stations fixes de référence (Grenoble périurbain sud et Feyzin stade). Des prélèvements par canister ont été effectués sur un pas de temps court, sur 2 jours où les conditions météorologiques étaient propices à la formation d'ozone. L'ensemble des résultats des prélèvements sont supérieurs à la limite de détection. Les concentrations mesurées par canister sur le site du sud Lyonnais sont globalement comparables avec celles mesurées en continu (perkin) sur ce site, sauf pour certains composés (propène, 1-butène) où l'on observe des écarts importants, liés à la différence entre le temps de prélèvement des appareils.

Les **niveaux moyens de COV mesurés sur le site du sud lyonnais en proximité industrielle**, sont pour la plupart des composés **nettement supérieurs** à ceux observés sur le site de fond périurbain de Grenoble. Néanmoins, les **niveaux maximums d'Isoprène** ($4,6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) ont été **mesurés sur la station du sud grenoblois, le 12 août entre 18h et 20h**. Les **concentrations d'Isoprène augmentent pendant la période estivale**, cependant les **concentrations maximales** ne sont **pas observées aux heures les plus chaudes de la journée**.

Des composés majoritaires ont pu être identifiés sur chaque sites, mais Il est difficile d'établir un profil des concentrations moyennes de COVNM avec uniquement deux prélèvements. Les composés organiques volatils n'ont pas la même réactivité dans l'atmosphère ni le même « pouvoir » de formation de l'ozone. Néanmoins, ces données pourront être utilisées pour savoir sur quels composés il serait préférable d'agir en priorité pour réduire les concentrations de COV dans l'air ambiant et notamment les composés mesurés qui ont un **fort**

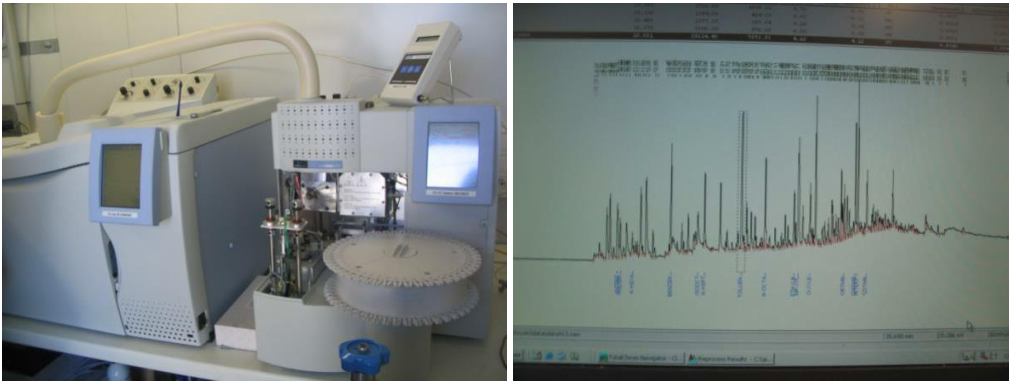
potentiel de création d'ozone photochimique comme le **m+p-xylène (106)** et l'**isoprène (109)** à **Grenoble** et le **propène (112)** et le **1-butène (108)** à **Lyon**.

Dans le cadre du plan régional ozone mené par la DREAL des études complémentaires permettront de préciser et quantifier les composés les plus impactant et ensuite de mener des actions de réduction sur ces composés.

Annexes 1 : Méthodes de prélèvement des COVNM

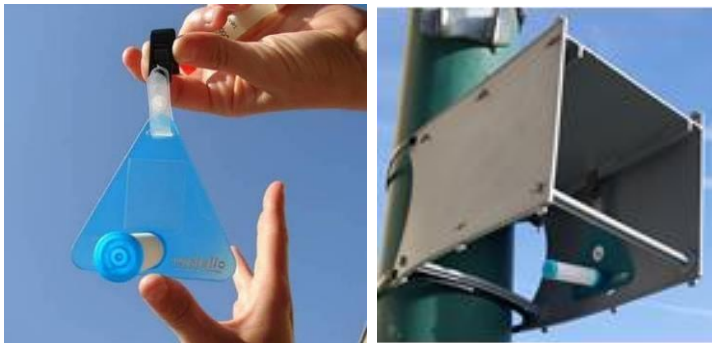
-Analyseur Perkin

L'analyse en continu de nombreuses substances (31 COV précurseurs d'ozone) nécessite d'avoir recours à du matériel spécifique, d'une technologie différente des analyseurs de polluants « classiques ». Les appareils utilisés pour cette surveillance sont des chromatographes en phase gazeuse avec détection à ionisation de flamme. La chromatographie permet de séparer et de quantifier plusieurs substances provenant d'un même échantillon prélevé dans l'air ambiant.



- Tube passif

Par définition, l'échantillonnage passif est basé sur le transfert de matière d'une zone à une autre sans mouvement actif de l'air. Les cartouches absorbantes, imprégnées d'un réactif chimique spécifique, piègent les COV recherchés au fur et à mesure que l'air circule avec un débit connu à travers le tube. Le tube est un tube filet en acier inoxydable rempli de charbon actif. Les composés organiques volatils sont piégés par adsorption, désorbés par disulfure de carbone puis sont analysés en laboratoire par la chromatographie gazeuse capillaire (détecteur à ionisation de flamme « FID») afin de déterminer la concentration moyenne de polluant dans l'air ambiant au cours de la période d'exposition considérée.



-Canister

Le canister est un récipient de plusieurs litres en inox inerte mis sous dépression. Le canister, une fois rempli jusqu'à rétablissement de la pression atmosphérique, est envoyé en laboratoire pour analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC/MS).



Annexes 2: Resultats prèlevements

Familles	Alcanes											Alcènes											
	ethane	propane	isobutane	n-butane	isopentane	n-pentane	n-hexane	isooctane	i-hexane	n-heptane	n-octane	cyclohexane	ethene	propene	acetylene	trans-2-butene	1-butene	cis-2-butene	1,3-butadiene	trans-2-pentene	1-pentene	cis-2-pentene	1-hexene
Grenoble périurbain sud	Resultats COV en µg.m ⁻³																						
2021-07-22 06:00-08:00	1,4	1,0	0,5	0,9	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,5	0,3	0,1	0,2	1,3	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
2021-07-22 08:00-10:00	1,2	1,1	0,5	1,0	0,6	0,4	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,6	0,4	0,2	0,2	1,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
2021-07-22 10:00-12:00	1,4	0,7	0,4	0,7	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,3	0,1	0,2	0,9	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
2021-07-22 12:00-14:00	1,3	0,8	0,3	0,5	0,4	0,3	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6	0,3	0,1	0,2	0,8	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0
2021-07-22 14:00-16:00	0,4	0,5	0,2	0,5	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,6	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
2021-07-22 16:00-18:00	1,3	0,6	0,3	0,5	0,4	0,3	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,5	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
2021-07-22 18:00-20:00	1,4	0,9	0,3	0,6	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,5	0,4	0,1	0,2	0,6	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
2021-07-22 20:00-22:00	1,4	1,0	0,5	1,0	0,6	0,4	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,7	0,3	0,2	0,2	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
2021-08-12 06:00-08:00	4,1	3,0	1,2	3,9	0,7	3,8	0,6	0,6	0,0	1,0	0,8	0,3	3,3	1,1	0,1	0,3	0,9	0,1	0,2	0,1	0,5	0,1	0,1
2021-08-12 08:00-10:00	1,5	1,0	0,6	1,0	0,7	0,3	0,1	0,4	0,2	0,1	0,2	0,1	0,7	0,2	0,1	0,3	0,3	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0
2021-08-12 10:00-12:00	1,6	0,7	0,3	0,5	0,4	0,2	0,1	0,3	0,0	0,1	0,1	0,1	0,4	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
2021-08-12 12:00-14:00	1,3	0,7	0,2	0,4	0,3	0,2	0,1	0,3	0,0	0,1	0,1	0,1	0,5	0,2	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
2021-08-12 14:00-16:00	1,2	0,7	0,3	0,6	0,4	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
2021-08-12 16:00-18:00	1,2	0,9	0,4	0,7	0,6	0,2	0,1	0,3	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
2021-08-12 18:00-20:00	1,5	1,1	0,6	1,2	1,2	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
2021-08-12 20:00-22:00	1,4	0,6	0,2	0,4	0,3	0,2	0,1	0,2	0,0	0,2	0,1	0,1	0,4	0,2	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
moyenne	1,5	1,0	0,4	0,9	0,5	0,5	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,7	0,3	0,1	0,2	0,6	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
max	4,1	3,0	1,2	3,9	1,2	3,8	0,6	0,6	0,3	1,0	0,8	0,3	3,3	1,1	0,3	0,3	1,3	0,1	0,2	0,1	0,5	0,1	0,1
Moyenne Frene 2016-2020	3,1	2,9	1,2	2,3	0,9	1,5	0,3	0,3		0,3	0,3	0,2	1,4	0,6	0,4	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
Max 24h 2016- 08/2021	21,0	26,9	6,0	71,0	4,2	82,7	7,2	2,6		13,1	2,8	1,0	14,0	14,5	2,7	0,9	4,7	0,7	1,5	1,4	1,9	0,6	1,8

Familles	Aromatique										Halogénés (Chlorés)										Terpène				
	C6H6	toluène	ethylbenzene	m-p-xylene	o-xylene	1,2,3-trimethylbenzene	1,2,4-trimethylbenzene	1,3,5-trimethylbenzene	cumene	3-ethyltoluene	styrene	1,1-dichloroethane	1,2-dichloroethylene	1,1,1-trichloroethane	1,2-dichloroethane	tetrachloromethane	trichloroethene	1,1,2-trichloroethane	1,4-dichlorobenzene	chlorobenzene	1,1-dichloroethylene	tetrachloroethene	limonène	isoprene	
Grenoble périurbain sud	Resultats COV en µg.m ⁻³																								
2021-07-22 06:00-08:00	0,2	1,4	0,6	2,8	1,0	0,8	0,7	0,2	0,2	0,5	0,8	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,03	0,3	0,1	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2	
2021-07-22 08:00-10:00	0,2	1,3	0,8	3,1	1,2	0,7	1,0	0,2	0,2	0,3	1,1	0,0	0,4	0,7	0,2	0,1	0,2	1,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3	0,3	
2021-07-22 10:00-12:00	0,4	1,1	1,0	4,2	1,5	0,9	1,0	0,1	0,3	0,3	1,2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,4	0,3		
2021-07-22 12:00-14:00	0,4	1,5	1,0	4,6	1,7	0,9	1,0	0,2	0,3	0,4	1,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,5	0,1	0,2	0,0	0,0	0,3	0,3		
2021-07-22 14:00-16:00	0,1	1,1	0,4	1,7	0,6	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,9		
2021-07-22 16:00-18:00	0,3	1,8	0,4	2,0	0,7	1,0	1,0	0,2	0,3	0,5	0,3	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,9	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,9	
2021-07-22 18:00-20:00	0,1	1,9	0,4	1,9	0,7	0,9	1,0	0,2	0,3	0,3	0,3	0,0	0,2	0,9	0,0	0,4	0,1	2,6	0,3	0,2	0,0	0,1	0,3	1,2	
2021-07-22 20:00-22:00	0,3	2,0	0,5	2,5	0,8	1,2	1,1	0,2	0,2	0,6	0,3	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	1,5	0,1	0,0	0,0	0,1	0,6	2,0	
2021-08-12 06:00-08:00	1,3	5,4	0,6	2,3	1,0	0,9	1,0	0,5	0,2	0,6	0,9	0,2	0,0	1,6	0,4	0,0	0,9	1,4	0,5	0,2	0,0	2,8	0,5	1,4	
2021-08-12 08:00-10:00	0,5	2,6	0,5	2,8	1,0	2,3	1,4	0,8	0,2	1,3	1,0	0,0	0,8	0,7	0,3	0,0	0,0	1,0	0,2	0,2	0,0	0,3	0,5	0,8	
2021-08-12 10:00-12:00	0,3	2,0	0,4	1,2	0,6	0,7	0,7	0,3	0,2	0,8	0,3	0,1	0,6	1,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,1	0,1	0,0	0,5	0,4	0,9	
2021-08-12 12:00-14:00	0,3	2,1	0,3	1,4	0,6	0,9	0,8	0,7	0,2	0,7	0,3	0,0	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	1,4	0,4	0,1	0,0	0,3	0,6	0,8	
2021-08-12 14:00-16:00	0,3	10,3	0,3	1,4	0,6	1,0	1,2	0,5	0,2	0,6	3,9	0,0	1,4	0,7	0,2	0,0	0,0	0,9	0,2	0,4	0,0	0,0	0,7	0,8	
2021-08-12 16:00-18:00	0,3	4,9	0,3	1,6	0,6	1,0	1,4	1,0	0,2	0,6	4,7	0,0	0,4	0,6	0,2	0,0	0,0	1,2	0,4	0,4	0,0	0,0	0,6	1,1	
2021-08-12 18:00-20:00	0,5	4,9	0,5	2,6	0,9	1,3	1,4	0,6	0,2	0,8	2,9	0,0	0,1	0,7	0,4	0,0	0,0	0,9	0,2	0,5	0,1	0,3	0,7	4,6	
2021-08-12 20:00-22:00	0,3	3,9	0,4	2,1	0,6	1,1	1,5	1,5	0,2	0,8	3,2	0,0	0,3	0,7	0,4	0,0	0,0	1,3	0,5	2,8	0,0	0,0	0,7	0,5	
moyenne	0,4	3,0	0,5	2,4	0,9	1,0	1,0	0,5	0,2	0,6	1,4	0,0	0,3	0,6	0,1	0,1	0,1	1,0	0,2	0,4	0,0	0,3	0,5	1,1	
max	1,3	10,3	1,0	4,6	1,7	2,3	1,5	1,5	0,3	1,3	4,7	0,2	1,4	1,6	0,4	0,4	0,9	2,6	0,5	2,8	0,1	2,8	0,7	4,6	
Moyenne Frene 2016-2020	0,7	1,7	0,6	2,0	0,8	2,8	0,6	0,3	0,1	0,3	0,6	0,3	0,2	0,4	0,5	0,6	0,2	0,6	0,6	0,5		0,3	0,1	0,2	
Max 24h 2016- 08/2021	2,6	20,3	8,5	35,7	12,7	31,9	4,5	4,9	1,1	1,3	4,8	19,0	1,9	3,1	2,3	11,5	8,3	3,4	36,6	5,0		4,7	2,8	3,5	

Famille	Alcanes													Alcènes											
	ethane	propane	isobutane	n-butane	isopentane	n-pentane	n-hexane	isooctane	i-hexane	n-heptane	n-octane	cyclohexane	ethene	propene	acetylene	trans-2-butene	1-butene	cis-2-butene	1,3-butadiene	trans-2-pentene	1-pentene	cis-2-pentene	1-hexene		
Feyzin stade Resultats COV µg.m ⁻³																									
2021-07-22 10:00-12:00	2,3	3,4	1,5	3,1	2,1	0,8	1,1	0,5	0,4	0,3	0,33	0,20	1,5	0,8	0,3	0,2	5,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	
2021-07-22 12:00-14:00	2,0	1,2	0,5	1,1	1,0	0,4	0,5	0,2	0,1	0,2	0,19	0,08	1,0	0,4	0,2	0,2	1,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	
2021-07-22 14:00-16:00	2,5	1,4	0,8	1,6	2,6	1,1	0,6	0,3	0,4	0,3	0,28	0,20	1,9	1,1	0,2	0,3	1,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	
2021-07-22 16:00-18:00	2,0	1,2	0,6	1,3	1,2	0,5	0,5	0,3	0,2	0,2	0,24	0,12	2,6	1,5	0,1	0,2	1,4	0,1	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	
2021-08-12 10:00-12:00	8,3	38,9	7,2	25,9	8,1	2,3	1,2	1,2	1,1	0,9	0,90	0,96	12,2	7,0	0,3	1,0	12,7	0,9	0,7	0,3	0,3	0,2	0,0	0,0	
2021-08-12 12:00-14:00	2,5	12,2	1,5	5,1	3,2	0,8	0,3	0,5	0,4	0,2	0,28	0,12	1,4	1,1	0,2	0,4	5,4	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	
2021-08-12 14:00-16:00	1,6	1,3	0,3	0,8	1,1	0,3	0,2	0,2	0,0	0,2	0,19	0,36	0,9	0,3	0,2	0,4	6,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	
2021-08-12 16:00-18:00	1,6	6,3	0,7	2,4	3,4	1,1	0,8	1,3	0,7	0,9	1,23	0,02	0,7	97,7	0,2	0,4	5,1	0,2	0,5	0,4	0,2	0,2	0,0	0,0	
moyenne	2,8	8,2	1,6	5,2	2,8	0,9	0,7	0,6	0,4	0,4	0,5	0,3	2,8	13,7	0,2	0,4	4,8	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	
max	8,3	38,9	7,2	25,9	8,1	2,3	1,2	1,3	1,1	0,9	1,2	1,0	12,2	97,7	0,3	1,0	12,7	0,9	0,7	0,4	0,3	0,2	0,0	0,0	
Moyenne Feyzin perkin 2016-2020	4,8	22,8	5,9	17,3	6,4	2,1	1,1	1,1	1,1	0,9	0,8		3,2	6,8	0,4	1,6	2,0	1,3	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	
Max horaire 2016- 08/2021	425	3415	1492	2170	569	439	198	106	198	374	44		87	4742	16	851	324	578	198	81	46	35	12,5	12,5	
Famille	Aromatique											Halogénés (Chlorés)										Terpène			
Feyzin stade	C6H6	toluène	ethylbenzene	m+p-xylene	o-Xylene	1,2,3-trimethylbenzene	1,2,4-trimethylbenzene	1,3,5-trimethylbenzene	cumene	3-ethyltoluene	styrene	1,1-dichloroethane	1,2-dichloroethylene	1,1,1-trichloroethane	1,2-dichloroethane	tetrachloromethane	trichloroethene	1,1,2-trichloroethane	1,4-dichlorobenzene	chlorobenzene	1,1-dichloroethylene	tetrachloroethene	limonène	isoprene	
Feyzin stade Resultats COV µg.m ⁻³																									
2021-07-22 10:00-12:00	0,9	3,0	0,8	2,7	0,8	0,8	0,9	0,2	0,2	0,6	0,2	0,9	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1	0,2	0,0	0,3	0,2	0,6	
2021-07-22 12:00-14:00	0,9	2,2	0,6	2,0	0,6	0,6	0,8	0,2	0,2	0,4	0,1	0,4	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,5	0,1	0,0	0,0	0,3	0,2	0,5	
2021-07-22 14:00-16:00	1,8	2,3	1,2	4,1	1,1	0,7	1,0	0,2	0,2	0,6	0,1	1,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1	0,5	
2021-07-22 16:00-18:00	1,2	2,0	0,5	1,6	0,6	0,6	0,9	0,1	0,2	0,4	0,0	0,5	0,0	0,6	0,0	0,3	0,4	1,2	0,2	0,0	0,0	0,2	0,9		
2021-08-12 10:00-12:00	3,1	4,9	1,6	4,8	1,9	1,4	1,8	0,4	0,3	1,1	0,4	2,9	0,0	0,9	0,2	0,0	1,3	0,4	0,2	0,5	0,1	0,1	0,5	0,8	
2021-08-12 12:00-14:00	0,7	2,3	0,6	2,2	0,7	1,0	1,2	1,0	0,2	0,6	0,1	0,7	0,0	0,8	0,1	0,0	0,1	0,7	0,1	0,1	0,0	0,1	0,5	0,5	
2021-08-12 14:00-16:00	0,5	1,6	0,4	1,1	0,4	0,6	0,7	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,0	0,8	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	
2021-08-12 16:00-18:00	0,8	4,1	1,4	5,4	1,8	2,3	2,9	0,7	0,4	1,7	0,1	3,2	0,0	1,0	0,1	1,6	1,2	0,6	0,7	0,7	0,0	0,1	0,7	1,7	
Moyenne	1,2	2,8	0,9	3,0	1,0	1,0	1,3	0,3	0,2	0,8	0,2	1,2	0,0	0,6	0,1	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,0	0,1	0,3	0,8	
Max	3,1	4,9	1,6	5,4	1,9	2,3	2,9	1,0	0,4	1,7	0,4	3,2	0,0	1,0	0,2	1,6	1,3	1,2	0,7	0,7	0,1	0,3	0,7	1,7	
Moyenne Feyzin perkin 2016-2020	2,3	2,3	0,9	2,2	1,0	0,6	0,7	0,3																0,2	
Max horaire 2016- 08/2021	168,6	120,5	83,4	276,7	91,5	24,1	59,4	22,1																8,9	

Annexe 3 : La biosurveillance passive : Comment reconnaître les symptômes de l'ozone sur la végétation ?

La biosurveillance passive consiste à repérer des dégâts foliaires sur la végétation spontanée. Elle requiert une certaine expertise, car il n'est pas toujours facile d'attribuer à l'ozone des dégâts observés. Quelques indices sont toutefois faciles à repérer :

Pour les espèces de feuillues :

-Dégâts souvent plus sévères **sur les feuilles adultes que sur les feuilles jeunes**. Ce sont les feuilles les plus âgées qui sont en général les premières à développer des symptômes.

Ex : sur le sureau hièble, *Sambucus ebulus*, Photo M.J Sanz & V. Calatayud)



-Symptômes visibles (**coloration rouge, tâches noires ou brunes**) sont présents sur la **face supérieure des feuilles**, et ne se retrouvent pas sur la face inférieure.

Ex sur : l'orme de montagne, *Ulmus glabra* en Suisse. Photo M.J Sanz & V. Calatayud)



-Feuille reste verte le long des nervures et **les décolorations** apparaissent **entre les nervures**

Exemple sur l'hibiscus althéa, *Hibiscus syriacus*. Photo V. Calatayud)



-**Feuilles** impactées par l'ozone **vieillissent plus vite et tombent** plus tôt que les feuilles saines.

Ex : sur le Saule blanc *Salix alba*. Photo V. Calatayud)



-**Feuilles** ou les portions de feuilles qui sont à **l'ombre** d'autres feuilles ne présentent en général **pas de dégâts**.

Ex. sur le hêtre, *Fagus sylvatica* en Italie, dans la région de Turin Photo M.J Sanz & V. Calatayud)



Pour les espèces de conifères :

-Symptômes visibles dans les **parties supérieures de la cime, sur la face supérieure des branches et des aiguilles.**

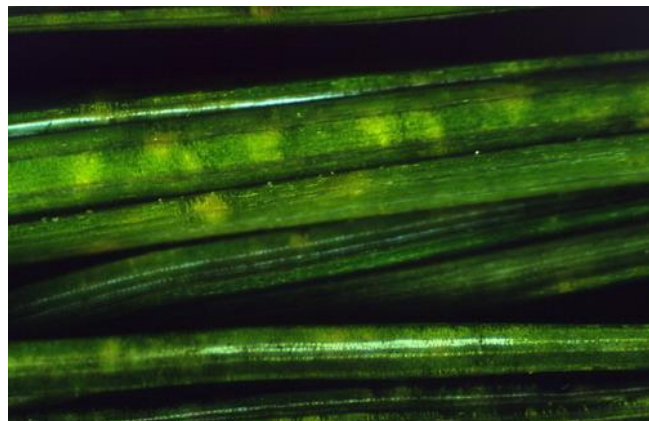
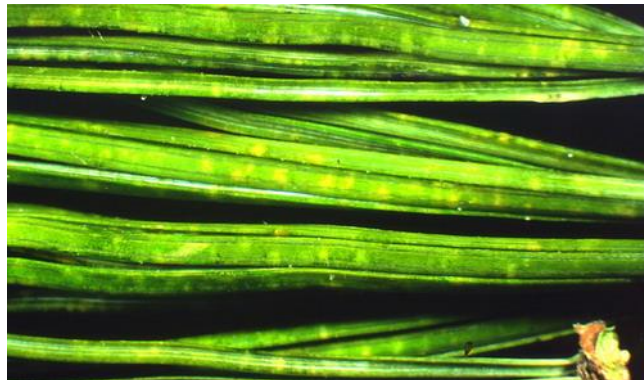
-**Marbrure chlorotique** est le symptôme le plus courant décrit pour les aiguilles de conifères :

-Résultat d'une **exposition chronique à l'ozone** et peut être décrit comme **des zones jaunes ou vert clair de taille similaire** sans frontières nettes entre les zones vertes et jaunes. Toutes les aiguilles ne peuvent pas être uniformément affectées.

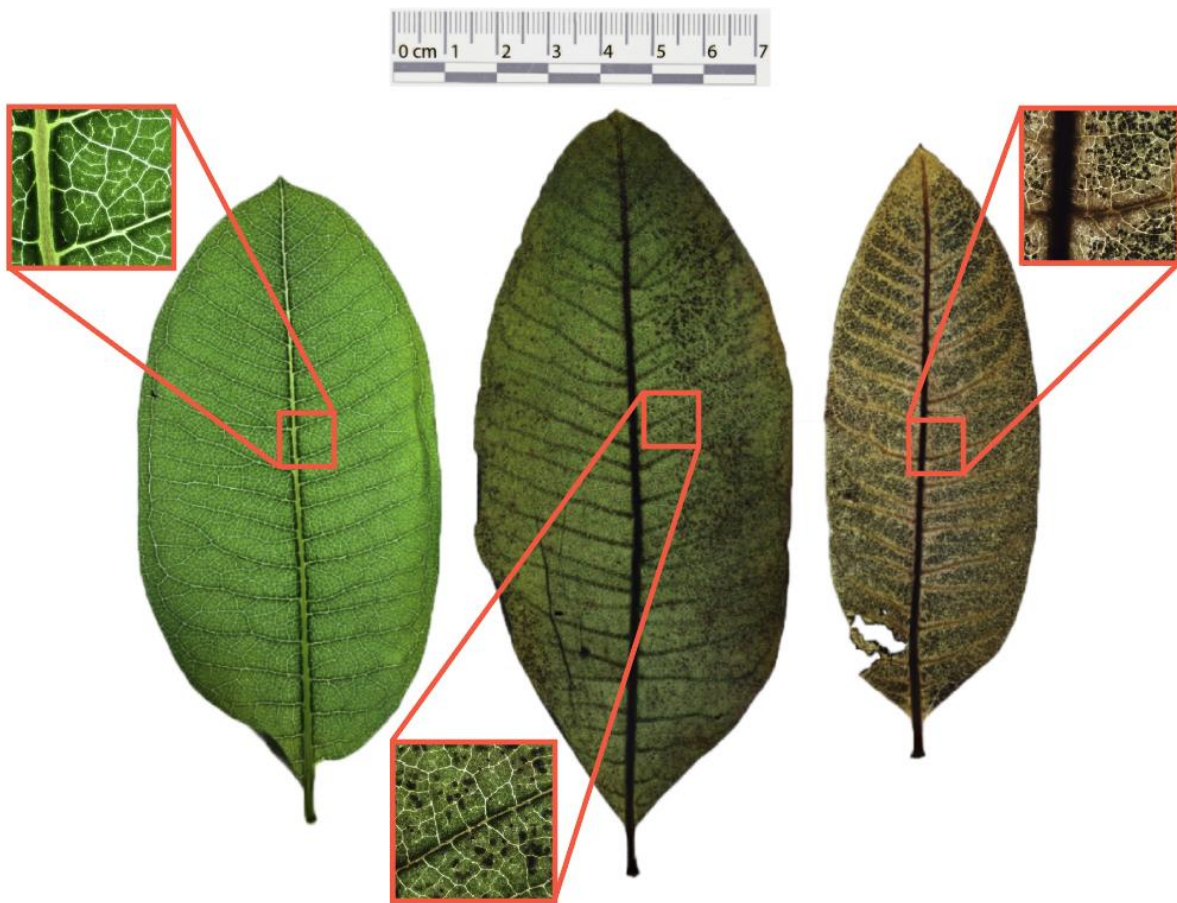
- Apparaissent fréquemment sur **les aiguilles de plus d'un an** (aiguilles de deuxième année et plus). Le symptôme semble augmenter avec l'âge de l'aiguille (effet de l'âge).

-**Plus distinctes** sur les zones d'aiguilles **exposées à la lumière** que sur les zones ombragées.

Il est plus facile d'observer la marbrure, si plusieurs aiguilles sont tenues proches les unes des autres.



Symptômes d'ozone chez Pinus strobus de Turin (Photo : MJ Sanz & V. Calatayud)



Trois feuilles de plantes d'asclépiade montrant des niveaux croissants de dommages causés par l'ozone de gauche à droite. Robin Rohrback, adapté par l'American Geosciences Institute

Les dommages causés aux plantes par l'ozone se produisent lorsqu'il y a plusieurs jours consécutifs avec des niveaux d'ozone supérieurs à environ 40 à 60 parties par milliard (ppb). Le meilleur moment pour rechercher les dommages causés par l'ozone est la dernière partie de la saison estivale. Les zones pointillées sont assez proéminentes et peuvent apparaître violet foncé, rouge ou beige à brun foncé, selon l'espèce végétale.

Un site internet contient également une banque de photos de dégâts foliaires sur la plupart des essences européennes :

http://www.ozoneinjury.org/index.php?option=com_content&view=category&id=3&Itemid=4

Annexe 4 : Bibliographie

Impact de l'ozone sur végétaux et biosurveillance

-<https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/impacts-polluants-air-sur-vegetation> (GARREC Jean-Pierre, Directeur de Recherche INRA, Laboratoire Pollution Atmosphérique, INRA, Centre de Recherches de Nancy, chapitre 5).

-<https://www.airparif.asso.fr/effets-sur-la-vegetation>.

-<https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/impacts-polluants-air-sur-vegetation>.

-<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1469-8137.1998.00177.x>

-<http://biosurveillance-air.info/>

-<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/synthese-cout-agriculture-impacts-ozone-france-2019.pdf> Cout économique pour l'agriculture des impacts de la pollution de l'air par l'ozone, mai 2019, ADEME, 24p

-<https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/article/effets-sur-lenvironnement>

-<https://www.encyclopedie-environnement.org/air/vegetaux-lichens-sentinelles-qualite-de-lair/>

-Bioindication végétale de la pollution de l'air-mai 2017, ADEME/UPEC

- <http://www.ozoneinjury.org/>

- <https://www.nps.gov/subjects/air/nature-ozone.htm>

- <https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/article/air-climat-et-energie>

Les précurseurs de l'ozone

-Ozone Troposphérique : Etat des connaissances et sensibilité de réduction des émissions de précurseurs et des secteurs d'activités sur les concentrations d'ozone, ATMOAURA, juillet 2020, 68p.

<https://www.atmo->

[auvergnerhonealpes.fr/sites/ra/files/atoms/files/travauxozonetropospherique_connaissances_et_actions_juillet2020.pdf](https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/sites/ra/files/atoms/files/travauxozonetropospherique_connaissances_et_actions_juillet2020.pdf)

-<https://www.citepa.org/fr/2020-covnm/>

-Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France, Mars 2020 CITEPA, sources biotiques, page 885.

-<https://www.atmosud.org/article/bilan-de-la-pollution-par-lozone-en-2018?bilan=6169>

-Thèse Emissions biogéniques de composés organiques volatils en région méditerranéenne – développement instrumental, mesures et modélisation, Romain BAGHI, 2013, 212p.

-Thèse Etude de COV oxygénés et biogéniques en milieu rural : du développement métrologique à l'évaluation de l'impact sur la chimie atmosphérique, DETOURNAY Anais, 2011, 367p.