



La pollution atmosphérique à l’ozone et le changement climatique en région Provence-Alpes-Côte d’Azur

Février 2024



Cette publication a été élaborée par le Groupe régional d'experts sur le climat en Provence-Alpes-Côte d'Azur (GREC-SUD) qui est coordonné par l'Association pour l'innovation et la recherche au service du climat (AIR Climat).

Le GREC-SUD décrypte et diffuse les connaissances scientifiques sur l'évolution du climat, évalue les enjeux et les effets du changement climatique de l'échelle régionale à locale, et accompagne les acteurs régionaux pour limiter les impacts du climat sur les territoires. Il bénéficie d'un financement au titre de la Convention État - Région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur - ADEME.

Financé dans le cadre du CPER



Ce cahier a été financé par la DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur.



**Direction régionale de l'environnement,
de l'aménagement et du logement**

Direction de la publication : GREC-SUD
Coordinatrice : Cécile Bergeot
Réalisation de la maquette : Tumult
Date de publication : février 2024

Crédits photos : couverture © jannoon028 sur Freepik / page 7 © frimufilms sur Freepick / page 14 © AtmoSud (épisode photochimique « près des sources ») / pages 36 © GeographR (Les Orres) / page 39 © GREC-SUD / 4^{ème} de couverture © Caroline Chevalier, Métropole Aix-Marseille-Provence (plage Olga à Port-Saint-Louis-du-Rhône).
Crédits pictogrammes : © Freepik & © Flaticon / zooms © bsd / illustration page 27 © studio4rt sur Freepik.

Édito

L'ozone est un composé chimique complexe aux effets multiples. Présent dans la stratosphère, celui-ci est bénéfique et forme la « couche d'ozone ». Sa présence dans la troposphère, celle qui contient l'air que nous respirons, est quant à elle néfaste, ce qui en fait un polluant dont les concentrations doivent être limitées. En effet, des concentrations en ozone élevées engendrent des effets négatifs sur la santé humaine, mais aussi la faune et la flore.



Contrairement aux autres polluants dits « primaires », l'ozone est un polluant secondaire formé à partir de nombreuses réactions chimiques complexes. Plusieurs facteurs entrent en jeu dans sa formation, parmi lesquels la température et le rayonnement solaire. Compte tenu de son climat, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur est particulièrement exposée au phénomène, notamment en période estivale durant laquelle des pics de pollution à l'ozone apparaissent chaque année, pics dont le nombre tend cependant à diminuer. Par ailleurs, contrairement aux autres polluants réglementés, les concentrations moyennes annuelles en ozone ne présentent pas de tendance à la diminution ces dernières années dans les territoires urbanisés.

Les composés chimiques à l'origine de la formation d'ozone sont issus d'activités anthropiques : transports routiers, aériens et maritimes, industrie, secteur résidentiel et agriculture. Certains possèdent également une origine végétale. Il est donc nécessaire d'agir sur ces nombreux secteurs contributeurs.

Les pouvoirs publics portent diverses actions qui visent à limiter les émissions de polluants, dont les précurseurs de l'ozone. Au niveau local, l'État pilote notamment les Plans de protection de l'atmosphère (PPA), qui comprennent un ensemble d'actions co-construites et portées par les acteurs de terrains compétents, permettant d'agir sur la pollution à long terme. Des dispositifs d'urgence avec des mesures spécifiques de très court terme existent également. Ils doivent permettre de diminuer rapidement la concentration des précurseurs et ainsi limiter la durée des pics de pollution à l'ozone.

Les défis sont immenses mais nous avons la chance d'avoir sur notre territoire des acteurs dynamiques aux connaissances et compétences uniques en matière de qualité de l'air. Une dynamique vertueuse est en place et permet aujourd'hui d'être optimiste pour l'avenir. Il est néanmoins important de ne pas relâcher notre effort collectif.

La DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur, très engagée sur la thématique, a souhaité impulser et financer le présent cahier afin de permettre la centralisation des nombreuses connaissances et résultats de recherches sur le sujet et d'appréhender les solutions envisageables afin de limiter la formation d'ozone. L'explicitation des évolutions spatio-temporelles de cette pollution, en lien avec les différents scénarios climatiques était particulièrement attendue.

La DREAL remercie tous les participants qui ont permis de nourrir ce cahier pour le travail de qualité accompli.

Ce cahier constitue un canal d'information sur les enjeux liés à l'ozone et propose des pistes d'actions afin d'y répondre au mieux. Au-delà d'un document scientifique, il s'agit d'un outil sur lequel s'appuyer pour la prise de décision en termes de politiques publiques.

Nicolas MALECKI (Photo 1, © DREAL PACA)

Chargé de mission qualité de l'air - référent 13, DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur

Résumé

La Région Provence-Alpes-Côte d'Azur présente des concentrations en ozone parmi les plus élevées de France métropolitaine, auxquelles s'ajoutent d'importants épisodes de pollution en période estivale. L'exposition à de fortes concentrations en ozone entraîne des répercussions sur la santé des individus et sur le bon fonctionnement des écosystèmes naturels régionaux, notamment forestiers, limitant ainsi leur résilience et leur capacité de stockage de carbone.

La formation de l'ozone dépend de processus photochimiques complexes dont la température et le rayonnement solaire sont des paramètres déterminants. En plus d'un climat très favorable, les niveaux d'ozone régionaux élevés s'expliquent par des émissions importantes de précurseurs d'ozone tels que les oxydes d'azote (NO_x), principalement émis par le secteur des transports et de l'industrie, et les composés organiques volatils (COV), émis par le secteur résidentiel, industriel et la végétation.

Les écosystèmes forestiers régionaux, à travers, par exemple, l'absorption de gaz à effet de serre (GES) ou leurs émissions de COV, jouent un rôle important pour la qualité de l'air, dont la production d'ozone. Dans un contexte de changement climatique, ce rôle pourrait se renforcer par l'augmentation des émissions de COV biogènes (COVB).

À l'échelle régionale, depuis les 20 dernières années, les politiques de réduction des précurseurs ont permis une baisse de la fréquence et de l'intensité des pics de pollution. Cependant, les concentrations chroniques restent relativement stables, présentant une baisse en milieu rural et une augmentation en zone urbaine.

Le changement climatique est particulièrement marqué en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Les températures moyennes régionales pourraient augmenter de +1,9 à +5,5 °C à la fin du siècle, selon les scénarios socio-économiques (RCP), s'accompagnant d'une hausse de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur et autres événements extrêmes. Les modélisations sur l'évolution des concentrations en ozone en fonction des scénarios climatiques à l'échelle européenne montrent une augmentation, modérée, des niveaux d'ozone en lien avec le changement climatique dans les décennies à venir. Ces modèles restent néanmoins optimistes quant à l'efficacité des politiques de diminution des émissions de précurseurs, qui, si elles sont soutenues, permettraient une baisse des concentrations en ozone sur la majeure partie du territoire régional (sauf dans les zones urbaines).

La limitation des émissions des précurseurs de l'ozone doit être poursuivie à l'échelle régionale pour réduire les concentrations de polluants et leurs effets sur le long terme, et favoriser les co-bénéfices qu'elle engendre en matière de santé publique. Ces politiques doivent être suivies, évaluées, et cibler les secteurs les plus émetteurs : transport et industrie. Trop longtemps dissociées, la pollution atmosphérique à l'ozone et la lutte contre le changement climatique doivent être traitées conjointement, avec un objectif clair : réduire nos émissions de GES et de polluants atmosphériques.

Le lien entre ozone et changement climatique reste à ce jour entaché d'incertitudes. Les processus de production d'ozone sont complexes et les facteurs déclencheurs fluctuent selon les territoires. De nombreux axes de recherche restent à approfondir. La coopération scientifique et technique, à toutes les échelles spatiales, est nécessaire pour comprendre les interactions entre la pollution de l'air et le climat.



Table des matières

Édito.....	3
Résumé.....	4
Introduction générale.....	6
1. Changement climatique et pollution de l'air en Provence-Alpes-Côte d'Azur.....	8
1.1. Climat et changement climatique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur.....	8
1.1.1. Les tendances climatiques régionales.....	8
1.1.2. Quel futur ? Les projections climatiques régionales.....	9
1.2. Une nette amélioration de la qualité de l'air en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, mais encore insuffisante.....	11
1.2.1. L'évolution de la qualité de l'air régionale.....	11
1.2.2. Les effets de la pollution atmosphérique sur la santé humaine : le cas de l'ozone.....	13
1.3. La pollution à l'ozone en région Provence-Alpes-Côte d'Azur.....	14
1.3.1. Le processus de formation de l'ozone.....	14
1.3.2. Tendances et évolutions de la pollution à l'ozone en Provence-Alpes-Côte d'Azur.....	15
1.3.3. Projections sur l'évolution des concentrations en ozone en fonction des scénarios climatiques....	18
2. Le rôle de la végétation méditerranéenne sur la qualité de l'air dans un contexte de changement climatique.....	20
2.1. La participation de la végétation méditerranéenne à la production d'ozone.....	20
2.1.1. Les COVB : des précurseurs d'ozone.....	20
2.1.2. Les principales essences régionales : de forts émetteurs de précurseurs.....	21
2.1.3. Quelles évolutions des émissions de COVB face au réchauffement climatique ?.....	22
2.2. La végétation méditerranéenne, vulnérable au changement climatique et à la pollution de l'air.....	22
2.2.1. Les peuplements forestiers face au réchauffement climatique en Provence-Alpes-Côte d'Azur....	22
2.2.2. Exposition à l'ozone des écosystèmes forestiers régionaux et risques écologiques.....	24
2.2.3. L'impact de l'ozone sur la végétation.....	25
3. L'amélioration de la qualité de l'air et la lutte contre le changement climatique : les synergies en région Provence-Alpes-Côte d'Azur.....	27
3.1. Les politiques de réduction des émissions de GES et de polluants atmosphérique.....	27
3.1.1. Orienter l'action pour réduire l'ozone.....	27
3.1.2. Quels leviers pour orienter et valoriser les co-bénéfices des politiques publiques en termes de pollution de l'air, changement climatique et santé publique en région ?.....	30
3.1.3. L'action départementale pour la diminution des émissions de précurseurs.....	31
3.2. Quelle gestion de la biodiversité face à la pollution de l'air et au changement climatique ?.....	32
3.2.1. Comment mieux exploiter les capacités de la végétation en ville ?.....	32
3.2.2. Stratégies d'adaptation au changement climatique des forêts méditerranéennes transfrontalières.....	35
Conclusion générale.....	37
Liste des contributeurs.....	38



Introduction générale

Pollution atmosphérique, changement climatique, déclin et modification de la biodiversité sont des enjeux mondiaux qui, en affectant les écosystèmes, touchent directement nos sociétés. Ces crises, d'origines anthropiques, sont diverses dans leur processus mais en étroites interrelations. L'évolution rapide du climat observée depuis une quarantaine d'années révèle et renforce ces interactions complexes. Appréhender cette complexité est aujourd'hui nécessaire afin d'anticiper au mieux les évolutions à moyen et long terme et mettre en place des politiques publiques pertinentes et efficaces sur le long terme.

La pollution atmosphérique est définie comme étant la contamination de l'environnement intérieur ou extérieur par tout agent chimique, physique ou biologique qui modifie les caractéristiques naturelles de l'atmosphère. Les activités humaines telles que l'industrie, le chauffage, le transport, l'agriculture en sont des sources majeures, même si des phénomènes naturels (feux de forêt, végétation...) en sont également vecteurs. Aujourd'hui la quasi-entière de la population mondiale (99 %) est exposée à une pollution atmosphérique qui dépasse les seuils fixés par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Des seuils au-delà desquels l'air que l'on respire devient néfaste pour la santé humaine. Ainsi, la pollution de l'air est à l'origine de 7 millions de décès dans le monde chaque année, en faisant un enjeu sanitaire de premier ordre.

Depuis l'ère industrielle (fin du 19^{ème} siècle), durant laquelle l'utilisation d'énergies fossiles, émettrices de gaz à effet de serre (GES), s'est intensifiée et normalisée, la température moyenne à la surface du globe s'est élevée d'environ 1,1 °C. Depuis 40 ans, ce réchauffement s'accélère de manière exponentielle, atteignant des niveaux inégalés depuis des milliers d'années. Au rythme actuel, le seuil emblématique des +1,5 °C d'augmentation à l'échelle globale pourrait être atteint avant 2040. Au sein du bassin méditerranéen, la hausse des températures, plus rapide, laisse suggérer des élévations régionales de l'ordre de 2,5 °C voire 3 °C autour de 2040. Cette hausse des températures est le moteur de modifications des caractéristiques climatiques et météorologiques ayant à leur tour des conséquences sur la composition de l'atmosphère, les écosystèmes terrestres et la santé humaine.

Au-delà du fait que les GES et les polluants atmosphériques peuvent provenir de sources similaires, les interrelations entre climat et pollution atmosphérique sont nombreuses. Les paramètres météorologiques tels que le vent, l'ensoleillement, les températures, influencent les concentrations de certains polluants (ozone, particules fines) en favorisant ou en limitant leur formation et leur dispersion autour des sources d'émissions. Réciproquement, la pollution de l'air peut avoir une incidence sur le climat ; certains polluants atmosphériques, tels que l'ozone, sont des gaz à effets de serre et contribuent au changement climatique alors que certaines particules telles que les aérosols captent une partie du rayonnement solaire et contribuent à limiter la hausse globale de la température. Ainsi, les trajectoires climatiques, les politiques de réductions de GES et polluants auront ainsi à terme des conséquences à la fois sur la qualité de l'air et l'évolution du climat.

La végétation - nous parlerons ici principalement des écosystèmes forestiers - joue un rôle déterminant au sein de ces interrelations. Particulièrement sensibles au changement climatique et à la pollution atmosphérique, elle influence également la qualité de l'air par régulation de la concentration en GES et polluants atmosphériques ou par l'émission de diverses molécules dont les précurseurs d'ozone. Si le rôle précis des écosystèmes régionaux dans la qualité de l'air est encore mal connu, les effets du changement climatique comme l'augmentation des incendies, l'allongement de la saison pollinique de certains végétaux ou l'accroissement des émissions de polluants naturels (composés organiques volatils biogènes, COVB) qui participent à la formation de l'ozone, sont des phénomènes à suivre sur le temps long.

La formation de l'ozone, GES et polluant atmosphérique aux effets délétères sur la santé humaine et végétale, est symbolique de la complexité des interactions climat, végétation et qualité de l'air. La région Provence-Alpes-Côte d'Azur, dotée d'un climat favorable à sa formation, présente des concentrations parmi les plus élevées d'Europe. La pollution à l'ozone pose alors un véritable enjeu sanitaire.

Ainsi ce cahier tente de réunir la connaissance scientifique régionale disponible autour de l'enjeu de la pollution par l'ozone avec l'ambition d'appréhender les interactions complexes entre pollution, climat et végétation et d'en faciliter leur compréhension, étape préalable à la mise en œuvre de politiques publiques adaptées aux évolutions futures possibles. Ce document dresse, dans un premier temps, un bilan du changement climatique et de la qualité de l'air régionale, puis met en lumière le double rôle de la biodiversité dans ce phénomène. Des pistes de solutions sont finalement présentées. Trop longtemps séparés, ces enjeux gagneront à être compris et traités dans leurs interactions.



© frimufilms

1. Changement climatique et pollution de l'air en région Provence-Alpes-Côte d'Azur

1.1. Climat et changement climatique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur

1.1.1. Les tendances climatiques régionales

Contributeurs : Cécile Bergeot (AIR Climat) et Joël Guiot (CNRS/CEREGE)

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est caractérisée, sur la plus grande part de son territoire, par un climat méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers doux. Le changement climatique y est particulièrement marqué.

Une hausse des températures nette et rapide

L'évolution de la température moyenne annuelle dans la région, globalement en augmentation depuis le début du siècle (+2 °C), s'est fortement accélérée depuis les années 1980. Les 7 dernières années sont les plus

chaudes jamais enregistrées à l'échelle de la région, avec 2022 de loin la plus chaude jamais enregistrée. Les températures estivales présentent une hausse plus marquée sur les cinquante dernières années avec une augmentation d'environ +0,56 °C par décennie contre +0,43 °C pour la température annuelle. La tendance des températures moyennes hivernales est quant à elle de l'ordre de +0,34 °C par décennie. Contrairement à l'échelle nationale, pour la région les températures maximales (Figure 1) augmentent plus vite (+0,49 °C) que les températures minimales (+0,37 °C).

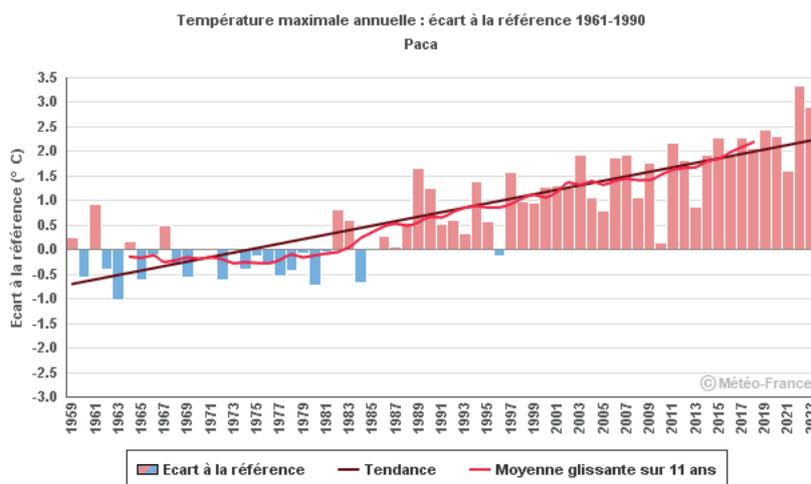


Figure 1. Température maximale annuelle en Provence-Alpes-Côte d'Azur : écart à la référence 1961-1990 (Météo-France, 2022).

Cette importante hausse des températures entraîne des répercussions multiples sur les caractéristiques du climat régional. Le nombre annuel de jours de gel est en diminution, avec de fortes variations d'un point de mesure à l'autre. Le nombre annuel de journées chaudes (températures maximales supérieures à 25 °C) est en forte augmentation sur la période 1961-2014 avec, en moyenne, 6 à 8 jours supplémentaires par décennie. L'année 2022 a connu le plus grand nombre de journées chaudes avec un record de 160 jours avec une température maximale supérieure 25 °C à Marignane et un autre de 36 jours supérieurs à 35 °C à Avignon. On observe également une augmentation de la fréquence des nuits tropicales (+20 °C), en particulier sur la Côte

d'Azur, avec un record de 104 jours de nuits tropicales à Nice, dont 60 consécutifs en 2022.

Des vagues de chaleur plus fréquentes, plus longues et plus intenses

Selon Météo-France, les vagues de chaleur sont trois fois plus nombreuses sur la période 2000-2022, que sur la période 1947-2000 (Figure 2). Les trois étés les plus chauds se sont produits après l'année 2000. Avec 3 vagues de chaleur, l'été 2022 est le plus chaud en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, quasiment à égalité avec l'été 2003 qui reste caractérisé par la vague de chaleur la plus longue jamais enregistrée. L'été 2023, également

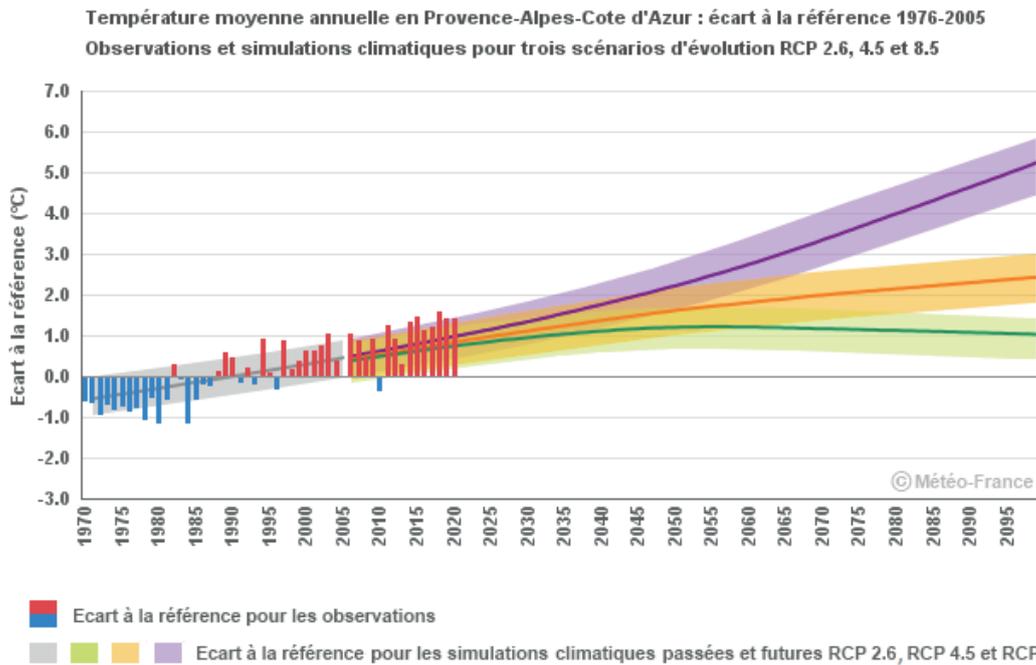


Figure 3. Température moyenne annuelle en Provence-Alpes-Côte d'Azur : écart à la référence 1976-2005. Observations et simulations climatiques pour 3 scénarios d'évolutions RCP 2.6, 4.5 et 8.5. (Météo-France, 2022).

Ainsi dans les décennies à venir, les températures s'adouciront encore en hiver. Par exemple, le nombre de jours de gel annuel à Embrun en moyenne montagne, dans le scénario le plus pessimiste, sera compris à la fin du siècle entre 40 et 50 jours, alors qu'il est aujourd'hui d'une centaine. Ceci entraînera une diminution du manteau neigeux, surtout aux altitudes moyennes. Les étés, quant à eux, déjà très chauds dans notre région, seront encore plus torrides avec une élévation pouvant aller jusqu'à +7 °C pour le scénario le plus pessimiste. Cette tendance sera plus marquée sur

les températures maximales, comme en témoignent les cartes suivantes (Figure 4) qui illustrent l'évolution de la température maximale de l'air au cours de l'été (juin à août) en région.

L'élévation des températures se poursuivra et s'accélèrera dans les décennies à venir jusqu'à ce que la neutralité carbone, au niveau planétaire, soit atteinte.

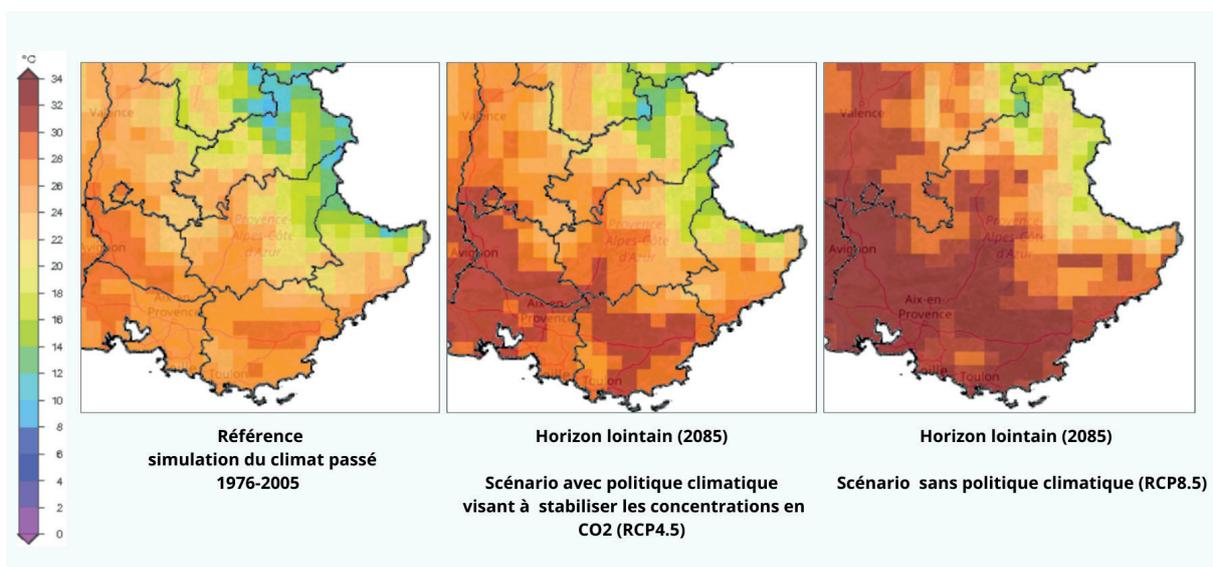


Figure 4. Évolution de la température maximale de l'air au cours de l'été (juin à août) en région Provence-Alpes-Côte d'Azur : exemple de la moyenne estivale de température maximale quotidienne (Drias, données Météo-France, CERFACS, IPSL).

Pour Aix-en-Provence, l'écart des températures estivales par rapport à la période de référence (1975-2005) sera de l'ordre de +3,4 °C à la fin du 21^{ème} siècle d'après le scénario intermédiaire (RCP 4.5) et de plus de +6 °C d'après le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5). À titre de comparaison, l'anomalie de la température de l'air moyenne à Aix-en-Provence durant l'été 2003 a été de +3,5 °C. La canicule de 2003 deviendrait donc en région Provence-Alpes-Côte d'Azur un événement quasi normal, voire frais, dans la seconde moitié du 21^{ème} siècle. L'été, les épisodes de canicule seront plus longs. La canicule de 2003 et les nuits tropicales de 2022 deviendront alors la norme après 2050.

À l'horizon 2071-2100, l'augmentation du nombre de jours chauds (> 25 °C) serait de 32 jours en plaine par

rapport à la période 1976-2005 (RCP 4.5, scénario intermédiaire) et de 59 jours selon le scénario pessimiste (RCP 8.5). Selon ce dernier scénario, les villes littorales pourraient enregistrer en moyenne 90 jours de canicule par an d'ici la fin du siècle et il n'est pas exclu qu'après 2050 les températures puissent dépasser les 50 °C sur le territoire régional.

À l'horizon 2050, la modification des précipitations à l'échelle régionale est peu significative si on prend comme référence le cumul annuel. Les contrastes saisonniers seront, quant à eux, renforcés, avec des étés généralement plus secs et des sécheresses plus longues et plus intenses. À l'horizon 2100, une diminution significative du cumul annuel semble se dessiner pour le scénario le plus pessimiste.

1.2. Une nette amélioration de la qualité de l'air en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, mais encore insuffisante.

1.2.1. L'évolution de la qualité de l'air régionale

Contributeur : Sylvain MERCIER (AtmoSud)

La pollution de l'air est un enjeu majeur de santé publique. En 2022, 100 % de la population de la région réside dans une zone où les concentrations en polluants dépassent au moins une ligne directrice (LD) de l'OMS et environ 5000 personnes résident dans une zone en dépassement d'au moins une valeur limite réglementaire (VL), principalement pour le dioxyde d'azote (NO₂).

En région Provence-Alpes-Côte d'Azur, le secteur des transports joue un rôle majeur dans la pollution atmosphérique : il représente 65 % des émissions d'oxydes

d'azote (dont 40 % pour le routier et 17 % pour le maritime), suivi par le secteur industriel qui émet 22 % des NO_x.

Les particules (PM10 et PM2.5) proviennent majoritairement du secteur résidentiel, où les chauffages domestiques, notamment au bois, émettent 46 % des PM2.5. Le secteur industriel émet 25 % des PM (Figure 5). C'est aussi un secteur émetteur de polluants d'intérêt sanitaire (dont particules ultrafines) dont on ne connaît pas la répartition aujourd'hui.

Part des différents secteurs d'activités dans l'émission des principaux polluants atmosphériques régionaux - Inventaire Atmosud 2021

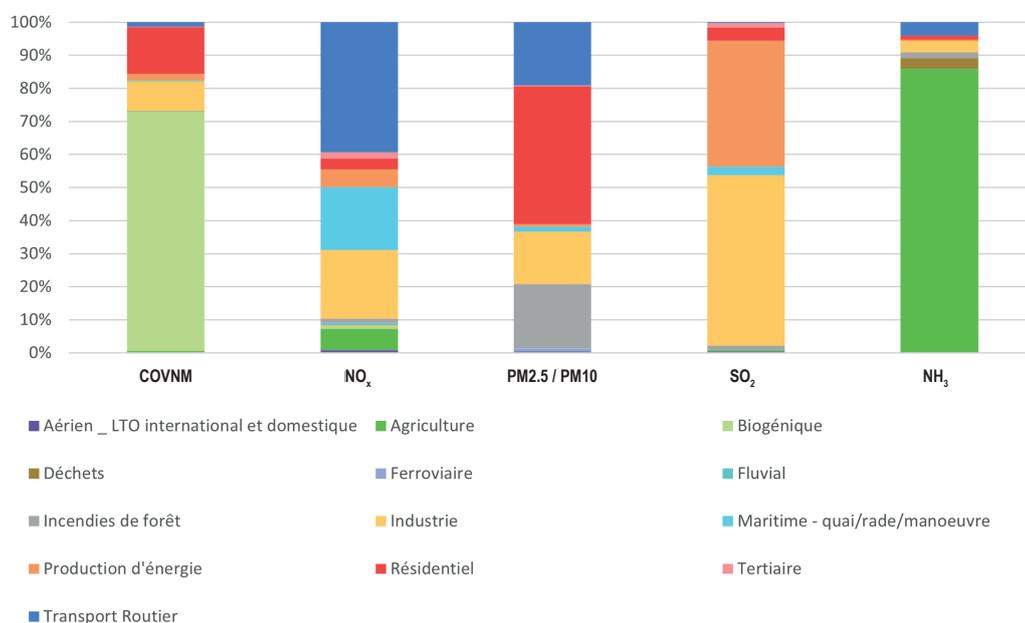


Figure 5. Les émissions des principaux polluants atmosphériques primaires régionaux par secteur d'activité (GREC-SUD, inventaire AtmoSud 2021 v10.1).



Zoom 1. Les principaux polluants atmosphériques régionaux

- **L'ammoniac (NH₃)** : l'ammoniac est lié essentiellement aux activités agricoles (volatilisation lors des épandages et du stockage des effluents d'élevage, et des épandages d'engrais minéraux azotés). C'est un gaz irritant qui possède une odeur piquante, il brûle les yeux et les poumons. Il s'avère toxique quand il est inhalé à des niveaux importants, voire mortel à très haute dose.
- **L'ozone (O₃)** : polluant secondaire issu de réactions photochimiques, l'ozone est un gaz nocif pour la santé humaine et végétale dans la troposphère. Cette molécule joue un rôle de protection des UV (couche d'ozone) dans la stratosphère.
- **Les composés organiques volatils (COV)** : ils constituent une famille très large de produits comme le benzène, l'acétone, le perchloroéthylène, etc., qui se trouvent à l'état de gaz ou s'évaporent facilement dans les conditions classiques de température et de pression lors de leur utilisation. Au niveau planétaire, la majorité des émissions de COV sont des émissions biogènes (COVB) qui proviennent à 90 % de sources naturelles (plantes, certaines zones géologiques qui contiennent du charbon ou du gaz). Les émissions liées aux activités humaines sont beaucoup plus ponctuelles et peuvent parfois devenir prépondérantes localement, en particulier dans les régions fortement industrialisées.
- **Le dioxyde de soufre (SO₂)** : le dioxyde de soufre est un polluant qui provoque une irritation des muqueuses, de la peau et des voies respiratoires (toux, gêne respiratoire, troubles asthmatiques). Il favorise les pluies acides et dégrade la pierre. C'est également un précurseur de particules secondaires en se combinant, sous certaines conditions, avec les oxydes d'azote (NO_x).
- **Les oxydes d'azote (NO_x)** : ils regroupent le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂). Ils sont émis lors de la combustion : chauffage, production d'électricité, moteurs thermiques des véhicules, etc. Une fois dans l'air, le monoxyde d'azote (NO) devient du dioxyde d'azote (NO₂), gaz irritant pour les bronches et favorisant les crises d'asthme et les infections pulmonaires.
- **Les particules ou poussières en suspension (PM)** : on distingue les particules primaires, directement émises dans l'air (anthropiques ou naturelles) et les particules secondaires, formées dans l'atmosphère à la suite de réactions physico-chimiques. Elles sont classées en fonction de leur taille : diamètre inférieur à 10 (PM10) et inférieur à 2,5 micromètres (PM2.5) et sont très nocives pour la santé.

Les populations les plus exposées vivent dans les centres urbains, qui cumulent différentes sources de pollution : transports routiers, maritimes pour les villes portuaires, chauffages urbains, parfois industriels. C'est dans ces zones que les lignes directrices (LD) de l'OMS sont dépassées pour les 3 polluants NO₂, PM, et O₃ avec jusqu'à 3 fois la LD OMS pour le NO₂ à Marseille et Nice. Toutefois, les concentrations d'ozone les plus élevées sont mesurées en zones rurales et en montagne. Le pourtour de l'étang de Berre avec l'industrie pétrochimique et sidérurgique, le pays de Grasse avec l'industrie du parfum, sont des territoires où les populations peuvent être exposées à une diversité d'espèces chimiques qui ne sont pas encore toutes documentées et avec un effet cocktail mal connu. L'ouest des Bouches-du-Rhône et la périphérie des villes se situent à près de 2 fois la LD OMS pour les PM2.5 en lien avec le chauffage au bois, et les activités (transport ou agriculture). Dans les zones périurbaines, les activités résidentielles ou agricoles participent régulièrement au dépassement de la LD OMS pour les PM2.5. Ces zones sont aussi soumises à des émissions de pesticides ou d'ammoniac (NH₃).

Concernant la plupart des polluants réglementés, la qualité de l'air régionale s'est améliorée depuis les années 2000. Seules les concentrations en ozone restent relativement stables (voir §1.3.2).

Entre 2007 et 2019, les secteurs d'activité ayant le plus progressé dans la diminution de leurs émissions sont le secteur des transports routiers, avec une diminution de 45 % des émissions d'oxydes d'azote et de particules fines (PM2.5), et le secteur industriel, avec une baisse des émissions d'oxydes d'azote de 40 % et de 60 % de PM2.5, principalement sur le pourtour de l'étang de Berre. *A contrario*, les émissions du secteur résidentiel restent stables depuis 2014. Celles du secteur maritime et du secteur aérien augmentent de façon constante depuis 2013.

Concernant la plupart des polluants réglementés, la qualité de l'air régionale s'est améliorée depuis les années 2000. Seules les concentrations en ozone restent relativement stables.



Zoom 2. Réglementation sur les seuils sanitaires d'exposition

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a fixé des lignes directrices (en 2021) pour la limitation des concentrations des polluants atmosphériques, grâce à des études épidémiologiques. Concernant l'ozone, le maximum journalier de la moyenne sur 8 heures à ne pas dépasser plus de 3 ou 4 jours par an (percentile 99) est désormais de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et la valeur moyenne d'exposition maximale sur 8h pendant la saison de pointe est de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Valeur limite (VL) : niveau de concentration annuel de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base des connaissances scientifiques, à ne pas dépasser dans le but d'éviter, de prévenir, ou de réduire les effets nocifs de ces substances sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble (n'existe pas pour l'ozone).

Valeur cible (VC) : niveau de concentration annuel de substances polluantes dans l'atmosphère à atteindre à long terme, 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 ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'ozone). Les valeurs cibles d'informations/recommandations et les seuils d'alerte ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'ozone) sont quant à eux des valeurs journalières destinées à la prévention de l'exposition des populations aux pics d'ozone par la mise en place de mesures exceptionnelles et à la sensibilisation.

1.2.2. Les effets de la pollution atmosphérique sur la santé humaine : le cas de l'ozone

Contributeur : Olivier Coulon (ARS Paca)

Si la pollution atmosphérique est si réglementée, à l'échelle régionale, métropolitaine et même européenne, c'est avant tout pour ses effets particulièrement délétères sur la santé humaine. Les particules fines restent les polluants les plus néfastes pour l'organisme, mais l'ozone devient un problème de santé publique majeur dans les villes où les concentrations augmentent significativement (alors que les concentrations en PM2.5 diminuent). Ce dernier est un gaz irritant pénétrant profondément dans l'appareil respiratoire. Dans l'organisme, ses propriétés oxydantes peuvent provoquer une réaction inflammatoire bronchique entraînant une toux sèche, une gêne respiratoire et le déclenchement de crises d'asthme. Des effets cardio-vasculaires liés à l'exposition à ce polluant ont également été constatés.

En région Provence-Alpes-Côte d'Azur, une étude rétrospective (2010-2018) du CHU de Nice¹ sur les effets de la pollution atmosphérique à l'ozone sur les arrêts cardiaques dans la région Niçoise montre que l'exposition brève à une élévation de la pollution à l'ozone est associée à un risque d'arrêts cardiaques hors hôpital, et ce, sans influence des saisons. De cette étude ressort l'intérêt pour le SAMU et les services d'urgences de

connaître en permanence les niveaux du taux d'ozone dans les grandes villes de France, ce qui n'est pas systématiquement le cas.

Certaines personnes sont plus vulnérables ou plus sensibles que d'autres à la pollution de l'air, du fait de leur capital santé ou de leur âge. C'est le cas, par exemple, des nourrissons et des jeunes enfants dont l'appareil respiratoire est encore en cours de développement, des personnes asthmatiques, des personnes âgées ou des personnes travaillant à l'extérieur. Chez des enfants asthmatiques, la hausse des niveaux d'ozone peut notamment provoquer une augmentation de la fréquence des crises d'asthme. Par rapport à la population générale, les personnes vulnérables ou sensibles à la pollution de l'air vont présenter plus rapidement ou plus fortement des symptômes à la suite d'une exposition à cette pollution, que ce soit à court ou long terme. Par conséquent, pour ces publics les plus fragiles et vulnérables, il est particulièrement important de suivre les recommandations spécifiques émises pendant les pics de pollution.



¹ Gibelin Pierre, *Étude de l'impact de la pollution à l'ozone sur les arrêts cardiaques dans la région niçoise*, Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine, Volume 205, Issue 3, 2021, Pages 233-238.

L'Agence européenne de l'environnement (AEE) a récemment évalué les impacts sanitaires de l'ozone. Ils représentaient 24 000 décès prématurés liés aux effets à court terme des concentrations en ozone supérieures à $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (pour 27 pays membres) en 2020. Par ailleurs, 12 523 admissions à l'hôpital pour maladies respiratoires, chez les adultes de 65 ans et plus, en 2019 étaient attribuables à des expositions à l'ozone (pour 23 pays membres).

L'OMS a réévalué en 2021 ses recommandations concernant les niveaux d'ozone. L'organisme a notamment rappelé que le niveau de preuve liant les concentrations d'ozone et les variations de mortalité à court terme est élevé. En France, une étude publiée par l'INSEE en juillet 2021 a corrélé la survenue d'un épisode de pollution à l'ozone à une hausse des admissions à l'hôpital pour motif respiratoire le jour même. Concernant les effets à long terme sur la mortalité, la

force du lien reste à ce jour modérée. L'OMS recommande notamment de poursuivre les études permettant de mieux caractériser ces liens.

Les liens entre ozone et réchauffement climatique ont particulièrement été illustrés par l'épisode de pollution à l'ozone de début septembre 2023 à Paris. Ce type d'épisode tardif est rare et s'explique par des conditions météorologiques exceptionnelles, soulignant les liens étroits entre pollution de l'air et changement climatique. Ces liens se retrouvent également dans l'effet synergique de l'exposition à l'ozone et aux températures élevées : il a été observé que l'impact sanitaire associé à une exposition aux particules et à l'ozone était plus important les jours où les températures étaient particulièrement élevées. Enfin l'ozone favorise les réactions allergiques, celles-ci étant influencées par les modifications des périodes de pollinisation induites par le réchauffement climatique.

1.3. La pollution à l'ozone en région Provence-Alpes-Côte d'Azur

1.3.1. Le processus de formation de l'ozone

Contributeurs : Julien Kammer (LCE) et Sylvain Mercier (AtmoSud)

L'ozone est une molécule gazeuse indispensable à la vie sur Terre mais avec des effets contrastés. Dans la stratosphère (entre 10 et 60 km d'altitude), sa présence en grande concentration forme une couche qui nous protège des rayons UV les plus intenses. En revanche, dans la troposphère, la plus basse couche de l'atmosphère (de 0 à 10 km), celle où évoluent les êtres vivants, l'ozone agit comme un GES et comme un polluant particulièrement néfaste pour la santé. L'exposition à l'ozone entraîne une surmortalité de près de 15 000 personnes par an en Europe.

L'ozone est un polluant secondaire, c'est-à-dire qu'il n'a pas de source directe (émission), mais qu'il est formé *in situ* dans l'atmosphère, à partir d'un ensemble de réactions chimiques. Les molécules impliquées dans ces réactions, et donc à l'origine de la formation d'ozone, sont appelées précurseurs (Figure 6). Ces précurseurs sont principalement les oxydes d'azotes (NO_x) et les composés organiques volatils (COV).

Les COV regroupent un ensemble de molécules organiques (contenant du carbone et de l'hydrogène) volatiles (c'est-à-dire à l'état de gaz dans les conditions am-

biantes : pression atmosphérique d'environ 1000 hPa, 20°C), à l'exception du méthane qui est catégorisé à part. Ils peuvent être émis par de très nombreuses sources, aussi bien d'origines anthropique que végétale. On parle alors de composés organiques volatils biogéniques (COVB). En Provence-Alpes-Côte d'Azur la part des COV anthropiques dans les émissions régionales est plus importante qu'à l'échelle globale, plus de 1/4 des émissions de COV étant d'origine anthropique dans la région, contre environ 10 % à l'échelle globale.

La formation d'ozone dépend également de la présence de lumière qui permet d'initier certaines des réactions nécessaires : on parle alors de réactions photochimiques. C'est pourquoi les concentrations en ozone sont maximales le jour, et que les épisodes de pollution à l'ozone ont lieu à la fin du printemps et en été, lorsque l'ensoleillement est le plus important. Les températures élevées permettent quant à elles d'accélérer ces réactions chimiques et d'augmenter leur rendement. Ainsi, le climat méditerranéen, caractérisé par un nombre d'heures d'ensoleillement particulièrement élevé et de fortes températures estivales, est particulièrement propice à la formation d'ozone.



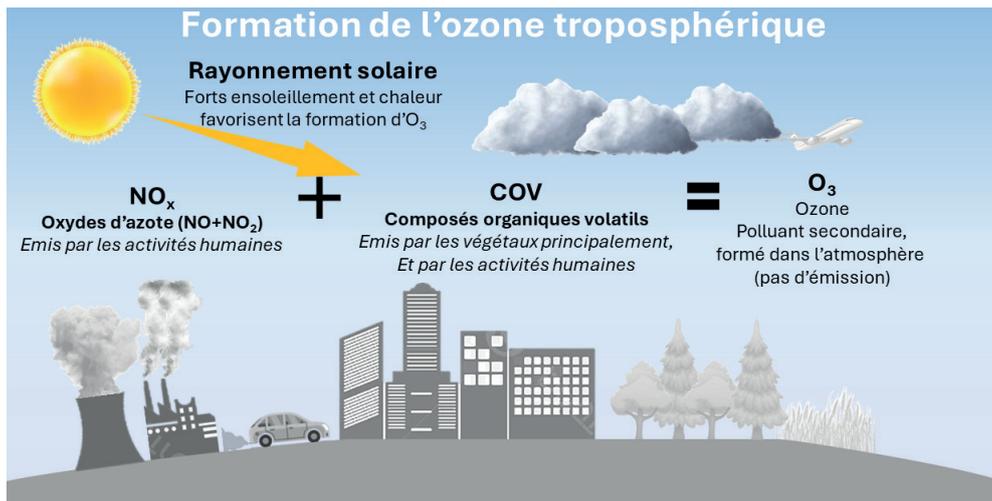


Figure 6. Schématisation de la formation de l'ozone troposphérique (Julien KAMMER, LCE, 2023).

Il est à noter que les relations entre la formation d'ozone et les concentrations en précurseurs dans l'air ne sont pas linéaires, c'est-à-dire que l'augmentation (ou la diminution) de la concentration en précurseurs ne se traduit pas automatiquement par une augmentation (ou une diminution) proportionnelle de la concentration en ozone (Figure 7). Cette non-linéarité traduit la complexité des processus en jeu dans la formation d'ozone.

En milieu urbain, la production d'ozone est limitée par la quantité de COV présente dans l'air, en moindre quantité que les NO_x . De plus, au fur et à mesure de sa production, l'ozone est détruit par des réactions chimiques à l'origine de la formation d'autres polluants oxydants, augmentant ainsi la pollution oxydante globale. Ce phénomène s'observe principalement la nuit, en l'absence de production d' O_3 . Le monoxyde d'azote (NO), en grande concentration dans l'air, participe alors à la destruction de l'ozone selon la réaction suivante : $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$. Dans ce cas, les concentrations en ozone peuvent descendre largement en dessous du niveau de fond naturel de la troposphère.

Les niveaux d'ozone à la surface de la Terre sont naturellement régulés par les puits d'ozone. En plus des réactions avec le monoxyde d'azote, les végétaux constituent un puits particulièrement important, l'ozone se déposant à la surface des végétaux (dépôts secs) ou y pénétrant au travers des stomates en journée (orifices

à la surface des feuilles ou aiguilles, permettant notamment à la plante de capter du CO_2 , voir §2.1.2). Ainsi, en situation rurale, où il n'y a en général pas de NO dans l'air ambiant (sauf passage ponctuel d'un véhicule), une partie de l'ozone est détruite ou captée par la végétation (plantes, sol...). Ce phénomène étant moins puissant la nuit où les plantes ferment leurs stomates et où le vent est moindre, les concentrations descendent donc peu en dessous du niveau de la troposphère.

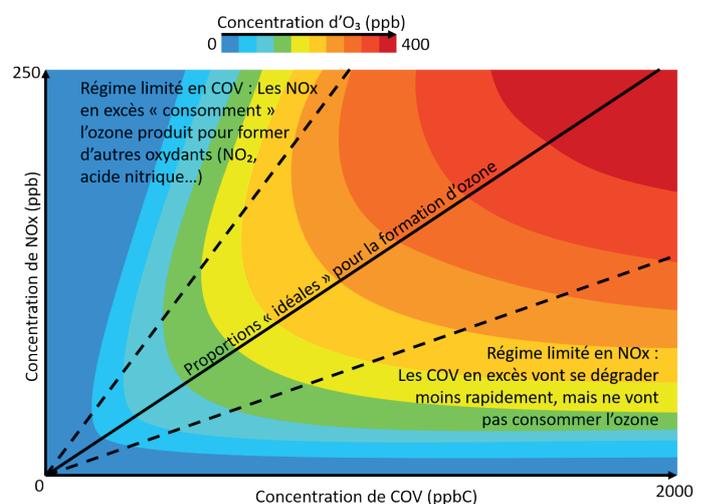


Figure 7. Formation de l'ozone selon différentes proportions de NO_2 et de COV (AtmoSud, 2021).

1.3.2. Tendances et évolutions de la pollution à l'ozone en Provence-Alpes-Côte d'Azur

Contributeurs : Julien Kammer (LCE) et Sylvain Mercier (AtmoSud)

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est la région française la plus exposée à de fortes concentrations de

fond en ozone et à des épisodes de pics de pollution, à cause du climat méditerranéen favorable à sa formation

et aux émissions massives de précurseurs (voir §1.2). S'additionnent à la production locale les apports issus de la troposphère libre (qui correspond à la couche de la troposphère plus stable, non concernée directement par les variations des émissions locales) qui maintiennent les concentrations moyennes en ozone régionales à des niveaux proches de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les habitants de la région sont régulièrement exposés à des valeurs de concentration en ozone dépassant les recommandations de l'OMS : 87 % du territoire et 76 % de la population ont connu un dépassement de la valeur cible pour la protection de la santé en 2022, même si des disparités existent sur le territoire.

Contrairement à la plupart des polluants, les concentrations moyennes annuelles en ozone les plus élevées sont réparties suivant une bande qui ceinture le centre des Bouches-du-Rhône, le Vaucluse, le sud des Alpes de Haute-Provence et le département du Var (Figure 8). C'est également dans cette zone, essentiellement rurale, que s'observe le plus grand nombre de dépassements du seuil d'information et de recommandation (voir Zoom 1). Il s'agit de la zone qui reçoit des masses d'air polluées, émises essentiellement par le pôle industriel de Marseille-Berre, qui viennent s'ajouter à la pollution locale et continentale, en particulier en période estivale.

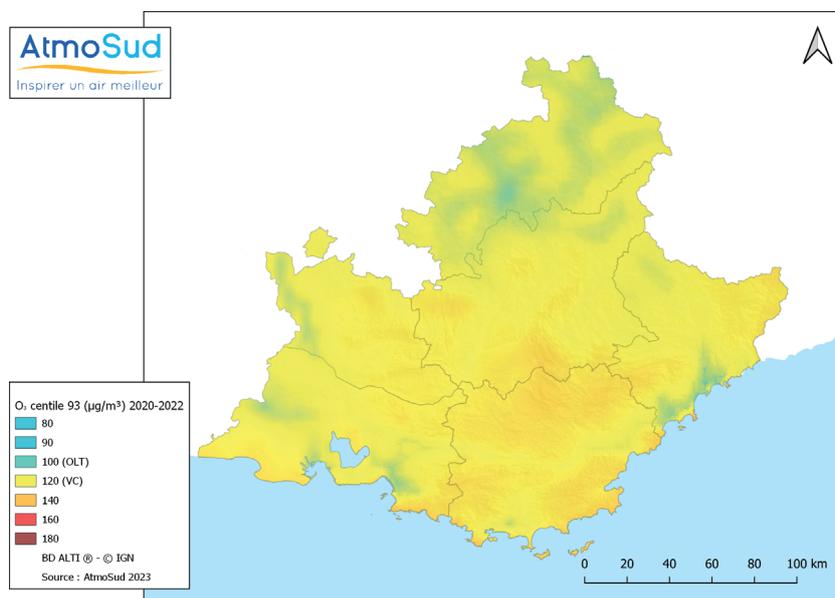


Figure 8. Cartographie de la pollution à l'ozone chronique annuelle en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (AtmoSud, 2023).

Centile 93 des maximums journaliers des moyennes sur 8h, moyenne 2020-2022. Une valeur de centile 93 supérieure à $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ signifie un dépassement de la valeur cible.

En fonction de l'indicateur pris en compte, la tendance en ozone sur les 30 dernières années n'évolue pas forcément dans le même sens. Ainsi, la moyenne annuelle des concentrations tend à augmenter légèrement, justifiant les préoccupations grandissantes autour de ce polluant, le pic de pollution² reste stable et le percentile 93 des max sur 8h³ (fréquence et niveau des pointes d'ozone, appelées aussi épisodes de pollution) tend à baisser (Figure 9). Ces tendances traduisent une évolution de l'exposition à l'ozone de la population de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, qui tend à être moins extrême et moins ponctuelle, mais de plus en plus chronique (exposition permanente, sur le long terme) dans les zones urbaines.

Info+

Il convient de bien distinguer pic de pollution et pollution chronique, qui ne traduisent pas le même état de pollution de la troposphère. Dans le premier cas, l'augmentation des niveaux d'ozone est due à l'augmentation rapide et passagère de la production locale, qui engendre une pollution photo-oxydante avec un grand nombre de composés gazeux radicalaires et oxydants. La pollution chronique, elle, de plus en plus soumise aux apports extérieurs en ozone, ne s'accompagne pas nécessairement d'une hausse de production locale des niveaux des polluants précédents.

² Le pic saisonnier est l'indicateur d'ozone annuel de l'OMS. Il est représentatif des niveaux d'ozone l'après-midi durant toute la saison chaude.

³ Le percentile 93 des max sur 8h correspond à la valeur cible européenne : c'est la valeur du 26^{ème} maximum journalier des moyennes glissantes sur 8h le plus élevé. Il est représentatif des niveaux d'ozone l'après-midi durant les jours les plus pollués de l'année.

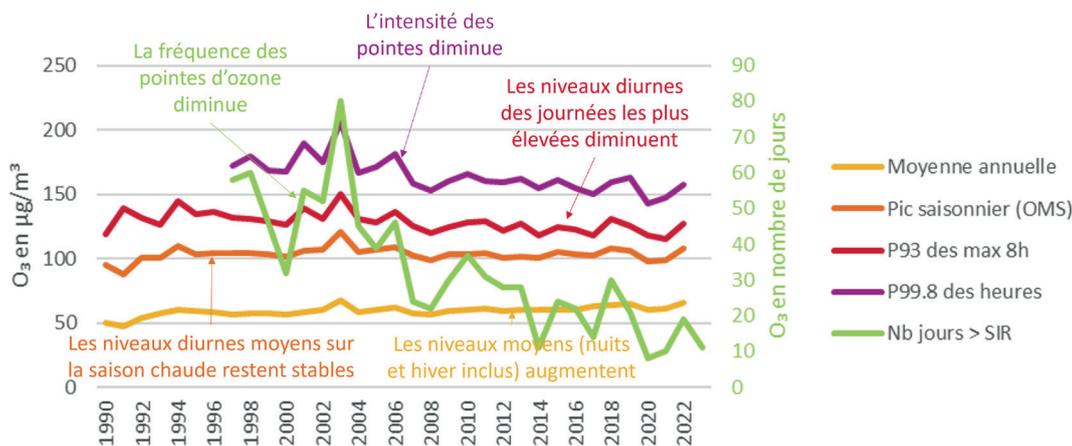


Figure 9. Tendence d'évolution de différents indicateurs de l'ozone depuis 1990 (AtmoSud, 2023).
SIR : seuil d'information et de recommandation fixé à 180 µg/m³.

À ces grandes tendances d'évolutions des concentrations en ozone régionales, s'additionnent des disparités géographiques (voir §1.3.1). En zone rurale, les concentrations chroniques comme de pointe sont plus élevées. On y observe très peu de valeurs basses (inférieures à 40 µg/m³) et une baisse lente des concentrations. Sur les sites AtmoSud ruraux de Cians, du Cheiron, de Plan d'Aups et de l'Observatoire de Haute-Provence, les concentrations aussi bien diurnes que nocturnes n'ont baissé que dans une gamme de concentration oscillant entre -0,8 et 0 µg/m³ par an selon les sites.

Or, entre 2007 et 2020, les précurseurs de l'ozone ont baissé en région Provence-Alpes-Côte d'Azur de 46 % pour les NO_x et de 17 % pour les COV (dont 43 % pour les COV d'origine anthropique). Cette faible baisse des niveaux d'ozone, en dépit d'une nette baisse des émissions régionales de précurseurs, signifie que la baisse de production régionale est compensée par une hausse des apports d'autres régions.

Info+

Grâce aux politiques de réduction, les pics d'ozone sont aujourd'hui de plus en plus dépendants d'épisodes d'émissions exceptionnels, là où il y a 20 ans, les émissions polluantes continues sur l'année étaient suffisantes pour que la météo soit le principal facteur de variation du smog photochimique. Aujourd'hui, ces pics de pollution ne se déclenchent que lorsqu'une activité industrielle conduit à une émission de précurseurs plus élevée que la normale et en concomitance avec un épisode de forte chaleur.

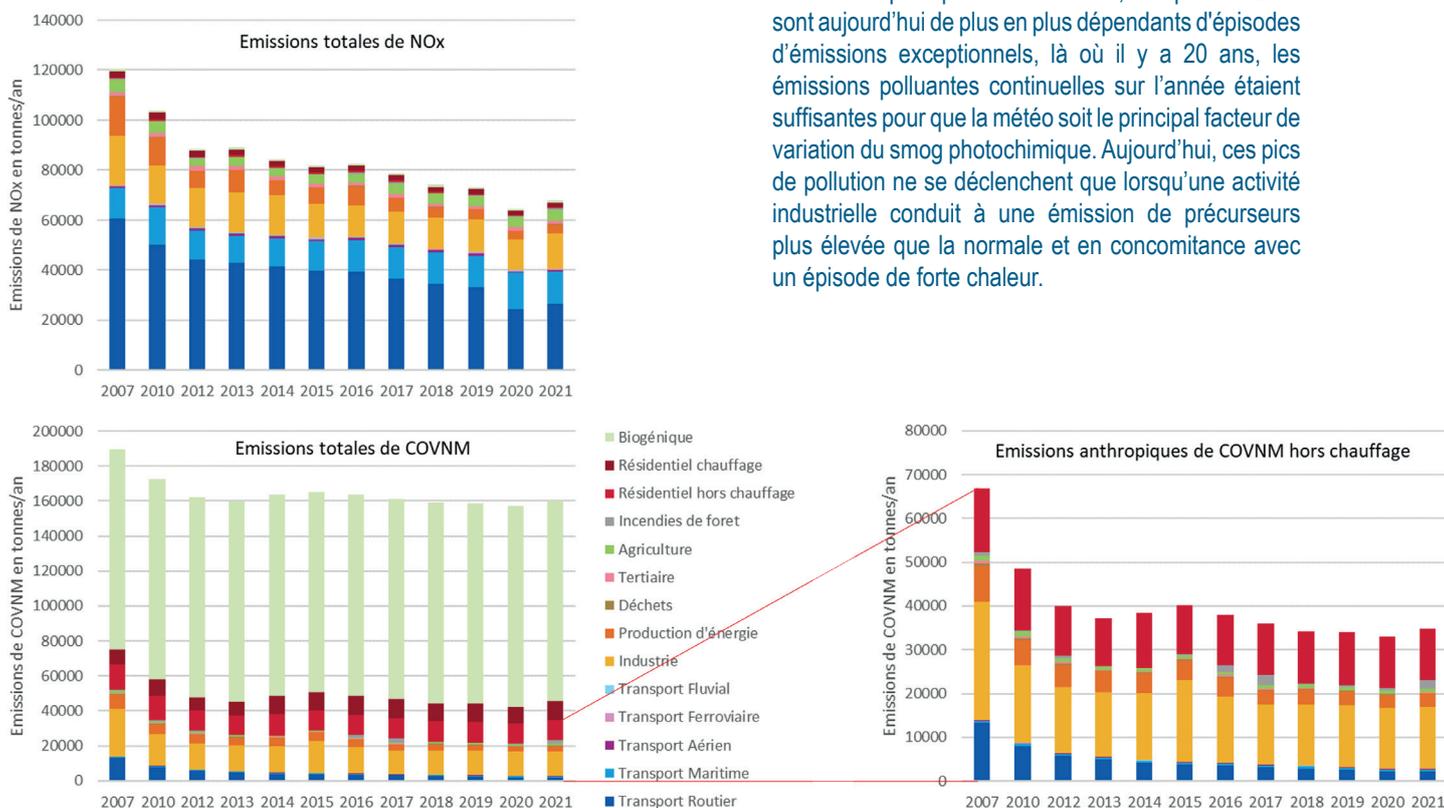


Figure 10. Évolution des émissions des précurseurs de l'ozone : en haut, oxydes d'azote et en bas, composés organiques volatils non méthaniques (AtmoSud, 2023).

En situation urbaine, sur le site AtmoSud de Marseille Longchamp, où le niveau en NO est plus élevé du fait des émissions par les transports, on observe davantage de valeurs inférieures à $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, qui correspondent aux niveaux nocturnes en saison froide, lorsque la production d'ozone locale est faible. Cependant, depuis 20 ans, la fréquence de ces valeurs basses diminue, au profit des classes de concentrations intermédiaires (entre 60 et $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), plus proches du niveau de fond troposphérique. Cette évolution à la hausse est liée à la

baisse des concentrations de NO qui limite la consommation de l'ozone dans les réactions d'oxydation entraînant également une diminution des concentrations des espèces secondaires oxydantes produites par ces réactions : NO_2 , acide nitrique, nitrates organiques, AOS (aérosol organique secondaire), aldéhydes... Les concentrations rurales restant relativement stables, c'est cette faible hausse des niveaux urbains qui explique la hausse des niveaux moyens d'ozone dans la région.

1.3.3. Projections sur l'évolution des concentrations en ozone en fonction des scénarios climatiques

Contributeur : Sylvain Mercier (AtmoSud)

À une échelle plus globale, les mesures historiques réalisées sur des sites d'altitude des Pyrénées et des Alpes, collectées par le Laboratoire d'aérologie de Toulouse, révèlent que les concentrations moyennes en ozone de la troposphère libre ont augmenté durant tout le 20^{ème} siècle, partant de 10 ppb ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en 1910 pour atteindre 50 ppb ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en 1990. Ces niveaux semblent stagner depuis, voire baisser légèrement.

Des données plus récentes de l'Académie des Sciences⁴ confirment cette hausse des concentrations durant le 20^{ème} siècle, suivie d'une stagnation en Eu-

rope, tandis que les niveaux d'ozone mesurés sur des montagnes d'Asie et d'Amérique du Nord continuent à croître.

Toutes ces données semblent indiquer une contribution en baisse de l'Europe aux concentrations en ozone de la troposphère libre de l'hémisphère nord, cohérente avec la baisse des émissions de précurseurs. Cette baisse de contribution serait contrebalancée par celle de la zone asiatique et par un rôle non identifiable à ce stade de l'Amérique du Nord. Dans l'hémisphère sud, les niveaux semblent généralement plus bas et plus stables.

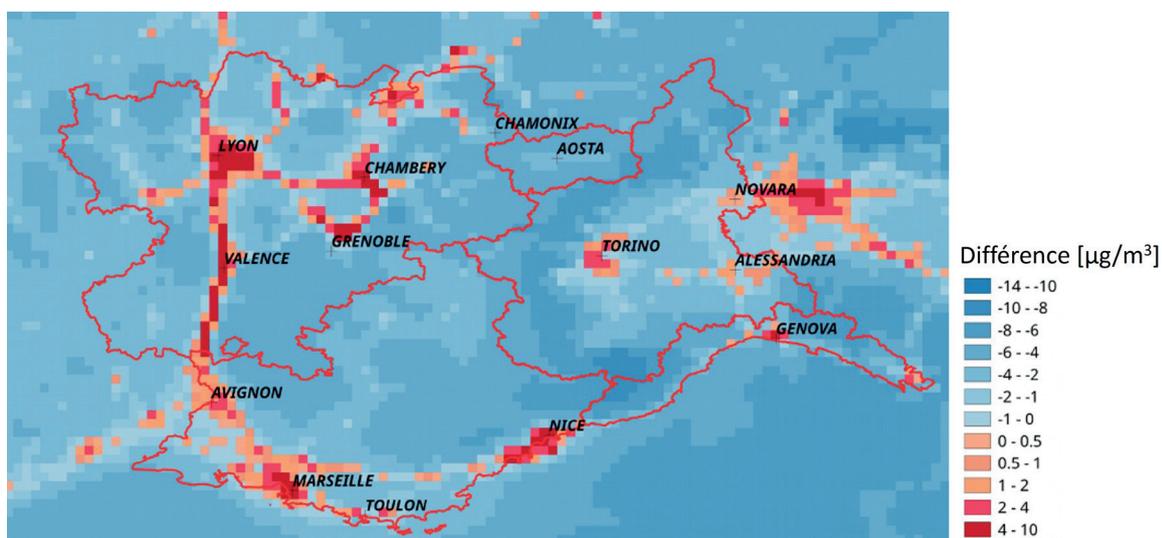


Figure 11. Évolution des concentrations en ozone entre 2013 et 2030 en régions Auvergne-Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte d'Azur, ainsi qu'en Vallée d'Aoste et Ligurie, avec un scénario d'évolution des émissions de précurseurs au fil de l'eau et prise en compte du RCP 4.5 (AtmoSud, 2019).

⁴ Chanin M.L., Clerbaux Cathy, Godin-Beekmann S. *L'évolution de l'ozone atmosphérique. Le point en 2015*, Académie des Sciences (2015).

À l'horizon 2030, les résultats sont cohérents avec l'évolution passée observée : les niveaux d'ozone diminuent sur la majeure partie de la région en conséquence de la baisse globale des précurseurs de l'ozone, mais augmentent dans les milieux urbains et plus pollués (Figure 11), la baisse des précurseurs (NO_x) en ville diminue en effet le phénomène de consommation de l'ozone par NO (voir §1.3.1). À l'inverse, dans le scénario où les émissions de précurseurs n'évoluent pas entre 2013 et 2030, mais que le climat se réchauffe (RCP 4.5), alors une hausse des niveaux d'ozone jusqu'à $2 \mu\text{g.m}^3$ est attendue sur la majeure partie de la région.

Le changement climatique, par ses nombreux impacts, joue un rôle (complexe) dans l'augmentation globale des niveaux d'ozone (Figure 12). Étant donné son caractère photochimique, les probables accroissements du rayonnement solaire et des températures estivales régionales stimuleront la formation de l'ozone troposphérique, respectivement via la rapidité et la réactivité des réactions chimiques, entraînant les concentrations à la hausse. De plus, les émissions de COV biogéniques (COVB) seront également fortement influencées (avec une incertitude importante) par ces paramètres climatiques (voir §2.1.2). De manière additionnelle, l'affaiblissement des végétaux par le changement climatique, via l'accentuation du stress hydrique et thermique ainsi que des incendies, pourrait diminuer leur capacité d'absorption de l'ozone. Les incendies agissent éga-

lement comme des sources de CO et de COV. À l'inverse, à une échelle européenne, certains facteurs, qui concernent moins la région, pourraient limiter les concentrations en ozone comme l'augmentation de l'humidité.

Info+

Le projet européen CLIMAERA, intégré dans le programme de coopération franco-italien ALCOTRA (Provence-Alpes-Côte d'Azur, Auvergne-Rhône-Alpes, Ligurie, Piémont et Vallée d'Aoste) a étudié les effets combinés de différents scénarios climatiques issus des travaux du CMCC (Centre euro-méditerranéen sur le changement climatique) et de différents scénarios d'émissions de polluants établis à partir du modèle GAINS⁵.

Dans le projet européen ALP'AERA (2023-2026), AtmoSud, les membres des directions régionales de l'environnement français et italiens du territoire ALCOTRA, et le JRC (European Commission's Joint Research Centre) approfondiront les connaissances sur les mécanismes de formation de l'ozone et sur les raisons de son augmentation ou de sa stagnation, par notamment la détermination de l'influence des précurseurs de l'ozone dans les concentrations. AtmoSud espère pouvoir aussi identifier la part des contributions transfrontalières dans l'augmentation des niveaux d'ozone.



Le rôle du changement climatique sur l'évolution de l'ozone est complexe et dépend de nombreux paramètres.

Augmentation de facteurs climatiques	Effet	Impacts sur les niveaux d'ozone
Température	Chimie plus réactive	↗ ozone
	Réaction des NO avec les PAN*	↗ ozone
	Augmentation des émissions biogéniques (COV, NO)	↗ ozone
Concentration de CO_2	Diminution des émissions biogéniques	↘ ozone
Radiation solaire	Photochimie plus rapide	$\text{NO}_x \gg \text{COV}$: ↗ ozone $\text{NO}_x \ll \text{COV}$: ↘ ozone
Précipitations	Dépôt humide de précurseurs solubles (HNO_3)	↘ ozone
Humidité	Augmentation de la destruction de l'ozone	$\text{NO}_x \gg \text{COV}$: ↗ ozone
		$\text{NO}_x \ll \text{COV}$: ↘ ozone
Sécheresse	Diminution de l'humidité et température en augmentation	↗ ozone
	Stress hydrique des végétaux et réduction de l'ouverture des stomates	↗ ozone
	Augmentation de la fréquence des feux	↗ ozone
Inversion thermique	Augmentation des situations non dispersives	↗ ozone
	Augmentation des vagues de chaleur	↗ ozone

*PAN ou NPA : nitrate de peroxyacétyle

Figure 12. Impacts du changement climatique sur les niveaux d'ozone (Agence européenne de l'environnement⁶, modifié).

⁵ <https://gains.iiasa.ac.at/models/>

⁶ <https://www.eea.europa.eu/fr>

2. Le rôle de la végétation méditerranéenne sur la qualité de l'air dans un contexte de changement climatique

2.1. La participation de la végétation méditerranéenne à la production d'ozone

2.1.1. Les COVB : des précurseurs d'ozone

Contributeurs : Julien Kammer (LCE) et Elena Ormeno Lafuente (IMBE)

Les composés organiques volatils (COV), dont les COV d'origine biogénique (COVB), sont des acteurs majeurs de la formation d'ozone (voir §1.3.1). Ces COVB sont produits par les différents organes du végétal vivant (feuilles, fruits, fleurs, tronc, racines) ou en décomposition au sol. Leurs fonctions sont multiples : défense contre les prédateurs (herbivores), les pathogènes, et

les stress thermique, hydrique et oxydant. Ils servent également à la communication avec d'autres organismes (plantes, animaux) et à la reproduction. Plusieurs centaines de COVB différents ont été recensés, classifiés par grandes familles, possédant différents potentiels de formation d'ozone.



Zoom 3. L'O3HP (Oak Observatory at OHP)

La nécessité de mieux comprendre le fonctionnement de la forêt méditerranéenne, afin d'en prévoir les évolutions futures face au changement climatique, a conduit en 2009 au développement, par le CNRS et Aix-Marseille Université, de la plateforme expérimentale O3HP concernant la forêt de chênes pubescents.

Ce dispositif a été mis en place sur le site de l'Observatoire de Haute-Provence, prestigieux observatoire astronomique du CNRS, situé à proximité de Manosque et implanté au cœur d'une centaine d'hectares de chênaies. Il vient compléter, pour la région méditerranéenne, celui, précurseur, installé par le CEFÉ à Puechabon près de Montpellier concernant le chêne vert et celui installé par l'INRAE à Roquefort-la-Bédoule s'intéressant au pin d'Alep.

L'O3HP est organisé autour de trois éléments, installés au sein d'une parcelle de chênes pubescents accompagnés d'érables de Montpellier : un système de passerelles instrumentées, un système d'exclusion de pluie (photos 2 et 3) et un réseau de capteurs.

Piloté par l'IMBE (Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale) et la fédération de recherche ECCOREV (Ecosystèmes continentaux et risques environnementaux), l'O3HP associe écologues, botanistes, physiciens de l'atmosphère et physiologistes.



Photos 2 et 3. Parcelle de 300 m² située à l'O3HP (AnaEE - France et Europe) permettant de simuler les précipitations futures à l'aide d'un toit qui se ferme pendant ~20 jours par an (© Elena Ormeno Lafuente).

2.1.2. Les principales essences régionales : de forts émetteurs de précurseurs

Contributeurs : Elena Ormeno Lafuente (IMBE) et Julien Kammer (LCE)

Sur la zone méditerranéenne française, le chêne pubescent, le chêne vert et le pin d'Alep sont les espèces naturelles les plus abondantes, occupant respectivement 440 000 ha, 281 000 ha et 244 000 ha.

Les espèces végétales se classifient en émetteurs de COVB négligeables ($< 0,1 \mu\text{g/g.h}$)⁷, faibles ($< 0,1 - 1,0 \mu\text{g/g.h}$), modérés ($1 - 10 \mu\text{g/g.h}$) ou forts ($> 10 \mu\text{g/g.h}$), en fonction de la quantité de composés émise par le feuillage « vert ». Ainsi, le pin d'Alep et le chêne vert qui émettent principalement des monoterpènes, avec des taux d'émission de l'ordre de $1-10 \mu\text{g/g.h}$ et $10-50 \mu\text{g/g.h}$, sont considérés comme des émetteurs respectivement modérés et forts. Le chêne pubescent, quant à lui, libère principalement de l'isoprène, avec de forts taux d'émission, pouvant atteindre $80 \mu\text{g/g.h}$ pendant la saison estivale.

Si aucune étude n'a évalué la contribution de ces espèces végétales à la formation d'ozone troposphérique à l'échelle méditerranéenne, il est probable que ces trois espèces y contribuent de manière comparable annuellement. En effet, bien que l'isoprène possède un potentiel de formation d'ozone troposphérique plus élevé que les monoterpènes, le chêne pubescent participe à l'émission d'isoprène seulement pendant la période végétative, soit d'avril à décembre (Figure 13), alors que le pin d'Alep et le chêne vert émettent des monoterpènes tout au long de l'année.

De plus, malgré ses émissions plus faibles, le pin d'Alep présente la particularité de posséder des réservoirs de terpènes dans ses aiguilles. Lorsque les conditions environnementales (ex. stress hydrique sévère) impactent fortement le fonctionnement de l'arbre et donc la synthèse et l'émission de COVB, ces réservoirs assurent leurs émissions, alors que chez les espèces végétales sans structures de stockage, les émissions de COV cessent.

Plus récemment, des recherches ont mis en évidence le potentiel d'émission de la litière (feuilles mortes en décomposition au sol). Celle du pin d'Alep représente une source d'émission modérée de COVB ($\sim 1 \mu\text{g/g.h}$), pouvant toutefois avoisiner les émissions libérées par la canopée après trois mois de décomposition au sol, alors que les litières des chênaies libèrent des quantités négligeables de COVB ($0,1 \mu\text{g/g.h}$).

Toutefois, le degré de compréhension des émissions du compartiment « litière » reste extrêmement faible en comparaison des émissions de la canopée et est complètement absent des modèles globaux d'émissions de COV, tout comme des inventaires d'émissions.

Les principales essences forestières de la zone méditerranéenne sont considérées comme des émetteurs modérés (pin d'Alep) et forts (Chêne vert et Chêne pubescent).

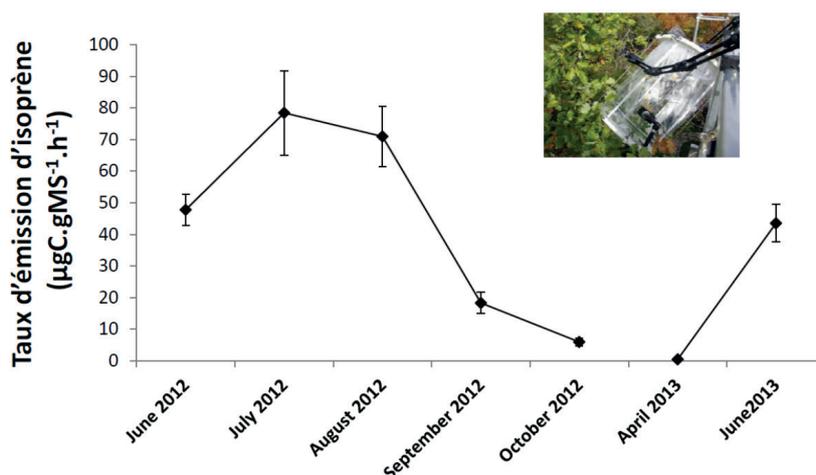


Figure 13. Émissions d'isoprène des branches du chêne pubescent à l'O3HP mesurées sous climat naturel (sans restriction des précipitations) à l'aide d'une chambre dynamique (Genard-Zielinski *et al.*, 2018 modifié ; projet ANR-Sec-Prime2 coordonné par Catherine Fernandez).

⁷ Microgramme de COV par gramme de matière sèche par heure.

2.1.3. Quelles évolutions des émissions de COVB face au réchauffement climatique ?

Contributeur : Elena Ormeno Lafuente (IMBE)

La capacité à émettre des COVB par la végétation est essentiellement modulée par la température, la lumière et la sécheresse. Ainsi, ces émissions évolueront avec le changement climatique. L'émission de COVB par la canopée augmente exponentiellement avec la température, jusqu'à environ 40 °C, puis décroît en lien avec le ralentissement des processus physiologiques liés aux fortes températures. De plus, en cas de sécheresse modérée, les émissions de COVB sont amplifiées car prioritaires par le végétal pour leur action antioxydante.

À l'échelle de la région méditerranéenne, les modèles existants prévoient, pour le chêne pubescent, une hausse remarquable des émissions de COVB (+240 %) en 2100 si l'on considère une hausse de la température moyenne annuelle de +3,4 °C (scénario RPC 8.5). Cette hausse s'élèverait à +280 % si l'on considère un scénario climatique futur à la fois plus chaud et modérément plus sec (-25 % des précipitations estivales)⁸. Dans ce climat futur plus chaud, la végétation partici-

pera donc davantage à la formation d'ozone troposphérique. En revanche, dans un scénario où les sécheresses deviennent chroniques et sévères, la capacité des arbres à synthétiser puis émettre des volatils serait grandement amoindrie. La végétation deviendrait alors une source moins importante d'émission de précurseurs de l'ozone.

Les feux de forêt contraignent également la capacité des arbres à produire des COVB. Les pinèdes de pin d'Alep (mais aussi d'autres pinèdes méditerranéennes), voient leurs réserves en COVB (puis leurs émissions) limitées de 75 % dans l'année qui suit les feux d'intensité modérée. C'est sans compter l'accélération de la croissance du pin d'Alep depuis le début du 19^{ème} siècle liée à des plantations, une colonisation naturelle due à son caractère expansionniste ainsi qu'une forte adaptation et résilience face au feu, qui compenseront sans doute ces émissions diminuées.

2.2. La végétation méditerranéenne, vulnérable au changement climatique et à la pollution de l'air

2.2.1. Les peuplements forestiers face au réchauffement climatique en Provence-Alpes-Côte d'Azur

Contributeurs : Maxime Cailleret (INRAE) et Cécile Bergeot (AIR Climat)

Le climat méditerranéen, caractérisé par des sécheresses estivales récurrentes, impose des contraintes importantes sur les écosystèmes forestiers, qui ont su s'adapter, faisant du stress hydrique et dans une moindre mesure la chaleur qui l'accompagne, partie intégrante de la dynamique naturelle des peuplements. Si la croissance des arbres a bénéficié de l'augmentation des températures, des dépôts azotés et de la concentration de CO₂ dans l'air au cours du 20^{ème} siècle, l'augmentation de la durée et de la récurrence des périodes de sécheresse depuis les 30 dernières années, a contrebalancé ces effets et a entraîné une dégradation de la santé des écosystèmes forestiers.

Lors d'une sécheresse, les arbres stoppent leur croissance et ferment leurs stomates pour réduire les pertes en eau mais au détriment de leur assimilation de carbone. Si le déficit hydrique devient très intense, il peut

entraîner une rupture du système hydraulique des plantes, engendrant la chute de feuilles, la perte de branches, parfois jusqu'à la mort de l'arbre. À plus long terme, les individus adoptent des modifications architecturales pour faire face à la sécheresse, telles que la diminution du nombre et de la taille des branches et de la surface de leurs feuilles. Ces évolutions limitent à nouveau l'assimilation du carbone, et ainsi la croissance des arbres et de leurs réserves (composés carbonés), qui ne pourront donc pas être utilisés pour lutter contre les attaques de pathogènes. Avec l'élévation des températures, la saisonnalité du processus de croissance des individus est modifiée. Par exemple, certaines espèces comme le pin d'Alep ont désormais une croissance ininterrompue en hiver et une apparition des boutons floraux avancée d'au moins 2 mois par rapport à 1970.

⁸ Démonstré par les chercheurs de l'IMBE et le LSCE (Genard-Zielinski et al., 2018).

La vulnérabilité des individus au changement climatique varie en fonction de l'espèce, de la densité du peuplement, des conditions topographiques et édaphiques locales. De plus, d'autres facteurs vont interagir et accentuer les stress subis par les arbres tels que la pollution de l'air (à l'ozone notamment), et la présence d'agents pathogènes qui ont largement contribué à accentuer la défoliation et la mortalité des arbres, comme les scolytes, le gui, les insectes défoliateurs (par ex. les chenilles processionnaires) ou les champignons pathogènes.



Photos 4 et 5. Mortalité au sein d'un peuplement de pins d'Alep et de chênes vert à Lioux dans le Luberon (© GREC-SUD, 2023).

Les dépérissements de peuplements autochtones sont observables dès la fin des années 90. À l'échelle régionale, la moitié des peuplements régionaux étaient considérés comme dépérissants en 2018. Si les essences les plus exposées sont le sapin et le pin sylvestre en dessous de 800 mètres d'altitude, le chêne pubescent montre des symptômes de dépérissement importants avec un déficit foliaire moyen ayant doublé

depuis les années 2000 (Figure 14) et un pourcentage de branches mortes en hausse. Le pin d'Alep et le chêne vert, essences typiquement méditerranéennes, présentent également des déficits foliaires importants (entre 40 et 50 %) en Provence calcaire, ainsi que dans toute la région Méditerranéenne.

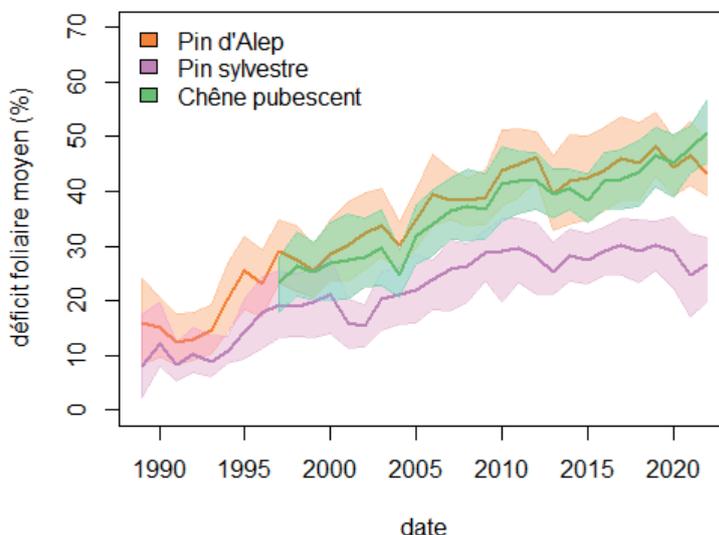


Figure 14. Pourcentage moyen de déficit foliaire depuis 1989 pour 3 essences majoritaires de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur sur les placettes permanentes du Département de la santé des forêts (Maxime Cailleret, 2023).

Ces dépérissements forestiers, par l'accumulation de biomasse sèche et l'ouverture du couvert, augmentent la combustibilité des milieux et le risque incendie déjà accru par la récurrence des fortes chaleurs et des sécheresses ces dernières années.

À l'échelle régionale, la moitié des peuplements forestiers étaient considérés comme dépérissants en 2018.



2.2.2. Exposition à l'ozone des écosystèmes forestiers régionaux et risques écologiques

Contributeurs : Laurence Dalstein (GIEFS) et Cécile Bergeot (AIR Climat)

En région méditerranéenne et dans une partie des Alpes du Nord, les concentrations en ozone sont cinq fois supérieures au seuil de protection des forêts, ce qui dégrade leur santé. Les valeurs dépassent en effet des niveaux critiques, notamment en montagne. Le risque d'endommagement des forêts devient élevé lorsque l'exposition à l'ozone cumulée, au-delà d'une concentration limite (40 ppb)⁹, excède le seuil phytotoxique (5 000 ppb.h)¹⁰.

Un certain nombre d'essences arborées et arbustives sont concernées : les pinèdes, les conifères d'une manière générale, mais aussi parmi les feuillus, peupliers, bouleaux, érables, frênes, charmes, sorbiers, tilleuls, saules, hêtres... et de nombreuses espèces herbacées et ornementales, la vigne, les légumineuses... À l'échelle régionale, les pins et les hêtres sont les essences les plus sensibles.



Zoom 4. Le projet MITIMPACT

Le projet européen transfrontalier MITIMPACT avait pour objectif d'évaluer les impacts de la pollution photochimique (ozone) et du changement climatique sur la végétation transfrontalière (France-Italie), afin de définir des stratégies d'adaptation pour préserver la santé des forêts et des plantes. Une équipe interdisciplinaire a été formée pour mener ce projet, avec les organismes IPLA, ARPA Piémont, CNR-IRET, GIEFS et GeographR.

De 2017 à 2021, les organismes ont œuvré en laboratoires et sur le terrain pour évaluer les dégâts provoqués par les concentrations d'ozone, modéliser les concentrations d'ozone sur l'espace transfrontalier franco-italien, cartographier à fine échelle spatiale l'évolution des températures de l'air et des précipitations et définir des stratégies d'adaptation des forêts au changement climatique.

Dans le sud-est de la France, 21 placettes localisées sur le littoral azuréen, dans le moyen pays et dans le Parc national du Mercantour ont été quotidiennement suivies par des observateurs du GIEFS. Les 3 espèces observées (pin d'Alep, pin sylvestre et pin cembro) avaient chacune 7 sites d'études.

Les résultats obtenus questionnent l'avenir de certains peuplements forestiers avec des symptômes de dépérissement très marqués, probablement accentués par les sécheresses récurrentes. Cette étude démontre que la pollution à l'ozone, directement liée aux activités anthropiques, a un impact réel sur les écosystèmes forestiers, même situés dans des sites naturels protégés éloignés des grands pôles urbains.

Depuis les années 2000, un programme européen stratégique de protection des forêts a été lancé sur la base du réseau de surveillance intensive du PIC-Forêts pour l'évaluation, la validation et la cartographie des dommages visibles causés par l'ozone sur la végétation, en tenant compte, d'une part, des réactions observées sur les essences arborées principales (MTS) de chaque placette forestière et d'autre part, de ce qui est observé sur la végétation naturelle issue de sites d'échantillonnage exposés à la lumière (LESS), souvent à la lisière de la forêt. La volonté est de disposer d'informations

quantitatives sur l'effet réel de l'ozone. C'est grâce à l'observation de lésions visibles spécifiques à l'ozone sur les feuilles et les aiguilles que l'on peut détecter la présence de symptômes sur le terrain. Cette méthodologie a été utilisée pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

La concentration d'ozone dans l'air n'est pas directement corrélée aux dommages engendrés aux peuplements forestiers. L'expression des symptômes liés à l'exposition à l'ozone dépend fortement du flux d'ozone

⁹ Moyennes horaires cumulées de concentration en ozone au-dessus de 40 ppb (équivalent de 80 ug/m³).

¹⁰ Partie par milliard par volume.

circulant à travers les stomates (conductance stomatique) et de la sensibilité propre des espèces à l'ozone. De même, la conductance stomatique, la capacité d'absorption du polluant et la réponse des écosystèmes dépendent elles-mêmes, directement ou indirectement, surtout en secteur montagneux, de certaines variables climatiques : niveau des précipitations, de l'humidité relative, des températures, du rayonnement solaire et de la teneur en eau du sol. Dans les Alpes-Maritimes, par exemple, où le gradient altitudinal est important entre la côte, le moyen-pays et la haute montagne, les résultats observés montrent un effet d'altitude, avec des symptômes aggravés sur les hauts versants. En raison de régulières inversions thermiques (température de l'air plus froide en vallée qu'en moyenne ou haute altitude), l'ozone se concentre dans les masses d'air plus chaudes formées en journée et stagne sur les crêtes.

Les polluants primaires arrivant en fin de journée sont piégés en fond de vallée (air plus frais et plus dense) et ne peuvent ainsi pas détruire l'ozone en altitude.

Sur une même période, le risque d'endommagement pour la forêt est étroitement lié à l'exposition à l'ozone, aux caractéristiques intrinsèques des arbres (âge, phénologie), aux capacités individuelles de réparer ou atténuer l'impact de l'ozone par des processus de défense, aux facteurs nutritionnels, climatiques et environnementaux tels que l'altitude, le niveau d'humidité, l'exposition à des parasites...

Dans les Alpes-Maritimes, on observe un effet d'altitude, avec des symptômes aggravés sur les hauts versants.

2.2.3. L'impact de l'ozone sur la végétation

Contributeurs : Laurence Dalstein (GIEFS), Cécile Bergeot (AIR Climat) et Magali Proffit (CEFE)

La forte exposition à l'ozone a des répercussions sur les écosystèmes forestiers régionaux, allant de légères dégradations des individus à des mortalités de peuplements. C'est généralement en fin de saison de croissance, lorsque le mécanisme de défense métabolique de la plante diminue, que les dommages foliaires apparaissent. L'ozone pénètre dans les feuilles, à travers les stomates, et se dégrade instantanément au contact des cellules, entraînant des réactions en chaîne pouvant aboutir à la mort de celles-ci. Les dommages pri-

maires se produisent généralement au niveau cellulaire sous-épidermique et gagnent progressivement les cellules mésophylles foliaires déclenchant différents types d'interactions.

L'apparition de symptômes visibles traduit finalement la perte de l'intégrité globale des feuilles liée aux conditions environnementales. Sur les aiguilles de conifères, les symptômes visibles s'expriment par de petites taches de couleur vert clair ou des marbrures à contour diffus (*mottling*), en particulier sur la face supérieure des rameaux et à la pointe des aiguilles (photos 6 et 7), et par des décolorations spécifiques des aiguilles sur les faces exposées à la lumière (*photobleaching*).



Photos 6 et 7. Aiguilles de pins cembro asymptotiques (à gauche) et symptomatiques (à droite) avec *mottling* (© GIEFS).

Chez les feuillus, on observe des décolorations des parties exposées à la lumière pouvant traduire un effet

faible de l'ozone (chlorose), des ponctuations de petite taille et de couleur variable apparaissant sur la surface des feuilles, entre les nervures (*stippling*) et une coloration brun cuivré apparaissant sur la partie supérieure du feuillage (*bronzing*). Cette coloration est souvent l'expression d'un effet typique de symptômes d'ozone (Photos 8 et 9).



Photos 8 et 9. Feuilles de hêtres asymptotiques vertes (à gauche) et symptomatiques (à droite) avec *stippling* et *bronzing* (© GIEFS).

S'ajoutent à ces atteintes foliaires des troubles du métabolisme : une chute prématurée des feuilles, une diminution de la teneur en chlorophylle des feuilles (chlorose), une modification de l'ouverture des stomates et donc une réduction du taux d'activité photosynthétique, de la croissance et de la productivité. Les individus affaiblis sont davantage prédisposés aux attaques de ravageurs, moins résilients aux aléas climatiques, et ont une capacité à séquestrer le carbone amoindrie.

Ces dommages sont évalués par bio indication passive, c'est-à-dire par pourcentage de lésions spécifiques en surface du feuillage propre à chaque essence. Cette notation européenne est actuellement la plus fiable

pour l'évaluation de la sensibilité de l'écosystème forestier. À titre complémentaire, les conditions du houppier en termes de densité foliaire et de coloration peuvent être indiquées également pour évaluer l'état de santé général des arbres. Ainsi, l'évaluation objective des résultats de terrain nécessite une observation spécifique et continue des dégâts de l'ozone sur les houppiers et le feuillage, réitérée annuellement, toujours sur les mêmes sites, afin d'évaluer l'adaptation ou la dégradation des écosystèmes face aux évolutions climatiques. Des symptômes quasi-similaires pouvant provenir de pathologies parasitaires, de colorations liées à la sénescence ou de malnutrition foliaire existent et sont à ne pas confondre avec les signes des effets de l'ozone.



Zoom 5. Impact de l'ozone sur l'agriculture et la biodiversité

Impact de l'ozone sur l'agriculture

L'exposition à de fortes concentrations en ozone a également des impacts sur les plantes cultivées. L'ozone peut provoquer des nécroses sur les tiges et feuilles des cultures et engendrer des dommages sur le métabolisme : réduction de la photosynthèse et augmentation de la respiration, ayant pour effets une diminution de la croissance des plantes et de la productivité des cultures. La question de l'ampleur des effets sur le rendement des cultures se pose d'un point de vue économique et avant tout nourricier. Des études menées à différentes échelles (France, Europe) permettent d'identifier les cultures les plus sensibles : par exemple, les rendements du blé, sous l'influence de l'ozone, ont diminué de 10 % en région parisienne. Des modèles sont en cours de développement sur les pommes de terre et le maïs. D'après les résultats de l'étude APOLLIO pilotée par l'ADEME (voir la publication *Coût économique pour l'agriculture des impacts de la pollution de l'air par l'ozone* sur librairie.ademe.fr) en 2020, les pertes de rendements estimées en France, consécutives à l'exposition à l'ozone, sont de l'ordre de 14 % pour le blé, 11 % pour les pommes de terre et 4 % pour les tomates.

Impact de l'ozone sur la biodiversité

Le fonctionnement des écosystèmes forestiers se fonde sur de nombreuses interactions entre les végétaux et leur environnement biotique, dont l'exposition à de fortes concentrations d'ozone peut affecter différentes composantes.

Une grande majorité des interactions entre les végétaux et les insectes sont médiées par des signaux chimiques, les composés organiques volatils émis par les plantes. Plusieurs études expérimentales menées en conditions contrôlées ont mis en évidence qu'une exposition à l'ozone, parfois en dessous des seuils recommandés pour la santé humaine et la végétation, pouvait affecter chaque étape de cette communication chimique plante-insecte. C'est ce que suggèrent des études très récentes menées sur l'interaction entre la lavande fine et l'abeille domestique. Du côté végétal, l'ozone peut modifier la composition chimique des plantes, les émissions des COVB et l'intégrité du signal chimique lorsqu'il se diffuse dans l'atmosphère, ce qui dégrade la détection de ce signal par les organismes receveurs. Du côté des insectes, plusieurs études récentes ont mis en évidence qu'une exposition à l'ozone pouvait affecter leur physiologie, en particulier leur perception des COVB, et leur comportement d'attraction vers ces composés. Ainsi, les interactions, plante-herbivore, plante-enemi naturel de ces herbivores et plante-pollinisateurs peuvent se retrouver altérées lors de pics de pollution à l'ozone. L'ozone peut également affecter les interactions plante-plante et les processus du sol qui définissent les interactions plantes-sol-microbes, menaçant ainsi le fonctionnement de l'écosystème du sol.

Des études menées jusqu'à présent, il ressort que les réponses des interactions plantes-insectes et plantes-sol-microbes à l'ozone sont spécifiques à chaque espèce, ce qui suggère que l'exposition à l'ozone pourrait affecter la composition des écosystèmes forestiers en fonction du degré de sensibilité des espèces et des interactions. Cependant, à ce jour, ces effets possibles de l'ozone sur le fonctionnement des écosystèmes ne sont pas pris en compte dans les seuils recommandés pour la santé de la végétation.



3. L'amélioration de la qualité de l'air et la lutte contre le changement climatique : les synergies en région Provence-Alpes-Côte d'Azur

3.1. Les politiques de réduction des émissions de GES et de polluants atmosphériques

3.1.1. Orienter l'action pour réduire l'ozone

Contributeur : Sylvain Mercier (AtmoSud)

Les COV permettent aux épisodes de pollution à l'ozone de se maintenir plus longtemps dans la journée, et de se propager plus loin, sur les zones périphériques et rurales. On pourrait dire que les COV sont le « carburant » des réactions de formation de l'ozone, tandis que les NO_x en sont le « moteur ». Les actions les plus efficaces consistent à réduire en priorité les émissions de NO_x sur les principaux pôles émetteurs, pour éviter que les épisodes de pollution n'y démarrent. Par ailleurs, agir sur les NO_x permet d'agir également sur les sources de COV, alors que l'inverse ne se vérifie pas automatiquement. Afin de poursuivre la réduction des oxydes d'azote, les actions doivent cibler en priorité le trafic routier, qui reste le principal émetteur, ainsi que le transport maritime et l'industrie là où ils sont présents.

Toutefois, les effets bénéfiques de la réduction des NO_x sur les concentrations en ozone au niveau des pôles émetteurs ne seront pas immédiats. Du fait des réactions complexes de formation de l'ozone, une baisse des émissions de NO_x seule pourrait même augmenter les concentrations d'ozone de manière transitoire. Cependant, même dans ce cas, l'exposition des populations à la pollution oxydante dans son ensemble diminuerait, y compris à court terme grâce à une baisse des concentrations en NO_2 et en acide nitrique. Afin d'éviter que les concentrations en ozone n'augmentent de manière transitoire sur les zones urbaines, des actions complémentaires de réduction des émissions de COV restent donc indispensables. Les réactions photochimiques étant limitées par les COV en zone urbaine, toute baisse des émissions de ceux-ci se traduirait par une baisse immédiate des concentrations d'ozone.

S'il n'est pas possible de réduire la majeure partie du carburant des réactions photochimiques du fait de son origine naturelle, les actions de réduction des COV peuvent porter sur les 28 % issues des activités humaines. Elles doivent cibler en priorité le secteur résidentiel (près de la moitié des émissions anthropiques : solvants, peintures, colles principalement), ainsi que

l'industrie là où elle est présente. Les actions portant sur l'industrie peuvent être optimisées en ciblant en priorité les activités émettant les espèces contribuant le plus à la photochimie, en utilisant le potentiel d'oxydation photochimique (PCOP) des composés, non étudié pour la région à ce jour. À noter qu'un tiers des émissions du secteur résidentiel provient du chauffage domestique, à la saison froide, et ne participe donc pas à la formation d'ozone à la saison chaude.

Enfin, des actions coordonnées de réduction des émissions de précurseurs avec les zones frontalières permettraient de limiter les apports transfrontaliers en ozone. Les actions de lutte contre le réchauffement climatique permettent également, dans une moindre mesure, de réduire les concentrations en ozone au niveau local.

Afin de poursuivre la réduction des oxydes d'azote, les actions doivent cibler le trafic routier qui reste le principal émetteur, ainsi que le transport maritime et l'industrie.





Dominique Robin, directeur général d'AtmoSud (Photo 10, © AtmoSud)



1. Quelles sont les grandes missions d'AtmoSud en région Provence-Alpes-Côte d'Azur ?

AtmoSud est, depuis plus de 50 ans maintenant, l'observatoire de la qualité de l'air de la région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur. Nous œuvrons à garantir un observatoire de référence air/climat/énergie d'intérêt général, agréé par l'État, tout en favorisant l'engagement des acteurs pour l'amélioration de la qualité de l'air et du climat, qu'ils soient institutionnels, industriels ou citoyens.

Dans notre région, les premières mesures de référence en ozone ont été réalisées en 1982, rue Paradis à Marseille, en situation de trafic. D'autres mesures ont suivi rapidement. En 1996-1997, le réseau s'est fortement étoffé avec la promulgation de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie. Aujourd'hui, les outils de mesure et de modélisation apportent une assez bonne vision de la situation sur l'ensemble du territoire régional pour ce polluant. Nous continuons cependant d'améliorer le dispositif et de l'adapter.

Les procédures d'information et d'alerte préfectorales ont été mises en place dès la fin des années 90 en lien avec une directive européenne. C'est un chantier sur lequel AtmoSud a été très impliqué avec les services de l'État, dans la mesure où notre région est très concernée par les fameux pics d'ozone. AtmoSud propose aujourd'hui une prévision expertisée horaire des niveaux d'ozone à 48 heures.

2. Quelles sont les spécificités régionales de la pollution à l'ozone ?

Je préfère pour ma part parler de pollution photochimique, car l'ozone est un indicateur qui traduit des états de l'atmosphère très différents. Les épisodes photochimiques indiquent la présence de nombreux autres composés oxydants gazeux et des aérosols secondaires (particules ultrafines). Notre région est la plus concernée à l'échelle nationale par ces épisodes, en lien avec le climat méditerranéen et l'importance des sources de précurseurs (transports, industries...).

La réduction des précurseurs locaux (oxydes d'azote et composés organiques volatils), notamment portée par les Plans de Protection de l'Atmosphère, se traduit par une baisse régulière de l'intensité des épisodes photochimiques. À titre d'illustration, à l'échelle régionale, le nombre de jours avec un dépassement du seuil d'information ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{h}$) est passé de soixante à une dizaine de jours entre 1996 et 2023. Le maximum a été enregistré en 2003, l'année de la canicule, avec 80 jours. Contrairement à certains messages un peu trop globalisants, les actions locales apportent bien un gain significatif sur l'intensité des épisodes photochimiques.

L'analyse des niveaux chroniques d'ozone montre en revanche une relative stabilité depuis 20 ans. Cette dernière semble s'expliquer par les transports longues distances d'ozone qui compense la baisse de production locale. En effet, l'ozone voyage très bien dans la troposphère libre (de 10 à 20 jours selon les conditions météorologiques) et une partie de l'ozone enregistrée sur notre territoire est aujourd'hui attribuée au développement économique asiatique par exemple. Il convient donc de bien distinguer les « pics » d'ozone des autres situations, majoritaires dans l'année, pendant lesquelles nous enregistrons simplement le niveau de la troposphère libre sans production locale, plus ou moins titré.

Même si une hausse de l'ozone est bien relevée en zone urbanisée, le bilan ozone + dioxyde d'azote montre cependant une amélioration, ce qui milite en faveur d'une analyse cumulée de ces indicateurs plutôt qu'une analyse séparée de chaque molécule. C'est d'ailleurs le sens du nouvel indice proposé par AtmoSud, ICAIR (Indice cumulé de l'air), qui somme les sous-indices de l'ozone et du dioxyde d'azote notamment. Rappelons que l'ozone est également un gaz à effet de serre puissant.

3. Quels types de solutions et quels leviers en termes de politiques publiques sont envisageables ?

Il convient de poursuivre les efforts de réduction portant sur les précurseurs de cette pollution photochimique qui a des impacts bien connus depuis longtemps. La réduction des oxydes d'azote participe non seulement à diminuer l'intensité des épisodes, mais elle permet également d'agir sur la pollution primaire, proche des sources. Certains composés organiques volatils ont également des propriétés toxiques ou CMR (cancérogène mutagène et reprotoxique). Leur réduction constitue un bénéfice évident pour les riverains de ces sources généralement industrielles. L'inventaire des émissions d'AtmoSud montre que les principaux émetteurs de précurseurs au niveau régional sont les transports (routier, maritime, aérien) et l'industrie. Si l'ozone est généralement plus élevé dans les campagnes que dans les villes, la pollution globale reste plus importante dans les zones proches des points d'émission, dans les zones industrielles et les villes.

Ce que l'on a appris depuis le lancement des premiers plans d'actions ayant une réelle ambition, c'est que tous les leviers d'actions sont utiles et complémentaires : technologiques, énergétiques, planification, pratiques/usages. Pour AtmoSud, l'enjeu est aujourd'hui de mesurer la performance et les résultats produits par les plans d'actions et de traduire l'évolution de la situation air/climat/énergie. La question du sens et de la mobilisation plus locale des acteurs s'est également progressivement développée depuis quelques années en écho au travail de sensibilisation et de mobilisation. En 2023, la formation est devenue un enjeu de premier ordre pour accompagner l'engagement des acteurs à l'échelle locale. C'est d'ailleurs une des orientations du Plan Régional Santé Environnement 4.

4. Comment améliorer la connaissance et la sensibilisation sur les épisodes de pollution régionaux et leurs impacts ?

L'ensemble des données et études produites par AtmoSud est publique et mise à disposition via le site Internet (atmosud.org). La population est aujourd'hui plus sensibilisée aux épisodes de pollution qu'à l'exposition chronique, qui a pourtant plus d'impact sur leur santé, selon les experts sanitaires. Les pics d'ozone sont bien relayés par les médias. Dans notre quotidien, ils se matérialisent par exemple à travers les messages de réduction de vitesse sur les autoroutes. Depuis 2009, nous développons, avec Victor Hugo Espinosa, un programme de sensibilisation destiné aux scolaires, l'Air et Moi, qui a depuis essaimé dans d'autres régions françaises et même d'autres pays comme l'Italie ou le Maroc. Cette action évolue vers l'accompagnement des enfants et adultes afin d'adopter les bons réflexes dans et autour de l'école. Nous développons également les sciences participatives en partenariat avec les associations locales, souvent adhérentes d'AtmoSud. Avec AirCarto, nous proposons aujourd'hui des solutions de capteurs open sources pour l'air intérieur et extérieur et une solution de partage de l'information ouverte en ligne, Open Air Map.

Naturellement, sur la question de la connaissance, AtmoSud poursuit une collaboration nourrie avec les laboratoires de recherche de la région, dont certains ont une renommée mondiale sur le sujet de la réactivité atmosphérique, comme le Laboratoire de Chimie Environnement de Marseille. Parmi les traductions opérationnelles, nous avons développé un réseau de supersites (Marseille Longchamp, Observatoire de Haute Provence, Port de Bouc...) opéré conjointement avec l'université dont la portée est à la fois opérationnelle, mais également de favoriser la recherche scientifique. Nous poursuivons également une collaboration active, soutenue par l'Union Européenne, avec les régions riveraines françaises et italiennes. Le nouveau projet Alp'aera porte notamment sur les contributions transfrontalières et l'approfondissement des connaissances sur les principaux COV qui agissent sur la pollution oxydante.

3.1.2. Quels leviers pour orienter et valoriser les co-bénéfices des politiques publiques en termes de pollution de l'air, changement climatique et santé publique en région ?

Contributeur : Thomas Margeron (ARS Paca)

Pollution atmosphérique et climat

Les multiples liens entre changement climatique et qualité de l'air influencent aussi bien les stratégies d'atténuation que d'adaptation, en interrogeant l'impact du climat futur sur la qualité de l'air. Sur le plan de l'atténuation, les sources anthropiques de GES et de polluants atmosphériques étant souvent les mêmes, les actions pour l'amélioration de la qualité de l'air ou pour l'atténuation du changement climatique auront des effets partagés : on parle alors de co-bénéfices. Ces politiques d'atténuation peuvent également générer des bénéfices pour la santé : par exemple, la promotion des mobilités actives (marche, vélo) permet de conjuguer des bénéfices liés à l'activité physique à la diminution de la pollution de l'air. Par ailleurs, une baisse des NO_x induit une diminution de la production d'autres formes de pollution néfaste pour l'organisme comme les particules qui restent la forme de pollution ayant le coût sanitaire le plus élevé aujourd'hui. En effet, dans son rapport d'octobre 2020, l'EPHA quantifie la contribution des principaux polluants dans les coûts induits par l'exposition de la population à la pollution, dans les principales villes européennes. Dans les sept villes de la région incluses dans cette étude, l'impact économique des coûts sanitaires attribués aux polluants se répartit de la manière suivante :

- particules (PM10, PM2.5) : entre 78 et 88 % ;
- dioxyde d'azote (NO₂) : entre 7 et 19 % ;
- ozone (O₃) : entre 4 et 6 %.

Réduire l'exposition des populations à la pollution de l'air

Collectivités et services de l'État élaborent différents plans visant à reconquérir et à préserver la qualité de l'air (Plan de Protection de l'Atmosphère [PPA, voir §3.1.3], Plan Climat-Air-Energie Territorial [PCAET], Plan de Déplacement Mobilité [PDM], etc.) ainsi que des documents d'urbanisme pouvant contenir des orientations d'aménagement et de programmation (OAP) exprimant de manière qualitative les ambitions et la stratégie d'une collectivité territoriale en termes d'aménagement (SCoT, PLUi).

Le plan régional santé environnement 4 (PRSE4) articule ses actions avec ces documents de planification afin de réduire l'exposition des populations, en particulier des publics les plus vulnérables, à la pollution de

l'air. Si certains secteurs industriels et urbains intègrent un réseau de mesures sur la qualité de l'air (SCENARII sur le secteur de Fos-Berre), il peut être parfois nécessaire de compléter la caractérisation pour mieux lutter contre les émissions polluantes en :

- réalisant un suivi des substances émergentes ou à enjeux ;
- caractérisant les émissions et concentrations issues des différents modes de transports ;
- incitant les collectivités à poursuivre leurs efforts pour mettre en œuvre l'interdiction de brûlage des déchets verts et mettre en place des solutions alternatives de traitement pour réduire les émissions de particules provenant du secteur résidentiel.

La sensibilisation lors de pics de pollution, dont les effets directs sur la santé sont bien décrits (voir §1.3.2) gagnerait à être renforcée. L'effectivité de cette sensibilisation lors de pics de pollution (en lien avec la chaleur, le vent, les feux de forêts, l'utilisation de la biomasse, etc.) passe par l'information sur les mesures à prendre pour réduire les risques, en ciblant les publics les plus à risque, en encourageant des changements comportementaux positifs et en soutenant la mise en œuvre d'actions en faveur d'une meilleure qualité de l'air.

Enfin, les collectivités territoriales sont appelées à piloter leurs projets en recourant à différents outils et approches intégrant l'enjeu de la santé. En plus de l'offre de formations destinées à acculturer les agents à l'usage d'outils et méthodes (évaluation d'impact sur la santé [EIS] par exemple), il est nécessaire d'encourager et accompagner les collectivités à la mise en œuvre d'une démarche d'évaluation respectant les pratiques d'urbanisme favorable à la santé (UFS). L'objectif est de faire émerger des dynamiques et des solutions innovantes, expertisées et transposables, afin d'intégrer ou renforcer la santé dans les différentes composantes d'un projet ou d'une politique. Ces démarches peuvent faciliter l'émergence de projets ou d'aménagements au regard de bénéfices en santé objectivés, ou encore d'améliorer l'acceptabilité des changements contraignants à opérer par la population. La mise en place de mesures visant à limiter l'exposition des populations aux émissions des transports sera particulièrement encouragée. Le recours à l'outil EQIS (Évaluation quantitative d'impact sanitaire) permet également d'illustrer l'impact de l'air ambiant sur la santé.

3.1.3. L'action départementale pour la diminution des émissions de précurseurs

Contributeur : Nicolas Malecki (DREAL PACA)

Les Plans de protection de l'atmosphère



Plan de protection de l'atmosphère (PPA), objectifs 2025 (DREAL).

Les Plans de protection de l'atmosphère (PPA) sont encadrés par les articles L.222-4 à L.222-7 et R.222-13 à R.222-36 du code de l'environnement. Ils ont pour objet de ramener dans le délai le plus court possible, à l'intérieur de la zone concernée, la concentration en polluants dans l'atmosphère à un niveau conforme aux normes de qualité de l'air (article R.222-16 du code de l'environnement). En région Provence-Alpes-Côte d'Azur, les départements 06, 13, 83 et 84 sont dotés de PPA.

À titre d'exemple, le PPA des Bouches-du-Rhône a été révisé et approuvé le 2 mai 2022 par le préfet. Ce Plan porté par l'État via la DREAL a été co-construit avec de nombreux acteurs locaux présents et actifs au plus près des territoires, parmi lesquels des collectivités territoriales, des acteurs économiques, des experts, le tissu associatif...

Ce travail collaboratif a permis de faire émerger 55 actions visant à améliorer la qualité de l'air au niveau local via la diminution des émissions de polluants et notamment les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV).

Ces actions concrètes sont réparties en 7 grandes thématiques ou secteurs d'activités :

- le transport maritime,
- le transport terrestre,
- le transport aérien,
- l'industrie,
- la biomasse et l'agriculture,
- le résidentiel et l'aménagement,
- la mobilisation des partenaires et citoyens.

Elles sont portées par les acteurs territoriaux compétents et directement concernés. De nombreuses actions concrètes permettent de diminuer les émissions des polluants précurseurs de l'ozone dont :

- la connexion électrique des navires à quai en place pour les ferrys Corse et en cours de déploiement

- pour les ferries Maghreb et l'activité croisière ;
- la mise en place d'une zone à faibles émissions (ZFE), ayant pour objectif de réduire les émissions polluantes liées au transport routier. Les ZFE correspondent à des secteurs dans lesquels des restrictions de circulation sont en place et ce tout au long de l'année. Ces restrictions sont basées sur un classement (via les vignettes Crit'air), qui permet de distinguer les véhicules en fonction de leurs émissions de polluants atmosphériques. En région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Marseille et Nice ont mis en place des zones à faibles émissions. Des réflexions et études sont en cours pour la mise en place de ZFE sur les agglomérations d'Avignon et de Toulon. En fonctionnement normal, la ZFE de Marseille interdit, depuis le 1^{er} septembre 2023, la circulation des véhicules possédant des vignettes Crit'Air 4, 5 et non classée ;
- le contrôle de la mise en œuvre des actions de réduction des COV pour 14 sites industriels du pourtour de l'étang de Berre.



Les vignettes CRIT'Air.

Par ailleurs, des actions du PPA visent à améliorer les connaissances en matière d'ozone afin de mieux appréhender ses modes de formation et ainsi mieux identifier les solutions à mettre en œuvre. La réalisation du présent cahier en est un exemple concret. Le PPA fait l'objet d'un suivi qui se matérialise par 2 comités de pilotage annuels permettant de suivre l'avancement des actions et l'intégration le cas échéant de nouvelles actions.

Le dispositif d'urgence pic de pollution

Pour lutter contre les pics de pollution, les départements des Alpes-Maritimes, des Bouches-du-Rhône, du Var et du Vaucluse sont dotés de dispositifs d'urgence. Il s'agit d'arrêtés préfectoraux qui prévoient l'application de mesures à très court terme et limitées dans le temps, destinées à réduire l'exposition des populations en faisant retomber au plus vite les concentrations en polluants sous un seuil d'information-recommandation. Ces mesures de court terme viennent compléter les mesures

structurelles prévues dans les PPA. Les polluants suivis dans le cadre des épisodes de pollution sont les particules fines (PM10), le dioxyde d'azote (NO₂), le dioxyde de soufre (SO₂) et l'ozone (O₃). À chacun de ces polluants sont associés des seuils (concentrations) à l'origine du déclenchement des procédures d'urgence.

Les mesures d'urgence concernent l'ensemble des secteurs émetteurs de polluants dans l'air : industrie, transports terrestre, maritime et aérien, secteurs résidentiel, tertiaire et agricole. Elles sont mises en œuvre de façon automatique en fonction du niveau d'alerte, ou par décision du préfet à la suite de la consultation d'un comité départemental (« comité d'exp'AIR »). Parmi ces mesures peuvent être citées :

- La circulation différenciée (Figure 15), mise en place sur décision du préfet, qui interdit la circulation, sur une zone donnée de la ville, des véhicules les plus polluants (vignettes Crit'Air) ;
- Le report des travaux d'entretien ou de nettoyage effectués par la population ou les collectivités territoriales avec des outils non électriques (tondeuses, taille-haies...) ou des produits à base de solvants organiques (peintures, vernis, white spirit, produits

de retouches automobiles...)

- La mise en œuvre des prescriptions particulières prévues dans les autorisations d'exploitation des ICPE.

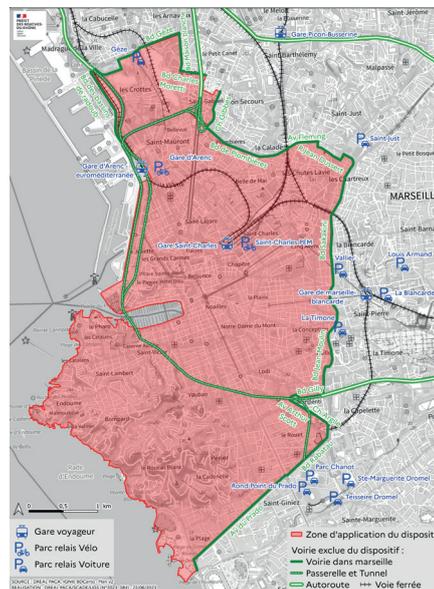


Figure 15. Zonage de la circulation différenciée à Marseille (DREAL, 2023).

3.2. Quelle gestion de la biodiversité face à la pollution de l'air et au changement climatique ?

3.2.1. Comment mieux exploiter les capacités de la végétation en ville ?

Contributeur : Pierre Sicard (ARGANS) et Sébastien Bergé-Lefranc (AIR Climat)

Dans le contexte du changement climatique, la pollution de l'air et les îlots de chaleur urbains sont deux problèmes majeurs affectant de plus en plus les zones urbaines. Les villes sont donc confrontées à un besoin croissant de développer des stratégies pour faire face à ces enjeux, en instaurant des mesures d'atténuation de la pollution atmosphérique et de la chaleur en ville. L'intégration des infrastructures vertes (arbres, arbustes, murs et toits végétalisés) est une mesure ayant montré son efficacité pour purifier l'air pollué en ville, tout en entraînant plusieurs co-bénéfices.

En effet, les arbres urbains sont les éléments les plus importants des écosystèmes urbains car ils contribuent à fournir de nombreux bénéfices sociaux et environnementaux (services écosystémiques) : réduction de la pollution de l'air, régulation de la température de l'air, atténuation des îlots de chaleur urbains, amélioration de la biodiversité, séquestration du carbone, régulation

du ruissellement, réduction du bruit ainsi que des avantages récréatifs, sociaux, psychologiques et esthétiques pour améliorer le bien-être des citoyens (Figure 16).

Les arbres, via l'absorption à travers les stomates de leurs feuilles, ou le captage par la surface, ont la capacité de réduire la pollution gazeuse, étant ainsi des puits à ozone. Les gaz ainsi absorbés le sont de manière permanente, puisqu'ils subissent une transformation à l'intérieur de la feuille (contrairement aux particules qui finissent généralement relarguées dans l'atmosphère). L'élimination de la pollution et les réductions potentielles des concentrations en polluants atmosphériques sont maximisées par les arbres de grande taille (diamètre de tige à taille de poitrine). Ils éliminent environ 60-70 fois plus de pollution atmosphérique annuelle que les arbres sains de petite taille (diamètre de tige < 7,6 cm)¹¹.

¹¹ Les effets des arbres et de la forêt sur la qualité de l'air et la santé humaine dans et autour des zones urbaines, David J. Nowak, Matilda Van den Bosch, dans Santé Publique 2019/HS1 (S1), pages 153 à 161.

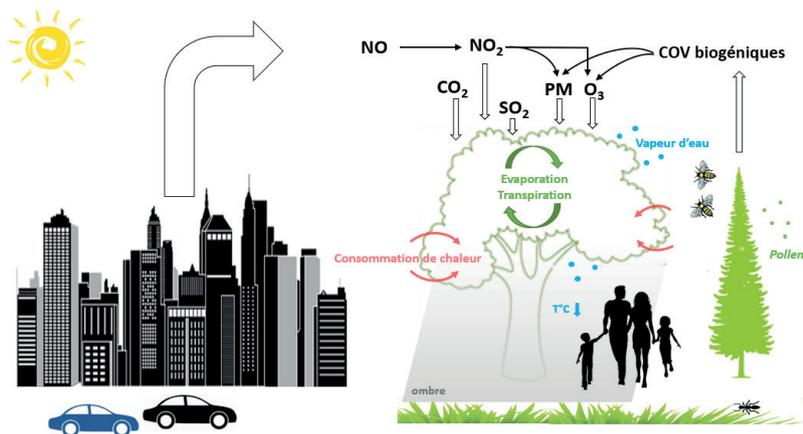


Figure 16. Interactions entre émissions anthropiques de polluants, pollution de l'air, espaces verts, biodiversité et bien-être des citoyens (Sicard et al.).

Ainsi, le reboisement urbain, consistant à augmenter la densité des arbres en ville, et le reboisement périurbain, près des villes densément peuplées où il n'est pas facile de planter des arbres, peuvent aider à améliorer la qualité de l'air et ainsi à respecter les normes de qualité sur le long terme. Cependant, le choix des essences est crucial dans les politiques de plantations car toutes les espèces végétales n'ont pas la même capacité à éliminer les polluants atmosphériques et à émettre des composés organiques volatils, précurseurs d'ozone. Dans certaines municipalités, par exemple, le manque de réflexion sur la localisation des plantations et le choix des essences ont entraîné une dégradation de la qualité de l'air urbain, et ont contribué à exacerber l'asthme chez des personnes vulnérables.

Les objectifs des plans de reverdissement convergent vers 30 % de couverture végétale en villes. La végétation peut être disposée ou densifiée le long des axes routiers, sur les terrains publics et privés et les toits et murs végétalisés peuvent être utilisés pour compléter la végétalisation urbaine. Pour maximiser les bénéfices, la solution préconisée est de mélanger les essences. Il paraît indispensable d'utiliser toute la gamme des végétaux : indigènes, exotiques (avec précaution) avec différentes variétés. Les arbres ont une capacité d'élimination des polluants de l'air plus élevée (3,4 g m⁻² par an en moyenne pour l'ozone) que les toits végétalisés (2,9 g m⁻² par an en moyenne) avec un coût d'installation et d'entretien inférieurs (~ 10 fois).

Pour optimiser les bénéfices, il faut sélectionner des espèces végétales :

- adaptées aux conditions environnementales locales et urbaines ;
- résilientes face au changement climatique (résistance aux sécheresses) ;
- à la capacité maximale d'élimination des polluants, en particulier l'ozone (en ville) ;
- avec un faible potentiel de formation d'ozone ;

- à la capacité maximale d'élimination des gaz à effet de serre et de séquestration du carbone ;
- efficaces pour limiter les îlots de chaleur urbains (fort potentiel rafraîchissant) ;
- émettant peu de composés organiques volatils et de pollens allergènes ;
- attractives pour les insectes pollinisateurs et la biodiversité ;
- résistantes (maladies, ravageurs, déficit hydrique, ozone) ;
- à la croissance rapide et sans racines déformantes.

L'adaptation du choix des essences aux conditions environnementales locales rend la sélection spécifique à chaque ville. Il est nécessaire de partir du principe suivant : « planter le bon arbre au bon endroit ». Cependant, quelques espèces végétales répondent à tous les critères ci-dessus et peuvent être recommandées pour les programmes de plantation : érable, chitalpa de Tashkent, févier d'Amérique doré, lilas d'été, merisier, micocoulier, parasol chinois, tilleul, Tipuana tipu, tulipier de Virginie, et zelkova du Japon.

Pour optimiser les bénéfices, il faut planter dans de bonnes conditions :

- investir dans un beau sujet ;
- privilégier un délai rapide entre l'arrachage et la plantation ;
- offrir un volume de fosse de plantation suffisant (> 16 m³) ;
- prévoir une surface perméable suffisante (6-7 m²) ;
- offrir un substrat de qualité et des amendements régulier ;
- assurer un bon suivi de l'arrosage.



Dans le domaine de la végétalisation, les Solutions d'adaptation fondées sur la Nature (SafN), actions qui s'appuient sur les « services » rendus par les écosystèmes, sont diverses : filtre biotechnologique, purificateur d'air à microalgues ou à mousses, phytoremédiation avec des espèces végétales appropriées, filtre à air et ventilation de la rue, arrêts de bus végétalisés, murs végétalisés... Les SafN sont aussi utilisées pour l'atténuation des îlots de chaleur urbains, du ruisselle-

ment de surface et la réduction du risque d'inondation. De nombreux exemples sont disponibles en région Provence-Alpes-Côte d'Azur : la ville d'Avignon a mis en œuvre sa trame verte et bleue à travers une diversité d'actions telles que la renaturation des cours d'école (photo 11) et des abords des remparts, la libération de pieds d'arbres, la suppression de stationnements et la transformation d'un espace sportif en parc urbain multifonctionnel.



Photo 11. Cour d'école désimpermeabilisée par la ville d'Avignon (© Solène Cusset, OFB).



Zoom 6. Le projet Airfresh

« Réduction de la pollution de l'air par les arbres en ville pour un meilleur bien-être des citoyens » est financé par l'Union Européenne dans le cadre du programme LIFE 2019. Airfresh regroupe 4 partenaires : ARGANS (coordinateur du projet, FR) AIR Climat (FR), ENEA (IT) et IRET-CNR (IT) pour un budget total de 1 225 070 euros.

Le projet, qui a débuté le 1^{er} septembre 2020 pour 4 ans, a pour objectif de mesurer et quantifier la capacité des arbres et arbustes urbains à :

1. éliminer les polluants atmosphériques ;
2. atténuer les îlots de chaleur urbains ;
3. séquestrer les gaz à effets de serre.

Pour atteindre ces objectifs, 2 forêts périurbaines ont été plantées, une à Aix-en-Provence (FR) et une à Florence (IT).

Plus de 400 essences ont été étudiées afin de sélectionner les espèces végétales les plus appropriées pour améliorer la qualité de l'air. À titre d'exemple, pour le site d'Aix-en-Provence (Photos 12 et 13, page suivante), 408 arbres ont été plantés avec 6 essences différentes : le tilleul à petites feuilles, le chêne chevelu, le micocoulier, le platane d'orient, le tilleul à grandes feuilles et l'érable argenté. Cette sélection s'est faite sur leur capacité à éliminer les polluants atmosphériques et à stocker du carbone, mais aussi sur un ensemble de facteurs comme la résistance aux maladies, à la sécheresse, à l'humidité des sols, leur capacité à croître rapidement et à être peu allergisantes.



Photos 12 et 13. Forêt urbaine du projet AIRFRESH à Aix-en-Provence, avec installation de capteurs et enclos (© GREC-SUD).

Des capteurs ont été installés avant et après la plantation des arbres (au-dessous et au-dessus de la canopée, et aux abords) afin de mesurer l'évolution de la concentration des polluants (ozone, dioxyde d'azote, particules fines), du dioxyde de carbone et l'évolution des températures avec la croissance progressive de la végétation. Sur les deux sites, une étude de la biodiversité (faune, flore, sol) permettra également de mesurer les bénéfices en matière de développement de la biodiversité locale.

À terme, les éléments observés permettront d'émettre des recommandations aux décideurs publics et urbanistes. Des démarches d'information et de sensibilisation sont déjà en cours afin de diffuser une culture commune autour de la nature en ville pour faire converger lutte contre le réchauffement climatique, amélioration de la qualité de l'air, amélioration du bien-être et résilience des territoires.

3.2.2. Stratégies d'adaptation au changement climatique des forêts méditerranéennes transfrontalières

Contributeur : Philippe Rossello (GeographR), Pierre Sicard (Argans)

Pour préserver la santé fragile des forêts méditerranéennes confrontées aux effets du changement climatique et de la pollution de l'air, plus particulièrement de l'ozone troposphérique, l'équipe en charge du projet européen Alcotra MITIMPACT a défini des stratégies d'adaptation et d'atténuation à combiner :

- privilégier les essences résilientes aux effets du changement climatique sur le long terme. La végétation étant plus sensible aux besoins en eau qu'aux températures, il est nécessaire de planter des arbres à faible besoin en eau et résistants aux sécheresses répétées ;
- favoriser les essences émettant peu de composés organiques volatils biogéniques précurseurs de l'ozone ;
- sélectionner des espèces végétales à la capacité maximale d'élimination des polluants et gaz à effet de serre ;
- diminuer la couverture végétale du sous-étage forestier : cette mesure a l'avantage de rompre la continuité verticale et horizontale du combustible, et de réduire ainsi le risque incendie. Pour limiter ce risque, il est aussi possible de planter des espèces à écorce épaisse, en particulier dans les endroits les plus secs ;
- conserver toutefois une part de nécromasse sur pied et au sol, en cas d'interventions sylvicoles ou de réaménagement après des événements destructifs pour favoriser la dynamique sylvigénétique ;
- mélanger les essences et accompagner les arbres avec des strates arbustives et herbacées. Les forêts mixtes, contenant toute la gamme des végétaux augmentent leur pouvoir de résilience et de régénération, et favorisent le maintien de la biodiversité. Elles sont plus productives et résistantes aux perturbations (attaque d'insectes ravageurs, par exemple) que les peuplements non mixtes ;

- contrôler les aires forestières à risque élevé et les peuplements présentant des symptômes de dépérissement : par exemple, forêts de chênes et charmes, pinèdes de pins sylvestres, châtaigneraies et sapinières ;
- assurer la migration assistée avec l'introduction de nouvelles essences moins sensibles aux effets du changement climatique. L'objectif est de déplacer volontairement des espèces menacées.

Il est fondamental de suivre davantage les dommages dus à l'ozone sur la végétation et tous les facteurs de trouble d'origine biotique et abiotique pour adopter des stratégies d'atténuation de manière rapide et ciblée, en fonction de l'ampleur des phénomènes. De plus, les arbres, individuellement, et les forêts, globalement, ont un potentiel de réponse non négligeable à court et à long termes face aux changements environnementaux. L'adaptation génétique et la plasticité phénotypique sont des processus de réponse naturelle que les arbres ont à leur disposition pour faire face au changement climatique et que le gestionnaire doit intégrer dans sa réflexion sur les pratiques de sylvicultures adaptatives.

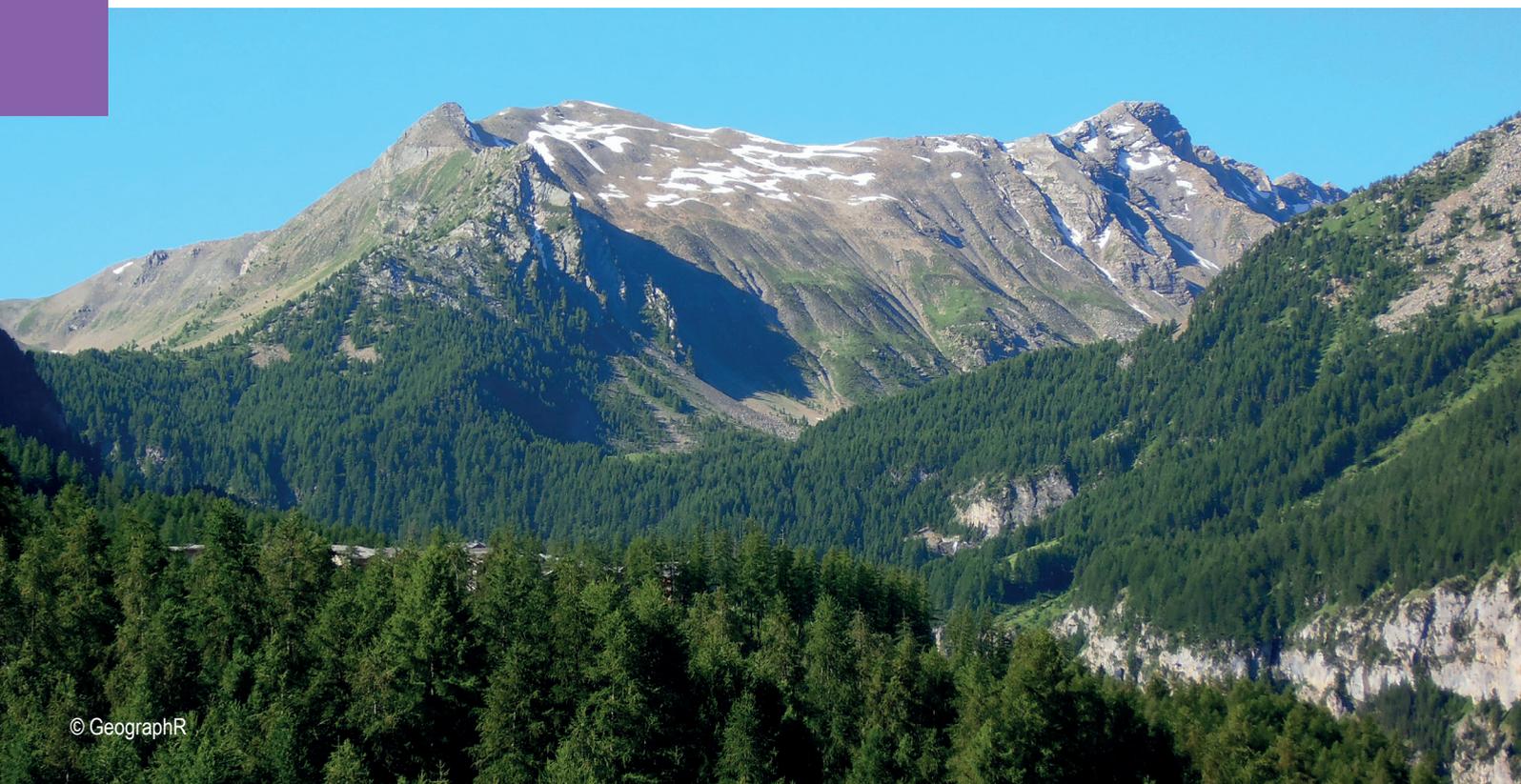
De manière générale, les mesures mises en place doivent être fondées sur les connaissances sur le changement climatique et la pollution de l'air. Les plans climat doivent participer activement à la limitation des émissions de gaz à effet de serre en engageant des actions visant notamment le secteur des transports qui représente, dans le sud-est de la France, environ 70 % des GES émis. Seule une politique active et continue de réduction des émissions de polluants primaires permettra de ramener les concentrations d'ozone à des

niveaux non dommageables, à la fois pour le patrimoine arboré et arbustif, mais également pour la santé humaine.

Les stratégies d'adaptation s'apprécient au cas par cas en fonction des contextes locaux et des spécificités forestières, mais il est également primordial de :

- associer la recherche fondamentale et appliquée, toutes disciplines confondues ;
- s'appuyer sur les connaissances académiques et les connaissances traditionnelles acquises par les populations locales ;
- privilégier des démarches participatives en mobilisant toutes les parties prenantes à l'échelle territoriale ;
- développer les démarches science-société et art-science.

Pour aller plus loin, il serait intéressant de produire des indicateurs climatiques locaux multifactoriels afin de proposer une approche encore plus transversale et interdisciplinaire. L'objectif serait d'évaluer la vulnérabilité des territoires en privilégiant des analyses croisées (climat, pollution de l'air, biodiversité, agriculture, élevage, tourisme, énergie, ressources en eau, occupation des sols, paysages, pratiques individuelles et sociales...). Les indicateurs prospectifs permettraient aux acteurs territoriaux d'orienter leurs stratégies et politiques d'adaptation au changement climatique et d'atténuation des émissions des gaz à effet de serre sur le long terme. Ils contribueraient aussi à la mise en œuvre d'actions concrètes en facilitant l'aide à la décision des élus, gestionnaires, collectivités territoriales, associations...



Conclusion générale

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est, plus que toute autre région française, soumise au double enjeu pollution de l'air et changement climatique. Les températures régionales se réchauffent plus rapidement qu'à l'échelle globale et les effets qui en découlent sont déjà bien visibles. Les concentrations en polluants atmosphériques, notamment en ozone, atteignent des valeurs dépassant parfois largement les valeurs préconisées par l'OMS. La santé et la qualité de vie de la population régionale, ainsi que le bon fonctionnement des écosystèmes, s'en trouvent menacés.

Les facteurs climatiques étant déterminants dans la production d'ozone, les concentrations moyennes, dans le contexte de réchauffement rapide des températures, augmenteraient sensiblement à l'échelle régionale. L'augmentation des températures et de l'ensoleillement, les feux de forêts, la limitation de la capacité de stockage du carbone par les végétaux (stress hydrique) et d'absorption d'ozone, l'augmentation des émissions de précurseurs biogéniques, etc. sont autant de facteurs laissant envisager une production accrue d'ozone dans les années à venir. À la vue des différents impacts sanitaires et écologiques associés à l'exposition à ce polluant, tant sur les écosystèmes que sur les populations, il convient de traiter cet enjeu de manière prioritaire.

Les enjeux de la pollution de l'air et du changement climatique sont intrinsèquement liés. Ils doivent ainsi être traités conjointement. Agir sur les concentrations d'ozone et plus largement sur la pollution atmosphérique, c'est aussi agir sur l'atténuation des GES. Cet enjeu gagnerait à être pris en compte dans les plans de réduction des GES régionaux et les mesures d'adaptation mises en place gagneraient à intégrer les connaissances sur la pollution de l'air. Le secteur du transport reste le premier émetteur d'oxydes d'azote et de GES à l'échelle de la région et doit ainsi être ciblé de manière prioritaire. Seule une politique continue et active sur la diminution des polluants primaires pourra ramener l'ozone à des niveaux non dommageables pour les écosystèmes et la santé humaine. Ces politiques induisent des co-bénéfices, notamment sur la santé, en limitant bon nombre de polluants. Certains modèles restent ainsi optimistes sur notre capacité à contenir les évolutions de concentrations d'ozone, hors zones fortement urbanisées.

La pollution à l'ozone étant issue de processus complexes, certaines variables restent incertaines. À l'échelle régionale, plusieurs questions restent en suspens, impliquant un travail d'approfondissement de cet enjeu par la recherche. Les évolutions spatio-temporelles des concentrations restent incertaines. Plus globalement, la complexité des liens entre changement climatique et pollution atmosphérique reste à approfondir. Des travaux sont en cours avec le Laboratoire de Chimie de l'Environnement (LCE), sur le lien entre pollution à l'ozone et GES. L'enjeu de l'ozone dépassant largement les frontières régionales, la quantification de la part des apports extérieurs dans les concentrations en ozone régionales est en cours par AtmoSud. Une coopération interrégionale et transfrontalière sera essentielle à la réduction des concentrations en ozone sur le long terme.

À l'échelle régionale, les effets du changement climatique restent néanmoins prépondérants sur les écosystèmes. Afin de préciser les impacts de l'ozone et de prendre conscience de l'ampleur de l'enjeu, les dommages de l'ozone sur les écosystèmes doivent être suivis régulièrement. Maintenir des écosystèmes en bonne santé favorise la séquestration du carbone, la purification de l'air (selon les essences) et de nombreux autres bénéfices. La participation des écosystèmes forestiers dans la production d'ozone régionale n'est pas une pollution en soit, les émissions végétales ne font que réagir avec nos propres émissions, trop importantes.

Les efforts des acteurs régionaux déjà engagés sont à poursuivre. La sensibilisation, à laquelle participe cette publication, est à renforcer pour faciliter la compréhension des processus et la gestion du risque. Le suivi actuel des politiques publiques doit continuer afin d'identifier les meilleurs leviers de lutte contre la pollution atmosphérique et le changement climatique et les rendre plus efficaces.

Contributeurs

1. **Cécile BERGEOT** (coordination générale, introduction, partie 1, conclusion), chargée de mission publication et valorisation (AIR Climat).
Contact : cecile.bergeot@air-climat.org
2. **Sébastien BERGE-LEFRANC** (zoom projet AIRFRESH), chargé de mission Airfresh (AIR Climat).
Contact : sebastien.berge-lefranc@air-climat.org
3. **Maxime CAILLERET** (§2.1.1), chercheur en écologie forestière, Unité RECOVER (INRAE Aix-en-Provence).
Contact : maxime.cailleret@inrae.fr
4. **Olivier COULON** (zoom santé), ingénieur en santé et environnement, Département Santé Environnement (ARS PACA).
Contact : olivier.coulon@ars.sante.fr
5. **Laurence DALSTEIN** (§2.1.2, 2.1.3), chargée de recherche en écologie forestière (GIEFS).
Contact : ldalstein@aol.com
6. **Joël GUIOT** (§1.1, 1.2), chercheur émérite du CNRS en paléoclimatologie (CEREGE).
Contact : guiot@cerege.fr
7. **Julien KAMMER** (§1.3.1, 1.3.2), chercheur en chimie de l'environnement (LCE).
Contact : julien.KAMMER@univ-amu.fr
8. **Nicolas MALECKI** (édito, §3.1.3), chargé de mission qualité de l'air - référent 13 (DREAL PACA).
Contact : nicolas.malecki@developpement-durable.gouv.fr
9. **Thomas MARGUERON** (§3.1.2), responsable régional santé et environnement, Département Santé Environnement (ARS PACA).
Contact : thomas.margueron@ars.sante.fr
10. **Sylvain MERCIER** (§1.2.1, 1.3.2, 1.3.3, 3.1.1), chargé de l'action territoriale Var-Vaucluse, thématique énergie/climat (AtmoSud).
Contact : sylvain.mercier@atmosud.com
11. **Elena ORMENO LAFUENTE** (§2.1.1, 2.1.2, 2.1.3), chercheuse en biodiversité et directrice scientifique de l'O3HP (IMBE).
Contact : elena.ormeno-lafuente@imbe.fr
12. **Magali PROFFIT** (encart biodiversité), chercheuse en biologie des organismes et écologie (CEFE/CNRS).
Contact : magali.proffit@cefe.cnrs.fr
13. **Dominique ROBIN** (parole d'acteur), directeur (AtmoSud).
Contact : dominique.robin@atmosud.com
14. **Philippe ROSSELLO** (§3.2.2) géoprospectiviste (GeographR), coordinateur et animateur (GREC-SUD).
Contact : philippe.rossello@geographr.fr
15. **Pierre SICARD** (§3.2.1, 3.3.2), docteur en chimie atmosphérique (ARGANS).
Contact : psicard@argans.eu

L'équipe du GREC-SUD tient à chaleureusement remercier l'ensemble des contributeurs qui ont synthétisé les connaissances, mais aussi le groupe de travail thématique qui est intervenu en amont pour définir les axes prioritaires à traiter. Merci également au conseil scientifique du GREC-SUD, et au financeur, la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement de Provence-Alpes-Côte d'Azur (DREAL PACA) qui a permis à AIR Climat de réaliser cet ouvrage.
Pour obtenir la liste des références bibliographiques sur lesquelles s'appuie cette synthèse des connaissances, prenez contact avec le GREC-SUD : contacts@air-climat.org

Comment citer cette publication du GREC-SUD ?

La pollution atmosphérique à l'ozone et le changement climatique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Les cahiers du GREC-SUD, édités par l'Association pour l'innovation et la recherche au service du climat (AIR Climat), février 2024, 40 pages.
ISBN : 9782491380069



Ce cahier thématique du GREC-SUD, financé par la DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur, présente les principaux enjeux de la pollution à l'ozone troposphérique et du changement climatique. Il explique l'interdépendance des deux phénomènes et souligne l'intérêt de les traiter conjointement dans les politiques et stratégies publiques en faveur de la protection de l'atmosphère et de la santé.



L'association pour l'innovation et la recherche au service du climat (AIR Climat), qui entend contribuer à la prise de conscience des enjeux du changement climatique, mais aussi aider à la recherche de solutions innovantes, encourage les transitions en coordonnant notamment le GREC-SUD.

Contact : contacts@air-climat.org
AIR Climat : www.air-climat.org
GREC-SUD : www.grec-sud.fr

