

# Ozone

ÉTAT DES CONNAISSANCES EN ÎLE-DE-FRANCE





# **OZONE, ÉTAT DES CONNAISSANCES EN ÎLE-DE-FRANCE**

**JUILLET 2022**

**AIRPARIF – L'Observatoire de l'Air en Île-de-France**

7 rue Crillon - 75004 PARIS

Tel : 01 44 59 47 64 – Fax : 01 44 59 47 67

[www.airparif.asso.fr](http://www.airparif.asso.fr)



# SOMMAIRE

PREAMBULE .....	1
1. L'OZONE, UN POLLUANT SECONDAIRE .....	1
2. UN POLLUANT AUX MULTIPLES IMPACTS .....	5
2.1 - IMPACT SUR LA SANTE HUMAINE .....	5
2.2 - IMPACT SUR LA VEGETATION .....	5
2.3 - IMPACT SUR LE CLIMAT .....	6
2.4 - IMPACT SUR LE BATI .....	6
3. NORMES DE QUALITE DE L'AIR APPLICABLES A L'OZONE .....	7
3.1 - POLLUTION CHRONIQUE .....	7
3.2 - ÉPISODES DE POLLUTION .....	8
4. LA SURVEILLANCE OPERATIONNELLE DE L'OZONE EN ÎLE-DE-FRANCE .....	9
4.1 – ÉVALUATION DE LA POLLUTION CHRONIQUE .....	9
<b>4.1.1 - Protection de la santé – Objectif de qualité</b> .....	9
<b>4.1.2 - Protection de la santé – Valeur cible</b> .....	11
<b>4.1.3 - Protection de la végétation</b> .....	13
<b>4.1.4 - Évolution des niveaux moyens annuels</b> .....	14
<b>4.1.5 - Records de pollution à l'ozone en Île-de-France</b> .....	15
4.2 - ÉPISODES DE POLLUTION A L'OZONE EN ÎLE-DE-FRANCE .....	16
4.3 - EXEMPLE D'UN EPISODE DE POLLUTION A L'OZONE EN ÎLE-DE-FRANCE .....	17
4.4 - PARAMETRES D'INFLUENCE .....	18
5. LEVIERS D'ACTION ET EFFICACITE DES MESURES D'URGENCE .....	21
5.1 - QUELS LEVIERS D' ACTIONS POUR LIMITER SON EXPOSITION ET REDUIRE LA POLLUTION A L'OZONE ? .....	21
5.2 – ÉVALUATION DE L'IMPACT DE L'EFFICACITE DES MESURES D'URGENCE .....	22
<b>5.2.1 – Évaluation de l'impact lié à l'abattement des émissions de NO<sub>x</sub> par le trafic routier sur les concentrations en ozone.</b> .....	22
<b>5.2.2 – Évaluation de l'impact de la baisse des émissions liées à la circulation différenciée.</b> ..	24
6. PERSPECTIVES .....	26
7. CONCLUSION GENERALE .....	29
8. REFERENCES .....	31



# Préambule

La présente note a pour objectif de dresser un bilan de l'état des connaissances sur l'ozone, un polluant à enjeux dans de nombreuses régions françaises.

Cette note se compose de cinq parties. Elle dresse des éléments de compréhension sur l'ozone : ses conditions de formation (Partie 1), ses potentiels effets sur la santé humaine et sur l'environnement (Partie 2), ses seuils réglementaires (Partie 3), sa surveillance en région Île-de-France à court, moyen et long termes (Partie 4). Enfin, elle vise également à apporter aux autorités publiques des informations sur la pertinence et l'efficacité des mesures de réduction mises en place en cas d'épisode de pollution (Partie 5).

## 1. L'ozone, un polluant secondaire

L'ozone (formule chimique :  $O_3$ ), composé de 3 atomes d'oxygène, est un gaz naturellement présent dans l'atmosphère terrestre.

Tout d'abord, il est important de distinguer l'ozone stratosphérique de l'ozone troposphérique. L'ozone stratosphérique ou « bon ozone », qui est formé dans les hautes couches de l'atmosphère (10-40 km), protège les organismes vivants du rayonnement solaire grâce à la couche d'ozone qui filtre les rayons ultraviolets (UV) du soleil. L'ozone troposphérique ou « mauvais ozone », formé dans les basses couches de l'atmosphère (0-10 km), est un **polluant atmosphérique** qui, à de fortes concentrations, a un impact néfaste sur la santé et sur l'environnement, du fait de son caractère oxydant. Ce document aborde uniquement l'ozone troposphérique.

L'ozone n'est pas directement émis dans l'atmosphère. Il s'agit d'**un polluant secondaire**. Il est principalement **formé chimiquement dans l'atmosphère, par oxydation des Composés Organiques Volatils (COV) en présence d'oxydes d'azote ( $NO_x$ ), sous l'effet du rayonnement solaire et de fortes températures.**

En Île-de-France, les  $NO_x$  sont principalement émis par le trafic routier, tandis que pour les COV, les sources sont plus variées, à la fois anthropiques (industries, solvants, peintures, colles et trafic routier (majoritairement les 2 roues)) et biogéniques (végétation).

En plus des concentrations en COV et des NO<sub>x</sub>, **la formation d'ozone est dépendante des conditions météorologiques printanières et estivales**. En effet, pour que les réactions aient lieu, les différentes espèces chimiques vont avoir besoin d'énergie. Cette énergie est fournie par les rayons UV du soleil. C'est pourquoi on parle de **polluant photochimique**. Enfin, des températures chaudes sont primordiales afin de catalyser ces transformations chimiques. C'est la raison pour laquelle, même si ce polluant est présent toute l'année, **les plus fortes concentrations d'ozone sont mesurées durant l'été, lorsque que les températures et l'ensoleillement sont les plus forts**. Le résumé du processus de formation de l'ozone est présenté en Figure 1.

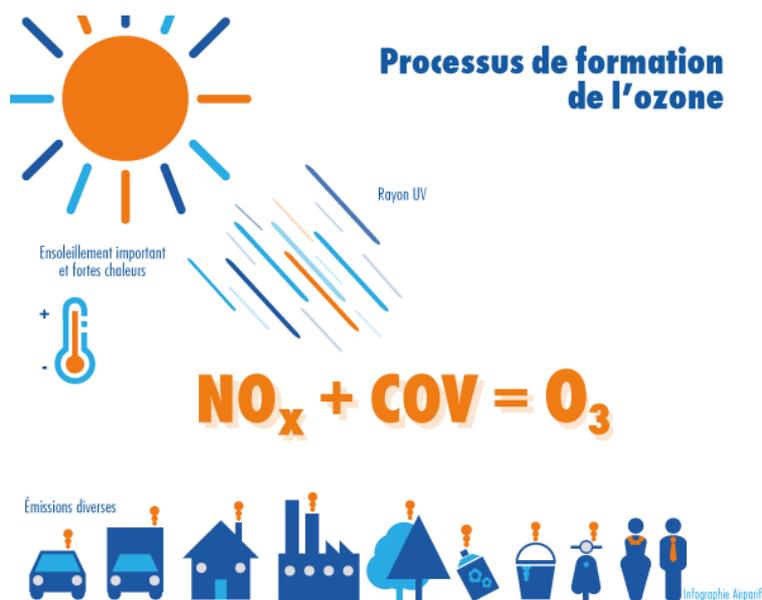


Figure 1 : Processus de formation de l'ozone

**Les processus de formation de l'ozone sont complexes et les concentrations d'ozone troposphérique résultent de l'équilibre entre les proportions de COV et de NO<sub>x</sub> dans l'atmosphère.**

Cette dépendance entre les niveaux de COV, NO<sub>x</sub> et O<sub>3</sub> est usuellement illustrée par un diagramme isoplèthe (Figure 2). Ce diagramme, qui représente les concentrations en ozone en fonction des concentrations en NO<sub>x</sub> et en COV permet de distinguer **trois principaux régimes de formation** :

- Un **régime limité en NO<sub>x</sub>**, lorsque les concentrations en NO<sub>x</sub> sont faibles et celles en COV élevées (rapport COV/NO<sub>x</sub> > 15). Dans ce régime, les niveaux d'ozone augmentent avec ceux des NO<sub>x</sub> de façon linéaire (flèche n°3 de la Figure 2) et ne sont que peu influencés par les variations de COV (flèche n°4).
- Un régime limité en COV ou **régime saturé en NO<sub>x</sub>** (rapport COV/NO<sub>x</sub> < 4). Dans ce régime, les niveaux d'ozone augmentent lorsque les concentrations en NO<sub>x</sub> diminuent (flèche n°2), et diminuent lorsque les concentrations en NO<sub>x</sub> augmentent.
- Un **régime standard** (4 < COV/NO<sub>x</sub> < 15). La production d'ozone dépend à la fois des concentrations de NO<sub>x</sub> et de COV.

La réaction de formation de l'ozone est la plus rapide lorsque les proportions de COV/NO<sub>x</sub> sont de 8/1. **Cet équilibre complexe entre les COV et les NO<sub>x</sub> est à prendre en compte dans la mise en place de stratégies de réduction des émissions de précurseurs pour limiter la pollution à l'ozone.**

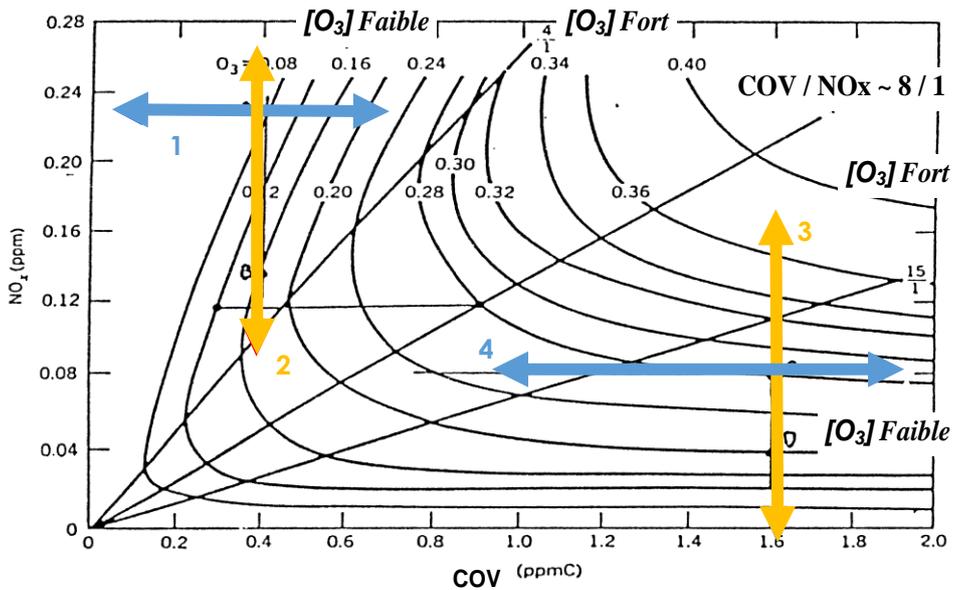


Figure 2 : Équilibres entre NO<sub>x</sub> et COV dans la formation d'ozone (National Research Center)

L'ozone est une espèce relativement stable. Son temps de vie dépend des concentrations en précurseurs, de la température et de l'ensoleillement. En saison estivale, son temps de vie chimique est de l'ordre de une à quelques semaines. En situation hivernale, il est de quelques mois.

La formation de l'O<sub>3</sub> nécessite un certain temps durant lequel les masses d'air se déplacent. De plus, comme vu précédemment, la production d'ozone dépend du ratio COV/NO<sub>x</sub>. **Les zones urbaines et rurales n'ont pas les mêmes concentrations en COV et NO<sub>x</sub>, et par conséquent la vitesse de formation de l'ozone est différente selon les environnements** (Figure 3). Ainsi, les niveaux moyens d'ozone sont généralement plus soutenus en zone rurale que dans l'agglomération même, où ses précurseurs ont été majoritairement produits.

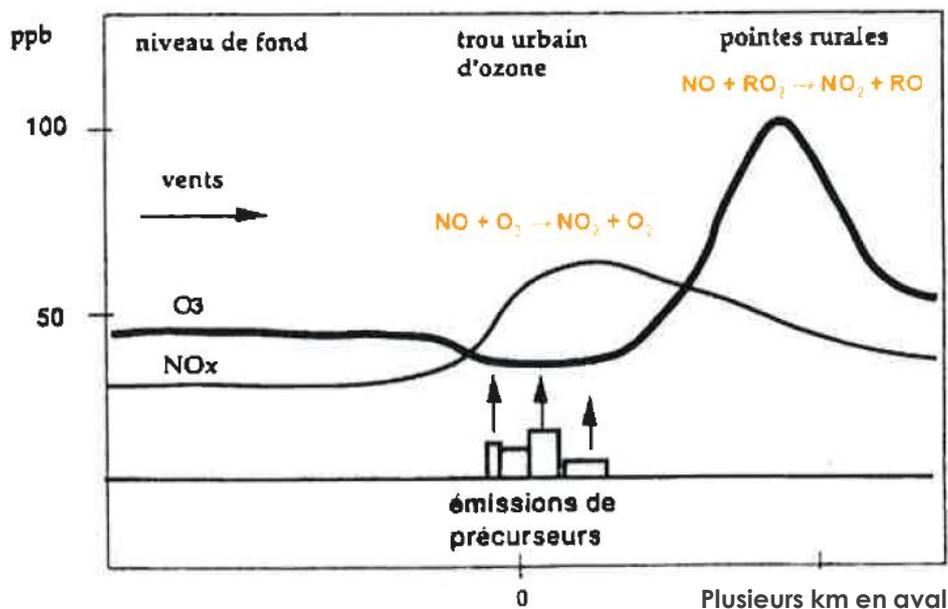


Figure 3 : Évolution des concentrations en NO<sub>x</sub> et en O<sub>3</sub> selon les environnements (Source : Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques)

L'ozone est un polluant qui voyage. De ce fait, il présente plutôt une **problématique régionale** que locale. La pollution issue de l'agglomération impacte les zones rurales alentours et l'agglomération peut elle-même subir d'importants phénomènes d'import d'ozone en provenance d'autres régions voire d'autres pays, notamment d'Europe du Nord et de l'Est.

En cas d'épisode de pollution en Île-de-France, les trois-quarts des concentrations en ozone mesurées peuvent avoir été importés. La pollution en ozone importée s'ajoute alors à celle produite localement. Mais le panache d'ozone produit en Île-de-France va à son tour s'exporter vers les régions avoisinantes.

**Si les oxydes d'azote contribuent à la formation de l'ozone lors de la journée, ils participent également à sa destruction.** En effet, l'ozone réagit avec le monoxyde d'azote (NO) selon la réaction suivante :  $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ . Cette réaction n'est pas photochimique et ne nécessite pas de rayonnement solaire. Elle est donc présente de jour comme de nuit.

Les concentrations en ozone et en dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) sont donc étroitement liées : c'est la compétition entre ces deux réactions qui gouverne le profil journalier des concentrations en ozone. Ainsi, **le profil journalier typique de l'ozone est anti-corrélé à celui du NO<sub>2</sub>** (Figure 4). Au petit matin, les concentrations en NO augmentent du fait de la pointe de trafic du matin et des conditions météorologiques peu dispersives, et réagissent avec l'ozone pour former du NO<sub>2</sub>. Sous l'action du rayonnement solaire et de l'augmentation de la température, la réaction photochimique de formation de l'ozone se met en place : les concentrations en NO<sub>2</sub> diminuent et celles d'ozone augmentent fortement. En fin d'après-midi, l'intensité du rayonnement solaire diminue, la réaction photochimique ralentit pour s'arrêter la nuit. La réaction de destruction de l'ozone redevient prédominante, l'ozone va à son tour être consommé par le monoxyde d'azote et conduire à la formation de NO<sub>2</sub>.

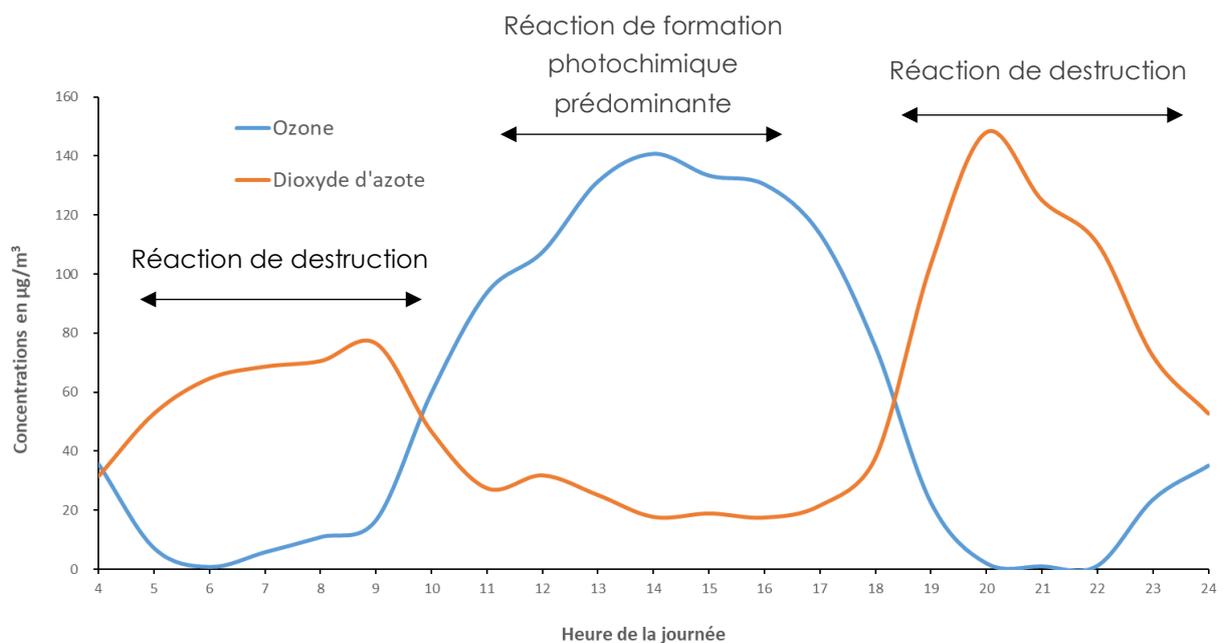


Figure 4 : Profil journalier des concentrations en ozone et dioxyde d'azote sur la station de Paris13<sup>ème</sup>, le 15 septembre 2020

En Île-de-France, l'ozone est uniquement mesuré en situation de fond. En effet, **à proximité immédiate des axes routiers, la réaction de destruction de l'ozone reste prépondérante**, du fait des concentrations très importantes de NO qui réagit avec l'ozone pour former du dioxyde d'azote. Cette formation est d'autant plus importante que les émissions primaires de NO sont fortes, et peuvent conduire, lors des pics de pollution à l'ozone, à des concentrations moyennes horaires en NO<sub>2</sub> supérieures à 200 µg/m<sup>3</sup>. C'est la raison pour laquelle les concentrations maximales en NO<sub>2</sub> sont généralement observées en période estivale à proximité immédiate du trafic routier.

## 2. Un polluant aux multiples impacts

L'ozone est un polluant oxydant, dont les effets sur la santé humaine, la végétation, le climat ainsi que sur les bâtiments sont avérés.

### 2.1 - Impact sur la santé humaine

L'ozone est un **gaz irritant** qui pénètre facilement jusqu'aux voies respiratoires les plus fines. Ses conséquences sur la santé dépendent de sa concentration dans l'atmosphère, de la quantité inhalée et de la durée durant laquelle les personnes y ont été exposées. Selon la sensibilité de chacun, **il peut provoquer des problèmes respiratoires, déclencher des crises d'asthme, diminuer la fonction pulmonaire et favoriser l'apparition de maladies respiratoires** (REVIHAAP, 2013 ; Nuvolone et al., 2018).

Sur le long terme, **des liens sont observés avec la mortalité respiratoire et cardio-respiratoire**, notamment pour des sujets prédisposés par des maladies chroniques (pulmonaires, cardiaques, diabète), avec l'asthme et la croissance de la fonction pulmonaire chez les jeunes. Les effets de l'ozone sont accentués par les exercices physiques du fait d'une plus grande quantité d'air inhalée lors de l'effort, et donc d'une plus grande quantité de polluant.

En cas d'épisode de pollution à l'ozone, il est recommandé par les autorités de santé de **limiter son exposition**, notamment pour les personnes les plus fragiles, **en prévoyant les activités physiques et l'aération des lieux de vie plutôt dans la matinée**, car les fortes concentrations en ozone sont observées surtout l'après-midi lorsque l'ensoleillement et les températures sont les plus élevés.

### 2.2 - Impact sur la végétation

En France comme à l'étranger, les effets nocifs de l'ozone sur la végétation font l'objet de nombreuses recherches. L'ozone touche à la fois la végétation naturelle (en particulier, les forêts et les zones d'intérêt écologique), mais également des cultures (notamment les céréales).

À fortes concentrations, l'ozone conduit à la formation de nécroses sur les feuilles, ce qui **limite la photosynthèse des végétaux** soumis à ces concentrations et provoque, à terme, **des baisses de rendement pour les cultures**, une baisse de la qualité de celles-ci, voire des dépérissements des écosystèmes. Le blé a, par exemple, fait l'objet de nombreux travaux montrant des baisses de rendement associées à de forts niveaux d'ozone durant la période de croissance [Feng et al, 2008].

L'altération de la production agricole et sylvicole du fait des concentrations en ozone ont également des **effets économiques significatifs** pour le secteur. Les pertes économiques agrégées sur la France sont importantes : en 2010, près d'1 milliard d'euros pour le blé tendre, plus d'1 milliard d'euros pour les prairies et plus de 200 millions d'euros pour les pommes de terre [ADEME, 2020].

Les forêts et la végétation dite « naturelle » (non cultivée) sont également sensibles à l'ozone. Les impacts de l'ozone sur le fonctionnement des principales essences forestières comme le hêtre, le chêne ou encore le peuplier, peuvent être connus au moyen de modèles analogues de ceux développés pour les plantes de grande culture. Pour les plantes « sauvages », l'état actuel des connaissances est plus limité. Même si les espèces paraissent aussi sensibles que les plantes cultivées, il semblerait toutefois que la plupart d'entre elles soient assez tolérantes à l'ozone.

À ce jour, les impacts de l'ozone à l'échelle des écosystèmes sont peu documentés. Les premiers résultats montrent que les degrés de sensibilité peuvent être très différents d'une espèce à l'autre. C'est pourquoi **la pollution de l'air peut modifier les relations de compétition entre les espèces et altérer la composition des écosystèmes, voire aboutir à leur dépérissement.**

**Les écosystèmes ont également un rôle dans le cycle de formation et de destruction de l'ozone, de par leur capacité d'absorption de ce polluant et, à l'inverse, d'émission de précurseurs et plus particulièrement de COV.**

## 2.3 - Impact sur le climat

L'ozone a des effets directs et indirects sur le climat et vice versa. La qualité de l'air et le changement climatique sont étroitement liés.

Comme l'ozone stratosphérique, **l'ozone troposphérique absorbe le rayonnement solaire et participe au phénomène d'effet de serre**, tout comme le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ou le méthane (CH<sub>4</sub>). L'augmentation des concentrations moyennes en ozone sur la région Île-de-France et plus globalement dans le monde va donc avoir un impact sur le réchauffement climatique.

Les projections du climat dans le futur montrent que **le changement climatique affecterait les concentrations d'ozone, en raison de l'évolution des conditions météorologiques, avec notamment plus d'épisodes caniculaires et de sécheresses** qui mèneront à plus d'épisodes de pollution à l'ozone et donc à plus d'ozone dans l'atmosphère.

L'impact de l'ozone sur la végétation a également un impact sur le climat. En effet, en réduisant l'activité photosynthétique des plantes, des cultures, des forêts, celles-ci seront ainsi moins capables de consommer le CO<sub>2</sub> atmosphérique, ce qui aura pour conséquence une augmentation de l'effet de serre et donc un réchauffement climatique plus important [Ainsworth et al., 2012].

## 2.4 - Impact sur le bâti

Enfin, l'ozone, en tant que polluant oxydant, intervient dans le **processus d'oxydation et de dégradation des matériaux de construction**, notamment sur les matériaux polymères.

## 3. Normes de qualité de l'air applicables à l'ozone

Lorsque l'on parle de pollution, il faut bien distinguer la pollution chronique, c'est-à-dire celle que l'on respire au quotidien, des épisodes de pollution - phénomènes plus ponctuels fortement liés aux conditions météorologiques. Que ce soit pour la pollution chronique ou les épisodes de pollution, il existe des seuils réglementaires à ne pas dépasser.

### 3.1 - Pollution chronique

En raison de ses effets néfastes sur la santé et la végétation, **l'ozone est soumis à une réglementation européenne** (Directive 2008/50/CE<sup>1</sup>), **transposée en droit français** (Décret du 21 octobre 2010 relatif à la qualité de l'air<sup>2</sup>).

L'ozone est concerné par :

- des **valeurs cibles** (VC), définies par la directive européenne et reprises dans la réglementation française, correspondant à un niveau fixé dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et l'environnement dans son ensemble, **à atteindre dans la mesure du possible dans un délai donné**. Il n'existe **pas de contraintes contentieuses associées à ces valeurs, mais des enjeux sanitaires avérés**. De ce fait, un dépassement de la valeur cible doit être déclaré au niveau européen et des plans d'actions efficaces doivent être mis en place afin de conduire à une diminution rapide des teneurs en dessous du seuil de la valeur cible.
- des objectifs à long terme (OLT), transposés en **objectif de qualité** dans la réglementation française (OQ), définis comme étant le niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère fixé sur la base des connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances pour la santé humaine et pour l'environnement, **à atteindre à long terme et à maintenir** (sauf si cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées). **Les objectifs à long terme concernent spécifiquement l'ozone**.

En complément des normes européennes et françaises (VC, OLT/OQ), l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a mis en place des lignes directrices relatives à la qualité de l'air dans le but d'évaluer et de réduire les effets de la pollution atmosphérique sur la santé humaine et sur les écosystèmes. Ces lignes directrices présentent **des recommandations d'ordre général concernant les niveaux d'exposition** (valeurs seuils indicatives) pour différents polluants atmosphériques, **en dessous desquels les effets sont considérés comme acceptables**. Les valeurs recommandées par l'OMS sont fondées sur des études épidémiologiques et toxicologiques publiées en Europe et en Amérique du Nord. L'ozone fait partie des polluants concernés par les recommandations OMS [Air Quality Guidelines, WHO, 2021<sup>3</sup>]. Les valeurs recommandées par l'OMS ont été abaissées pour l'ozone à 100 µg/m<sup>3</sup> en moyenne sur 8 heures, sur la base de liens récemment établis entre la mortalité journalière et la concentration d'ozone dans l'air.

<sup>1</sup> Directive 2008/50/CE : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000018984836>

<sup>2</sup> Décret du 21 octobre 2010 relatif à la qualité de l'air : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000022941254/>

<sup>3</sup> Air Quality Guidelines, WHO, 2021 : <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345334/9789240034433-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pour la protection de la santé :

- VC : 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne sur 8 heures, à ne pas dépasser plus de 25 jours par an, en moyenne sur 3 ans ;
- OLT/OQ : correspondant à une concentration en ozone de 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne sur une période de 8 heures, aucun dépassement autorisé dans l'année ;
- Valeur OMS : 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne sur 8 heures à ne pas dépasser plus de 3 jours par an et 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne de la concentration moyenne en  $\text{O}_3$  max sur 8 heures et 6 mois consécutifs, avec la plus forte concentration en  $\text{O}_3$  des moyennes glissantes sur 6 mois.

De nombreuses études scientifiques ont montré les effets néfastes de l'ozone sur la végétation, du fait de son fort pouvoir oxydant. De ce fait, **la réglementation intègre des objectifs de qualité et des valeurs cibles calés sur les périodes de pleine végétation et de cultures situées au printemps et en été**. Ainsi, l'**AOT40** (Accumulation Over Threshold) représente le cumul des différences entre les mesures horaires d'ozone supérieures à 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et la concentration de 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , relevées entre 9 et 21 heures légales, du 1<sup>er</sup> mai au 31 juillet de l'année considérée.

Pour la protection de la végétation :

- VC : 18 000  $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  en moyenne sur 5 ans ;
- OQ / Objectif à long terme : 6 000  $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  en moyenne sur une année.

## 3.2 - Épisodes de pollution

Certaines conditions météorologiques, combinées à la pollution chronique, jouent un rôle aggravant et vont contribuer à concentrer la pollution, parfois à des niveaux suffisamment élevés pour que l'on parle d'épisode de pollution. Ces épisodes peuvent durer de quelques heures à quelques jours. **Les conditions météorologiques qui favorisent un épisode de pollution à l'ozone** (fortes températures et ensoleillement important) **ne sont pas les mêmes que pour le dioxyde d'azote ou les particules** (vent faible, inversion de température, couche limite basse).

La directive européenne définit la concentration de polluant à partir de laquelle un épisode de pollution présentant un risque pour la santé et l'environnement est déclenché. Ces seuils sont transposés et complétés dans la réglementation française.

Pour l'Île-de-France, la procédure d'information et d'alerte concerne 3 polluants : l'ozone, les particules  $\text{PM}_{10}$ , le dioxyde d'azote  $\text{NO}_2$ .

Cette procédure comporte deux niveaux de gravité croissante :

- Un **niveau d'information et de recommandations** : ce niveau est déclenché lorsque le seuil d'information d'un des trois polluants risque d'être atteint le lendemain. Chaque seuil d'information correspond à une concentration d'un polluant dans l'atmosphère au-delà de laquelle une exposition de courte durée a des effets limités et transitoires sur la santé des catégories de la population particulièrement sensibles (enfants, personnes âgées, asthmatiques et insuffisants respiratoires chroniques). Il comprend des actions d'information de la population, des recommandations sanitaires aux catégories de la population particulièrement sensibles, ainsi que des recommandations et des mesures visant à réduire certaines des émissions polluantes. Concernant l'ozone, **le niveau d'information et de recommandations est fixé à 180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dépassé pendant 1 heure**.

- Un **niveau d'alerte** : ce niveau est déclenché lorsque le dépassement du seuil d'alerte pour l'un des trois polluants est prévu pour le lendemain. Chaque seuil d'alerte correspond à une concentration d'un polluant dans l'atmosphère au-delà de laquelle une exposition de courte durée présente un risque pour la santé ou l'environnement. En plus des actions prévues au niveau d'information et de recommandations, ce niveau comprend des mesures de restriction ou de suspension d'activités concourant à la pollution. Concernant l'ozone, deux seuils supplémentaires ont été définis, déclenchant l'activation ou le renforcement de certaines mesures d'urgence selon la gravité de l'épisode de pollution :
  - 1<sup>er</sup> seuil : **240 µg/m<sup>3</sup> dépassé pendant 1 h (moyenne horaire)** ;
  - 2<sup>ème</sup> seuil : **300 µg/m<sup>3</sup> (moyenne horaire, dépassé pendant 3 heures consécutives)** ;
  - 3<sup>ème</sup> seuil : **360 µg/m<sup>3</sup> dépassé pendant 1h (moyenne horaire)**.

## 4. La surveillance opérationnelle de l'ozone en Île-de-France

En France, la surveillance de la qualité de l'air est confiée à des associations indépendantes, les AASQA (Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air). Ces associations, à dimension régionale, composent le dispositif de référence au niveau national. Airparif est en charge de cette surveillance et de cette information en Île-de-France.

En Île-de-France, **l'ozone est mesuré en continu par 23 stations automatiques de référence du réseau d'Airparif implantées en situation de fond** (loin de toute source de pollution), 16 localisées dans l'agglomération parisienne et 7 en zone rurale. En complément, une station d'observation est située au 3<sup>ème</sup> étage de la Tour Eiffel.

### 4.1 – Evaluation de la pollution chronique

#### 4.1.1 - Protection de la santé – Objectif de qualité

Compte-tenu des fortes fluctuations interannuelles liées aux conditions météorologiques, le nombre moyen de jours de dépassement de l'objectif de qualité relatif à la protection de la santé (seuil de 120 µg/m<sup>3</sup> sur 8 heures) peut considérablement varier dans le temps. Il s'analyse donc au regard de la météorologie estivale, et notamment de la présence de périodes durablement chaudes et ensoleillées.

**L'objectif de qualité français est toujours dépassé en Île-de-France.** C'est également le cas du seuil recommandé par l'OMS (100 µg/m<sup>3</sup> à ne pas dépasser sur une période de 8 heures). Ces dépassements concernent **l'ensemble de la région** (Figure 5), même si le dépassement de l'OQ dépend des conditions météorologiques estivales. Ainsi, en 2007 et 2018, les conditions estivales ont été propices à la formation d'ozone avec un fort ensoleillement et des températures élevées, engendrant ainsi un nombre de jours de dépassement de l'OQ très important sur toute l'Île-de-France (> 25 jours), tandis qu'en 2012 et 202 l'été s'est révélé moins ensoleillé et moins chaud et a conduit à un nombre de jours de dépassement bien plus faible (< 15 jours).

**Les zones périurbaines et rurales sont généralement plus touchées que le cœur de l'agglomération parisienne.** Ce constat est attribué à l'effet « puits d'ozone » caractéristique des grandes métropoles au centre desquelles se concentrent les sources d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), telles que le trafic routier et le chauffage résidentiel qui, par réaction avec l'ozone, consomment celui-ci.

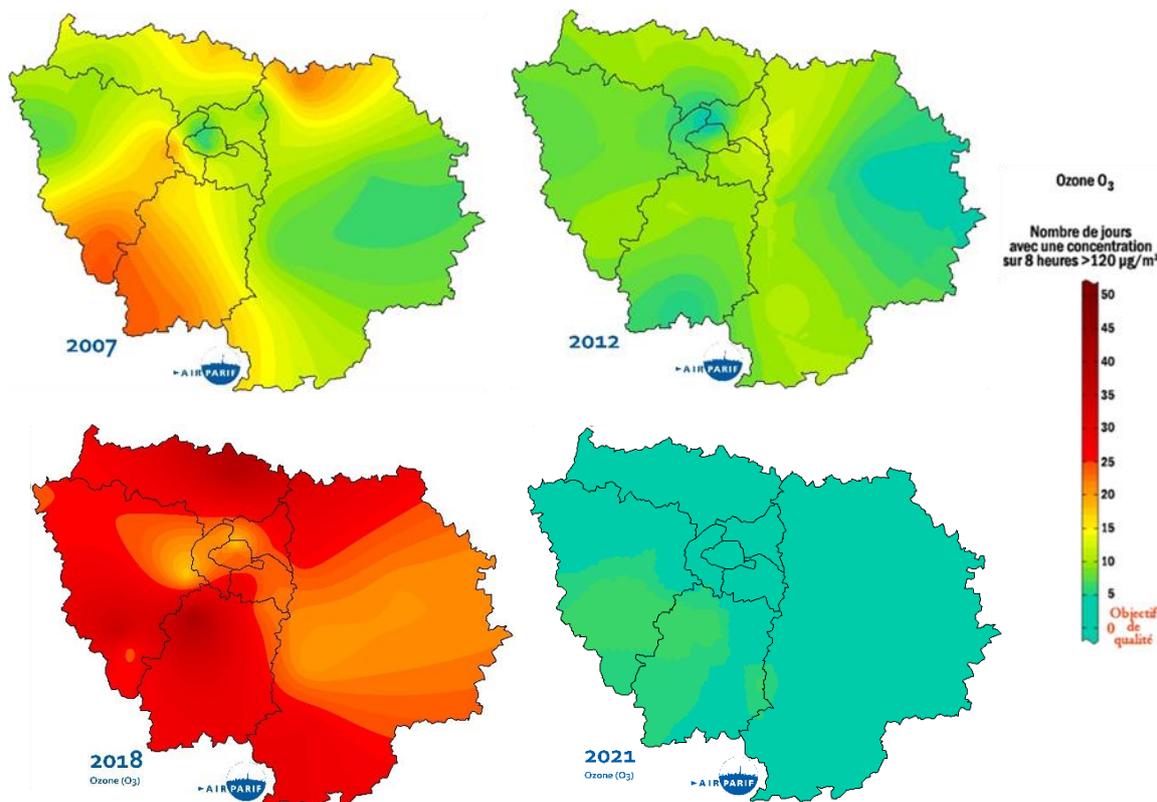


Figure 5 : nombre de jours de dépassement de l'objectif de qualité en ozone (O<sub>3</sub>) (seuil de 120 µg/m<sup>3</sup> sur 8 heures) en Île-de-France de 2007 à 2021

Sur la période 2001-2021, **le nombre de jours de dépassement ne montre pas de tendance à la baisse** (Figure 6). Il reste continuellement supérieur à l'objectif de qualité (aucun dépassement autorisé). La période 2007-2017 est la plus faible de l'historique avec entre 7 et 19 jours de dépassement en zone rurale et 7 à 14 jours dans l'agglomération. Le nombre de jours de dépassement a augmenté depuis 2018, et est comparable à ceux observés avant 2007. Cela s'explique par des étés chauds et très ensoleillés, ainsi qu'une augmentation du nombre de jours de canicule. Ces derniers étés se placent régulièrement parmi les étés les plus chauds (Source Météo France). Ce nombre de jours de dépassement de l'objectif de qualité reste néanmoins très inférieur à celui de l'année 2003, année qui avait connu un épisode de canicule durable et très intense.

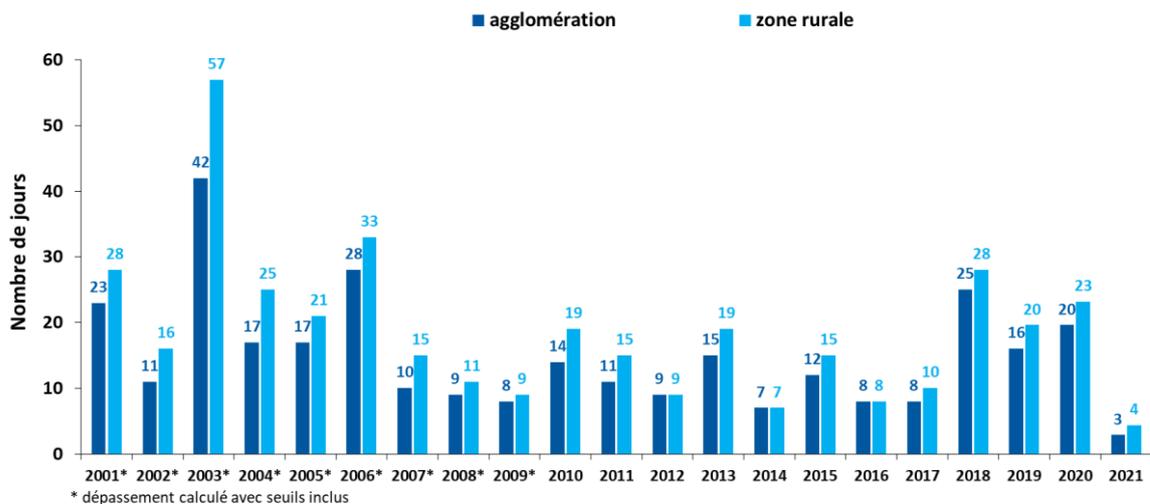


Figure 6 : nombre moyen de jours de dépassement de l'objectif de qualité en ozone (O<sub>3</sub>) (seuil de 120 µg/m<sup>3</sup> sur 8 heures) en Île-de-France de 2001 à 2021

Le nombre de jours de dépassement de l'objectif de qualité en zone rurale est toujours supérieur ou égal au nombre de jours de dépassement dans l'agglomération parisienne. Ceci est une conséquence des mécanismes de formation de l'ozone, comme vu dans la partie 1.

#### 4.1.2 - Protection de la santé – Valeur cible

Compte-tenu de cette forte dépendance aux conditions météorologiques, l'évolution du nombre de jours de dépassement du seuil de 120 µg/m<sup>3</sup> sur 8 heures ne peut s'évaluer de manière pertinente que sur le moyen terme en moyenne 3 ans.

**Après une période de 11 ans sans dépassement, la valeur cible relative à la protection de la santé** (120 µg/m<sup>3</sup> pour le maximum journalier de la moyenne sur 8 h à ne pas dépasser plus de 25 jours par année civile en moyenne calculée sur 3 ans) **a de nouveau été dépassée en 2019 et 2020** sur la région et plus spécifiquement dans certaines zones périurbaines et rurales de l'Essonne et du Val-d'Oise, du fait des conditions estivales intenses de 2018 à 2020 (Figure 7). Les étés 2008-2017 avaient été moins propices à la formation d'ozone, avec un respect de cette valeur réglementaire. Après un dépassement de la valeur cible sur les 2 dernières années, le nombre de jours de dépassement de la valeur cible sur les stations les plus fortes dans l'agglomération et en zone rurale est en baisse sur la période 2019-2021 et ne dépasse plus ce seuil du fait des conditions estivales limitées en 2021.

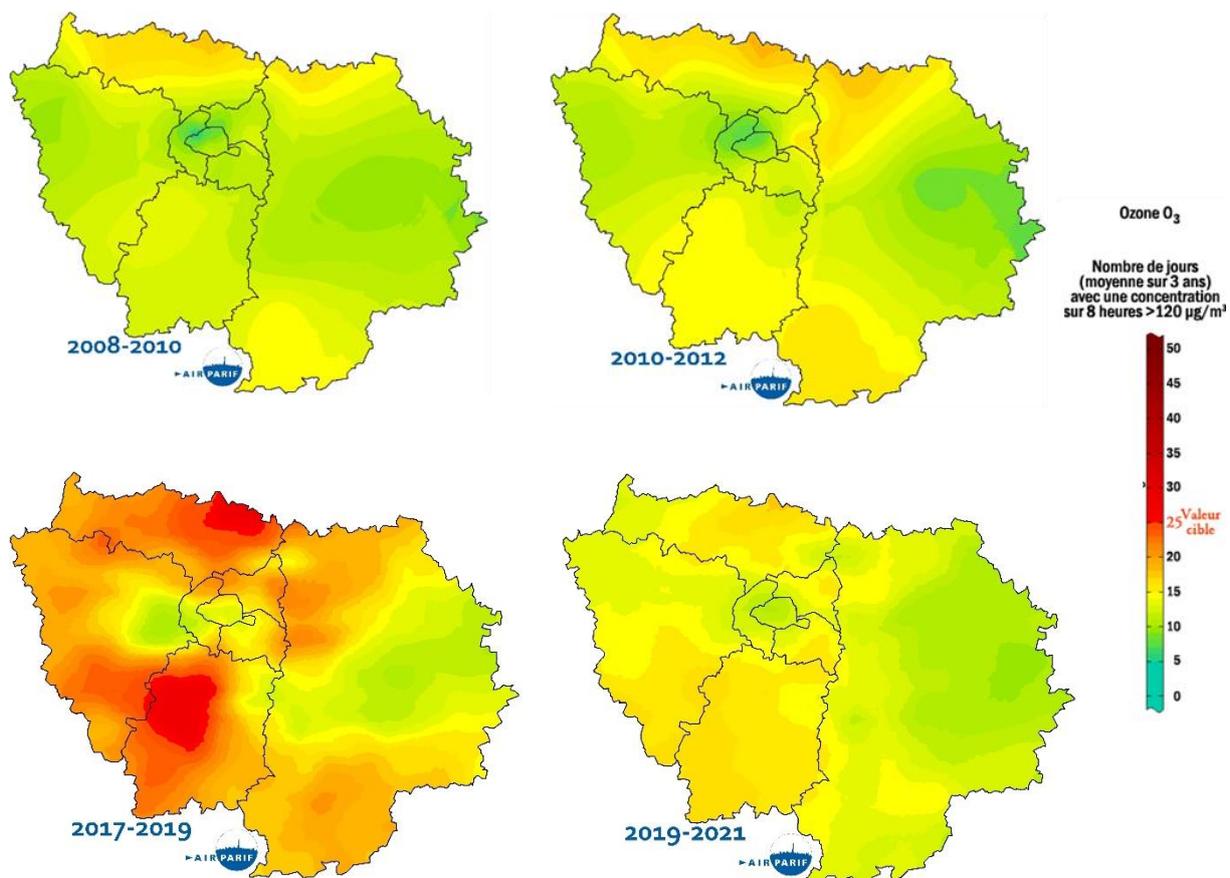


Figure 7 : situation de l'Île-de-France au regard de la valeur cible en ozone (O<sub>3</sub>) pour la santé (seuil de 120 µg/m<sup>3</sup> sur 8 heures à ne pas dépasser plus de 25 jours par année civile en moyenne calculée sur 3 ans) en Île-de-France – Période 2008-2010 à 2018-2020

La moyenne du nombre de jours de dépassement du seuil de 120 µg/m<sup>3</sup> sur 8 heures reste **plus élevée dans les zones rurales et périurbaines que dans le cœur de l'agglomération parisienne.**

La Figure 8 illustre la situation en ozone par rapport à la valeur cible pour la protection de la santé, calculée en moyenne sur 3 ans et à ne pas dépasser plus de 25 jours par an. Sur les périodes 2006-2008 à 2016-2018, la valeur cible pour la protection de la santé a été respectée en tout point de l'Île-de-France. La période allant de 2007-2009 à 2015-2017 a enregistré le plus faible nombre de jours de dépassement de tout l'historique.

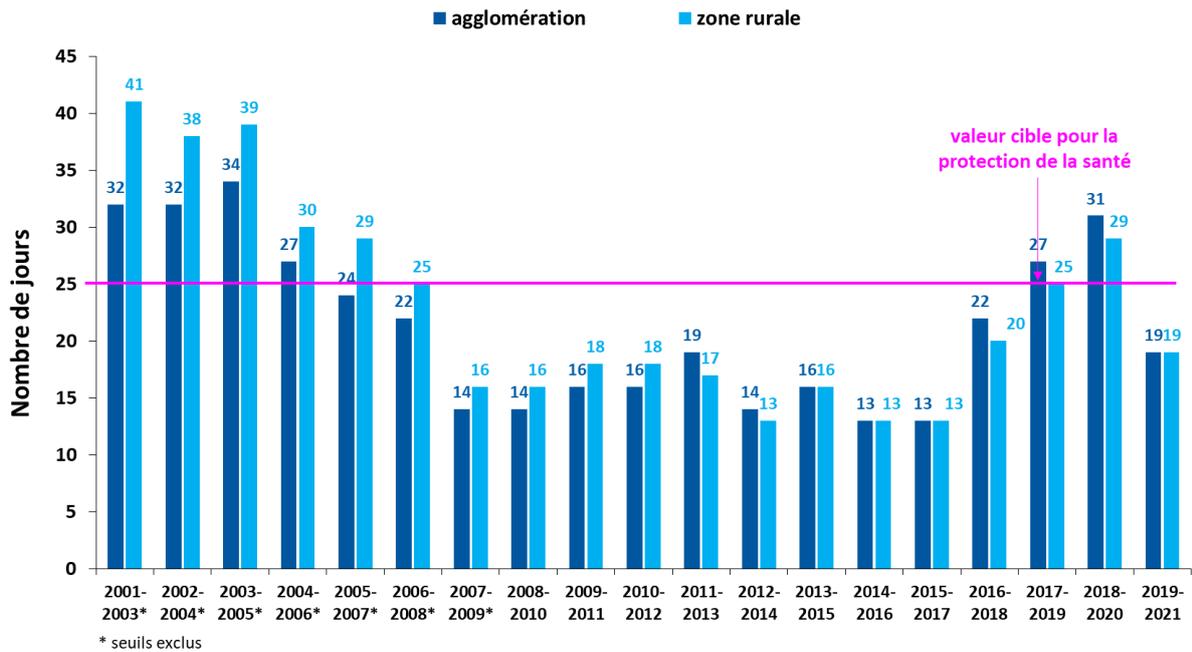


Figure 8 : nombre de jours de dépassement du seuil de 120 µg/m<sup>3</sup> sur 8 heures en ozone en moyenne sur 3 ans (valeur cible pour la protection de la santé) sur la station de mesure la plus forte en Île-de-France de 2001-2003 à 2019-2021

### 4.1.3 - Protection de la végétation

La situation de l'AOT par rapport au seuil de la valeur cible (fixé à 18 000 µg/m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>) se juge en moyenne sur une période de 5 ans. Par conséquent, la moyenne est moins fluctuante d'une année à l'autre. **La valeur cible est respectée en tout point de l'Île-de-France, et ce depuis l'année 2003.**

A contrario, **l'objectif de qualité français pour la protection de la végétation** (fixé à 6 000 µg/m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> de mai à juillet, équivalent à l'objectif à long terme européen) **est dépassé en Île-de-France tous les ans.** En 2020, toutes les stations du réseau d'Airparif enregistrent des teneurs supérieures à l'objectif de qualité pour la protection de la végétation. Le constat de dépassement est généralement observé dans les zones rurales et périurbaines visées par ce seuil de protection, où les teneurs sont jusqu'à plus de 2 fois supérieures à la norme.

#### 4.1.4 - Évolution des niveaux moyens annuels

Entre 1992-1994 et 2019-2021, les niveaux moyens annuels d'ozone mesurés dans l'agglomération parisienne ont augmenté de 130 % (Figure 9). Cette hausse a été significative dans la première partie de l'historique. **Entre 1994 et 2003, le rythme moyen annuel de hausse était d'environ +7 % par an. Entre les périodes 2001-2003 et 2015-2017, les niveaux urbains de fond en ozone sont statistiquement stables. Depuis 2016-2018, les concentrations moyennes annuelles en ozone connaissent une nouvelle augmentation ; celles mesurées sur la période 2018-2020 étant les plus fortes de l'historique du fait notamment de l'année 2020 où la crise sanitaire a engendré des baisses d'émissions de NO<sub>2</sub> et par conséquent une augmentation des concentrations en O<sub>3</sub> (cf. Bilan régional 2020). La période 2019-2021 présente une légère baisse par rapport à la période précédente du fait des conditions estivales maussades en 2021.**

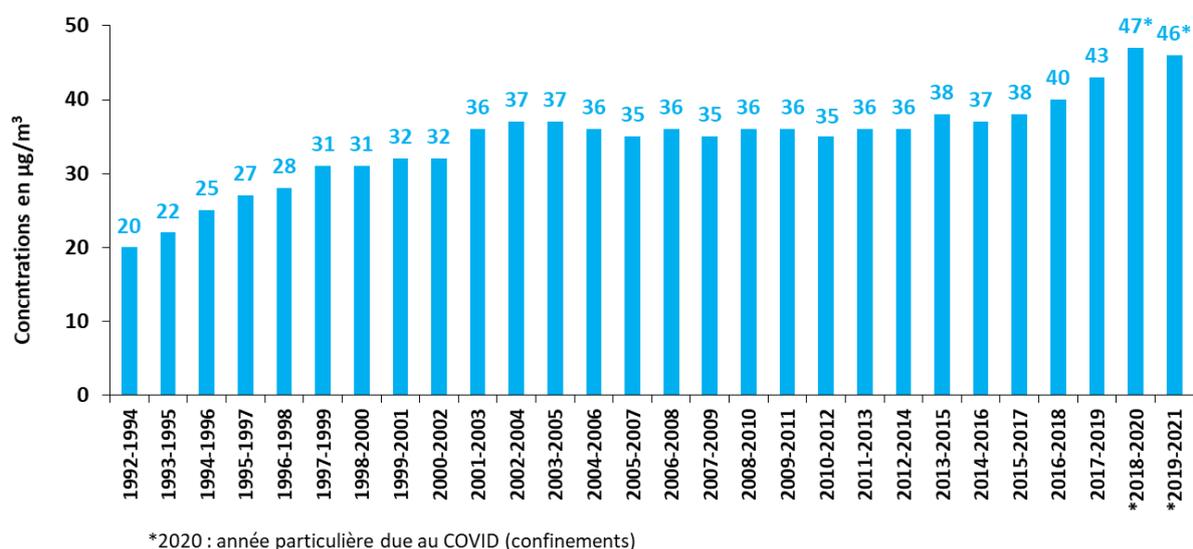


Figure 9 : Évolution, à échantillon constant de trois stations urbaines de fond, de la concentration moyenne sur 3 ans en ozone (O<sub>3</sub>) dans l'agglomération parisienne de 1992-1994 à 2019-2021

Cette hausse a été constatée en France, mais également dans toute l'Europe. Elle est principalement liée à deux phénomènes. Le premier tient paradoxalement à la **diminution des niveaux d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) dans les grandes agglomérations des pays les plus développés**. En effet, la baisse régulière des niveaux de monoxyde d'azote (NO), qui localement dans les cœurs urbains détruit chimiquement l'ozone, induit une hausse des niveaux moyens d'ozone.

Le second s'observe dans l'ensemble de l'hémisphère nord : il tient à la hausse globale des émissions de précurseurs de l'ozone (multipliées par 5 en un siècle). **Les scientifiques s'accordent à dire qu'il n'y aura pas de baisse des niveaux moyens d'ozone tant que les émissions de précurseurs à l'échelle globale ne diminueront pas de manière sensible** [Collette et al., 2011 ; Guerreiro et al., 2014 ; Weber et al., 2018].

Une récente étude a également montré que **le dérèglement climatique** (qui multiplie les vagues de chaleur et de sécheresse) **renforce le stress hydrique de la végétation**. Ce phénomène limite fortement la capacité des plantes à capter l’ozone dans l’air et à l’éliminer efficacement. Par conséquent, l’absorption de l’ozone par une végétation en état de stress hydrique est fortement remise en cause et pourrait potentiellement expliquer l’augmentation des niveaux moyens annuels rencontrés en Europe [Lin et al., 2020].

**Sur le moyen et long terme, l’ozone reste en Île-de-France une problématique chronique récurrente.**

#### 4.1.5 - Records de pollution à l’ozone en Île-de-France

La Figure 10 indique les concentrations d’ozone les plus fortes relevées depuis 1992.

Historique 1992-2020	Fond urbain et péri-urbain		Fond rural régional	
	Valeur ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Où et quand ?	Valeur ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Où et quand ?
Concentration moyenne annuelle la plus forte	61	Les Ulis, 2019	64	Zone rurale Sud-Ouest Forêt de Rambouillet, 2020
Concentration horaire maximale	340	Tremblay-en-France le 11 août 1998 à 18h légales	327 <sup>(1)</sup>	Zone rurale Sud-Est Forêt de Fontainebleau, le 31 juillet 1992 à 20h légales
Concentration sur 8 heures maximale	252	Les Ulis le 8 août 2003 de 13h à 21h légales	260	Zone rurale Sud-Ouest Forêt de Rambouillet, le 8 août 2003 de 13h à 21h légales
	Valeur (jours)	Où et quand ?	Valeur (jours)	Où et quand ?
Nombre de jours de dépassement de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 8h le plus fort	56	Les Ulis, 2003	68	Zone rurale Sud-Ouest Forêt de Rambouillet, 2003
Nombre de jours de dépassement de 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 1h le plus fort	14	Cergy-Pontoise, 2003	18	Zone rurale Sud-Ouest Forêt de Rambouillet, 1995

(1) 357  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à Frémenville le 12 juillet 1994 durant une campagne de mesure temporaire

Figure 10 : records annuels pour l’ozone ( $\text{O}_3$ ) en Île-de-France sur l’historique 1992-2020

## 4.2 - Épisodes de pollution à l’ozone en Île-de-France

**Le nombre d’épisodes de pollution est variable d’une année sur l’autre**, comme l’illustre la Figure 11. Le nombre et l’occurrence des épisodes de pollution sont étroitement liés au contexte météorologique (voir facteurs d’influence dans la partie suivante).

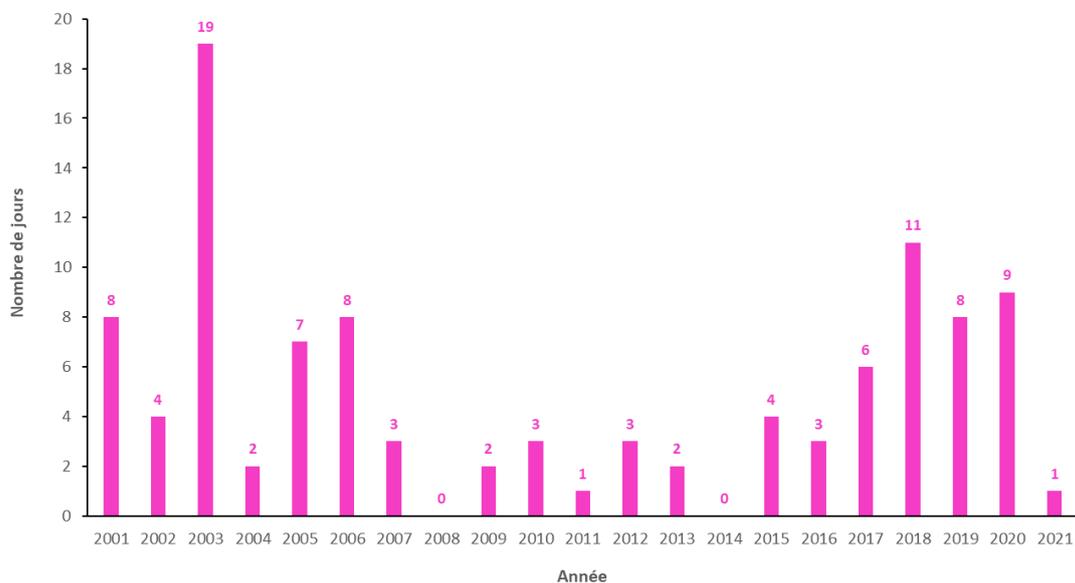


Figure 11 : nombre de jours de dépassement du seuil d’information et de recommandations en ozone de 2001 à 2021

Comme pour le nombre de jours de dépassement du seuil de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur 8 heures, **le nombre de jours de dépassement du niveau d’information et recommandations** ( $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur une heure) **ne montre pas de tendance à la baisse sur la période 2001-2021**. La période 2007-2017 est la plus faible de l’historique avec entre 0 et 4 jours de dépassement. Ce faible nombre d’épisodes est dû au fait que ces étés n’ont pas connu de conditions météorologiques propices à la formation d’ozone avec peu ou pas de périodes de canicule et parfois même des périodes pluvieuses et peu chaudes. De 2018 à 2020, le nombre de jours de dépassement a augmenté et est comparable à ceux observés avant 2007, du fait des vagues de chaleur estivales que connaît la région depuis 3 ans. Les concentrations maximales observées sont toutefois moindres. L’année 2003 reste, à ce jour, l’année ayant connu le plus d’épisodes de pollution du fait de la très forte et durable canicule qui a touché l’Île-de-France, et plus globalement la France. En 2021, le nombre de jours de dépassement du niveau d’information et de recommandations a de nouveau été très faible du fait des conditions météorologiques estivales maussades, avec peu de journées chaudes et ensoleillées, et donc peu propices aux épisodes de pollution à l’ozone. **Les niveaux de pointe en ozone sont étroitement liés aux vagues de chaleur et de sécheresse, dont la fréquence et l’intensité tendent à augmenter en Europe** [Lin et al., 2020]. De ce fait, le changement climatique affectera les futures concentrations d’ozone, en raison de l’évolution des conditions météorologiques, avec notamment plus d’épisodes caniculaires, ainsi qu’en raison de l’augmentation des émissions de précurseurs spécifiques (notamment celles des COV biogéniques dues à la hausse des températures).

La quantification des futurs niveaux d’ozone reste néanmoins incertaine, compte-tenu de la complexité des processus de formation de ce composé. Les modélisations prévoient **une augmentation des concentrations en ozone à moyen et long terme, au-delà de 2040** [ETC/ACM, 2015]. Toutefois, **cette tendance pourrait être compensée par les mesures envisagées de réduction des émissions de précurseurs d’ozone** [Collette et al, 2013]. Le changement climatique, combiné à cette réduction des émissions, pourrait influencer les futurs niveaux d’ozone [EEA, 2015].

## 4.3 - Exemple d'un épisode de pollution à l'ozone en Île-de-France

En août 2020, un épisode de pollution à l'ozone a entraîné 6 journées de dépassement du seuil d'information et de recommandations (Figure 12). Les conditions météorologiques exceptionnelles survenues durant cette période (températures caniculaires, insolation excédentaire) ont favorisé la formation d'ozone à partir de polluants émis directement sur la région, qui s'ajoutent à des imports en provenance d'autres régions. La localisation du panache de pollution dépend de la direction et de la force du vent. Ainsi, la journée du 8 août qui présentait un vent de secteur nord-est a vu son panache se former au sud-ouest de la région, tandis que le 11 août, le vent de secteur sud-est a eu pour conséquence de former le panache de pollution au nord-ouest de la région.

**Cet épisode a conduit à la mise en place de mesures de réduction des émissions de polluants par les autorités préfectorales, notamment la circulation différenciée.**

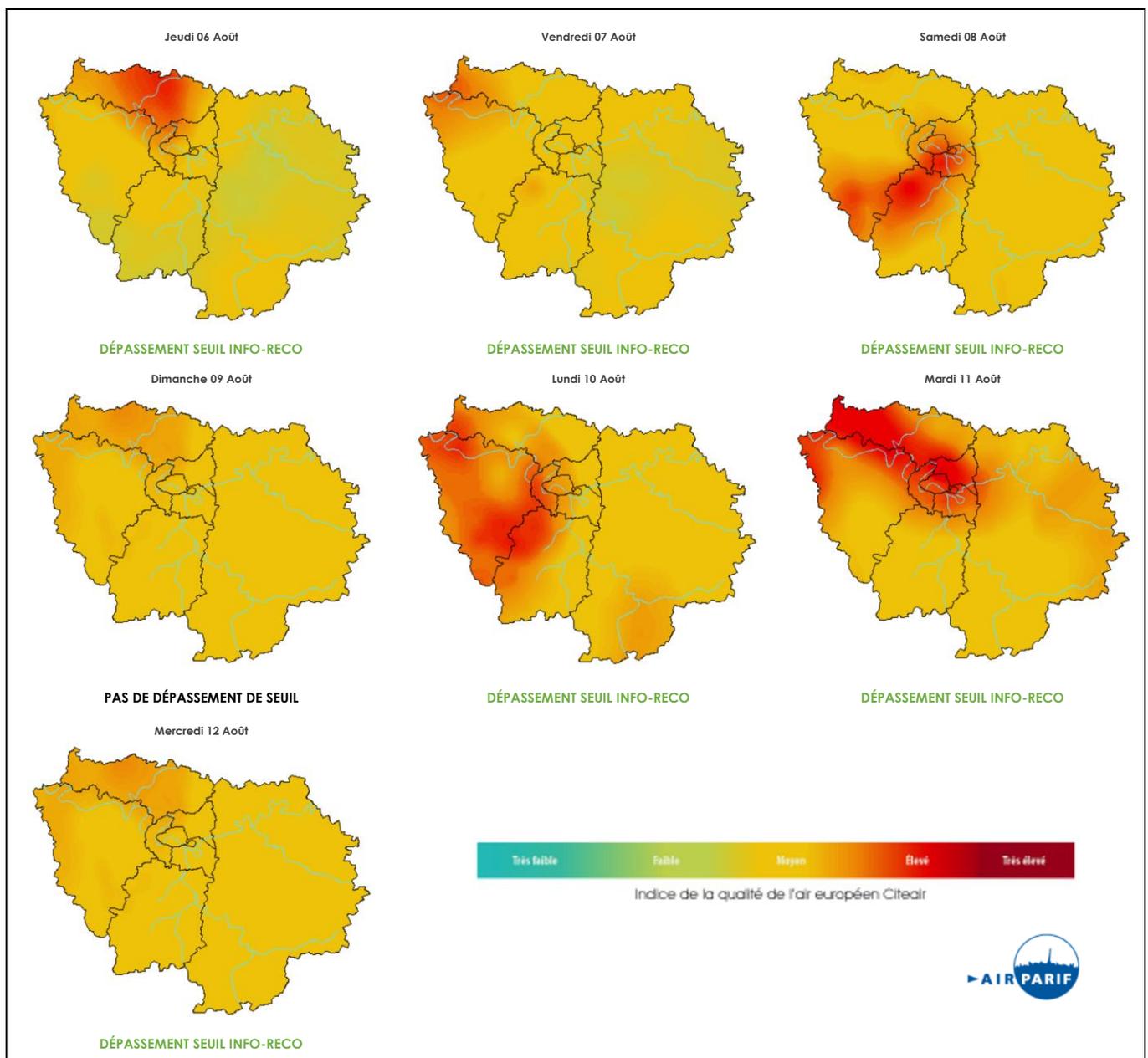


Figure 12 : cartes journalières de la qualité de l'air en Île-de-France de l'épisode de pollution à l'ozone ayant eu lieu du 6 au 12 août 2020

## 4.4 - Paramètres d'influence

Les années 2003 et 2019 ont toutes les deux connu des vagues de chaleur intenses et durables mais les niveaux d'ozone ont été plus élevés en 2003 qu'en 2019. **En 2003, le seuil d'information et de recommandations était automatiquement dépassé lorsque la température dépassait les 27°C, tandis qu'en 2019, une température de plus de 30°C ne suffisait pas pour dépasser les 180 µg/m<sup>3</sup> (Figure 13).**

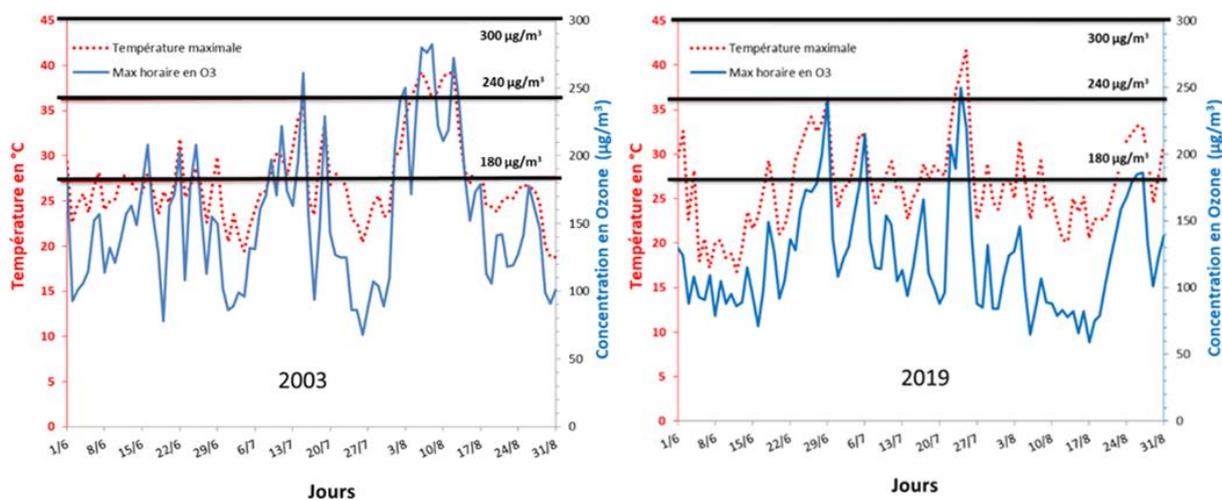


Figure 13 : Évolution de l'influence de la température sur les concentrations en ozone entre les années 2003 et 2019

Afin d'évaluer plus avant l'impact de la météo, différents paramètres météorologiques ont été analysés pour évaluer leur influence dans l'occurrence des épisodes de pollution : la température estivale moyenne (mai-septembre), la température estivale maximale et les précipitations moyennes.

L'analyse de ces paramètres montre que, pour les années avec un faible nombre de jours de dépassement (2004, 2007-2014), de faibles températures moyennes ont été observées, de même que des températures maximales limitées ainsi que de fortes précipitations (Figure 14). À l'inverse, les années présentant un nombre élevé de jours de dépassement (2003, 2005, 2006, 2018, 2019, 2020) ont connu une météo plus propice à la formation d'ozone avec des températures moyennes et maximales élevées, et de faibles précipitations.

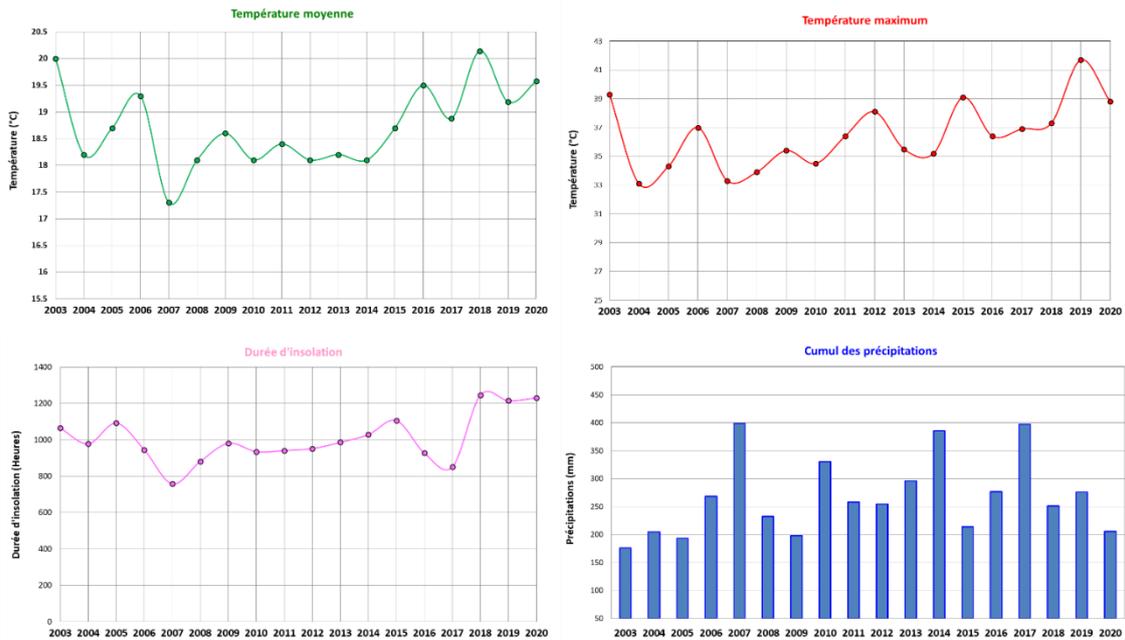


Figure 14 : Exemples d'analyses de paramètres météo d'influence (température moyenne, température maximum, précipitation moyenne) sur la période 2003-2020

Si ces paramètres météorologiques influencent les concentrations d'ozone, la relation entre ces paramètres, notamment la température, et les niveaux d'ozone évolue (Figure 15). **À température équivalente, les concentrations en ozone mesurées en 2006 étaient plus fortes qu'en 2020. Ceci est probablement lié à la diminution des concentrations des précurseurs, à une évolution des ratios entre eux et un changement dans les dynamiques de formation de l'ozone.**

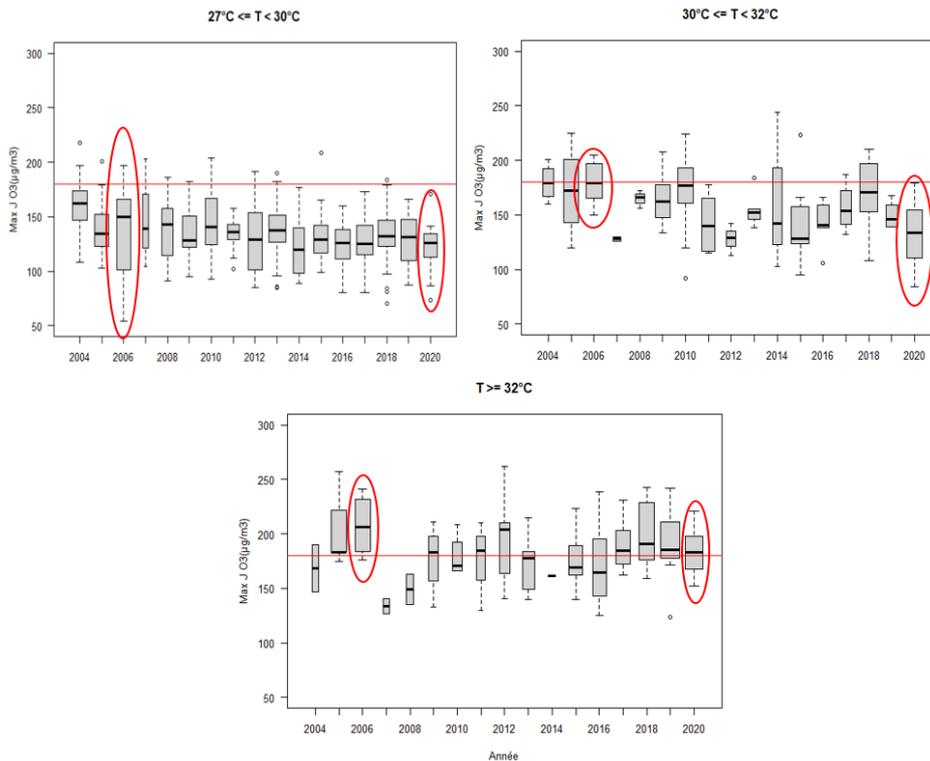


Figure 15 : Évolution de l'influence de la température sur les concentrations en ozone sur la période 2004-2015. Le graphique de gauche représente les concentrations en ozone mesurées lorsque la température était comprise entre 27 et 30°C, celui du milieu entre 30 et 32°C et celui de droite supérieure à 32°C.

Une analyse des journées de dépassement de 2015 à 2019 a également permis de déterminer l'importance des paramètres météo sur leur occurrence. Ainsi, en ce qui concerne la température maximale, **la majorité des dépassements en 2019 ont eu lieu lorsque la température était supérieure à 32°C (Figure 16). La température minimale pour un dépassement est de 30°C.** De même, la grande majorité des dépassements a eu lieu lorsque **l'ensoleillement était supérieur à 10 heures dans la journée**, soit une journée avec peu de couverture nuageuse. Enfin, la majorité des dépassements a eu lieu lorsque **le vent maximal dans la journée était inférieur à 5 m/s.** En effet, un vent fort pousse le panache de pollution hors de l'Île-de-France et va ainsi polluer la région voisine.

**Ces évolutions sont probablement à mettre en relation avec les baisses des émissions de leur gaz précurseurs (COV et NO<sub>x</sub>), qui peuvent modifier les équilibres chimiques.**

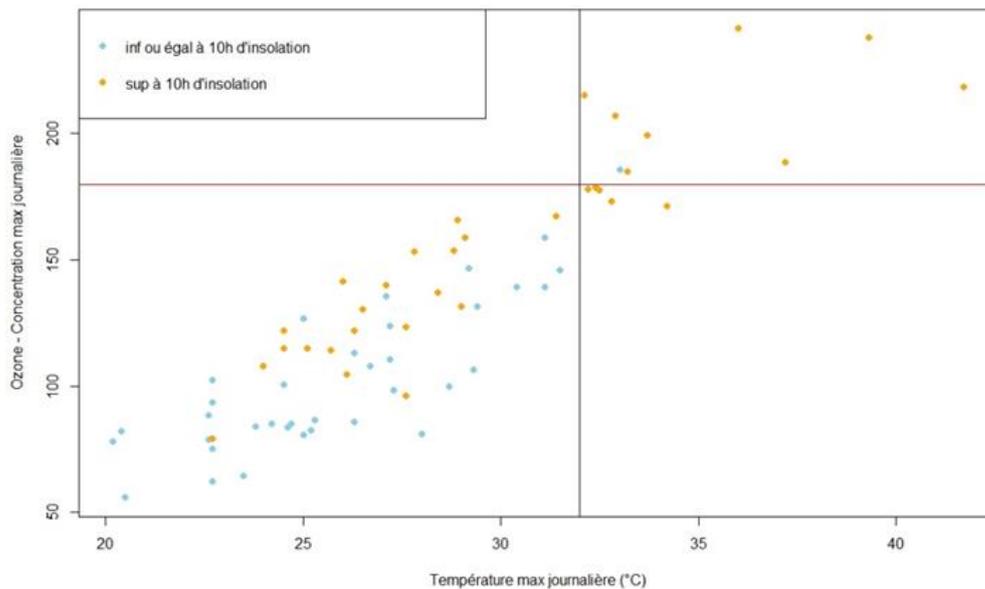


Figure 16 : Exemple d'analyse de paramètres météo d'influence (température maximum et durée d'insolation) sur l'année 2019

## 5. Leviers d'action et efficacité des mesures d'urgence

Les processus de formation et de destruction de l'ozone dans l'atmosphère restent complexes, faisant intervenir un ensemble de réactions entre les gaz précurseurs. De fait, une baisse des niveaux d'un des précurseurs (COV ou NO<sub>x</sub>) n'induit pas obligatoirement une diminution des concentrations en ozone, et notamment dans le cas où l'équilibre entre ces composés n'est plus respecté. Ce déséquilibre peut même conduire à une augmentation des concentrations en ozone. C'est la raison pour laquelle **des stratégies de réduction des émissions de polluants précurseurs dans des proportions adaptées** s'avèrent nécessaires.

### 5.1 - Quels leviers d'actions pour limiter son exposition et réduire la pollution à l'ozone ?

Les autorités publiques, ainsi que les collectivités, ont différents moyens d'actions permettant d'informer et de lutter contre cette pollution photochimique, comme le stipule l'arrêté inter-préfectoral relatif aux procédures d'information-recommandation et d'alerte en cas d'épisode de pollution en région Île-de-France (cf. Partie 3).

En cas d'épisode de pollution à l'ozone, le Préfet de Police de Paris peut engager **des actions d'information et de recommandations sanitaires**, visant à protéger la population.

Les recommandations sanitaires ont pour but de conseiller les personnes dites « sensibles » et « vulnérables », ainsi que la population générale sur la manière de limiter leur exposition à la pollution atmosphérique. **En cas d'épisode de pollution à l'O<sub>3</sub>, il est fortement conseillé de limiter les sorties durant l'après-midi lorsque l'ensoleillement est maximum, ainsi que d'éviter les activités physiques et sportives intenses en plein air ; celles à l'intérieur pouvant être maintenues.**

En complément, le Préfet de Police peut également mettre en œuvre des mesures réglementaires de restriction des émissions, adaptées et proportionnelles aux caractéristiques de l'épisode de pollution, dans le but de réduire ou supprimer les émissions de polluants dans l'atmosphère et à en limiter les effets sur la santé humaine et sur l'environnement.

Dans le cas d'un épisode de pollution à l'ozone, ces mesures dites « d'urgence » (dont la liste ci-dessous est non-exhaustive) concernent principalement les secteurs émettant dans les plus grandes proportions des NO<sub>x</sub> et des COV :

- **Le secteur des transports** : abaissement temporaire de la vitesse de 20 km/h sur certains axes de la région, contournement par la Francilienne des véhicules en transit dont le poids total autorisé excède 3.5 T, mise en place de la circulation différenciée, ...
- **Le secteur résidentiel** : interdiction totale de la pratique du brûlage ; report des travaux d'entretien ou de nettoyage nécessitant des outils à moteur thermique ou l'utilisation de produits à base de solvants (acétone, white spirit, vernis, colles, peintures, ...).

- **Le secteur industriel** : report de certaines opérations émettrices de COV (travaux de maintenance, dégazage d'une installation, chargement ou déchargement de produits émettant des COV en l'absence de dispositif de récupération des vapeurs), réduction du fonctionnement des établissements industriels dont les émissions contribuent à l'épisode de pollution, voire arrêt temporaire et exceptionnel des activités polluantes.

Le Préfet de Police peut également recommander aux collectivités territoriales, aux autorités organisatrices de la mobilité ainsi qu'aux entreprises, des mesures comportementales et d'accompagnement visant à limiter certaines émissions polluantes : report des déplacements non indispensables, utilisation de véhicules peu polluants (électrique, GNL, ...), mise en place de tarifs avantageux en matière de stationnement résidentiel, incitation à privilégier les modes actifs de déplacement (marche, vélo, ...), le covoiturage ou encore les réseaux de transport en commun (notamment avec la mise en place par Île-de-France Mobilités du « forfait journalier antipollution », un titre de transport à tarif réduit valable sur l'ensemble de la région), aménagement des déplacements domicile-travail (plan de mobilité, télétravail, adaptation des horaires, ...).

## 5.2 – Évaluation de l'impact de l'efficacité des mesures d'urgence.

Bien que **toute mesure prise permettant de réduire les émissions de polluants présente un bénéfice non négligeable pour la qualité de l'air ainsi que pour la santé des Franciliens**, des questionnements subsistent néanmoins concernant l'efficacité des mesures d'urgence mises en place par le Préfet lors d'un épisode de pollution pour un polluant secondaire, tel que l'ozone. Certains leviers d'actions ont fait l'objet d'une évaluation par Airparif.

### 5.2.1 – Évaluation de l'impact lié à l'abattement des émissions de NO<sub>x</sub> par le trafic routier sur les concentrations en ozone.

En fin d'année 2019, Airparif a mené des travaux basés sur des simulations numériques de concentrations en ozone sur la région Île-de-France selon différents scénarios de réduction des émissions polluantes par le trafic routier en oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>).

Ces travaux de scénarisation ont concerné la journée du 27 juin 2019, date à laquelle la région Île-de-France a été touchée par une vague de chaleur précoce d'une intensité exceptionnelle. La présence d'un anticyclone positionné sur l'Europe de l'Est a généré un flux de sud et l'advection d'un air de plus en plus chaud à l'origine du temps caniculaire rencontré. Cet épisode caniculaire, combiné à un excédent d'ensoleillement, a été propice à une augmentation importante des concentrations d'ozone. Pour cette journée du 27 juin 2019, aucun épisode de pollution n'a été constaté : une concentration maximale de 178 µg/m<sup>3</sup> a été relevée, selon les critères de l'arrêté inter-préfectoral en vigueur.

L'étude menée par Airparif a consisté à simuler **quelles auraient été les concentrations en ozone pour la journée du 27 juin 2019, en appliquant un abattement sur les émissions de NO<sub>x</sub> par le trafic routier, et de les comparer à celles modélisées avec les émissions réelles** (« situation de référence »).

Pour ce faire, **des scénarios de réduction des émissions de NO<sub>x</sub> par le trafic routier allant de 10 à 50 % ont été considérés**. Les simulations numériques (réalisées à partir du système de modélisation interrégional [ESMERALDA](#) développé par AIRPARIF) ont permis de recalculer les concentrations en ozone en prenant en compte chaque scénario d'abattement, à conditions météorologiques équivalentes.

Selon les scénarios réalisés :

- Les diminutions des émissions de NO<sub>x</sub> entre la situation de référence et chaque scénario de réduction sont d'autant plus importantes que l'abattement est grand. Ce constat est d'autant plus visible au sein de l'agglomération parisienne (où se concentre la densité des émissions par le trafic routier), comme l'illustre la Figure 17.

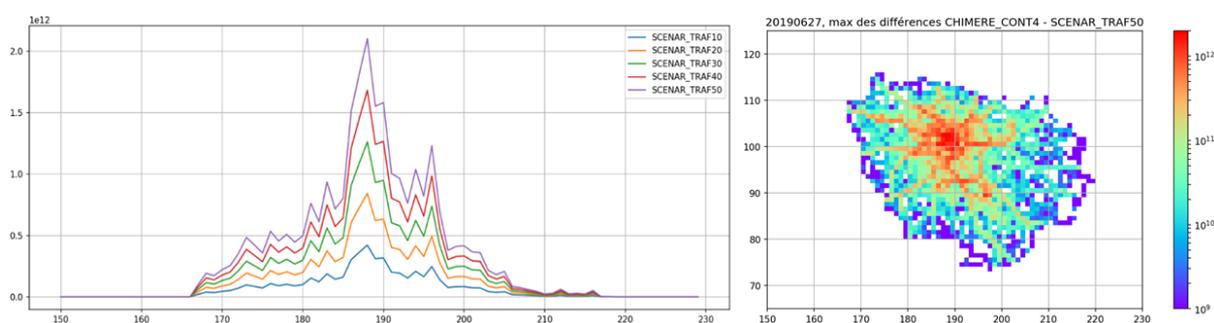


Figure 17 : Écarts des émissions de NO<sub>x</sub> entre la situation de référence et chaque scénario d'abattement des émissions du trafic routier (10, 20, 30, 40 et 50 %) selon un transect ouest-est de la région Île-de-France (graphique de gauche). Le graphique de droite correspond à la carte des différences entre la situation de référence et la situation avec abattement des émissions de NO<sub>x</sub> de 50 % (TRAF50). Les différences maximales sont observées pour un axe des abscisses dont les valeurs sont comprises entre 180 et 200 (l'agglomération parisienne) – x= ~190 correspondant à Paris.

- Les simulations numériques montrent qu'**un impact lié à la réduction des émissions de NO<sub>x</sub> du trafic routier sur les concentrations en ozone peut être perceptible dès 10 % d'abattement**. Cet impact est d'autant plus grand que l'abattement des émissions de NO<sub>x</sub> est important, comme l'illustre la Figure 18. Selon les scénarios, les résultats de l'étude indiquent une diminution plus ou moins importante des niveaux en ozone en périphérie de l'Île-de-France et au sein des régions voisines. *A contrario*, les concentrations en ozone tendent à augmenter dans le centre de l'agglomération parisienne.

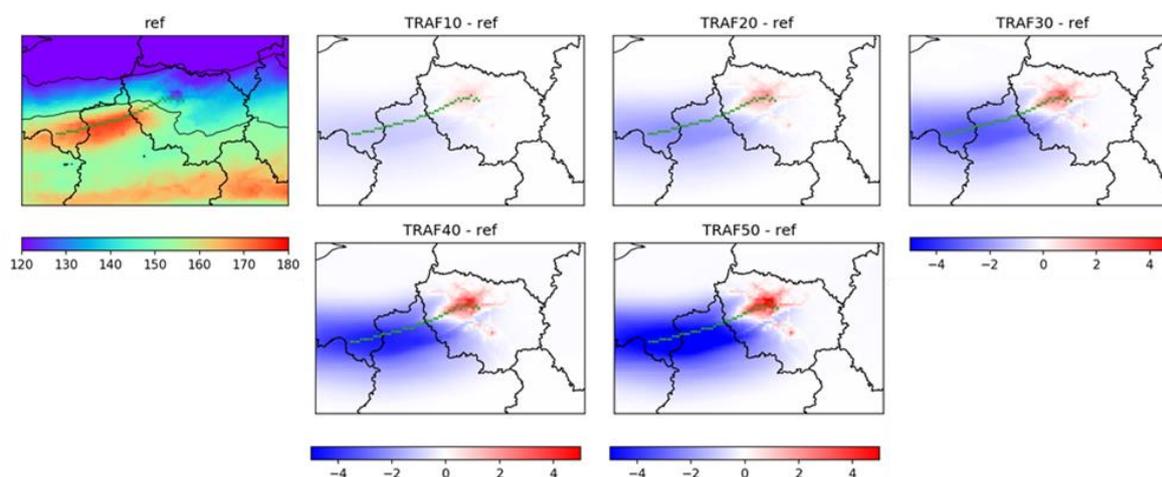
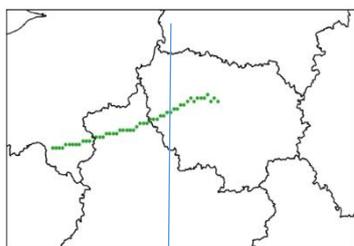
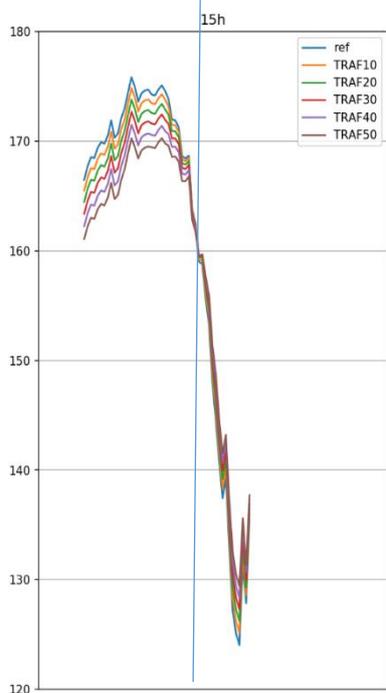


Figure 18 : Impact (exprimé en µg/m<sup>3</sup>) lié à l'abattement des émissions de NO<sub>x</sub> (de 10 à 50 %) sur les concentrations d'ozone pour la journée du 27 juin 2019, à l'échancee 15h TU. La ligne verte correspond aux maxima d'ozone modélisés dans le panache.



L'abatement des émissions de NO<sub>x</sub>, polluants qui localement détruisent chimiquement l'ozone dans les centres urbains, induit une augmentation des niveaux en ozone visible au sein de l'agglomération parisienne.

Selon les scénarios, l'impact lié à la réduction des émissions de NO<sub>x</sub> peut atteindre jusqu'à +5 µg/m<sup>3</sup> sur les concentrations en ozone dans le cœur dense de l'agglomération francilienne.



En revanche, des niveaux en ozone plus faibles sont observés à la périphérie de l'Île-de-France et dans les régions voisines sous le vent de l'agglomération parisienne. En effet, dans les scénarios d'abatement, la masse d'air s'est ainsi moins chargée en NO<sub>x</sub> que dans la situation de référence, ayant pour conséquence de réduire la formation en ozone dans le panache (Figure 19).

Selon les scénarios, la réduction des émissions de NO<sub>x</sub> peut conduire à une baisse de la concentration en ozone dans le panache de l'ordre de 5 µg/m<sup>3</sup> (soit environ -1 µg/m<sup>3</sup> pour 10 % d'abatement).

Figure 19 : Concentrations maximales relevées dans le panache pour la situation de référence (en bleu) et pour chaque scénario ayant fait l'objet d'un abatement des émissions de NO<sub>x</sub> par le trafic routier.

Il est important de souligner que **cette évaluation a été réalisée à émissions de COV constantes, en appliquant uniquement un abatement des émissions de NO<sub>x</sub> issus du trafic routier** (les autres activités polluantes de NO<sub>x</sub> restant inchangées dans les simulations numériques). Les enseignements de cette étude pourront être amenés à être différents dans le cas où un abatement des COV et des NO<sub>x</sub> (de plusieurs secteurs émetteurs) est appliqué. Cependant, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a également testé divers scénarios dans lesquels les émissions de COV étaient abaissées. Leurs résultats montrent qu'une diminution des émissions de COV couplée à celle des NO<sub>x</sub> n'avait pas plus d'impact qu'une diminution des NO<sub>x</sub> seuls [Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, 2020].

D'autres scénarios ont été testés afin de déterminer les secteurs d'activité qui auraient le plus d'impact sur la baisse des concentrations en O<sub>3</sub> en cas de restrictions. Il apparaît que la mise en place de mesures sur le trafic routier et l'industrie serait le plus efficace, tandis que la mise en place de mesures sur le secteur résidentiel ou l'agriculture n'aurait que peu d'impact [Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, 2020].

## 5.2.2 – Évaluation de l'impact de la baisse des émissions liées à la circulation différenciée.

Lors d'un épisode de pollution à l'ozone, le Préfet de Police peut décider de mettre en œuvre le dispositif de circulation différenciée. Il s'agit d'une **mesure réglementaire visant à restreindre l'utilisation des véhicules les plus polluants en Île-de-France**, plus spécifiquement à l'intérieur du

périmètre délimité par l'A86 (hors autoroute). Elle repose sur l'utilisation des vignettes Crit'Air, une classification qui permet de distinguer les véhicules en six classes en fonction de leurs émissions de polluants atmosphériques (dépendant de l'âge du véhicule et de sa motorisation). Seuls les véhicules disposant d'une vignette Crit'Air de classe 0,1 et 2 sont désormais autorisés à circuler. Cette mesure est applicable, le jour de l'épisode de pollution, à partir de cinq heures trente jusqu'à minuit.

En 2019, Airparif a procédé à une analyse permettant d'évaluer l'impact théorique maximal de la circulation différenciée en termes de gains de kilomètres parcourus et d'émissions de polluants atmosphériques (NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>), en conditions normales de circulation.

Dans le cas où cette mesure serait totalement respectée, l'impact maximal de la circulation différenciée induirait **une diminution de près d'un quart du trafic routier dans la zone intra-A86**, engendrant ainsi **une baisse d'environ 50 % des émissions en NO<sub>x</sub> et particules**.

Comme montré dans le paragraphe précédent, les études d'Airparif ont permis de montrer que **les réductions des émissions des précurseurs de l'ozone au sein de la région Île-de-France**, et plus particulièrement **dans le cœur dense de l'agglomération parisienne** (là où se concentrent les émissions) peuvent permettre de **limiter l'intensité du pic de pollution à l'ozone, autant en zone périphérique de l'Île-de-France qu'en aval de la région**.

De plus, **ces mesures permettent également de limiter localement les concentrations en dioxyde d'azote à proximité des axes routiers**. En effet, les concentrations en monoxyde d'azote (NO), très importantes, réagissent avec l'ozone pour former du dioxyde d'azote. Lors des périodes photochimiques, ce phénomène peut conduire à des concentrations très élevées de NO<sub>2</sub> sur les stations trafic du réseau de mesure. Ce phénomène est d'autant plus important que les émissions primaires de NO<sub>x</sub> par le trafic routier sont fortes.

En revanche, **ces réductions ne permettent pas de diminuer les concentrations en ozone, notamment en zone urbaine**. Une étude menée par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a montré que **la mise en place de la circulation différenciée n'avait pas permis de diminuer les concentrations en ozone dans le cœur de la zone faible émission de l'agglomération lyonnaise** [Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, 2019]. Ce constat est cohérent avec les conclusions issues de l'évaluation de l'impact lié à l'abattement des émissions de NO<sub>x</sub> par le trafic routier sur les concentrations en ozone (Cf. Sous-section 5.2.1).

L'ozone étant un polluant dont les processus de formation et de transport se produisent sur de longues distances, **des actions très localisées et isolées n'ont néanmoins que peu d'effets**.

Considérant qu'une part non négligeable d'ozone résulte de l'import en provenance des autres régions environnantes, il apparaît indispensable de mettre en place des **actions de réduction de forte ampleur et à très large échelle géographique** (*a minima* régional, voire idéalement interrégional ou national) sur les précurseurs d'ozone pour lutter efficacement contre la pollution photochimique.

Un levier d'action intéressant consisterait à appliquer, par anticipation, certaines mesures, locales et à grande échelle, avant l'arrivée des vagues de chaleur. Ainsi, une étude européenne a montré que la mise en place de mesures de réduction des émissions de NO<sub>x</sub> un jour avant l'épisode de pollution permettait de réduire son ampleur [ETC/ACM 2018].

Il peut également être envisagé d'agir à long terme sur la pollution chronique en mettant en œuvre des mesures permanentes, qui s'accompagneraient le plus souvent d'un effet bénéfique pour la

santé des Franciliens et qui permettraient éventuellement de diminuer la fréquence des épisodes de pollution.

## 6. Perspectives

L'ozone est un polluant secondaire, pour lequel il est difficile de pouvoir établir des tendances claires tant sur l'aspect chronique, qu'épisodique. Alors qu'une température de 27°C suffisait en 2003 à dépasser le niveau d'information-recommandations en O<sub>3</sub>, il a été constaté ces dernières années qu'une température minimale de 30°C était désormais nécessaire pour dépasser ce seuil réglementaire. Ce constat peut s'expliquer en partie par la baisse continue des concentrations des précurseurs (NO<sub>x</sub>, COV) observée depuis une vingtaine d'années. La diminution conjointe de ces polluants a certainement dû conduire à une évolution dans les ratios NO<sub>x</sub>/COV.

Face à ce constat, plusieurs perspectives scientifiques pourraient répondre aux diverses questions qui se posent. Les trois régimes chimiques de l'ozone ont-ils changé au cours du temps et de quelle manière ? La production photochimique de l'ozone faisant intervenir différents radicaux (notamment OH•, RO<sub>2</sub>•, HO<sub>2</sub>•), la capacité oxydante de l'atmosphère a-t-elle également évolué sur le long terme ? Quels sont les COV les plus impliqués dans le processus de formation de l'ozone et de quelle manière y contribuent-ils ? Leurs sources d'émissions ont-elles bien été identifiées ? Comment évoluent les concentrations de ces COV précurseurs, tant d'un point de vue spatial que temporel ? Toutes les données associées et les processus de production sont-ils bien pris en compte dans les modèles ? Tant de questions pour lesquelles il n'est pas aisé d'apporter de réponses à court terme.

En l'état actuel des moyens mis à disposition (mesures, modélisation) et dans une optique d'amélioration continue de la surveillance de l'ozone, des travaux sont entrepris dans le but de parfaire les connaissances sur les précurseurs gazeux (et plus spécifiquement, les COV) en IDF, de mieux les prendre en compte dans les inventaires d'émissions, de mieux comprendre les mécanismes de formation de l'ozone et de poursuivre le développement des outils de modélisation en intégrant ces éléments. Les pistes de travail évoquées ci-dessous sont en partie menées en collaboration avec des organismes institutionnels nationaux et de recherche.

**En juillet 2021, une stratégie à moyen-long terme concernant les mesures d'ozone et ses précurseurs a été proposée par le Laboratoire Central de la Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) aux Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA).** Cette dernière vise à mettre en place des équipements spécifiques afin d'une part, de mieux documenter les précurseurs de l'ozone et d'améliorer les modèles (notamment sur la déclinaison des composés biogéniques) et d'autre part, d'homogénéiser le parc analytique national (pour d'éventuelles comparaisons). Cinq stations de mesures appartenant aux AASQA ont été retenues, dont la station de fond urbain Paris 1<sup>er</sup> Les Halles pour Airparif. Dans le cadre de cette stratégie, un nouvel appareil mesurant à la fois des COV et des COVO (Oxygénés) a été installé sur ce site en début d'année 2022, remplaçant ainsi un analyseur de COV récemment transféré à la station trafic Boulevard Périphérique Porte d'Auteuil. La mise en place d'un tel appareil permet pour la première fois de recueillir des mesures de COV à proximité du trafic routier (jusqu'à maintenant, elles étaient menées en situation de fond). L'exploitation approfondie et l'analyse de la base de données de COV(O) feront l'objet d'un stage de 6 mois proposé par Airparif courant 2023.

**Une autre piste de travail consiste à acquérir une meilleure connaissance des émissions de précurseurs d'ozone, tant anthropiques que biogéniques.**

Un premier axe porte sur l'amélioration continue des inventaires des émissions anthropiques (NO<sub>x</sub>, COV). Par exemple, dans les études d'abattement des émissions de NO<sub>x</sub> réalisées pendant des vagues de chaleur, les surémissions induites par l'utilisation de la climatisation pourraient faire l'objet d'études spécifiques. Des travaux sont également en cours pour mettre à jour les inventaires d'émissions biogéniques. Actuellement, Airparif exploite une version simplifiée du modèle MEGAN pour modéliser quotidiennement les émissions biogéniques qui alimentent par la suite CHIMERE (modèle de chimie-transport intégré dans la plateforme inter-régionale de cartographie et de prévision ESERALDA). L'objectif pour mettre à jour l'inventaire des émissions biogéniques est d'utiliser une version plus récente et complète du modèle MEGAN avec un jeu de données plus précis (à partir de l'Inventaire National Forestier pour la France et l'inventaire du JRC (Joint Research Center) pour le reste de l'Europe). Des comparaisons entre les sorties de modélisations des émissions biogéniques fournies par l'ancienne et par la nouvelle version du modèle MEGAN seront réalisées afin d'évaluer la plus-value d'une mise à jour du modèle.

Les émissions biogéniques sont sensibles à la température, à l'humidité et au rayonnement solaire. Ces paramètres météorologiques pourraient également faire l'objet d'études spécifiques, en vue d'apporter à terme une meilleure compréhension des interactions entre météorologie et pollution urbaine dans le processus de formation de l'O<sub>3</sub>. Actuellement, les données météorologiques utilisées en entrée de modélisations proviennent du modèle MM5. Des travaux de développement de paramétrisations optimales engagés depuis quelques années doivent aboutir courant 2023 à l'utilisation du modèle météorologique WRF dans les modélisations menées par Airparif.

Enfin, **des travaux conjoints avec, entre autres, des laboratoires de recherche** (développeurs des modèles utilisés) **sont actuellement menés, notamment sur l'amélioration de la représentation des processus** (réactions chimiques, capacité oxydante de l'atmosphère, ...).

Plusieurs campagnes de mesures sont programmées à l'été 2022 en région Île-de-France, dont le projet ACROSS « Atmospheric ChemistRy Of the Suburban foreSt » (du 13 juin au 25 juillet) piloté par l'Institut Pierre-Simon Laplace (<https://across.cnrs.fr/>). Ce programme de recherche vise à améliorer les connaissances sur les transformations chimiques dans l'atmosphère et l'interaction entre les émissions des végétaux et les émissions humaines de polluants. Pour ce faire, des mesures aéroportées (avec des vols de l'avion scientifique ATR-42 de SAFIRE) sont quotidiennement effectuées pour suivre l'évolution des propriétés des polluants atmosphériques au cours de leur transit au sein du panache formé entre les centres denses urbains et les zones rurales.

Autre programme de recherche visant à améliorer nos connaissances sur les composés précurseurs d'ozone, l'ANR Street. Dans le cadre de ce projet, une campagne de mesures est menée du 1<sup>er</sup> juin au 8 juillet 2022, dans le but d'étudier en zones urbaines l'impact du stress hydrique des arbres et notamment sur leurs émissions de COV.

Ces deux projets s'inscrivent au sein de l'initiative PANAME 2022 (comptant au total 10 programmes scientifiques), dont l'objectif est un peu plus large : mieux comprendre les causes et les effets du changement climatique en environnement urbain, en abordant les problématiques de la pollution de l'air et du climat urbain avec une forte interdisciplinarité mêlant physique, chimie de l'atmosphère, ainsi que les sciences météorologiques, climatiques, humaines et sociales (<https://paname.aeris-data.fr/#>). Les résultats des projets ACROSS et STREET doivent servir *in fine* à améliorer les modèles de qualité de l'air.

Une des dernières perspectives envisagées serait de pouvoir mener des collaborations avec les instituts de recherche pour le développement d'un module visant à représenter tous les processus complexes impliqués dans la formation de l'ozone – au même titre que cela a pu être fait pour les particules (module SSH-Aerosol, CEEA/INERIS/Airparif). Ce module permettrait de modéliser les concentrations en ozone, incluant les différentes sources d'émissions en COV (étant bien spatialisées et temporalisées) et tenant compte de facteurs intégrés (nature des végétaux/essences, ensoleillement, température, humidité, eau dans les sols (état ou non de stress hydrique), saisonnalité, ...), qui influenceraient la quantité de COV pouvant être émis dans l'atmosphère.

## 7. Conclusion générale

L'ozone, **polluant secondaire** formé chimiquement dans l'atmosphère, par oxydation des Composés Organiques Volatils (COV) (et du CO) en présence d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) sous l'effet combiné du rayonnement solaire et de fortes températures, connaît ses plus fortes concentrations durant l'été.

La production d'ozone étant fortement dépendante des rapports de concentrations entre les COV et les NO<sub>x</sub> selon les environnements, les niveaux moyens d'ozone sont généralement plus soutenus en zone rurale, sous le vent du panache urbain, que dans l'agglomération où leurs précurseurs ont été majoritairement produits.

L'ozone est un **polluant oxydant**, dont les effets sur la santé humaine, la végétation, le climat ainsi que sur les bâtiments sont avérés. Selon la sensibilité de chacun, il peut provoquer des problèmes respiratoires, déclencher des crises d'asthme, diminuer la fonction pulmonaire et favoriser l'apparition de maladies respiratoires. Il va également limiter la photosynthèse des végétaux soumis à ces concentrations et provoquer, à terme, des baisses de rendement pour les cultures, une baisse de la qualité de celles-ci, voire des dépérissements des écosystèmes.

En raison de ses effets néfastes sur la santé et la végétation, **l'ozone est soumis à des réglementations européennes, transposées au droit français**. Des valeurs cibles et des objectifs de qualité ont ainsi été définis pour lutter contre la pollution chronique à l'ozone et protéger à la fois la santé humaine et la végétation. De même, pour anticiper et limiter l'ampleur des épisodes de pollution, des seuils d'information et d'alerte ont été définis par la directive européenne et appliqués localement par l'arrêté inter-préfectoral.

La pollution chronique, ainsi que les épisodes de pollution à l'ozone sont très dépendants des conditions météorologiques estivales. Ainsi, **il n'est pas possible de dégager des tendances claires sur les dépassements des valeurs cibles et des objectifs de qualité, ainsi que sur le nombre de dépassements des seuils d'information-recommandations et d'alerte. Après onze années consécutives de non-dépassement (2006-2008 à 2016-2018), la valeur cible européenne est de nouveau dépassée en Île-de-France depuis l'année 2019. Des dépassements chroniques de l'objectif à long terme et des recommandations de l'OMS sont également enregistrés sur l'ensemble de la région**. De plus, **les niveaux moyens d'ozone sur l'année**, non soumis à des réglementations, sont **en constante augmentation en France mais également en Europe**.

Différents paramètres météorologiques ont été analysés pour évaluer leur influence dans l'occurrence des épisodes de pollution. Ainsi, la température maximale, la température moyenne, la durée d'insolation et les précipitations influencent sur les concentrations en ozone. Bien qu'il soit difficile d'établir des tendances, **à températures équivalentes, les concentrations en ozone étaient bien plus fortes il y a une dizaine d'années qu'actuellement**. Ainsi, alors qu'une température de 27°C suffisait pour dépasser les 180 µg/m<sup>3</sup> en 2003, il faut un minimum de 30°C depuis ces dernières années pour assister au dépassement du seuil d'information et de recommandations. **Ces évolutions sont probablement à mettre en relation avec les baisses des émissions de leurs gaz précurseurs (COV et NO<sub>x</sub>), qui peuvent modifier les équilibres chimiques**.

Afin de lutter contre l'intensité d'un épisode de pollution à l'ozone, le Préfet de Police de Paris peut engager **des actions d'information, des recommandations sanitaires et comportementales**, visant à protéger la population. De plus, des mesures d'urgence peuvent être prises dans le but de diminuer les concentrations en NO<sub>x</sub> et en COV et par conséquent limiter l'intensité du pic de pollution à l'ozone, autant en Île-de-France qu'en aval de la région.

Afin de juger de l'intérêt des mesures prises pour lutter contre un épisode de pollution à l'ozone, Airparif a mené des travaux basés sur des simulations numériques de concentrations en ozone sur la région Île-de-France selon différents scénarios de réduction des émissions polluantes par le trafic routier en oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>). Les simulations numériques montrent qu'**un impact lié à la réduction des émissions de NO<sub>x</sub> du trafic routier sur les concentrations en ozone peut être perceptible dès 10 % d'abattement, autant dans le centre de l'agglomération parisienne qu'en périphérie de l'Île-de-France et au sein des régions voisines.**

Pour ce qui est de la circulation différenciée, l'impact d'une telle mesure est nettement plus significatif. Ainsi, l'application de cette mesure réglementaire induirait **une diminution de près d'un quart du trafic routier dans la zone intra-A86**, engendrant ainsi **une baisse d'environ 50 % des émissions en NO<sub>x</sub> et particules.**

En revanche, **son action sur l'ozone peut s'avérer localement inefficace, notamment en zone urbaine.** L'ozone étant un polluant dont les processus de formation et de transport sont effectifs sur de longues distances, **des actions très localisées et isolées n'ont que peu d'effets.** Toutefois, **cette mesure réglementaire permet vraisemblablement de limiter l'intensité du pic de pollution, puisque les réductions des émissions de précurseurs associées à la mise en place de la circulation différenciée peuvent contribuer à réduire les niveaux de fond d'ozone à l'échelle régionale, voire nationale.**

Considérant qu'une part non négligeable d'ozone résulte de l'import en provenance des autres régions environnantes, il apparaît indispensable de mettre en place **des actions de réduction de forte ampleur et à très large échelle géographique** (*a minima* régional, voire idéalement interrégional ou national) sur les précurseurs d'ozone pour lutter efficacement contre la pollution photochimique.

Les projections du climat dans le futur montrent que **le changement climatique affecterait les concentrations d'ozone, en raison de l'évolution des conditions météorologiques, avec notamment plus d'épisodes caniculaires et de sécheresses.**

Quant à la pollution chronique, **la quantification des futurs niveaux d'ozone reste néanmoins incertaine, compte-tenu de la complexité des processus de formation de ce composé.** Les modélisations prévoient une augmentation des concentrations en ozone à moyen et long termes, au-delà de 2040. Toutefois, cette tendance pourrait être compensée par les mesures envisagées de réduction des émissions de précurseurs d'ozone. Le changement climatique, combiné à cette réduction des émissions, pourrait influencer les futurs niveaux d'ozone.

Un levier d'action intéressant consisterait à appliquer, par anticipation, certaines mesures à grande échelle avant l'arrivée des vagues de chaleur. Il peut également être envisagé d'agir à long terme sur la pollution chronique en mettant en œuvre des mesures permanentes, qui s'accompagneraient le plus souvent d'un effet bénéfique pour la santé des Franciliens et qui permettraient éventuellement de diminuer la fréquence des épisodes de pollution.

## 8. Références

**ADEME**, Coût économique pour l'agriculture des impacts de la pollution de l'air par l'ozone, synthèse 24 pages, Octobre 2020.

**Atmo Auvergne-Rhône-Alpes**, Impact de la circulation différenciée sur la pollution à l'ozone. Étude de cas : épisode de pollution du 24 juin au 02 juillet 2019, septembre 2019.

**Atmo Auvergne-Rhône-Alpes**, Ozone troposphérique – État des connaissances et sensibilité de réductions des émissions de précurseurs et des secteurs d'activités sur les concentrations d'ozone, Année 2020, Juillet 2020.

**Collette A. et al.**, Air quality trends in Europe over the past decade: a first multi-model assessment, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 11657-11678, 2011

**Collette A. et al.**, European atmosphere in 2050, a regional air quality and climate perspective under CMIP5 scenarios, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 7451-7471, 2013

**Elizabeth A. Ainsworth, Craig R. Yendrek, Stephen Sitch, William J. Collins, Lisa D. Emberson**, Annual Review of Plant Biology; the Effects of Tropospheric Ozone on Net Primary Productivity and Implications for Climate Change; 63:1, 637-661, 2012.

**European Environment Agency**, Air Pollution due to ozone: health impacts and effects of climate change, accessible à l'adresse suivante:  
<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/air-pollution-by-ozone-2/assessment>, 2015

**European Topic Centre on Air pollution and Climate change Mitigation (ETC/ACM)**, Modelled future change in surface summertime ozone concentrations, 2015.

**European Topic Centre on Air pollution and Climate change Mitigation (ETC/ACM)**, Ozone in Southern Europe – Assessment and effectiveness of measures, Technical Paper 2017/3, April 2018.

**Feng, Z., Kobayashi, K., Ainsworth, E.**, Impact of elevated ozone concentration on growth, physiology, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.): a metaanalysis. *Global Change Biology* 14, 2696–2708, 2008.

**Guerreiro, C. B.B, Foltescu, V., de Leeuw, F.**: Air quality status and trends in Europe, *Atmospheric Environment* 98(2014), 376-384, 2014

**Lin M. et al.**, Vegetation feedbacks during drought exacerbate air pollution extremes in Europe, *Nature Climate Change*, 2020.

**Nuvolone, D., Petri, D. & Voller, F.** The effects of ozone on human health. *Environ Sci Pollut Res* 25, 8074–8088 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9239-3>

**REVIHAAP**, Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project technical report, 2013.

**Weber et al.**, Total ozone trends from 1979 to 2016 derived from five merged observational datasets – the emergence into ozone recovery, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 2097-2117, doi:10.5194/acp-18-2097-2018, 2018