

LES DOSSIERS DE L'INERIS

Septembre 2020

An aerial photograph of Paris, France, showing a mix of modern skyscrapers and traditional European architecture. A large green rectangular overlay is positioned in the lower-middle part of the image, containing white text. The text is framed by two horizontal white lines. The background of the image is a clear blue sky with scattered white clouds. A series of thin, white, curved lines sweep across the sky from the bottom left towards the top right, creating a sense of motion and connectivity.

POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE
À L'OZONE: DÉCRYPTAGE

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

P.04

QU'EST-CE
QUE L'OZONE?

P.05

L'IMPACT DES
ÉMISSIONS ET
DU TRANSPORT
ROUTIER

P.06

UNE POLLUTION
TOUJOURS
D'ACTUALITÉ

P.06

RÉDUCTION DE
LA POLLUTION:
ÉTAT DES LIEUX

P.08

QUELLES
PRIORITÉS
DANS LA
LUTTE CONTRE
L'OZONE?

POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE À L'OZONE : DÉCRYPTAGE

L'ozone est un polluant atmosphérique bien connu pour ses effets délétères sur la santé humaine et sur la végétation. Il se forme dans les basses couches de l'atmosphère en période estivale, sous l'effet du rayonnement solaire et lorsque les températures sont élevées. Ainsi, on se souviendra de la canicule d'août 2003 et de ses dramatiques conséquences sanitaires, largement imputables aux températures particulièrement élevées, mais aussi aggravées par les niveaux d'ozone, inédits par leur ampleur géographique et leur persistance. Aujourd'hui, le principal problème lié à la pollution à l'ozone est l'absence de tendances à la baisse des niveaux de fond depuis près de deux décennies en Europe, en dépit des mesures de réduction des émissions des polluants précurseurs à sa formation.



Les analyses à long terme montrent l'absence de tendances claires à la baisse ou à la hausse des niveaux d'ozone en France.

Ce constat illustre toute la complexité qu'il y a à appréhender la formation de l'ozone troposphérique auquel sont exposés les populations et les écosystèmes.

Néanmoins, ces travaux montrent également que le territoire français ne subit plus les mêmes pointes de pollution que dans les années 2000, malgré l'occurrence fréquente en période estivale de situations météorologiques favorables au développement d'épisodes d'ozone (températures et rayonnement solaire élevés).

Si les niveaux de concentrations peuvent rester localement élevés, avec par exemple des épisodes d'ozone très intenses en 2018 et 2019¹, la situation n'est nullement comparable à celle de 2003, dans des conditions météorologiques similaires. Ainsi, le nombre et l'intensité des pointes de pollution à l'ozone ont bien diminué entre 2000 et 2019, signe de l'efficacité des plans de réduction des émissions mis en place par la France, ses régions et les pays voisins. Cependant, l'absence d'évolution substantielle des niveaux de fond est considérée comme le paramètre le plus préoccupant : l'Organisation mondiale de la santé (OMS) recommande une valeur guide de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la valeur maximum de la moyenne sur 8 heures, la réglementation européenne établissant une valeur limite de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne pour le même indicateur. L'Agence européenne de l'environnement, dans son rapport sur la qualité de l'air en Europe de 2018, estime que l'ozone pourrait être responsable de près de 17 000 morts prématurées en Europe chaque année. L'ozone est également surveillé pour ses effets néfastes sur les écosystèmes, en particulier les forêts et les cultures.

Une pollution complexe à traiter

L'ozone se forme à partir des transformations chimiques des oxydes d'azote (NOx) et des composés organiques

volatils (COV), principalement émis par le trafic routier et les activités industrielles. Avec la baisse des émissions établies et à venir dans ces secteurs, d'autres sources peuvent jouer un rôle de plus en plus important, par exemple les émissions de COV par les activités domestiques (produits ménagers notamment).

Le couvert végétal est aussi une source naturelle de COV, plus ou moins importante selon les essences et les conditions météorologiques. La formation de l'ozone est fortement dépendante des conditions météorologiques et donc des zones géographiques considérées. L'ozone est un polluant à longue durée de vie, qui peut voyager sur de très longues distances. Les mesures de gestion prises dans un pays et *a fortiori* dans une ville, peuvent donc s'avérer insuffisantes ou inopérantes localement si ces actions restent isolées géographiquement. Il est admis qu'une maîtrise efficace des niveaux d'ozone requiert une approche globale et nécessite une coordination internationale, allant même au-delà du cadre européen établi dans la directive de 2008 sur la qualité de l'air ambiant².

Si l'on ajoute que ce polluant est par nature sensible au réchauffement climatique et que les stratégies de réduction de ses précurseurs peuvent être compensées par la hausse globale des températures, on comprend toute la difficulté que peuvent présenter les objectifs de réduction des niveaux d'ozone de fond, partout dans le monde.

Enfin, il faut noter l'importance croissante de stratégies de gestion basées sur la réduction des émissions de méthane. En effet, le méthane est un COV précurseur de l'ozone, particulièrement réactif et un gaz à effet de serre de durée de vie dite « intermédiaire » (de l'ordre de la dizaine d'années). Ainsi, il participe activement au maintien des concentrations d'ozone de fond à un niveau élevé et fait aujourd'hui l'objet d'une attention particulière dans les négociations internationales visant à réduire les émissions des polluants atmosphériques. ■

1. Des dépassements du seuil d'alerte de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été constatés en 2019.

2. Directive 2008/50/CE

Qu'est-ce que l'ozone ?



la végétation elle-même (l'isoprène et les terpènes par exemple). Enfin, le CH_4 provient des activités agricoles.

La formation d'ozone : un phénomène très complexe

Le cycle chimique de l'ozone est particulièrement complexe et intègre des mécanismes de formation, mais aussi de destruction. Leur mise en œuvre dépend des conditions météorologiques (température et ensoleillement), mais aussi de l'équilibre relatif entre les concentrations de précurseurs. Ainsi, ce ne sont pas les mêmes réactions qui prévaudront selon que l'atmosphère est plus chargée en NO_x (typiquement en milieu très urbanisé), ou en COV. On parle de « chimie fortement non linéaire », qui rend délicate la conception de stratégies de réduction des émissions de précurseurs : réduire uniformément les émissions de précurseurs ne conduit pas systématiquement à des réductions des niveaux d'ozone. Sur la figure 1, l'évolution des concentrations d'ozone (courbes), en fonction des concentrations de COV et de NO_x indique que, dans la zone dite limitée par les COV (VOC-limited), pour un niveau de COV donné, la réduction des concentrations de NO_x conduit à une croissance des niveaux d'ozone. L'inverse se produit dans les zones limitées par les NO_x (NO_x -limited). ■

L'ozone est un gaz naturellement présent à l'état de traces dans l'atmosphère, mais ayant des effets potentiellement toxiques pour les systèmes vivants, lorsque ces concentrations dans les basses couches deviennent trop élevées.

Un polluant atmosphérique dit « secondaire »

L'ozone peut être créé par un ensemble complexe de réactions chimiques et photochimiques, qui impliquent des composés dits « précurseurs » tels que les oxydes d'azote (NO_x), les composés organiques volatils (COV) dont le méthane (CH_4) et le monoxyde de carbone (CO). À ce titre, il entre dans la catégorie des polluants atmosphériques dits « secondaires ». Ses processus de formation, parce qu'ils mettent en jeu des temps de réaction chimique plus ou moins longs, peuvent s'élaborer dans des panaches susceptibles d'être transportés sur de longues distances. Ainsi, bien souvent, pour l'ozone comme pour d'autres polluants secondaires, les niveaux les plus élevés de concentrations se trouvent éloignés des sources de polluants précurseurs.

Les NO_x sont majoritairement issus du trafic routier, mais aussi de l'industrie et du chauffage résidentiel. Les COV sont

des hydrocarbures émis par des activités industrielles et de raffinage, mais aussi par le trafic routier, les solvants et les produits ménagers, sans oublier que certains composés sont émis par

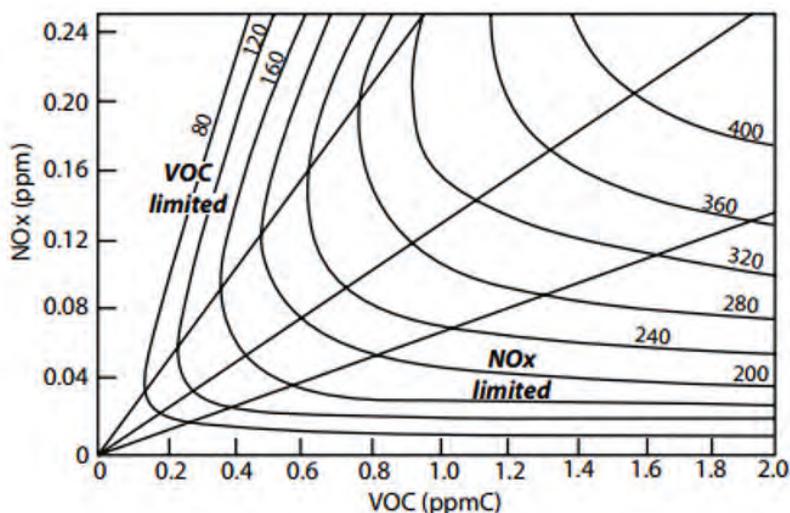


Figure 1 : Évolution des concentrations d'ozone en fonction des concentrations de NO_x et de COV

L'impact des émissions industrielles et du transport routier sur la pollution à l'ozone

Durant l'été 2019, la France a été exposée à des concentrations supérieures au seuil d'information et recommandation pendant 26 jours, faisant de 2019 l'une des années les plus polluées à l'ozone depuis 2003. L'Ineris a effectué des simulations afin de comprendre la dynamique de ces épisodes et la contribution des différentes sources d'émission et objectiver l'impact des mesures de réduction appliquées à ces sources.

Durant les épisodes d'ozone de l'été 2019, la France a été exposée pendant 26 jours (non consécutifs) à des concentrations supérieures au seuil d'information et recommandation : 252 dépassements du seuil de $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire ont été enregistrés dans la plupart des régions métropolitaines. Huit dépassements du seuil d'alerte ont également été observés, lors du premier épisode de pollution intervenu fin juin. Deux épisodes d'ampleur importante ont eu lieu de juin à août : du 20 juin au 9 juillet, puis du 20 au 28 juillet. Du 22 et 28 août, un épisode de moindre importance a également été observé dans le Nord du pays.

Afin de caractériser le rôle et la contribution des différents secteurs d'activité, la réponse des modèles de qualité de l'air mis en œuvre dans PREV'AIR (CHIMERE et MOCAGE) à différents scénarios de réduction d'émissions, a été analysée entre le 25 et le 29 juin.

Le rôle significatif du phénomène de « titration »

Le scénario « réduction des émissions liées au trafic routier » souligne un comportement particulier sur des grandes agglomérations, comme Paris et Lyon, où la réduction des émissions s'accompagne d'un accroissement des concentrations d'ozone. Cette évolution résulte d'un phénomène bien connu, la diminution de la titration. La titration est un phénomène principalement nocturne de destruction d'ozone par les oxydes d'azote, dans les zones où ils sont émis en grande quantité

(alors qu'ils favorisent la production d'ozone le jour). Du fait de la baisse de disponibilité des oxydes d'azote dans ce scénario par rapport aux émissions de référence, la titration (et destruction) de l'ozone nocturne ne peut plus s'opérer et induit des hausses localisées de concentrations.

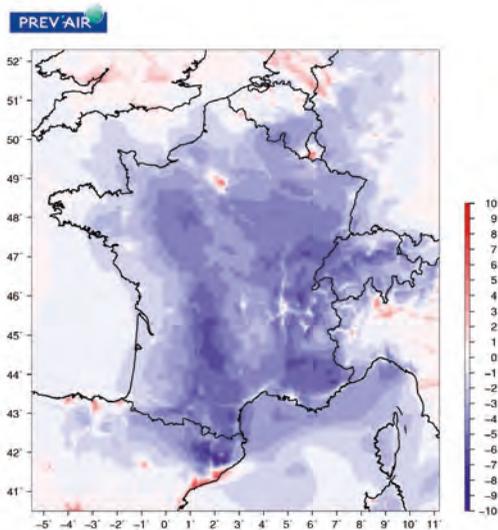
Dans les zones où les émissions d'oxydes d'azote sont moins importantes, notamment les zones rurales, le scénario « réduction des émissions du trafic » a un impact très bénéfique avec des réductions de concentration d'ozone avoisinant $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La réduction des émissions liées aux activités industrielles a globalement un impact plus limité. L'augmentation d'ozone imputable à la titration est visible sur les régions industrialisées comme les Hauts de France et le Benelux, mais elle n'apparaît plus sur les zones urbaines, où les émissions industrielles sont plus faibles.

Les simulations réalisées montrent néanmoins que la réduction combinée des émissions de précurseurs issues de toutes les sources (industrie et trafic routier notamment) est l'approche la plus efficace, avec des réductions des niveaux d'ozone globalement plus

importantes, même si la diminution de l'effet de titration induit toujours une augmentation localisée dans les grandes zones urbaines.

L'efficacité de PREV'AIR, système de prévision unique en Europe

PREV'AIR est le système national de prévision de la qualité de l'air, piloté par l'Ineris suite aux épisodes d'ozone de 2003, en collaboration avec le CNRS, Météo France et le LCSQA. Système pionnier en Europe établi à la suite des épisodes de 2003, PREV'AIR fournit depuis lors quotidiennement des prévisions d'ozone, de dioxyde d'azote et de particules sur la France métropolitaine, ainsi que des cartographies « analysées » basées sur la combinaison de résultats de modélisation et des observations réalisées par les AASQA. Il s'agit certainement de la meilleure représentation cartographique des niveaux de concentration que l'on puisse élaborer. Le savoir-faire acquis par l'Ineris dans ce domaine est reconnu en France, comme en Europe. En effet, les équipes de l'Ineris et de Météo France assurent la coordination des services européens de prévision et de surveillance de la qualité de l'air, mis en place dans le cadre du programme COPERNICUS. ■



Différence (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) des concentrations maximales d'ozone le 29/06/2019 sous l'effet d'une baisse de 30% des émissions du transport routier et des activités industrielles

Une pollution toujours d'actualité

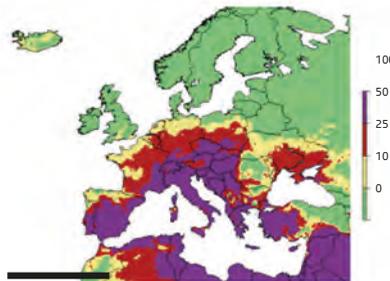
Les épisodes estivaux d'ozone peuvent avoir des profils très différents d'une année sur l'autre, du fait de l'influence de la météorologie. L'analyse de l'évolution à long terme montre que, même si la France ne subit plus les mêmes pics de pollution qu'au début des années 2000, les niveaux « de fond » ne manifestent pas de tendance à la baisse dans la durée, et restent élevés.

L'ozone est un polluant atmosphérique bien connu pour ses effets délétères sur la santé humaine et sur la végétation. En témoigne la canicule de 2003, qui a perduré pendant la première moitié du mois d'août et ses dramatiques conséquences sanitaires, largement imputables aux températures particulièrement élevées, mais aussi aux niveaux d'ozone, inédits par leur ampleur géographique et leur persistance.

Moins de pics pendant les épisodes

Malgré une météorologie favorable à la formation d'ozone, les analyses des épisodes estivaux montrent dans la durée que le territoire français ne subit plus les mêmes pointes de pollution qu'au début des années 2000. En 2016, 2018 et 2019 par exemple, si les niveaux de concentrations ont été localement élevés,

dépassant dans plusieurs régions le seuil réglementaire d'information de $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire, la situation n'était nullement comparable à 2003, dans des conditions météorologiques similaires. Et les étés précédents peuvent être qualifiés



Nombre de jours où la moyenne journalière sur 8 heures a dépassé le seuil de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (valeur guide de l'OMS) en 2017 (source : Copernicus Atmosphere Services).

de « calmes » en termes de pollution à l'ozone. Le nombre et l'intensité des pointes de pollution à l'ozone ont donc bien diminué, et il faut certainement y voir un signe de l'efficacité des plans de réduction des émissions de NOx et de COV mis en place par la France, ses régions et les pays voisins.

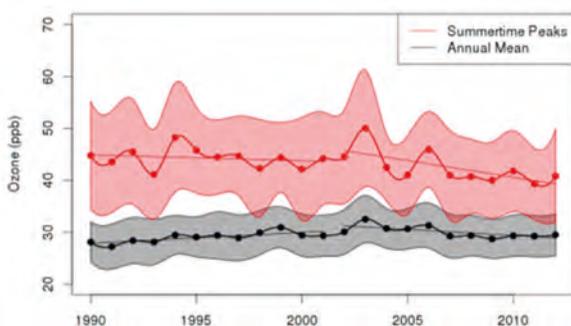
Un niveau moyen qui reste élevé

Le problème n'est pas pour autant résolu : l'analyse des observations réalisées sur 2000-2019³ révèle une absence de tendance, à la hausse comme à la baisse, des niveaux de concentrations moyennes dans la durée. Cette persistance d'un niveau « de fond » élevé, conduit au constat d'un niveau encore préoccupant des indicateurs de concentration à visée sanitaire recommandés par les experts de la santé sur une grande partie de l'Europe. De plus, des études récentes tendent à montrer que les effets néfastes de l'ozone sur la santé se manifesteraient à des concentrations moins élevées que celles considérées jusqu'à présent. ■

3. <https://www.ineris.fr/fr/recherche-appui/risques-chroniques/mesure-prevision-qualite-air/20-ans-evolution-qualite-air>

Réduction de la pollution à l'ozone : état des lieux

Le nombre et l'intensité des pics estivaux d'ozone ont légèrement diminué ces dernières années par rapport aux années 2000 avec des conditions météorologiques similaires. C'est un fait établi qui s'explique par les politiques de baisse des émissions de précurseurs, engagées depuis près de vingt ans en Europe.

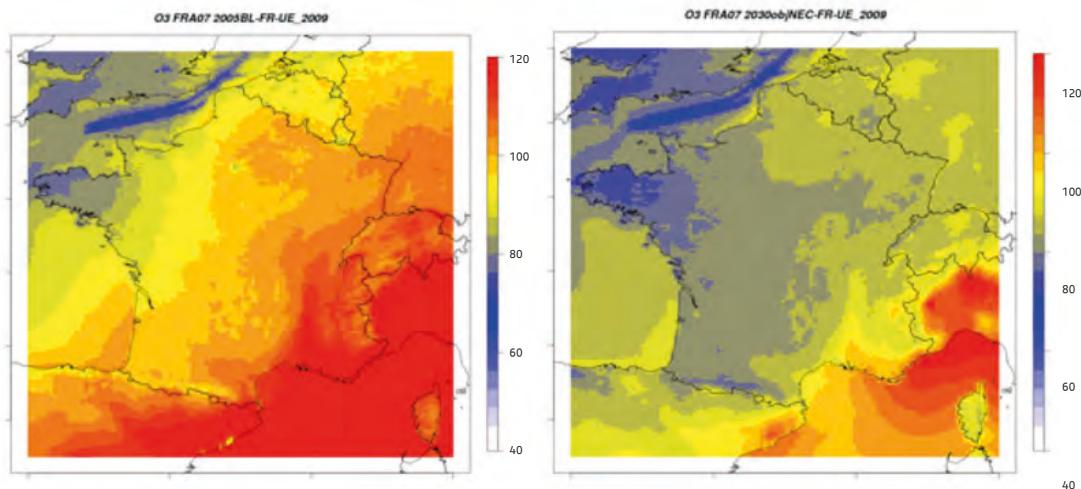


Tendances d'indicateurs d'ozone (pics estivaux en rouge et moyenne annuelle en noir) en Europe de 2000 à 2015

Politiques de réduction des émissions : une efficacité démontrée sur les pics d'ozone

Dans le cadre de ses travaux d'appui au ministère en charge de l'environnement, l'Ineris a supervisé une étude sur les tendances de pollution de l'air. Ce rapport a été réalisé en vue des négociations menées dans le cadre de la Convention de la Commission économique pour l'Europe des Nations unies (CEE-NU) sur le transport de la pollution atmosphérique à longue distance (CLRTAP).

La tendance déclinante des pics d'ozone estivaux est illustrée, de même que la relative stagnation de la moyenne annuelle, en dépit des politiques



Moyennes des pics estivaux d'ozone simulés avec le modèle CHIMERE en France : pour la situation actuelle (à gauche), avec les scénarios 2030 (à droite).

volontaristes de réduction des émissions. Le rapport montre que l'évolution des niveaux d'ozone n'est pas en proportion avec celle des émissions de précurseurs. À titre d'exemple, les politiques de réduction des émissions de précurseurs mais aussi la crise économique de 2008 ont contribué à réduire les émissions de NOx, de plus 50 % en Europe depuis 1990. Les simulations réalisées par l'Ineris avec le modèle de chimie-transport CHIMERE montrent que des gains substantiels sont encore possibles en France sur les pics de pollution à l'ozone d'ici 2030, avec une mise en œuvre de stratégies de réduction des émissions discutées dans le cadre des négociations européennes sur la révision de la directive sur les plafonds nationaux d'émissions de polluants atmosphériques « NEC » (National Emission Ceilings, 2016/2284/EU).

L'impact de la pollution à l'ozone, un sujet toujours préoccupant

Malgré un signal très positif sur les niveaux les plus élevés, la baisse des concentrations de fond d'ozone reste faible. Cela demeure un sujet de préoccupation, notamment au regard de la santé et de l'exposition des écosystèmes. Les études de santé sur les effets de l'ozone montrent que ceux-ci se manifestent à des concentrations peu élevées qui correspondraient aux niveaux de fond. Afin d'adapter les

objectifs de réduction des émissions de précurseurs de l'ozone à ces nouvelles données, les experts de l'OMS recommandent d'utiliser un indicateur sanitaire, qui n'est pas un indicateur réglementaire, appelé SOMO35. Il correspond au nombre cumulé des maxima journaliers de moyennes sur 8 heures des concentrations d'ozone supérieures au seuil de 70 µg/m³. L'Ineris a également mené en 2014 une étude économique sur les coûts de la pollution atmosphérique et sur les bénéfices monétaires induits par les stratégies d'atténuation. Elle prend en compte les effets de l'ozone et des particules fines sur la mortalité (nombre de morts prématurées) et sur la morbidité. Même si les coûts induits par l'exposition à l'ozone sont moins élevés que ceux liés à l'exposition aux particules fines, l'étude montre néanmoins que l'impact existe et ne se résorbe pas significativement dans le futur. De nouveaux travaux ont été conduits à l'Ineris, en coopération avec l'Assemblée permanente des chambres d'agriculture (APCA), dans le cadre du programme Primequal, financé par l'Ademe et le ministère en charge de l'environnement, pour évaluer l'impact de l'ozone sur les rendements agricoles en France et les coûts induits. À titre d'exemple, en 2010, le rendement imputable à l'exposition à l'ozone des cultures de blé tendre en France est estimé à 15 %. ■

Les seuils et les valeurs cibles européens pour l'ozone

L'ozone se caractérise par ses effets sanitaires de long terme et de court terme. De ce fait, la directive concernant la qualité de l'air et un air pur pour l'Europe (2008/50/EC), transposée dans la réglementation française, fixe un seuil d'information et de recommandation à 180 µg/m³ en moyenne horaire et un seuil d'alerte à 240 µg/m³. Elle fixe également des valeurs cibles pour la protection de la santé humaine et des écosystèmes, soit respectivement :

- le maximum journalier de la moyenne sur 8 heures glissantes des concentrations d'ozone ne doit pas dépasser 120 µg/m³ plus de 25 jours par an ;
- l'AOT40⁽¹⁾ ne doit pas excéder 18 000 µg/m³.h en moyenne sur 5 ans.

Les objectifs de long terme imposent que le seuil de 120 µg/m³ ne soit jamais dépassé, et que l'AOT40 se limite à 6 000 µg/m³.h.

⁽¹⁾ AOT40 (exprimé en µg/m³ par heure), signifie la somme des différences entre les concentrations horaires supérieures à 80 µg/m³ (= 40 parties par milliard) de mai à juillet en utilisant uniquement les valeurs sur une heure, mesurées quotidiennement entre 8h00 et 20h00 (heure de l'Europe centrale).

Quelles priorités dans la lutte contre l'ozone ?

L'ozone est et restera un sujet d'étude dans les années à venir, du fait de sa sensibilité au transport de la pollution atmosphérique à longue distance et aux effets du réchauffement climatique.

Un effet pénalisant du changement climatique sur l'évolution de la pollution à l'ozone

C'est un sujet largement investigué à l'Ineris, notamment à travers une méta-analyse de plus de 25 résultats de modélisation de la qualité de l'air à longue échéance (d'ici à 2100) en intégrant les effets du changement climatique associés à différents scénarios énergétiques. Ces travaux, publiés dans *Environmental Research Letters*, montrent une convergence des diagnostics et la mise en évidence d'un effet du réchauffement climatique d'ici la fin du siècle sur les concentrations d'ozone. Cet impact climatique devrait pénaliser les efforts des réductions des émissions de quelques microgrammes par mètre cube. Cette étude montre donc tout l'intérêt pour les décideurs politiques de rester ambitieux dans la mise en œuvre de stratégies de réduction des émissions.

Le rôle déterminant de la pollution transfrontière

L'ozone est l'exemple type du polluant influencé par le transport des masses

d'air sur de très longues distances. L'Ineris a mené des travaux qui visaient à estimer le poids respectif, dans les niveaux d'ozone observés, de différents facteurs déterminants, tels que le transport des polluants à longue distance, la réduction des émissions, et la « pénalité climatique ». Un scénario à échéance 2050, dans lequel les politiques de gestion de la pollution atmosphérique et du changement climatique resteraient au même niveau d'ambition que ceux en vigueur dans les réglementations actuelles, a été étudié. Il apparaît que les efforts de réduction des émissions de précurseurs sont entièrement contrebalancés par les imports transcontinentaux d'ozone. En revanche, une gestion concertée au niveau international des réductions d'émissions de ces précurseurs, pourrait résoudre une large partie du problème et rétablir l'équilibre en faveur d'une réduction des niveaux d'ozone, en France et en Europe. Ces éléments doivent encourager les décideurs politiques à maintenir une attention particulière sur la question de l'ozone qui, même si des progrès substantiels sont notés au cours des dernières décennies, reste un enjeu,

en particulier pour l'Europe méditerranéenne. Le dispositif de surveillance doit être maintenu à un bon niveau, de même que le dispositif d'alerte ou de vigilance qui ne doit pas se limiter aux valeurs les plus élevées mais aussi prendre en compte une exposition plus chronique. Enfin, la concertation internationale est essentielle pour développer des moyens de luttés co-efficaces, pour ce polluant qui peut continuer à se former et se transformer dans l'atmosphère à des centaines, voire des milliers de kilomètres des lieux d'émissions de précurseurs. ■

À PROPOS DE L'INERIS

Créé en 1990, l'Ineris, Institut national de l'environnement industriel et des risques, est un établissement public à caractère industriel et commercial, placé sous la tutelle du ministère de la Transition écologique.

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

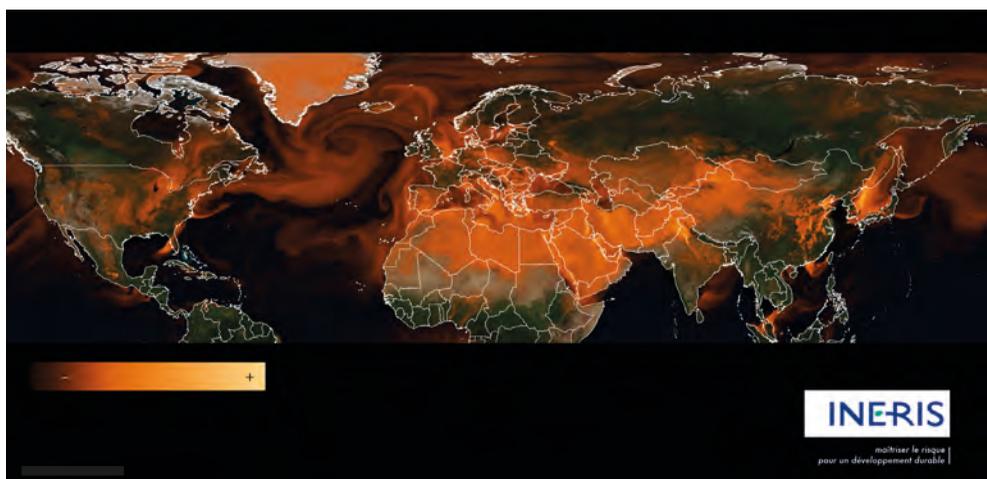
Parc Technologique Alata
BP2
60550 Verneuil-en-Halatte
03 44 55 66 77
ineris@ineris.fr

www.ineris.fr

[@ineris_fr](https://twitter.com/ineris_fr)



Pour en savoir plus, rendez-vous sur le site internet de l'Ineris : <http://bit.ly/2dPiobb>



Concentrations d'ozone, le 21 juillet 2014