Quel est l'impact des polluants de l'air sur la végétation ?

Auteur :
GARREC Jean-Pierre, Directeur de Recherche INRA, Laboratoire Pollution Atmosphérique, INRA, Centre de Recherches de Nancy

15-04-2019



Les végétaux sont en première ligne face aux pollutions atmosphériques car ils vivent fixés et constituent la base du fonctionnement des écosystèmes terrestres et aquatiques. La nature et l'importance de l'impact des polluants atmosphériques sur les végétaux va dépendre des caractéristiques physiologiques et biochimiques du végétal touché, et des propriétés du ou des polluants rencontrés. Les perturbations physiologiques des plantes sont variées et sont observables, selon la nature du polluant, sur des zones plus ou moins étendues qui vont de l'échelle locale jusqu'à l'ensemble de la planète. Ces réponses vont immédiatement se répercuter sur le fonctionnement des écosystèmes et en particulier sur les relations plantes-insectes. Elles peuvent aussi avoir des effets sur la santé humaine, les végétaux étant à l'origine de nombreuses chaines alimentaires.

1. Qu'est-ce qu'une atmosphère polluée ?

L'atmosphère, enveloppe gazeuse entourant la Terre (Lire L'atmosphère et l'enveloppe gazeuse de la Terre) contient un certain nombre de constituants naturels : un mélange de gaz (78 % d'azote, 21 % d'oxygène, et aussi de quelques autres gaz mineurs dont 1 % d'argon, du CO_2, du néon, de l'hélium, de l'ozone [1], etc.), d'eau (solide, liquide et vapeur) et de particules solides ou liquides, inorganiques ou organiques en suspension (les aérosols).

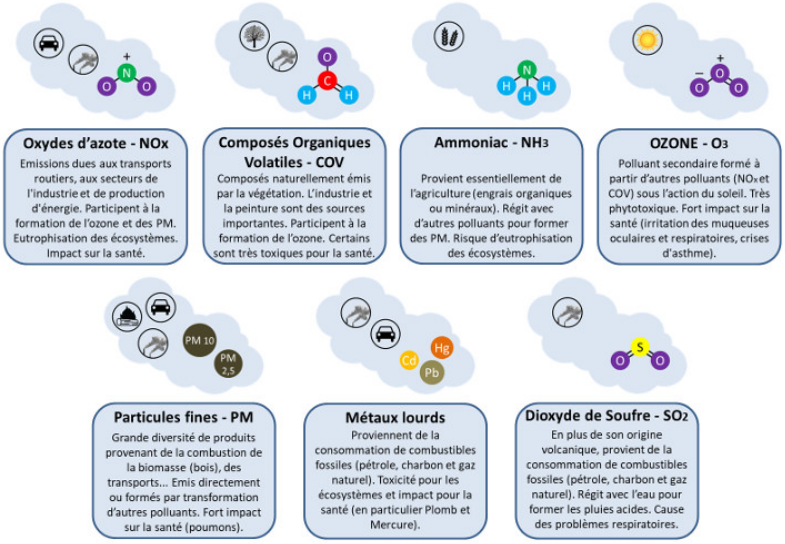


Figure 1. Quelques-uns des polluants atmosphériques majeurs, leur origine (transports, industrie, agriculture, biomasse, etc…) et leur impact sur l'environnement et la santé. Dans le cas de l'ozone, il ici est question de l'ozone troposphérique engendré par la pollution près de la surface de la terre.

L'atmosphère est polluée lorsque la teneur de certains de ses constituants naturels est supérieure à la normale et/ou lorsqu'elle contient de nouveaux composants (Lire Les pollutions de l'air ; Comment le droit protège-t-il la qualité de l'air ? ; Article Guidotti & Pithon). Mais on parle surtout de pollution atmosphérique lorsque ces augmentations entrainent des teneurs en composants telles qu'elles ont des effets nocifs sur les différents constituants des différents écosystèmes (végétaux, animaux, etc.), sur les humains (effets sur la santé) et sur les matériaux [2].

Selon le type de constituant considéré (Figure 1) [3], ces augmentations peuvent concerner des zones très réduites comme la planète toute entière. Si cette pollution atmosphérique a toujours existé (à cause du volcanisme, des incendies, par exemple), c'est avec l'avènement de l'ère industrielle qu'elle est devenue un véritable problème pour l'environnement et la santé (Lire Les pollutions de l'air ; Focus Les oiseaux : des filtres à air volants).

2. Réponses physiologiques des plantes

Si les plantes, de par leur vie fixée et leur large répartition, sont parmi les premières victimes de la pollution atmosphérique, elles peuvent également constituer une source de pollution secondaire. Lors de fortes chaleurs, elles émettent des composés organiques volatiles (COV) comme les terpènes [4], un des gaz précurseurs de l'ozone (Figure 1). Dans les villes des régions chaudes des USA, il est recommandé de ne pas planter certains arbres (pins, chênes, etc..) pour ne pas augmenter les niveaux d'ozone. Les plantes émettent également des particules fines (pollens, spores, composés cireux, divers particules) qui, si elles n'ont pas d'effet sur les végétaux, peuvent avoir des effets sur la santé humaine (allergies).

2.1. Pénétration

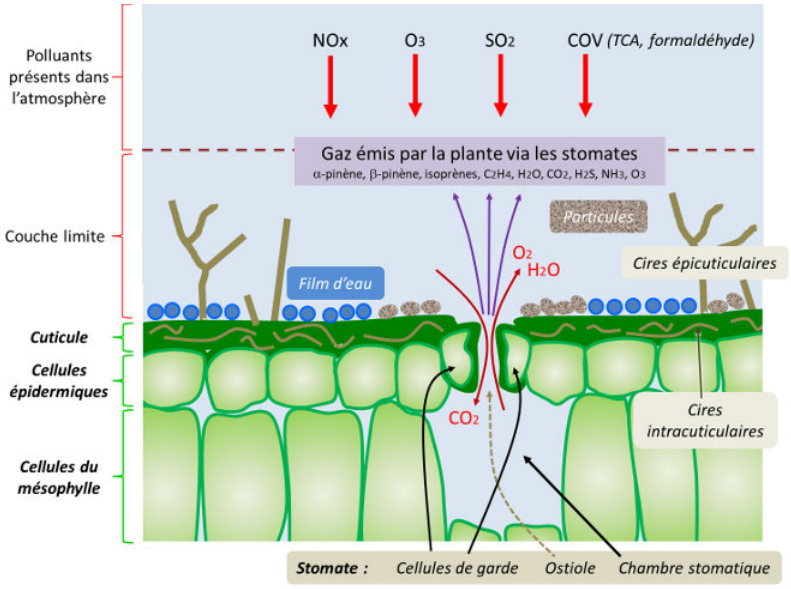


Figure 2. Représentation schématique de l'environnement des surfaces foliaires. Les stomates, situés essentiellement à la surface des feuilles, sont le site privilégié des échanges gazeux de la plante avec l'atmosphère. Parmi les composés organiques volatiles émis par la plante, on trouve de nombreux terpènes -a-pinène, b-pinène, isoprènes- responsables de pollution atmosphérique estivale, en particulier dans les zones de forêts et les vallées de montagne. La taille des cellules est de l'ordre de 10 à 100 mm. [Source J.P. Garrec].

La pénétration des polluants dans les plantes se fait essentiellement par l'intermédiaire des feuilles (Figure 2). Il peut aussi exister une légère pénétration par les tiges et le tronc. Avant d'arriver dans la feuille, le polluant va d'abord devoir traverser la 'couche limite' qui correspond à la couche d'air non agitée au contact de celle-ci (Figure 2).

L'épaisseur de cette couche est fonction de la taille et de la forme de la feuille, de la présence de poils foliaires (ou trichomes) et de la vitesse du vent. Son épaisseur est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres.

Lors de sa présence temporaire dans cette couche limite, de nombreuses réactions sont susceptibles de se produire car le polluant incident va réagir avec :

Une phase aqueuse constituée du film d'eau présent en surface de la feuille ainsi que de l'eau liée aux groupes polaires de la cuticule (Lire Focus Cuticule des plantes)

Une phase lipidique constituée des cires présentes au sein (cires intracuticulaires) ou situées en surface (cires épicuticulaires) de la cuticule (Lire Focus Cuticule des plantes) ;

Une phase gazeuse constituée des composants de l'atmosphère et des émissions de la feuille. [5].

Selon la nature des réactions qui auront lieu ou non au niveau de la couche limite, la concentration du polluant qui va pénétrer dans la plante peut varier énormément. Certains produits de ces réactions sont même plus phytotoxiques que le polluant lui-même [6].

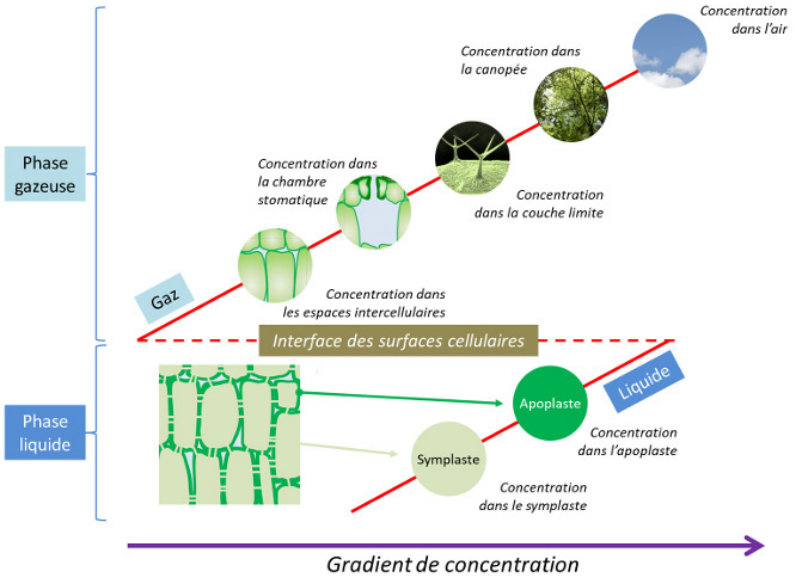


Figure 3. Représentation schématique de l'évolution décroissante de la concentration d'un polluant depuis l'atmosphère jusqu'à l'intérieur de la feuille. [Source J.P. Garrec].

Les polluants gazeux pénètrent dans la plante comme les autres gaz atmosphériques (CO_2, Oxygène,…), principalement par l'intermédiaire des stomates présents sur les surfaces foliaires. Par contre, une large partie des polluants organiques va surtout être absorbée par la structure lipidique que constitue la cuticule (Figure 2). Seule une faible partie va pénétrer dans la feuille, puis diffuser et réagir entre et dans les différents compartiments internes que constituent l'apoplaste et le symplaste (Figures 3 & 4).

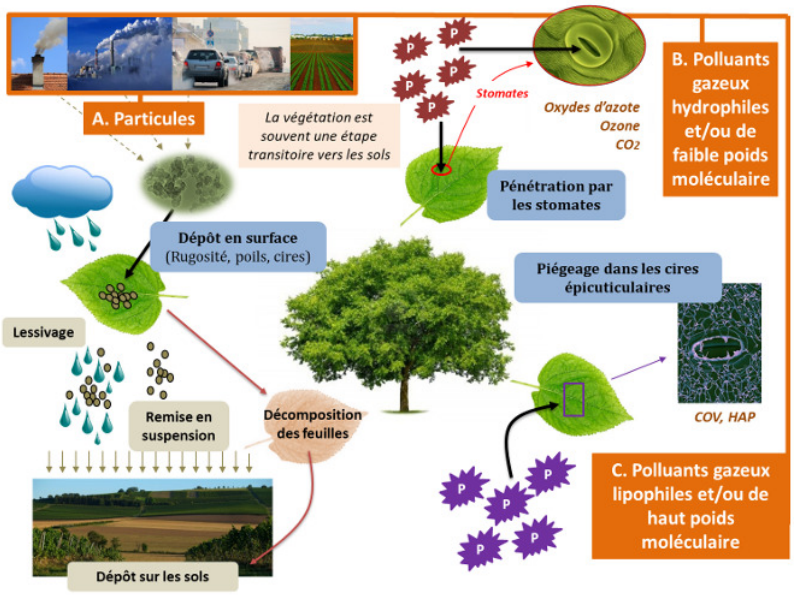


Figure 4. Représentation schématique du comportement des divers polluants (gazeux et particules) vis-à-vis des végétaux.

Les polluants particulaires (organiques ou inorganiques) sont d'abord captés par les surfaces foliaires (grâce au micro-relief crée par la présence des cires épicuticulaires, des trichomes, etc…), dans une gamme de tailles qui est généralement comprise entre 1 et 10 µm. En forêt, ce dépôt particulaire peut osciller entre 280 et 1000 kg par hectare. Par la suite, les conditions météorologiques comme le vent, le soleil et surtout la pluie (lessivage des feuilles, dissolution des particules inorganiques) influencent les caractéristiques de ce dépôt (Figure 4). Grâce à l'efficacité de la barrière cuticulaire, le dépôt foliaire organique ou inorganique n'est souvent à l'origine que d'une légère pénétration de polluants dans les feuilles et il a donc de faibles impacts

physiologiques.

Après pénétration, la réponse physiologique des plantes à la pollution atmosphérique va dépendre des deux acteurs en jeu : d'une part les caractéristiques de la plante et d'autre part la nature de la pollution.

2.2. La réponse dépend de la plante

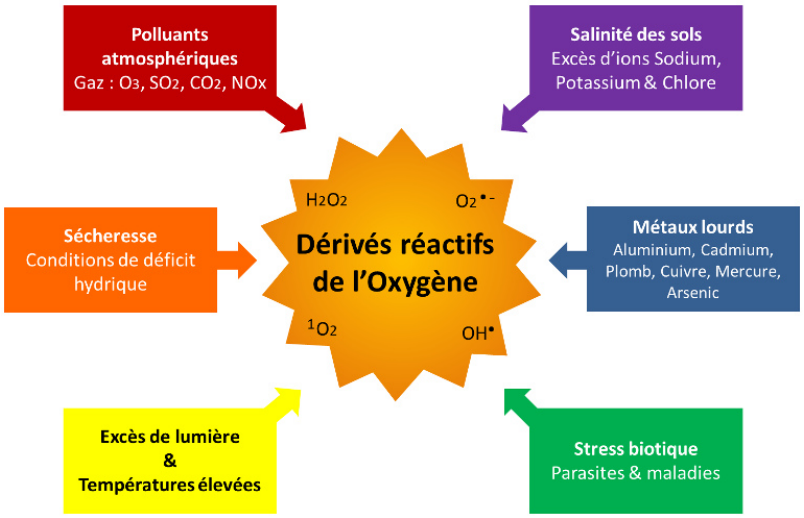


Figure 5. La production de dérivés réactifs de l'oxygène (DRO en français, souvent appelés ROS selon l'acronyme anglais pour Reactive Oxygen Species) est une stratégie de défense classique lorsque les plantes sont soumises à des stress de nature très variée (sécheresse, excès de lumière, attaque par des agents pathogènes, salinité des sols, etc…). C'est aussi le cas lorsqu'elles sont soumises à des polluants atmosphériques.

La plante réagit à la pollution atmosphérique en produisant des dérivés réactifs de l'oxygène. Après pénétration dans les feuilles, et comme pour la majorité des stress biotiques et abiotiques (Lire La vie fixée des plantes et ses contraintes ; Comment les plantes supportent les stress alpins ?), les polluants vont tout d'abord entraîner chez la plante un stress oxydatif avec production de radicaux libres (radicaux hydroxyles) et de dérivés réactifs de l'oxygène (DRO) susceptibles de provoquer des dégâts à différents niveaux (Figure 5) [7]. En particulier ces DRO vont avoir trois cibles principales au niveau des cellules : les lipides (au niveau des membranes), les protéines (au niveau des acides aminés) et les acides nucléiques (formation d'adduits).

Parallèlement le polluant va entraîner un stress spécifique lié à ses caractéristiques physico-chimiques propres :

Ainsi, dans le cas d'une pollution par l'acide fluorhydrique (HF), on observera une perturbation du métabolisme cellulaire du calcium (précipitation du calcium sous forme de CaF_2).

Dans le cas d'une pollution aux oxydes de soufre (SO_2…), les propriétés réductrices de ce gaz vont perturber le fonctionnement de l'appareil photosynthétique (dégradation de la chlorophylle)

De leur côté, les pluies acides sont à l'origine de carences minérales entrainant le jaunissement des feuilles suite au pluvio-lessivage des éléments minéraux Ca, K et Mg.

Face à ces stress, la stratégie classique de défense de la plante vise à limiter l'absorption du polluant et augmenter sa tolérance à celui-ci. Elle consiste à mettre en œuvre :

des processus physiques : fermeture des stomates, chute de feuilles… ;

des processus chimiques et biochimiques.

Ces facteurs chimiques et biochimiques correspondent à :

la fabrication de précipités insolubles (formation de CaF_2 dans le cas d'une pollution par le fluor) ;

la détoxification par l'émission de forme réduite du polluant (H_2S dans le cas d'une pollution par SO_2, NH_3 dans le cas d'une pollution par les NOx) ;

des dégradations enzymatiques par les cytochromes P450 et par un certain nombre d'enzymes antioxydantes [8],[9]. Des composés antioxydants non enzymatiques comme le glutathion, les vitamines E et C et les caroténoïdes peuvent aussi intervenir.

Lors de l'installation d'un 'stress pollution', la plante va donc mettre en place (plus ou moins rapidement) des processus qui viendront s'ajouter au pool de processus de défense déjà présent dans la plante. Suite à l'agression, la résistance de la plante au polluant résultera de la combinaison de ces divers processus. C'est pour cette raison qu'il existe une échelle spécifique de sensibilité des plantes pour chaque polluant et pour chaque plante.

Dégâts visibles et invisibles. Lors de faibles pollutions et/ou lorsque les systèmes de défense de la plante sont suffisants pour limiter l'impact physiologique d'un polluant, cette résistance a tout de même un coût physiologique, qui se caractérise par des diminutions de taille, des baisses de rendement… On parle alors de « dégâts invisibles ».

Lors de fortes pollutions et/ou lorsque les systèmes de défense de la plante ne sont pas suffisants, des dommages irréversibles apparaissent comme des morts cellulaires (les nécroses foliaires entre autres). On parle alors de « dégâts visibles » liés à la pollution atmosphérique

La plante réagit en fonction des conditions environnementales. La plante, comme tous les systèmes biologiques, est sensible en même temps aux facteurs abiotiques (température, humidité, lumière…) et aux facteurs biotiques (âge, maladies, génotypes…) de son environnement. Si les maladies ont un impact négatif, d'autres facteurs peuvent avoir des répercussions positives sur la réponse de la plante à la pollution atmosphérique. Ainsi, la sécheresse conduit à la fermeture des stomates, ce qui protège la plante, tandis que l'augmentation du CO_2 favorise la photosynthèse. L'évolution journalière de la pollution atmosphérique va aussi se répercuter sur la réponse des plantes. C'est ce que montrent les observations de terrains :

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

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

Par contre, au niveau des forêts de plaine, la pollution de l'air se caractérise par des concentrations moyennes d'ozone avec cette fois de fortes variations jour-nuit. Comme parallèlement dans ces zones l'humidité de l'air est plus faible, l'ouverture des stomates sera moins importante : pour ces deux raisons, on observe un plus faible impact de l'ozone.

2.3. La réponse dépend du polluant

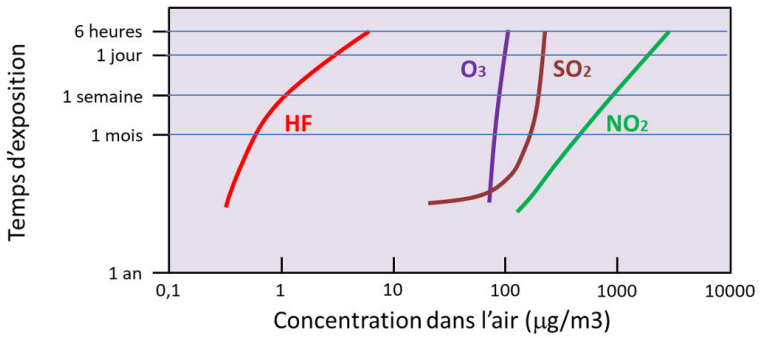


Figure 6. Apparition de nécroses foliaires sur la végétation en fonction de différents polluants atmosphériques. Concentrations seuils moyennes en fonction du temps d'exposition. [Source : © J.P. Garrec]

Selon leur nature chimique, les polluants sont plus ou moins phytotoxiques. Des expériences en laboratoire ont permis de classer les principaux polluants atmosphériques (à concentrations égales dans l'air) dans l'ordre suivant de phytotoxicité décroissante (Figure 6) :

Acide fluorhydrique (HF) > ozone (O_3) > dioxyde de soufre (SO_2) > dioxyde d'azote (NO_2)

Ce classement est seulement donné à titre indicatif car il existe toute une gamme de sensibilité des différentes plantes pour chaque polluant. Par exemple le tabac est très sensible à l'ozone mais peu touché par la pollution par le fluor.

En plus de la phytotoxicité du polluant, la réponse des plantes va dépendre de la dose reçue (concentration x temps). La dose est souvent calculée à partir des concentrations en polluant présentes dans l'atmosphère. C'est le calcul des flux de polluants qui ont réellement pénétré dans les organes foliaires [10] qui donne les meilleures informations sur les relations pollution-dégâts dans la végétation.

Enfin, à doses égales, l'impact du polluant est d'autant plus important que le temps d'application est court. On explique généralement cet « effet pic » par le fait que, sur de courtes périodes, la plante n'a pas le temps de mettre en route ses systèmes de défense.

3. Symptomatologie

La symptomatologie consiste à étudier les signes ou les manifestations (symptômes) exprimés par les plantes en réponse aux perturbations physiologiques induites par les polluants atmosphériques.

Cette symptomatologie est importante car elle peut être utilisée comme méthode de bio-surveillance végétale de la qualité de l'air

[11]. Cette méthode originale permet de détecter et d'estimer les niveaux de polluants atmosphériques uniquement à partir de l'étude des perturbations visibles (par observation des nécroses) ou invisibles (par des analyses biochimiques) qu'ils entrainent sur les végétaux.

Les polluants présents autour des plantes étant très nombreux, il est intéressant de les classer, pour les observations en symptomatologie, selon l'étendue de leur zone d'impact : locale, régionale ou globale.

3.1. Symptomatologie des polluants locaux

Les polluants locaux vont avoir, au niveau des végétaux, des impacts sur tout au plus quelques dizaines de kilomètres autour de leurs sources d'émission.

Il s'agit principalement des composés azotés directement émis par les sources de pollution (polluants primaires), essentiellement les NOx (issus des transports) et le NH_3 (issu de l'agriculture et des transports)

Ces composés azotés sont des polluants paradoxaux. Ils sont peu phytotoxiques mais avec cependant un fort impact sur la végétation :

ils ont un effet bénéfique fertilisant en favorisant la croissance dans un premier temps ;

mais ils ont un impact négatif à la longue en entrainant l'eutrophisation des écosystèmes [12], des carences minérales, des effets sur la biodiversité (les plantes nitrophiles sont favorisées) ainsi qu'une diminution de la résistance aux différents stress.

Les autres polluants locaux présents dans l'air sont les dépôts particulaires. Il faut rappeler que la grande majorité des sources de pollution atmosphérique sont à la fois émettrices de gaz et de poussières (particules). Les dépôts particulaires sont composés d'une fraction inorganique (métaux lourds), mais également d'une fraction organique (HAP, etc…). Ils comprennent entre autre :

Des polluants liés aux transports. Ce sont des composés organiques comme les BTX (COV des gaz d'échappement), ou des composés inorganiques comme les platinoïdes : Pt, Rh, Pd (pots catalytiques), le titane (réacteurs des avions), etc.

Des polluants liés à l'agriculture suite au transfert dans l'air des produits phytosanitaires comme les pesticides (herbicides, fongicides, insecticides) lors des épandages.

Les émissions des usines d'incinération avec en particulier des composés organiques comme les dioxines, les furannes, les PCB, etc.

Tous ces différents polluants particulaires ont peu ou pas d'impact sur la végétation, mais ils entrainent la contamination des chaines alimentaires de l'homme et des animaux via les plantes.

Pour certains polluants locaux, l'impact peut être plus marqué. L'utilisation massive de produits lessiviels plus ou moins biodégradables rejetés en mer entraine une pollution de l'eau puis de l'air (à partir de la formation par les vents d'embruns chargés en détergents présents à la surface)[13]. Le dépôt de ces tensio-actifs sur les feuilles va alors favoriser la pénétration du

sel dans les plantes, entrainant par la suite leur dépérissement et leur mort. Des impacts de cette pollution particulière sont observables sur les lisières de certaines forêts littorales du pourtour méditerranéen.

3.2. Symptomatologie des polluants régionaux

Les polluants régionaux peuvent avoir des impacts sur plusieurs centaines de kilomètres autour de leurs sources d'émission.

Ils comprennent principalement les dépôts acides, avec essentiellement la présence de H_2SO_4 et de HNO_3 dans des dépôts humides ou solides. Ce sont des polluants secondaires car ils sont issus d'interactions entre des polluants primaires (SO_2, composés azotés) et l'ozone [14].



Figure 7. Impact de l'ozone sur les feuilles de tabac BEL W3. [Source : © J.P. Garrec]

Les dépôts acides ont de faibles impacts sur les végétaux : jaunissement des aiguilles et baisse de vitalité des arbres suite aux lessivages des ions qu'ils induisent. Par contre l'ozone est un gaz très phytotoxique par ses effets directs fortement oxydants sur les différents processus physiologiques de la plante (photosynthèse, respiration, etc...). C'est le polluant le plus préoccupant actuellement au niveau de la végétation et des écosystèmes car il entraine des pertes de rendement qui peuvent être de 5 à 10%, et l'apparition de nécroses foliaires (Figure 7) maintenant visibles dans les milieux naturels. Mais il a en plus des effets indirects sur la végétation car c'est un gaz à effet de serre lié aux perturbations climatiques.

On considère aujourd'hui que 90% des pertes de rendement liées à la pollution atmosphérique dans le monde végétal proviennent de l'ozone [15]. Il faut cependant relativiser cette observation pour la croissance de la végétation dans les écosystèmes anthropisés (grandes cultures, etc...) : les effets négatifs de l'ozone sont très souvent masqués par les effets positifs sur la photosynthèse de l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère (280 ppm avant l'ère industrielle contre plus de 400 ppm actuellement).

Suite à cet impact marquant de l'ozone sur la végétation et pour en détecter et en apprécier les effets, de nombreuses listes ont été établies indiquant la sensibilité à l'ozone des plantes présentes dans les différents milieux naturels ou anthropiques (forêts, prairies, grandes cultures, etc...), en fonction des zones climatiques rencontrées (Europe de l'ouest et Europe centrale, façade méditerranéenne de l'Europe, etc...) [16].

3.3. Symptomatologie des polluants globaux

Les polluants globaux ont des impacts au niveau de la planète.

Ils comprennent principalement le CO_2 qui est un polluant lié à l'utilisation massive de combustibles fossiles par les transports et l'industrie. Le CO_2 est un polluant paradoxal, qui va avoir des effets directs bénéfiques sur la croissance des végétaux via son rôle essentiel dans la photosynthèse. Mais parallèlement, il a des effets indirects nocifs pour les plantes via l'effet de serre et les perturbations climatiques qui en découlent

Parmi les autres polluants globaux on peut citer :

le méthane ou CH_4, gaz issu de la digestion des animaux herbivores, des milieux anaérobies comme les rizières ;

les CFC et HFC [17] (utilisés dans les réfrigérateurs ou comme solvants) ;

le N_2O (issu de l'utilisation massive des engrais en l'agriculture) ;

le bromure de méthyle [18] (utilisé comme désinfectant des sols en sériciculture).

Tous ces autres gaz ont uniquement un effet indirect sur la végétation via leurs rôles dans l'effet de serre. Ils sont également, à l'exception du CH_4, des gaz destructeurs de la couche d'ozone avec la possibilité d'un autre impact négatif sur les plantes suite à l'augmentation des flux d'UV-B solaire atteignant le sol.

4. Conséquences pour les écosystèmes naturels et anthropisés

4.1. Impacts sur les écosystèmes

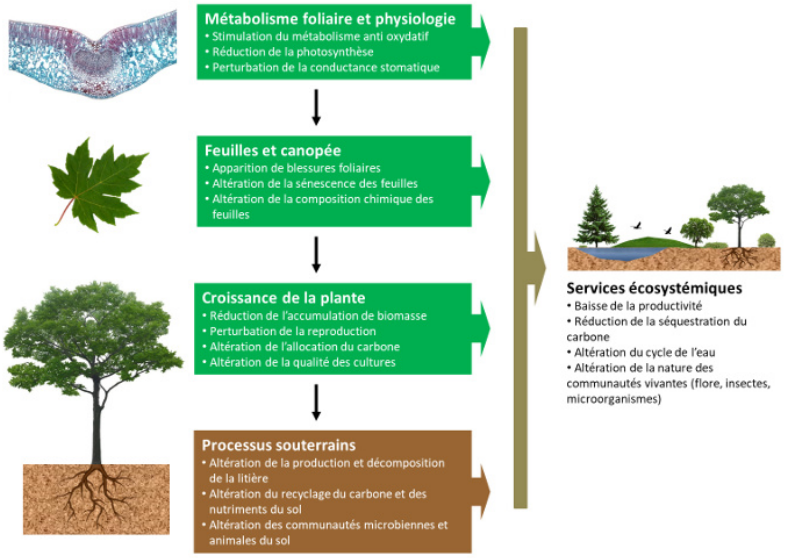


Figure 8. Effets de l'ozone sur la végétation : de la cellule végétale à l'écosystème. [Source : © J.P. Garrec]

Les végétaux constituent la base du fonctionnement de la plupart des écosystèmes terrestres et aquatiques. Les perturbations physiologiques des végétaux sous l'impact de la pollution atmosphérique vont alors provoquer des effets complexes et très variées sur ces différents écosystèmes (Figure 8). Par exemple les perturbations des communautés résultant des modifications de la compétition entre espèces suite à l'élimination des espèces sensibles, va se répercuter sur la biodiversité avec un appauvrissement de celle-ci dans la majorité des cas.

Si longtemps la pollution a été responsable d'effets toxiques aigus sur les écosystèmes avec des déséquilibres brusques de ceux-ci (mortalité massives de végétaux), de nos jours et dans nos régions se sont surtout les effets chroniques de la pollution de l'air sur les écosystèmes que l'on observe, avec des modifications progressives mais souvent aussi dangereuses à la longue.

Les conséquences de l'eutrophisation et l'acidification des milieux naturels sous les effets respectifs des retombées de composés azotés et des retombées acides, sont des exemples flagrants de ces altérations progressives de la composition des écosystèmes suite à l'impact de la pollution atmosphérique sur la végétation. De même l'ozone en accélérant le développement et le vieillissement de la végétation, et en réduisant le cycle végétatif va diminuer la croissance des espèces végétales dans les milieux naturels avec une répercussion lente sur l'équilibre des écosystèmes.

Au final, en remontant le long des chaines trophiques, ces perturbations lentes finissent par affecter l'ensemble de l'écosystème et entrainer des changements qui peuvent être très graves. Nous avons développé ci-dessous les conséquences qui en découlent dans le cadre d'un des maillons de ces chaines : les relations plantes-insectes.

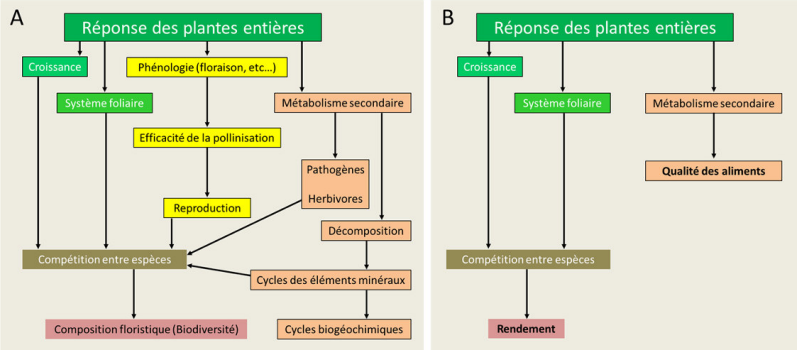


Figure 9. Représentation des conséquences pour les écosystèmes naturels (A) ou anthropisés (B) des effets de la pollution de l'air sur les végétaux.[Source : © J.P. Garrec]

Des pertes de rendement sont plus ou moins observables dans les écosystèmes anthropisés (grandes cultures de céréales et d'oléagineux, forêts de production). Par contre la biomasse n'est pas forcement réduite dans les écosystèmes naturels, car des espèces résistantes peuvent occuper les niches laissées vides. Ainsi, les résineux sont remplacés par des feuillus dans les zones soumises à une pollution fluorée. Cependant les communautés qui en résultent seront plus uniformes, avec souvent des écosystèmes moins stables et moins résistants face aux différents stress biotiques ou abiotiques qu'ils subissent. Dans la figure 9, nous avons représenté schématiquement les conséquences différentes des effets des polluants atmosphériques sur la végétation des écosystèmes naturels comparativement aux écosystèmes anthropisés.



Figure 10. Forêt de pins à Tramonto da Monte Sona (Etna, Sicile). [Source : © Photo Angelo Failla (CC BY-NC-SA 2.0), via Flickr]

Dans ces communautés, un certain nombre d'individus des populations sensibles disparaissent. Mais une action sélective peut se manifester également sur les individus ou les espèces les plus tolérantes qui survivent, aboutissant à la sélection d'un phénotype particulier. Par exemple sur les pentes de l'Etna, source en particulier d'une pollution de l'air par le fluor (HF), une forêt de pins est présente, malgré la grande sensibilité de cet arbre à ce polluant (Figure 10).

4.2. Impacts sur l'Homme

L'impact de la pollution atmosphérique sur les végétaux des écosystèmes naturels peut avoir des conséquences directes pour l'homme et sa santé essentiellement suite à la consommation des produits végétaux contaminés de ces écosystèmes (champignons, baies, fruits, etc...). Des conséquences indirectes pour l'homme suite à la dégradation des milieux sont aussi possibles : risques d'érosion ou d'éboulements, possibilités d'inondation et de modification du cycle de l'eau et des micro-climats avec la disparition du couvert végétal, sans oublier les effets esthétiques négatifs liés aux pertes de biodiversité comme à l'absence d'arbres par exemple.

Mais ce sont les impacts de la pollution atmosphérique sur les végétaux des écosystèmes anthropisés (ou agrosystèmes), résumés dans le tableau ci-dessous, qui vont concerner le plus directement l'homme et sa santé *via* la contamination de nombreuses chaines alimentaires.

Cible	Polluants principaux	Effets sur le végétal	Effets sur l'homme via le végétal	Remarques
Grandes cultures : céréales et oléagineux	Ozone	Oui Pertes de rendement (5 à 10%)	Non	Pertes masquées par la sélection et la fertilisation
Cultures légumières, fruitières et viticulture	Métaux lourds Composés organiques	Non	Oui Contamination des chaines alimentaires	
Prairies	Ozone	Oui Pertes de rendement (5 à 10%)	Non	Pertes masquées par l'augmentation du CO_2 et les dépôts azotés
Forêts de production	Ozone	Oui Pertes de rendement (5 à 10%)	Non	Pertes masquées par l'augmentation du CO_2 et les dépôts azotés

Tableau. Récapitulatif des effets des polluants sur les végétaux et leurs conséquences pour l'Homme.

5. Impacts sur les relations plantes-insectes

La végétation n'est pas seule dans son écosystème, et elle interagit sans arrêt avec tout son environnement. La pollution atmosphérique, en modifiant la physiologie et la biochimie des végétaux, va avoir un effet déterminant sur ces différentes interactions, et notamment sur les interactions plantes-insectes. Les trois paramètres clés des plantes qui régissent ces interactions - reconnaissance, qualités nutritives et systèmes de défenses- vont être touchés avec des conséquences plus ou moins importantes.

5.1. Perturbations de la localisation et de la reconnaissance des plantes par les insectes



Figure 11. Mélanisme industriel de la phalène du bouleau. Ce papillon nocturne passe la journée immobile sur les troncs de bouleau, invisible aux oiseaux prédateurs (A, forme blanche typica). La forme noire, carbonaria (B), est devenue majoritaire dans les zones polluées après la révolution industrielle au 19e siècle. [Source : © Olaf Leillinger ; License CC-BY-SA-2.5 & GNU FDL]

La pollution atmosphérique entraîne souvent une modification de la couleur des végétaux, ce qui influence fortement la couleur

des insectes associés. En Angleterre, dans les régions industrielles, la forte pollution atmosphérique a entraîné au XIX^{e} siècle la disparition des lichens et le noircissement des troncs de bouleaux. On a alors constaté que la phalène du bouleau (*Biston betularia*), papillon nocturne habituellement de couleur blanche tachetée de noir, se rencontrait majoritairement sous sa forme mutée, beaucoup plus sombre (Figure 11). Cela est expliqué par le fait que les papillons sombres, plus difficiles à repérer, étaient mieux protégés contre la prédation des oiseaux que les individus clairs (Lire L'adaptation des organismes à leur environnement). Le même phénomène a été observé à Paris dans les années 1980 chez le bombyx de l'ailante (*Samias cynthia*), qui a spectaculairement évolué du beige clair au marron très foncé pour s'adapter à son environnement, suite à la pollution qui noircissait sa plante nourricière.

La pollution atmosphérique perturbe aussi la communication chimique entre plantes et insectes. En agissant indirectement sur les substances chimiques de communication (médiateurs chimiques), certains polluants comme l'ozone perturbent les relations plantes-insectes (reconnaissance des lieux de ponte par exemple) :

via leurs effets physiologiques sur les plantes, par exemple sur l'émission des terpènes limitée par la fermeture des stomates ;

en dégradant ou modifiant la composition physico-chimique des médiateurs chimiques, les rendant inopérants.

Enfin, la pollution atmosphérique entraîne également des modifications de la reconnaissance foliaire chez les insectes. Des polluants comme l'ozone ou le CO_2, en favorisant la production de cires cuticulaires et en modifiant de ce fait les caractéristiques physico-chimiques des surfaces foliaires (Lire Focus Cuticule des plantes), ont des répercussions sur la reconnaissance de celles-ci par les insectes.

5.2. Modifications des ressources nutritionnelles des plantes pour les insectes

La pollution atmosphérique induit la présence d'éléments extérieurs dans ou sur les végétaux pouvant avoir des conséquences graves sur les insectes associés. Les fortes accumulations dans les organes végétaux de polluants atmosphériques toxiques comme les métaux lourds, l'arsenic, le fluor, certains produits phytosanitaires sont souvent à l'origine d'une intoxication et d'une mortalité plus ou moins importante des insectes phytophages (chez les insectes de type broyeurs et les « piqueurs-suceurs ») et des insectes pollinisateurs (abeilles…).

Dans les plantes, la pollution atmosphérique -comme de nombreux autres stress- entraîne des changements qualitatifs et quantitatifs des métabolites primaires et secondaires. On observe souvent une augmentation des concentrations en acides aminés (proline), en protéines solubles et en sucres dans les feuilles, augmentant leur qualité nutritive pour certains insectes.

Signalons également l'effet positif pour les insectes des polluants comme SO_2 et NOx qui augmentent les concentrations en soufre et en azote dans les plantes et améliorent les qualités nutritionnelles de celles-ci. Cela se vérifie en particulier sur les végétaux des bords de routes et d'autoroutes, importantes sources de NOx. Mais à l'inverse, la pollution CO_2 souvent présente avec les NOx entraîne une diminution des concentrations d'azote dans les feuilles suite à la modification du rapport Carbone/Azote.

5.3. Altérations des systèmes de défenses chimiques et physiques des plantes vis-à-vis des insectes

Les composés phénoliques et la cuticule foliaire, qui constituent respectivement un système de défense chimique et une barrière de défense physique des plantes, sont susceptibles d'être modifiés par les polluants :

L'ozone et le CO_2, comme de nombreux autres polluants atmosphériques induisant un stress oxydatif, augmentent les concentrations en composés phénoliques dans les plantes, diminuant ainsi les qualités nutritionnelle et gustative des feuilles pour les insectes.

Parallèlement, en favorisant la production des cires cuticulaires, l'ozone comme le CO_2 améliorent les caractéristiques de la barrière physique que représente la cuticule (Lire Focus *Cuticule des plantes*).

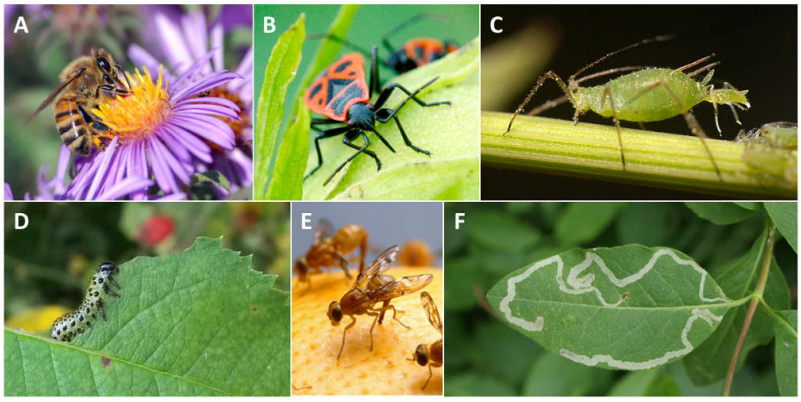


Figure 12. Quelques exemples d'interactions trophiques plantes-insectes. A, abeille butinant une fleur (Photo © John Severns, [Public domain], via Wikimedia Commons) ; B. gendarme se nourrissant du fruit d'un hibiscus (Photo © Calimo (Own work) [CC BY-SA 3.0], via Wikimedia Commons) ; C, puceron (Photo MedievalRich [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons) ; D, chenille se nourrissant d'une feuille (Photo Daniel Mietchen (Own work) [CC0], via Wikimedia Commons) ; E, Mouche mexicaine sur un fruit de pamplemousse (Photo Jack Dykinga, USDA, Bugwood.org, [CC BY 3.0], via Wikimedia Commons) ; F, Mineuse de feuille de lonicera (Photo Kenraiz Krzysztof Ziarnek (Own work) [CC BY-SA 4.0-3.0-2.5-2.0-1.0], via Wikimedia Commons).

Ainsi, dans de nombreux exemples, l'impact des polluants atmosphériques sur les plantes augmente à la fois les qualités nutritives et les qualités défensives de celles-ci. Les modifications positives ou négatives des relations plantes-insectes qui en découlent vont donc dépendre de la conjugaison de ces deux effets contradictoires vis-à-vis de l'insecte. Cependant, comme ces relations vont aussi dépendre du mode d'alimentation de l'insecte (broyeur, suceur, mineuse, Figure 12), il est difficile de définir un modèle universel. Toutefois, *in situ*, c'est une augmentation des populations d'insectes sur les plantes que l'on observe le plus généralement dans les régions polluées.

6. Messages à retenir

Les polluants atmosphériques gazeux pénètrent dans les plantes par l'intermédiaire des stomates des feuilles alors que les polluants particulaires sont captés par le micro-relief des surfaces foliaires.

La phytotoxicité des polluants atmosphériques dépend de leur nature chimique.

Les polluants induisent un stress oxydatif dans la plante avec production de radicaux libres (radicaux hydroxyles) et de dérivés réactifs de l'oxygène (DRO) qui provoquent des dégâts dans la feuille.

La plante met en œuvre des processus tels que la fermeture des stomates pour limiter l'absorption du polluant.

Certains facteurs externes peuvent avoir des répercussions positives sur la réponse de la plante à la pollution atmosphérique. Ainsi, la sécheresse conduit à la fermeture des stomates, ce qui protège la plante.

La pollution atmosphérique, en modifiant la physiologie et la biochimie des végétaux, a un effet déterminant sur les écosystèmes, et notamment sur les interactions plantes-insectes.

Les composés azotés sont peu phytotoxiques mais ont un fort impact sur la végétation : un effet bénéfique fertilisant dans un premier temps et un impact négatif à la longue en entrainant l'eutrophisation des écosystèmes.

90% des pertes de rendement dues à la pollution atmosphérique dans le monde végétal proviennent de l'ozone.

Si les différents polluants particulaires ont peu ou pas d'impact sur la végétation, ils entrainent la contamination des chaines alimentaires de l'homme et des animaux via les plantes qui sont consommées.

La pollution atmosphérique modifie les qualités nutritives des plantes utilisées par les insectes phytophages.

Les systèmes de défenses des plantes vis-à-vis des insectes sont altérés par la pollution atmosphérique.

Références et notes

Photo de couverture. Feuille de tabac nécrosée sous l'action de l'ozone. [Source : © J.P. Garrec]

[1] Dans le cas de la pollution atmosphérique, on parle de l'ozone troposphérique, polluant secondaire formé dans les couches basses de l'atmosphère, près de la surface de la terre. Cet ozone est à distinguer de l'ozone retrouvé à assez haute concentration dans la stratosphère terrestre, essentiellement à une altitude comprise entre 15 et 20 km. En absorbant près de 97% les rayons ultraviolets provenant du soleil, l'ozone stratosphérique forme une couche qui protège les organismes vivants des dangers des radiations UV.

[2] https://www.airparif.asso.fr/pollution/effets-de-la-pollution-batiment

[3] A noter que les NOx et NH_3 produisent des PM par conversion directe gaz-solide, par nucléation avec les gouttes d'eau, et aussi par réaction de NH_3 sur les NOx pour former du nitrate d'ammonium.

[4] Misztal, P.K., Hewitt, C.N., Wildt, J., Blande, J.D., Eller, A.S.D., Fares, S., … Goldstein, A.H. (2015). *Atmospheric benzenoid emissions from plants rival those from fossil fuels.* Scientific Reports, 5, 12064. http://doi.org/10.1038/srep12064

[5] Ce sont d'une part des émissions naturelles (H_2O, CO_2, terpènes, isoprènes), d'autre part des émissions liées aux stress (éthylène) et enfin des émissions provenant de la réduction biologique des polluants : H_2S formé à partir du SO_2, NH_3 formé à partir des NOx.

[6] C'est le cas de la réaction entre l'ozone et des constituants des cires épicuticulaires (hydrocarbures insaturés) qui produit des ozonides et des hydroxyhydropéroxides (HHP), et de la réaction $O_3 + C_2H_4$ qui entraine la formation d'hydroxyméthyl hydropéroxide (HMHP).

[7] Baier M., Kandlbinder A. Golldack D. & Dietz K.J. (2005) *Oxidative stress and ozone: perception, signalling and response*. Plant, Cell & Environment, 28(8), 1012–1020.

[8] Par exemple les enzymes superoxyde dismutases, des catalases ou l'ascorbate peroxydase.

[9] Foyer CH, Noctor G. (2005) *Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses.* Plant Cell. 17, 1866-1875.

[10] En tenant compte des résistances à la diffusion que constituent la couche limite et les stomates.

[11] Garrec J.P. & Van Haluwyn C. (2002) *Biosurveillance végétale de la qualité de l'air. Concepts, méthodes et applications.* Editions Tec et Doc Lavoisier, Paris, 118 pages.

[12] À l'heure actuelle, l'eutrophisation causée par les dépôts atmosphériques d'azote est l'impact le plus important de la pollution de l'air sur les écosystèmes et la biodiversité. *Eutrophication of terrestrial ecosystems due to air pollution*. Annual Indicator Report Series (AIRS), In support to the monitoring of the 7th Environment Action Programme. En date du 30 Novembre 2017 ; Jones L., et al. (2014) *A review and application of the evidence for nitrogen impacts on ecosystem services*. Ecosystem Services, 7, 76-88, ISSN 2212-0416.

[13] Garrec J.P., Sigoillot I.E. (1992) *Les arbres malades de la mer*. La Recherche, 245, 940-941.

[14] L'ozone est également un polluant secondaire issu de réactions complexes sous l'action du soleil entre différents polluants gazeux émis -en particulier- par les transports : COV, NOx.

[15] Holland M., Kinghorn S., Emberson L., Cinderby S., Ashmore M., Mills G., Harmens H. (2006) *Ozone and Crop Losses 2006* (ICP Vegetation Report for Defra Contract EPG 1/3/205).

[16] Voir les rapports de ICP vegetation ; Mills G., Hayes F., Jones M.L.M. & Cinderby S. (2007). *Identifying ozone-sensitive communities of (semi-) natural vegetation suitable for mapping exceedance of critical levels.* Environmental Pollution 146: 736-743.

[17] En 1987 à Montréal, les principaux pays producteurs de CFC ont décidé d'en stopper la production. En Europe, les CFC ne peuvent plus être mis sur le marché depuis 2000 et doivent être impérativement récupérés et détruits depuis 2002. Pour remplacer les CFC, les industriels ont alors adopté les HFC, dont l'usage a été généralisé, mais qui ont eux aussi un impact

environnemental. La fin de l'utilisation des HFC a été actée dans un accord signé à Kigali (Ruanda) en 2016.

[18] Le bromure de méthyle est une des substances visées par le protocole de Montréal (1987). La production et la mise sur le marché du bromure de méthyle sont interdites depuis 2005 sauf dérogations pour des utilisations strictement réglementées.

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur :** GARREC Jean-Pierre (2019), Quel est l'impact des polluants de l'air sur la végétation ?, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=4956

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.
