

DÉPOLLUTION VERTE

Utiliser les végétaux
pour réhabiliter les milieux contaminés

Domenico Morabito, Sylvain Bourgerie,
Manhattan Lebrun, Didier Le Thiec, coord.



Dépollution verte

Utiliser les végétaux pour réhabiliter
les milieux contaminés

Domenico Morabito, Sylvain Bourgerie,
Manhattan Lebrun, Didier Le Thiec, coord.

Éditions Quæ

Collection Synthèses

*Des contrats dans les filières agricoles,
forêt-bois et halieutiques*

*Dialogue entre le droit, l'économie
et la sociologie*

Magrini M.-B., Aubin-Brouté R.-J.,
Bouamra-Mechemache Z., Marty G.,
Vignes A., coord.
2025, 232 p.

*Agriculture et changement climatique
Impacts, adaptation et atténuation*

Debaeke P., Graveline N., Lacor B.,
Pellerin S., Renaudeau D.,
Sauquet E., coord.
2025, 398 p.

*Invasion et expansion
d'insectes bioagresseurs forestiers
Quels risques pour la forêt française
dans le contexte
des changements globaux ?*

Robinet C., Saintonge F.-X., Tassus X.,
Brault S., coord.
2025, 312 p.

*Les mycotoxines
Connaissances actuelles
et futurs enjeux*

Oswald I., Forget F., Puel O., coord.
2024, 272 p.

Pour citer cet ouvrage :

Morabito D., Bourgerie S., Lebrun M., Le Thiec D., 2025. *Dépollution verte. Utiliser les végétaux pour réhabiliter les milieux contaminés*, Versailles, éditions Quæ, 158 p.
<https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4182-8>

Photo de couverture : Ancienne zone humide du lac bleu, district métallifère de Pontgibaud,
site de la mine de Roure-les-Rosiers, Saint-Pierre-le-Chastel (63);
présence de résidus d'extraction de minerais de plomb-argentifère. © Domenico Morabito

Les éditions Quæ réalisent une évaluation scientifique des manuscrits avant publication
(<https://www.quae.com/store/page/199/processus-d-evaluation>).

La procédure d'évaluation est décrite dans Prism
(<https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/25780>).

Le processus éditorial s'appuie également sur un logiciel de détection des similitudes
et des textes potentiellement générés par IA.

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles Cedex
www.quae.com – www.quae-open.com

© Éditions Quæ, 2025

ISBN (papier) : 978-2-7592-4181-1
ISBN (ePub) : 978-2-7592-4183-5

ISBN (PDF) : 978-2-7592-4182-8
ISSN : 1777-4624

Sommaire

Introduction	7
---------------------------	---

PARTIE I

ÉTAT DE LA POLLUTION ET POSSIBILITÉS DE REMÉDIATION BIOLOGIQUE

Chapitre 1. Sources et évolution de la pollution : air, sol, eau et concept de phytoremédiation	11
<i>Didier Le Thiec, Jean-Louis Morel</i>	
Identification des différentes sources de pollution	12
Effets de cette pollution sur l'environnement	17
Remédiation, phytoremédiation et solutions fondées sur la nature	19
Références bibliographiques	22

Chapitre 2. La remédiation biologique des compartiments pollués : méthodes et applications	24
<i>Sylvain Bourgerie, Domenico Morabito, Manhattan Lebrun</i>	
La phytoremédiation	25
La bioremédiation	29
Les facteurs influençant la réussite de la remédiation biologique	30
Les avantages et les inconvénients de la remédiation biologique	31
Conclusion	32
Références bibliographiques	32

PARTIE II

DÉPOLLUTION BIOLOGIQUE DE L'AIR, DES EAUX ET DES EFFLUENTS

Chapitre 3. Capture des polluants atmosphériques par les cultures : mécanismes et conséquences	37
<i>Jean-François Castell</i>	
Mécanismes de transfert et de capture	38
Utilisation des cultures pour la dépollution de l'air	41
Conclusion	44
Références bibliographiques	45

**Chapitre 4. Potentialités et limites de la dépollution de l'air
par les structures végétalisées urbaines.....47**
Juliette Leymarie, Jean-François Castell

Potentialités de dépollution de l'air aux échelles de la petite région urbaine
et des parcs urbains47

Effets ponctuels : petites surfaces végétalisées, organisation spatiale, arbres isolés.....48

Caractéristiques du végétal influençant la capture de polluants50

Capacité des structures végétalisées pour la dépollution de l'air52

Conclusion.....54

Références bibliographiques54

**Chapitre 5. Aménagements paysagers pour réduire les transferts
de contaminants d'origine agricole vers le milieu aquatique58**
Julien Tournebize, Cédric Chaumont

Stratégie d'interception des eaux de drainage59

Performance des ZTHA sur l'ion nitrate.....61

Performance de la ZTHA pour les pesticides65

Conclusion.....68

Références bibliographiques68

PARTIE III
RÉHABILITATION ET VALORISATION DES SOLS POLLUÉS :
APPROCHES VÉGÉTALES ET MICROBIENNES

**Chapitre 6. Pollution des sites miniers ou industriels
et stratégie de phytostabilisation aidée.....73**
Sylvain Burgerie, Domenico Morabito, Manhattan Lebrun

Mécanismes développés par les plantes qui influencent la mobilité des ETM73

Les amendements en tant que stabilisateurs des ETM75

Mécanismes développés par les microorganismes.....78

Conclusion.....80

Références bibliographiques81

**Chapitre 7. Pollution des sols par les hydrocarbures,
biodégradation microbienne et rôle des plantes.....84**
Aurélié Cébron, Thierry Beguiristain, Marc Crampon, Marie-Paule Norini, Pierre Leglize

Métabolismes microbiens de biodégradation des hydrocarbures
et application en bioremédiation.....85

Rôle des plantes dans la dynamique des hydrocarbures.....87

Optimisation de la phytoremédiation88

Challenge de la phytoremédiation *in situ*90

Conclusion.....91

Références bibliographiques92

Chapitre 8. Le phytomanagement : une solution fondée sur la nature pour réhabiliter les sols pollués..... 95

Yoann Boisson, Lisa Ciadamidaro, Michel Chalot

Stratégies de phytomanagement pour la réhabilitation des sols pollués par les éléments-traces.....	96
Phytoremédiation assistée par les microorganismes.....	100
Valorisation économique de la biomasse produite.....	101
Conclusion.....	103
Références bibliographiques	104

Chapitre 9. Phytomanagement pour la gestion de la pollution des sols nourriciers en contexte agricole et urbain..... 107

Thierry Lebeau

Origine des contaminations des sols nourriciers en contexte rural et urbain.....	108
Gestion des sols nourriciers pollués	109
Application du phytomanagement au cas des sols agricoles.....	112
Conclusion.....	118
Références bibliographiques	118

Chapitre 10. Récolter des métaux avec l'agromine..... 123

Jean-Louis Morel, Marie-Odile Simonnot, Yetao Tang, Guillaume Echevarria,

Wenshen Liu, Baptiste Laubie

Qu'est-ce que l'agromine ?	124
L'agromine du nickel	125
L'agromine des terres rares.....	128
Conclusion.....	129
Références bibliographiques	130

PARTIE IV

FAISABILITÉ ÉCONOMIQUE ET ACCEPTABILITÉ SOCIALE DES STRATÉGIES DE REMÉDIATION

Chapitre 11. La difficile économie de la remédiation des sols..... 133

Xavier Galiégue

La remédiation des sols : quel préjudice ?	134
La remédiation des sols : quelle action de remédiation ?	137
Quel critère de remédiation ? Le jeu complexe des acteurs.....	139
Conclusion.....	141
Références bibliographiques	141

Chapitre 12. Les freins sociaux à l'instauration du phytomanagement..... 143

Valérie Bert, Hervé Flanquart

Qu'est-ce que l'acceptabilité sociale ?	143
Quelle acceptabilité pour les phytotechnologies ?	144

Quelle acceptabilité pour les phytomasses provenant des phytotechnologies ?..... 148

Conclusion..... 150

Références bibliographiques 150

Conclusion générale..... 153

Liste des abréviations..... 155

Liste des auteurs..... 157

Introduction

La pollution des sols, de l'air et de l'eau, conséquence de l'industrialisation et de l'augmentation de la population, et ses effets sur la santé humaine et l'environnement suscitent aujourd'hui une prise de conscience croissante à l'échelle mondiale. Cette problématique a fait l'objet de nombreuses études scientifiques et de conférences initiées avec le soutien d'organismes internationaux qui agissent pour la défense de la santé et de l'environnement. Ainsi, un état des lieux des pollutions induites par l'ensemble de nos activités, qui pour la plupart sont essentielles à notre mode de vie, est actuellement dressé. Cela doit permettre de rechercher et d'apporter des solutions concrètes et spécifiques à mettre en place pour en limiter les impacts. Mais les fortes pressions que nous continuons à exercer sur les composantes de notre planète font peser de lourdes menaces sur l'environnement et la santé publique si aucune action n'est entreprise.

En effet, la croissance démographique à l'échelle mondiale s'accompagne d'une augmentation de la demande en minerais, produits agricoles, fibres et carburants. Cette intensification affecte les équilibres physiques, chimiques et biologiques, et impacte à la fois notre santé, la biodiversité et les services écosystémiques. Ainsi, la pollution de l'atmosphère serait responsable à elle seule, chaque année, de 6,7 millions de décès prématurés dans le monde. Il est donc essentiel de prendre conscience de cette situation et d'engager des actions de remédiation de ces compartiments pollués afin de mettre en place une gestion raisonnée de l'utilisation de nos ressources et de préserver un équilibre écologique déjà fragile et aujourd'hui menacé. Les impacts de ces pollutions sont multiples : dérèglement climatique à l'échelle mondiale, perte importante des fonctions écologiques des sols et dégradation de la qualité et de la disponibilité des ressources en eau.

Cette pollution est à corréler, depuis le début de l'ère industrielle, avec une gestion inadéquate des sols et des compartiments associés. Les activités humaines, notamment l'industrialisation massive qu'a connue notre société, ont produit des zones marginales dégradées. Ces activités ont induit la mise en place de déséquilibres, marqués par l'accumulation de composés organiques ou minéraux dans l'atmosphère, dans les sols, dans les eaux superficielles ou souterraines.

Bien que des origines naturelles de pollutions existent, telles que les éruptions volcaniques, dans la majorité des cas, les concentrations élevées en composés polluants dépassant les seuils de tolérance sont très souvent le résultat des activités anthropiques, et entraînent une perte des fonctions originelles des milieux.

Dans certains cas, les sols dégradés peuvent recouvrer leurs fonctions écologiques essentielles et contribuer de nouveau aux services écosystémiques, à condition de mettre en œuvre des stratégies de remédiations efficaces. Ces stratégies visent à réduire ou éliminer les pollutions et à mettre en place un nouvel équilibre favorable à une reprise significative de la vie biologique.

Parmi les approches émergentes, les solutions dites «fondées sur la nature», qui utilisent des végétaux (aussi appelées «phytotechnologies») et des microorganismes, sont de plus en plus privilégiées pour assainir les milieux pollués. Ces solutions, plus économiques et moins agressives que les techniques physico-chimiques classiques, rencontrent une forte acceptabilité sociétale.

Cet ouvrage a pour ambition de présenter ces stratégies biologiques de dépollution en s'appuyant sur des recherches récentes. Il met en lumière des techniques alternatives aux solutions conventionnelles, conciliant efficacité environnementale et durabilité.

La partie I est consacrée à l'inventaire des sources de pollutions présentes dans les différents compartiments de l'environnement, leurs modes de diffusion, les mécanismes de toxicité ainsi que les solutions basées sur la phytoremédiation.

La partie II aborde les principaux polluants que l'on peut identifier dans l'air, dans les milieux aquatiques et dans les eaux de ruissellement. Elle explore les aménagements végétalisés capables de capter les particules fines et les gaz nocifs et met en avant les aménagements paysagers destinés à piéger et limiter les pollutions dues aux nitrates, aux pesticides et aux métaux.

La partie III détaille les différentes stratégies de phytoremédiation associant végétaux et microorganismes pour diminuer la pollution des sols, notamment en contexte agricole et industriel. Quand cela est possible, la valorisation des biomasses produites est proposée en phytomanagement et en agromine.

Enfin, la partie IV développe les dimensions socio-économiques de ces approches, ce qui vient compléter les explications techniques de l'utilisation de végétaux pour limiter les effets négatifs des pollutions, en évaluant les coûts, les bénéfices et les freins à leur mise en œuvre.

Cet ouvrage illustre ainsi les possibilités offertes par la phytoremédiation pour limiter les effets néfastes de décennies d'activités économiques mal maîtrisées. Il propose des pistes pour une gestion écologique, raisonnée et respectueuse afin de réconcilier société et environnement. Ces approches écologiques non agressives permettent également de retrouver les services écosystémiques rendus notamment par les sols.

Les auteurs ayant contribué à cet ouvrage représentent un large spectre des chercheurs français investis dans le domaine de la gestion écologique des pollutions. Toutefois, pour des raisons éditoriales, il n'a pas été possible d'associer à ce travail tous les collègues actifs dans ce domaine, bien que leurs travaux soient tout aussi essentiels.

Nous souhaitons que cet ouvrage contribue à une meilleure information et à la valorisation de nouvelles approches de dépollution de notre environnement, fondées sur l'utilisation durable du végétal.

Partie I

État de la pollution et possibilités de remédiation biologique

Chapitre 1

Sources et évolution de la pollution : air, sol, eau et concept de phytoremédiation

Didier Le Thiec, Jean-Louis Morel

La révolution industrielle au xix^{e} siècle marque un tournant décisif dans l'histoire de la pollution en Europe, dont la France. En effet, au début de ce siècle, la France connaît un essor économique important, avec le passage d'une économie essentiellement agraire à une production de biens manufacturés à grande échelle. C'est le début de la pollution de grande ampleur, notamment de l'atmosphère. Le développement des industries, particulièrement dans les grandes villes, et la combustion massive de charbon – pour alimenter les usines et les chauffages domestiques – provoquent une forte pollution atmosphérique. À la fin du xix^{e} siècle et au début du xx^{e} siècle, le pays connaît une deuxième révolution industrielle avec l'utilisation de nouvelles sources d'énergie : électricité, gaz, pétrole. Dans le même temps, la chimie se développe (ex. : engrais azotés) avec une accentuation de la pollution des sols et des eaux de surface et souterraines, notamment par les rejets des usines et des eaux usées non traitées. Les villes et les zones rurales se développent sans gestion adéquate des déchets, créant des problèmes sanitaires et environnementaux. Au cours du xx^{e} siècle, des lois et des dispositifs seront mis en place pour réduire les sources de pollution.

En 2022, Fuller *et al.* ont effectué un bilan sur les effets de différentes pollutions sur la santé humaine au niveau mondial. La pollution engendre chaque année plus de 9 millions de morts, dont 6,5 millions sont attribuables à la pollution de l'air et 1,8 million au plomb (Pb) et autres produits chimiques. Les polluants, quels qu'ils soient, affectent les écosystèmes avec des conséquences néfastes sur la biodiversité, l'état de santé des organismes vivants, animaux ou végétaux, la qualité des eaux (de surface, souterraines ou océaniques) ainsi que la qualité et la fertilité des sols. Les interactions à l'intérieur de ces écosystèmes peuvent aussi être perturbées de façon complexe.

Ce chapitre traitera, dans un premier temps, des différentes sources de pollution, puis nous montrerons l'évolution de cette pollution au cours du temps et l'état actuel des différents polluants majeurs en France. Nous présenterons ensuite les effets de cette pollution sur l'environnement et nous aborderons finalement la remédiation et la phytoremédiation.

► Identification des différentes sources de pollution

Il existe deux catégories de pollution : la première est dite « ponctuelle », car elle est souvent localisée géographiquement dans l'espace et ses produits sont émis directement dans l'écosystème ; la seconde est dite « diffuse », car les substances sont rejetées de façon spatio-temporelle, par exemple les pesticides épandus dans les grandes cultures peuvent polluer les sols, les nappes phréatiques, les rivières, et avoir des impacts sur des écosystèmes éloignés de la source de pollution.

Pollution atmosphérique

Les polluants dans l'atmosphère peuvent être d'origine naturelle – ils sont alors émis par la végétation, l'érosion des sols, les volcans, les incendies de forêt, etc. – ou d'origine anthropique. Dans la troposphère, les polluants observés proviennent directement de ces sources (polluants primaires), mais peuvent également résulter de réactions physico-chimiques entre composants chimiques (polluants secondaires) dépendantes des conditions météorologiques (ex. : l'ozone, ou O_3 , en été, les particules et le dioxyde d'azote, ou NO_2 , en hiver et au printemps).

Tous les secteurs d'activité sont susceptibles d'émettre des polluants atmosphériques : voici un aperçu des principales sources de pollution. Il est à rappeler que les limites sont régies par la réglementation, elles sont le fruit de la mise en place de normes ISO ou CEN (Comité européen de normalisation)¹.

- Le transport routier : c'est l'une des principales sources de pollution, surtout dans les zones urbaines, notamment avec les émissions de NO_2 , de dioxyde de carbone (CO_2) et de particules fines (PM_{10} , $PM_{2,5}$ et $PM_{1,0}$). Les véhicules diesel, en particulier, sont souvent pointés du doigt.

- Les transports aériens et maritimes : ils contribuent également à la pollution atmosphérique, bien que dans une moindre mesure par rapport aux transports terrestres, avec l'émission de CO_2 et des oxydes d'azote (NO_x). Les navires sont une source importante de pollution dans les zones portuaires, émettant du dioxyde de soufre (SO_2) et des particules fines.

- Les activités industrielles : elles génèrent une grande quantité de polluants, notamment les particules, les composés organiques volatils (COV) et le SO_2 . Les secteurs tels que l'énergie, la chimie, la cimenterie et la métallurgie sont particulièrement concernés.

- Les activités de production d'énergie : la production d'électricité, surtout à partir de sources fossiles comme le charbon et le gaz naturel, émet des gaz à effet de serre et des polluants atmosphériques de toutes sortes.

- Les activités agricoles et sylvicoles : l'utilisation d'engrais azotés, et de pesticides en particulier, contribuent à la pollution de l'air et à la pollution des sols et des eaux. Les émissions de méthane (CH_4) et de protoxyde d'azote (N_2O) sont significatives dans ce secteur, notamment celui de l'élevage de ruminants.

- Le secteur résidentiel avec l'habitat et les constructions : la rénovation des bâtiments ainsi que l'utilisation de combustibles fossiles pour le chauffage sont des sources de polluants tels que le monoxyde de carbone (CO) et les particules.

1. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/01_Tableau-Normes-Seuils%20r%C3%A9glementaires.pdf; https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/rapport_lcsqa_2014_normreg_vf.pdf

Produits de nettoyage, peintures et solvants libèrent des COV qui contribuent à la pollution de l'air intérieur et extérieur.

– Les déchets : les décharges et l'incinération des déchets peuvent émettre une variété de polluants comme le méthane, les particules, y compris des dioxines et des éléments-traces. La gestion inadéquate des déchets contribue également à la pollution des sols et des eaux. Les déchets plastiques, s'ils ne sont pas recyclés, finissent dans les océans, où ils provoquent une pollution marine importante. La majeure partie des résidus de plastiques sont fragmentés en micro et en nanoplastiques que l'on retrouve dans tous les compartiments naturels.

L'effort pour réduire la pollution implique des politiques publiques ciblées, des innovations technologiques et une prise de conscience accrue des citoyens. Les initiatives se concentrent aujourd'hui sur la réduction des émissions des transports, l'amélioration de la qualité de l'air et la mise en place de pratiques agricoles durables.

Pollution des eaux et des sols

De nombreuses activités humaines peuvent avoir des effets délétères sur nos rivières, lacs, mers et nappes phréatiques. La qualité de l'eau est influencée par des rejets directs, tels que ceux provenant d'une usine ou d'une station d'épuration des eaux usées (pollutions ponctuelles). Elle est également influencée par diverses sources diffuses, telles que les épandages d'engrais et l'utilisation de produits phytosanitaires par les activités agricoles, et les polluants rejetés dans l'air par l'industrie, qui retombent ensuite sur les sols et en mer. La principale source de pollution ponctuelle de l'eau provient du traitement des eaux usées et des eaux d'égout, tandis que la pollution diffuse a pour sources principales l'agriculture et les centrales à combustible fossile (*via* la pollution de l'air). L'utilisation excessive de produits phytosanitaires et d'intrants agricoles de type fertilisants contamine les eaux souterraines et de surface, provoquant, dans le cas des nitrates et des phosphates, des problèmes comme les algues vertes en Bretagne. Les pratiques agricoles intensives dégradent les sols et contribuent à l'érosion, qui peut entraîner la pollution des rivières avec des sédiments riches en composés chimiques.

Les polluants chimiques, tels que les éléments-traces comme les métaux lourds, les médicaments, notamment les antibiotiques et les hormones, ou encore les produits phytosanitaires, polychlorobiphényles (PCB), les substances per et polyfluoroalkylées (PFAS), etc., ont de nombreuses conséquences sur la biodiversité, puisqu'ils se retrouvent dans les sols et les eaux, mais également dans l'air ainsi que dans la faune et la flore. De nombreuses recherches sont en cours, notamment pour déterminer leurs effets sur la santé humaine, mais aussi pour déterminer les seuils de risque.

Les anciennes activités industrielles, comme la sidérurgie, les industries chimiques, l'exploitation des ressources minières, laissent derrière elles des sols contaminés entre autres par des éléments-traces (ex. : Pb, cadmium, ou Cd, mercure, ou Hg) et des hydrocarbures.

Évolution et état de la pollution en France

Au ^{xx}e siècle, avec l'avènement de l'automobile et l'accroissement des transports en général, la pollution atmosphérique s'est aggravée. Le nombre de véhicules à moteur a augmenté de manière exponentielle, notamment avec l'expansion économique des

Trente Glorieuses au lendemain de la Seconde Guerre mondiale jusqu'au choc pétrolier des années 1970. Ainsi, la combustion des hydrocarbures par les voitures est devenue une source majeure de pollution atmosphérique dans les villes françaises et autour des grands axes routiers. La production industrielle, en constante augmentation, a continué d'émettre des polluants tels que le SO₂ et les particules fines.

Les principales étapes

L'urbanisation croissante, avec une forte densification des villes dans les années 1960 et 1970, a engendré des niveaux élevés de pollution atmosphérique. Ainsi, les habitants des zones urbaines commencent à subir les conséquences de cette dégradation de la qualité de l'air, avec notamment l'aggravation des problèmes respiratoires. C'est pourquoi la pollution devient un sujet de préoccupation majeur dans les années 1970 en France, en particulier avec le choc pétrolier de 1973, qui pousse à réfléchir à une utilisation plus rationnelle des énergies fossiles. En janvier 1971, le gouvernement français crée le ministère de la Protection de la nature et de l'Environnement, marquant ainsi une première étape vers une politique de régulation et de contrôle de la pollution avec une prise de conscience des responsables politiques. En juin 1976, la loi sur la protection de la nature est adoptée, introduisant des mécanismes de protection contre les pollutions atmosphériques et hydriques, mais aussi imposant des listes d'espèces protégées et des études d'impact. Parallèlement, la France commence à développer des infrastructures de traitement des eaux usées et à imposer des normes plus strictes aux industries pour limiter leurs émissions de polluants.

L'accident chimique du 10 juillet 1976 à Seveso, en Italie, qui a libéré une grande quantité de dioxines (2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-*p*-dioxine, ou TCDD) dans l'atmosphère, a été fortement médiatisé en Europe et a conduit à la mise en place de la directive Seveso en 1982, une législation européenne visant à prévenir les risques industriels majeurs. Cette catastrophe environnementale a renforcé la nécessité d'une surveillance accrue des industries à risque et d'une meilleure gestion (production, stockage, recyclage) des produits chimiques dangereux.

Les politiques publiques

Depuis les années 2000, la question du changement climatique et celle de ses interactions avec la pollution sont devenues des enjeux majeurs de société. Le réchauffement climatique accentue certains phénomènes de pollution, comme la réaction chimique de formation de O₃ dans l'air, qui est catalysée par les températures élevées. La France a ainsi signé des accords internationaux comme le Protocole de Kyoto (1997) et l'Accord de Paris (2015) pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre. L'engagement vers une transition énergétique s'est poursuivi avec des politiques incitant à l'utilisation d'énergies renouvelables et à la réduction des énergies fossiles. Le développement de la « mobilité douce » (vélos, voitures électriques) et la mise en place de zones à faibles émissions dans plusieurs villes françaises visent à lutter contre la pollution urbaine. Ces politiques sont aujourd'hui menées par le ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche.

Un des défis majeurs qui persiste en France est la gestion des déchets, même si des progrès ont été réalisés en matière de recyclage et de réduction de l'enfouissement. La mise en place d'une économie circulaire (avec malgré tout de fortes disparités entre

territoires), avec une réduction à la source, le réemploi et le recyclage des matériaux sont essentiels pour limiter la pollution liée aux décharges (pollution des eaux et des sols) et aux incinérateurs (pollution de l'air).

Au niveau international, des plafonds d'émissions pour certains polluants sont fixés par le Protocole de Göteborg (1999) de la Convention de Genève. Ces plafonds se traduisent par l'obligation de mettre en place un système d'inventaires nationaux d'émissions de polluants atmosphériques et un plan d'action national de réduction de ces émissions. Le décret du 10 mai 2017 et l'arrêté du 11 mai 2017, qui composent en France le Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques, fixent ainsi des objectifs de réduction des émissions.

La réalisation technique des inventaires nationaux des émissions de polluants atmosphériques est déléguée au Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (Citepa). Le Citepa est l'organisme national de référence dans ce domaine et assure, pour le compte de l'État, le rapportage réglementaire des émissions nationales au titre du Protocole de Göteborg de la Convention sur le transport atmosphérique à longue distance et de la directive NEC (National Emission Ceilings) sur les plafonds nationaux d'émissions (2016/2284/EU). En 1990 est créé aussi l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) ; l'institut a pour mission de contribuer à la prévention des risques que les activités économiques font peser sur la santé, la sécurité des personnes et des biens, et sur l'environnement. La mission de l'Ineris inclut également la fourniture de données d'émission aux utilisateurs et le couplage avec les modèles de qualité de l'air comme Prev'air. La qualité de l'air, évaluée en termes de concentrations, est suivie par les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air, créées suite à la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie de 1996 (ou loi Laure).

La qualité de l'air, des eaux et des sols en France s'est améliorée depuis les années 1970-1980, notamment grâce à la mise en place de réglementations strictes et à la réduction des émissions industrielles et des transports. La diminution des émissions de polluants historiques est bien réelle, les émissions de SO_2 ont fortement baissé avec la transition vers des énergies plus propres, les émissions de CO ont chuté grâce à l'amélioration des technologies automobiles et à la réglementation stricte sur les moteurs, depuis l'interdiction du plomb dans l'essence en 2000.

Ainsi, les émissions de polluants atmosphériques, notamment celles liées au transport routier, montrent une tendance à la baisse depuis 2000 pour les niveaux de NO_2 (figure 1.1). Par ailleurs, des épisodes de pollution ponctuels, comme ceux liés à O_3 , ont été rapportés, avec des concentrations élevées observées sur le territoire pendant l'été 2024.

Cependant, certains polluants continuent à poser problème. Les particules fines (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ et $\text{PM}_{1.0}$), principalement générées par le trafic routier, les activités agricoles et le chauffage au bois, restent un défi majeur, en particulier dans les grandes villes. Le NO_2 , malgré une baisse générale des émissions, a des concentrations qui restent encore élevées dans certaines grandes agglomérations, comme Paris ou Lyon. Le O_3 troposphérique voit ses concentrations de fond légèrement augmenter, malgré la baisse des NO_x et des COV, ceci étant certainement dû à l'augmentation des températures (réactions photochimiques dépendant de la température).



Des concentrations dans l'air en baisse pour une majorité de polluants

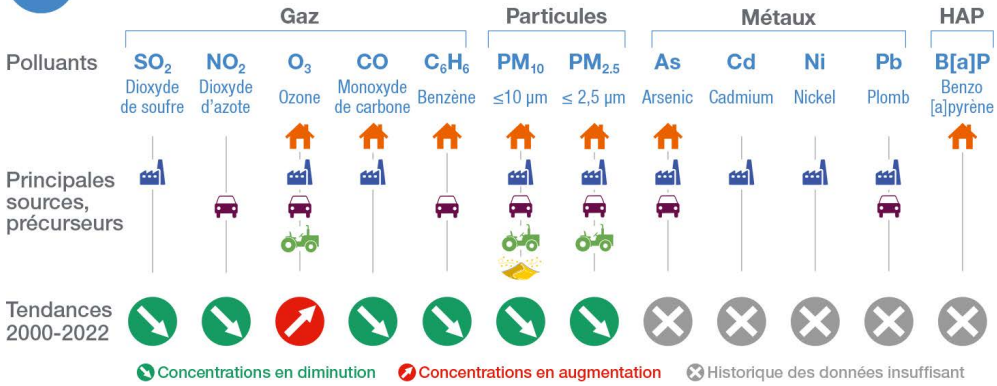


Figure 1.1. Évolution et sources des différents polluants atmosphériques en France (source : ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche – Service des données et études statistiques).

La qualité de l'eau en France reste un défi majeur dans de nombreuses régions. Les rejets industriels dans les cours d'eau ont considérablement baissé grâce à la réglementation européenne (comme les directives sur les eaux résiduaires industrielles). Les stations d'épuration se sont également multipliées, ce qui a amélioré la qualité de l'eau potable et réduit les polluants issus des eaux usées domestiques. L'agriculture reste une source importante de pollution de l'eau, notamment à cause des nitrates et des produits phytosanitaires. Les régions agricoles intensives, comme la Bretagne, sont particulièrement touchées par les pollutions diffuses. Cependant, des efforts sont faits pour réduire l'usage des pesticides, comme le plan Écophyto, bien que les résultats soient encore limités.

Les sols en France sont souvent pollués par des activités industrielles passées, en particulier dans les anciennes zones minières et industrielles du nord et de l'est du pays. Éléments-traces (Pb, Cd, Hg), hydrocarbures, solvants et produits phytosanitaires sont les polluants les plus fréquemment rencontrés.

Environ 300 000 sites en France sont répertoriés comme potentiellement pollués à cause d'anciennes activités industrielles. Ces sols pollués posent des risques pour l'alimentation, notamment par l'absorption des polluants par les plantes de grandes cultures. Le gouvernement français a identifié et cartographié les «sites et sols pollués», avec des programmes de réhabilitation pour les plus dangereux² en lien avec le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). Les friches industrielles, souvent situées en zones urbaines ou périurbaines, sont ainsi gérées et traitées afin d'éliminer les sources de pollution et de limiter les risques sanitaires et environnementaux. Les pratiques agricoles intensives ont entraîné une accumulation de produits chimiques dans les sols, notamment des résidus de produits phytosanitaires. Des efforts sont faits pour encourager l'agriculture biologique ou raisonnée, malgré des réticences qui perdurent.

2. <https://www.georisques.gouv.fr/cartes-interactives#/>

► Effets de cette pollution sur l'environnement

La pollution a des effets significatifs sur la dynamique du vivant (plantes, règne animal et humains). Elle agit en provoquant des impacts à court, moyen et long terme et de façon temporelle. Une description des effets des principaux polluants (O_3 troposphérique, éléments-traces, particules fines) sur les plantes est détaillée ci-après.

L'ozone troposphérique

À faible altitude, O_3 est toxique pour les plantes. Il pénètre dans les feuilles par les stomates. L'ozone est hautement réactif et peut interagir avec les composants de la paroi cellulaire des stomates et du mésophylle. Il est dissous en quasi-totalité dans l'apoplasme, produisant des ROS (*Reactive Oxygen Species*, ou espèces réactives à l'oxygène), comme le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), le radical hydroxyle (HO), le radical perhydroxyle (HOO), le radical superoxyde (O_2^-), le radical hyperoxyde (O_2H) ou l'oxygène singulet (1O_2) (Dumont, 2013; Wittig *et al.*, 2007; 2009). Ces composés sont des molécules très toxiques pouvant modifier ou détruire les constituants cellulaires comme les protéines, les lipides, les pigments ou les acides nucléiques (Ishida *et al.*, 1999).

Tandis qu'une exposition chronique à la pollution à O_3 peut induire une perte de biomasse sans signe visible, une exposition aiguë à O_3 entraîne l'apparition de dégâts visibles sur les feuilles ou les aiguilles des plantes. En Europe, les niveaux ambiants de O_3 sont suffisamment élevés pour causer des taches nécrotiques visibles chez différentes espèces. Les dégâts foliaires dus à O_3 peuvent se voir à l'œil nu et sont caractéristiques de ce polluant. Ces symptômes sont plus marqués sur les feuilles âgées, où ils apparaissent en premier, et moins importants sur les feuilles d'ombre, où ils sont presque inexistantes. Ils se limitent généralement à la face supérieure des feuilles et peuvent prendre la forme d'une décoloration rouge ou brune entre les nervures, ou encore de plus ou moins grandes nécroses (Vollenweider *et al.*, 2003).

Les défenses de la plante comprennent la capacité à restreindre la quantité de O_3 entrant dans les tissus (reflétée par les modifications de la conductance stomatique), mais aussi à détoxiquer O_3 une fois les stomates franchis. Pour se protéger, un système de détoxification, constitutif puis inductif, agit sur les ROS (Wieser et Matyssek, 2007). La détoxification constitutive est déjà opérationnelle à l'entrée de O_3 dans les feuilles. En effet, les ROS étant produits naturellement dans différents compartiments cellulaires, les acteurs de la détoxification sont toujours actifs. Chaque compartiment cellulaire contient ses propres agents de détoxification. La première barrière à s'opposer à O_3 et aux ROS est l'ascorbate, présent dans l'apoplasme sous forme réduite (Castagna et Ranieri, 2009).

Si ces barrières de défense ne suffisent pas, O_3 finira par réduire la photosynthèse, ralentir la croissance des végétaux et provoquer le vieillissement prématuré des feuilles (Dizengremel, 2001; Dumont, 2013; Dumont *et al.*, 2014). Les concentrations en O_3 actuelles entraînent déjà une baisse de la croissance en diamètre et en biomasse chez de nombreuses espèces, dont une perte de biomasse totale de 7% chez les espèces forestières (Wittig *et al.*, 2009). Castell et Le Thiec (2016) ont effectué une synthèse sur les impacts sur l'agriculture et les forêts et l'estimation des coûts économiques. Ils relatent notamment deux études au niveau mondial qui indiquent des estimations

de pertes de rendement globales de l'ordre de 3-15 % pour le blé, 6-16 % pour le soja, 3-4 % pour le riz, 2-5 % pour le maïs (Van Dingenen *et al.*, 2009; Avnery *et al.*, 2011), conduisant à un impact économique qui atteindrait entre 10 et 20 milliards de dollars.

La pollution atmosphérique peut conduire à fortement perturber les rôles de puits de carbone et de maintien de la biodiversité joués par les forêts.

Les métaux et les métalloïdes

Une large gamme d'éléments pose des problèmes sanitaires à des concentrations faibles, entrant dans la catégorie des éléments-traces. Les éléments les plus fréquemment impliqués sont des métaux, tels que le Cd, le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le Hg, le Pb, le zinc (Zn) ainsi que les terres rares, et des métalloïdes, tels que l'arsenic (As) et le sélénium (Se). La pollution de l'environnement intervient à tous les stades du cycle des éléments : elle commence avec l'extraction minière des gîtes métallifères, l'introduction dans les procédés industriels de fabrication, l'utilisation par les différentes activités humaines, enfin l'élimination des déchets ; ainsi, tous les éléments, à un stade ou à plusieurs, sont dispersés dans l'environnement, contaminant l'ensemble des composantes des écosystèmes, y compris les eaux et les sols. Aucun écosystème n'y échappe ; en effet, le transport atmosphérique entraîne le dépôt de métaux et de métalloïdes dans des zones pourtant considérées comme exemptes de pollutions, telles que les sommets des montagnes ou les régions arctiques.

Une propriété clé des polluants du sol, et plus généralement des éléments nutritifs, qui détermine leur potentiel à entrer dans les chaînes alimentaires, est leur biodisponibilité. Dans le sol, la biodisponibilité est la capacité d'un composé quelconque à passer d'une phase solide à liquide, où il peut exercer une action biologique. En d'autres termes, pour les plantes, c'est la quantité d'un élément qui, pendant la durée de la croissance, peut quitter la phase solide et passer dans la solution du sol où il peut être prélevé par les racines. La biodisponibilité est donc une propriété qui découle des interactions entre la phase solide du sol et l'élément (ou, s'agissant des polluants organiques, le composé), déterminant ainsi sa mobilité dans le sol et sa capacité à transiter vers les surfaces racinaires. La biodisponibilité est un potentiel (« l'offre » du sol) sur lequel la plante exerce une « demande ». Elle est une propriété indépendante de la plante. Le prélèvement par la plante dépend alors de ses caractéristiques (ex. : espèce, variété, stade phénologique) et des conditions du milieu (ex. : température, humidité, pH).

Certains éléments-traces sont indispensables à la plante, il s'agit des oligoéléments (ex. : Cu, Zn). D'autres ne le sont pas mais peuvent avoir des effets bénéfiques sur son développement (ex. : Ni). Enfin, la grande majorité n'est pas indispensable (ex. : Cd, Pb, Hg). Pourtant, s'ils sont présents dans la solution du sol (biodisponibles), la plante peut les prélever et les accumuler. En fonction des quantités accumulées dans les tissus, les polluants peuvent provoquer des désordres physiologiques. La plante peut tolérer de faibles concentrations de polluants dans ses tissus sans manifester de changements observables au niveau macroscopique ou moléculaire. Mais lorsque les concentrations augmentent, des désordres peuvent apparaître à différents niveaux, d'abord moléculaire, puis cellulaire, touchant enfin le fonctionnement et le développement des organes et, par conséquent, la plante entière. Le développement de la plante est perturbé, et elle peut manifester des symptômes spécifiques (ex. : chlorose, nécrose) et la chute de sa croissance, voire mourir. Il existe un groupe de végétaux