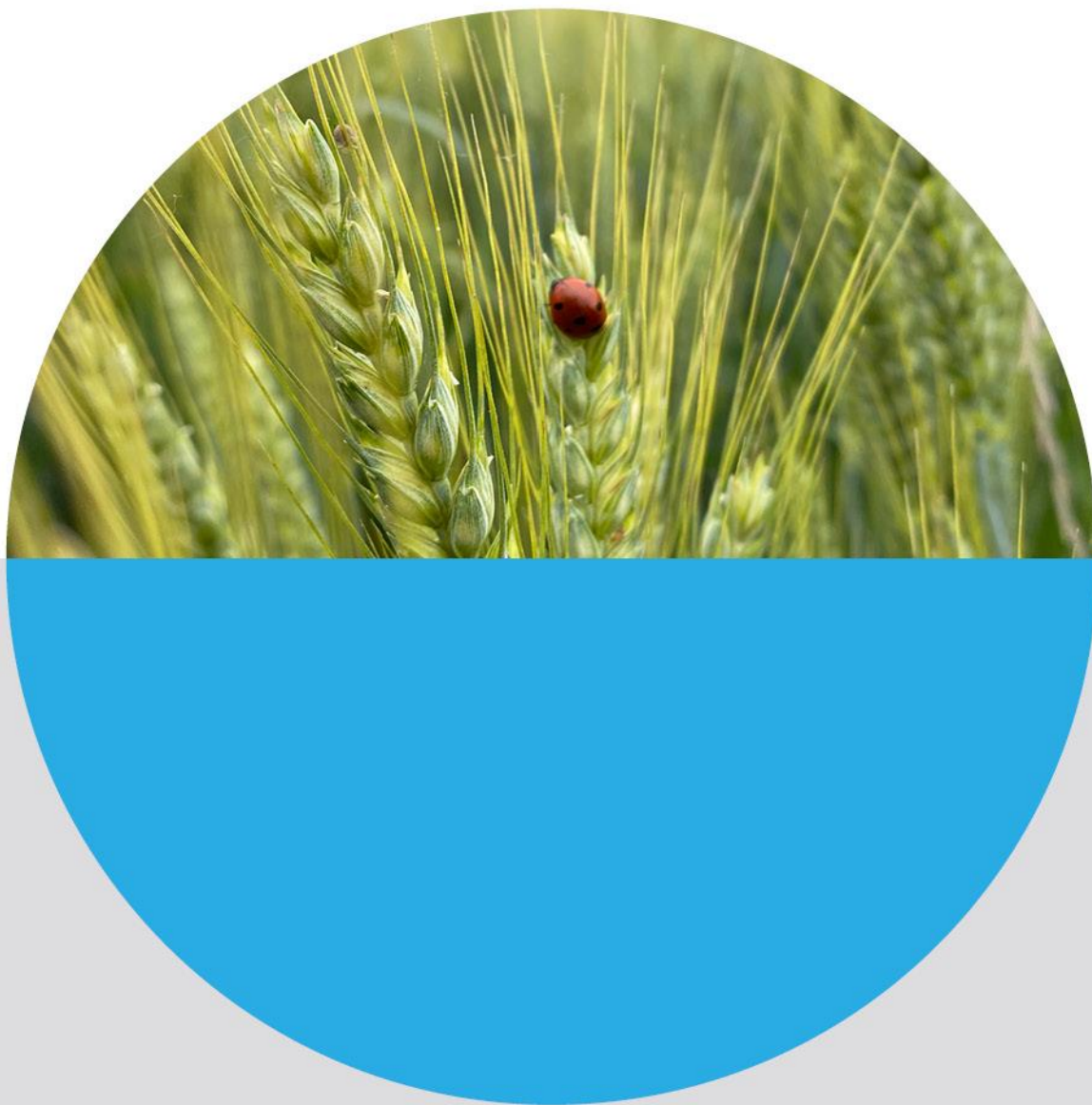




Pollution de l'air et érosion de la biodiversité

ÉTAT DES CONNAISSANCES



POLLUTION DE L'AIR ET EROSION DE LA BIODIVERSITE

ETAT DES CONNAISSANCES

MAI 2025

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

7 rue Crillon - 75004 PARIS

01 44 59 47 64

airparif.fr

SOMMAIRE

I. CONTEXTE	6
L'érosion de la biodiversité	6
La pollution de l'air.....	6
Les crises écologiques planétaires	6
II. IMPACTS DE LA POLLUTION DE L'AIR SUR LA BIODIVERSITÉ	8
Impacts de la combustion des énergies fossiles	8
Impacts de l'ozone de basse altitude sur les végétaux.....	9
Impacts des particules sur les végétaux	13
Impacts des oxydes d'azote et de l'ammoniac sur l'eutrophisation	16
Impacts du dioxyde de soufre et des oxydes d'azote sur l'acidification des eaux et des sols	17
Impacts de la pollution de l'air sur les invertébrés	19
Impacts de la pollution de l'air sur les animaux de grande taille	21
Impacts des particules sur la fertilisation des océans.....	22
III. IMPACTS DE LA BIODIVERSITÉ SUR LA POLLUTION DE L'AIR.....	23
Pollution de l'air générée par la biodiversité.....	23
Régulation de la pollution de l'air par la biodiversité.....	25
IV. IDENTIFICATION DES LEVIERS D'ACTIONS GAGNANTS-GAGNANTS POUR ATTÉNUER LA POLLUTION DE L'AIR ET PRÉSERVER LA BIODIVERSITÉ	28
BIBLIOGRAPHIE.....	31

I. CONTEXTE

L'érosion de la biodiversité

L'érosion de la biodiversité désigne la diminution rapide et significative de la diversité des espèces vivantes à l'échelle planétaire. Cette perte de biodiversité concerne non seulement la disparition d'espèces animales et végétales, mais aussi la réduction de la diversité génétique au sein des populations d'une même espèce, ainsi que la perte de diversité des écosystèmes eux-mêmes (forêts, océans, zones humides, etc.).

Les causes principales de l'érosion de la biodiversité sont, par ordre décroissant d'importance :

- la destruction et la fragmentation des habitats (l'artificialisation des sols, la déforestation et l'agriculture intensive réduisent les habitats naturels et les flux de gènes liés au déplacement d'espèces animales ou végétales) ;
- la surexploitation des espèces animales et végétales (la chasse excessive, la pêche intensive et la surexploitation des ressources naturelles mettent en péril de nombreuses espèces) ;
- le changement climatique (l'augmentation des températures, la modification de la fréquence, de l'intensité et de la quantité des précipitations, et la hausse du niveau des mers affectent les habitats et les espèces) ;
- les pollutions dans leur ensemble (les polluants des eaux, des sols, de l'air, notamment chimiques, plastiques et agricoles nuisent à la santé des écosystèmes)
- les espèces invasives (l'introduction d'espèces non natives peut perturber les écosystèmes locaux, entraînant la disparition d'espèces indigènes).

Cette érosion menace la stabilité des écosystèmes qui fournissent des services essentiels à la vie humaine, notamment : la pollinisation, la purification de l'eau, la régulation du climat, la fourniture de ressources alimentaires et la disponibilité de biomasse en tant que ressource énergétique.

La pollution de l'air

La pollution de l'air désigne la présence de substances nocives dans l'atmosphère, qui ont des effets à court et long termes sur la santé humaine, les écosystèmes, les constructions et sur le changement climatique. Ces substances, appelées polluants de l'air, proviennent de sources naturelles (éruptions volcaniques, feux de forêt, etc.) et humaines (industrie, transports, agriculture, etc.). Les principaux polluants de l'air sont les particules (PM), le dioxyde d'azote (NO₂), l'ozone de basse altitude (O₃) et le dioxyde de soufre (SO₂).

La pollution de l'air tue prématurément chaque année environ 8,3 millions de personnes dans le monde.

Les crises écologiques planétaires

Les crises écologiques planétaires sont les perturbations environnementales d'une ampleur telle qu'elles affectent l'ensemble de la planète, mettant en danger la survie des écosystèmes, des espèces, et des processus vitaux pour le maintien de la vie sur Terre.

Elles affectent non seulement les environnements naturels, mais aussi les sociétés humaines, les économies, la santé publique et les infrastructures, avec des effets disproportionnés sur les personnes les plus pauvres.

L'ONU parle donc d'une triple crise écologique planétaire pour qualifier la combinaison du changement climatique, de l'érosion de la biodiversité et des pollutions de l'air, des eaux et des sols. Ces crises peuvent interagir, et ont souvent des origines communes. Elles sont considérées comme des urgences planétaires par l'ONU, en raison de la nécessité d'une action rapide et concertée pour en limiter les dommages.

Le secteur agricole et les activités humaines font-elles partie de la biodiversité ?

Au sens strict, l'ensemble des animaux et végétaux font partie de la biodiversité. Néanmoins, dans la communauté scientifique, la biodiversité désigne communément la diversité génétique au sein d'une espèce, la diversité des espèces elles-mêmes et des systèmes dans lesquels elles évoluent, ainsi que l'interaction de ces trois niveaux, incluant la dynamique évolutive qui conduit à l'apparition de nouveaux gènes, de nouvelles espèces, et de nouveaux systèmes écologiques.

Lorsque l'on parle ici des impacts de la biodiversité sur la pollution de l'air, il faut donc l'entendre comme les impacts des espèces animales et végétales – ainsi que leurs usages – sur la pollution de l'air. Inversement : lorsque l'on parle ici de l'impact de la pollution de l'air sur la biodiversité, il faut entendre l'impact de la pollution de l'air sur les espèces animales et végétales ainsi que leur usage, notamment agricole.

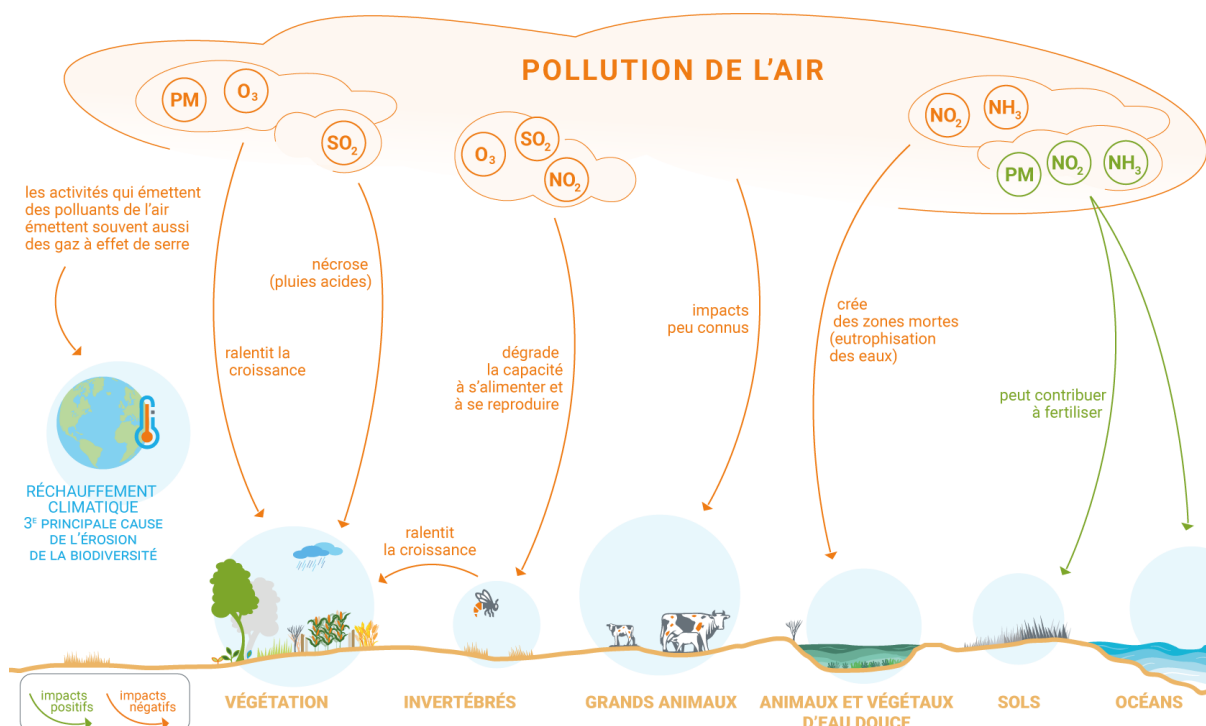
II. IMPACTS DE LA POLLUTION DE L'AIR SUR LA BIODIVERSITÉ

IMPACTS DE LA POLLUTION DE L'AIR SUR LA BIODIVERSITÉ

Source : Pollution de l'air et biodiversité. Airparif, 2025.



LA POLLUTION DE L'AIR DÉSÉQUILIBRE LES ÉCOSYSTÈMES



IMPACTS DE LA COMBUSTION DES ENERGIES FOSSILES

Cette section s'appuie sur la source : [1]

Les activités qui émettent des polluants de l'air aggravent souvent également le changement climatique, et donc l'érosion de la biodiversité. La combustion des énergies fossiles – charbon, pétrole, gaz fossile – est non seulement une source majeure d'émissions de polluants de l'air, mais aussi de gaz à effet de serre, occasionnant un réchauffement climatique qui est l'un des principaux facteurs responsables de l'érosion de la biodiversité. Toutes les activités de combustion d'énergies fossiles sont donc émettrices de polluants de l'air, mais sont aussi indirectement nocives pour la biodiversité via le réchauffement climatique qu'elles engendrent.

Le changement climatique accélère l'érosion de la biodiversité en modifiant les conditions environnementales essentielles à la survie des espèces. Ses effets se manifestent principalement à travers :

- la fonte des glaces, la montée du niveau des mers et la désertification, qui réduisent les écosystèmes disponibles pour la faune et la flore.

- des changements de température et des régimes de précipitations qui perturbent la reproduction, la migration et l'hibernation de nombreuses espèces, entraînant des déséquilibres écologiques.
- des tempêtes, sécheresses, incendies et inondations de plus en plus intenses menaçant directement la faune, la flore et les écosystèmes.
- un dérèglement des saisons affectant la disponibilité des ressources alimentaires, ce qui fragilise les populations animales et végétales.
- des températures plus élevées favorisant la prolifération d'espèces envahissantes et de pathogènes, menaçant les espèces locales qui ne peuvent pas s'adapter à ces nouvelles pressions.

IMPACTS DE L'OZONE DE BASSE ALTITUDE SUR LES VEGETAUX

Cette section s'appuie sur les sources : [1] [2] [3] [4] [5] [8] [17]

En plus d'être nocif pour la santé humaine et d'être un gaz à effet de serre renforçant le réchauffement climatique, l'ozone de basse altitude (O_3 , ou ozone troposphérique) est nuisible à la biodiversité végétale.

Origine de l'ozone de basse altitude. L'ozone de basse altitude est un polluant de l'air qui se forme dans l'atmosphère par transformation chimique de différents composés : des composés organiques volatils non méthaniques (COVNM), du méthane (CH_4) et du monoxyde de carbone (CO), en présence d'oxydes d'azote (NO_x) et sous l'effet d'un ensoleillement important et de fortes températures. L'ozone de basse altitude doit être distingué de l'ozone de haute altitude, aussi appelé couche d'ozone.

Mécanismes physiques expliquant la nocivité de l'ozone de basse altitude pour les végétaux.

L'ozone de basse altitude pénètre dans les feuilles des plantes cultivées via leurs pores (aussi appelés stomates), pores utilisés par les végétaux pour absorber le dioxyde de carbone (CO_2) et réaliser la photosynthèse. L'ozone de basse altitude réagit ensuite avec l'eau et les cellules végétales présentes dans les espaces intercellulaires humides, ce qui produit des molécules instables et réactives appelées espèces réactives de l'oxygène. Pour se défendre, les plantes déclenchent alors la production d'antioxydants qui neutralisent les espèces réactives de l'oxygène, limitant ainsi les dommages cellulaires que ces molécules pourraient causer. Cependant, cette défense coûte de l'énergie et des ressources métaboliques aux plantes, ce qui peut détourner des ressources normalement utilisées pour la croissance, la reproduction ou d'autres fonctions essentielles, telles que la formation et le remplissage des grains. L'exposition répétée à l'ozone induit plusieurs changements cellulaires, notamment une augmentation de la respiration réparatrice, une réduction de la photosynthèse, une accélération du vieillissement des cellules des feuilles et une modification de l'allocation du carbone et de l'azote aux différents organes de la plante.

L'exposition à l'ozone de basse altitude ralentit donc la croissance de la plante, fait diminuer la photosynthèse (soit en raison de l'énergie nécessaire à la production de composés de défense, soit en raison des dommages directs causés à l'appareil photosynthétique), entraîne la pousse de grains plus petits et moins nombreux (dans une moindre mesure), augmente également la vulnérabilité des plantes aux ravageurs et aux maladies, et réduit leur capacité de captation de dioxyde de carbone, les rendements agricoles et la capacité de production de bois des forêts. L'ozone de basse altitude est responsable à l'échelle mondiale d'une réduction d'environ -10 %

de l'énergie produite par l'ensemble des végétaux via la photosynthèse chaque année (production primaire brute annuelle).

En présence de niveaux élevés d'ozone, une cascade de signaux indiquant une mort cellulaire programmée peut même se propager dans la feuille, semblable à celle qui se produit lorsqu'une plante est attaquée par un agent pathogène. Ce phénomène se manifeste souvent par l'apparition de nombreuses petites lésions de la taille d'une tête d'épingle à la surface des feuilles, qui peuvent fusionner pour former des lésions plus importantes.

L'impact de l'ozone de basse altitude sur les végétaux dépend de l'absorption stomatique de ce polluant, donc non seulement des concentrations d'ozone dans la basse atmosphère, mais aussi du rayonnement solaire, de la température, de l'humidité de l'air et de l'état hydrique de la plante.

Espèces les plus impactées par l'ozone de basse altitude. L'ozone de basse altitude est particulièrement nocif pour plusieurs espèces végétales (hors culture) : les arbres à feuilles caduques (peuplier, tremble, hêtre, chêne rouge), les arbres à feuilles persistantes (pin ponderosa, pin sylvestre), les arbustes et buissons sensibles (sureau noir, hamamélis), les herbacées et fleurs sauvages (trèfle blanc, pissenlit, plantain lancéolé).

Impacts sur la biodiversité. L'ozone de basse altitude réduit la croissance des végétaux, que ce soient des plantes sauvages ou des cultures. Certaines espèces étant plus sensibles que d'autres à cette pollution, l'exposition à l'ozone peut favoriser la dominance de certaines plantes résistantes, diminuer la diversité végétale et déséquilibrer les écosystèmes. En modifiant la composition des espèces végétales, l'ozone peut également provoquer des effets en cascade sur l'ensemble de la chaîne alimentaire et les écosystèmes, en affectant indirectement les populations d'insectes pollinisateurs, d'herbivores et de prédateurs qui dépendent de ces plantes pour leur alimentation ou leur habitat, contribuant ainsi à l'érosion de la biodiversité. Les changements induits par l'ozone troposphérique peuvent aussi affaiblir la résilience des écosystèmes et les rendre plus vulnérables à d'autres stress, tels que le changement climatique, les maladies et la pollution par d'autres composés chimiques.

Les oxydes d'azote peuvent également participer à des processus qui entraînent des déséquilibres dans la composition chimique des plantes, mais leurs effets directs sont moins marqués que ceux de l'ozone de basse altitude.

Localisation des principaux impacts de l'ozone de basse altitude sur la végétation. Depuis les années 1990, la baisse des émissions de polluants précurseurs d'ozone de basse altitude a entraîné une diminution des pics d'ozone, mais a été accompagnée d'une augmentation des concentrations de fond dans les zones rurales éloignées d'Amérique du Nord et d'Europe du fait de l'augmentation du transport hémisphérique de l'ozone et de ses précurseurs. En revanche, les pics et les concentrations de fond d'ozone de basse altitude ont augmenté dans les pays asiatiques tels que l'Inde et la Chine au cours de la dernière décennie, atteignant des concentrations qui, dans de nombreuses zones agricoles, sont bien supérieures à celles que l'on observe habituellement dans les zones rurales d'Amérique du Nord et d'Europe.

Sur la base des concentrations d'ozone de basse altitude signalées dans les réseaux de surveillance rurale, les concentrations les plus élevées dans les régions agricoles se trouvent dans certaines parties des États-Unis d'Amérique, de l'Europe méditerranéenne, du Japon, de la République de Corée, de la Chine et de l'Inde.

Anticipation de l'évolution de l'impact de l'ozone de basse altitude sur la végétation. Dans les scénarios prospectifs faisant l'hypothèse de mesures strictes de lutte conjointe contre la pollution atmosphérique et d'atténuation du changement climatique (scénario SSP1-2.6 du GIEC), la concentration annuelle mondiale d'ozone diminuerait en moyenne de -10 µg/m³ d'ici à 2050 et

de -18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'ici à 2100 par rapport à la moyenne de la période 2005-2014. A contrario, dans les scénarios de forte lutte contre la pollution atmosphérique mais de faible atténuation du changement climatique (scénario SSP5-8.5 du GIEC), la concentration annuelle mondiale d'ozone augmenterait de +3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'ici à 2050, et diminuerait de -5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'ici à 2100 par rapport à la moyenne de la période 2005-2014.

Les zones dans lesquelles les végétaux risquent de subir le plus de nuisances en raison du changement climatique coïncident souvent avec celles qui sont actuellement menacées par la pollution à l'ozone de basse altitude : le centre et l'est des États-Unis, le sud-est du Canada, le sud-ouest du Brésil, le centre de l'Afrique subsaharienne, la plaine indo-gangétique et certaines parties de la Chine, comme la plaine de Chine du Nord.

Les effets sur les végétaux de l'ozone de basse altitude et de l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone vont souvent dans des directions opposées. En général, les concentrations élevées de dioxyde de carbone augmentent la croissance des végétaux et la superficie totale des feuilles, ce qui se traduit par un plus grand nombre de grains par plante et donc par une augmentation de la croissance des végétaux (on parle ici uniquement des impacts directs, et non des impacts indirects du changement climatique entraîné par l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère sur les végétaux). L'ozone de basse altitude, en revanche, réduit la période de remplissage des grains en induisant un vieillissement prématuré, entraînant une moindre allocation de carbone et de nutriments aux grains, d'où une baisse de la vitesse de croissance. Des concentrations de dioxyde de carbone élevées diminuent également les concentrations de protéines par unité d'azote et de nutriments des grains, tandis que l'ozone augmente ces propriétés. Relativement peu d'études expérimentales ont examiné les effets combinés de l'ozone et du dioxyde de carbone. Certaines expériences tendent à montrer que l'ozone de basse altitude pourrait atténuer les effets bénéfiques de la hausse de concentration de dioxyde de carbone sur la vitesse de pousse des végétaux.

Les outils de modélisation actuels ne permettent pas de prévoir les changements dans la composition future des espèces découlant de leurs différences de vulnérabilité à l'ozone, bien qu'il existe des preuves que l'ozone peut effectivement affecter la composition et la richesse des espèces. Il faut s'attendre à de grandes différences régionales concernant l'impact futur de l'ozone sur les espèces végétales.

Recommandations pour améliorer la compréhension des impacts de l'ozone de basse altitude sur la végétation. La surveillance de l'ozone de basse altitude dans les zones rurales, où la biodiversité est plus présente, est beaucoup plus limitée que dans les zones urbaines, et il n'y a que peu ou pas de surveillance de l'ozone dans certaines des principales zones de production alimentaire du monde, notamment l'Amérique du Sud, l'Afrique subsaharienne, le Moyen-Orient et de grandes parties de l'Europe de l'Est et de l'Asie. Dans ces régions, les concentrations d'ozone sont estimées soit à l'aide de données provenant de stations de surveillance urbaines, soit à l'aide de modèles de transport chimique. Pour mieux comprendre l'impact de l'ozone sur les cultures et la biodiversité végétale, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) recommande de :

- Améliorer les prévisions dans la modélisation des incidences de l'ozone sur les cultures. Pour cela, il s'agirait d'augmenter le nombre de stations de surveillance de l'ozone dans les zones rurales, en particulier en Chine, en Inde et dans plusieurs pays africains et autres pays en développement pour informer les autorités réglementaires sur les points chauds où des concentrations élevées d'ozone de basse altitude peuvent réduire la quantité et la qualité des rendements et avoir des impacts importants sur la santé humaine ;
- Réduire les biais et les incertitudes qui entraînent des sous-estimations et des surestimations de la concentration d'ozone dans certaines zones rurales., Par exemple, en améliorant les inventaires des émissions et la modélisation prévisionnelle des concentrations de méthane, de composés organiques volatils émis par les végétaux et des autres précurseurs de

l'ozone ; en améliorant la modélisation des processus chimiques dans la troposphère ; en améliorant la modélisation des dépôts ; en améliorant la résolution de la modélisation ; et en augmentant la disponibilité des données de surveillance de l'ozone au niveau du sol pour le développement et l'évaluation des modèles.

Impacts spécifiques de l'ozone de basse altitude sur les activités agricoles

Les concentrations actuelles d'ozone ont un impact négatif sur les rendements et la qualité des cultures dans de nombreuses grandes régions agricoles du monde.

Les légumineuses – dont le soja, le pois et le haricot –, le blé et certaines variétés de riz sont les productions agricoles les plus sensibles à l'ozone. Le maïs, la pomme de terre, la tomate, l'orge, d'autres variétés de riz, les cultures maraichères – notamment la laitue, l'oignon et la pastèque – sont modérément sensibles à l'ozone. L'avoine est insensible à l'ozone. Pour une plante donnée, chaque variété peut être plus ou moins sensible à l'ozone de basse altitude. Les variétés modernes de soja et de blé ont tendance à être plus sensibles à l'ozone que les variétés plus anciennes.

Les pertes annuelles moyennes de rendement et de production dues à l'ozone de basse altitude entre 2010 et 2012 ont été estimées dans le monde à 36 millions de tonnes de soja (-12 % du rendement annuel), 63 Mt de blé (-7 %), 50 Mt de riz (-4 %) et 78 Mt de maïs (-6 %), soit une perte de production totale de 227 Mt pour ces quatre cultures qui sont souvent utilisées pour répondre aux besoins alimentaires des producteurs et de leurs proches dans les pays les moins avancés économiquement.

Les pertes de rendements agricoles dues à l'ozone de basse altitude sont les plus fortes dans plusieurs États du centre, du nord-est et de la côte ouest des États-Unis, et certaines parties méridionales du Canada ; les parties méridionales de l'Europe, y compris les régions méditerranéennes de la France, de l'Italie et de l'Espagne ; la Chine orientale, y compris la plaine de Chine du Nord et la région du delta du Yangtze ; la plaine indo-gangétique et certaines parties de l'Inde occidentale ; la majeure partie du Japon, en particulier le sud ; la République de Corée ; et l'Afrique du Sud. Pour certaines cultures comme le blé, les pertes de rendements sont nettement plus importantes dans les pays les moins avancés économiquement, ce qui renforce les inquiétudes quant à la sécurité alimentaire des pays les moins développés.

En France, on estime que la pollution à l'ozone de basse altitude est responsable d'une perte de rendement de blé tendre et de pommes de terre de 5% à 15% en fonction des années. Pour l'année 2010, l'ozone de basse altitude a été responsable d'environ 2,2 milliards d'euros de pertes économiques pour la production agricole en France : près de 1 milliard d'euros pour le blé tendre, 1 milliard d'euros pour les prairies utilisées pour nourrir le bétail, et 200 millions d'euros pour la pomme de terre. Depuis 2010, ces coûts diminuent légèrement avec de fortes variations d'une année sur l'autre, mais devraient rester de l'ordre de 1,8 milliard d'euros par an aux alentours de 2030.

Les impacts de l'ozone sur les cultures sont plus fortement liés à l'absorption stomatique de l'ozone qu'à la seule concentration d'ozone dans l'air au-dessus de la canopée. Les pertes globales de rendements modélisées à l'aide de méthodes basées sur la concentration tendent à prévoir des pertes supérieures d'environ 50 % à celles prévues à l'aide de méthodes basées sur le flux stomatique, plus fiables.

Les pertes de rendements induites par l'ozone pour le blé, le soja, le riz et le maïs se situent dans la même fourchette que les pertes de rendements causées par d'autres stress biotiques (causé

par des organismes vivants : pathogènes, insectes, compétition avec d'autres plantes, etc.) et abiotiques (conditions climatiques, présence de nutriments, etc.), ce qui les rend difficiles à distinguer. Dans plusieurs régions du monde, en particulier en Asie du Sud et de l'Est, les pertes de rendements dues aux ravageurs et aux maladies coexistent avec des niveaux et impacts élevés de l'ozone de basse altitude.

La pollution par l'ozone est une cause cachée de la réduction de la quantité et de la qualité des rendements qui n'est généralement pas prise en compte dans les évaluations de la sécurité alimentaire actuelle et future. Aujourd'hui, les effets de l'ozone sont rarement pris en compte dans les projections de l'évolution des rendements au cours de ce siècle, alors qu'ils peuvent aggraver les pertes de rendements dans un contexte globale de changement climatique et d'érosion de la biodiversité, ou contrebalancer l'augmentation des rendements agricoles que peut provoquer l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, en fonction de la culture et du lieu.

En dehors de la réduction des concentrations d'ozone de basse altitude, il existe plusieurs moyens potentiels de réduire les pertes de rendements agricoles dues à ce polluant :

- Sélectionner des variétés plus tolérantes à l'ozone,
- Sélectionner les variétés les plus tolérantes à l'ozone en mettant en œuvre des approches de sélection moléculaire, y compris la sélection assistée par marqueurs, pour cibler les caractéristiques associées à la tolérance à l'ozone,
- Adapter les calendriers de culture pour éviter que les stades de croissance sensibles à l'ozone, tels que la formation et le remplissage des grains, n'aient pas lieu pendant les périodes où des épisodes d'ozone sont probables, en particulier dans les pays où les cultures sont pratiquées tout au long de l'année,
- Identifier des produits chimiques protecteurs pour protéger les cultures contre les effets de l'ozone,
- Mener des études approfondies pour déterminer si, comme le montre de premières expériences, les systèmes d'irrigation à faible consommation d'eau, comme le déficit fréquent (stratégie qui consiste à irriguer les cultures avec moins d'eau que ce qu'elles exigeraient dans des conditions idéales mais de manière plus fréquente, en particulier pendant les périodes où les cultures sont moins sensibles à un manque d'eau) et l'alternance d'irrigation humide et sèche pour le riz, peuvent contribuer à réduire les effets de l'ozone sur la photosynthèse,
- Il n'est pas recommandé d'utiliser des engrais supplémentaires pour compenser les effets négatifs de l'ozone, car ce polluant réduit l'efficacité de l'utilisation de l'azote et cela pourrait accroître la libération d'azote réactif dans l'environnement, entraînant des conséquences néfastes pour la biodiversité et les cultures.

IMPACTS DES PARTICULES SUR LES VÉGÉTAUX

Cette section s'appuie sur la source : [6]

En plus d'être nocives pour la santé, les particules ont un impact contrasté sur la biodiversité végétale.

Origine des particules. Les particules (PM₁₀) regroupent toutes les entités solides de moins de 10 micromètres de diamètre présentes dans l'atmosphère. Ces particules peuvent avoir été émises par les transports, les industries, le chauffage domestique, les travaux de construction et de démolition, les pratiques agricoles, les feux de forêt, l'érosion des sols, la mise en suspension dans

l'air de sables désertiques, les éruptions volcaniques et les embruns océaniques. Certains gaz polluants (oxydes d'azote - NO_x, dioxyde de soufre – SO₂, ammoniac – NH₃, composés organiques volatils) peuvent également se transformer chimiquement dans l'atmosphère et se condenser sur des particules existantes et en accroître la concentration dans l'air.

Accumulation de particules toxiques dans les végétaux. Les particules peuvent, lorsqu'elles sont composées de produits toxiques, comme des métaux lourds, contaminer les végétaux, ce qui est nocif pour la santé des animaux ou des êtres humains qui les consomment, avec une accumulation progressive tout au long de la chaîne alimentaire. Dans certains pays, le dépôt atmosphérique de particules sur les sols est la principale source de métaux lourds dans les sols (en Chine : 50 à 93 % de l'apport total d'arsenic, de cadmium, de chrome, de mercure, de nickel, de plomb et de zinc). Les dépôts humides et secs de plomb, de cadmium et de mercure sont nettement plus élevés dans les zones de haute végétation, comme les forêts, que dans les zones de faible végétation, comme les terres agricoles. L'absorption se fait via les feuilles via leurs stomates, soit via les racines.

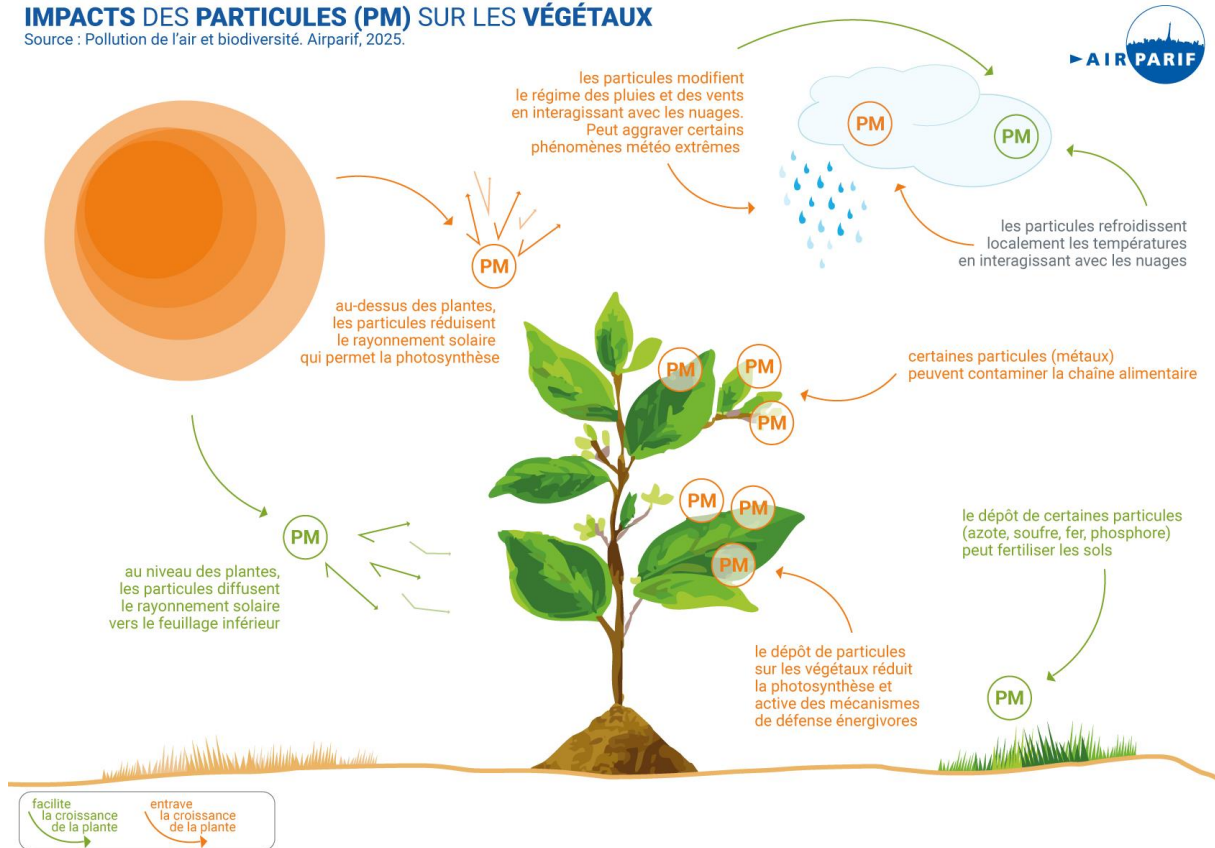
Les particules d'azote, de soufre, de fer et de phosphore peuvent, elles, apporter des nutriments aux végétaux (impact positif sur la croissance des plantes) et la biodiversité marine mais aussi provoquer l'eutrophisation de sols ou cours d'eau (impacts négatifs sur la biodiversité).

Impact des particules sur la croissance des végétaux. Les particules peuvent avoir quatre types d'effets distincts sur la croissance des végétaux.

- En se déposant sur les végétaux, les particules peuvent freiner la photosynthèse, bloquer les stomates et générer des mécanismes de défense des plantes qui ralentissent leur métabolisme.
- Lorsqu'elles sont en suspension dans l'air, les particules réduisent la température sur l'ensemble du globe (-0,7°C en moyenne entre 1750 et 2019, avec un effet de refroidissement plus important dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud). Cet effet de refroidissement - qui compense partiellement le réchauffement climatique - est globalement bénéfique pour les végétaux, en particulier lorsque le stress thermique coïncide avec des stades de croissance sensibles, et peut partiellement compenser les effets négatifs sur le rendement de l'augmentation des températures associée au réchauffement climatique.
- Les particules modifient la quantité de rayonnement solaire qui atteint les végétaux. Elles amoindrissent la quantité de rayonnement solaire reçu par la partie supérieure du couvert végétal, mais apportent paradoxalement plus de lumière aux zones ombragées de la plante, ce qui leur permet de capter plus d'énergie solaire et d'augmenter leur capacité à réaliser la photosynthèse. L'ampleur de ces effets dépend du type de végétal, de la proportion de feuilles ombragées et de l'efficacité d'utilisation du rayonnement par les feuilles exposées au soleil et les feuilles ombragées.
- Enfin, les particules provoquent des changements dans les régimes pluviométriques, puisqu'elles modifient les caractéristiques de formation et l'accumulation d'eau par les nuages. Elles affectent ainsi indirectement la constance des récoltes, en réduisant par exemple la fiabilité des moussons, et en renforçant les processus atmosphériques liés à la formation d'orages et de cyclones tropicaux.

IMPACTS DES PARTICULES (PM) SUR LES VÉGÉTAUX

Source : Pollution de l'air et biodiversité. Airparif, 2025.



Localisation des principaux impacts des particules sur la végétation. Les plus fortes concentrations de particules dans le monde coïncident avec les principales zones de culture, par exemple en Afrique centrale, au Pakistan, en Inde, en Chine et en Asie du Sud-Est.

L'Organisation météorologique mondiale (OMM) déplore le manque de surveillance des particules dans les zones rurales, où la surveillance est bien plus faible que dans les zones urbaines, qui permettraient de mieux comprendre l'impact des particules sur la biodiversité végétale et les cultures.

Impacts spécifiques des particules sur les activités agricoles

Des exemples de contamination des cultures majoritairement due à des particules métalliques, où les niveaux de cadmium, de plomb et d'autres métaux lourds sont 1,5 à 7 fois plus élevés que les normes nationales de sécurité alimentaire, ont été signalés en Chine, en Inde et en République de Corée. Les effets sur la santé les plus préoccupants sont l'affaiblissement du système immunitaire, le cancer gastro-intestinal, les maladies neurologiques, les maladies cardiovasculaires et les retards de croissance mentale. La contamination des cultures vivrières par les particules est très préoccupante dans les zones périurbaines où les particules contenant des métaux (plomb, le cadmium et le mercure, provenant de la combustion de l'essence sans plomb, de l'usure des pneus, de la fabrication et de la fusion des métaux) peuvent s'accumuler dans les sols.

À ce jour, la modélisation la plus complète réalisée à l'échelle nationale pour évaluer l'impact des particules sur les rendements agricoles indique qu'en Chine, les impacts combinés des particules sur le rayonnement solaire, la température et les précipitations réduisent le

rendement des cultures de riz et de blé d'environ 5 %, sans prendre en compte tous les effets directs des particules sur la photosynthèse. D'autres méthodes de modélisation, qui utilisent des approches plus simples ne prenant en compte que certains des impacts des particules sur les cultures, prévoient une augmentation des rendements du riz, du maïs et du blé de 2 % à 11 % à l'échelle mondiale, avec des exceptions dans des zones où les concentrations de particules sont particulièrement élevées comme en Inde et en Chine, ce qui entraîne des pertes de rendement de -4 % à -23 %.

Peu d'études ont examiné les effets combinés de l'ozone de basse altitude et des particules à l'échelle mondiale ou régionale. Certaines études suggèrent que les effets bénéfiques de la pollution aux particules sur le rendement peuvent localement compenser en partie les effets négatifs de l'ozone sur le rendement, tandis que d'autres indiquent que les deux effets sont négatifs et s'additionnent.

L'impact des particules sur les précipitations est particulièrement préoccupant dans des pays comme l'Inde, où les moussons de juin à septembre fournissent l'eau au sol pour les cultures de riz et de maïs l'été, ainsi que pour les cultures de blé l'hiver qui suit. Dans ces régions, les périodes d'interruption de la mousson de plus de sept jours, suffisent à réduire considérablement le rendement des cultures. C'est cet impact spécifique des particules sur les cultures qui fait de la concentration des particules (aérosols dans la littérature scientifique) dans l'atmosphère l'une des 9 limites planétaires identifiées dans la littérature scientifique.

En dehors de la réduction des émissions de particules, il existe plusieurs moyens potentiels de réduire les pertes de rendements agricoles dues à ce polluant :

- Sélectionner des cultures résistantes aux impacts directs ou indirects des particules sur le rendement, étant donné que des réponses différentes entre les variétés ont été détectées sur le terrain, tant au niveau de la quantité de particules interceptées par les cultures qu'au niveau des effets mesurés,
- Planter des brise-vent composés d'arbres et/ou d'arbustes entre la source de particules et la culture (avec pour co-bénéfice de protéger les terres arables et les cultures des vents forts et des problèmes associés tels que l'érosion des sols, les effets abrasifs des particules de sol et des poussières soufflées, et les embruns marins dans les zones côtières). L'agroforesterie ou la culture en couloir, qui consiste à faire pousser des cultures dans des canaux entre des arbres ou des haies, offre une autre manière de protéger les cultures (avec pour co-bénéfices un meilleur stockage du carbone et une meilleure protection de la biodiversité).

IMPACTS DES OXYDES D'AZOTE ET DE L'AMMONIAC SUR L'EUTROPHISATION

Cette section s'appuie sur les sources : [1] [14] [2]

Les oxydes d'azote (NO_x) et l'ammoniac (NH_3) sont deux gaz polluants. Les oxydes d'azote sont principalement émis par les procédés de combustion, et notamment les véhicules thermiques. L'ammoniac est majoritairement émis par les épandages d'engrais azotés.

Les oxydes d'azote et l'ammoniac présents dans l'air se déposent sur les plans d'eau et les sols, entraînant un apport supplémentaire d'azote, ce qui entraîne l'eutrophisation des écosystèmes concernés au-delà d'un certain seuil.

Impacts sur les eaux de surface. Dans les plans d'eau, l'eutrophisation provoque la prolifération d'algues qui peuvent étouffer d'autres formes de vie en provoquant une carence en oxygène et en privant le milieu de lumière. Cela peut asphyxier les poissons et d'autres organismes aquatiques, et conduire à des zones mortes où la biodiversité est sévèrement réduite. Si les apports d'azote liés aux épandages d'engrais azotés ou aux eaux usées sont la principale cause des problèmes d'eutrophisation des eaux de surface, la contribution des émissions de polluants dans l'air peut être significative.

Impacts sur les sols. Sur les sols, les dépôts d'azote générés par les oxydes d'azote et l'ammoniac peuvent fertiliser et augmenter la productivité des plantes dans les forêts et les prairies limitées en azote. Dans les écosystèmes terrestres sensibles comme les prairies, des concentrations trop importantes d'azote peuvent entraîner la perte d'espèces sensibles, la croissance accrue d'espèces favorisées par des niveaux élevés d'azote et des changements dans la structure et le fonctionnement des écosystèmes. L'ajout d'azote peut modifier l'abondance, la diversité et la composition chimique des communautés bactériennes.

En 2020, des niveaux dommageables de dépôts d'azote générés par la pollution de l'air étaient observés dans 75 % des écosystèmes des 27 États membres de l'UE (en baisse de 12 % depuis 2005). Des dépassements significatifs des charges critiques pour l'azote ont été observés dans la vallée du Pô (Italie), dans les zones frontalières entre les Pays-Bas, l'Allemagne et le Danemark, ainsi que dans le nord-est de l'Espagne.

En Île-de-France, la pollution générée par les dépôts atmosphérique d'azote était supérieure de 53% (en azote équivalent par hectare et par an) au seuil limite UE en 2021 (-36% entre 2005 et 2021).

IMPACTS DU DIOXYDE DE SOUFRE ET DES OXYDES D'AZOTE SUR L'ACIDIFICATION DES EAUX ET DES SOLS

Cette section s'appuie sur la source : [9]

Le dioxyde de soufre (SO_2) et les oxydes d'azote (NO_x) sont deux gaz polluants gazeux qui lors des pluies peuvent se dissoudre dans les gouttes d'eau, les acidifier et provoquer le phénomène de pluies acides. L'ammoniac (NH_3) peut indirectement y contribuer également en facilitant la formation de particules secondaires avec ces polluants gazeux, particules qui entraînent également l'acidification des gouttes de pluie et des sols. Parmi ces trois polluants gazeux, le dioxyde de soufre est à l'origine de la grande majorité de l'acidification des eaux et des sols.

Le dioxyde de soufre est principalement émis par la combustion de charbon et de pétrole non désulfuré. Les oxydes d'azote sont principalement émis par les procédés de combustion, et notamment les véhicules thermiques. L'ammoniac est majoritairement émis par les épandages d'engrais azotés.

Impacts sur les eaux de surface. Ces pluies acidifient les sols et les eaux, détruisant les habitats de biodiversité sensibles et nuisant aux organismes aquatiques, aux amphibiens et à certaines plantes qui ne supportent pas l'acidification de leur milieu. Ce n'est parfois pas l'acidité elle-même qui pose problème, mais l'effet de l'acidification qui libère des métaux tels que l'aluminium dans l'eau. Parmi les espèces en déclin dans les eaux acidifiées, on trouve toutes sortes de zooplanctons, des vers plats, des sangsues, des escargots, des bivalves, de petits crustacés, des écrevisses d'eau douce et certaines larves d'éphémères et de plécoptères. Chez les amphibiens et les poissons, les effets sont plus fréquemment liés à la perte de capacité reproductrice - comme c'est le cas pour

le saumon atlantique, la truite brune, la grenouille rousse et le crapaud calamite. Certaines espèces d'insectes, comme les corises et les libellules, prolifèrent en eau acidifiée en raison des changements dans les schémas de prédation après la disparition des poissons.

Impacts sur les sols forestiers. L'acidification des sols forestiers inclut la libération de métaux toxiques et la perte de nutriments, entraînant le déclin des forêts impactées. Certains lichens, champignons et certaines plantes herbacées à fleurs sont particulièrement vulnérables face aux pluies acides. Les invertébrés terrestres sont également affectés, dans des proportions mal connues. Les groupes particulièrement sensibles comprennent les vers de terre, les limaces et les escargots, mais des effets ont également été prouvés sur certains types d'araignées, de papillons et de coléoptères. Les recherches ont également montré que des niveaux élevés d'aluminium résultant de l'acidification ont contribué à l'amincissement des coquilles des œufs de certaines espèces d'oiseaux, comme la mésange charbonnière et le gobe-mouche noir.

Impacts sur les animaux de petite taille. Les formes de vie inférieures (comme les micro-organismes, les plantes herbacées et les invertébrés) sont généralement plus affectées par l'acidification que les formes supérieures (comme les mammifères, les oiseaux et les grands arbres). Si des effets peuvent être visibles chez les grands organismes, ceux observés chez les formes de vie inférieures sont beaucoup plus étendus en termes de nombre d'espèces touchées et de variabilité de sensibilité entre les individus d'une même espèce. Les lichens, les bryophytes, les champignons et les invertébrés aquatiques à corps mou sont particulièrement affectés.

Impacts sur les animaux de plus grande taille. Relativement peu d'exemples d'animaux de plus grande taille souffrant d'effets toxiques directs dus à l'acidité ou à la pollution atmosphérique gazeuse sont connus. L'effet tend plutôt à être indirect, principalement par la perte de sources de nourriture et les perturbations des systèmes reproducteurs. La perte de nourriture dans les eaux acidifiées affecte par exemple, les loutres, les cincles plongeurs et les balbuzards.

Sur terre, les plantes sont plus touchées que les animaux par l'acidification. Les plantes sont par nature moins aptes à s'adapter aux changements soudains de niveaux de pollution que les animaux, qui peuvent migrer ou modifier leur source de nourriture. Une étude de 1995 estimait que trois fois plus de plantes terrestres que d'animaux étaient affectées par l'acidification.

Dans les écosystèmes d'eau douce, les espèces animales plus touchées que les végétaux. Dans les écosystèmes d'eau douce, en revanche, le déclin lié à l'acidification est plus important parmi les espèces animales que parmi les plantes. Des études sur la faune benthique (organismes vivants au fond des milieux aquatiques) en Suède ont montré que la diversité des espèces animales avait diminué de 40 % avec l'acidification de l'eau, contre une diminution de 25 % pour les espèces végétales du fait de l'acidification des eaux.

Si la plupart des espèces affectées diminuent en raison de l'acidification entraînée par la pollution de l'air, certaines augmentent. Une grande majorité d'espèces sont touchées négativement par les polluants de l'air. Cependant, certaines en bénéficient. Des études indiquent que certaines espèces de pucerons semblent être stimulées par les pluies acides, et certaines espèces résistantes se multiplient pour occuper l'espace laissé vacant par la disparition de formes plus sensibles.

L'acidification entraînée par la pollution de l'air tend à réduire la diversité des espèces, mais pas nécessairement la biomasse ou photosynthèse globale réalisée par l'ensemble des végétaux. Les pertes représentent généralement un déclin des espèces plus rares et plus sensibles, leurs places étant occupées par des espèces plus communes et plus robustes. Dans le cas des plantes, il peut s'agir de nombreuses espèces de mauvaises herbes adaptées à une large gamme de conditions pédologiques (caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol qui influencent sa capacité à supporter la vie végétale) et climatiques.

Certains écosystèmes particulièrement vulnérables à l'acidification. Les environnements de haute altitude seront parmi les premiers à montrer les effets de l'acidification. Bien que la pollution diminue souvent avec l'altitude, le dépôt peut rester élevé, car les précipitations augmentent. Comme la plupart des tourbières et des marais sont déjà acides ou neutres, une charge acide supplémentaire peut provoquer des changements graves dans l'écosystème. Les écosystèmes de tourbières sont également sensibles aux apports supplémentaires d'azote. La pollution de l'air peut provoquer des changements majeurs dans les landes acides ou avec une faible teneur en éléments nutritifs essentiels comme les bases (calcium, magnésium, potassium).

Situation en Europe. Alors que les émissions de dioxyde de soufre ont considérablement diminué au cours des dernières décennies, la contribution relative d'oxyde d'azote et d'ammoniac à l'acidification des eaux de surface et des sols a augmenté. Les dépassements seuil au-delà duquel des effets négatifs liés à l'acidification peuvent se produire ont concerné 4 % de l'écosystème européen en 2020. Les points chauds ont été observés aux Pays-Bas et à ses frontières avec l'Allemagne et la Belgique, ainsi que dans certaines petites régions du sud de l'Allemagne et de la République tchèque. Le dépôt d'azote y est généralement à présent le principal facteur d'acidification du fait de la forte baisse des concentrations de dioxyde de soufre.

Impacts passés en Europe. Des estimations indiquent qu'au moins 20 % des espèces végétales et animales ont disparu dans les 15 000 à 25 000 lacs européens où l'acidité a augmenté de façon conséquente avant les années 2000 en raison des dépôts acides anthropiques. En 1995, 25 % des arbres échantillonnés pouvaient être classés comme endommagés (perte de feuilles ou d'aiguilles d'au moins 25 % par rapport à un arbre de référence de la même espèce), en proportion égale pour les espèces à feuilles larges et les conifères. Les dégâts étaient particulièrement graves en République tchèque et en Pologne, où respectivement 60 % et 53 % des arbres étaient identifiés comme endommagés.

IMPACTS DE LA POLLUTION DE L'AIR SUR LES INVERTEBRES

Cette section s'appuie sur la source : [1] [7] [18]

La pollution de l'air impacte à la baisse les services écologiques et économiques fournis par les invertébrés, notamment la pollinisation et la régulation naturelle des ravageurs, et provoque le déclin des invertébrés. Les invertébrés rassemblent les animaux qui ne possèdent pas de colonne vertébrale ou de squelette interne osseux, notamment les insectes et les araignées. Nombre des services écosystémiques essentiels fournis par la nature dépendent de l'action des invertébrés : en particulier le cycle des nutriments, la lutte contre les parasites, la pollinisation et le maintien de la structure et de la fertilité des sols.

Mécanismes physiques à l'origine des impacts de la pollution de l'air sur les invertébrés. Des concentrations élevées de pollution de l'air réduisent d'un tiers la performance des invertébrés (abondance des invertébrés, taux de reproduction, efficacité de l'alimentation, efficacité de la recherche - capacité d'un organisme à localiser et capturer des ressources alimentaires dans son environnement) bénéfiques pour la croissance des végétaux.

- Les polluants de l'air peuvent entraîner des réductions significatives de la condition physique des invertébrés en provoquant des changements aux niveaux physiologique et moléculaire (ex : changements physiologiques dans les antennes des invertébrés qui réduisent leur capacité à trouver leur nourriture).

- Les polluants de l'air peuvent également altérer chimiquement les composés organiques volatils émis par les végétaux. Ces composés sont utilisés par les invertébrés pour identifier les plantes ; leur altération rend donc plus difficile la recherche de nourriture.
- Les polluants de l'air peuvent perturber les processus biologiques responsables de la production de composés organiques secondaires par les plantes, ce qui rend également plus difficile la recherche de nourriture par les invertébrés.

Invertébrés impactés par la pollution de l'air. Les invertébrés bénéfiques aux végétaux et aux cultures, comme les pollinisateurs et les régulateurs naturels de nuisibles, sont affectés par la pollution de l'air. À l'inverse, la pollution de l'air n'a pas d'impact sur les invertébrés herbivores nuisibles à la croissance des plantes.

Des impacts différenciés en fonction des polluants. Les effets de la pollution de l'air sur les performances des invertébrés varient d'un polluant à l'autre. La pollution par l'ozone de basse altitude (O_3) a les effets les plus néfastes. Les oxydes d'azote (NO_x) ont des impacts négatifs moindres mais importants. Le dioxyde de soufre (SO_2) a des impacts comparativement plus faibles. Les particules (PM_{10}) ne semblent pas avoir d'impacts mesurables, même s'il existe à date peu d'études concernant les impacts de ce polluant spécifique.

Même des niveaux modérés d'ozone de basse altitude et d'oxydes d'azote, inférieurs aux seuils réglementaires actuels, affectent négativement les invertébrés bénéfiques, ce qui indique que les menaces posées par la pollution de l'air persisteront ou s'aggraveront probablement sans changements de politique particulièrement ambitieux.

Il existe très peu d'études sur l'impact de tous les polluants en Afrique, en Asie du Sud-Est et en Amérique du Sud, et sur l'impact des particules en général. Des chercheurs plaident donc pour des études sur la pollution de l'air dans ces régions et sur les particules afin d'acquérir une compréhension globale plus complète de la manière dont les polluants atmosphériques affectent les populations d'insectes.

Impacts spécifiques de la pollution de l'air sur les invertébrés bénéfiques aux activités agricoles

Les services écologiques et économiques des invertébrés bénéfiques pour la croissance des cultures agricoles sont réduits par la pollution de l'air (ozone de basse altitude, oxydes d'azote, dioxyde de soufre), alors que celles des invertébrés nuisibles aux plantes ne sont pas significativement affectées, leur permettant ainsi de proliférer.

La pollution de l'air affecte notamment de manière préjudiciable les pollinisateurs. La réduction des visites de fleurs par les pollinisateurs, due à la pollution de l'air, est susceptible d'entraîner des pertes économiques pour le secteur agricole plus élevées que celles actuellement prévues du fait des conséquences du changement climatique et de l'érosion de la biodiversité, en particulier si les niveaux d'ozone de basse altitude continuent d'augmenter.

Les services de pollinisation assurent 5 à 8 % (235 à 577 milliards de dollars de 2015) de la valeur mondiale totale de la production alimentaire agricole, et plus de 70 % de toutes les espèces cultivées bénéficient de la pollinisation par les invertébrés. L'importance économique de la lutte naturelle contre les ravageurs et des services liés au cycle des nutriments est plus mal connue, mais l'impact des invertébrés en matière de régulation naturelle des ravageurs a été évalué en 2006 à environ 6 milliards de dollars par an rien qu'aux États-Unis.

Qu'en est-il des pesticides ?

Les pesticides sont des produits épandus sur certaines cultures agricoles pour les protéger des ravageurs, des maladies et des mauvaises herbes. Leur utilisation vise à augmenter la productivité agricole en réduisant les pertes dues aux organismes nuisibles.

L'utilisation de pesticides est identifiée comme l'un des facteurs majeurs de déclin des populations de nombreuses espèces, notamment les insectes, les oiseaux, et d'autres espèces vivant dans ou à proximité des terres agricoles. Les pesticides affectent la biodiversité animale par plusieurs voies : par toxicité directe (inhalation, ingestion de nectar ou pollen contaminé, contact direct avec leur couche externe des invertébrés), par bioaccumulation et biomagnification (tout au long de la chaîne alimentaire, pouvant causer des effets toxiques graves chez les prédateurs), par dégradation de l'habitat (en éliminant les mauvaises herbes, des pesticides réduisent les ressources alimentaires et les habitats pour de nombreuses espèces), par contamination des sols et des eaux (affectant notamment les amphibiens et les poissons, sensibles aux composés chimiques présents dans l'eau), et par perturbations hormonales (certains pesticides agissent comme des perturbateurs endocriniens, affectant la reproduction et le développement des animaux).

La nocivité des pesticides pour les agriculteurs qui les épandent dans certaines conditions est aussi reconnue, via plusieurs voies d'exposition : l'inhalation de particules ou de vapeurs de produits chimiques lors de la pulvérisation des pesticides, les contacts cutanés notamment au niveau des mains, du visage ou des avant-bras, l'ingestion accidentelle si les mains contaminées touchent les lèvres ou la bouche, ou si l'agriculteur consomme de la nourriture ou des boissons dans des zones exposées.

Si tant pour les invertébrés que pour les agriculteurs la toxicité des pesticides par inhalation directe est reconnue, il n'y a pas en l'état d'impact connu des résidus de pesticides présents en suspension dans l'air à distance de la zone d'épandage sur la santé humaine, ce qui fait que les pesticides ne sont pas reconnus comme étant des polluants de l'air ambiant au sens strict du terme. Néanmoins, des campagnes de mesure des pesticides dans l'air ambiant sont en cours, notamment en France, pour documenter leur présence et à terme éventuellement nourrir le volet aérien des études visant à mieux connaître l'impact des pesticides sur la santé.

IMPACTS DE LA POLLUTION DE L'AIR SUR LES ANIMAUX DE GRANDE TAILLE

Cette section s'appuie sur les sources : [20] [22] [23]

Bien que les expérimentations sur des animaux de laboratoire (notamment des rongeurs) sont utilisés pour étudier l'impact de la pollution de l'air sur les mammifères, il existe peu d'informations sur les effets de la pollution de l'air sur la santé des animaux de grande taille, bien que les humains et les animaux partagent de nombreux mécanismes biologiques pouvant conduire à la morbidité et à la mortalité.

Impact sur les oiseaux. Plusieurs études semblent aller dans le sens d'une nocivité de la pollution de l'air sur les oiseaux, identifiant des effets délétères sur leur reproduction, des dommages moléculaires sur leur ADN et plus généralement leur survie globale. Les particules fines sont les polluants les plus identifiés comme responsables de ces impacts, notamment les métaux lourds.

Impacts sur les animaux domestiques. Une étude menée au Royaume-Uni sur les animaux domestiques estime que la pollution de l'air entraîne une augmentation significative du nombre de visites chez le vétérinaire, tant pour les chats que pour les chiens. Une réduction forte des niveaux de pollution de l'air aux particules fines se traduirait par 80 000 visites de vétérinaires en moins chaque année, et par des économies annuelles de coûts d'utilisation des soins aux animaux de compagnie d'environ 15 millions de livres sterling. D'autres études menées sur des animaux athlètes (chiens de traîneau et chevaux de sport, par exemple) et des animaux de compagnie ont mis en évidence les effets délétères de la pollution de l'air sur la fonction cardio-pulmonaire.

La mortalité du bétail, en particulier des vaches, a été observée en relation avec des épisodes de pollution atmosphérique. Toutefois, les études scientifiques modernes sur les effets de la pollution atmosphérique sur la santé des animaux d'élevage sont particulièrement limitées.

IMPACTS DES PARTICULES SUR LA FERTILISATION DES OCEANS

Cette section s'appuie sur la source : [21]

Certaines particules émises dans l'atmosphère peuvent fertiliser l'océan lorsqu'elles s'y déposent. Ce phénomène est principalement lié aux particules contenant des nutriments essentiels pour le phytoplancton, comme le fer (oligo-élément crucial pour la photosynthèse et la fixation de l'azote), le phosphore ou l'azote, à savoir les poussières désertiques comme celles du Sahara, certaines particules émises lors d'éruptions volcaniques, ainsi que certaines particules issues de la combustion de biomasse ou des émissions industrielles.

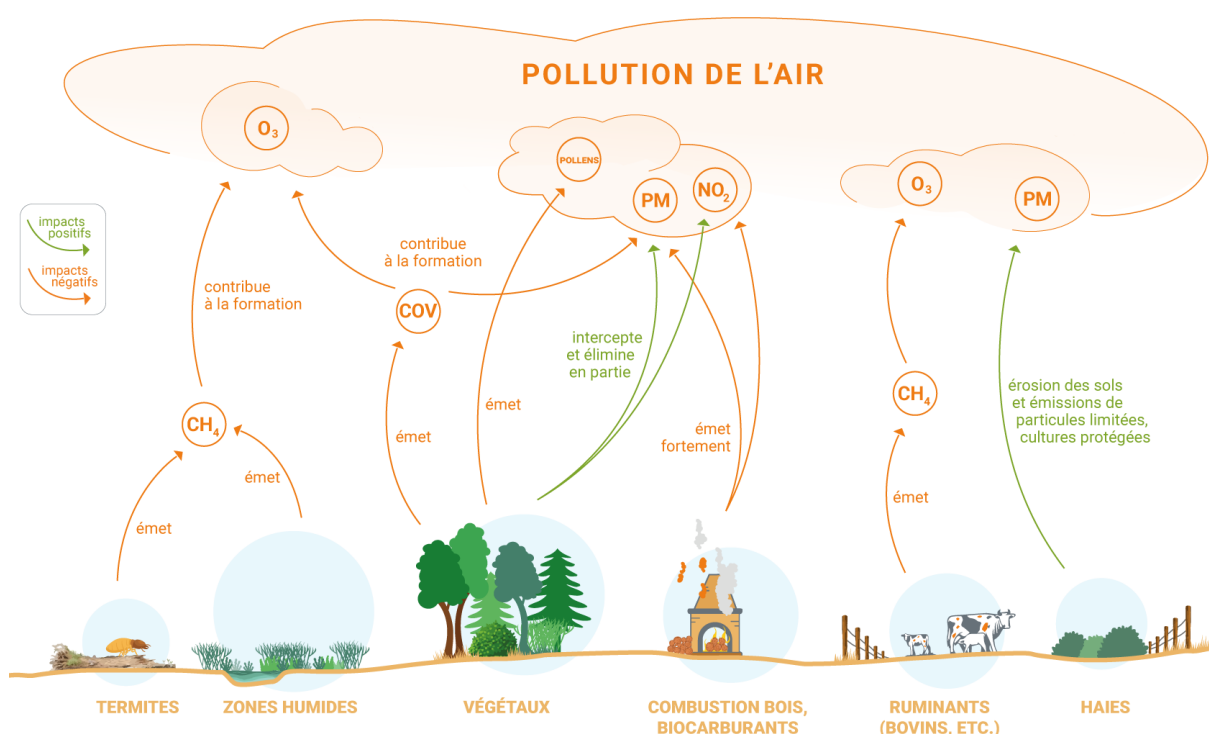
Ces particules sont constituées de nutriments qui une fois déposés à la surface de l'océan, stimulent la croissance du phytoplancton, qui est à la base de la chaîne alimentaire marine. Le fer et le phosphore sont souvent des facteurs limitants pour la croissance du phytoplancton dans certaines régions océaniques.

III. IMPACTS DE LA BIODIVERSITÉ SUR LA POLLUTION DE L'AIR

La biodiversité est ici comprise au sens large comme l'ensemble des animaux et végétaux, ainsi que leur usage.

IMPACTS DE LA BIODIVERSITÉ SUR LA POLLUTION DE L'AIR

Source : Pollution de l'air et biodiversité. Airparif, 2025.



POLLUTION DE L'AIR GÉNÉRÉE PAR LA BIODIVERSITÉ

Cette section s'appuie sur les sources : [1] [2] [9] [10] [11] [12] [19]

Certains animaux et végétaux, ainsi que certains usages énergétiques des végétaux, sont à l'origine d'émissions de polluants dans l'air.

Pollution de l'air générée par les animaux. Plusieurs espèces d'animaux émettent du méthane (CH₄) : les ruminants, poules et dinde, les porcs, certains poissons et crustacés, et certains insectes, comme les termites. Ces émissions de méthane favorisent la production d'ozone de basse altitude (O₃) dans l'atmosphère.

Les termites sont responsables de 2% des émissions mondiales de méthane.

Pollution de l'air générée par les végétaux. Les végétaux sont responsables de l'ordre de 90% des émissions mondiales de composés organiques volatils (COV). Ces composés organiques volatils sont des polluants de l'air précurseurs d'autres polluants de l'air : l'ozone de basse altitude et les particules (PM₁₀).

Les zones humides sont également responsables de 28% des émissions mondiales de méthane (CH₄), gaz à effet de serre précurseur de la pollution à l'ozone de basse altitude (O₃).

Les émissions futures de composés organiques volatils émis par la végétation dépendent fortement de l'évolution future du changement climatique et de l'utilisation des terres. Les émissions de composés organiques volatils seront aussi sensibles aux futures stratégies d'atténuation du réchauffement climatique reposant sur le changement d'usage des terres, et notamment la part donnée et le choix des cultures utilisées pour la reforestation et la bioénergie (les augmentations prévues de la production de cultures destinées aux biocarburants, en particulier dans le cas des espèces bioénergétiques ligneuses - eucalyptus, peuplier - qui émettent plus d'isoprène que les cultures traditionnelles, laissent entrevoir des incidences importantes sur les concentrations d'ozone troposphérique et, par conséquent, sur la santé humaine et la mortalité).

Pollution aux pollens générée par les végétaux. Les végétaux sont aussi à l'origine d'émissions de pollens, polluants de l'air spécifiques à l'origine de réactions allergiques pouvant entraîner un nez qui coule, des éternuements, des yeux irrités, des crises d'asthme et l'exacerbation d'autres allergies.

Les plantes qui poussent en air pollué émettent plus de pollens. Les grains de pollens libèrent une quantité plus importante de substances allergisantes en présence de certains polluants dans l'air, et les muqueuses des personnes qui vivent en air pollué vont réagir davantage (la pollution agit comme un cofacteur : avant de devenir allergique, le patient se sensibilise pendant plusieurs années, jusqu'à ce que son taux d'anticorps atteigne un certain niveau, qui déclenche des symptômes). Néanmoins, une biodiversité plus riche semble globalement réduire la vulnérabilité aux allergies. Le changement climatique doit accroître à l'avenir la durée et l'intensité des pollutions aux pollens.

Pollution de l'air due aux usages de la biomasse. Certains usages de la biomasse émettent des polluants de l'air. C'est le cas notamment de la combustion du bois pour le chauffage et la cuisson d'aliment, qui est l'une des principales sources de pollution de l'air aux particules (et dans une moindre mesure d'oxydes d'azote) en air ambiant et en air intérieur. Les feux de forêt sont eux aussi à l'origine de quantités importantes de pollution de l'air, notamment de particules (et dans une moindre mesure d'oxydes d'azote et de monoxyde de carbone). Ces feux de forêt peuvent être liés à des phénomènes naturels ou à des activités humaines, notamment agricoles. Le changement climatique rend les conditions plus propices aux feux de forêt. Les biocarburants liquides ou gazeux d'origine végétale sont aussi à l'origine d'émissions de polluants de l'air, notamment d'oxydes d'azote (et dans une moindre mesure de particules).

Pollution de l'air spécifiquement générée par les activités agricoles

Le secteur agricole, et notamment les activités liées à l'élevage bovin, est responsable de 21% des émissions mondiales de méthane (40% des émissions mondiales spécifiquement liées aux activités humaines, dont 31% spécifiquement dus aux ruminants - vaches, moutons, chèvres, les animaux de basse-cour - poules et dindes - et au lisier qu'ils génèrent). Il est donc indirectement responsable d'une part des concentrations d'ozone de basse altitude, dont le méthane est un des précurseurs.

Via l'épandage d'engrais azotés, il est également à l'origine d'environ trois quarts des émissions

mondiales d'ammoniac (NH_3), polluant de l'air précurseur de la formation de particules secondaires. Le travail du sol, et en particulier les activités de labours, est également à l'origine de 10 à 20% des émissions anthropiques mondiales de particules.

Ces émissions de polluants sont très majoritairement dues à l'alimentation carnée et donc à l'élevage. Une alimentation 100% végétale (végan) permettrait de réduire les émissions d'ammoniac et de méthane d'origine agricole de 84 à 86% environ au niveau mondial à échéance 2030. En réduisant les émissions et la formation de particules et d'ozone de basse altitude, une alimentation 100% végétale permettrait d'éviter 236 000 morts prématurées par an dans le monde, soit -6% des décès prématurés imputés à la pollution de l'air ambiant à cette échéance (en France, une alimentation 100% végétale permettrait de diminuer de 19% la concentration de particules fines et de 6% les concentrations d'ozone de basse altitude à cette échéance).

REGULATION DE LA POLLUTION DE L'AIR PAR LA BIODIVERSITE

Cette section s'appuie sur la source : [1] [9] [13] [16]

La biodiversité végétale peut contribuer à faire diminuer les concentrations de polluants de l'air.

Captation des polluants par les arbres. Les arbres peuvent filtrer les polluants.

- Les feuilles et les branches des arbres interceptent les particules en suspension dans l'air, comme la poussière, les cendres et les pollens. Ces particules se déposent sur les surfaces des feuilles et peuvent ensuite être éliminées par la pluie et être absorbées par les sols. Les arbres peuvent absorber certains polluants gazeux, comme le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote, à travers les stomates (petits pores) présents sur leurs feuilles.
- Certaines espèces d'arbres peuvent absorber et accumuler des métaux lourds et d'autres contaminants dans leurs tissus (phytoremédiation). Ce processus peut aider à dépolluer le sol et l'eau environnants, mais peut aussi être nocif pour la biodiversité animale ou les êtres humains qui se nourrissent ensuite de ces végétaux.

Les taux d'élimination de la pollution par la végétation varient d'une région à l'autre en fonction de la couverture végétale et de la surface foliaire (aire totale occupée par les feuilles d'une plante ou d'un ensemble de plantes), de l'importance de la pollution de l'air, de la durée de la saison où sont présentes des feuilles, des précipitations et d'autres variables météorologiques.

Cette captation de polluants de l'air est globalement faible. En Angleterre, une étude a estimé que l'absorption nette de la pollution par les forêts réduit les décès liés à la pollution de l'air de 5 à 7% et les admissions à l'hôpital liées à la pollution de l'air de 4 à 6%, permettant d'éviter des pertes économiques évaluées entre 17 000 et 900 000 livres sterling. D'autres études estiment que les forêts du Royaume-Uni permettent d'éviter 5 à 7 décès prématurés par an, et que les forêts américaines permettent d'éviter environ 1 décès prématuré par ville dans 10 villes américaines et jusqu'à 8 personnes par an dans la ville de New York.

Des études menées dans différentes villes italiennes ont montré qu'en général, les forêts de feuillus à feuilles persistantes capturent plus d'ozone de basse altitude que les forêts de conifères, suivies par les forêts mixtes de feuillus et de conifères, les forêts de feuillus à feuilles caduques en capturant le moins. Les forêts mixtes de feuillus et de conifères et les forêts de conifères capturent

elles plus de particules, suivies par les forêts de feuillus à feuilles persistantes et par les forêts de feuillus à feuilles caduques. Les arbres à feuilles caduques capturent davantage de particules et d'ozone de basse altitude en été lorsqu'ils sont en feuilles tandis que les arbres à feuilles persistantes en capturent davantage en automne et en hiver. Le choix des espèces plantées peut donc avoir une incidence sur la régulation de la qualité de l'air.

En Europe et en Asie centrale, la valeur médiane de la diminution des concentrations de polluants de l'air par les végétaux est estimée à 289 dollars (valeur 2017) par hectare et par an. A titre de comparaison, les bénéfices écosystémiques de la biodiversité sur la qualité de l'air sont moindres que ceux estimés sur la qualité de l'eau douce - 1 965 dollars par hectare et par an - et la régulation du climat - 464 dollars par hectare et par an.

Cas particulier de l'impact des végétaux en ville sur la pollution de l'air. Les arbres urbains ont un impact mitigé sur la pollution de l'air.

- Ils émettent des composés organiques volatils, qui favorisent la formation de deux polluants de l'air, l'ozone de basse altitude et les particules
- Ils modifient la circulation des flux d'air (effets aérodynamiques)
- Leurs feuilles, branches et écorces capturent par absorption ou adhésion des particules et gaz polluants en suspension dans l'air
- Ils limitent la hausse de température en été, ce qui limite indirectement la formation d'ozone de basse altitude

Une thèse menée pour la Ville de Paris prenant en compte l'ensemble de ces facteurs estime que les arbres sont à l'origine d'une hausse de 4% des concentrations de dioxyde d'azote et de 1% des concentrations de particules fines (PM_{2,5}), ainsi que d'une baisse de 2% des concentrations d'ozone de basse altitude dans les rues arborées. Ces impacts varient fortement d'une rue à l'autre, et sont majoritairement dus aux effets aérodynamiques des arbres sur la circulation des flux d'air.

D'autres études, qui ne prennent pas en compte l'ensemble des impacts des arbres urbains sur la pollution de l'air, estiment que les arbres urbains peuvent réduire les concentrations de particules de 9 % à 50 % en ville, tout en évaluant que ces chiffres peuvent varier considérablement et recommandent d'évaluer des projets au cas par cas et à petite échelle. D'autres études ont estimé que les forêts urbaines de Barcelone ont réduit de 3% les émissions de particules, et de 1% les émissions d'oxydes d'azote en 2008. Aux États-Unis, certaines études ont évalué que la rétention de la pollution par les arbres urbains permet d'éviter 3,8 milliards de dollars de pertes économiques chaque année dues à la pollution de l'air. D'autres, enfin, ont estimé que le couvert arboré du Grand Londres élimine entre 0,7 % et 1,4 % des concentrations de particules. Globalement, l'ensemble des études montrent que l'impact moyen des arbres sur la pollution de l'air en ville, que cet impact soit globalement positif ou négatif, est faible, mais peut être plus important dans certaines zones.

Les forêts urbaines peuvent aussi émettre des quantités importantes de pollens, un polluant de l'air à l'origine de réactions allergiques.

Limitation de l'érosion des sols par les végétaux. La végétation joue un rôle essentiel dans la limitation de l'érosion des sols et, par extension, dans la réduction des émissions de particules issues de cette érosion. Elle agit comme une couverture protectrice qui stabilise le sol par l'intermédiaire de racines et de la canopée, en diminuant l'impact direct des précipitations et en limitant le transport des particules de sol par le vent et l'eau.

- Les racines des végétaux maintiennent les particules du sol en place, réduisant ainsi leur déplacement par les forces érosives du vent et de l'eau. Ce réseau racinaire forme une

barrière mécanique qui aide à préserver la structure du sol, réduisant les pertes de terre, notamment sur les pentes où l'érosion est plus marquée.

- Le couvert végétal amortit l'impact des gouttes de pluie sur le sol. En interceptant les précipitations, la végétation réduit l'érosion par éclaboussure, qui est une cause importante de déstabilisation des particules de sol en surface. Moins de particules sont ainsi remises en suspension, diminuant les émissions de poussières dans l'atmosphère.
- En maintenant le sol en place, la végétation prévient la formation de poussières qui pourraient sinon être soulevées par le vent, particulièrement dans les régions arides ou les zones agricoles.

Usages des végétaux pour améliorer la surveillance de la pollution de l'air

Des projets de recherche visent à utiliser la biodiversité pour améliorer la surveillance de la pollution de l'air. Le projet français de science participative Ecorc'air ambitionne de prélever des écorces d'arbres et d'y analyser la présence de particules métalliques pour estimer leur concentration dans l'air. Le projet est encore expérimental, ne concerne que les particules métalliques, et ne permet pas d'atteindre des mesures fiables [\[plus d'informations\]](#). De la même manière, le projet Lichen Go vise à évaluer la pollution de l'air en utilisant les lichens comme indicateurs [\[plus d'informations\]](#).

Un projet de recherche anglais entend utiliser les filtres des stations de mesure de la pollution de l'air pour surveiller la biodiversité grâce à l'ADN environnemental déposé accidentellement sur le filtre. En analysant l'ADN présent sur ces filtres, les chercheurs sont parvenus à identifier des traces génétiques de diverses espèces, notamment de plantes, d'insectes et d'animaux. Cette approche pourrait permettre de surveiller l'état des écosystèmes et la santé de la biodiversité dans une région sans perturber les habitats naturels, en l'intégrant simplement aux systèmes de surveillance de la qualité de l'air déjà en place [\[plus d'informations\]](#).

Efficacité des plantes dépolluantes d'intérieur

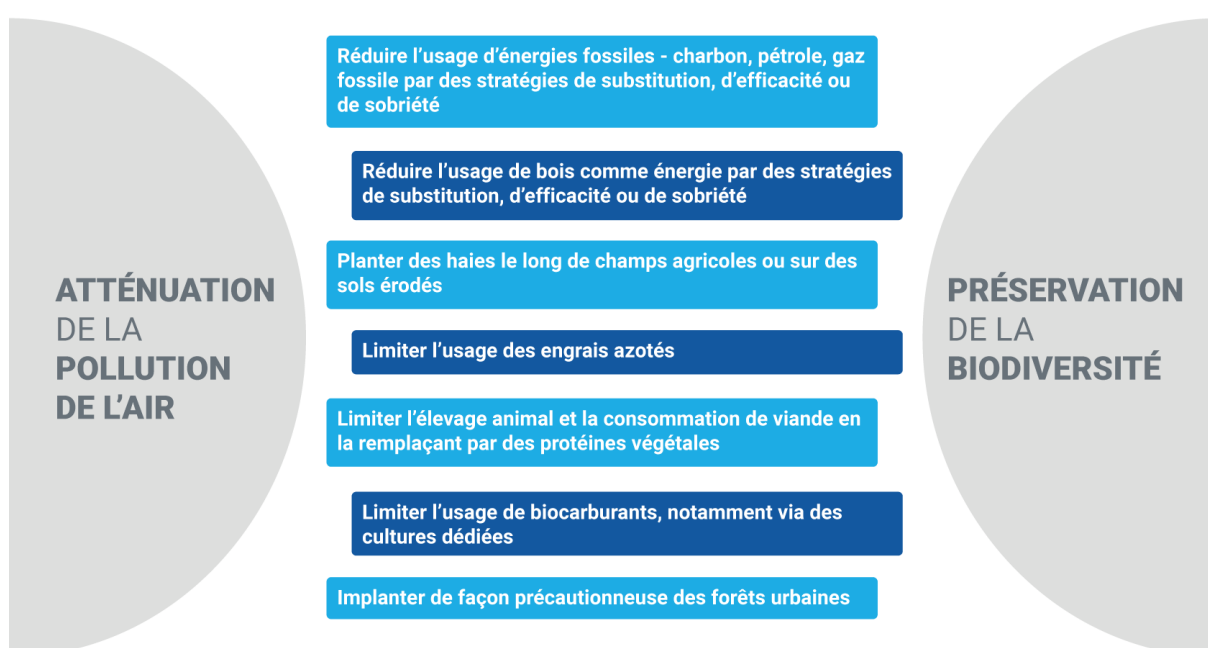
Certains végétaux sont commercialisés comme des solutions de dépollution de l'air intérieur du fait de leur capacité d'absorption de certains polluants. Si certains végétaux ont prouvé leur capacité d'épuration en laboratoire, leur efficacité en conditions réelles n'a pas été démontrée. Par ailleurs, si les impacts sanitaires restent faibles, les végétaux présents dans les logements peuvent émettre certains polluants de l'air toxiques (des composés organiques volatils) et être à l'origine de troubles allergiques, soit directement liés aux plantes, soit du fait de développement de moisissures dans le substrat de celles-ci.

L'utilisation de végétaux comme solutions de dépollution de l'air intérieur n'est donc pas validée scientifiquement au regard des niveaux de pollution généralement rencontrés dans les habitations et des nouvelles connaissances scientifiques dans le domaine.

IV. IDENTIFICATION DES LEVIERS D'ACTIONS GAGNANTS-GAGNANTS POUR ATTÉNUER LA POLLUTION DE L'AIR ET PRESERVER LA BIODIVERSITÉ

ACTIONS CO-BÉNÉFIQUES POUR LA QUALITÉ DE L'AIR ET LA BIODIVERSITÉ

Source : Pollution de l'air et biodiversité. Airparif, 2025.



Transformations utiles pour limiter la pollution de l'air qui ont également un impact sur la biodiversité (le chiffre entre parenthèse renvoie à un des cinq principaux leviers d'action de protection de la biodiversité, listés plus bas) :

- **réduire l'usage d'énergies fossiles - charbon, pétrole, gaz fossile par des stratégies de substitution, d'efficacité ou de sobriété est co-bénéfique pour la biodiversité et la qualité de l'air** (1) (3) (4)
 - l'usage des énergies fossiles est la principale source d'émissions de gaz à effet de serre
 - leur extraction et à l'origine d'une part conséquente de l'artificialisation des sols
 - leur combustion est une source majeure d'émissions de polluants de l'air, qui sont nocifs pour la santé, les végétaux et les animaux

- **réduire l'usage de bois comme énergie par des stratégies de substitution, d'efficacité ou de sobriété est co-bénéfique pour la biodiversité et la qualité de l'air** (1) (3) (4)
 - la combustion de bois pour le chauffage et pour l'industrie est une source majeure d'émissions de polluants de l'air, qui sont nocifs pour la santé, les végétaux et les invertébrés
 - elle peut également rajouter des gaz à effet de serre dans l'atmosphère
 - la coupe du bois peut être à l'origine de déforestations

- **planter des haies le long de champs agricoles ou sur des sols érodés est co-bénéfique pour la biodiversité et la qualité de l'air** (1) (3) (4)
 - les haies fournissent un refuge et un habitat pour de nombreuses espèces animales, et permettent aux espèces de se déplacer entre différents habitats
 - elles peuvent capter des gaz à effet de serre
 - elles peuvent contribuer à abriter les cultures des impacts de la pollution de l'air, et limiter les émissions de particules polluantes liées à l'érosion des sols

- **limiter l'usage des engrais azotés est co-bénéfique pour la biodiversité et la qualité de l'air** (3) (4)
 - l'épandage et la production d'engrais azotés est à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre
 - l'épandage d'engrais azotés est à l'origine d'émissions d'ammoniac, un polluant de l'air qui facilite la formation de particules fines, un polluant nocif pour la santé et les végétaux, et peut eutrophiser les sols et les eaux, un phénomène nocif pour la biodiversité

- **limiter l'élevage animal et la consommation de viande en la remplaçant par des protéines végétales est co-bénéfique pour la biodiversité et la qualité de l'air** (1) (2) (3) (4)
 - l'élevage animal est une des principales sources d'émissions de gaz à effet de serre
 - il est notamment à l'origine de fortes émissions de méthane, gaz qui favorise la formation d'ozone de basse altitude dans l'atmosphère, un polluant nocif pour la santé, les végétaux et les invertébrés
 - la forte production agricole nécessaire à l'alimentation animale est également à l'origine d'émissions importantes d'ammoniac et de particules, des polluants nocifs pour la santé, les végétaux et les invertébrés
 - l'élevage animal et les cultures agricoles qu'elle nécessite sont une des sources majeures de déforestation dans le monde

- **limiter l'usage de biocarburants, notamment via des cultures dédiées, est co-bénéfique pour la biodiversité et la qualité de l'air** (1) (4)
 - la production de biocarburant à partir de végétaux est susceptible d'émettre des quantités importantes de composés organiques volatils, des polluants de l'air précurseurs d'ozone de basse altitude nocif pour la santé, les végétaux et les invertébrés
 - leur production peut être fortement consommatrice de sols agricoles, dont l'extension est une cause majeure de déforestation dans le monde

- la combustion de biocarburants émet des polluants de l'air similaires aux combustibles fossiles, nocifs pour la santé, la végétation et les invertébrés
- **implanter de façon précautionneuse des forêts urbaines est co-bénéfique pour la biodiversité et la qualité de l'air (4)**
 - les forêts urbaines sont des moyens efficaces de préserver la biodiversité en ville et de réduire les pics de chaleurs estivaux accrus par le réchauffement climatique
 - cependant, elles peuvent aggraver la pollution de l'air en facilitant l'accumulation de polluants dans les rues et en émettant des pollens
 - pour l'éviter, il peut être pertinent de limiter la plantation d'espèces à forte émission de composés organiques volatils ou de pollens allergisants

Les 5 principaux leviers pour protéger la biodiversité, identifiés par l'IPBES :

- (1) réduire l'artificialisation, la déforestation et l'agriculture intensive pour réduire la destruction et la fragmentation des habitats naturels
- (2) réduire la chasse excessive, la pêche intensive et la surexploitation des ressources naturelles
- (3) réduire les émissions de gaz à effet de serre, à l'origine du changement climatique
- (4) réduire les émissions de polluants dans les eaux, les sols, l'air, notamment chimiques, plastiques et les pesticides
- (5) réduire le transport d'espèces invasives

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *The global assessment report on biodiversity and ecosystem services*. IPBES (2019) [\[lien\]](#)
- [2] *Rapport d'évaluation 6, Groupe de travail I : Les bases scientifiques du changement climatique*. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2021) [\[lien\]](#)
- [3] « Quel est l'impact des polluants de l'air sur la végétation ? ». Encyclopédie de l'environnement (2019) [\[lien\]](#)
- [4] N. E. Grulke et al. *Ozone effects on plants in natural ecosystems*. Plant Biology (2019) [\[lien\]](#)
- [5] *Air quality in Europe 2022 Impacts of air pollution on ecosystems*. AEE (2024) [\[lien\]](#)
- [6] *The Impacts of Particulate Matter on Crop Yield: Mechanisms, Quantification and Options for Mitigation*. World Meteorological Organisation (2023) [\[lien\]](#)
- [7] James M. W. Ryalls et al. *Air pollution disproportionately impairs beneficial invertebrates: a meta-analysis*. Nature (2024) [\[lien\]](#)
- [8] *The Impacts of Tropospheric Ozone Pollution on Crop Yield: Mechanisms, Quantification and Options for Mitigation*. World Meteorological Organisation (2023) [\[lien\]](#)
- [9] *The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia*. IPBES (2018) [\[lien\]](#)
- [10] Marco Springmann et al. *The global and regional air quality impacts of dietary change*. Nature Communication (2023) [\[lien\]](#)
- [11] R. B. Jackson et al. *Human activities now fuel two-thirds of global methane emissions*. Environmental Research Letter (2024) [\[lien\]](#)
- [12] Katerina Sindelarova et al. *High-resolution biogenic global emission inventory for the time period 2000–2019 for air quality modelling*. Earth System Science Data (2022) [\[lien\]](#)
- [13] Alice Maison. *Modélisation des impacts des arbres sur la qualité de l'air de l'échelle de la rue à la ville*. ENPC (2023) [\[lien\]](#)
- [14] *Air quality in Europe 2022 Impacts of air pollution on ecosystems*. AEE (2024) [\[lien\]](#)
- [15] Nigel Dudley et al. *Air pollution and biodiversity: a review*. WWF International (1996) [\[lien\]](#)
- [16] *Identification et analyse des différentes techniques d'épuration d'air intérieur émergentes*. ANSES (2017) [\[lien\]](#)
- [17] *Coûts économiques pour l'agriculture des impacts de la pollution de l'air par l'ozone*. ADEME, Agriculture et Territoires, INERIS (2020) [\[lien\]](#)
- [18] *Prévention des risques pour la santé liée à l'utilisation des pesticides dans l'agriculture*. OMS et International Centre for Pesticide Safety (2001) [\[lien\]](#)
- [19] Pierre De Baudouin, « Pollens : pourquoi la pollution de l'air aggrave les allergies ? ». France 3 (2022) [\[lien\]](#)
- [20] Olivier Deschenes et al. *The impact of air pollution on petcare utilization*. Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment (2024) [\[lien\]](#)

[21] Zero pollution Dashboard. Commissions Européenne (2025) [[lien](#)]

[22] Madeleine G. Barton et al. *A review of the impacts of air pollution on terrestrial birds*. Science of the Total Environnement (2023) [[lien](#)]

[23] Bonni L. Beaupied et al. *Cows as canaries: The effects of ambient air pollution exposure on milk production and somatic cell count in dairy cows*. Environmental Research (2022) [[lien](#)]