



**HAL**  
open science

# Les pollutions des matrices environnementales air, eaux, sols et leur sensibilité aux évolutions climatiques en Île-de-France

Christine Aubry, Isabelle Coll, Alexandra Courtin, Christian Mougin

## ► To cite this version:

Christine Aubry, Isabelle Coll, Alexandra Courtin, Christian Mougin. Les pollutions des matrices environnementales air, eaux, sols et leur sensibilité aux évolutions climatiques en Île-de-France. Les Carnets du GREC francilien, 2025, 70 p. <hal-05004429>

**HAL Id: hal-05004429**

**<https://hal.inrae.fr/hal-05004429v1>**

Submitted on 22 Apr 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

# Les carnets

du **GREC** francilien

Les pollutions  
des matrices  
environnementales  
air, eaux, sols  
et leur sensibilité  
aux évolutions climatiques  
en Île-de-France

Christine Aubry • Isabelle Coll • Alexandra Courtin • Christian Mougin



**GREC**  
francilien

Groupe régional d'expertise sur le changement climatique  
 et la transition écologique en Île-de-France

## **Les auteurs et autrices**

- ▶ **Christine Aubry**, agronome, UMR SADAPT, INRAE-AgroParisTech-Université Paris-Saclay
- ▶ **Isabelle Coll**, professeure en sciences de l'atmosphère, LISA, Institut Pierre-Simon Laplace, Université Paris-Est Créteil
- ▶ **Alexandra Courtin**, professeure en géosciences, UR Geops, Université Paris-Saclay
- ▶ **Christian Mougin**, écotoxicologue, UMR Ecosys, INRAE-AgroParisTech-Université Paris-Saclay

**Ce carnet a bénéficié des échanges et de l'apport d'expertise de l'Institut Paris Région. Il a également bénéficié du concours de scientifiques d'unités de recherche rattachées à la Fédération Île-de-France de Recherche sur l'Environnement (FIRE).**



Ce carnet est dédié à Isabelle Lamy. Chimiste de formation, directrice de recherche à l'INRAE, où elle exerçait depuis 1983, Isabelle Lamy a focalisé ses recherches sur la dynamique des éléments traces métalliques dans les sols. Sa contribution à l'écotoxicologie terrestre lui a valu les honneurs de l'Académie de l'Agriculture, qui lui a décerné une médaille d'or en 2023.

## RÉSUMÉ POUR DÉCIDEURS

L'Île-de-France est une région unique par la forte densité de sa population, son urbanisation, ses activités agricoles et son trafic routier et aérien. Au carrefour de trois grandes zones biogéographiques, elle abrite un riche patrimoine naturel avec une diversité spécifique comparable à celle des régions voisines, pour une surface bien moindre. Elle est de fait fortement confrontée aux pollutions de trois grandes matrices environnementales de notre biosphère : l'air, les eaux, les sols. Les connaissances sur les pollutions actuelles sont très variables selon ces matrices, les sols étant de loin les moins connus car insuffisamment étudiés. Le changement climatique en cours impacte déjà la nature et les intensités de ces pollutions, et peut remettre en cause les améliorations parfois réalisées ces dernières années.

### L'air

La surveillance assurée par Airparif permet d'avoir une bonne connaissance de l'évolution des teneurs en polluants atmosphériques réglementés. Les mesures montrent que la qualité de l'air ambiant s'est améliorée sur les quinze dernières années : certains polluants ne constituent désormais plus un sujet de préoccupation en milieu urbain (plomb, dioxyde de soufre) ; dans l'ensemble, les concentrations moyennes des polluants primaires (oxydes d'azote, particules fines) ont baissé significativement.

Pourtant, la pollution chronique reste élevée et délétère pour la santé, notamment à proximité des grands axes routiers pour ces mêmes polluants primaires, mais aussi sur une très grande partie de la région pour ce qui concerne l'ozone, dont les niveaux moyens ne montrent pas de tendance décroissante. Les teneurs en polluants peuvent en outre s'avérer préoccupantes lors d'épisodes parfois aggravés par l'intervention de sources saisonnières (épandages agricoles, chauffage au bois). La multiplication et/ou l'intensification de fortes perturbations climatiques (les canicules) ravivent enfin les « pointes d'ozone » estivales qui avaient fortement diminué.

Ces constats interrogent les aménagements urbains et les mobilités et exacerbent les questions d'inégalités socio-spatiales en matière de qualité de l'air dans l'espace francilien.

### Les eaux

Les suivis des états chimiques et écologiques des masses d'eaux, quoique fragmentaires, montrent des pollutions significatives et durables des eaux souterraines et de surface, même si elles sont variables, par différents macro (nitrates, phosphates) et micro (Éléments traces métalliques ETM, médicaments, pesticides) contaminants chimiques : après les efforts réalisés sur les stations d'épuration, il est essentiel de poursuivre ceux qui visent à réduire les rejets diffus pour localement diminuer efficacement ces pollutions.

Les travaux du PIREN Seine (Programme interdisciplinaire de recherche sur l'eau et l'environnement du bassin de la Seine) depuis 30 ans montrent une baisse des macropolluants et des pesticides dans les eaux de surface, mais à l'inverse des résidus médicamenteux (notamment antibiotiques) croissants, la présence récemment détectée de substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées (PFAS) et de microplastiques, et, dans les phases particulières (sédiments, matières en suspension),

des métaux et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Les eaux souterraines renferment des polluants rémanents (dont des pesticides agricoles), retrouvés dans de nombreux captages d'eau potable.

En 2022, 30 % des masses d'eaux d'Île-de-France atteignaient un très bon à bon état écologique et 28 % un bon état chimique (valeurs obtenues à partir de l'indicateur qui prend en compte les substances persistantes, bio-accumulables et toxiques – PBT – ubiquistes). En 2020, 153 polluants sur 286 évalués ont été retrouvés dans des eaux rejetées par les stations d'épuration (STEP). Le réchauffement et la fréquence accrue d'évènements climatiques extrêmes entraîneront : une réduction des débits d'étiage, concentrant localement des pollutions ; une raréfaction de la ressource avec des tensions croissantes sur ses usages, notamment agricoles ; une plus grande fréquence de blooms algaux provenant de cyanobactéries dans des eaux de surface.

Ces projections plaident pour des suivis plus fins et moins fragmentaires de la qualité des eaux et pour une gestion plus localisée des solutions, à l'instar du programme Aquif'Brie.

### Les sols

Sauf historique spécifique (épandages de boues) ou localisation particulière (proximité de Paris), les sols agricoles franciliens semblent peu contaminés par les métaux lourds et les HAP. Les connaissances sur les résidus de pesticides, de médicaments et plus encore de microplastiques sont plus fragmentaires mais préoccupantes dans les quelques études intégratives existantes.

Les sols urbains sont encore moins connus. Toutefois, la fréquence des activités industrielles, notamment, provoque des pollutions variées et parfois fortes, y compris en parcs forestiers : en 2021, environ 900 sites de l'Île-de-France et 3 000 hectares étaient concernés par des pollutions d'origine industrielle. Les conséquences du changement climatique sur la mobilité et le transfert des contaminants des sols sont mal connues : une systématisation des suivis des contaminants inorganiques et organiques des sols franciliens est nécessaire.

### À retenir

Les activités anthropiques en Île-de-France ont pu entraîner sur certains territoires de fortes contaminations de chacune des matrices Air, Eaux, Sols, généralement bien connues pour les contaminants réglementairement suivis, avec toutefois une connaissance encore limitée pour les sols, notamment urbains. Pour chacune des matrices, d'autres contaminants, tels que les microplastiques et les PFAS, doivent aujourd'hui être recherchés systématiquement.

Face aux incertitudes du devenir des contaminants au regard du changement climatique, la mise en place rapide **d'observatoires de longue durée des contaminations plurimatrices, air, eaux et sols**, représentant la diversité des situations rencontrées en Île-de-France, s'impose aujourd'hui dans une optique de préservation de la santé humaine et environnementale.

**Table  
des  
matières**

**01**

Introduction  
générale

**02**

Pollution  
de l'air

**03**

Pollution  
des eaux

**04**

Pollution  
des sols

**05**

Conclusion  
générale

# 01

---

Introduction générale

L'Île-de-France est une région très contrastée en termes d'occupation de l'espace : sur 1,2 million d'hectares, 22 % des sols sont artificialisés, près de 50 % agricoles, et 25 % sont forestiers, 2 % en grands espaces verts de loisirs et il y a aussi 1 % de surfaces en eau<sup>1</sup>. C'est aussi une région caractérisée par un réseau hydrographique dense représenté par la Seine et ses affluents.

Au 1<sup>er</sup> janvier 2023, avec près de 12,4 millions d'habitants<sup>2</sup>, une concentration forte d'activités économiques diverses, un trafic routier particulièrement dense, et une attractivité qui ne faiblit pas, l'Île-de-France doit faire face à des pollutions des eaux et des sols susceptibles de se poursuivre, voire de s'aggraver avec le changement climatique. Fortement anthropisée dans sa zone centrale, l'Île-de-France est en effet soumise à certaines dégradations de la qualité de ses matrices environnementales, issues pour certaines de son passé (et de son présent) agricole et industriel, pour d'autres, plus récentes, de l'urbanisation : croissance du trafic routier, du chauffage urbain, remblaiement et imperméabilisation des sols, rejets chimiques et organiques dans les eaux.

L'introduction de réglementations a toutefois pu faire évoluer positivement la situation en visant à protéger mieux les ressources (loi sur l'air de 1996, directive cadre sur l'eau 2004, tout récemment obligation de zéro artificialisation nette, ZAN, des sols), de même que certaines évolutions sociétales récentes (mobilités douces actives, développement rapide jusqu'à tout récemment de l'agriculture biologique). Ainsi, le bilan des pollutions des matrices et *a fortiori* les évolutions à venir sont contrastés et complexes.

Nous proposons dans ce carnet de distinguer chacune des matrices, air, eaux et sols, et pour chacune d'entre elles, de réaliser tout d'abord un inventaire cartographié des problèmes de pollution en Île-de-France (partie A), puis (partie B) de s'interroger sur les évolutions possibles de ces pollutions (intensité, nature, mécanismes) sous l'effet du changement climatique, et enfin (partie C) de recenser certaines « solutions » à ces évolutions mais aussi les questions de recherche qui subsistent.

Nous concluons par une lecture transversale des trois matrices en forme de perspectives et de recommandations.

<sup>1</sup> Occupation des sols 2017, MOS et Geofla IGN, Institut Paris Région (IPR)

<sup>2</sup> Jabot D, 2023. *Bilan démographique 2022 de l'Île-de-France : deux naissances pour un décès*. INSEE Flash Ile-de-France, n°77. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6968304>

# 02

---

**Pollution de l'air**  
Isabelle Coll

## Introduction

Les principaux effets de la pollution atmosphérique sur la morbidité et la mortalité ont pu être établis au travers d'un grand nombre d'études épidémiologiques et toxicologiques. Intrinsèquement liés aux grandes métropoles – à la fois parce qu'ils relèvent de la densité et de l'intensité des activités anthropiques qui y sont exercées, et parce qu'ils résultent d'une constante proximité aux sources d'émissions imposée par la structure et les pratiques urbaines – ces effets incluent une vaste gamme de pathologies cardiovasculaires, respiratoires ou encore neurologiques qui contribuent à réduire l'espérance de vie ainsi que le nombre d'années de vie en bonne santé.

Cette problématique prend une dimension de santé publique au regard de l'absence d'un seuil de concentration identifié en-dessous duquel aucun effet sur la santé ne serait observé. Ainsi, les études d'exposition à court terme aux particules atmosphériques de diamètre inférieur à 2,5 µm suggèrent clairement qu'il n'existe pas de seuil en-dessous duquel personne ne serait affecté.

En conséquence, il est attendu des bénéfices pour la santé de la population pour toute réduction des teneurs en particules fines, que les niveaux de concentration soient ou non supérieurs ou inférieurs aux valeurs limites réglementaires. Sur le long terme, les études épidémiologiques ne fournissent pas non plus de données qui tendent vers l'identification d'un tel seuil, que ce soit pour les particules fines, pour le dioxyde d'azote ou pour l'ozone<sup>3</sup>. Dans de telles conditions, la maîtrise de la qualité de

l'air reste un défi permanent pour les zones urbanisées et densément habitées.

Grâce à l'impulsion donnée par la loi sur l'air de 1996, la surveillance de la qualité de l'air sur le territoire national s'est structurée au travers d'associations présentes en région (AASQA<sup>4</sup>) en charge de la mise en œuvre d'une surveillance continue des polluants réglementés. Les AASQA sont également chargées de la prévision opérationnelle et de la transmission des informations vers différents acteurs et publics, en particulier celles relatives aux dépassements des seuils réglementaires.

Le déploiement des sites de mesure sur le terrain doit permettre la surveillance équilibrée et rationalisée de la qualité de l'air dans les espaces habités et les zones constituant des points de vigilance. En Île-de-France, une cinquantaine de stations fixes pérennes gérées par l'AASQA Airparif mesurent actuellement la qualité de l'air à un pas de temps au moins horaire. Cette structuration en réseau d'observation permet de disposer d'un historique robuste sur la qualité de l'air depuis la fin des années 1990, et d'une base de données adaptée au calcul d'une multiplicité d'indicateurs de pollution sur le territoire. La question individuelle vient toutefois complexifier la notion d'exposition et les risques sanitaires et sociaux associés.

<sup>3</sup> Atkinson R., Barregård L., Bellander T. *et al.*, 2013. *Review of evidence on health aspects of air pollution*, REVIHAAP Project, Technical Report. World Health Organization.

<sup>4</sup> Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air, sous l'égide du ministère de l'Environnement.

## A – Inventaire « cartographié » de la pollution de l'air en Île-de-France

### A.1. Problématiques associées aux principaux polluants atmosphériques

Ozone (O<sub>3</sub>), dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), particules fines : la question réglementaire de la qualité de l'air en région parisienne comme dans les grandes métropoles mondiales s'articule aujourd'hui en grande partie autour de ces trois familles de polluants. Toutefois, bien que les politiques sur le sujet s'appuient en grande partie sur le respect de seuils pour la santé humaine, les polluants atmosphériques ont également des impacts directs sur les écosystèmes naturels. C'est le cas des composés azotés, issus des combustions anthropiques (oxydes d'azote issus à 65 % du trafic routier et à 21 % des combustions résidentielles dans Paris) et des épandages agricoles (contenant de l'ammoniac) qui, par retombées sèches ou humides, perturbent la biodiversité par l'apport excessif de nutriments azotés aux systèmes aquatiques. C'est également le cas de l'ozone troposphérique, qui affecte la photosynthèse et a une action nécosante sur les feuilles des végétaux.

Ces processus ont de nombreuses conséquences environnementales et économiques, comme la réduction du taux de croissance de la végétation, la baisse significative des rendements agricoles ou encore l'appauvrissement de la biodiversité et la perturbation des services écosystémiques. Pour ces raisons, l'ozone est également soumis au respect réglementaire d'indicateurs pour la protection de la végétation, qui s'appuient sur le cumul d'exposition à des teneurs dépassant une limite donnée<sup>5</sup>.

Les principaux problèmes de respect des seuils réglementaires en France sont liés au dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) et aux particules de diamètre inférieur à 10 µm (PM<sub>10</sub>) en zone urbaine. Depuis 2010, la Commission européenne a engagé des procédures d'infraction à l'encontre de la France pour non-respect des valeurs limites de concentration horaires et annuelles en NO<sub>2</sub> dans plus de 24 zones. Une autre procédure d'infraction, cette fois relative aux PM<sub>10</sub>, a été engagée en 2011 contre la France. Parmi les 10 zones administratives toujours en dépassement en 2020, seul Paris était à la fois concerné par le NO<sub>2</sub> et par les PM<sub>10</sub><sup>6</sup>.

Le dioxyde d'azote est un polluant émis lors des combustions. C'est un constituant majeur des émissions – essentiellement diesel – du trafic routier parisien et des émissions du secteur résidentiel – dans lequel 70 % du NO<sub>2</sub> provient de la combustion du gaz naturel. Au-delà de son rôle dans les équilibres de consommation et de formation de l'ozone, le NO<sub>2</sub> est associé à l'aggravation des symptômes de l'asthme chez l'enfant et à différentes formes d'atteinte à la fonction pulmonaire.

Les études épidémiologiques et toxicologiques menées depuis les années 2000 ont continûment renforcé les preuves d'une association entre la santé respiratoire et cardiovasculaire, et l'exposition à long terme aux particules fines (notamment celles de diamètre inférieur à 2,5µm, dites PM<sub>2,5</sub>), et ce même à des niveaux inférieurs aux valeurs réglementaires actuelles. Les PM<sub>10</sub> et les PM<sub>2,5</sub> peuvent être

<sup>5</sup> AOT 40, *Accumulated Ozone exposure over a Threshold of 40 ppb* (soit 80 µg/m<sup>3</sup>), indicateur calculé sur toutes les valeurs horaires entre 8h et 20h CET sur la période de mai à juillet, Directive 2002/3/CE. Objectif de qualité de 6 000 µg.m<sup>-3</sup>.h<sup>-1</sup>

<sup>6</sup> Tuddenham, M., 2023. Dépassement des valeurs limites pour le NO<sub>2</sub> : le Conseil d'État condamne l'État à verser deux astreintes de 10 M €. Citepa. [https://www.citepa.org/fr/2022\\_10\\_a03/](https://www.citepa.org/fr/2022_10_a03/)

émises dans l'air lors des combustions naturelles ou anthropiques, sous l'effet du vent ou encore par des phénomènes de frottement ou de broyage. Elles peuvent au cours de leur vie atmosphérique interagir avec une grande variété de polluants gazeux. Elles contiennent parfois des composants terrigènes provenant de zones désertiques lointaines, des métaux émis par des sources industrielles ou ferroviaires, et du carbone à l'état de suie provenant des phénomènes de combustion. Elles subissent de multiples interactions avec des polluants gazeux parmi lesquels des formes dérivées de l'ammoniac provenant des fertilisants agricoles, mais aussi des HAP<sup>7</sup>, issus eux aussi de la combustion.

Les particules fines possèdent une composition et des propriétés physiques, chimiques et toxicologiques qui résultent d'une histoire complexe dans l'atmosphère. Elles se déposent à différents endroits de l'appareil respiratoire et peuvent, pour les plus fines, passer dans le sang au niveau des alvéoles pulmonaires. La diversité de leur composition chimique s'exprime alors sur les organes par des mécanismes biologiques différenciés.

Concernant les composés organiques volatils (COV), dont il existe presque une infinité de formules, les composés toxiques les plus représentés dans l'air sont surveillés de manière ciblée : la réglementation impose ainsi la surveillance du benzène (cancérogène et mutagène) et de certains de ses dérivés (toluène, éthylbenzène, xylène) qui sont mesurés de manière concomitante. Plusieurs stations proposent également la mesure du benzo(a)pyrène, retenu comme traceur du risque cancérogène lié aux HAP. Au-delà de ces problématiques sanitaires spécifiques, les COV et

leurs produits d'oxydation atmosphérique sont surveillés pour leur contribution oxydante majeure à la fraction « organique secondaire » des particules.

La pollution par l'ozone a des impacts sur la santé humaine à court et long terme. Par ses propriétés oxydantes, l'ozone est susceptible de provoquer des irritations des voies oculaires et respiratoires et des problèmes d'essoufflement, de déclencher des crises d'asthme, mais aussi d'affecter la fonction pulmonaire et de favoriser l'apparition de maladies respiratoires et de troubles cardiovasculaires.

Cette pollution s'exprime sous deux formes distinctes. D'une part, des épisodes estivaux dits de « pointes d'ozone » post-méridiennes et d'échelle régionale, issues d'une production photochimique rapide impliquant oxydes d'azote et COV durant les journées chaudes et peu ventées. Ces épisodes sont devenus moins fréquents et moins intenses en Europe depuis la fin des années 1990 grâce à la réduction des rejets des précurseurs de l'ozone. Toutefois, le dérèglement climatique pourrait inverser cette tendance positive du fait de l'augmentation en fréquence, en durée et en intensité des vagues de chaleur favorables à la photochimie produisant l'ozone. C'est ainsi que le nombre moyen de jours de dépassement du seuil horaire de 180 µg/m<sup>3</sup> pour l'ozone en Île-de-France est passé de 2,2 jours sur la période 2011-2016 à 6,5 jours sur la période 2018-2022, avec une grande variabilité météorologique interannuelle et un maximum à 11 jours de dépassement en 2018<sup>8</sup>.

D'autre part, on constate la persistance d'une pollution chronique liée aux niveaux

<sup>7</sup> Hydrocarbures aromatiques polycycliques.

<sup>8</sup> <https://opendata.paris.fr>

de fond en ozone : ce polluant est en effet le seul en France pour lequel les teneurs moyennes annuelles ont augmenté au cours des deux dernières décennies. En cause, tout d'abord, l'augmentation des émissions de composés précurseurs d'ozone dans certaines régions urbanisées de l'hémisphère Nord, ce qui intensifie le transport d'ozone sur de longues distances.

À ce phénomène s'ajoute, de manière paradoxale, l'effet de la maîtrise des oxydes d'azote en ville. En effet, lorsqu'il est présent à de fortes concentrations, le monoxyde d'azote (NO) émis en même temps que le NO<sub>2</sub> disparaît en assurant une consommation très rapide de l'ozone environnant. La diminution des teneurs en oxydes d'azote dans le cœur des métropoles réduit l'ampleur de ce phénomène, ce qui conduit à l'augmentation des niveaux urbains d'ozone. Les niveaux de fond en ozone ont ainsi doublé en Île-de-France entre 1994 et 2019, et la région est aujourd'hui soumise à un « bruit de fond » excédant les seuils de protection de la santé et de la végétation sur huit heures consécutives<sup>9</sup>. L'ORS et Airparif estiment que sur la période avril-septembre 2017-2019, les expositions maximales journalières sur huit heures glissantes forment une moyenne qui excède 80 µg/m<sup>3</sup> pour la totalité de la population, soit au-delà de la limite de 70 µg/m<sup>3</sup> recommandée par l'OMS comme indicateur journalier<sup>10</sup>.

Les évolutions technologiques réalisées dès la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle dans les industries, les moteurs des voitures

thermiques, la composition des carburants, etc., ont bien sûr permis de réduire notablement les émissions, et d'éliminer plusieurs problématiques, comme celle du plomb, supprimé de la composition des carburants et qu'on ne retrouve plus aujourd'hui à des niveaux mesurables dans l'atmosphère (ses émissions ont connu une diminution de 97 % en 30 ans).

De même, le dioxyde de soufre a connu une décroissance régulière depuis les années 1950 ; ses teneurs, divisées par 100, sont le plus souvent au-dessous des limites de détection. On peut toutefois rencontrer des problèmes ponctuels de qualité de l'air sous le vent des panaches de certaines usines, comme cela peut être le cas avec l'arsenic au voisinage d'usines de fabrication du verre, sans que les émissions industrielles ne constituent une problématique régionale chronique.

## A.2. Intensité et géographie des sources

En Île-de-France, les transports routiers et le secteur résidentiel et tertiaire (combustions pour la production d'électricité et de chauffage notamment) représentent à eux seuls près de 70 % des émissions de dioxyde d'azote et de particules fines (*voir la figure 1 page suivante pour les particules fines en 2018*). La part restante de leurs émissions provient d'une grande diversité de sources qui incluent notamment les activités industrielles, commerciales et aéroportuaires, le secteur de l'énergie et des déchets, les chantiers et l'agriculture (depuis les engins agricoles jusqu'aux épandages d'engrais et de pesticides).

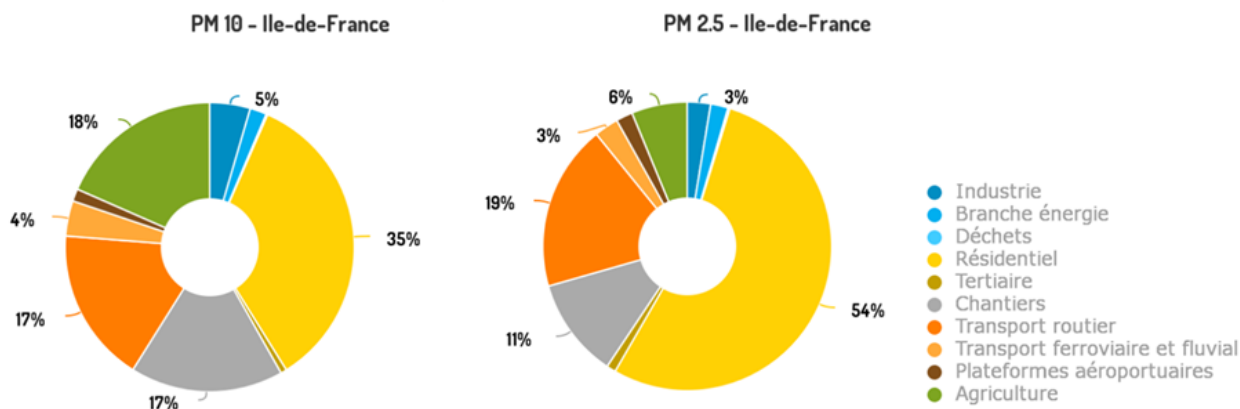
<sup>9</sup> Valeur cible de 120 µg/m<sup>3</sup> pour le maximum journalier de la moyenne sur huit heures, à ne pas dépasser plus de 25 jours par an (en moyenne sur trois ans). L'OMS recommande une valeur plus restrictive correspondant au nombre de maximums journaliers de moyenne supérieure à 70 µg/m<sup>3</sup> sur huit heures.

<sup>10</sup> Host, S., Cardot T., Saunal A. *et al.*, 2022. Mortalité attribuable à la pollution atmosphérique en Île-de-France, Quelle

évolution depuis 10 ans et quels bénéfices d'une amélioration de la qualité de l'air dans les territoires, ORS Île-de-France.

*Bull. Épidémiol. Hebd.* 19-20: 326-35.

[http://beh.santepubliquefrance.fr/beh/2022/19-20/2022\\_19-20\\_1.html](http://beh.santepubliquefrance.fr/beh/2022/19-20/2022_19-20_1.html)



AIRPARIF déc. 2020 - Inventaire 2018

**Figure 1.** Répartition sectorielle des émissions de particules PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> primaires en Île-de-France en 2018. Source Airparif, Émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre, bilan Île-de-France - année 2018, mai 2021.

Toutefois, l'impact des sources relève autant de leur intensité que de leur distribution sur le territoire. La région parisienne est organisée autour d'une structure urbaine centrale à haute densité d'habitations et d'emplois, ceinturée par une zone urbaine périphérique en expansion, qui posent clairement le problème de l'organisation de la mobilité et des flux de mobilité individuelle. Le trafic routier est un émetteur omniprésent dans l'espace urbain, et il se distingue par la très grande proximité qu'il impose en continu aux habitants et aux usagers de la métropole.

La récurrence des situations de congestion, sur les grands axes et dans le centre urbain dense de Paris, ainsi que l'urbanisation dense à proximité des axes routiers à fort trafic, parfois avec des établissements accueillant des publics sensibles (écoles, collèges, lycées ou stades à proximité du périphérique parisien par exemple), constituent un facteur aggravant de l'exposition des citoyens à cette pollution, que ce soit via le temps passé dans la circulation pour les usagers de la voirie, par le fait que

les moteurs des véhicules sont très émetteurs à bas régime, ou encore par l'accumulation de véhicules sur la voie, à proximité des trottoirs fréquentés par des piétons de tous âges.

Les autres sources, notamment l'agriculture et le chauffage domestique, génèrent une exposition de moins grande proximité, mais peuvent s'exprimer intensément lors d'épisodes particuliers saisonniers de courte durée (deux à cinq jours en moyenne, voir p. 17).

### A.3. Cartographie de la qualité de l'air

La qualité de l'air ambiant en Île-de-France s'est très fortement améliorée ces deux dernières décennies. Les paragraphes ci-après détaillent cette amélioration et évaluent les niveaux observés aujourd'hui par rapport aux exigences réglementaires et à leur évolution.

#### Exposition chronique

La qualité de l'air extérieur en région Île-de-France est fortement contrastée. Ce contraste s'exprime à grande échelle

via l'existence de gradients de concentration croissants depuis les zones rurales externes vers le cœur dense et urbain de la région – figuré par Paris et sa banlieue limitrophe – mais il s'exprime également au sein d'un même îlot urbain, *via* l'opposition entre des environnements situés à distance ou à proximité des zones de trafic.

En Île-de-France comme dans toute la France, la qualité de l'air s'est améliorée durant les vingt dernières années. Depuis les années 2000, des efforts d'aménagement de l'espace urbain et routier parisien visant à limiter les flux de trafic ont en effet été menés. Ils se sont ajoutés à diverses incitations pour mieux maîtriser le chauffage résidentiel et à l'action technologique continue pour la réduction des émissions des véhicules imposée par la réglementation européenne sur les motorisations. L'ensemble s'est traduit par une baisse des niveaux de concentration de 35 % pour les particules fines et de 25 à 30 % pour le NO<sub>2</sub>.

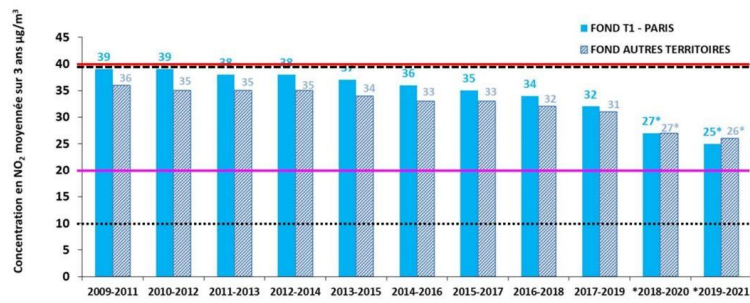
Malgré ce progrès, on retrouve encore en 2019 des concentrations en dioxyde d'azote jusqu'à deux fois plus élevées au niveau des voies de circulation (*figure 2b*) qu'en fond urbain (*figure 2a*), c'est-à-dire à quelques dizaines de mètres des plus grands axes de circulation. Près des grands axes routiers, la valeur limite réglementaire de 40 µg/m<sup>3</sup> est systématiquement dépassée. La problématique s'est avérée un peu moins critique ces dernières années pour les PM<sub>10</sub>. Leurs concentrations

moyennes se situaient au-dessous du seuil réglementaire annuel (*figure 2d*), qui est de 40 µg/m<sup>3</sup> avec une moyenne journalière de 50 µg/m<sup>3</sup> à ne pas dépasser plus de 35 jours par an. Enfin, la décroissance depuis le début des années 2010 est plus nette pour les PM<sub>2,5</sub>. Elles respectent aujourd'hui les valeurs limites annuelles réglementaires sur tous les types de site (*figure 2c*).

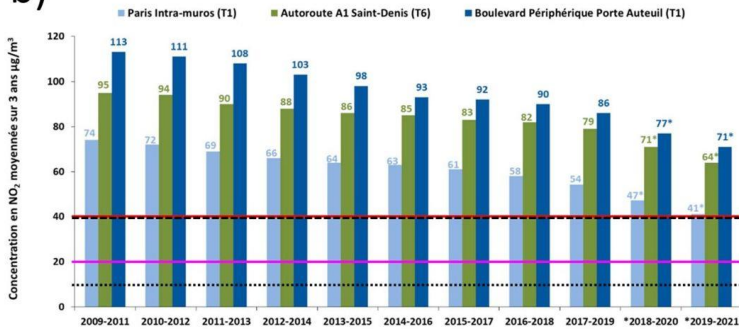
Toutefois, les niveaux de particules observés en Île-de-France excèdent les recommandations de l'OMS datant de 2005 sur les moyennes annuelles (*traits noirs pointillés sur tous les histogrammes de la figure 2*), cela d'un facteur 1,5 à 2. De plus, l'OMS a abaissé ses valeurs de référence en septembre 2021 (*traits noirs pleins*) et, sous cette impulsion, la Commission européenne a révisé en 2022 ses normes pour la qualité de l'air (*traits roses sur la figure 2*).

Il est donc légitime de continuer à se préoccuper du respect des normes de qualité de l'air en Île-de-France, du fait de leur évolution rapide vers la baisse pour des raisons sanitaires, et parce qu'on constate une plus grande inertie dans l'amélioration des concentrations. Les cartographies de la qualité de l'air produites par Airparif montrent toutefois la décroissance significative des niveaux annuels moyens de pollution ainsi que la réduction de l'emprise spatiale des dépassements de seuils sur la région depuis une quinzaine d'années (*figure 3*).

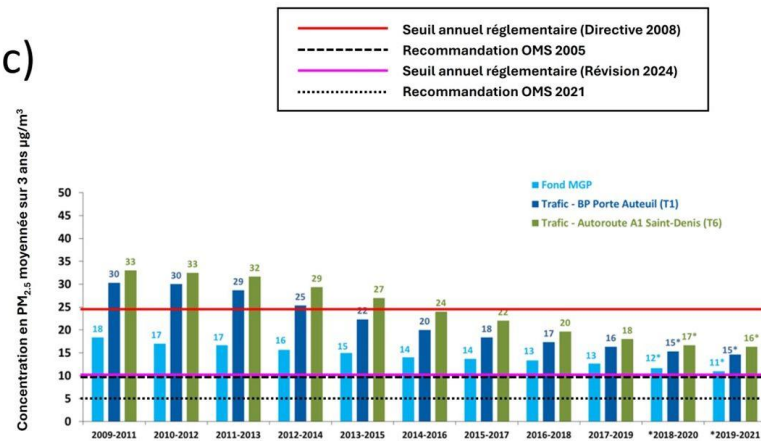
a)



b)



c)



d)

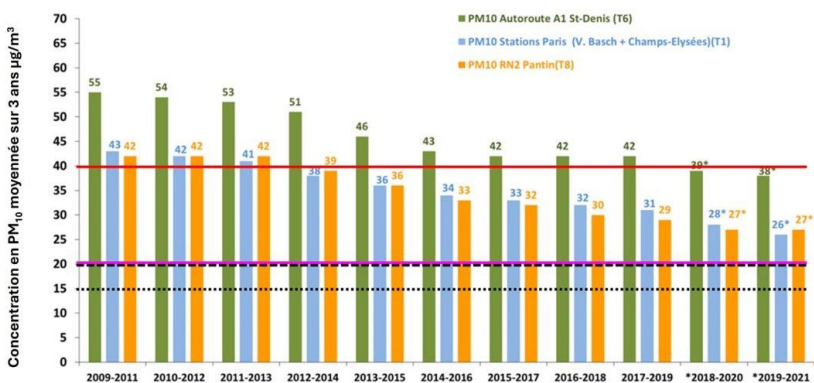
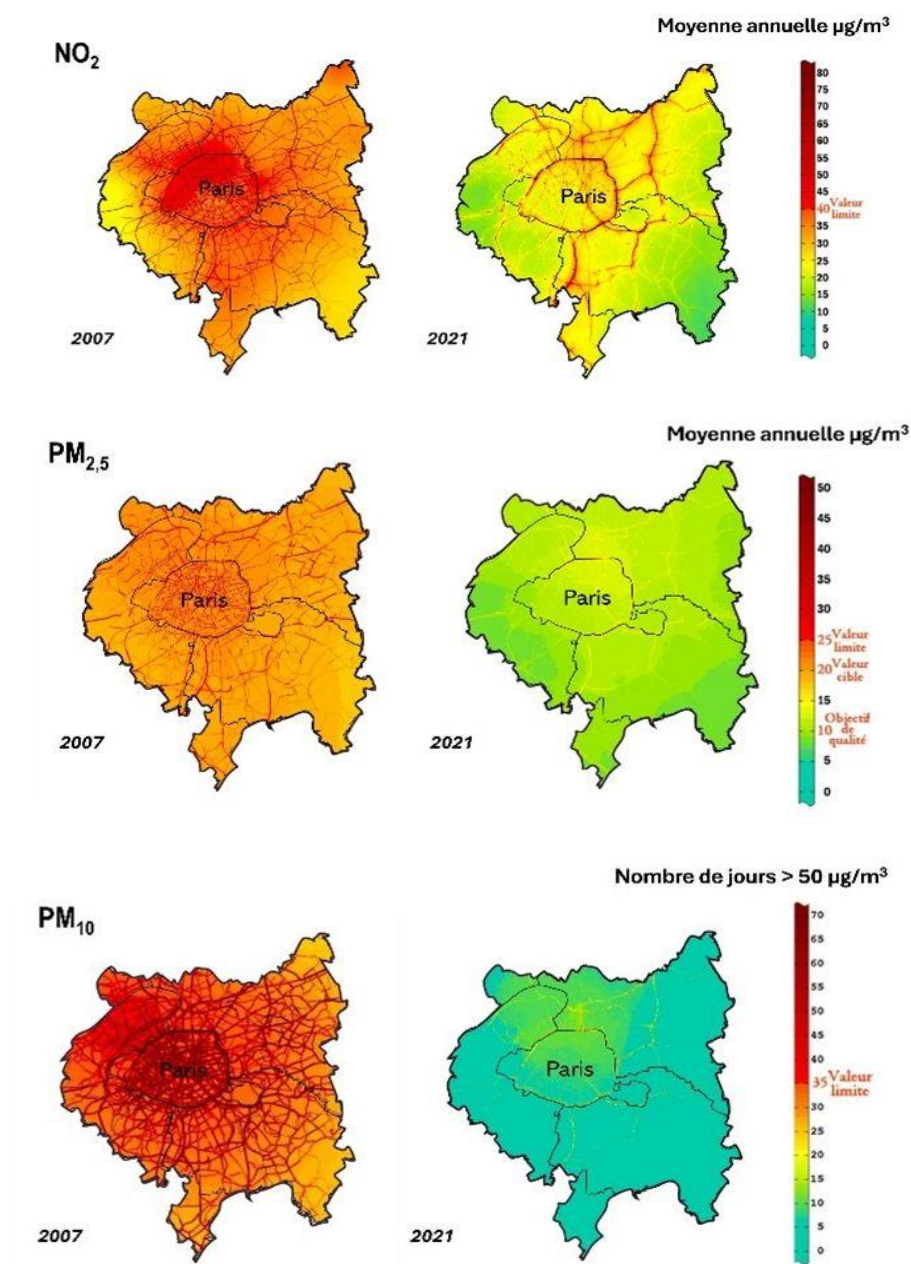


Figure 2. Évolution de la concentration moyenne sur trois ans en NO<sub>2</sub> (a et b), en PM<sub>2,5</sub> (c) et en PM<sub>10</sub> (d) dans le grand Paris, sur des échantillons représentatifs de stations. Source Airparif, Surveillance et information sur la qualité de l'air, Métropole du Grand Paris – 2021, juillet 2022.



**Figure 3.** Cartographies comparatives en 2007 et 2021 des concentrations moyennes annuelles en dioxyde d’azote (a), en  $PM_{2,5}$  (b) et du nombre de jours de dépassement du seuil de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  des  $PM_{10}$  (c), dans le grand Paris. Source Airparif, Surveillance et information sur la qualité de l’air, Métropole du Grand Paris – 2021, juillet 2022.

### Exposition de pointe : les épisodes de pollution

Plus visibles médiatiquement que la pollution chronique urbaine, les événements ou « épisodes » de pollution peuvent être observés à diverses périodes de l'année. D'une durée moyenne de deux à cinq jours, ils sont amorcés par des systèmes météorologiques anticycloniques, favorables à l'accumulation et/ou la production de pollution dans les basses couches de l'atmosphère. Ces situations météorologiques se caractérisent par des vents d'Est à Nord-Est, par de hautes pressions limitant le mélange vertical des polluants, et par des vents très faibles limitant la dispersion horizontale des polluants émis dans l'atmosphère. Elles positionnent en particulier l'Île-de-France sous le vent d'autres pays et régions, amenant une part de pollution « importée » qui peut être significative. Le nombre et l'origine des épisodes sont variables selon l'année.

En hiver, ces systèmes dynamiques sont associés à des ciels clairs et au transport de masses d'air polaires très froides vers l'Ouest de l'Europe, conditions qui permettent l'installation d'une inversion de température à très basse altitude – un phénomène qui maintient les polluants anthropiques près du sol. Les épisodes les plus sévères sont déclenchés par la combinaison de cette situation dynamique et d'une augmentation des émissions liées au chauffage domestique par combustion de biomasse.

Ce phénomène a pu être observé autour de Paris, grâce à des prélèvements et analyses poussées de la composition chimique des particules, révélant la présence de traceurs de combustion du bois. Dans ces situations, les concentrations en particules

et en NO<sub>2</sub> peuvent rester élevées durant plusieurs jours, par confinement de l'air à l'échelle de la région. À cette pollution s'ajoute souvent une part importée significative en provenance d'Europe.

Au début du printemps, la coïncidence de ce système météorologique favorable à l'accumulation des polluants et d'épandages agricoles soutenus en périphérie parisienne est à l'origine d'épisodes particuliers de grande intensité. L'évaporation de l'ammoniac agricole vient contribuer à la formation de l'espèce « ammonium » sous forme particulière – *via* notamment la formation de nitrate d'ammonium, dont le pendant « nitrate » provient pour une part importante des émissions automobiles. Ce système perdure jusqu'au changement de régime météorologique.

Enfin, en été, la forte intensité lumineuse et les températures élevées des périodes anticycloniques sont favorables à une évolution rapide des émissions urbaines en composés oxydés et oxydants. Le suivi de ces composés est notamment réalisé par l'intermédiaire de l'ozone, espèce majoritaire de ces nuages de pollution oxydante, et dont les concentrations sont maximales à quelques dizaines de kilomètres sous le vent des grands centres urbains émetteurs d'oxyde d'azote et de COV. Lors de ces épisodes, les teneurs en ozone déjà présentes dans l'air importé sur une région sont également déterminantes pour que surviennent localement des dépassements des seuils réglementaires. Ces périodes sont également propices à la production d'un aérosol atmosphérique riche en composés organiques fortement oxydés, résultant à la fois de la transformation chimique des composés anthropiques émis en ville mais aussi de celle, rapide, des composés naturellement émis par

la végétation. C'est là un sujet d'étude actif et un point de vigilance sanitaire.

#### A.4. Exposition

##### La question sanitaire

Le programme Erpurs (Évaluation des risques de la pollution urbaine sur la santé) s'intéresse depuis le début des années 1990 aux effets sanitaires, observables à court terme, des niveaux de pollution subis par les habitants de l'Île-de-France. Les résultats, qui rejoignent ceux de Santé Publique France, montrent l'existence d'impacts significatifs de la pollution francilienne sur les différents indicateurs de santé, en particulier le recours aux urgences, et sur leur variabilité à l'échelle de quelques jours.

Les études épidémiologiques, dans leur ensemble, pointent enfin le rôle extrêmement prédominant de l'exposition à long terme à la pollution de l'air, au-dessous des seuils réglementaires, sur la santé des populations : développement de maladies cardiaques, respiratoires ou encore neurologiques, troubles de la reproduction, du développement de l'enfant, diabète de type 2, risque de cancer du poumon et baisse de l'espérance de vie. Les actions en faveur d'une réduction continue des niveaux urbains de pollution sont donc cruciales. Ces études reconnaissent également l'importante toxicité du mélange particulier que constituent les émissions liées au trafic, et le risque accru qu'elles imposent aux populations résidant à proximité des axes à fort trafic routier, questionnant par là-même les inégalités d'exposition associées aux lieux de vie.

La prise en compte croissante de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique a

repositionné comme enjeu de santé publique le risque de l'exposition chronique des populations urbaines aux polluants de l'air. Elle a également redéfini le champ des acteurs intervenant dans la maîtrise de la qualité de l'air, et les liens entre celle-ci et les politiques publiques. C'est ainsi que s'est développé le recours aux « évaluations quantitatives des impacts sur la santé » (EQIS), études qui s'appuient sur les relations causales existant entre l'exposition à un polluant et une gamme d'effets sanitaires, afin d'évaluer *a priori* les bénéfices attendus de différentes actions de réduction des sources de polluants de l'air.

Ainsi, une récente étude de l'ORS Île-de-France, menée avec Airparif, a montré une réduction importante de la mortalité attribuable à l'exposition prolongée aux particules PM<sub>2,5</sub> entre 2010 et 2019, soit une baisse de 40 % du nombre de décès annuels et un gain d'espérance de vie de près de huit mois en moyenne par habitant. La politique et les actions de lutte contre la pollution de l'air, telles qu'elles ont été menées ces dernières années, sont donc des mesures de santé publique particulièrement pertinentes et efficaces.

Si la qualité de l'air s'améliore, il reste bien des actions à mener. En effet, selon l'ORS, la pollution de l'air est encore responsable de près d'un décès sur dix en Île-de-France. Plus de 7 900 décès prématurés pourraient être évités chaque année en moyenne si de nouvelles mesures étaient prises pour abaisser les niveaux de pollution de l'air sous les valeurs recommandées par l'OMS (moyenne annuelle de 5 µg/m<sup>3</sup> pour les PM<sub>2,5</sub> et de 70 µg/m<sup>3</sup> pour l'ozone). La difficulté d'une telle tâche réside dans le caractère diffus de la pollution urbaine, qui résulte d'une multitude de sources et d'une grande densité

d'émetteurs. Les mesures complémentaires à mettre en place doivent intégrer de nouvelles dimensions, complexes, telles que la transformation des espaces, des réseaux et des pratiques.

Ces dernières années, les travaux de recherche croisant les champs de la santé et de l'environnement ont mis en évidence la nécessité d'accéder à de nouvelles métriques de la pollution atmosphérique, au-delà des concentrations classiquement utilisées. Le but est de mieux estimer les risques et les bénéfices sanitaires associés à différentes situations urbaines, afin de guider plus efficacement l'action publique. La fraction ultrafine des particules, leur concentration en nombre, leur composition chimique et même leur potentiel d'oxydation des cellules de l'organisme sont ainsi des paramètres d'intérêt majeur dans l'évaluation et la différenciation du risque d'exposition à l'air pollué.

### Exposition plurielle : les espaces clos

Bien que la question de l'exposition des individus à la pollution ait longtemps été réduite à la prise en compte de la qualité de l'air extérieur, la problématique des espaces clos complexifie cette évaluation. Les habitants d'une métropole fréquentent en effet une variété d'environnements intérieurs au cours de leur journée : le domicile, le lieu de travail ou d'études, mais aussi les lieux de mobilité. Les transports, plus particulièrement ceux liés aux trajets quotidiens entre le domicile et le site de travail (modes individuels motorisés ou non, transports en commun), peuvent apporter une contribution significative à l'exposition globale en raison du temps passé et des niveaux élevés de polluants rencontrés dans ces milieux. Avec

près de 10 millions de voyages quotidiens en transports en commun, les rames, couloirs et quais du métro constituent des espaces à très forts enjeux environnementaux. Point aggravant, ce sont pour la plupart des espaces souterrains, soumis à des émissions de particules intenses et spécifiques – car principalement métalliques – et débouchant la plupart du temps sur les trottoirs des grands axes de circulation franciliens.

Depuis quelques années, le déploiement d'un nombre important de campagnes d'observation de la qualité de l'air dans les transports a permis d'améliorer notre connaissance de ces environnements. Les résultats montrent qu'au-delà de sa contamination par l'air extérieur, l'air de ces environnements est particulièrement riche en particules contenant des métaux en proportions élevées – notamment le fer mais aussi le baryum, le cuivre, le chrome ou le manganèse – qui proviennent des frottements des trains sur les rails et de l'usure des freins des rames. Les concentrations massiques en  $PM_{10}$  atteignent en moyenne trois fois celles observées en extérieur, et peuvent très ponctuellement excéder  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne horaire dans certaines stations<sup>11</sup>.

D'importants efforts sont déployés pour caractériser les impacts toxicologiques de ces particules. Selon les premiers travaux menés en Europe, les effets à court terme sur les cellules, et notamment ceux qui sont liés au stress oxydant, à la cytotoxicité et à la génotoxicité, peuvent être plus importants que ceux qui sont induits par certaines des particules types de l'air urbain extérieur, issues par exemple des combustions des moteurs de véhicules<sup>12</sup>.

<sup>11</sup> Airparif, *Mesures dans les enceintes souterraines de la RATP*, juin 2022, [https://www.airparif.asso.fr/sites/default/files/pdf/Campagnes%20EFS\\_RATP.pdf](https://www.airparif.asso.fr/sites/default/files/pdf/Campagnes%20EFS_RATP.pdf)

<sup>12</sup> Avis révisé de l'ANSES, 2015. <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-25247-air-efs-anses.pdf>

Face à ces constats, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) a travaillé en 2022 à la formulation de repères de concentrations en particules dans les enceintes ferroviaires souterraines, afin de caractériser la qualité de l'air dans ces environnements, et d'accompagner l'évaluation des actions de réduction à la source<sup>13</sup>. En parallèle, la question de l'exposition des personnes dans les habitacles routiers est également critique. Elles se trouvent en effet dans un espace confiné et respirent un air prélevé au centre de la voie routière, voire à proximité des pots d'échappement des véhicules environnants lors des situations de congestion routière.

### Multi-exposition et vulnérabilité

Puisque le terme d'« exposition de la population » recèle en fait une large distribution de cas individuels, liée à la diversité des lieux et modes de déplacement choisis, des espaces fréquentés et de leur degré de confinement, se pose alors clairement la question des inégalités d'exposition qui peuvent affecter les habitants d'une agglomération.

Actuellement, l'hypothèse selon laquelle les populations défavorisées seraient plus exposées aux polluants atmosphériques que les populations aisées – d'une part en raison de leur localisation géographique, d'autre part en raison d'un potentiel de résilience plus faible (état de santé moins bon, mobilité résidentielle et de loisir plus faible) – varie en fonction des études et des contextes urbains. Une méta-analyse, réalisée à l'échelle des villes de l'ouest de

l'Europe, confirme l'inconsistance des relations entre les caractéristiques socio-économiques des quartiers (niveau d'étude, taux de chômage) et l'exposition aux polluants atmosphériques<sup>14</sup>.

À Paris pourtant, une relation significative entre augmentation de la concentration de NO<sub>2</sub> et risque de mortalité est observée, mais uniquement dans les quartiers défavorisés. La précarité socio-économique est, dans ce contexte urbain, identifiée comme un facteur majorant l'impact de la pollution sur la mortalité. Toutefois, dans l'ensemble de ces travaux, les auteurs insistent sur le besoin d'analyser les inégalités d'exposition à des échelles fines en tenant compte des caractéristiques individuelles et contextuelles.

Par ailleurs, aucune de ces recherches ne prend actuellement en compte les mobilités quotidiennes des populations, ni les différents lieux d'exposition au cours d'une journée (lieu de résidence, lieu de travail, déplacements). Dès lors, on peut faire l'hypothèse qu'en contraignant l'exposition à sa valeur au lieu de résidence, on introduit des erreurs dans l'estimation de l'exposition aux polluants atmosphériques et on ignore les gradients qui existent potentiellement entre catégories ou profils de population.

Cela peut entretenir une méconnaissance des facteurs de développement des inégalités de santé environnementales. Pour réduire cette lacune, la recherche en sciences de l'atmosphère s'est très récemment emparée du sujet des inégalités spatiales et sociales d'exposition, mobilisant

<sup>13</sup> ANSES, 2022. *Qualité de l'air des enceintes ferroviaires souterraines - Revue de la littérature sur les effets sanitaires - Proposition de concentrations en particules dans l'air à ne pas dépasser*, Rapport d'expertise collective. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2019SA0148Ra.pdf>

<sup>14</sup> Temam S., 2017. *Déterminants sociaux et asthme : approche épidémiologique*. Thèse soutenue à l'Université Paris-Saclay.

de nouveaux outils de modélisation et de mesure et favorisant l'innovation au service des territoires et de leurs populations. Pour les établissements franciliens recevant des populations sensibles tels que les écoles et les crèches, on peut noter un accompagnement important des différents acteurs de la qualité de l'air, via la réalisation de campagnes de mesures de l'exposition aux polluants (par Airparif et l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur) ou encore la rédaction de recommandations et de guides de bonnes pratiques (ADEME).

L'ORS a publié en 2022 les résultats d'un travail sur l'identification des risques cumulatifs d'un ensemble de facteurs de stress environnementaux<sup>15</sup>. L'objectif était de construire une méthodologie permettant de relever des situations de multi-exposition environnementale. Pour cela, des indicateurs intégraient les milieux en-

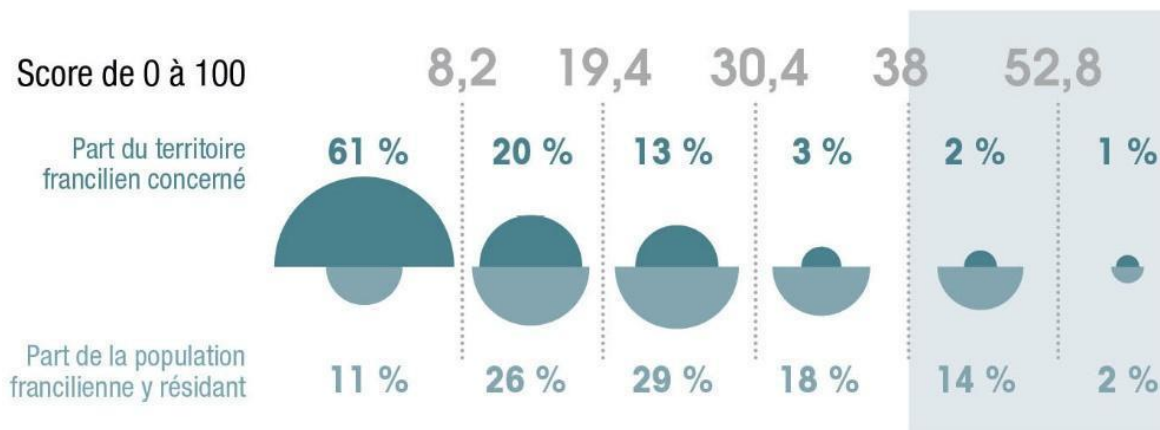
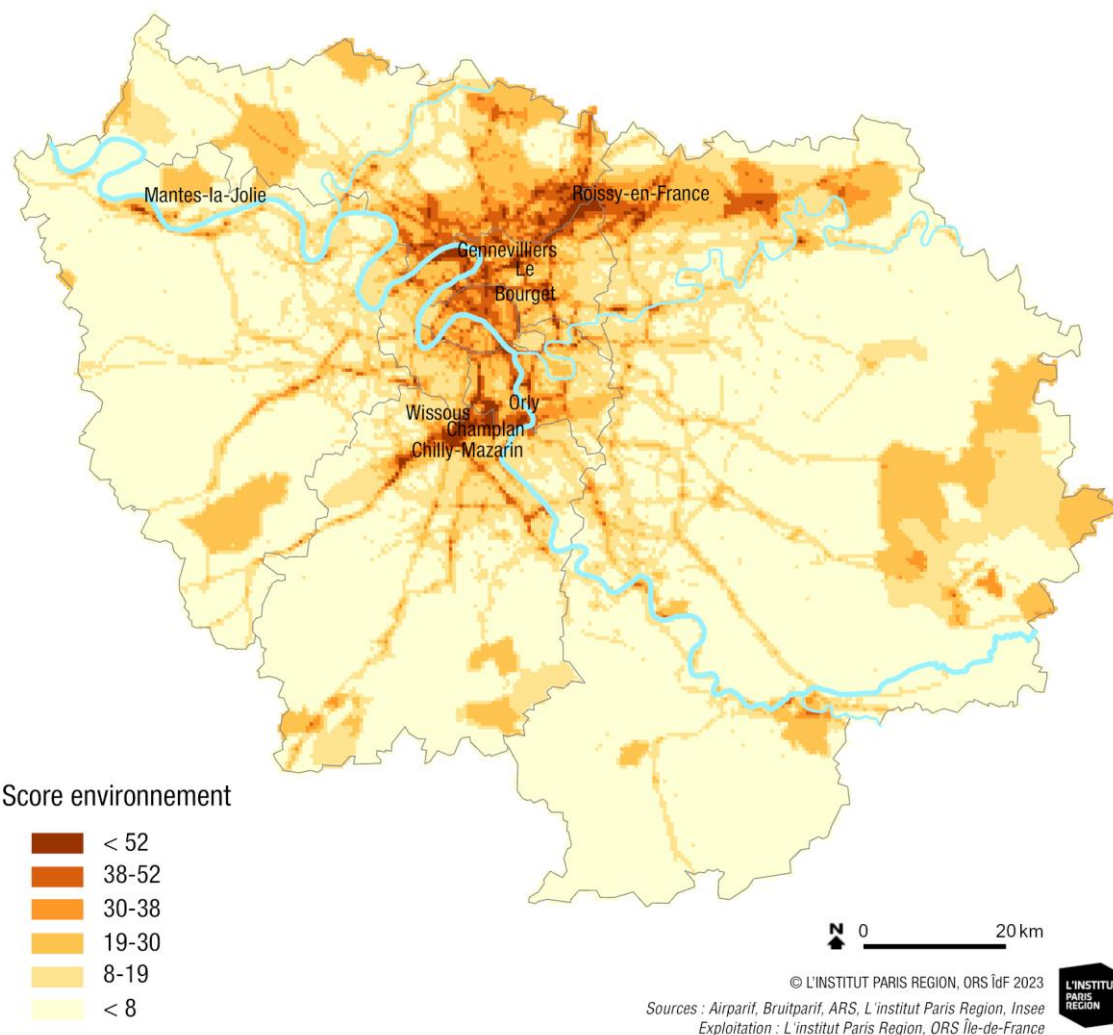
vironnants (qualité de l'air, bruit des transports, pollution industrielle des sols, installations industrielles, eau de consommation) mais aussi l'environnement impactant les modes de vie des individus (proximité d'espaces verts, risque d'être soumis à un îlot de chaleur urbain, ICU<sup>16</sup>, facilitation de la marche à pied). Les indicateurs étaient regroupés en un score d'environnement dont la spatialisation est présentée en illustration ci-dessous (*figure 4*).

Ce type de cartographie met en évidence les couloirs de survol aérien, les axes majeurs de trafic routier mais aussi des zones sur lesquelles les populations impactées sont vulnérables. L'identification des zones de multi-exposition constitue un moyen d'interpellation des acteurs publics<sup>17</sup>. Les produits de cette analyse sont également destinés à permettre l'avancée des connaissances sur l'interrelation entre paramètres environnementaux et vulnérabilité.

<sup>15</sup> Host S., Laruelle N., Mauclair C., Caudeville J., 2022. *Cumuls d'expositions environnementales en Île-de-France, un enjeu de santé publique : méthode d'identification des secteurs les plus impactés*. Observatoire régional de santé Île-de-France.

<sup>16</sup> Îlot de Chaleur Urbain (ICU), phénomène lié à la production et la rétention de chaleur dans les espaces urbanisés, qui conduit localement à de plus hautes températures, notamment nocturnes.

<sup>17</sup> [https://cartoviz2.institutparisregion.fr/?id\\_appli=prse3](https://cartoviz2.institutparisregion.fr/?id_appli=prse3)



**Figure 4.** Carte des cumuls d'exposition aux nuisances et pollutions (score d'environnement à la maille 500m x 500m) et part du territoire et de population dans les six niveaux de score (ORS Île-de-France).

## **B – Interactions entre le changement climatique et la pollution atmosphérique**

L'historique météorologique récent met en avant le risque d'intensification et de multiplication des sécheresses et vagues de chaleur sur le territoire francilien. Ces vagues de chaleur constituent un problème de santé publique majeur dans les zones urbaines densément habitées, où les populations subissent les effets combinés d'un stress thermique renforcé par le phénomène d'ICU et d'une mauvaise qualité de l'air.

En effet, les épisodes météorologiques très chauds et très secs facilitent la persistance des particules dans l'atmosphère (qui disparaissent principalement par lessivage lors des pluies). En périphérie urbaine, ces événements sont accompagnés de forts niveaux d'ozone, qui pourraient même de façon régulière poser des problèmes de respect des seuils réglementaires. Enfin, les vagues de chaleur mettent au défi la résilience urbaine. De nouveaux axes de recherche opérationnelle ont désormais investi la question du confort thermique dans la ville en utilisant des approches intégrées mêlant urbanisme, réflexion sur les usages de la ville, hydrologie urbaine, sciences des matériaux... Il s'agit notamment de rendre la ville plus favorable à la santé mais aussi de proposer des alternatives à l'utilisation de climatiseurs, qui engendrent des émissions de CO<sub>2</sub> et de polluants.

Pollution atmosphérique et climat s'entrelacent ainsi fortement dans les espaces urbains, avec des impacts qui s'additionnent sur la qualité de vie, le bien-être et la santé humaine, et un risque fort d'injustice sociale quant au cumul des risques ou à la

capacité des individus à trouver des stratégies de contournement des nuisances qu'ils subissent. La définition de stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, cohérentes avec les politiques de lutte contre la pollution atmosphérique constitue une question de recherche active et ouverte.

## **C – « Solutions » et questions de recherche**

Les verrous sont nombreux pour produire une analyse poussée des problématiques environnementales urbaines. La réflexion sur la gouvernance transversale des problèmes posés par l'amélioration conjointe de la qualité de l'air et de la lutte contre le changement climatique est encore émergente. Les questions d'inégalités d'accès et de santé, et de discrimination sociale face au risque environnemental, sont des défis posés aux politiques urbaines. Pour faire face à tous ces questionnements, le défi le plus urgent à relever est celui du croisement des disciplines et des volets urbains : approches physiques de l'environnement, représentation de l'aménagement du territoire, évolution des technologies (bâtiments, transports...) et des solutions énergétiques, réflexion sur les conditions de réussite des politiques publiques, et prise en compte des inégalités sociales et environnementales subies par les populations.

### **C.1. Solutions liées à l'aménagement urbain et aux transports**

Pour continuer à améliorer la qualité de l'air, il est désormais nécessaire de compléter les évolutions technologiques par une recherche de configurations et pratiques urbaines plus favorables à l'environnement et à la santé. Dans ce contexte, l'aménagement urbain et la maîtrise de

La mobilité sont devenus des leviers privilégiés pour réduire les émissions de polluants. Ces leviers sont déjà liés par la recherche d'une diminution de la demande en énergie, qui s'appuie sur la cohérence entre habitats et transports.

La durabilité urbaine a longtemps été pensée dans l'opposition de deux grands modèles urbains. Le premier est celui d'une métropole étalée, peu (ou pas) efficace du point de vue énergétique, reposant de fait sur la consommation des sols et la fragmentation des espaces naturels, et qui s'accompagne irrémédiablement d'une augmentation de la demande en transports – souvent individuelle. Le second modèle est celui d'une ville dense et peu étalée, favorisant la lutte contre l'artificialisation des sols et pour la préservation de la biodiversité, mais aussi idéalement sobre du fait de sa structure dense permettant une réduction presque mécanique de la portée des déplacements quotidiens.

Cette ville, favorable aux mobilités actives, est pensée sur le principe de la mixité fonctionnelle des espaces (zones d'habitation, d'emploi, de loisirs, de commerce...) et plus largement de la densification de l'ensemble des fonctions urbaines, dont l'offre globale de transports. Par la proximité de services qu'elle permet, elle doit amener une meilleure qualité de vie urbaine. Toutefois, les villes denses ont parfois du mal à échapper aux risques de nuisances sonores, à la congestion routière, aux inégalités d'accès ou à la pollution atmosphérique. Par ailleurs, ces deux modèles peinent à restituer toute la complexité des espaces urbains existants.

Ainsi, la région francilienne peut se décrire comme mêlant ces deux modèles, avec un

cœur d'agglomération très dense qui n'échappe pas aux problématiques socio-environnementales mentionnées précédemment, et une périphérie d'agglomération plutôt étalée, avec des villes nouvelles ainsi que des extensions récentes de bourgs et villages soutenant une forte demande en transports. Pour évoluer vers un modèle plus durable, la transformation des espaces urbains doit se penser à partir des particularités d'un territoire, et composer avec les bâtis et réseaux existants, ainsi qu'avec les populations, leurs spécificités sociodémographiques et leurs pratiques (mobilité, travail...).

Dans un cadre réglementaire qui pousse à une gestion économe de l'espace, l'enjeu est donc de trouver une organisation et une urbanisation du territoire favorables à la santé et au bien-être. Elles devront allier la maîtrise de la consommation énergétique et celle des activités émettrices de polluants atmosphériques, favoriser le développement de formes de mobilité alternatives au véhicule particulier, renforcer la résilience urbaine face aux crises environnementales, permettre une gestion durable des sols et assurer la continuité des espaces urbains avec les espaces ruraux et agricoles, tout en évitant les pièges de la ville dense. C'est notamment l'ambition du SDRIF-E, au travers par exemple du polycentrisme, que de promouvoir un nouvel équilibre avec une métropole dense et économe en énergie, exploitant le potentiel de développement des transports collectifs et des quartiers des grandes gares régionales, et riche en espaces ouverts et naturels ainsi qu'en continuités biologiques (trames vertes par exemple).

Justement, dans le débat sur l'aménagement des villes durables, la végétalisation

urbaine s'impose comme une solution répondant à la fois au besoin d'appropriation par les usagers d'un espace public enrichi, et aux questions de santé, de bien-être, de confort thermique et de dépollution. L'efficacité de la ville végétalisée pour limiter l'îlot de chaleur urbain, et ses effets attendus de « barrière verte » pour protéger les populations d'une trop grande exposition aux sources automobiles par exemple, font l'objet de recherches transversales innovantes.

Pourtant, le démarrage plus précoce de certaines saisons ou la sécheresse accrue, liés au dérèglement climatique, pourraient fragiliser la végétation urbaine par l'augmentation des stress (hydrique, thermique, pathogènes...) et pourraient également se combiner à la pollution atmosphérique dans l'exacerbation des allergies et manifestations de l'asthme. Ce dernier point doit être appréhendé comme un risque sanitaire fort, en particulier pour les personnes sensibles ou vulnérables<sup>18</sup>. De même, l'émission de COV très réactifs par la végétation, et leur possible participation au panache urbain oxydant (ozone et aérosol urbain oxydé), constituent un risque environnemental à considérer lorsque l'on souhaite végétaliser une zone urbaine.

La réflexion sur la maîtrise de la mobilité s'articule autour de grands thèmes tels que la réorganisation de l'offre de transports, la multimodalité ou encore l'implémentation d'une circulation choisie. Implantés en Europe dès la fin des années 1990, les Zones à faibles émissions (ZFE) reposent sur la restriction d'accès au centre-ville pour certaines catégories de véhicules jugés plus polluants. En 2018, plus de 230 villes proposaient une ZFE,

dans 13 pays différents, au tout premier rang desquels l'Italie et l'Allemagne. La conception, ainsi que les modalités et surfaces d'application varient toutefois grandement d'une ville à l'autre. Quant aux retours d'expérience, ils montrent que les coûts de mise en œuvre et d'accompagnement de l'action publique sont assez rapidement compensés par des coûts sanitaires évités.

L'ampleur de la réduction obtenue sur les niveaux de concentration des polluants atmosphériques dépend bien sûr de l'emprise spatiale de la ZFE et de l'ampleur initiale de la problématique. Cependant, les observations montrent que l'on peut réduire les concentrations des polluants routiers classiques (NOx, PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>) de 10 à 15 %, et même de 50 % pour la teneur des particules atmosphériques en carbone suie. Cela permet notamment d'infléchir le nombre de jours de dépassement de la valeur limite journalière pour les PM<sub>10</sub>. La ZFE de la région parisienne, initialement limitée à la ville de Paris, s'étend désormais sur un territoire délimité par l'autoroute A86. Créée en 2016, elle poursuit depuis un calendrier d'exigence croissante sur la performance à l'émission des moteurs des véhicules.

En 2018, l'ORS Île-de-France, en partenariat avec Airparif et Santé Publique France, a mené une évaluation quantitative d'impact sanitaire (EQIS) prospective sur différents scénarios de mise en œuvre de la ZFE. Il en ressortait que des réductions de 23 % et de 28 % des teneurs en NO<sub>2</sub> de pointe et de fond, respectivement, pouvaient être attendues dans Paris. Des réductions significatives du nombre de décès attribuables à la pollution de l'air et de

<sup>18</sup> Candeias J., Zimmermann E.J., Bisig C. *et al.*, 2022. The priming effect of diesel exhaust on native pollen exposure at the

air-liquid interface. *Env. Res.*, 211, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112968>

cas de pathologies chroniques telles que l'asthme chez l'enfant ou de maladies cardiaques étaient aussi anticipées, ainsi que celles des hospitalisations et des recours aux urgences<sup>19</sup>.

L'ORS Île-de-France, en étudiant la distribution des bénéfices sanitaires au sein de différentes catégories de défaveurs sociales, a montré un rééquilibrage en faveur des populations les moins favorisées du fait de l'élargissement de la ZFE. Toutefois, si elle force le renouvellement du parc roulant, l'implémentation d'une ZFE rend aussi l'accès aux services et espaces centraux plus difficiles pour les catégories de population les plus défavorisées. La prise en compte des enjeux sociaux autour de la mobilité, absente de la plupart des évaluations *ex-ante* et *ex-post* des ZFE (principalement concentrés sur les enjeux sanitaires) est un besoin aujourd'hui clairement identifié<sup>20</sup>.

Pour autant, la question des transports est incomplètement traitée, car souvent abordée uniquement du point de vue de la mobilité individuelle. La logistique urbaine recouvre pourtant une partie considérable des enjeux énergétiques en Île-de-France. Elle se trouve être également indissociable des questions de qualité de l'air sur les voies de circulation. Cependant, difficile à appréhender techniquement, sa prise en compte dans les documents planificateurs réalisés entre 2012 et 2014 (Plan de

Déplacement Urbain, Schéma Directeur Régional et Schéma Régional Climat Air Énergie d'Île-de-France) reste très qualitative. Il persiste dans ce domaine un manque de données sur le transport de marchandises (notamment les livraisons à domicile) et des difficultés à produire des évaluations des bilans carbone territorialisés. Plus spécifiquement, l'estimation des émissions de polluants liées au transport de marchandises, en situation actuelle ou prospective, est en grande partie freinée par l'absence d'outils de modélisation explicites<sup>21</sup>. Ce domaine de recherche actif nécessite des développements méthodologiques.

## C.2. Solutions liées aux pratiques

Au tout premier plan il y a bien sûr la question de la consommation d'énergie (et donc de la contribution à la pollution atmosphérique) des individus via leurs pratiques domestiques et leur mobilité. Une partie importante des ambitions de sobriété énergétique ou de report de l'usage des véhicules particuliers vers des véhicules partagés ou des mobilités actives repose ainsi sur une forte appropriation des enjeux environnementaux et sanitaires par la population, mais surtout sur sa possible déclinaison en changements de pratiques au quotidien. Parallèlement, des études sociologiques ont montré que la modification des pratiques liées au chauffage domestique (et notamment au chauffage au bois)<sup>22-23-24</sup> nécessite surtout

<sup>19</sup> Host S., Honoré C., Joly F. et al., 2020. Implementation of various hypothetical low emission zone scenarios in Great Paris: Assessment of fine-scale reduction in exposure and expected health benefits. *Env. Res.*, 185,109405. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109405>

<sup>20</sup> Rejeb R., Bouscasse H., Mathy S., Treibich C., 2023. *Les déterminants de l'acceptabilité sociale des ZFE en France : le cas de la future ZFE de Grenoble*. fhal-03996727f

<sup>21</sup> Dablanc L., 2023. La logistique, un mal pensé de la transition énergétique en Île-de-France. Chap. 8 in : *Vers une Île-de-France post-carbone ? Freins et leviers d'une transition énergétique régionale*, ss la dir. Gallez C. et Coutard O., Ed. L'Œil d'or.

<sup>22</sup> Brisepierre G., 2013. *Analyse sociologique de la consommation d'énergie dans les bâtiments résidentiels et tertiaires. Bilan et perspectives*. ADEME. 2013.

<https://shs.hal.science/halshs-04853287>

<sup>23</sup> La Branche S., 2016. Étude sociologique sur la pollution due au chauffage au bois dans l'agglomération grenobloise : synthèse des principaux résultats. *Pollution Atmosphérique : climat, santé, société*, 228.

<https://hal.science/hal-01962391v1/document>

<sup>24</sup> ADEME, 2021. Étude sociologique sur les usages du chauffage au bois. ESUC Arche, mise en place d'un plan d'action et de communication pour Arche Agglo. Rapport, 44 p.

<https://librairie.ademe.fr/>

de prendre en compte les représentations sociales dans lesquelles s'inscrivent les comportements des utilisateurs, et leur perception du poêle à bois.

La sensibilisation environnementale et la communication sur des données techniques ou sanitaires seules apparaissent insuffisantes, voire aléatoires dans leur impact, car elles peuvent être brouillées par un mauvais niveau de compréhension des enjeux, ou parce que les individus sont concernés par d'autres enjeux. Dans ces démarches, l'accompagnement financier joue surtout sur la capacité à réaliser le changement une fois qu'il a été décidé. On le voit, la question de l'accompagnement des changements des pratiques des populations est critique.

Elle nécessite de comprendre ce qui détermine les logiques d'action des individus, mais aussi ce qui permet de transposer d'éventuels changements individuels jusqu'à l'échelle d'un collectif. L'accès à la connaissance de sa propre exposition aux polluants en air extérieur et/ou intérieur, via la mise à disposition de capteurs individuels, pourrait faciliter la mise en place d'actions en faveur de la santé et de l'amélioration de la qualité de l'air. Les impacts de telles démarches sont bien loin d'être totalement compris, mais les premières études faites sur le sujet concluent que, pour être efficaces et mener au changement des comportements, elles doivent notamment être soutenues par l'existence de solutions de mobilité alternatives faciles et peu coûteuses pour l'individu<sup>25</sup>.

Le changement de pratiques agricoles est également de nature à constituer un levier

environnemental. Les émissions liées aux activités agricoles sont associées à une grande variété d'impacts, affectant différents compartiments environnementaux et jouant à la fois sur la qualité des milieux (dégradation de la qualité des eaux par les nitrates et pesticides) et sur le changement climatique (notamment par le rejet de protoxyde d'azote et de méthane).

Le rôle de l'agriculture dans la dégradation de la qualité de l'air a émergé plus récemment. L'activité agricole étant la principale émettrice d'ammoniac (93 % des totaux d'émission nationaux en 2019), elle constitue de fait le seul levier de lutte contre les épisodes printaniers de particules fines. Dans les autres secteurs d'activité, les émissions d'ammoniac sont réglementées depuis longtemps et la marge de manœuvre sur leur réduction est modeste : autour de 13 % dans la dernière révision de la directive NEC (*National Emission Ceilings*) de 2016 sur la réduction des émissions nationales de certains polluants atmosphériques. C'est en agissant sur les pratiques agricoles que l'on peut espérer atteindre cet objectif de réduction, tant par la réflexion sur les engrais utilisés que par une gestion du calendrier ou des techniques d'épandage. L'efficacité des changements de pratiques agricoles nécessite une approche systémique qui ne fasse pas l'impasse sur la faisabilité technique et économique des mesures qui peuvent être proposées.

Entre 2017 et 2021, l'INERIS a investigué – à l'aide d'un ensemble de modèles pluridisciplinaires – les effets de différentes mesures sur les pratiques de fertilisation. Les résultats indiquent que la mise en place d'actions

<sup>25</sup> ADEME, Saïdi N, Planchon M., Deloitte Développement Durable, Allard. L., 2017. *Étude des liens entre données individuelles de la qualité de l'air, changements de comportement et mises en œuvre de pratiques favorables à l'air*. Rapport. 102 p.

d'urgence visant à suspendre les épandages d'engrais en cas d'épisode de pollution de l'air avéré (sans qu'il soit nécessaire d'anticiper l'événement, et de suspendre *a priori* les épandages) serait un outil de gestion efficace de la qualité de l'air. Cependant, les retombées sur la productivité risquent d'être importantes et réduiront nécessairement l'acceptation de ces mesures dans la communauté concernée. Agir sur la volatilisation des engrais pendant les épisodes de pollution – par la mise en œuvre de techniques d'épandage moins émissives ou par l'enfouissement systématique des engrais dans le sol – peut constituer une proposition plus consensuelle et moins délétère pour les rendements.

Toutefois, c'est vers les mesures sur le long terme que l'on devra sans doute se tourner pour rencontrer une acceptabilité plus grande et une efficacité plus continue. Privilégier les engrais moins volatils n'est pas systématiquement efficace. Ainsi, des travaux de modélisation numérique ont montré que le remplacement de l'urée par des ammonitrates est peu efficace. D'abord parce qu'il concerne en grande partie des régions où la question de la qualité de l'air n'est pas critique, mais aussi parce que, dans les régions où elle l'est, la réduction des émissions serait insuffisante pour infléchir la chimie atmosphérique et l'intensité locale de formation des particules.

### C.3. Exposition, santé globale

La question de l'exposition réelle des individus à la pollution au sein de la structure urbaine reste un verrou à lever. D'une part, la description statistique des trajectoires individuelles des habitants n'a jusqu'ici que très rarement été mise en œuvre dans l'optique d'un croisement

avec la qualité de l'air (sauf quelques études qui couplent capteurs embarqués et données GPS sur de courtes durées). D'autre part, le calcul de la concentration des polluants dans les principaux micro-environnements urbains extérieurs n'est pas d'un accès facile, et les environnements intérieurs (de l'habitable aux transports en passant par les logements) sont encore très peu décrits dans la littérature.

Sur la dernière décennie, on note toutefois une préoccupation grandissante pour cette question. De grandes campagnes visent actuellement à caractériser la qualité de l'air dans les transports souterrains. En parallèle, de nouveaux développements méthodologiques ont été entrepris, dans les communautés institutionnelles et de recherche sur la qualité de l'air, pour appréhender l'exposition individuelle prenant en compte les budgets espace-temps des individus dans l'espace urbain. L'évolution des outils et des concepts devrait permettre d'avancer rapidement sur ce thème et de produire de nouveaux diagnostics environnementaux et sanitaires.

L'estimation quantitative de l'exposition de l'ensemble d'une population urbaine, et du risque sanitaire associé, sont des éléments fondamentaux de l'aide à la décision environnementale et de la gestion des questions de santé publique en milieu urbain, comme le rappelle l'ORS dans son bilan sur la mortalité liée à la pollution en Île-de-France<sup>26</sup>. Selon cette étude, le respect des valeurs annuelles recommandées par l'OMS en Île-de-France permettrait d'éviter 6 220 décès en lien avec les PM<sub>2,5</sub>, 2 350 décès en lien avec le NO<sub>2</sub> (ces deux chiffres étant liés donc ne pouvant s'additionner) et environ 1 700 décès en lien avec l'ozone.

<sup>26</sup> Host et al., 2022 op. cit.

# 03

## Pollution des eaux

Alexandra Courtin

Contributeurs : Christine Aubry (AgroParisTech), Sophie Ayrault (LSCE),  
Manuel Pruvost-Bouvattier (IPR), Cécile Quantin (GEOPS),  
Nabil Touili (INRAE).

## Introduction

Dans une région aussi densément peuplée et qui reste encore très fortement industrielle, la pression sur la qualité du milieu et notamment en termes de préservation et de restauration de la ressource en eau est au cœur des enjeux environnementaux. Même si les activités manufacturières ont amorcé de profondes mutations depuis 2008, leurs activités passées ont fortement marqué la qualité des rejets vers le compartiment hydrographique. Avec 19 % de la population française métropolitaine, la région Île-de-France est la plus densément peuplée de notre territoire. Cette densité implique d'occuper les sols d'une façon toujours plus optimale et des enjeux forts sur la quantité et la qualité de l'eau, notamment à usage domestique, à la fois en termes de consommation mais aussi de rejets et de traitement de ces derniers.

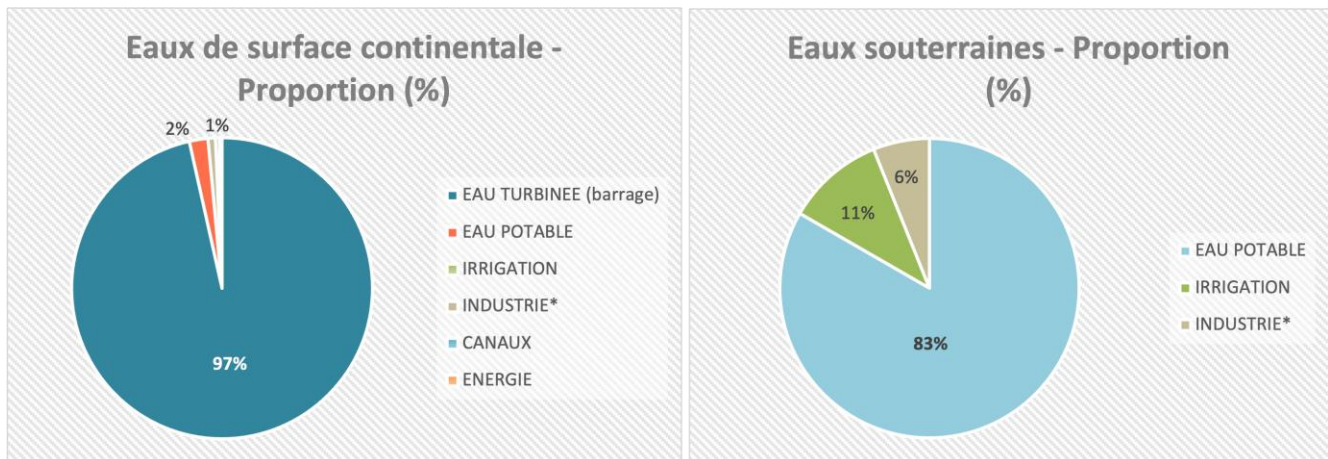
À l'heure actuelle, beaucoup d'incertitudes demeurent sur les flux de contaminants organiques et/ou inorganiques, sur les transferts qui s'opèrent entre les divers compartiments de l'environnement. De nombreuses études abordent ces problématiques, par exemple en ayant recours aux (bio-)indicateurs permettant de rendre compte de la qualité des milieux. Ces travaux se sont fortement concentrés sur la Seine, fleuve majeur

de la région, et soumis aux forçages anthropiques et climatiques. La qualité des masses d'eau bénéficie des diverses actions législatives : la loi sur l'eau (3 janvier 1992)<sup>27</sup>, la DCE (Directive cadre sur l'eau, 21 avril 2004) et l'élaboration de SDAGE et SAGE (Schéma – directeur – d'aménagement et de gestion de l'eau) qui concernent de nombreux bassins versants. Les critères d'évaluation des masses d'eau pour la qualité de l'état chimique et de l'état écologique ont constamment évolué depuis leur mise en place en établissant différents indicateurs reposant sur les concentrations pour la chimie (*voir l'encart ci-après*).

Les usages de l'eau sont variés et concernent principalement l'alimentation en eau potable (principalement les eaux souterraines), les usages liés à l'irrigation, le secteur industriel et les activités économiques et les eaux turbinées (de barrage) (principalement les eaux de surface) (*figure 5*). Les volumes concernés en 2022 étaient de 28 milliards de mètres cube (28 351 666 301), avec une majorité d'eaux de surface (28 038 859 493 m<sup>3</sup>) et une moindre quantité (312 806 808 m<sup>3</sup>) d'eaux souterraines. À l'échelle de l'Île-de-France, le travail de suivi de qualité des masses d'eau des bassins versants est complexe. Les données disponibles concernent 783 bassins versants élémentaires et 223 masses d'eau.

<sup>27</sup> Gestion de l'eau en France, Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche,

23 déc. 2020. <https://www.ecologie.gouv.fr/gestion-leau-en-france#e1>



**Figure 5.** Répartition pour 2022 des volumes d'eau prélevés selon les usages pour les eaux de surface (\*industrie et activités économiques, hors irrigation, hors énergie) et les eaux souterraines en Île-de-France (D'après BNPE, eaufrance.fr)

### Bon état chimique des masses d'eau et indicateurs du risque environnemental

Le risque environnemental est défini comme le produit de la toxicité d'une substance par l'exposition à cette substance. Il est évalué par deux niveaux de concentrations : les PNEC (*Predicted No Effect Concentrations*), définis à partir de bio-essais, et les PEC (*Predicted Environmental Concentrations*), définis en fonction du tonnage et l'utilisation qui est faite de la substance considérée, son comportement dans l'environnement, ses propriétés physico-chimiques.

Les PNEC permettent d'évaluer la toxicité d'une substance et le seuil au-delà duquel elle n'est plus sans effet sur l'environnement. Les PEC définissent l'exposition des milieux naturels à une substance donnée. Ces valeurs sont calculées et vérifiées par des organismes comme l'INERIS et sont affectées d'une valeur d'incertitude. Ces concentrations sont associées à des Normes de Qualité Environnementale (NQE) définies par la Directive cadre sur l'eau (DCE) et correspondant à « la concentration d'un polluant ou d'un groupe de polluants dans l'eau, les sédiments ou le biote qui ne doit pas être dépassée » au regard de l'écotoxicité de ces substances à la fois sur les milieux aquatiques et sur la santé humaine.

La mise en place de la DCE repose sur deux types de NQE qui doivent être respectés : la NQE en moyenne annuelle (NQE-MA) qui rend compte de la toxicité chronique, et la NQE en concentration maximale admissible (NQE-CMA), qui rend compte de la toxicité aiguë. Des NQE « biote » concernent des substances chimiques bioaccumulables.

.../...

Des NQE sont définies pour 53 substances ou familles de substances (liste des polluants chimiques commune à tous les États membres de l'Union européenne). S'y ajoutent des critères de « polluants spécifiques de l'état écologique » (PSEE) établis par la France – comme chaque État membre peut le faire, et dont les NQE diffèrent de celles des polluants utilisés pour la qualification de l'état chimique.

Quatre métaux seulement (cadmium, plomb, nickel, mercure et leurs composés associés) sont pris en compte, pour 49 molécules organiques : pesticides, solvants, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), produits ignifugeants tels que les polychlorobiphényles (PCB) et les polybromodiphényléthers (PBDE), composants des plastiques tels que les phtalates. Parmi les substances pesticides, plus de la moitié sont interdites d'usage.

Enfin les NQE des PSEE rendent compte d'une toxicité évaluée au regard de la protection des prédateurs secondaires, et n'englobent ni la consommation humaine ni la potabilité, à l'inverse des NQE de l'état chimique. Ces PSEE rassemblent quatre métaux polluants (arsenic, chrome, cuivre, zinc) et 16 polluants spécifiques synthétiques, parmi lesquels le métazachlore, le glyphosate et le xylène.

## **A – Inventaire « cartographié » des pollutions. L'Île-de-France et le bassin-versant de la Seine : des hydro-écosystèmes complexes**

À l'échelle d'un bassin versant, de nombreuses voies et sources de contamination existent et leur contribution respective est souvent difficile à évaluer avec les seules concentrations de polluants. Les pressions peuvent être liées aux rejets de stations d'épuration, aux activités urbaines, domestiques, industrielles ou encore agricoles.

Dans les régions urbanisées comme l'Île-de-France, les rivières sont les principaux puits ou réceptacles de contaminants de formes et propriétés variées (métaux, mé-

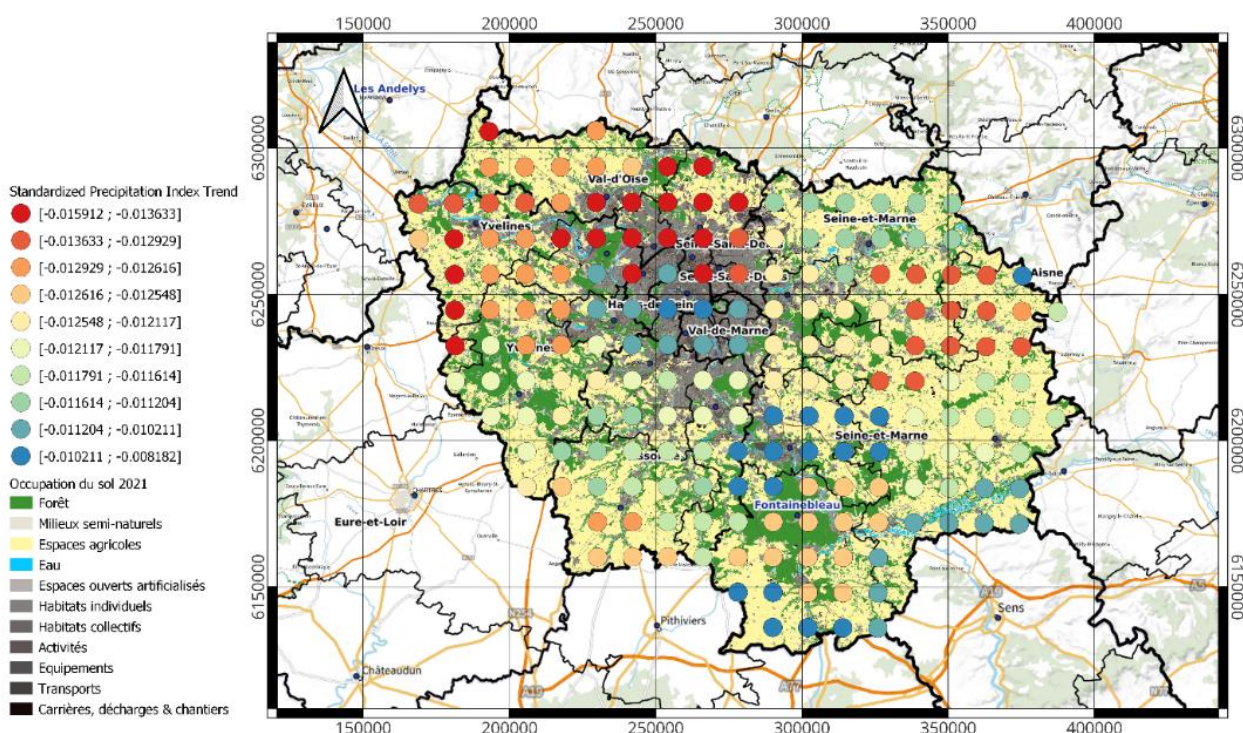
talloïdes, perturbateurs endocriniens, pesticides, HAP, etc.), principalement par ruissellement sur les surfaces imperméabilisées de plus en plus nombreuses (21 % des surfaces sont artificialisées<sup>28</sup>), du fait de l'érosion des sols contaminés mais aussi par les apports atmosphériques, les pratiques agricoles, domestiques et industrielles (*figure 6*).

Le bassin de la Seine est ainsi fortement impacté par une urbanisation et une industrialisation depuis plus d'un siècle, à l'origine d'une contamination massive en macropolluants (tels que les orthophosphates et les nitrates) et en micropolluants (métaux, résidus de médicaments, pesticides, produits d'entretien, etc.) de

<sup>28</sup> Institut Paris Région, Occupation du sol en Île-de-France 2021, Cartographie thématique régionale. <https://www.institutparisregion.fr/nos-travaux/publications/occupation-du-sol-en-ile-de-france-2021/>

l'hydrosystème<sup>29-30-31-32-33</sup>. Cette pollution est diffuse et durable, avec des stocks parfois mal connus et mal maîtrisés, ponctuels ou continus à bas bruit. Ces pollu-

tions ne touchent pas que les eaux de surface. Les eaux souterraines, dont plus de la moitié sont prélevées pour l'alimentation en eau potable, sont également fortement impactées.



**Figure 6.** Indicateur de précipitations normalisé (*Standardized Precipitation Index, SPI*), tendance sur 100 ans (Test Mann Kendall<sup>34</sup>), et occupation du sol en Île-de-France en 2021 (12 000 km<sup>2</sup>). Données d'occupation du sol d'après l'inventaire réalisé en 2021 par l'IPR <https://www.institutparisregion.fr/nos-travaux/publications/occupation-du-sol-en-ile-de-france-2021/>.

Le bassin versant de la Seine bénéficie à la fois des travaux menés par les chercheurs pour mieux comprendre la dynamique de pollution, son origine, les processus impliqués, mais également d'un suivi réglementaire réalisé dans le cadre

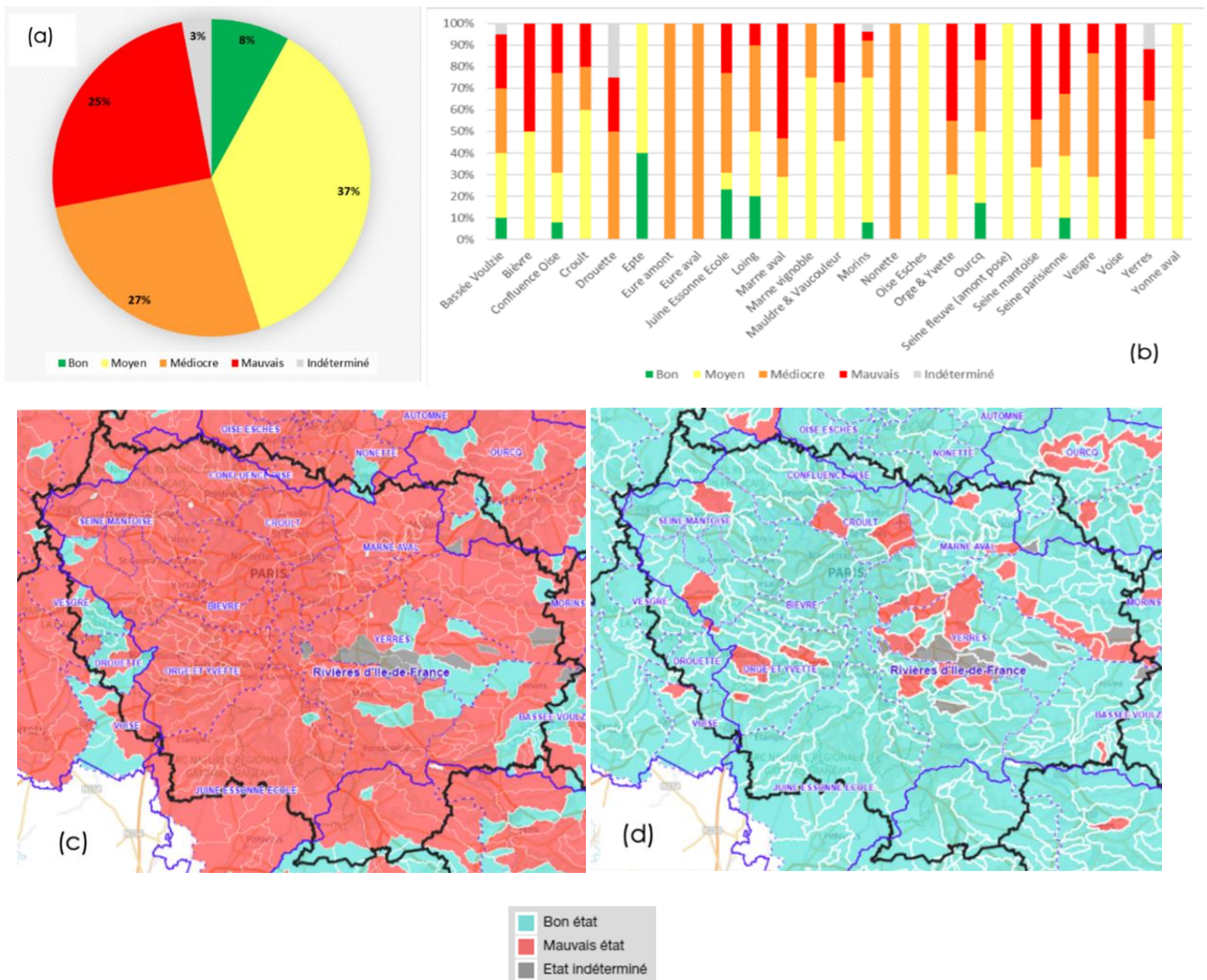
du SDAGE et défini par la DCE. Cette part réglementaire permet d'établir un indice de bon état écologique d'après différents paramètres biologiques (dont la surveillance de la population des espèces) et

<sup>29</sup> Ayrault S., Roy-Barman M., Le Cloarec M.-F. *et al.*, 2012. Lead contamination of the Seine River, France: Geochemical implications of a historical perspective. *Chemosphere*, 87(8), 902-910.  
<sup>30</sup> Grosbois C., Meybeck M., Horowitz A J. *et al.*, 2006. The spatial and temporal trends of Cd, Cu, Hg, Pb and Zn in Seine River floodplain deposits (1994–2000). *Science of The Total Environment*, 356 (1–3), 22-37.  
<sup>31</sup> Horowitz A.J., Meybeck M., Idlafkih Z., Biger E., 1999. Variations in trace element geochemistry in the Seine River Basin based on floodplain deposits and bed sediments. *Hydrological Processes*, 13(9), 1329-1340.

<sup>32</sup> Meybeck M., Lestel L., Carré C. *et al.*, 2018. Trajectories of river chemical quality issues over the Longue Durée: the Seine River (1900S–2010). Spatial and temporal patterns of anthropogenic influence in a large river basin. A multidisciplinary approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 23468–23484.  
<sup>33</sup> Thévenot D.R., Moillero R., Lestel L. *et al.*, 2007. Critical budget of metal sources and pathways in the Seine River basin (1994–2003) for Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn. *Science of The Total Environment*, 375(1–3), 180-203.  
<sup>34</sup> Courtin A., 2023. SPI Trend DCLIM [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7832062>

physico-chimiques (tels que la concentration en substances polluantes, en oxygène, la température, etc.). Quoique imparfait, cet indice met en évidence des bassins versants pour lesquels une amélioration de la qualité des eaux de surface et

souterraines est notable, du fait notamment de la baisse des rejets des stations d'épuration et des industries. Néanmoins, selon le dernier SDAGE, les efforts accomplis doivent être poursuivis et intensifiés pour rencontrer les objectifs de la DCE en 2027 (figure 7).

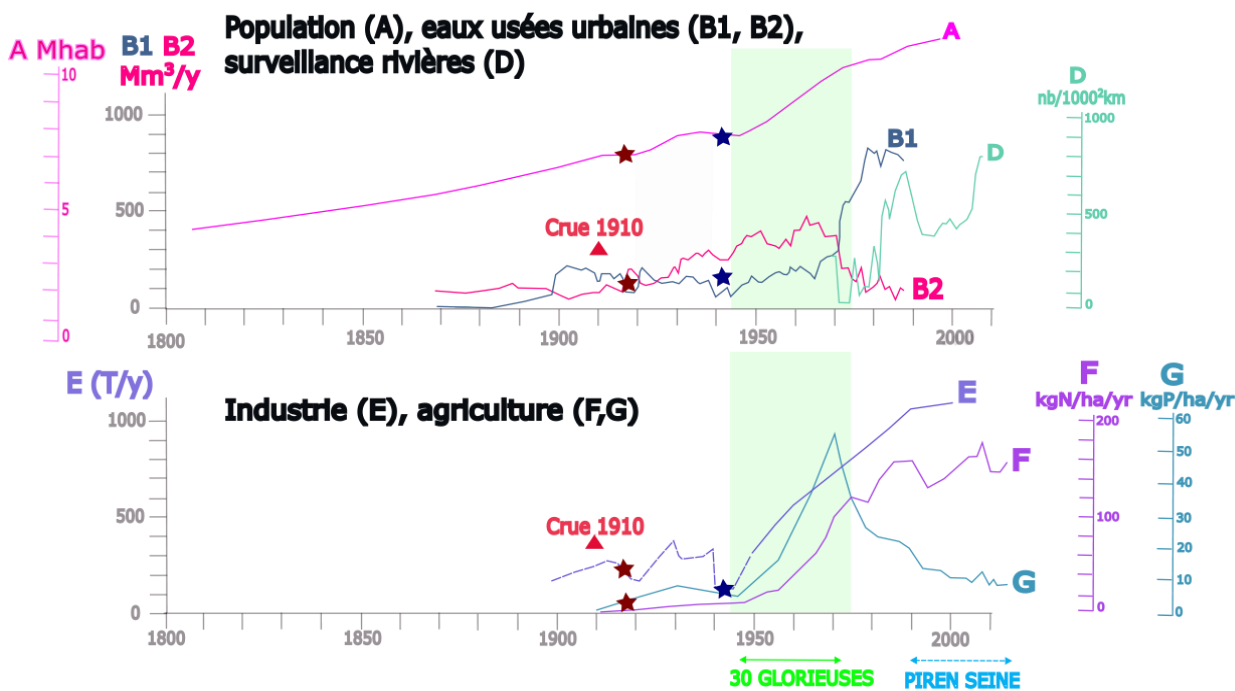


**Figure 7.** (a) Qualité écologique des rivières en Île-de-France (masses d'eau n = 223) et (b) par unité hydrographique (n = 223, 25 unités) (d'après données du SDAGE<sup>35</sup>) ; (c) et (d) État chimique des eaux superficielles en 2019 (c) avec ubiquistes et (d) sans ubiquistes (cartes : <https://geo.eau-seine-normandie.fr/#/home/MESU>).

<sup>35</sup> <https://sdage-sage.eau-loire-bretagne.fr/home/le-sdage-2022-2027/les-documents-du-sdage-2022---2027/etat-des-lieux-2019.html>

Jusqu'au début des années 1980, les eaux du bassin de la Seine ont été soumises à de fortes pressions anthropiques, à la fois industrielles – avec des activités très nombreuses au niveau de la mégapole de Paris

notamment pendant les Trente Glorieuses<sup>36</sup>, mais aussi en lien avec l'aménagement des cours d'eau pour la navigation, pour contrôler les crues ou encore répondre aux besoins en eau (figure 8)



**Figure 8.** Construction des trajectoires à l'échelle de la Seine : évolution des facteurs gouvernant le bassin de la Seine (1800-2010). **A**, population totale ; **B1 et B2**, volumes collectés et traités des eaux usées de Paris ; **D**, densité des stations de surveillance de la qualité des rivières (nb/1000 km<sup>2</sup>) ; **E**, utilisation totale de métaux en France (Cu + Pb + Zn), extrapolée avant 1950 à partir d'indicateurs industriels ; **F**, applications d'engrais azotés ; et **G**, engrais phosphorés. Marqueurs chronologiques : 1910, crue centenaire ; conflits de la Première (étoile bordeaux) et de la Seconde Guerre mondiale (étoile bleu marine) ; 1944-1974, période de développement rapide de l'après-guerre (Trente Glorieuses) ; 1989, début du programme PIREN Seine, d'après Flipo F. *et al.*, 2021<sup>32</sup>.

Ainsi les modifications des lits des cours d'eau et les effluents industriels directement rejetés dans les eaux du bassin de la Seine (Seine aval et bassin versant de l'Oise) ont grandement affecté la qualité de ces masses d'eau sans que l'effet de dilution attendu joue un rôle suffisant d'atténuateur naturel. L'étude de la pollution et son suivi à l'échelle de la Seine a commencé il y a environ 30 ans, notamment grâce aux

travaux menés dans le cadre du PIREN Seine. Ces travaux ont permis d'établir des bilans réguliers, avec des précisions spatiales et temporelles de plus en plus fines et des modèles numériques ou conceptuels de compréhension de l'hydro-socio-système Seine.

L'enregistrement de ces pollutions peut se faire de diverses façons avec des mesures

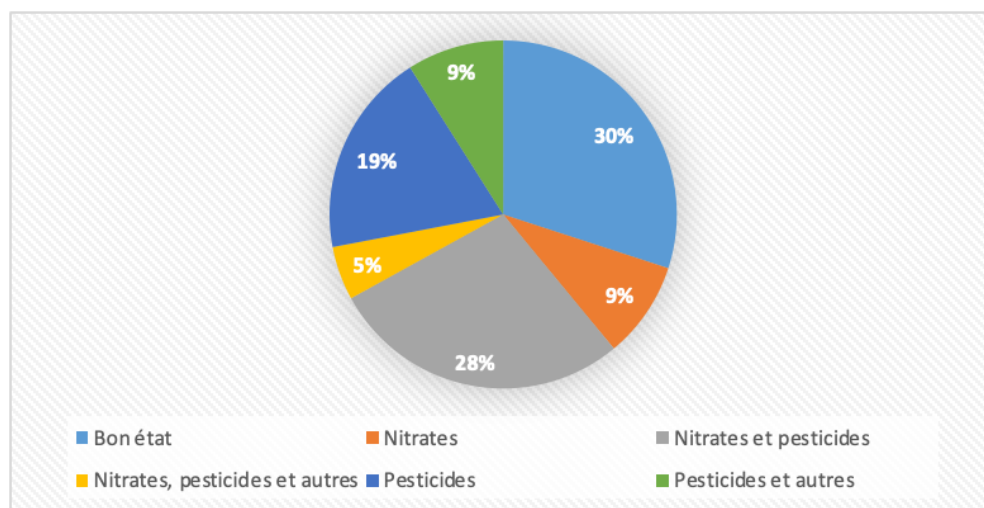
<sup>36</sup> Flipo N., Labadie P., Lestel L. 2021. The Seine River Basin. *The Handbook of Environmental Chemistry*, 90, 355–380.

ponctuelles ou plus intégratives. On peut ainsi recourir à des indicateurs biologiques (par exemple en étudiant des espèces sentinelles animales ou végétales<sup>37</sup> : poissons type chevaines, macrophytes...), réaliser des analyses chimiques ou microbiologiques au sein de matrices diverses (sédiments, biofilms par exemple), des prélèvements ponctuels ou sur des temps longs de plusieurs jours à mois (échantillonneurs passifs ou préleveurs automatiques), ou encore effectuer des enregistrements sédimentaires et biologiques (carottes). La compréhension de l'évolution de la qualité de l'eau passe aussi par des archives historiques et les échanges entre les acteurs locaux, la société civile, les chercheurs et la mutualisation des données.

En Île-de-France, la qualité des eaux de surface bénéficie d'une tendance générale à la baisse des macropolluants et des pesticides, alors que celle des eaux souterraines reste affectée par la rémanence plus longue des polluants. La contribution

à la dégradation de la qualité des cours d'eau est à pondérer selon les activités. Ainsi les secteurs agricole et industriel impactent plus la qualité des eaux que la contribution urbaine (e.g., désherbage des parcs, routes, etc.). C'est le cas des pesticides à l'échelle du bassin versant de la Marne. L'agriculture en utilise 1 000 fois plus que les usages urbains, soit 4 300 tonnes/an versus 47 tonnes/an. Toutefois, en considérant que les superficies imperméabilisées des zones urbaines facilitent les fuites vers la rivière, les rejets de pesticides dans la Marne seraient équivalents, soit 11 tonnes/an pour les usages agricoles et autant pour les usages urbains<sup>38</sup>.

Outre les pesticides et les nitrates, des substances aux origines variées (COV, perturbateurs endocriniens, résidus médicamenteux, produits cosmétiques, rejets domestiques, plastiques, phtalates, etc.) persistent parfois longtemps, au-delà de leur interdiction d'usage (figure 9).



**Figure 9.** Paramètres déclassant les eaux souterraines à l'échelle du bassin versant de la Seine. 70 % des eaux souterraines ont une qualité dégradée, les pesticides représentant plus de la moitié des substances en cause (61 %) et les nitrates 42 % (données AESN).

<sup>37</sup> Espèces sentinelles : espèces animales ou végétales servant de bio-indicateurs pour l'évolution de la qualité des milieux étudiés et notamment ici des milieux d'eau douce.

<sup>38</sup> Blanchoud H., Moreau-Guigon E., Farrugia F. *et al.*, 2007. Contribution by urban and agricultural pesticide uses to water contamination at the scale of the Marne watershed. *Science of the Total Environment*, 375, 168–179.

Par exemple, l'atrazine, un herbicide interdit en France depuis 2003, a longtemps été utilisé pour de nombreuses cultures dont celle du maïs ou comme désherbant pour les voies de chemin de fer, par exemple. Malgré cela, du fait de sa persistance dans les sols, il évolue en produits de dégradation, ou métabolites, qui dégradent la qualité des eaux. De même, le métolachlore, banni en 2003 et remplacé par une molécule très proche (S-métolachlore), est rémanent dans de nombreux captages d'eau potable<sup>39</sup>. Des métabolites tels que l'ESA métolachlore sont régulièrement détectés dans les captages d'eaux potables ou dans les stations d'épuration<sup>40</sup>.

Les travaux scientifiques ont aussi mis en évidence de l'antibio-résistance au sein des sédiments et des biofilms dans certains affluents de la Seine, grâce à la détection d'intégrons cliniques<sup>41</sup> et de colibacilles au sein de ces matrices. C'est le cas de l'Orge, rivière traversant les départements des Yvelines et de l'Essonne au sud de Paris, et supportant 41 structures hospitalières<sup>42</sup>. La contamination en antibiotiques (principalement fluoroquinolones, ofloxacine, ciprofloxacine, tétracycline), est néanmoins différente entre les deux matrices ; la colonisation et les teneurs sont plus élevées au sein des biofilms, les marqueurs sont moins nombreux dans les sédiments. Les profils moléculaires détectés peuvent égale-

ment varier. La principale source d'antibiotiques correspond aux rejets des stations d'épuration des eaux usées.

Ce qui a été observé pour les antibiotiques l'est aussi pour les biocides (tels les parabènes) et les produits phytosanitaires (tébuconazole, triclosan) avec le même comportement au fractionnement entre biofilms et sédiments. Cependant, les sources sont différentes pour les biocides puisque l'évolution des concentrations semble plutôt liée à un gradient d'urbanisation amont-aval.

Enfin il faut retenir que les bactéries résistantes aux antibiotiques (ATBr) et leurs génomes, quoique détectés, ne s'accumulent pas dans les deux matrices étudiées. À ce jour, la contamination en antibiotiques est décorrélée des profils de résistance aux antibiotiques des colibacilles isolés dans ces matrices<sup>36</sup>.

Les modèles biologiques étudiés, ainsi que les sédiments des affluents de la Seine (l'Orge, là encore) montrent également la présence de micropolluants émergents à haut profil de résistance : les composés fluoroalkylés (PFAS) et les chloroalcanes. Globalement les concentrations de PFAS dans la phase dissoute, les biofilms ou les espèces sentinelles montrent une contribution significative du grand Paris<sup>32-43</sup>.

<sup>39</sup> AQUI'Brie, 2017. Tableau de bord annuel de la nappe des calcaires de Champigny n°16 2014 / 2015.

<sup>40</sup> ANSES, 2021. *Non-conformités dans les eaux destinées à la consommation humaine dues aux métabolites du métolachlore*. Extrait du rapport d'analyse et d'interprétation d'un signalement transmis à l'Anses au titre de la phyto-pharmacovigilance, 2021-AST-0088.

<sup>41</sup> Intégrons cliniques : éléments génétiques, vecteurs de l'acquisition et de l'expression de gènes de résistance aux antibiotiques et aux antiseptiques et qui permettent notamment la dissémination de l'antibiorésistance dans l'environnement.

<sup>42</sup> Vivant A.L., Berthe T., Guigon E. *et al.*, 2021. *Suivi des marqueurs de la dissémination de l'antibiorésistance (biofilms, sédiments, biote) dans une rivière urbanisée du bassin de la Seine (l'Orge)*. PIREN-Seine phase 8 - Rapport 2021 – Antibiorésistance bactérienne dans une rivière urbanisée.

<sup>43</sup> Munoz G., Fechner L.C., Geneste E., Pardon P., Budzinski H., Labadie P. 2018. *Spatio-temporal dynamics of per and polyfluoroalkyl substances (PFASs) and transfer to periphytic biofilm in an urban river: case-study on the River Seine*. *Environmental Science and Pollution Research* 25, 23574–23582.

Enfin la qualité de ces eaux reste également très liée à la présence de métaux et HAP. Ainsi malgré la diminution de la contamination globale de la Seine (par exemple, la pollution particulaire associée aux métaux était deux à cinq fois supérieure au début des années 1980 que dans les années 2000)<sup>44</sup>, les niveaux de pollution en métaux et HAP dans de

nombreux bassins hydrographiques restent très élevés, notamment dans la phase particulaire : sédiments, matières en suspension (MES) et biofilms (grands accumulateurs de MES)<sup>45-46-47-48</sup>, comme l'illustrent par exemple les travaux menés par Sophie Ayrault et Cécile Quantin sur le bassin versant de l'Orge (*figure 10, et encadré ci-après*).

### Le cas de l'antimoine, un contaminant en lien avec nos systèmes urbanisés de circulation automobile (Sophie Ayrault, LSCE et Cécile Quantin, GEOPS)

Les concentrations en contaminants hérités (plomb, zinc, HAP, etc.) sont devenues problématiques en raison de leur toxicité<sup>49</sup> et/ou de leur persistance dans l'environnement, notamment dans les sols et sédiments qui ont la capacité de les accumuler et de les transporter et donc de propager la pollution loin des sources<sup>50-51</sup>. Les concentrations en HAP peuvent atteindre 20 mg.kg<sup>-1</sup> dans la fraction particulaire, un niveau qui est bien inférieur cependant aux apports de HAP dus aux retombées atmosphériques. En plus des contaminants hérités, le comportement des contaminants émergents tels que le bisphénol A (BPA) et l'antimoine (Sb), toxiques bien connus, reste mal compris<sup>52-53-54</sup>. Cette problématique est parfaitement illustrée par l'étude

.../...

<sup>44</sup> Meybeck M., Horowitz A.J., Grosbois C., 2004. The geochemistry of Seine River Basin particulate matter: distribution of an integrated metal pollution index. *Science of the Total Environment*, 328, 219–236.

<sup>45</sup> Fernandes M.B., Sicre M.A., Boireau A., Tronczynski J. 1997. Polyaromatic hydrocarbon (PAH) distributions in the Seine River and its estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 34, 857-867.

<sup>46</sup> Priadi C., Le Pape P., Morin G. *et al.*, 2012. X-ray Absorption Fine Structure Evidence for Amorphous Zinc Sulfide as a Major Zinc Species in Suspended Matter from the Seine River Downstream of Paris, Île-de-France, France. *Environ. Sci. Technol.* 46 (7), 3712–3720.

<sup>47</sup> Meybeck M., Lestel L., Briand C., 2016. L'impact de l'agglomération parisienne sur le milieu aquatique de 1876 à 1937, dans les travaux de l'Observatoire de Montsouris, In: Lestel L, Carré C (eds) *Comment les métropoles ont sacrifié leurs rivières : Berlin, Bruxelles, Milan et Paris (1850 – 2010)*, Editions Quae.

<sup>48</sup> Gélalbert A., Berthe T., Morin G. *et al.*, 2021. *Phases minérales associées aux biofilms microbiens prélevés en Seine*. PIREN-Seine phase 8 - Rapport 2021 – Phases minérales associées aux biofilms microbiens prélevés en Seine.

<sup>49</sup> Madrid L., Díaz-Barrientos E., Madrid F., 2002. Distribution of heavy metal contents of urban soils in parks of Seville. *Chemosphere*, 49 (10), 1301-1308.

<sup>50</sup> Le Pape P., Ayrault S., Quantin C., 2012. Trace element behavior and partition versus urbanization gradient in an urban river (Orge River, France). *Journal of Hydrology*, 472-473, 99-110.

<sup>51</sup> Bonnot C., Gelabert A., Louvat P., Morin G., Proux O., Benedetti M., 2018. Trace metals dynamics under contrasted land uses: contribution of statistical, isotopic, and EXAFS approaches. *Environmental Science and Pollution Research*, 25 (24).

<sup>52</sup> Jonkers N., Laane R. W. P. M. *et al.*, 2005. Fate modeling of nonylphenol ethoxylates and their metabolites in the Dutch Scheldt and Rhine estuaries: validation with new field data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 62, 141-160.

<sup>53</sup> Cladière M., Bonhomme C., Vilmin L. *et al.*, 2013. *Simulation du devenir des alkylphénols dans la Seine*. Colloque annuel du PIREN-Seine, Février 2013, Paris, France.

<sup>54</sup> Resongles E., Casiot C., Freydier R. *et al.*, 2014. Persisting impact of historical mining activity to metal (Pb, Zn, Cd, Tl, Hg) and metalloid (As, Sb) enrichment in sediments of the Gardon River, Southern France. *Science of the Total Environment*, 481(1), 509-521.

Du bassin versant de l'Orge<sup>55</sup>. Des indications puissantes sur les sources et les processus bio-physico-chimiques affectant ces contaminants ont pu être obtenues par la mesure des rapports isotopiques de certains métaux ou le rapport des composés organiques.

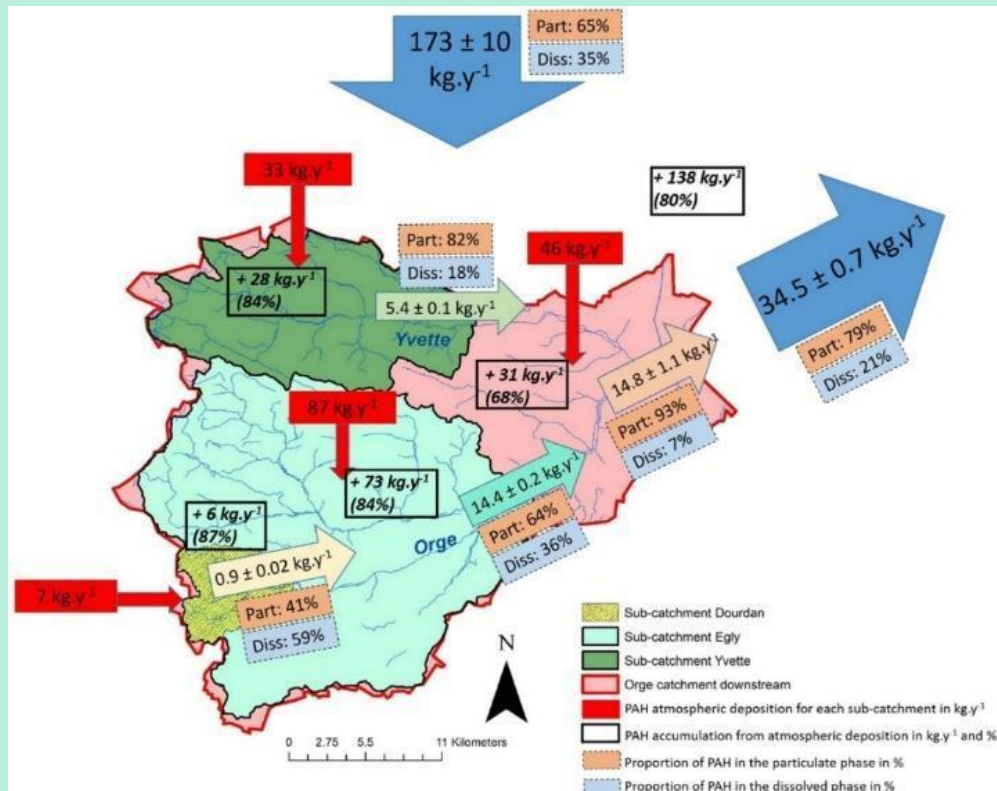
Notre région, y compris ses zones urbanisées, est parcourue de voies rapides équipées de bassins recueillant les eaux de pluie ruisselant sur ces chaussées. Dans ces bassins, se rencontrent la recherche scientifique qui vise à améliorer nos connaissances sur les cycles des contaminants d'origine routière et la gestion des ruissellements routiers qui vise à protéger les milieux aquatiques (lacs, rivières) et les sols. Parmi les contaminants de ces bassins routiers, l'antimoine est l'un des éléments les plus enrichis mais aussi l'un des plus méconnus. Sa concentration dans les sédiments de bassin, qui peut atteindre 100 mg par kg, est particulièrement élevée au regard de sa concentration naturelle, très faible, soit 0,5 mg par kg. Pour identifier l'impact environnemental de cet élément potentiellement toxique, nous étudions son comportement biogéochimique dans et entre les réservoirs sédimentaires urbains où il se concentre. L'antimoine de ces sédiments provient en partie des freins de véhicules où des composés en contenant ont remplacé l'amiante, dont l'usage a été interdit à la fin des années 1990. Les peintures et les plastiques peuvent aussi contenir de l'antimoine.

C'est pourquoi nous évaluons aussi les contributions relatives de ses différentes sources urbaines en traçant chacune d'elles grâce à sa signature isotopique. Des expériences de mésocosme (i.e. en milieu contrôlé en laboratoire) avec des sédiments représentatifs des réservoirs urbains sont conçues pour mieux comprendre les processus affectant la mobilité de l'antimoine dans ces réservoirs et élucider le rôle des bactéries dans son transfert entre l'eau et les sédiments. Les résultats sont discutés avec les gestionnaires afin de mieux maîtriser la concentration de l'antimoine dans les boues de leurs bassins, qui complique leurs curages.

.../...

<sup>55</sup> Froger C., Ayrault S., Evrard O. *et al.*, 2018. Tracing the sources of suspended sediment and particle-bound trace metal elements in an urban catchment coupling elemental and isotopic geochemistry, and fallout radionuclides. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(28), 28667-28681.

Le rôle des sédiments de route dans l'apport de contaminants est particulièrement important dans les bassins versants urbanisés<sup>49</sup>. Les signatures isotopiques du plomb ainsi que les signatures en HAP permettent de confirmer que le ruissellement urbain est le principal vecteur de contamination<sup>49-56</sup>. Les estimations des flux d'éléments traces et de HAP annuels et saisonniers entrants (retombées atmosphériques) et sortants (exportés par la rivière) ont mis en évidence une accumulation globale à l'échelle du bassin, qui comporte déjà un stock important de contaminants dans ses sols<sup>57</sup>.



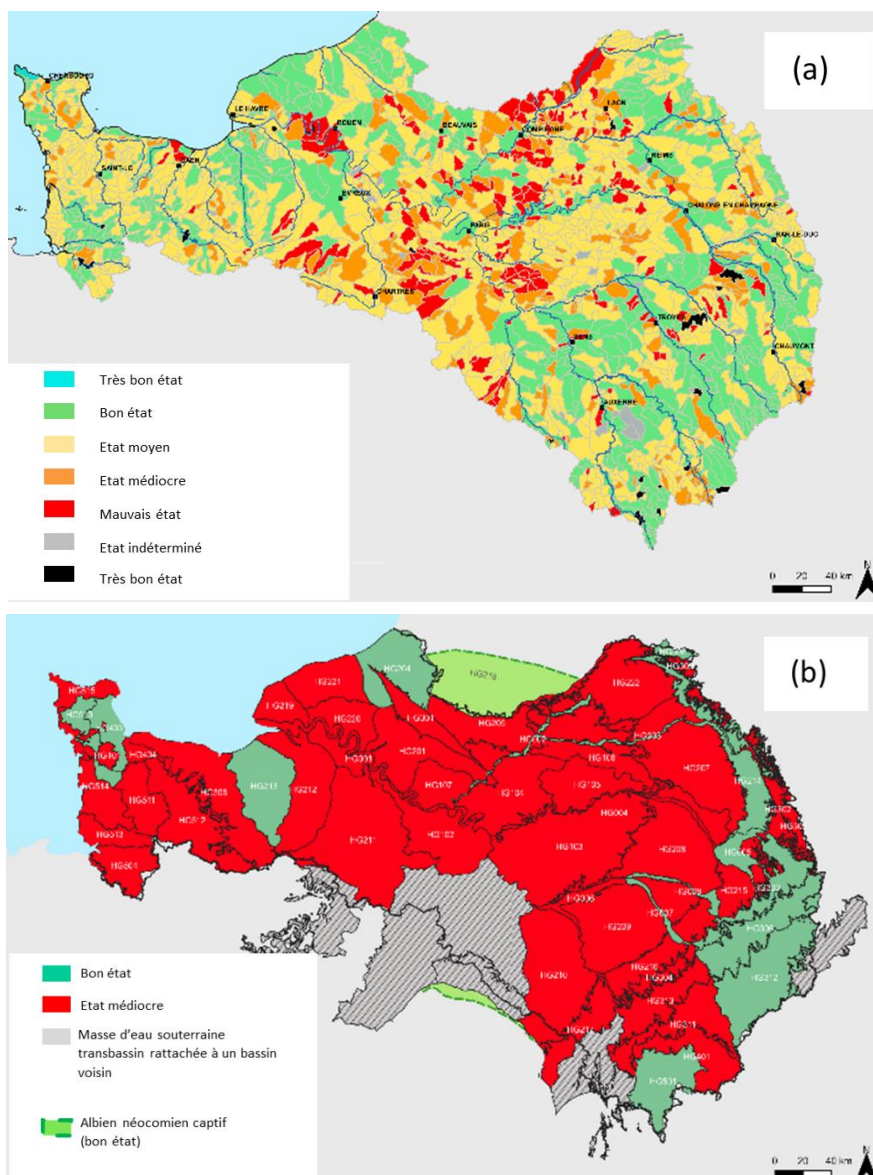
**Figure 10.** Bilan des flux totaux annuels estimés de HAP dissous et particulaires pour le bassin versant de l'Orge et les sous-bassins d'Egly (bleu), de l'Yvette (vert), de Dourdan (jaune rayé) et de Virysub (rose), associés aux dépôts atmosphériques de HAP (rouge) et le taux d'accumulation annuel (cadres noirs) pour chaque sous-bassin<sup>50</sup>.

<sup>56</sup> Froger C., Ayrault S., Gasperi J. *et al.*, 2019. Innovative combination of tracing methods to differentiate between legacy and contemporary PAH sources in the atmosphere-soil-river continuum in an urban catchment (Orge River, France). *Science of the Total Environment*, 669, 448-458.

<sup>57</sup> Froge, C., Quantin C., Bordier L. *et al.*, 2020. Quantification of spatial and temporal variations in trace element fluxes originating from urban areas at the catchment scale. *Journal of Soils and Sediments*, 20(11), 4055-4069.

Les grandes tendances d'évolution de qualité des masses d'eau peuvent être obtenues grâce aux données ponctuelles existantes. Ces données sont issues notamment du travail des agences de l'eau (AESN, Agence de l'eau Seine Normandie pour la région Île-de-France), du réseau SANDRE ou encore de la Direction régionale et interdépartementale de l'environnement, de l'aménagement et des transports (DRIEAT).

Elles illustrent par exemple un état chimique médiocre des nappes de la craie du Tertiaire du Mantois à l'Hurepoix et celle du Tertiaire - Champigny - en Brie. Cependant, les réseaux de suivi de qualité restent insuffisants en termes de fréquence de prélèvements et/ou du nombre de stations pour pouvoir rendre compte finement des évolutions spatio-temporelles, d'autant plus en ce qui concerne les eaux souterraines (figure 11).



**Figure 11.** (a) État écologique des masses d'eau de surface et (b) état chimique des masses d'eau souterraine du bassin Seine-Normandie selon les règles d'évaluation de 2022 (d'après <https://seine-normandie.eaufrance.fr/>, Source AESN, DRIEAT, état des eaux 2022).

L'état des lieux réalisé en 2015 pour le SDAGE 2016-2021 montrait que seules 18 % des masses d'eau respectaient les critères de bon état ou de bon potentiel écologique. Ces critères prennent en compte les concentrations en nutriments, macropolluants et polluants spécifiques : métaux ubiquistes (cuivre et zinc) car entrant dans la composition des nombreux matériaux urbains (zinc des toitures) ou encore plomb et ses composés. Les concentrations en zinc et en plomb sont de 20 à 150 % supérieures à celles des eaux météoriques (atmosphériques) et dépassent les seuils réglementaires : 20 mg/L pour le zinc, et 2 mg/L pour le plomb, contre 3 mg/L et 0,01 mg/L respectivement pour les normes de potabilité, 7,8 µg/L et 1,2 µg/L pour les normes de qualité environnementale en moyenne annuelle (NQE-MA) des eaux douces.

De plus, l'utilisation des phytosanitaires se poursuit, les pressions liées aux micropolluants restent fortes. Les eaux souterraines, notamment, sont significativement soumises aux pressions d'usage des pesticides et des engrais minéraux, surtout des nitrates. Par exemple, en 2019, sur 13 masses d'eaux souterraines du bassin Seine-Normandie analysées, seulement 15 % avaient un bon état chimique (*figure 11*)<sup>58</sup>. Ainsi, des cours d'eau comme l'Orge ou l'Yvette présentent des états écologiques « moyen » (30 %) à « mauvais » (45 %). Comme discuté précédemment, la Marne et l'Oise sont également marquées par des gradients amont-aval de génotoxicité et d'immunotoxicité environnementale.

Toutes les données vont dans le sens d'un impact significatif de la métropole de Paris et des zones rurales amont du bassin de la Seine sur la dégradation de la qualité des eaux et des matrices associées, du fait de la majorité des substances polluantes mesurées.

Enfin, les données existantes sur les polluants spécifiques de l'état écologique (PSEE) sont parcellaires : on trouve par exemple des bassins versants bien documentés pour le sélénium en Île-de-France, lequel traduit une anomalie régionale dans les couches de l'Yprésien (Eocène inférieur), mais peu d'autres substances toxiques et PSEE métalliques sont autant suivies. Le travail est insuffisamment intégratif dans le temps et dans l'espace, les données acquises sont rarement intégrées sous visualisateur cartographique de données chimiques des eaux – même si des avancées significatives sont à noter en Île-de-France. Les données liées aux activités de recherche permettent souvent, à elles seules, de connaître finement la qualité chimique des cours d'eau et les flux associés, avec le désavantage, cependant, d'être souvent contraintes géographiquement ou avec des chroniques limitées. Néanmoins, l'acquisition de telles chroniques implique un équipement des sites qui est onéreux, contraignant, chronophage et demandeur en personnel technique. L'Orge fait partie des bassins versants les plus étudiés car considéré comme un point chaud de la contamination, toutes substances confondues. Enfin, les connaissances hydrogéologiques et de qualité des eaux souterraines doivent encore progresser.

<sup>58</sup> [https://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/presentation\\_edl\\_idf\\_vf2.pdf](https://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/presentation_edl_idf_vf2.pdf)

Les études mettent en évidence des limites dans le suivi des substances et les chroniques d'enregistrement. Ces verrous sont liés à la moindre bioaccessibilité de certains composés, leur biotransformation à la base du réseau trophique (biofilms ou macro-invertébrés) ou par les espèces d'étude choisies, sachant que le régime alimentaire d'espèces dulçaquicoles omnivores détermine la bioaccumulation de certains composés. Les processus mis en œuvre dans la transformation ou l'accumulation des substances organiques ou inorganiques, et donc l'évaluation du risque écotoxicologique ou chimique, sont nombreux et complexes, avec des synergies possibles entre substances.

L'éco-dynamique des substances polluantes est donc contrainte par des paramètres ou processus tels que les stocks et leurs dynamiques, la spéciation ou les formes chimiques, la lithologie, la biodisponibilité, la rémanence, la métabolisation, la bioaccumulation, la biomagnification, les forçages naturels ou anthropiques. En outre l'échantillonnage, la méthode ou le site sont également déterminants pour rendre compte de la contamination avec un maillage plus ou moins resserré à l'échelle du grand Paris et du bassin de la Seine d'une façon générale.

Malgré ce bilan en demi-teinte, les nombreuses études financées par le PIREN Seine ou par différents programmes régionaux ou universitaires (IRS ACE-ICSEN par ex.) ont permis des avancées :

- quantifier la contamination provenant des activités anthropiques en utilisant des traceurs géochimiques comme les isotopes du plomb ou de l'antimoine couplés à des mesures de radionucléides, qui permettent de caractériser les temps de transfert ainsi que les compartiments réservoirs des particules<sup>59</sup> ;
- produire un schéma global de la dynamique des contaminants historiques et émergents à l'échelle de bassins versants sous forte pression anthropique à la fois urbains et agricoles<sup>60-61</sup> ;
- caractériser la « chimiodiversité » des produits chimiques libérés dans les masses d'eau de l'Île-de-France, et proposer des indicateurs ne se limitant pas aux seules concentrations mais aussi aux formes des polluants et à leur réactivité<sup>38-62-63</sup>.

## B – Interactions Changement climatique et pollutions des matrices Eau

Outre les forçages anthropiques discutés précédemment, l'Île-de-France va également devoir s'adapter à la pression climatique. Le changement climatique, tel qu'il est vécu et prévu sur le moyen terme, indique notamment une tendance globale au réchauffement et à l'augmentation de la fréquence d'événements climatiques extrêmes (canicules prolongées, pluies violentes, etc.). Les conséquences sur le cycle de l'eau seront multiples, recouvrant des aspects multi-dimensionnels et de nombreux champs socio-économiques.

<sup>59</sup> Philippe M., Le Pape P., Da Costa C. *et al.*, 2021. *L'antimoine, un polluant émergent dans les sols et rivières urbaines : Géochimie élémentaire, isotopique et spéciation sur le continuum route – bassins routiers, premières études sur la biogéochimie de Sb*. PIREN-Seine phase 8 - Rapport 2021.

<sup>60</sup> Kafi M., Gasperi J., Moilleron R., Gromaire M.C., Chebbo G., 2008. Spatial variability of the characteristics of combined wet weather pollutant loads in Paris. *Water Research*, 42(3), 539-549.

<sup>61</sup> Thiebault T., Alliot F., Berthe T. *et al.*, 2021. Record of trace organic contaminants in a river sediment core: From historical wastewater management to historical use. *Science of The Total Environment*, 773, 145694.

<sup>62</sup> Brignon J.M., Gasperi J., 2021. *Indicateur de la pression de pollution chimique sur le bassin de la Seine*. PIREN Seine phase 8 – Rapport 2021.

<sup>63</sup> Treilles R., Gasperi J., Gallard A. *et al.*, 2021. Microplastics and microfibers in urban runoff from a suburban catchment of Greater Paris. *Environmental Pollution*, 287, 117352.

Parmi ces conséquences, on sait que les évolutions tendanciennes climatiques en domaine continental auront des incidences sur le réservoir hydrographique, notamment sur (i) l'évolution des débits et du ruissellement, avec une réduction des eaux renouvelables de surface et une modification des écosystèmes ; (ii) une grande variabilité des précipitations, avec une augmentation des épisodes extrêmes impactant l'érosion des sols et l'évapotranspiration ; et selon les scénarios climatiques considérés, (iii) une éventuelle baisse des débits d'été impactant négativement la qualité de l'eau et (iv) une réduction des ressources en eau disponibles d'où pourraient découler des conflits d'usage et une augmentation de la vulnérabilité des populations, comme on le prédit à l'échelle nationale.

La principale problématique actuelle, et certaine dans le futur, est la baisse de la qualité des eaux tant de surface, souterraines que celle des zones humides, au regard de la pression anthropique persistante. Cette qualité pourrait être affectée d'autant plus que la quantité de la ressource en eau pourrait aussi être impactée selon les scénarios climatiques envisagés. Toutefois, le rapport Explore 2 (2024)<sup>64</sup> semble indiquer que, pour la moitié nord de la France, et *a fortiori* l'Île-de-France, et en considérant l'horizon temporel de la fin du siècle, l'impact des évolutions climatiques sur les niveaux piézométriques (hauteurs de nappe) semble limité, voire qu'on pourrait aller, dans certains cas, vers une hausse de ces niveaux.

Ces modélisations ne tiennent pas compte, cependant, de la hausse probable des prélèvements d'eau tous secteurs

confondus (urbains, agricoles, industriels). Pour l'agriculture en particulier, les hausses prévues des températures (moyennes et maximales) et l'augmentation de l'évapotranspiration impliquent de fait une croissance des besoins d'irrigation donc des prélèvements d'eau. Rappelons en effet que la notion de « raréfaction de l'eau » ne peut se limiter seulement aux prévisions pluviométriques : elle doit aussi prendre en compte le rapport entre l'offre physique en eau (la pluviométrie) et la demande en eau (les usages). La pression anthropique et les demandes en eau, notamment agricoles, ne présentent pas des scénarios à la baisse. La demande va donc très probablement continuer de croître, impactant in fine la qualité des eaux.

À l'échelle de l'Europe, les bassins versants étudiés montrent depuis plusieurs années des sécheresses plus fréquentes et plus graves qui intensifient le stress hydrique, et des inondations plus fréquentes aussi. La complexité du réseau hydrographique et son importance rendent l'Île-de-France particulièrement vulnérable aux inondations à des échelles globales ou plus locales dans le temps et l'espace : débordements pluviaux liés aux phénomènes orageux, débordement des cours d'eau en période de hautes eaux - périodes hivernales, effets de ruissellement ou remontée des nappes phréatiques. Des zones de plus hautes eaux sont connues et combinées aux PPRI (cartographie de prévention des risques inondations) et cartes d'aléas. Leur connaissance et définition ont permis de mettre en œuvre des aménagements spécifiques pour lutter contre ces événements possiblement printaniers (par exemple le Loing en 2016) mais principalement hivernaux, tels que la mise en place

<sup>64</sup> Jeantet, A., Vergnes, J.-P., Munier, S., Habets, F., 2024. *Rapport Explore2 : les futurs de l'eau. Projections hydrologiques souterraines sur le domaine de la plateforme AQUIFER – Nord-*

*Pas-de-Calais, Basse-Normandie, Bassin parisien, Loire, Poitou-Charentes, Alsace, Tarn-et-Garonne.* 63 p.

de système d'endiguement, de préservation ou restauration des zones d'expansion des crues pour protéger les populations franciliennes.

Néanmoins, dans le cadre du changement climatique global, l'intensité et la récurrence de tels évènements vont s'accroître et les coûts associés à leur gestion vont doubler, voire tripler, en fonction des scénarios d'augmentation des températures<sup>65</sup>. Corollairement, en Europe, une augmentation de 3°C des températures aura une incidence sur le nombre d'épisodes de sécheresse, cinq fois plus élevé en 2100 qu'en 2020<sup>66</sup>.

Ainsi ces changements vont affecter directement le fonctionnement des cours d'eau, en impactant la composition chimique et la qualité des eaux, le fonctionnement des écosystèmes associés, les régimes thermiques des cours d'eau, les flux dissous (e.g., moins de dilution) et particuliers (e.g., plus d'apport solide par facilitation de l'érosion) au sein des bassins versants concernés<sup>67-68</sup>. Par exemple, à l'échelle du grand Paris, les épisodes d'inondation, tout comme le degré d'urbanisation, affectent particulièrement les flux massiques de microplastiques<sup>69</sup>.

Quant au stress hydrique, il est à mettre en lien avec la densité de population et les usages principaux de la ressource : domestique, agricole ou industriel. La pénurie d'eau<sup>70</sup> a touché 16 % du territoire de

l'UE en 2019 et 26 % de sa population sur presque toute l'année. Malgré des prélèvements d'eau à la baisse entre 2000 et 2019, la pénurie persiste. Toutes les régions de l'UE sont concernées. Selon l'Agence européenne de l'environnement, « *le changement climatique exacerbe les fluctuations naturelles de la disponibilité saisonnière de l'eau, ce qui entraîne une augmentation de la fréquence, de l'intensité et des impacts des épisodes de sécheresse* »<sup>71</sup>.

En 2018, seuls 38 % des eaux de surface en EU présentaient un bon état chimique (incluant les substances ubiquistes, persistantes et toxiques, ou uPBT) avec comme point noir les contaminants inorganiques tels que le zinc, le cuivre ou encore l'arsenic. En Île-de-France, sur cette même période, l'état chimique est bon à 85 % sans substances ubiquistes et à 16 % avec elles. Bien sûr, cet état des lieux doit être modulé en fonction de nombreux paramètres des bassins versants considérés, comme la lithologie (nature des bassins versants considérés : fissuré/fracturé, poreux ou karstique), l'importance des zones urbaines, l'humidité des sols, les usages de l'eau, la végétation etc.

L'Île-de-France est une région karstique et soumise à une forte pression anthropique : grandes aires urbaines, zones culturelles étendues, prégnantes et variées (80 % du territoire correspond à des espaces agricoles, forestiers ou naturels

<sup>65</sup> Dottori F., Mentaschi L., Bianchi A. *et al.*, 2020. *Adapting to rising river flood risk in the EU under climate change*, EUR 29955 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

<sup>66</sup> Cammalleri C., Naumann G., Mentaschi L. *et al.*, 2020. *Global warming and drought impacts in the EU*, EUR 29956 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

<sup>67</sup> Coulthard T.J., Macklin M.G., 2003. Modeling long-term contamination in river systems from historical metal mining. *Geology*, 31(5), 451-454.

<sup>68</sup> Whitehead P.G., Wilby R.L., Battarbee R.W. *et al.*, 2009. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality, *Hydrological Sciences Journal*, 54(1), 101-123.

<sup>69</sup> Treilles R., Gasperi J., Tramoy R. *et al.*, 2022. Microplastic and microfiber fluxes in the Seine River: Flood events versus dry periods *Science of The Total Environment*, 805, 150123.

<sup>70</sup> La pénurie en eau se définit selon que la demande en eau est supérieure au volume d'eau douce renouvelable disponible.

<sup>71</sup> EAA Report, 2018. *European waters Assessment of status and pressures*. EEA Report No 7/2018. <https://www.eea.europa.eu/>

d'autres natures...). Son urbanisation a des impacts sur tous les volets du cycle de l'eau, que ce soit les précipitations, les écoulements, l'infiltration, la quantité et la qualité des eaux souterraines, l'évaporation et l'évapotranspiration en surface. Les villes influent de façon très significative sur le réchauffement global en constituant des pièges et des sources de chaleur, en l'absence de facteurs rafraîchissants tels que l'eau ou la végétation.

Les données du GIEC soulignent que l'amplification du phénomène de réchauffement est en lien direct avec l'urbanisation telle qu'elle est pensée et conçue dans sa géométrie comme dans l'emploi des matériaux et avec nos modes de vie (e.g.

systèmes de chauffage ou de refroidissement domestiques et industriels) <sup>72</sup>.

Dans un contexte général de raréfaction de la ressource en eau en été en France, les activités agricoles sont très consommatrices d'eau : 5 milliards de m<sup>3</sup> d'eau sont prélevés chaque année pour les besoins de l'agriculture, dont une majorité dédiée à l'irrigation (60 %). Toutefois, l'Île-de-France est une région très particulière en termes d'irrigation agricole car les céréales, très répandues, ne sont pas ou peu irriguées. À l'inverse, le maraîchage, qui l'est quasi systématiquement, représente de très faibles surfaces agricoles régionales (voir l'encadré ci-dessous).

### L'eau pour l'agriculture en Île-de-France Christine Aubry (Agro-ParisTech) et Nabil Touili (INRAE)

Comparée à d'autres régions agricoles françaises, l'Île-de-France utilise moins l'irrigation pour ses cultures : en 2017, seules 3 % des surfaces agricoles étaient irriguées (soit 18 000 ha), en majorité des grandes cultures (12 000 ha) et, parmi elles, surtout les cultures industrielles (pommes de terre ou, plus rarement, betteraves), tandis que les céréales, y compris le maïs pour sa majorité, ne sont pas irriguées<sup>73</sup>. En revanche, les légumes, fleurs et plantes aromatiques (un peu plus de 3 600 ha en 2017) le sont quasi systématiquement.

Si l'agriculture francilienne est ainsi relativement peu consommatrice d'eau (moins de 10 % de la consommation totale annuelle des seuls Parisiens<sup>74</sup> en 2017), elle verra probablement ses besoins en eau augmenter du fait d'un double phénomène :

1) La **demande croissante en légumes et produits de proximité** : le nombre d'exploitations maraîchères a presque doublé de 2010 à 2020, passant de 74 à 139, au même titre que les surfaces ont progressé de 1 140 ha à 2 040 ha en 2020<sup>75</sup>.

.../...

<sup>72</sup> GIEC, *Changement climatique 2021, Les bases scientifiques physiques*, Résumé à l'intention des décideurs, Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation, 2021. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WG1\\_SPM\\_French.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_French.pdf)

<sup>73</sup> Agreste, 2021. Mémento de l'agriculture d'Île-de-France 2020. [https://idf.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Île-de-France/160\\_Inst-IDF/1-Chambre/Docs/2021\\_Agrete\\_Memento.pdf](https://idf.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Île-de-France/160_Inst-IDF/1-Chambre/Docs/2021_Agrete_Memento.pdf)

<sup>74</sup> <https://www.planetoscope.com/Paris/1144-consommation-d-eau-par-les-parisiens.html>

<sup>75</sup> Agreste, 2022. *Premiers résultats du recensement de l'agriculture 2020, La synthèse en 15 points clés*. In *Essentiel Île-de-France*, février 2022, n°3. <https://driaaf.ile-de-france.agriculture.gouv.fr/Recensement-agricole-2020-1ers>

Cette tendance devrait se poursuivre, avec les incitations croissantes à la relocalisation de l'approvisionnement alimentaire prônée par le CESER<sup>76</sup> accompagnée par certaines politiques publiques comme la loi Egalim ou le Pacte agricole de la Région (par exemple les 12 Projets alimentaires territoriaux fin 2022<sup>77</sup>).

2) Le **changement climatique** : à l'appui des données Drias<sup>les futurs du climat</sup> (voir la partie C), une série de projections climatiques à l'horizon 2060, menées sur trois territoires en Île-de-France (Plateau de Saclay, Plaine de Cergy et territoire de la Brie) dans le cadre du projet de recherche-action ClimaLeg<sup>78</sup>, montre que les besoins en eau pour l'agriculture sont appelés à s'accroître. Sur ces trois territoires franciliens, les données relatives à l'indice d'humidité/sécheresse des sols montrent une tendance à des sols de plus en plus secs (notamment au printemps et en été), bien que le volume pluviométrique annuel reste globalement stable. L'impact de ces phénomènes est d'autant plus significatif pour les cultures maraîchères et légumières puisque leur système racinaire n'explore que les couches superficielles des sols.

Ainsi, les projections climatiques amènent à devoir considérer, de manière simultanée, la rétention de l'eau en surplus par rapport aux capacités d'absorption des sols en hiver pour éviter les inondations, et l'apport d'eau d'irrigation aux cultures légumières impactées par les sécheresses de surface en été. Face à l'évolution souhaitable du système alimentaire francilien vers plus d'autonomie en fruits et légumes, si des pratiques d'économie de l'eau en systèmes maraîchers doivent être mieux évaluées et encouragées (différentes formes de paillage, systèmes d'irrigation plus efficaces), reste posée la double question :

- des **quantités nécessaires pour l'irrigation** de printemps et d'été dans la diversité de ces systèmes agricoles (des bilans hydriques projetés sont en cours de réalisation dans le cadre du projet ClimaLeg Eau<sup>79</sup>)
- des **sources disponibles pour fournir cette ressource productive** : pompes possibles ou pas dans les nappes profondes (dans le cadre de ClimaLeg-Eau, le BRGM effectue des projections des niveaux de la nappe du Plateau de Saclay par exemple), utilisation estivale de réserves hivernales, interrogeant sur leurs places dans l'aménagement de l'espace et sur leur gestion (individuelle, collective...).

La question de la qualité des eaux d'irrigation (et de drainage), avec les interactions possibles entre changement climatique et pollutions des eaux que nous venons de voir, risque de s'ajouter à ce tableau : si l'irrigation agricole en Île-de-France n'était pas un sujet majeur il y dix ou quinze ans, elle est en train de le devenir. D'autant plus que l'urbanisation a aussi utilisé largement les vallées autrefois agricoles, en laissant l'agriculture sur les plateaux, ce qui accroît à la fois le besoin d'irrigation pour certaines cultures sur ces plateaux et les risques d'inondation dans les zones de vallées ainsi urbanisées.

<sup>76</sup> Ceser, 2021. *Plan régional de l'alimentation durable*. Avis 2021-02 (Mme Claire Dadou-Willmann). 17 p.

<https://www.iledefrance.fr/actes/avis-ceser/AVIS2021-02.pdf>

<sup>77</sup> Ceresco, 2022. *Les projets alimentaires territoriaux en Île-de-France*. Préfecture d'Île-de-France, Territoires PAT et projets emblématiques, 28 p. <https://driaaf.ile-de-france.agriculture.gouv.fr/projets-alimentaires-territoriaux-r380.html>

<sup>78</sup> Touili N., Aubry C., Morel K., 2022. *Adaptation of vegetable farmers to climate change in the Parisian region: a participatory approach using climate data*. *Acta Horticulturae*, 1355, 463-467.

<sup>79</sup> ClimaLeg-Eau est un programme de recherche qui fait suite à ClimaLeg (<https://www6.versailles-grignon.inrae.fr/sadapt/Focus/CLL-MALEG-Eau>) suite à l'identification par les acteurs de cette double contrainte de la gestion de l'eau en maraîchage en Île-de-France (contact : [nabil.touili@inrae.fr](mailto:nabil.touili@inrae.fr)).

Néanmoins, ces pratiques de choix de cultures et d'irrigation contribuent aux problématiques liées au réchauffement global en modifiant la couverture végétale et subséquemment l'albédo, en impactant l'évapotranspiration, en perturbant l'humidité des sols, les écoulements de surface et souterrains. La qualité des eaux dans ces territoires agricoles en est également impactée au regard des intrants (nitrates, produits phytosanitaires...). Le SDAGE 2022-2027 à l'échelle du bassin versant de la Seine propose que les cours d'eau franciliens acquièrent en 2027 le niveau de « bon état écologique », ce qui n'est pas le cas aujourd'hui pour la plupart d'entre eux. La bonne qualité chimique est atteinte pour la majorité des cours d'eau de la région si l'on ne tient pas compte des substances ubiquistes, mais ne le serait qu'en 2033 si on les considère. Cette situation est à l'image des observations réalisées à l'échelle de l'Europe.

### C – « Solutions » et questions de recherche

De nombreux leviers sont proposés afin de diminuer la pression sur la ressource en eau. Parmi ceux-ci, la recherche doit se poursuivre à la fois en apportant des éléments de compréhension de la raréfaction et/ou de la dégradation de la qualité de la ressource mais aussi en permettant de proposer, à partir de ces résultats, des solutions ou des pistes pour la protéger et moins la consommer. Elle doit pouvoir s'appuyer sur des réseaux de suivi des substances prioritaires et dangereuses et bénéficier – et faire bénéficier – de la collecte et de la diffusion des données. Face à la multiplicité des pollutions, la mise en place d'observatoires géochimiques de

la pollution doit permettre de mieux identifier les polluants problématiques, les flux, les rejets, ainsi que le propose par exemple le programme de recherche EGOUT<sup>80</sup>.

La qualité des eaux en lien avec des événements météorologiques brusques peut aussi bénéficier de nouveaux dispositifs plus intégratifs déployés à large échelle spatio-temporelle (échantillonneurs passifs et autres capteurs). Les états de lieux sont dressés à l'échelle de grands bassins versants, en faisant fi des spécificités locales et des cas particuliers qui intéressent directement les populations et les usagers de l'eau. Cela se comprend dans un souci de veille et d'alerte. Cependant, la connaissance fine spatio-temporelle doit être menée de front pour permettre une meilleure gestion globale de la ressource et de sa qualité. Dans cette optique, des projets aux composantes plus régionales, par exemple le programme PANAME 2022<sup>81</sup>, s'intéressent à divers aspects, dynamiques et interactions de l'atmosphère, de la météorologie, et des évolutions climatiques en lien avec la santé et les interactions humaines.

La pression sur la ressource a aussi vu surgir ces dernières années des projets de réservoirs ou retenues d'eau temporaires, notamment pour les usages agricoles. Ces pratiques sont contestées pour la privatisation de la ressource et leur pertinence, notamment au regard des phénomènes d'évaporation par rapport au volume utile ou prélevable disponible, face aux pressions diverses d'usages. Des outils sont développés pour pouvoir répondre à ces nouvelles problématiques, notamment

<sup>80</sup> <https://egout.cnrs.fr/>, « Observations Géochimiques des Trajectoires Urbaines », *Extended Geochemical Observation of Urban Trajectories* (EGOUT), projet ANR 2021-2024, LSCE, J. Jacobs.

<sup>81</sup> PANAME, *Paris region urban atmospheric observations and models for multidisciplinary research*, <https://paname.aeris-data.fr/>

dans les secteurs de l'industrie, de l'énergie et du résidentiel. Ils prennent en compte les évolutions multifactorielles, climatiques, démographiques, énergétiques, alimentaires, etc. C'est le cas de STRATEAU<sup>82</sup>, outil d'aide à la gestion de la ressource en eau qui tient compte de la pression d'utilisation sans nécessiter d'y implémenter des données parfois parcelaires ou inexactes.

Certains forçages sur la ressource sont cependant mieux pris en compte que d'autres. C'est le cas pour les profondes modifications climatiques déjà prégnantes et à venir, qui sont bien traitées par différents observatoires et réseaux de mesures pour anticiper les évolutions futures. Le portail Drias en est un exemple, qui s'appuie sur des laboratoires français de modélisation du climat – IPSL, Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique (CERFACS), Centre national de recherches météorologiques (CNRM) – et met à disposition des projections climatiques régionalisées<sup>83</sup>.

Le changement climatique, on l'a vu, pose un problème d'accès à la ressource en eau, de modifications des pratiques et des usages à tout niveau et toute échelle – industriels, agriculteurs, particuliers – de sobriété de l'eau. La raréfaction des eaux a une incidence nette sur leur qualité, par diminution de l'effet de dilution par exemple. L'exemple d'une utilisation récréative de l'eau qu'est la baignade illustre bien cette problématique : le réchauffement des eaux, notamment des lacs, se répercute sur la température de toute la colonne d'eau, et favorise le développement

de cyanobactéries et des cyanotoxines associées, qui se manifeste par des blooms algaires. Ces toxines ont un rôle bien connu d'altération écologique et sanitaire des eaux. Leur prolifération massive impacte de façon directe ou indirecte les usagers. De plus, les augmentations de température favorisent des réactions de photodégradation, décomposant ces cyanobactéries en « fraction dissoute chromophorique de la matière organique » (la part qui interagit avec la lumière, ce qui influe sur la température de surface des eaux et les réactions de photolyse), dont on sait mal le rôle sur la dégradation d'autres cyanotoxines<sup>84</sup>.

Cette problématique bien connue a fait l'objet, en Île-de-France, pour la partie Seine et Marne, de la mise en place d'un plan « Qualité de l'eau et baignade » en 2019. Il vise notamment à améliorer la qualité des eaux, mais aussi à renforcer la biodiversité et rendre possible la baignade pour 2024. Cet objectif doit être atteint notamment grâce à diverses mesures d'amélioration et de renforcement des traitements des eaux usées, dont les origines peuvent être variées (stations d'épuration, bateaux), et des rejets d'eaux pluviales.

Une autre démarche originale de réflexion et d'implication des acteurs et usagers de la nappe sur son devenir et les solutions alternatives à son utilisation a été lancée grâce à la prospective menée par AQUI'Brie sur la nappe aquifère multicouche du Champigny<sup>85</sup>. Dans un modèle mathématique de nappe, les hydrogéologues d'AQUI'Brie injectent des scénarios

<sup>82</sup> Maugis P., Oliver J-L., 2015. *STRATEAU, un outil innovant pour identifier les possibles crises de l'eau - Exemple du diagnostic des demandes en eau en France. Les tensions sur l'eau en Europe et dans le bassin méditerranéen : des crises de l'eau d'ici 2050 ?*, Oct 2015, Paris, France, hal-02936883f.

<sup>83</sup> <http://www.drias-climat.fr/>

<sup>84</sup> Vione D., Rosario-Ortiz F.L., 2021. Foreseen Effects of Climate-Impacted Scenarios on the Photochemical Fate of Selected Cyanotoxins in Surface Freshwaters. *Environmental Science and Technology*, 55(16), 10928-10934.

<sup>85</sup> Communication M. Pruvost-Bouvattier, L'Institut Paris Région. Voir aussi <https://www.aquibrie.fr/>

climatiques sélectionnés et ajustés au territoire par le CERFACS et Mines ParisTech. Sur ces bases physiques, qui sont du ressort des scientifiques (représentation du fonctionnement complexe des échanges entre nappe et cours d'eau, choix des scénarios climatiques les plus adaptés au territoire), l'originalité de la démarche est de laisser ensuite les « manettes » de l'outil de modélisation aux acteurs du territoire. Ils se réunissent tous les six mois pour partager les connaissances acquises et voter pour les futurs scénarios à « jouer » sur le modèle du Champigny : évolution de la population, de l'occupation des sols, variation des pompages selon les usages, recours à des solutions alternatives pour soulager la nappe...

Parallèlement à ces ateliers, trois groupes techniques se réunissent plus régulièrement pour explorer des solutions d'adaptation et évaluer leurs impacts sur la ressource. En 2020, les acteurs du territoire de la nappe du Champigny ont voté pour étudier la réutilisation des eaux usées traitées (qui s'ouvre désormais plus largement aux eaux non conventionnelles comme les eaux de piscine), l'irrigation du futur (sélection variétale, outils d'aide à la décision, retenues d'eau de drainage...) et la gestion des eaux pluviales chez les industriels (ICPE). Sans dogmatisme ni œillère, des acteurs de tous horizons débattent, visitent des installations et réfléchissent à la préservation de la nappe dans le contexte climatique de 2060. Par exemple, le groupe technique Irrigation instrumente deux retenues d'eau de drainage agricole, et évalue collégialement leurs impacts sur la nappe et les cours d'eau.

<sup>86</sup> [https://www.synteau.com/wp-content/uploads/2020/11/MICROPOLLUANTS\\_INRAE\\_SYNTEAU.pdf](https://www.synteau.com/wp-content/uploads/2020/11/MICROPOLLUANTS_INRAE_SYNTEAU.pdf)

Depuis 2020, c'est près de 350 personnes issues de 90 structures des secteurs privé et public qui participent à la démarche.

Enfin, un dernier exemple de dispositifs originaux qui visent à améliorer la qualité des eaux concerne les stations d'épuration. Un certain nombre de micropolluants ayant le plus d'impact sur l'environnement (pesticides, PCB, hormones, antibiotiques) passent au travers de la maille de traitement et ne sont pas éliminés. Ainsi, selon une étude conjointe de l'INRAE et du Synteau, 153 micropolluants organiques sur 286 évalués persistaient dans les eaux rejetées en 2020<sup>86</sup>. Parmi les solutions envisagées, la gestion à la source des émissions (réduction du nombre et des quantités de produits utilisés), l'interdiction de la mise sur le marché de molécules écotoxiques, toxiques et rémanentes ou encore le développement de nouveaux procédés de traitement des eaux (e.g. oxydation, adsorption) semblent les plus intéressantes pour réduire les impacts. Toutefois, elles ne peuvent être appliquées partout, et l'amélioration peut être longue à obtenir.

Néanmoins ces eaux usées sont aussi envisagées comme des solutions à la recharge maîtrisée d'aquifères (MAR) et de traitement de l'eau par le sol et l'aquifère (SAT). Ces recharges sont des solutions séduisantes pour répondre à la raréfaction de la ressource. Dans ce sens, les travaux du BRGM et de l'UMR Metis (Milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols, Sorbonne Université)<sup>87</sup> sur la Seine aval, en Normandie, ont étudié des composés organiques d'origine pharmaceutique et industrielle qui posent habituellement problème au regard de la qualité

<sup>87</sup> Guillemoto Q., Picot-Colbeaux G., Valdes D. *et al.*, 2022. Transfer of trace organic compounds in an operational soil-aquifer treatment system assessed through an intrinsic tracer test and transport modelling. *Science of the Total Environment*, 836,155643.

de l'eau. Il s'agit de molécules persistantes ou à rémanence forte, à l'exemple de la carbamazépine (antiépileptique) et de l'ibuprofène (analgésique et antipyrétique). Ces travaux semblent montrer une certaine efficacité d'épuration des eaux grâce à la filtration de

certaines molécules par les sols. Néanmoins, cette efficacité dépend beaucoup, outre les propriétés intrinsèques de dégradation de ces molécules, des conditions du site notamment d'oxydo-réduction et de l'activité microbienne des sols.

# 04

## **Pollution des sols**

**Christine Aubry • Christian Mougin**

Constitutrices : Anne Barbillon, Isabelle Lamy, Sabine Houot.

En région Île-de-France, on peut distinguer aujourd'hui des sols agricoles, forestiers (et de pelouses naturelles) et des sols urbains (lesquels peuvent aussi intégrer des forêts urbaines et des formes d'utilisations agricoles des sols). Les contaminations des sols du fait des activités anthropiques sont anciennes et relativement bien documentées pour certains polluants inorganiques, ceux-ci étant non biodégradables et s'accumulant le plus souvent dans les horizons de surface. En revanche, il existe peu de données concernant la contamination des sols franciliens, agricoles ou non, par les contaminants organiques. La dynamique de biodégradabilité de ces derniers, ainsi que la formation de sous-produits souvent difficilement détectables ou inconnus, rendent les mesures délicates.

Les pollutions d'origine industrielle, pollutions localisées majoritaires, font l'objet d'un suivi administratif depuis les années 1990 (inventaires Basias et Basol, qui restent néanmoins partiels). D'autres pollutions ponctuelles ou les pollutions diffuses restent mal connues et ne font pas l'objet de suivi particulier.

## A – Inventaire des contaminations des sols en Île-de-France

### A.1 - Sols agricoles et forestiers

En zones périurbaines et rurales franciliennes, les sols forestiers et de pelouses naturelles<sup>88</sup> sont faiblement contaminés en métaux lourds d'origine anthropique

(plomb, cadmium, cuivre et zinc) de même qu'en éléments traces d'origine naturelle (arsenic, chrome et nickel)<sup>89</sup>. Les activités agricoles ont historiquement enrichi les sols en éléments traces métalliques (ETM), du fait notamment de l'usage séculaire de boues et déchets urbains<sup>90</sup> et, plus récemment, par suite d'apports d'intrants (engrais chimiques, pesticides, et leurs dérivés). Des apports supplémentaires sur les sols agricoles et forestiers peuvent être liés à la proximité entre l'agriculture et des activités (trafic routier, industries) qui entraînent des dépôts atmosphériques de polluants à la surface des sols.

La contamination des sols agricoles périurbains et ruraux en ETM est variable et généralement non préoccupante en Île-de-France. Cependant, on peut retrouver localement dans ces sols des teneurs élevées en ETM, notamment aux abords de Paris (*figure 12*), du fait notamment des utilisations pendant des décennies des boues urbaines de la ville. Des études ont aussi montré des teneurs localement élevées en HAP, en résidus médicamenteux, en pesticides et en plastiques. Ces contaminations cumulatives ont pu conduire à l'interdiction d'une activité agricole traditionnelle considérée comme trop risquée pour la santé humaine et environnementale. Il en a ainsi été des anciennes plaines d'épandage des eaux usées de la ville de Paris<sup>91</sup> et notamment de la plaine de Pierrelaye-Bessancourt, au Nord-Ouest de la métropole, qui a fait l'objet d'une étude spécifique de l'INRAE.

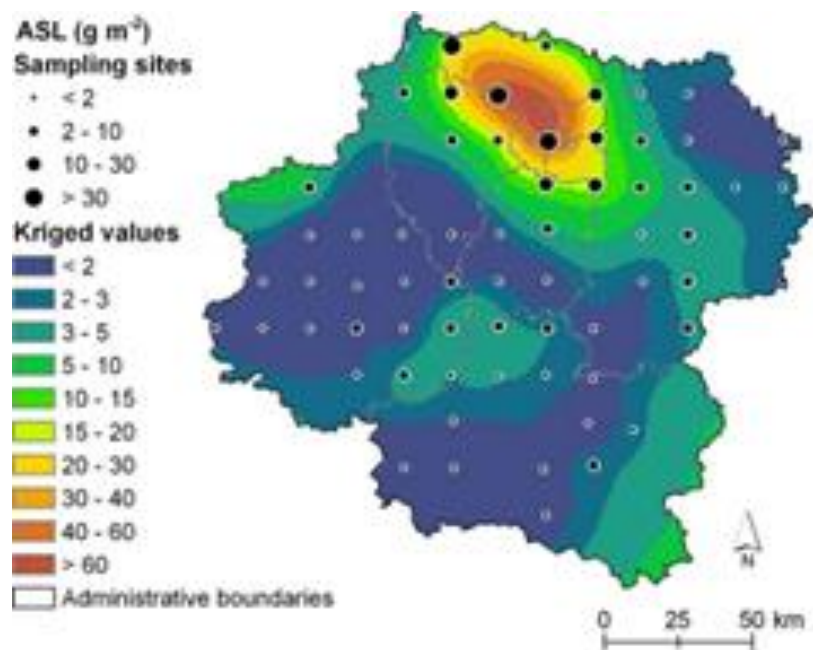
<sup>88</sup> Loti L., Dubs F., 2017. Trace element concentrations along a gradient of urban pressure in forest and lawn soils of the Paris region (France). *Science of the Total Environment*, 598, 938-948. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.111>

<sup>89</sup> Même si les teneurs en ETM anthropiques sont supérieures aux standards mondiaux, elles sont équivalentes aux normes européennes et françaises pour le cadmium et égales ou inférieures à ces normes pour les autres éléments.

<sup>90</sup> Barles S., 2005. *L'invention des déchets*. Ed. Champ Vallon ; Cf l'exemple emblématique des Murs à Pêches de Montreuil, siège d'activités agricoles maraîchères et arboricoles intenses

depuis au moins le XVI<sup>e</sup> siècle et fortement utilisatrices de goudres urbaines marquant les sols en ETM, comme une étude de la DRIAAF l'a montré en 2009. <https://www.mon-treuil.fr/environnement/etat-des-lieux/pollution-des-sols-et-de-leau>.

<sup>91</sup> SJAAP, ARS Île-de-France, 2017. *Étude environnementale des anciennes plaines d'épandage d'Achères (78), de Triel-sur-Seine / Carrières-sous-Poissy (78) et de Méry-sur-Oise / Pierrelaye (95)*. Étude sanitaire, Rapport de synthèse des Trois Plaines, 20 décembre 2017.



ASL : Stock de plomb anthropogénique (ASL, *anthropogenic stock of lead*) (en  $\text{g/m}^2$ ) mesuré dans les 30 premiers centimètres du sol dans les échantillons prélevés. Représentation des variations spatiales continues des ASL estimées par méthodes statistiques d'extrapolation à partir des sites de prélèvements.

**Figure 12.** Niveaux de contamination en plomb du Bassin Parisien<sup>92</sup>.

Dans le passé, la plaine de Pierrelaye-Bessancourt a été irriguée avec les eaux usées non traitées de la ville de Paris pendant environ un siècle, ce qui permettait de rendre les sols fertiles et d'assurer une activité agricole, principalement du maraîchage. En effet, afin de surmonter le problème récurrent de pollution de la Seine, la Ville de Paris avait acheté au XIX<sup>e</sup> siècle les terrains de cette plaine qui présentaient des caractéristiques favorables à l'épandage des eaux usées et pouvaient être utilisés pour la ceinture maraîchère de Paris. Pendant une centaine d'années, des quantités massives d'eaux usées

brutes ont été apportées. En l'absence de système de traitement, la pollution des eaux d'irrigation a entraîné celle des sols. À la fin des années 1990, un décret de la préfecture a interdit la vente des cultures maraîchères de la plaine à cause de l'accumulation d'éléments traces dans certains légumes. Suite à ce décret, des travaux ont été entrepris<sup>93</sup> pour définir la nature ainsi que la distribution spatiale de la pollution des sols, et proposer des solutions aux agriculteurs. Les résultats de ces travaux ont montré l'importance de la contamination métallique des sols (zinc, cuivre, plomb, cadmium...) et

<sup>92</sup> Saby N., Arrouays D., Boulonne L. *et al.*, 2006. Geostatistical assessment of Pb in soil around Paris, France. *Science of the Total Environment*, 367, 212 – 221.

<sup>93</sup> Bourennane H., Dère Ch., Lamy I. *et al.*, 2006. Enhancing spatial estimates of metal pollutants in raw wastewater irrigated fields using a topsoil organic carbon map predicted from aerial photography. *Science of the Total Environment*, 361, 229-248.

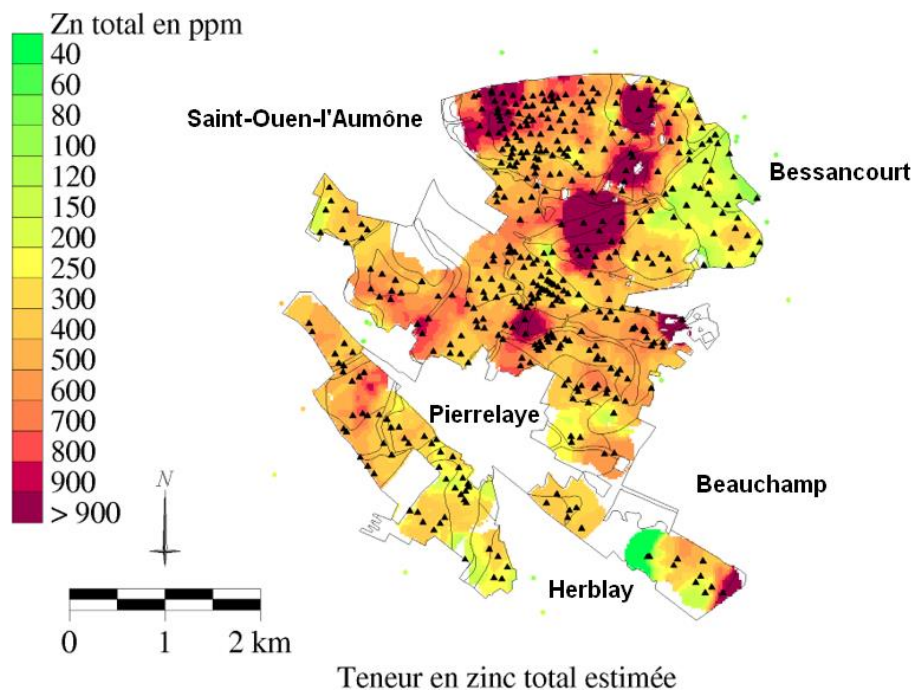
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.05.011> Lamy I., van Oort F., Dère C. *et al.*, 2006. Use of major- and trace-element correlations to assess metal migration in sandy Luvisols irrigated with wastewater. *European Journal of Soil Science*, 57: 731-740.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00765.x> Dère C., Lamy I., van Oort F. *et al.*, 2006. Trace metal inputs reconstitution and migration assessment in a sandy Luvisol after 100 years of massive irrigation with untreated wastewaters. *C.R. Geoscience* 338, 565-573. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.02.006>

VanOort F., Jongmans A.G., Lamy I. *et al.*, 2008. Impacts of long-term wastewater irrigation on the development of sandy Luvisols: consequences for metal pollutant distributions. *European Journal of Soil Science*, 59, 925-938. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01047.x>

sa répartition très hétérogène dans les horizons de surface des sols (*figure 13*), mais aussi l'existence d'un mécanisme géochimique de fixation des pollutions métalliques en surface par la matière organique,

ce qui est fortement lié au type d'activité agricole et au type de source de pollution.



**Figure 13.** Distribution spatiale de zinc dans les horizons de surface des sols du périmètre d'épandage des eaux usées dans la plaine de Pierrelaye-Bessancourt. La probabilité de dépassement d'une valeur seuil, correspondant à trois fois la valeur maximale de la « teneur agricole habituelle locale » peut être calculée. Pour le zinc, la probabilité de dépasser la valeur seuil de  $189 \text{ mg.kg}^{-1}$  est proche de 1 pour la plus grande partie de la plaine. Il en est de même pour le plomb et le cadmium, par exemple. Source : © I. Lamy – F. van Oort

Sur le long terme, l'irrigation intensive sur cette plaine a aussi provoqué un bouleversement complet des caractéristiques du sol sur toute sa profondeur, c'est-à-dire plus de 100 centimètres, aboutissant à l'apparition d'« anthroposols », suivant le référentiel français, ou de « technosols » suivant la classification internationale. De grandes quantités de polluants métalliques sont aujourd'hui présentes : de  $0,5$  à  $1,5 \text{ kg/m}^2$ , essentiellement concentrées dans la partie superficielle du sol.

L'irrigation massive (environ  $2\,700 \text{ mm}$  par  $\text{m}^2$  par an pendant 100 ans), a entraîné la migration du zinc et du cuivre vers la nappe phréatique sous-jacente. On observe aussi le déplacement des argiles des sols et leur dissolution partielle en profondeur, facilitant la migration des contaminants, qui ne sont plus piégés par le filtre que constitue l'argile du sol.

Après la décision d'arrêt des cultures maraîchères en 1999, la monoculture de maïs

irriguée a été développée sur le périmètre. Les grains de maïs présentent en effet l'avantage de moins accumuler les métaux que les feuilles et tiges, qui sont recyclés sur place. Cependant, l'arrivée d'un insecte parasite, la chrysomèle, un coléoptère originaire d'Amérique qui s'attaque aux racines du maïs, a conduit les services de la protection des végétaux à interdire, au moins partiellement, cette culture dans la plaine de Pierrelaye – Bessancourt. Celle-ci faisant partie des régions choisies dans le cadre du projet de boisement du « Grand Paris », le problème de la gestion de ces sols a été résolu par une indemnisation des agriculteurs et la mise en place d'une forêt.<sup>94</sup>

Des travaux récents non coordonnés ni conduits de façon systématique, infor-

ment de manière fragmentaire sur le degré de contamination des sols agricoles (ou non) en résidus de pesticides, en ETM, HAP ou autres contaminants (il n'existe pas de données publiées à notre connaissance sur les polluants issus des engrais de synthèse). Localement des épandages agricoles de matières organiques (effluents d'élevage issus de centres équestres, boues de stations d'épuration, voire composts de déchets verts...) peuvent contribuer à l'enrichissement des flux. On trouve des études portant sur certains éléments contaminants (*voir l'encadré « Les études par éléments », ci-après*), ainsi que des études plus intégratives et parfois plus longues menées dans le cadre de certains programmes de recherche (*voir l'encadré « Des études intégratives », ci-après*).

### Les études par éléments

**Phosphore :** Des chercheurs ont étudié en 2018 la gestion du phosphore (P) dans des systèmes sous agriculture conventionnelle ou biologique du Bassin Parisien<sup>95</sup>. Des échantillons de sol ont été prélevés en 2015 dans 59 parcelles. Les teneurs totales en P étaient très variables, comprises entre 0,31 et 0,95 mg par gramme de sol sec alors que les teneurs en P extractible (méthode Olsen) variaient de 0,009 à 0,11 mg/g. Plus de la moitié des parcelles présentaient des teneurs en « P Olsen » supérieures à 0,039 mg/g, le seuil au-delà duquel il est possible de se passer de fertilisation phosphorique, et un petit nombre avait des valeurs inférieures à 0,026 mg/g, seuil en dessous duquel est nécessaire un renforcement de la fertilisation en phosphore. Les valeurs moyennes de P Olsen sont quasiment identiques entre les parcelles en agriculture conventionnelle et biologique, il en est de même concernant les stocks calculés de phosphore.

**Microplastiques :** Support majeur de l'activité humaine en milieu continental, le sol est une voie importante d'entrée des matières plastiques dans l'environnement, et le premier compartiment à en subir les effets néfastes. Les matières plastiques et leurs produits dérivés s'accumulent dans les sols essentiellement suite à l'utilisation massive de films de paillage et

.../...

<sup>94</sup> Pernot R., Dans le Val d'Oise, naissance d'une forêt d'1 million d'arbres sur des terres agricoles polluées, *Actu-Environnement*, n°423. <https://www.actu-environnement.com/ae/news/naissance-foret-val-d-oise-arbres-climat-terres-agricoles-polluees-39164.php4#xtor=ES-6>

<sup>95</sup> Le Noë J., Garnier J., Billen G., 2018. Phosphorus management in cropping systems of the Paris Basin: From farm to regional scale. *J. Environ. Manag.* 205, 18-28. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479717309015>

d'autres produits en agriculture, de décharges sauvages...<sup>96</sup> Les épandages de boues résiduelles urbaines et d'autres formes d'amendements organiques comme les composts, les dépôts atmosphériques et l'abrasion routière des pneus sont d'autres sources de contamination par des éléments plastiques de petite taille et/ou déjà fragmentés.

Il n'existe pas à ce jour de suivi organisé des teneurs des sols agricoles en microplastiques (ou nanoplastiques) : d'après les quantités de boues classiquement épandues sur les parcelles (30 tonnes de matières sèches/ha/10 ans) et leurs teneurs en microplastiques (1 000 à 10 000 particules.kg<sup>-1</sup>), on peut calculer que leur épandage constitue une source majeure de contamination de ces sols, bien supérieure aux dépôts atmosphériques. Les apports de microplastiques par les retombées atmosphériques ont été démontrés (entre 13 et 110 particules.m<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup> en région parisienne)<sup>97</sup> : l'apport atmosphérique serait de l'ordre de 0,7 particule/kg de sol/jour sur les 10 premiers centimètres de l'horizon de surface, soit l'équivalent de 27 µg de plastiques/kg de sol/an. L'irrigation des sols peut constituer une autre source de microplastiques. Nous avons calculé que l'irrigation de cultures comme le maïs occasionnerait des apports de l'ordre de 1 particule/kg de sol/cycle cultural compte tenu des teneurs en plastiques apportées par les eaux de surface.

Pour les sols urbains ou industriels, ces apports pourraient être nettement plus significatifs, compte tenu des apports atmosphériques auxquels ils sont exposés (plusieurs dizaines de particules/m<sup>2</sup>/jour<sup>98</sup>). Compte tenu de l'absence de données quantitatives comparables sur les différentes entrées réelles de plastiques, il est impossible aujourd'hui de les hiérarchiser.

**Radioisotopes :** Dans le cadre du dispositif de longue durée des 42 parcelles (INRAE de Versailles), une étude a porté sur la contamination des sols par les dépôts atmosphériques de césium 137 (<sup>137</sup>Cs), ainsi que le devenir de ce radioisotope en fonction des pratiques agricoles<sup>99</sup>. L'activité du <sup>137</sup>Cs dans l'horizon superficiel des échantillons de sols maintenus en jachère nue augmente dès 1950 (essais nucléaires dans le monde) et l'accident de Tchernobyl est enregistré en 1986 (*figure 14*).

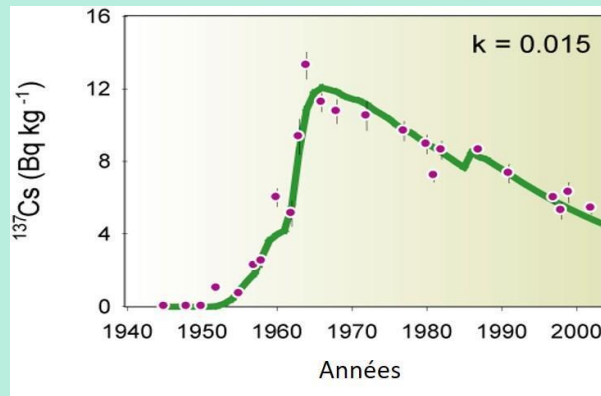
.../...

<sup>96</sup> Mougin C., Lamy I., Ciadamidaro L., Houot S., Gasperi J., Driss R., Tassin B., 2020. "Les plastiques dans les sols : quels niveaux de contaminations et quels impacts écotoxicologiques ? » In *Les sols urbains sont-ils cultivables ?* Mougin C., Douay F., Canavese M., Lebeau T., Rémy E. (Éditeurs), Collection Matière à débattre et décider, Editions Quae, Versailles, chapitre 10, pp.182-192, ISBN 978-2-7592-3202-4.

<sup>97</sup> Dris R., Gasperi J., Saad M., Mirande C., Tassin B., 2016. Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin* 104: 290-293. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.006>

<sup>98</sup> Dris et al. 2016, op. cit.

<sup>99</sup> Monna F., van Oort F., Hubert P. et al., 2009. Modeling of <sup>137</sup>Cs migration in soils using an 80-year soil archive: role of fertilizers and agricultural amendments. *J Environ Radioact.*, 100(1), 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.09.009>



**Figure 14.** Activité en césium 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) mesurée dans les échantillons de sols (points), et courbe modélisée dans le dispositif des 42 parcelles de Versailles.

## Des études intégratives

**Étude Piren-Seine :** Une étude réalisée sur 32 échantillons prélevés dans des sols franciliens en 2009-2010 dans le cadre du PIREN Seine (12 échantillons de zones rurales et 20 de zones urbanisées) a dressé un état des contaminations des sols par les métaux et 82 contaminants organiques<sup>100</sup>. Si certains contaminants étaient faiblement, beaucoup d'entre eux étaient systématiquement détectés avec des valeurs importantes mais variables. Les plus fortes variabilités étaient notées pour les HAP (150-55 000  $\mu\text{g}/\text{kg}$  de sol sec), majoritairement issus des procédés de combustion. En Île-de-France, leurs émissions proviennent surtout du trafic routier, et la forte variabilité s'explique essentiellement par la distance entre l'axe routier et le point de prélèvement (*cf ci-après*). Les teneurs en HAP et PCB (1-71  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) sont comparables à celles rapportées dans la littérature pour les zones urbaines et péri-urbaines. Les teneurs des polybromodiphényléthers (PBDE, 0,3-13  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) dans les sols franciliens sont également proches de celles rapportées dans d'autres articles. À l'inverse, les teneurs en esters de phtalates (AES, 10-1700  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) sont plutôt dans les valeurs inférieures à celles mesurées à travers le monde.

La contamination par les composés fluoroalkylés (PFAS) reste peu documentée à ce jour. Bien que l'effet de l'usage du sol ne puisse être mis en évidence pour tous les contaminants certains échantillons sont plus fortement contaminés que d'autres, avec les concentrations les plus fortes mesurées dans les parcelles fortement urbanisées, à proximité de zones industrielles et commerciales, des voies de circulation, aéroports, etc. Aucune corrélation spécifique n'est apparue entre les teneurs des sols en matière organique et leurs teneurs en polluants, suggérant différents historiques de transport atmosphérique et de dépôts.

.../...

<sup>100</sup> Gaspéri J., Ayrault S., Moreau-Guigon E. *et al.*, 2018. Contamination of soils by metals and organic micropollutants: case study of the Parisian conurbation. *Environ Sci Pollut Res Int* 25(24), 23559-23573. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-016-8005-2>

**Études RMQS :** Le Réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS) assure le suivi de 2 240 sites répartis uniformément en métropole et outre-mer selon une maille carrée de 16 km de côté. De nombreuses analyses (propriétés physiques, chimiques et biologiques), dont celles des contaminations diffuses, ont conduit au développement d'approches de géostatistiques. Les 16 HAP ont été analysés dans 549 sites du RMQS sur des échantillons collectés en 2002 et 2009<sup>101</sup>. Les concentrations maximales relevées variaient entre 30 et 1 190 µg/kg de sol sec, dans les valeurs basses produites par le programme PIREN-Seine.

Une seconde étude reposant sur des échantillons collectés durant la même période a concerné la contamination des sols par le lindane, un insecticide organochloré interdit en 1998<sup>102</sup>. Au niveau national ainsi qu'en Île-de-France, les concentrations mesurées se répartissaient en trois catégories selon les points (< 0,2 µg/kg de sol sec ; 0,2-1,0 µg/kg et > 1,0 µg/kg). Au niveau régional, les teneurs les plus élevées ont été obtenues dans les zones d'agriculture intensive en intrants, comme la Beauce. Toutefois, dans d'autres zones, des « points chauds » de contamination au lindane sont présents dans les sols qui retiennent facilement le pesticide, tels les sols argileux. Enfin, dans le cadre de la phyto-pharmacovigilance portée par l'ANSES, le programme Phytosol vise à quantifier 111 substances actives de pesticides (incluant le produit de transformation AMPA) dans un certain nombre de points du RMQS. Ce programme ne concerne actuellement qu'un point, en Seine-et-Marne.

**Études Qualiagro :** L'essai Qualiagro<sup>103</sup> est situé à Feucherolles, dans les Yvelines. Sur 6 ha, il est divisé en 40 parcelles expérimentales. Il permet de comparer les effets d'apports répétés de différents « produits résiduels organiques » (PRO) (composts de biodéchets, de boues, d'ordures ménagères résiduelles, fumier) dans le cadre d'une rotation blé/maïs, avec un témoin sans apports. Depuis 2013, ces effets sont étudiés dans un système en agriculture biologique. Les HAP, les PCB, les phtalates (DIBP, DBP, DEHP, DiNP, DiDP), les alkylbenzène sulfonates linéaires (ALS) et les nonylphénols (NP) ont été suivis dans les PRO, les sols et les plantes. Les contaminants organiques les plus abondants dans les sols de l'essai sont les HAP (182-1 045 µg/kg de sol sec). Les PCB présentent des teneurs de l'ordre de quelques µg/kg. Suivis depuis le début de l'essai en 1998, ils ne semblent pas s'accumuler dans les sols.

Les autres contaminants n'ont été mesurés qu'en 2006 et 2007 : de l'ordre de la centaine de µg/kg en 2006 et à l'état de traces en 2007. Aucun effet significatif des traitements (apports de PRO) n'a été observé sur l'évolution des teneurs en contaminants organiques dans les sols. Une étude plus récente a porté sur les résidus de produits pharmaceutiques apportés aux sols par l'apport de PRO<sup>104</sup>. De très faibles concentrations en médicaments (fluoroquinolones et carbamazépine) ont été mesurées dans les sols, < 10 µg/kg sol sec, après plusieurs applications de PRO.

<sup>101</sup> Villanneau E., Saby N.P.A., Orton T.G., Jolivet C., Boulonne L., Caria G., Barriuso E., Bispo A., Briand O., Arrouays D., 2013. First evidence of large-scale PAH trends in French soils. *Environmental Chemistry Letters* 11:99-104, doi: 10.1007/s10311-013-0401-y

<sup>102</sup> Orton TG., Saby N., Arrouays D., Jolivet CC., Villanneau E-J., Marchant BP., Caria G., Barriuso E., Bispo A., Briand O., 2013. Spatial distribution of Lindane concentration in topsoil across France. *Sci Total Environ* 15;443:338-50. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969712014039>

<sup>103</sup> Qualiagro 2020. <https://www6.inrae.fr/qualiagro>.

<sup>104</sup> Bourdat-Deschamps M., Ferhi S., Bernet N. et al., 2017. Fate and impacts of pharmaceuticals and personal care products after repeated applications of organic waste products in long-term field experiments. *Science of The Total Environment*, 607–608, 271-280, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.240>

Le trafic routier, et secondairement les industries (dont les cimenteries pour le cadmium), sont aussi sources exogènes de dépôts sur les sols agricoles et forestiers. On a cependant pu montrer que les contaminations en ETM, notamment en plomb, restent faibles en sols agricoles périurbains et ruraux et liés à la distance aux sources principales d'émissions (axes routiers tels que les autoroutes)<sup>105</sup> : la distance entre les voies de forte circulation et les parcelles agricoles est aujourd'hui rarement un obstacle à l'activité agricole en Île-de-France, sauf par rapport à certains cahiers des charges de l'industrie agro-alimentaire fortement prescriptifs sur des distances dites « de sécurité », par ailleurs peu établies sur un plan scientifique<sup>106</sup>.

## A.2 - Les sols urbains

En zone urbaine dense, c'est-à-dire Paris et essentiellement la petite couronne (plus quelques communes situées en moyenne et grande couronne), les sols urbains s'étendent au cours du siècle dernier très largement au détriment des sols agricoles. Leur histoire complexe, faite de nombreux remaniements, déplacements et ré-apports (remblais) liés aux aménagements urbains, est faite aussi de nombreux apports organiques variés au cours des siècles, qui peuvent d'ailleurs en faire des sols localement très fertiles<sup>107</sup>. Les contaminations et, dans certains cas,

les pollutions, notamment aux métaux lourds, HAP et autres contaminants organiques, peuvent être localement importantes et inquiétantes<sup>108</sup>. De plus, selon les données BASOL et SIS, environ 900 sites et 3 000 ha sont concernés en 2021 par des pollutions d'origine industrielle, dont 700 ha impliqués dans des projets d'aménagements en cours ou prévus<sup>109</sup>.

Selon une étude déjà mentionnée<sup>110</sup>, les sols forestiers urbains actuels (souvent d'anciens sols maraîchers fortement fertilisés aux eaux usées urbaines) sont plus contaminés que leurs équivalents ruraux en Île-de-France : ils ont des teneurs plus élevées que les normes Afnor notamment pour le cadmium et pourraient présenter des risques de toxicité pour cet élément<sup>110</sup>. Les espaces verts urbains peuvent aussi être contaminés pour les mêmes raisons que précédemment (apports sur d'anciennes terres maraîchères), plus fréquemment lorsqu'ils sont antérieurs aux années 2000<sup>111</sup>.

Or, l'usage des sols urbains est en pleine mutation, avec notamment le développement de l'agriculture urbaine, dont certaines formes sont en plein sol (jardins partagés et familiaux, microfermes urbaines), ce qui renvoie à questionner l'expertise sur ces sols<sup>112</sup>. Les jardins familiaux

<sup>105</sup> Petit C., Loubet B., Rémy E. *et al.*, 2013, Dépôt de polluants sur les espaces agricoles à proximité des voies de transport en Île-de-France, *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Hors-série 15, février 2013, <http://vertigo.revues.org/12833>

<sup>106</sup> Petit C., Aubry C., Remy-Hall E., 2011. Agriculture and proximity to roads: How should farmers and retailers adapt? Examples from the Île-de-France region. *Land Use Policy* 28, 867-876. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837711000226>

<sup>107</sup> Schwartz C., 2013. Jardins Potagers, terres inconnues. Coll Ademe, 176 p.

<sup>108</sup> Les murs à pêches de Montreuil ayant été le siège d'activités arboricoles majeures depuis plus de quatre siècles, provoquant de fortes contaminations, notamment au plomb, ont été aussi le siège d'activités artisanales plus récentes fortement

polluantes. E. Marnette, Montreuil : nouvelle alerte aux polluants dans les Murs à Pêches, *Le Parisien*, 30 septembre 2018, <https://www.leparisien.fr/seine-saint-denis-93/montreuil-nouvelle-alerte-aux-polluants-dans-les-murs-a-peches-30-09-2018-7907154.php>

<sup>109</sup> Institut Paris Region, 2022. *L'environnement en Île-de-France*, mai 2022, Chap. Pollution des sols, 92-97.

<sup>110</sup> Loti *et al.*, 2017, *op. cit.*

<sup>111</sup> Gitton G., Verger Y., Brondeau F. *et al.*, 2018. L'économie circulaire : cercle vertueux ou cercle vicieux ? Le cas de l'utilisation de terres maraîchères pour aménager des espaces verts urbains, *Géocarrefour*, 92/2. <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.11950>

<sup>112</sup> Rémy E., Branchu P., Canavese M., Berthier N., 2017. Les risques sanitaires liés aux jardins collectifs : l'expertise sur le sol urbain en débat. *Lien social et Politiques*, 78, 49-69. <https://doi.org/10.7202/1039338ar>

(souvent en petite couronne car, là comme ailleurs, liés à la progression de l'industrie au XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècle) peuvent contenir localement des teneurs élevées en métaux lourds : la « découverte » de ces pollutions (notamment au plomb) dans ces jardins historiques (certains ont plus de 70 ans d'existence) a souvent été récente et fortuite, donnant lieu à des interventions variées des autorités de santé, allant de l'autorisation de poursuite, pour les jardins du Fort d'Aubervilliers par exemple<sup>113</sup> à des fermetures administratives comme en 2021 pour les jardins de Mazagran à Vitry-sur-Seine<sup>114</sup>.

Ces questions sont depuis peu traitées pour les jardins associatifs ou les microfermes urbaines dans des programmes de recherche (ANR JASSUR 2013-2016) et de recherche-action<sup>115</sup>, tel le programme Refuge-Sécuragri<sup>116</sup> : on y confirme la variabilité des teneurs de sols de jardins ou de microfermes en contaminants, parfois élevées voire très élevées. Ce cas implique alors de réaliser des Évaluations quantitatives de risques sanitaires (EQRS) afin de décider des formes possibles d'utilisation<sup>117</sup>. Aujourd'hui, ces sols urbains font l'objet de plus d'attention : néanmoins, d'une part les démarches de caractérisation et d'évaluation des risques de conta-

mination sont très loin d'être systématiques dans la région parce que, notamment, coûteuses ; d'autre part, de nouvelles contaminations peuvent apparaître : l'usage intensif de composts de déchets verts dans les espaces verts et en agriculture urbaine pourrait devenir, s'il n'est pas bien géré, un nouveau flux de contaminants, clairement à surveiller en zones urbaines<sup>118</sup>. Des recherches et des accompagnements d'acteurs fondés sur ces recherches sont ainsi largement à privilégier.

## B – Interactions changement climatique -pollution des sols

Le changement climatique a des conséquences sur le devenir et les effets des polluants auxquels les êtres vivants sont exposés<sup>119</sup>. Les scénarios du GIEC, outre des augmentations de température, prévoient une augmentation de la variabilité du climat, ainsi que de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes (vagues de chaleur, sécheresse ou au contraire précipitations extrêmes). Pour l'Île-de-France, les scénarios doivent être encore affinés. En interagissant avec d'autres pressions sur les écosystèmes, ces perturbations vont moduler le devenir de milliers de composés chimiques organiques et d'éléments traces métalliques

<sup>113</sup> Legout C., Mienne A., 2011. Jardins familiaux du Fort d'Aubervilliers. Résultats de l'enquête alimentaire. Institut de veille sanitaire, 6 p. <http://www.invs.sante.fr>

<sup>114</sup> Ce n'est qu'en 2014 que le Haut conseil de Santé Publique a fixé des niveaux de teneurs dans les sols en plomb dans les espaces verts, jardins potagers, cours d'école etc. fréquentés par des enfants, dans le cadre de sa lutte contre le saturnisme. À partir de 100 ppm, on déclenche une EQRS, au-delà de 300 ppm c'est au tour de mesures de plombémie pour les enfants et femmes enceintes.

<sup>115</sup> Besnard C., Branchu P., Charvet R. *et al.*, 2017. *Guide « Qualité et usages des sols urbains : points de vigilance »*, Pollusols, 17 p.

<sup>116</sup> Barbillon A., Aubry C., Nold F. *et al.*, 2019. Health Risks Assessment in Three Urban Farms of Paris Region for Different Scenarios of Urban Agricultural Users. A Case of Soil Trace Me-

tals Contamination. *Agricultural Sciences*, 10, 352-370. Barbillon A *et al.*, 2020. *Guide REFUGE: Risques en Fermes Urbaines Gestion et Evaluation*. <http://ademe.fr/guide-refuge>

<sup>117</sup> Ces EQRS prennent en compte les deux principaux risques en agriculture urbaine, l'ingestion d'aliments ayant poussé sur ces sols et potentiellement contaminés, et l'ingestion de sols (poussières chargées, contacts mains-terre) ainsi que les diverses formes et intensités de fréquentation par les différents types d'utilisateurs (enfants, adultes, visiteurs, travailleurs...). De ces démarches découlent des mesures de gestion variées, du simple évitement de certaines productions à des interdictions totales de fréquenter le site.

<sup>118</sup> Charvet R., Nold F., 2020. Qualité des terres urbaines en Île-de-France. p 24-40 In : *Les sols urbains sont-ils cultivables ?*, Éd. Quae.

<sup>119</sup> Mougin C., Lamy I., Caquet T., 2015. La survie des organismes du sol, entre polluants et changements climatiques. *Biofutur* 371, 29-31.

présents dans l'environnement, potentiellement contaminants, ainsi que par voie de conséquence leur biodisponibilité et leur écotoxicité.

Les processus de transfert des contaminants organiques, qui incluent volatilisation, infiltration et ruissellement, ainsi que les phénomènes de transformation sont affectés. L'augmentation de la température ainsi que celle de l'humidité du sol, suite à un épisode pluvieux, favorisent généralement la volatilisation ou la dégradation des pesticides. Le ruissellement est, quant à lui, accru par les fortes précipitations, avec un transfert vers les eaux de surface ou souterraines peu profondes. Il en est de même pour l'érosion des sols, qui déplace des particules éventuellement chargées en polluants d'une parcelle à l'autre, voire sur de longues distances.

La température ne joue pas seulement sur la mobilité des contaminants organiques, elle impacte également leur transformation. Des températures élevées, de même qu'une humidité importante du sol stimulent les réactions microbiennes et chimiques de transformation. Si l'augmentation de température contribue le plus souvent à réduire dans les sols la persistance et les concentrations de polluants facilement biodisponibles et potentiellement toxiques sur le court terme pour les organismes, elle conduit aussi à la formation plus rapide de résidus stabilisés (non extractibles) dans les sols dont la remobilisation et la toxicité sur le long terme sont mal connues.

À la différence des micropolluants organiques, les éléments traces métalliques sont naturellement présents dans les sols à des teneurs variables suivant l'origine de la roche mère qui a présidé à la formation

du sol. Apportés dans l'environnement à des concentrations parfois élevées, ces ETM ne sont pas biodégradables, mais changent de forme physico-chimique (spéciation) sans influence sur leur teneur totale. La spéciation conditionne leur mobilité dans le sol et leur biodisponibilité pour les organismes du sol, donc leur transfert et leur accumulation. Elle est sous la dépendance de différents paramètres caractéristiques du milieu (pH de la solution du sol, conditions d'oxydoréduction, teneur en matière organique...), tous sensibles au changement climatique. L'évolution du régime pluviométrique entraînera, en cas d'excès d'eau, une dilution des teneurs et un déplacement des équilibres entre phases solide et liquide du sol. À l'inverse, un déficit en eau verra augmenter les concentrations des ETM dans la solution du sol, mais aussi la force ionique de cette dernière, préjudiciable à la vie des organismes. En accélérant la minéralisation de la matière organique des sols, une élévation de température augmentera le relargage des éléments traces qu'elle piègeait.

D'une façon générale, les conséquences de ces évolutions climatiques sur la mobilité ou la biodisponibilité des contaminants organiques et des ETM sont encore mal connues et difficilement prévisibles, notamment en raison des difficultés à modéliser l'ensemble des réactions biotiques et abiotiques impliquées. De la même façon, l'évolution des impacts des formes bioactives sur les organismes des écosystèmes et l'Homme est mal connue.

## C – Solutions et questions de recherche

La Commission européenne a défini une stratégie pour la protection des sols à l'horizon 2030<sup>120</sup>. Il convient de se mettre en situation de pouvoir intégrer les piliers de cette stratégie au niveau francilien. Mais d'ici là, il est nécessaire de mieux connaître la contamination des sols, préalable à une mise en évidence d'impacts climatiques sur ces contaminations et leurs conséquences écotoxicologiques et sanitaires. Aujourd'hui les données de contaminations sont très fragmentées et parfois difficilement accessibles. Les actions suivantes pourraient être mises en œuvre.

### C-1. Connaître la contamination chimique et organique des sols franciliens

Tout d'abord il faut **organiser l'inventaire des données de contamination des sols existantes** auprès des différents acteurs (structures de recherche, bureaux d'étude, collectivités locales...). De même, il s'agit d'organiser la collecte des données et métadonnées pertinentes et de les centraliser.

Des campagnes de suivi régulier reposant sur les observatoires existants (par exemple RMQS...) peuvent conduire à **la mise en place d'un observatoire des sols franciliens** : les approches nécessitent de définir les contaminants à rechercher, des protocoles de prélèvement standardisés, la gamme des analyses à couvrir, les laboratoires d'analyses pertinents.

**La liste des contaminants mesurés doit être étoffée** : actuellement, y compris dans le réseau RMQS, on dispose uniquement de quelques contaminants chimiques (métaux, HAP, PCB), ceux inclus aujourd'hui dans la réglementation Sites

et Sols Pollués, très orientée par les sites industriels. De nombreux contaminants n'y sont pas, dont les organochlorés, ou de façon ponctuelle, notamment ceux provenant des activités agricoles ou assimilées, dont les pesticides, mesurés dans seulement 60 sites du réseau RMQS sur les 2 200 sites nationaux (ou dans le site Qualiagro dans les Yvelines). En Île-de-France, où les contaminations d'origine urbaine, industrielle et agricole des sols peuvent être importantes, il est très important de pouvoir disposer à l'avenir d'un panel beaucoup plus large de mesures de contaminants chimiques et organiques dans les sols. Il serait alors nécessaire de **cartographier les contaminations majeures et de favoriser les recherches sur les risques associés pour la santé humaine et environnementale**.

**La mesure d'indicateurs biologiques de fonctionnement des sols** (biodiversité micro et mésofaune notamment) serait bénéfique.

On pourrait, enfin, **favoriser, par la formation, la montée en compétence des gestionnaires de foncier en urbain et périurbain sur la caractérisation et la gestion des contaminations des sols**, notamment dans le contexte de fort développement des nouveaux usages de ces sols par l'agriculture intra et périurbaine, qui donne lieu à des fréquentations accrues de ces zones par les habitants.

### C-2. Connaître les interactions entre contamination des sols et changement climatique

Les interactions entre contaminants et climat sont très mal connues dans le compartiment sol par comparaison avec le compartiment atmosphérique ou même le compartiment des eaux. En effet, peu

<sup>120</sup> Montanarella L., Panagos P., 2021. The relevance of sustainable soil management within the European Green Deal. *Land*

Use Policy 100: 104950,  
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104950>

d'équipes de recherche sont impliquées, l'organisation de la recherche conduit à une segmentation des approches (contaminations ou climat), et très peu d'études sont réalisées en conditions naturelles. Les recherches doivent s'articuler autour de trois problématiques majeures, en prenant en compte certaines fonctions écologiques assurées par les sols :

- **Impact du changement climatique sur le devenir des contaminants dans les sols**, prise en compte de scénarios d'élévation de température et de modification des régimes de précipitations notamment sur la biodisponibilité des contaminants. Les épisodes d'humectation-dessiccation plus intenses et plus fréquents vont probablement conduire à des piégeages de certains polluants dans les sols.

- **Impacts du changement climatique sur les interactions entre contaminations et biodiversité des sols**. Il est très probable que ces interactions climat-contaminations des sols aient des effets aujourd'hui peu connus sur la micro et macrofaune du sol. De précédentes études menées notamment sur la Plaine de Pierrelaye ont montré l'évolution des traits fonctionnels des invertébrés des sols<sup>121</sup>.
- **Impact des contaminations des sols sur l'évolution du climat**, notamment via la modification de la régulation des échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère<sup>122</sup>.

Là encore, seul un observatoire des sols franciliens pourrait permettre de progresser significativement dans ce domaine

---

<sup>121</sup> Hedde M., van Oort F., Lamy I., 2012. Functional traits of soil invertebrates as indicators for exposure to soil disturbance. *Environmental Pollution*, 164: 59-65, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.01.017>

<sup>122</sup> Sereni L., Guenet B., Lamy I., 2021. Does Copper Contamination Affect Soil CO<sub>2</sub> Emissions? A Literature Review *Frontiers Environmental Science*, 9, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.585677>

# 05

---

Conclusion générale

Air, eaux, sols : ces trois matrices de notre environnement en Île-de-France peuvent être déjà fortement impactées par des contaminations. Lorsqu'elles le sont, cela est largement dû aux activités anthropiques, urbaines, industrielles et agricoles, toutes trois très présentes dans la région. Ces contaminations sont bien sûr variables en nature et intensité, selon les territoires, tant en types de matrices affectées qu'en polluants concernés et en fonction des historiques des sites.

De plus, on ne connaît pas tout, loin de là, de ces contaminations, car on ne mesure pas, ou pas suffisamment, la réglementation n'y incitant pas encore, tous les contaminants que l'on sait fortement présents dans notre environnement : les travaux sur les microplastiques dans les eaux et les sols sont très récents (moins de dix ans) ; dans l'air, les particules ultrafines ne sont pas encore surveillées systématiquement, même si Airparif a commencé des campagnes de mesure.

Cette connaissance actuelle des pollutions est complexe à établir :

- (i) Les origines des contaminations dans chacune des matrices sont souvent multiples et les teneurs en polluants ne suffisent pas à déterminer, dans la plupart des cas, cette ou ces origines.
- (ii) Cette connaissance est le plus souvent fractionnaire et liée à certaines échelles, petites ou grandes mais sans termes de passage systématique entre elles. Pour l'eau, par exemple, des mesures sont faites sur de grands bassins versants comme celui de la Seine, ou au contraire dans de petits territoires où l'on mesure seulement certains contaminants, sans effort d'intégration entre ces échelles aujourd'hui.

(iii) Enfin, ces pollutions sont fortement interdépendantes : une forte proportion des pollutions des eaux de surface provient en effet de l'imperméabilisation des sols et des ruissellements subséquents issus des zones urbanisées et notamment des chaussées.

Il est fort probable que le changement climatique impacte les transferts de contaminants, dans leur intensité comme dans les formes sous lesquelles ils sont transférés, et ce jusqu'à l'être humain. On a évoqué les risques de retour, alors qu'ils avaient diminué ces vingt dernières années, de pics d'ozone dans l'air du fait des épisodes de chaleur, et de risques accrus de stagnation des particules fines ; des pluies violentes peuvent engendrer des concentrations de polluants dans les eaux, les épisodes de dessiccation et réhumectation des sols vont jouer sur la dynamique des polluants et leurs transferts dans les autres milieux.

Si l'on a déjà des données pour certaines matrices et des mesures ou modélisations sur certains territoires, qu'il faut encore mieux rassembler et valoriser, on manque de résultats : il est important de **mettre en place rapidement des modalités de vigilance et de suivi des pollutions des matrices air, eaux, sols, face à un changement climatique qui s'intensifie**, à la fois pour accroître les connaissances et pour tenter de trouver des solutions opérationnelles pour les éviter, les réduire ou au moins tenter de compenser leurs effets. On a vu l'efficacité du dispositif du PIREN Seine pour quantifier des contaminations des eaux dans le bassin versant de la Seine et proposer des indicateurs pertinents. Un tel dispositif doit perdurer et s'accroître en intégrant aussi les autres matrices (*cf. ci-dessous*).

Aujourd'hui, entre ces matrices, les connaissances et les dispositifs de mesure sont en effet loin d'être équivalents : **c'est clairement le sol qui est le moins pourvu** en travaux de recherche sur les liens entre contaminations, fonctionnement du sol et évolutions liées au changement climatique, même si l'on constate une forte dynamique récente. Le sol est souvent la « boîte noire » de l'environnement, longtemps considéré en agriculture conventionnelle d'abord comme un support, et dans toutes les activités, comme un milieu capable de tout absorber et faire disparaître (au moins au regard humain !).

Par exemple, la recharge maîtrisée des aquifères à partir d'eaux usées, évoquée dans la partie sur l'eau comme une solution intéressante d'adaptation au changement climatique, prend le sol comme moyen de filtration, semble-t-il efficace par rapport à l'épuration de ces eaux. Mais cela concentre les polluants restants dans le sol, avec peu de recul et de connaissances sur les dynamiques de ces polluants dans cette matrice. Peut-être faudra-t-il demain légiférer, à l'instar de ce qui a été fait pour les épandages agricoles des boues de station d'épuration, sur les flux maximaux afin d'éviter un « enrichissement » de ces sols-filtres en éléments indésirables.

Cet exemple illustre un volet capital : il est nécessaire de mieux étudier **en quoi les interactions de ces matrices influent sur leurs contaminations**, interactions souvent mal connues, et de le faire **sur la durée** pour pouvoir connaître et gérer les effets du changement climatique. Cela passe nécessairement par des **observatoires de longue durée des contaminations pluri-matrices**, construits à l'image de ceux qui existent pour l'air (les AASQA), avec un

maillage suffisamment serré pour prendre en compte la diversité des situations et de leurs effets sur la santé environnementale, dont humaine. Une question centrale de recherche est en effet la résilience des populations humaines et non humaines face aux expositions aux polluants dans un contexte de stress accru par le changement climatique. En particulier, nous souhaitons attirer l'attention sur **la nécessité de soutenir un travail spécifique sur les évolutions de la biodiversité** dans des contextes de pollution des matrices air, eaux et sols en interaction avec le changement climatique.

On l'a vu, parmi les solutions envisageables pour réduire les émissions et les expositions des populations à ces pollutions, les décisions d'aménagement urbain (mobilités, trafic, densités urbaines, gestion à la source des émissions dans les eaux vs leur traitement – actuellement incomplet – dans des STEP) et notamment la végétalisation urbaine sont primordiales : toute décision d'aménagement en Île-de-France (nouveau quartier, rénovation urbaine, nouvelle infrastructure, etc.) devrait être qualifiée en fonction des émissions et des expositions qu'elle pourrait provoquer sous l'effet du changement climatique : risques d'augmentation, réduction, évolution des inégalités d'exposition, etc. Sans oublier, on l'a vu pour l'air et pour l'eau, que des effets de report géographique des pollutions existent entre les lieux d'émission et les lieux d'expression des risques sanitaires. L'élaboration des documents régionaux (SDRIF-E et autres), doit être l'occasion d'interroger les modalités de l'urbanisation. Il s'agit selon nous de prôner une organisation urbaine, agricole et forestière durable qui limite les émissions de polluants, par la réduction des transports, dont ceux destinés

à l'alimentation grâce à la relocalisation agricole, et le changement de leurs modalités, par la réduction du chauffage urbain polluant, celle des émissions dans les eaux grâce à une refonte de l'assainissement, etc.

On ne saurait trop insister, pour finir, sur la nécessité d'accroître fortement les évaluations quantitatives d'impact sanitaire (EQIS) : existantes pour les pollutions atmosphériques en Île-de-France depuis 2018 par suite de l'implantation de la ZFE, leur philosophie pourrait être réfléchiée pour les sols et pour l'eau.

Par exemple, concernant les sols urbains contaminés, leur végétalisation notamment à des fins alimentaires nécessiterait, au-delà des EQRS actuellement réalisables, qu'on ait de meilleures connaissances sur la distribution dans l'organisme humain des polluants présents dans les sols et les végétaux qui y ont poussé. Car c'est bien le concept de santé globale (*One Health*) qui est activé par ces questions. Dans une première étape, il faudrait actualiser les connaissances sur les zones de multi-expositions identifiées dans le cadre du PRSE 2 et 3 depuis 2016<sup>123</sup>.

Puis il s'agirait de proposer (via la Fédération FIRE<sup>124</sup>, en association avec d'autres structures) la création d'un organisme (qui

aurait pertinence à l'échelle nationale au moins) jouant pour les questions de pollutions face au changement climatique, les rôles actuels de l'IPBES pour la biodiversité et du GIEC pour le climat : des voix se sont déjà élevées dans ce sens<sup>125</sup> et l'Île-de-France serait une région tout particulièrement intéressante pour créer un tel organisme.

Pour l'Île-de-France, la définition de stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique concernant les pollutions de matrices environnementales et leurs impacts sur la santé globale implique nécessairement **un effort très accru d'augmentation des recherches pluridisciplinaires, mêlant sciences biophysiques et sciences sociales**, une question centrale étant l'inégalité socio-territoriale aux expositions et à leurs impacts, aujourd'hui et demain.

Elle nécessite aussi la mise en place d'une **structure de gouvernance partagée à l'échelle régionale**, entre aménageurs, décideurs, habitants et chercheurs pour analyser les aménagements urbains dans l'objectif de réduire les pollutions et leurs conséquences pour la santé de l'environnement et la santé humaine.

<sup>123</sup> Observatoire Régional de la Santé, 2022, Cumuls d'expositions environnementales en Ile-de-France, <https://territoire-environnement-sante.fr/espace-documentaire/cumuls-d'expositions-environnementales-en-ile-france>

<sup>124</sup> Fédération Île-de-France de Recherche sur l'Environnement : créée en 2007, elle a pour vocation de promouvoir la

recherche interdisciplinaire dans le domaine des Sciences de l'Environnement à l'échelle de l'Île-de-France.

<sup>125</sup> Brack W., Barcelo Culleres D., Boxall A.B.A. *et al.*, 2022. One Planet - one Health: A Call to Support the Initiative on a Global Science-Policy Body on Chemicals and Waste. *Environ. Sci. Eur.* 34:21. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00602-6>



## Les carnets du GREC francilien

Les pollutions  
des matrices environnementales  
air, eaux, sols et leur sensibilité  
aux évolutions climatiques  
en Île-de-France

### Maquette et mise en pages

Marie Pinhas, ICOM-IPSL

### Photo

Markus Spiske, Unsplash

© GREC francilien, mars 2025