

Influence de la pollution urbaine sur la mésofaune des pelouses : un nouveau bio-indicateur de la qualité de l'air en ville ?

The impact of urban pollution on lawn mesofauna: a new bio-indicator of city air quality?

Vincent PENEL*, Olivier LIST*, Séverine POURRET*

Résumé

Cette étude porte sur la corrélation entre les populations de mésofaune (acariens, collemboles et thysanoptères) des pelouses urbaines de Paris et la pollution atmosphérique. Les populations de mésofaune furent analysées dans les gazons urbains puis comparées à la qualité de l'air. Les échantillonnages furent effectués le long des voies représentées sur la carte-voir d'AIRPARIF présentant les taux de NO₂ pour les principales rues de la ville. Quatre teneurs en NO₂ furent retenues : supérieure à 80 µg/m³, 70-80, 60-70 et 50-60 µg/m³, et 55 sites analysés. La mésofaune moyenne totale diminue lorsque la qualité de l'air décroît. En pratique, trois groupes présentent un intérêt plus net : la mésofaune totale, les collemboles totaux et, parmi eux, les symphypléones totaux. La mésofaune des pelouses semble être un intéressant bio-indicateur de pollution urbaine.

Abstract

This study focuses on the correlation between mesofauna: mites (Acari), springtails (Collembola) and Thysanoptera in urban grassy areas (lawns) of Paris, and atmospheric pollution. Mesofauna communities were analyzed in urban lawns and then compared to air quality. Sampling was carried out along the way described on AIRPARIF's (Monitoring Air Quality in the Paris Region) map, presenting the NO₂ levels for the main streets of the city. Four NO₂ pollution levels were considered: more than 80 µg/m³, 70-80, 60-70 and 50-60 µg/m³ and 55 sites were analyzed. The total of mesofauna (average) decreased when air quality decreased. Three groups present a higher interest: total mesofauna, total Collembola and Symphypleona (Collembola). Lawn mesofauna may be an interesting bioindicator of urban pollution.

Introduction

Depuis de nombreuses années, l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé est une pré-occupation de nos concitoyens. Des réseaux de contrôle, de plus en plus performants, permettent de nous informer, jour par jour, de la qualité globale de l'air que nous respirons. Des indices atmosphériques, diffusés par les médias, permettent de quantifier cette pollution, avec son cortège de conséquences : limitation de vitesse, mise en garde pour les insuffisants respiratoires...

Les capteurs de qualité de l'air permettent une bonne approche des niveaux de pollution pour des

indicateurs bien choisis. Si la mesure de ceux-ci est excellente, leur impact, parfois synergique, sur le vivant semble beaucoup plus aléatoire tant est complexe la nature même du vivant et sa capacité d'adaptation aux stress urbains.

L'évolution des populations végétales ou animales, soumises en milieu urbain à l'ensemble des polluants semble une approche intéressante pour apprécier la qualité globale d'un habitat.

De nombreuses équipes, notamment anglo-saxonnes [1, 2] s'intéressèrent ainsi dès les années 1960 aux lichens. Elles reprenaient une vieille observation du XIX^e siècle, montrant que le début de l'ère industrielle et l'utilisation massive du charbon comme

* Laboratoire des Pollens et du Micro-environnement – 13, rue Farnerie – BP 129 – 26001 Valence Cedex, France – penel@netsante.fr

source d'énergie avait entraîné une disparition progressive des lichens sur les troncs d'arbres des sites industrialisés de la campagne anglaise. En France, Nylander [3], dès les années 1860, s'attachait à observer les lichens du jardin du Luxembourg ; il avait remarqué que certaines espèces, présentes à l'intérieur du parc, faisaient défaut à l'extérieur. Il fut le premier à relier cette observation à une différence de qualité de l'air.

D'autres équipes étudient les tabacs [4-7], cette plante étant souvent utilisée pour apprécier les effets phytotoxiques de l'ozone troposphérique (*Nicotiana tabacum*, cv. Bel-W3), les araignées [8], les insectes [9] ou plus spécifiquement les microarthropodes du sol [10-12] ou corticoles [13, 14], ou les collembolles [15] ; toutefois ces études ne concernaient pas des centres urbains, mais plutôt des massifs forestiers ou des bassins industriels.

Dès 1987, Hagvar [16] remarque qu'en Europe, les modifications de l'acidité des sols (pH) induites par la pollution atmosphérique sont reflétées par l'altération de la faune du sol. Celle-ci peut de plus être utilisée comme indicateur précoce des changements apportés aux propriétés du sol par les polluants [17].

Le terme bio-indicateur désigne selon Kirschbaum et Wirth [18] des espèces biologiques ou animales qui, du fait de leurs particularités écologiques, réagissent à un polluant par une modification nette et spécifique de leurs fonctions vitales.

La disparition des lichens d'arbres, souvent fort sensibles à la pollution, est considérée comme très significative [19-20]. Toutefois, la sensibilité même des lichens à la pollution en font un marqueur limité en milieu urbain, même si leur présence dans Paris est en lente augmentation [19] attestant d'une amélioration globale. Quant aux tabacs, s'ils sont de bons marqueurs, ils sont absents du centre des grandes villes françaises.

Cette étude s'attache à montrer l'intérêt des mésofaunes, constituées d'arthropodes de petite taille (0,2 à 4 mm), en tant que bio-indicateurs. En effet, celles-ci sont présentes jusque dans les sites les plus pollués des grandes villes. Ces mésofaunes, notamment celles des gazons urbains, vivent au ras du sol et subissent directement l'influence des polluants automobiles des voies de circulation voisines par l'air, l'eau et les nutriments. Elles vivent en permanence au contact de la pollution urbaine sous ses diverses formes. Diverses objections seront développées au paragraphe « Discussion », p. 110.

Diverses études récentes utilisent les mésofaunes comme bio-indicateur actif ou passif de la pollution des sols [12, 21-23].

L'étude fine des microarthropodes est délicate. Ce travail s'intéresse principalement à deux groupes principaux : celui des collembolles et celui des acariens. Les thysanoptères occupent une place beaucoup moins importante dans l'étude des pelouses. Les autres microarthropodes, peu rencontrés dans cette étude, ne seront cités que de façon anecdotique.

Les collembolles [24] sont des hexapodes primitifs proches des insectes (sous-classe des aptérygotes), caractérisés par la présence d'un organe de saut, la furca. Ils sont au cœur de cette étude car ils constituent le groupe d'arthropodes dominant dans les pelouses étudiées. Il est aisé de distinguer dans les mésofaunes de surfaces divers groupes dont celui des symphypléones, à corps globuleux caractéristique, fréquents dans les habitats herbeux, ou celui des entomobryomorphes au corps allongé. Au sein de ce second groupe, il est possible de citer le genre *Folsomia* (Isotomidae), utilisé comme bio-indicateur de la contamination des sols [25]. Ainsi l'espèce *F. candida*, est un bon modèle, bien étudié, notamment par Snider [26], à cycle rapide : espérance de vie moyenne de 136 jours à 21 °C mais variable avec la température (241 jours à 15 °C, 72 jours à 26 °C), utilisé par diverses équipes [27].

Les poduromorphes, à l'aspect de larves (genre *Hypogastrura*, par exemple) sont plutôt des collembolles du sol. Ils ont peu été observés dans cette étude qui, du fait du mode de prélèvement, porte sur la faune de surface. Les collembolles ont été utilisés dans diverses études portant sur la contamination du sol par les métaux lourds [28] ou par les hydrocarbures aromatiques polycycliques PAH [29].

Les acariens [30] sont des arachnides caractérisés par un gnathosoma qui porte une paire de chélicères et une paire de palpes. Les acariens Oribatida (Actinotrichidae) ou « oribates », très présents dans les gazons urbains où ils mènent une vie libre, tiennent une place importante dans cette étude. Utilisés dans l'étude de Blakely [29], ce sont plutôt les travaux d'André sur les acariens corticoles [13, 14], qui ont inspiré ce travail.

Les thysanoptères [31] sont des insectes de petite taille présentant une structure proche de celle des homoptères. Ils sont notamment connus pour leurs formes ailées, qui peuvent être nuisibles, et ne sont signalés dans ce travail qu'en raison de leur présence fréquente, quoique très minoritaire, dans les pelouses urbaines.

Une première approche des mésofaunes urbaines fut entreprise durant l'hiver 1999-2000, par Céline Bach [32]. L'étude, effectuée dans le centre-ville de Valence, en période froide, a montré des sites assez riches. Un milieu fortement urbanisé reste donc parfaitement compatible avec une mésofaune variée. Ces premiers résultats ont conduit à la mise en place de la pré-étude sur les corrélations entre les populations de mésofaune et la pollution urbaine.

Mise au point de la méthode : étude préliminaire Paris-Lyon-Marseille 2000

Les biotopes et le mode de prélèvement

Les mésofaunes étant très présentes dans le centre-ville de Valence, modérément pollué, nous avons élargi le champ de cette observation par cette pré-étude avec pour but « d'explorer » trois grandes

villes françaises : Paris, Lyon et Marseille, et en particulier leurs sites les plus pollués. Trois communes périurbaines, présentant des niveaux de pollution moindres et géographiquement proches, furent parallèlement retenues : Argenteuil pour Paris, Solaize pour Lyon et Allauch pour Marseille.

Trois principaux milieux d'étude sont disponibles en centre-ville : les pelouses, les écorces d'arbres déhiscentes notamment de platanes (rhytidomes), les litières de feuilles mortes.

- Les gazons

La plupart des gazons des grandes villes étant dans des zones plutôt protégées (Palais Longchamp, Marseille, par exemple) la technique par carottage suggérée par Edwards [33] est impossible à mettre en œuvre. C'est pourquoi les gazons furent prélevés à l'aspirateur, puis extraits, selon les suggestions de Coineau. Cette dernière méthode est en effet non dommageable pour la pelouse et permet de plus une extraction rapide. En revanche, elle ne collecte que la mésofaune de surface. En pratique, l'échantillonnage fut pratiqué par aspiration de 1 m² de surface pendant une minute.

Ils doivent être choisis aussi identiques que possible les uns par rapport aux autres. Ce point a, par exemple, conduit à éliminer les pelouses des talus du Palais Omnisports de Paris-Bercy – POPB, site 54 de l'étude 2001), pourtant fort riches, car totalement artificielles.

- Les platanes

Chaque platane fut mesuré, puis brossé au pinceau, du sol jusqu'à une hauteur de 2 m, afin de récupérer l'ensemble de la mésofaune présente. Fréquents sur les trottoirs urbains, ils présentent une hétérogénéité de taille. Il s'agit d'une technique longue, l'échantillonnage d'un platane d'une taille moyenne nécessitant une heure. Ils semblent être un milieu modérément significatif du point de vue quantitatif, mais pourraient présenter un intérêt qualitatif.

- Les litières

C'est le milieu le plus simple à prélever puisqu'il suffit d'une brosse et d'une pelle à poussière propre, chaque litière étant pesée avant extraction. C'est un milieu très hétérogène, tant par sa constitution propre que par le support sur lequel il repose. En dépit de leur usage par certaines équipes [34] en milieu forestier, nous verrons qu'elles ne semblent pas constituer un milieu d'étude exploitable en milieu urbain.

Extraction et décompte

L'extraction s'applique aux prélèvements de gazons et de litières, et utilise le système de Berlèse-Tullgren [35].

Le décompte s'effectue au laboratoire sous microscope binoculaire, à faible grossissement ($\times 40$ ou 100 , rarement 250). Chaque échantillon est étudié en dénombrant et en classant l'ensemble des arthropodes présents dans leurs grands groupes respectifs.

Choix du polluant

La surveillance de la qualité de l'air dans les villes choisies est assurée par les Associations agréées de

surveillance de la qualité de l'air (AASQA) suivantes : AIRPARIF à Paris, COPARLY à Lyon et AIRMARAIX à Marseille.

De nombreux composés entrent en jeu dans la pollution des grandes villes, toutefois un groupe semble présenter un intérêt particulier pour cette étude, les oxydes d'azote (NO_x) et, plus particulièrement, le dioxyde d'azote (NO_2).

En effet, ce dernier est un excellent marqueur du trafic automobile qui constitue la première cause de pollution urbaine, c'est donc un très bon indicateur de la pollution des grandes métropoles [36]. L'étude *in fine* a été effectuée à Paris, ville pour laquelle les données spatio-temporelles de la pollution atmosphérique disponibles auprès d'AIRPARIF (issues de la modélisation ou de la mesure) sont très bien documentées notamment au niveau de la voirie.

Toutefois le NO_2 n'étant qu'un traceur de la pollution retenu en raison de sa commodité d'emploi, rien ne prouve qu'il ait un effet direct sur les mésofaunes. Cette étude porte sur la qualité globale de l'air et n'utilise le NO_2 que comme un marqueur.

L'ozone (O_3), gaz très oxydant et toxique majeur, est un produit de transformation des polluants primaires, dont l'action sur le vivant et en particulier les végétaux est nette. Son apparition est tributaire de conditions climatiques (chaleur, ensoleillement) inconstantes. Si l'ozone formé reste au niveau de l'agglomération, il est détruit peu de temps après sa formation par le NO émis en particulier par les véhicules automobiles. Au contraire, s'il se déplace au gré des vents, dès la périphérie de l'agglomération, et encore plus dans les campagnes, il n'y aura plus assez de polluants automobiles pour le détruire et il pourra alors stagner, voire s'accumuler [Association pour la surveillance de la qualité de l'air en Drôme et Ardèche – ASQUADRA, Résumé de conférence, 5 décembre 2003]. Un exemple net en est fourni par les mesures d'AIRMARAIX montrant des taux plus élevés sur Allauch qu'au centre de Marseille. Enfin, les taux maximaux de ce gaz sont souvent relevés lors de canicules telles qu'en août 2003, périodes durant lesquelles les mésofaunes peuvent subir un stress hydrique majeur, dont l'effet l'emportera sur celui de la qualité de l'air. Ainsi l'ozone ne semble pas être le meilleur marqueur pour cette étude. L'absence de cartographie fine constitue enfin un inconvénient supplémentaire important.

Ce dernier point est aussi un écueil pour l'utilisation du benzène, des oxydes de carbone, des particules. Quant au dioxyde de soufre (SO_2), s'il reste un polluant industriel, son importance dans les grandes agglomérations est en nette diminution (modification des combustibles de chauffage et des zones industrielles urbaines).

Choix des sites

Cent quatorze sites furent analysés (42 sites sur Paris-Argenteuil, 30 sites sur Lyon-Solaize, 42 sites sur Marseille-Allauch), dont 31 gazons, 36 platanes et

47 litières. Seuls les sites franchement urbains (situés à moins de 8 m d'une voie de circulation) furent retenus. En effet, les centres des grands parcs urbains, riches de nombreuses espèces végétales et éloignés des sources de pollution ne constituent pas des sites urbains représentatifs. Nylander, tel que décrit dans l'introduction, l'avait déjà remarqué il y a 150 ans... En revanche, les pelouses des ronds-points routiers, ou les platanes des grandes avenues, milieux fortement soumis à l'influence de la pollution urbaine, semblent valides.

Résultats et conclusion de cette pré-étude

Une première observation globale montre que, sur les prélèvements de cette pré-étude, les populations de mésofaune sont *a priori* plus abondantes sur les platanes et gazons de Paris et Lyon que sur ceux de Marseille. En dépit d'un climat plus clément, Marseille présente une hygrométrie plus faible, élément défavorable (Tableau 1). Il ne semble donc pas possible de comparer les trois villes entre elles.

- *Les gazons* observés semblent présenter une corrélation avec la qualité de l'air, ainsi les densités de populations paraissent plus élevées lorsque la qualité de l'air est bonne. Le peuplement nettement plus important du parc de Plombières (Marseille), par rapport aux abords immédiats du boulevard, montre l'intérêt d'éviter les parcs au profit de prélèvements en milieu franchement urbain. Le nombre modeste d'échantillons (total de 31 sites pour les 6 villes) ne permet pas, en raison de la grande variabilité des conditions locales, de tirer d'autre conclusion que l'intérêt de ce milieu.
- *Les 36 platanes* testés montrent un nombre d'arthropodes/m² de surface de tronc assez variable, les platanes parisiens et lyonnais étant plus peuplés que les marseillais. Ainsi pour cette dernière ville, aucun des 10 platanes testés : Plombières (3 sites), Timone (2 sites), Rabatau, Saint-Charles, Athènes (2 sites), Longchamp, n'atteint 40 arthropodes/m². Si ceux du boulevard de Plombières (Marseille, NO₂ : 101 µg/m³), de l'avenue de la Porte d'Orléans (Paris, NO₂ : 97 µg/m³) ou du quai des Célestins (Paris, NO₂ : 82 µg/m³) présentaient de 10 à 40 arthropodes/m², un platane de l'avenue de Messine (Paris) en présentant 262, voire 474 sur l'avenue Youri Gagarine (Argenteuil, NO₂ : 43 µg/m³, capteur de fond) ; un platane de l'avenue des Champs-Élysées en présentait 270 (acariens oribates en quasi-totalité), tandis

qu'un autre de l'avenue de l'Observatoire n'en montrait que 76. La grande variabilité du nombre d'écorces déhiscentes, qui constituent autant d'habitats, rend difficile l'usage de ce milieu comme marqueur qualitatif.

En revanche, d'un point de vue qualitatif, il y a peut être lieu de s'intéresser à deux autres types d'arthropodes : les pseudo-scorpions, notamment des genres Cheliferoid ou Chernes et les myriapodes du genre Polyxenus. En effet, des pseudo-scorpions ont été observés sur les huit platanes en périphérie urbaine (Allauch, Argenteuil et Solaize), mais non sur ceux des centres-ville, à l'exception des boulevards Rabatau (Marseille) et Gerland (Lyon), sites pour lesquels la qualité de l'air est satisfaisante. Il en va de même pour les Polyxenus toutefois absents d'Allauch ; en effet, ces micromyriapodes se nourrissent d'algues et les milieux très secs peuvent leur être préjudiciables. **Ce dernier point conduit à rappeler qu'une pollution peut être sans effet direct sur une espèce vivante, mais l'atteindre par la modification de la flore ou de la faune dont elle est tributaire.**

- *Les 47 litières* donnent des résultats non exploitables, sans aucun lien apparent avec la qualité de l'air. Ainsi, si les quelques litières (plantes diverses) du boulevard de Plombières à Marseille, de l'avenue Berthelot à Lyon ou du périphérique parisien – trois sites pour lesquels la qualité de l'air est mauvaise – étaient peu peuplées, une litière (Taxus/lauracées) de l'église Saint-Pierre de Montrouge l'était beaucoup plus pour une qualité d'air analogue. Quant aux sites pour lesquels la qualité de l'air est bonne, une litière bien peuplée (lauracées) fut observée à Allauch tandis que les essais sur Solaize et Argenteuil étaient beaucoup moins concluants. Les conditions de température et d'hygrométrie, très variables selon la nature botanique de la litière, son emplacement et le sol sur lequel elle repose, entraînent un manque d'homogénéité donnant des résultats peu interprétables.

Au total, cette pré-étude conduit à retenir comme biotope d'étude les gazons urbains, et comme ville Paris en raison de la relative abondance des sites exploitables, couplée à une hygrométrie homogène et de niveau satisfaisant.

Étude Paris 2001

Choix des sites

L'étude LIFE RESOLUTION d'AIRPARIF [37], met en évidence la grande variabilité des taux de NO₂ au sein d'un même quartier. Ainsi le taux de NO₂ relevé rue de Rivoli n'a rien à voir avec ceux observables à quelques dizaines de mètres dans les rues adjacentes. En conséquence, la carte-voirie d'AIRPARIF, présentant le réseau d'un grand nombre de rues de Paris avec leurs valeurs moyennes (percentile 50 horaire : valeur de NO₂ qui est dépassée par la moitié des mesures horaires) de pollution par le NO₂, s'est avérée très utile.

Tableau 1.
Hygrométrie (moyenne mensuelle) mars-juin 2000.
(Données : Météo-France)
Hygrometry (monthly average) March-June 2000.
(Data: Météo-France)

	Paris	Lyon	Marseille
Mars	73 %	74 %	67 %
Avril	69 %	71 %	65 %
Mai	70 %	72 %	64 %
Juin	69 %	70 %	63 %

Il a ainsi été possible de rattacher la plupart des sites à une fourchette de pollution probable. Pour les sites hors carte, AIRPARIF utilisant un algorithme basé sur l'intensité du trafic de la rue concernée, une estimation de la teneur en NO_2 a pu être obtenue (modélisation par le logiciel spécifique STREET en situation de proximité).

La principale cause de pollution sur Paris étant le trafic urbain, tous les échantillonnages de l'étude 2001 furent pratiqués à moins de 8 m des voies de circulation. Ceci afin de limiter le biais lié à l'éloignement de la source (les taux des polluants décroissant alors rapidement). Au total, 55 gazons urbains situés à proximité immédiate des voies de circulation furent étudiés, répartis sur une zone aussi large que possible de Paris intra-muros (Figure 1). Seul le nord de l'agglomération, ne présentant que peu de pelouses de qualité satisfaisante, n'a pu faire l'objet d'échantillonnages variés. Tous les gazons étudiés devant être sensiblement homogènes entre eux, les pelouses centrales des grands parcs ont été éliminées. Quelques petits squares de quartier ont, en revanche, été étudiés dans leurs parties situées à proximité immédiate des rues, ainsi qu'une pelouse de l'accès, en bordure de chaussée, du parc des Buttes-Chaumont (site 38).

En pratique, les sites étudiés furent répartis en cinq grandes classes :

- ceux pour lesquels la teneur en NO_2 est supérieure à $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (percentile 50 horaire). Il s'agit de lieux fortement pollués, proches d'axes routiers au trafic intense. Les pelouses, en de tels emplacements, sont évidemment rares ;
- ceux pour lesquels la teneur en NO_2 est entre 70 et $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- ceux pour lesquels la teneur en NO_2 est entre 60 et $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, les plus nombreux ;
- ceux pour lesquels la teneur en NO_2 est entre 50 et $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- il existe enfin une classe qui regroupe les emplacements (teneur en NO_2 variable) pour lesquels un prélèvement a été effectué mais qui présentent des anomalies amenant à les rejeter de l'étude pour des raisons développées au paragraphe « Résultats », p. 106.

Mode opératoire

Le prélèvement de terrain par carottage ne pouvant être appliqué, seule la solution de l'aspiration fut utilisée (aspirateur-traîneau de 1 000 W, branché sur le groupe électrogène du véhicule du laboratoire).

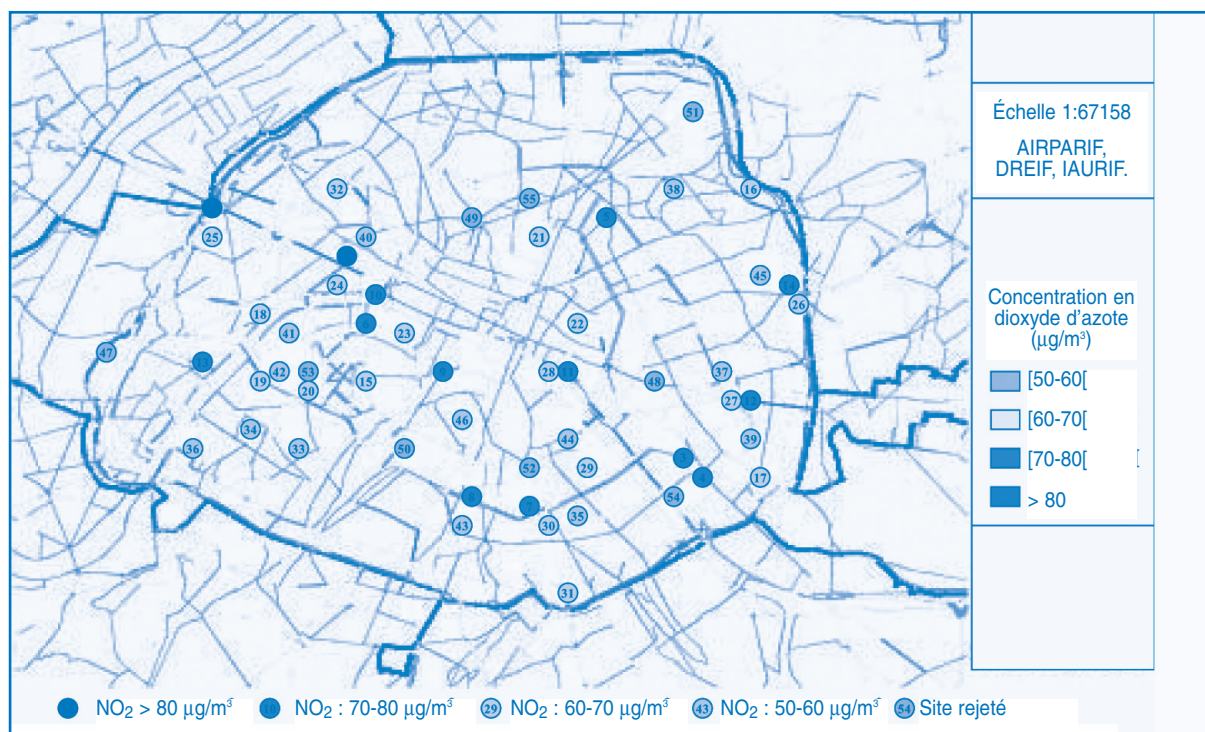


Figure 1.

Carte de Paris, sites de prélèvements (voir Tableau 2 p. 107) et distribution du réseau routier étudié par type de concentration (percentile 50 horaire) de dioxyde d'azote. Résultats pour l'année 1997.

Map of Paris, sampling sites (see Table 2 p. 107) and distribution of the road network studied per type of concentration 50 percentile hourly emissions of nitrogen dioxide. Results for the year 1997.

(Source : AIRPARIF, DREIF, IAURIF. Carte reproduite avec autorisation)

Pour chaque gazon, trois parcelles d'une surface de 1 m² chacune furent échantillonnées (temps de prélèvement standardisé à une minute pour chaque site). En effet, les populations de microarthropodes n'étant pas réparties de façon homogène, il est souhaitable de multiplier les points de prélèvements. Lors de l'analyse des échantillons, une valeur moyenne des trois points représente le gazon concerné. Seuls quelques sites, en raison de leurs caractéristiques, n'ont pas permis de triple échantillonnage. Ils sont signalés dans les résultats.

L'échantillon d'aspiration, peu chargé en matière végétale, formé de débris et de mésofaune, permettait une extraction assez rapide au moyen de l'appareil de Berleze.

L'échantillonnage fut effectué entre le 10 juin et le 20 juillet 2001, période de bon développement des mésofaunes et de conditions climatiques optimales. Les populations croissent au printemps, d'où l'obligation de travailler sur une période brève et optimale. Le risque de parcelles desséchées croît nettement en août, et il existe *a priori* un risque de pluies plus fort en avril, ces dernières rendant l'aspirateur inutilisable (hygrométrie 2001 : avril 70 %, mai 62 %, juin 57 %, juillet 67 %, [38]).

Résultats

(Tableau 2) [39, 40]

Neuf sites sont rejetés de l'étude, soit parce que techniquement inexploitable, soit en raison de l'état de la pelouse induisant un peuplement très pauvre (en conservant toutefois les sites présentant au moins 20 arthropodes/m²), soit encore en raison d'un peuplement totalement déséquilibré (constitué à plus de 98 % de l'un des groupes : collembolles, acariens ou thysanoptères) ; en effet, la prolifération d'un seul groupe d'arthropodes peut être observée très localement, dans un gazon ou sous une écorce (observation isolée d'une très abondante colonie d'acariens oribates sous une écorce d'un platane des Champs-Élysées, par exemple).

Résultats par classe de teneur en NO₂

- Classe de teneur en NO₂ supérieure à 80 µg/m³ (très forte pollution)

Les pelouses exploitables, proches d'axes de trafic intense restent exceptionnelles.

Les prélèvements du périphérique et des abords de la place Victor Basch (église Saint-Pierre de Montrouge), étudiés en 2000, ne peuvent être adjoints à l'étude 2001, les conditions expérimentales étant très différentes. Il est toutefois possible de retenir que les mésofaunes y étaient fort faibles, dominées par les collembolles et totalement dépourvues de thysanoptères. Le gazon de l'église Saint-Pierre, n'existait plus en 2001. Le talus du périphérique à la porte d'Auteuil, prélevé en 2000, puis en 2001, n'a pu être exploité cette dernière année : recueilli en juillet, un lendemain d'orage et chargé d'humidité, l'échantillon s'est très vite dégradé, devenant inexploitable.

Les deux sites (1 et 2) sont la place de la porte Maillot et le rond-point des Champs-Élysées, qui présentent des caractéristiques analogues. La mésofaune moyenne de surface est très pauvre. Les collembolles sont fortement prédominants par rapport

aux acariens. Ces sites très fortement pollués présentent une mésofaune moyenne de 103 arthropodes/m², constituée pour 62,7 % de collembolles, 24,2 % d'acariens et 13,1 % de thysanoptères.

- Classe de teneur en NO₂ comprise entre 70 et 80 µg/m³ (forte pollution)

Cette classe regroupe la plupart des axes à gros trafic de Paris (12 sites) et un square (site 10) situé à proximité d'axes à très gros trafic. La mésofaune moyenne de surface est pauvre, les collembolles sont fortement prédominants par rapport aux acariens. Ces sites fortement pollués présentent une mésofaune moyenne de 115 arthropodes/m², constituée pour 60 % de collembolles, 31,5 % d'acariens et 8,5 % de thysanoptères.

- Classe de teneur en NO₂ comprise entre 60 et 70 µg/m³ (pollution moyenne)

Cette classe regroupe des axes de trafic moyen ou aérés (13 sites) et des squares situés à proximité d'axes à gros trafic (5 sites), prélèvement effectué à moins de 8 m de la chaussée. La mésofaune moyenne de surface est d'abondance modérée, les collembolles sont fortement prédominants par rapport aux acariens. Ces sites de pollution moyenne présentent une mésofaune moyenne de 183 arthropodes/m², constituée pour 60,3 % de collembolles, 32,8 % d'acariens et 6,9 % de thysanoptères.

L'état du gazon de l'avenue de Breteuil (fortement desséché, site 15) explique l'extrême pauvreté de ce site et le rend discutable. Il n'a toutefois pas été rejeté car présentant une densité moyenne supérieure à 20 arthropodes/m². Le prélèvement du square Notre-Dame (site 28), fut effectué à faible proximité de la zone sur laquelle de nombreux cars de touristes stationnent, moteurs au ralenti, dans l'attente de leurs passagers. En conséquence et **bien qu'assez richement peuplé**, il fut classé en zone de pollution moyenne (60-70 µg) et **non modérée** (50-60 µg).

- Classe de teneur en NO₂ comprise entre 50 et 60 µg/m³ (pollution modérée)

Cette classe regroupe des axes de trafic modeste ou aérés (7 sites) et des squares situés à proximité d'axes à trafic modéré (6 sites, prélèvement effectué à moins de 8 m de la chaussée). La mésofaune moyenne de surface est abondante, les collembolles sont fortement prédominants par rapport aux acariens. Ces sites de pollution modérée présentent une mésofaune moyenne de 309 arthropodes/m², constituée pour 70,2 % de collembolles, 24,4 % d'acariens et 4,3 % de thysanoptères.

Deux sites du 15^e arrondissement posent problème : le square Necker et le square Violet (sites 33 et 34). Dans ces deux cas l'échantillon recueilli contenait une quantité très importante de poudre identifiée *a priori* comme étant un engrais. Ceci peut expliquer l'anormale pauvreté de ces sites et les rendent discutables. Ils n'ont toutefois pas été rejetés car présentant, malgré tout, une densité moyenne supérieure à 20 arthropodes/m². Ils **minorent fortement** les données de densité moyenne totale de mésofaune pour ce groupe de sites et modifient des résultats finaux qui auraient été encore plus nets si ces deux sites avaient été exclus (la mésofaune moyenne serait dans ce cas de 393 arthropodes/m² pour la zone 50-60 µg/m³). Ceci pose le problème de l'influence des actions humaines, soulignée au paragraphe « Discussion », p. 110.

Tableau 2.
Nombre moyen d'arthropodes/m² observés sur chaque site.
Average number of arthropods/m² observed from each site.

Classe 1 : teneur en NO₂ supérieure à 80 µg/m³

Site	Collembolles		Acaréens		Thysa	Total
	Symph	Autres	Oribat	Autres		
1. Porte Maillot	15,67	23	10,33	21	26,33	96,33
2. Champs-Élysées	40,67	50	0	18,67	0,67	110

Ce site 2 correspond au rond-point.

Classe 2 : teneur en NO₂ comprise entre 70 et 80 µg/m³

Site	Collembolles		Acaréens		Thysa	Total
	Symph	Autres	Oribat	Autres		
3. Avenue Daumesnil	52	3,67	1,67	3	0,33	60,67
4. Place Félix Éboué	0,33	18,33	5,33	14,33	26,33	64,67
5. Rondo de La Villette	56	4	1	8,67	0	69,67
6. Boulevard des Invalides	43	0	21,33	11,67	0	76
7. Avenue des Gobelins	5	48,67	23,33	19	0	96
8. Pl. Denf.-Rochereau (2)	7	51	23,5	8	24	113,5
9. Pl. St-Germain des Prés	3	93	3	15,33	0	114,3
10. Sq. Champs-Élysées	9	56,33	37,67	24,33	3,33	130,7
11. Quai des Célestins	6,33	116,7	0,33	3,33	5	131,7
12. Rd-Pt Nation (centre)	109	20,67	2	10,67	6,67	149
13. Avenue Pdt Kennedy	84,67	5,33	33,67	16,33	47,67	187,7
14. Porte de Bagnolet	16	16,67	2	144	9,33	188

Classe 3 : teneur en NO₂ comprise entre 60 et 70 µg/m³

Site	Collembolles		Acaréens		Thysa	Total
	Symph	Autres	Oribat	Autres		
15. Avenue de Breteuil *	12,67	5	1	0,67	1	20,33
16. Boulevard d'Algérie	23	4,67	4	2	1,67	35
17. Rue Vivaldi	52	1,33	1,67	2,67	0,33	58
18. Trocadéro	61,67	9,67	1	1,33	4	77,67
19. Avenue de Lowendal	18,33	67	19,67	3	1	109
20. Square Losserand	49,33	17,67	4	31	9	111
21. Square Albert Satragne	66,67	5,67	16,33	12,67	21	122,3
22. Square Georges Cain	121,7	1,67	4	6,67	2,33	136,3
23. Boulevard St-Germain	16,33	113,7	38	4	0	172
24. Av. F. Roosevelt (2)	121,5	14	39	6,5	2	183
25. Avenue Foch	166	43,33	12	0	2	223,3
26. Square Séverine	58	95	12,33	3,67	58,7	227,7
27. Pl. Nation (accès est)	46	16	143,7	25,33	11,33	242,3
28. Square Notre-Dame	16,67	18,33	171,3	42,33	11,67	260,3
29. Rue Jussieu (2)	53	240,5	1	4,5	21	320
30. Place d'Italie (2)	124,5	19	187	46	11	388
31. Rue Dr Bourneville (1)	240	181	7	21	1	450
32. Place Général Catroux	150,3	26	209,3	10	59,67	454,7

Nombre moyen d'arthropodes/m² observés sur chaque zone :
 Classe 1 : teneur en NO₂ supérieure à 80 µg/m³ : **103,17**
 Classe 2 : teneur en NO₂ comprise entre 70 et 80 µg/m³ : **115,20**
 Classe 3 : teneur en NO₂ comprise entre 60 et 70 µg/m³ : **183,34**
 Classe 4 : teneur en NO₂ comprise entre 50 et 60 µg/m³ : **309,19**
 (valeur moyenne : valeur absolue/surface échantillonnée pour chaque zone).
 Tous les gazons sont échantillonnés en trois points, sauf les sites 1 et 2 :
 1 : un seul point utilisable,
 2 : deux points utilisables.

Classe 4 : teneur en NO₂ comprise entre 50 et 60 µg/m³

Site	Collembolles		Acaréens		Thysa	Total
	Symph	Autres	Oribat	Autres		
33. Square Necker *	26,33	3,33	3,33	1,67	0	34,67
34. Square Violet *	21,33	15,67	4,33	3	2	46,33
35. Rue Georges Eastman	69,33	11,33	36,33	4	6,67	127,7
36. Hôpital Pominou	77,33	25	15,33	29,67	7,67	155
37. Rue de Buzenval	90,33	63,67	14,67	10,33	22	201
38. Buttes-Chaumont	145	2	22	50,33	7,67	227
39. Boulevard de Picpus	63	142,7	3,33	4,67	14,33	228
40. Rue Louis Murat (2)	37	69	44	7	133	290
41. Tour Eiffel (2)	212,5	24	32	15	12,5	296
42. Square Duplex	219,3	85,67	33,67	8,33	17	363,7
43. Boulevard René Coty	1	9,67	396	66,33	8,67	481,7
44. Rue Censier (1)	69	493	99	12	6	679
45. Square Belgrand	9,33	669	0,67	99	20	798
46. Av. Observatoire (2)	555	210,5	3	31	0	799,5

Sites rejetés

Site	Collembolles		Acaréens		Thysa	Total
	Symph	Autres	Oribat	Autres		
47. Boulevard périphérique	–	–	–	–	–	–
Motif de rejet	Pelouse détrempée, échantillon dégradé					
48. Rue Charrière	0	0,33	0,33	0	0	0,67
Motif de rejet	Sites desséchés					
49. Place de la Trinité	0	1	0,67	5,67	0	7,33
Motif de rejet	Site desséché					
50. Tour Maine-Montparnasse	7,67	0	0,67	0,33	0,33	9
Motif de rejet	Site desséché					
51. La Villette (musée)	6	0,67	0,33	3,67	0,33	11
Motif de rejet	Site desséché					
52. Rue Mouffetard	0	0	0	6	5	11
Motif de rejet	Site desséché et un seul point utilisable					
53. Champ de Mars	2,33	47,67	0	0	0,33	50,33
Motif de rejet	Site desséché, déséquilibré : collemb. 99,5 %					
54. Paris-Bercy (POPB)	327	565	15	0	0	907
Motif de rejet	Site artificiel déséquilibré : collemb. 98,3 %					
55. Square Franz Liszt	880	32	3,33	14	0	929,3
Motif de rejet	Site petit déséquilibré : symphypléones 95 %					

– : résultats non exploitables.

***Sites contestables**

Site	Collembolles		Acaréens		Thysa	Total
	Symph	Autres	Oribat	Autres		
Av. de Breteuil (Site 15)	12,67	5	1	0,67	1	20,33
Anomalie relevée	Gazon desséché					
Square Necker (Site 33)	26,33	3,33	3,33	1,67	0	34,67
Anomalie relevée	Gazon suspect (traitement ?)					
Square Violet (Site 34)	21,33	15,67	4,33	3	2	46,3
Anomalie relevée	Gazon suspect (traitement ?)					

Il est par ailleurs possible de raisonner en fonction des densités de peuplement des pelouses significatives (Tableau 3). La répartition collembolles-acariens sur les groupes de sites ainsi classés, reste comme dans l'approche en fonction des classes de NO_2 , assez peu éloignée de 2/3-1/3. Cette proportion, relativement constante, tend à indiquer que la répartition des peuplements de mésofaune des pelouses parisiennes est, en moyenne, assez homogène.

Ceci permet de penser que la mesure de la **mésofaune totale**, constituée des divers peuplements homogènes, pourrait être un reflet intéressant du paramètre variable que constitue la pollution.

Tableau 3.
Répartition des mésofaunes
en fonction des densités de peuplement
(densités exprimées en nombre d'arthropodes/m²).

Mesofauna distribution according to population densities
(number of arthropods/m²).

Densité de peuplement	< 100	100-200	200-300	> 300
Nombre de sites	12	16	9	9
Collembolles %	68,9	66,1	59,7	66
Acariens %	22,7	27,5	29,1	30,3
Thysanoptères %	8,4	6,4	11,2	3,7

Synthèse des résultats (Tableau 4)

Cette étude porte sur 55 sites : 46 significatifs, 3 discutables et 9 rejetés. Le nombre total d'arthropodes observé sur l'ensemble des 55 sites est de 30 849. Sur l'ensemble des 46 significatifs (25 114 arthropodes dénombrés), la répartition montre une mésofaune moyenne de 198 arthropodes/m², constituée pour 64,9 % de collembolles, 28,5 % d'acariens et 6,6 % de thysanoptères.

Cette répartition collembolles-acariens, pas très éloignée de 2/3-1/3 reste semblable dans les quatre groupes de sites (> 80 µg/m³, 70-80 µg/m³, 60-70 µg/m³, 50-60 µg/m³). Seul le dernier groupe (50-60 µg/m³, pollution modérée) semble différer légèrement dans sa répartition, au profit des collembolles.

Au total :

- *Collembolles totaux* : cette valeur représente la somme de toutes les populations de collembolles. L'identification d'un arthropode en tant que collembolle est aisée. Ces derniers, bien que constituant un groupe varié, ne peuvent, dans leur ensemble, guère être confondus avec d'autres arthropodes. Cette facilité d'identification fait que les collembolles totaux semblent constituer un intéressant bio-indicateur de pollution urbaine.
- *Collembolles symphypléones* : les populations de ces arthropodes, proportionnellement bien représentées dans les quatre zones d'études, sont d'autant plus abondantes que la qualité de l'air est bonne. En raison de ces caractéristiques et de leur identification généralement aisée, même pour un observateur peu spécialisé, les collembolles symphypléones semblent constituer un intéressant bio-indicateur de pollution urbaine.
- *Acariens totaux* : cette valeur représente la somme de toutes les populations d'acariens dont l'identification grossière est très aisée. Bien que constituant un groupe varié dont l'identification fine est complexe, ils ne peuvent guère être confondus avec d'autres arthropodes. L'étude statistique montre que leur intérêt est faible.
- *Acariens oribates* : les populations de ces arthropodes, proportionnellement moyennement représentées dans les quatre zones d'études, sont d'autant plus abondantes que la qualité de l'air est bonne. Ils sont d'une identification assez aisée, bien que parfois délicate, mais leur abondance est modérée. L'étude statistique montre que leur intérêt est limité.
- *Thysanoptères* : les populations de ces arthropodes, trop peu représentées dans les quatre zones d'études pour être intéressantes, ne semblent pas présenter de rapport avec la qualité de l'air. André notait déjà dans son étude écologique des communautés de microarthropodes corticoles soumises à la pollution atmosphérique [14] que « dans cette étude, on est évidemment contraint à ne tenir compte que d'espèces particulièrement abondantes ». Il faut noter

Tableau 4.
Nombre d'arthropodes par zone (valeur absolue et moyenne /m²).
Total and average number of arthropods observed /m² from each area.

	COLLEMBOLLES			ACARIENS		Thysa	Total
	Symphy	Autres	Total Collem.	Oribat	Total acariens		
Classe 1 : faune totale	169	219	388	31	150	81	619
faune moyenne/m ²	28,17	36,5	64,67	5,17	25	13,5	103,17
Classe 2 : faune totale	1 167	1 252	2 419	441	1 269	344	4 032
faune moyenne/m ²	33,34	35,77	69,11	12,6	36,25	9,83	115,2
Classe 3 : faune totale	3 414	2 003	5 453	2 376	2 943	620	8 984
faune moyenne/m ²	69,67	40,88	111,29	48,49	60,06	12,65	183,34
Classe 4 : faune totale	3 845	4 184	8 029	1 846	2 796	615	11 440
faune moyenne/m ²	103,92	113,1	217	49,89	75,57	16,62	309,19

(valeur moyenne : valeur absolue/surface échantillonnée pour chaque zone).
Symphy : collembolles symphypléones – Oribat : acariens oribates – Thysa : thysanoptères.

que la valeur observée dans la classe $\text{NO}_2 > 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est à prendre avec précaution en raison du faible nombre de sites et de la relative richesse de la porte Maillot (site 1) en cet arthropode. Tout cela, ainsi que l'étude statistique montre que leur intérêt est très faible.

- **Mésafaune totale** : cette valeur représente la somme de toutes les populations d'arthropodes. L'abondance en est d'autant plus grande que la qualité de l'air est bonne. L'étude statistique en montre l'intérêt.

La quantification des mésofaunes totales semble constituer un intéressant bio-indicateur de pollution urbaine.

Étude statistique de la relation entre la population de la mésofaune et la teneur en NO_2

L'aspect des courbes de variation du nombre d'arthropodes en fonction de la qualité de l'air (Figure 2), quoique évoquant une corrélation, ne constitue pas à lui seul un élément fiable. Une approche statistique est donc indispensable (Tableau 5), en utilisant non pas 4 points de zones, mais l'ensemble des 46 points correspondants aux sites exploitables, les populations de chacun étant comparées aux teneurs en NO_2 locales. En pratique, les valeurs observées ne suivent pas une loi normale, ce qui exclut l'usage de tests paramétriques.

Il ressort de ce tableau que trois groupes présentent une intéressante corrélation : les collembolés symphypléones, les collembolés totaux et surtout la

mésafaune totale ($p < 0,01$, Spearman). Les acariens oribates, en revanche, présentent une corrélation nettement plus discutable ($p = 0,079$) à moins d'accepter un seuil à 10 %... Les thysanoptères, quant à eux, ne présentent aucune corrélation, mais il s'agit d'un groupe faiblement représenté dans cette étude (moins de 7 % de l'ensemble de la mésofaune observée sur l'ensemble des sites).

Tableau 5.

Résultats des tests de Kruskal et Wallis (Hc : variable de décision, p : seuil de signification), calcul du coefficient de corrélation de rang de Spearman (rs) et résultats des tests de signification de ce coefficient (Uc et p). Les résultats significatifs figurent en gras.

Results of Kruskal and Wallis tests (Hc: Decision variable, p: Significance threshold) and calculation of Spearman's row correlation coefficient (rs) as well as results of significance tests for this coefficient (Uc and p). In bold: significant results.

	Test de Kruskal et Wallis		Corrélation de Spearman		
	Hc	p	rs	Uc	p
Symphyléones	7,01	0,072	- 0,33	- 2,24	0,013
Autres collembolés	1,81	0,613	- 0,1	- 0,64	0,26
Total collembolés	6,92	0,074	- 0,33	- 2,22	0,013
Oribates (acariens)	3,77	0,287	- 0,21	- 1,41	0,079
Total acariens	2,43	0,488	- 0,15	- 1,02	0,153
Thysanoptères	1,51	0,68	- 0,11	- 0,71	0,238
Mésafaune totale	8,95	0,03	- 0,39	- 2,61	0,005
	p < 0,1		p < 0,05		

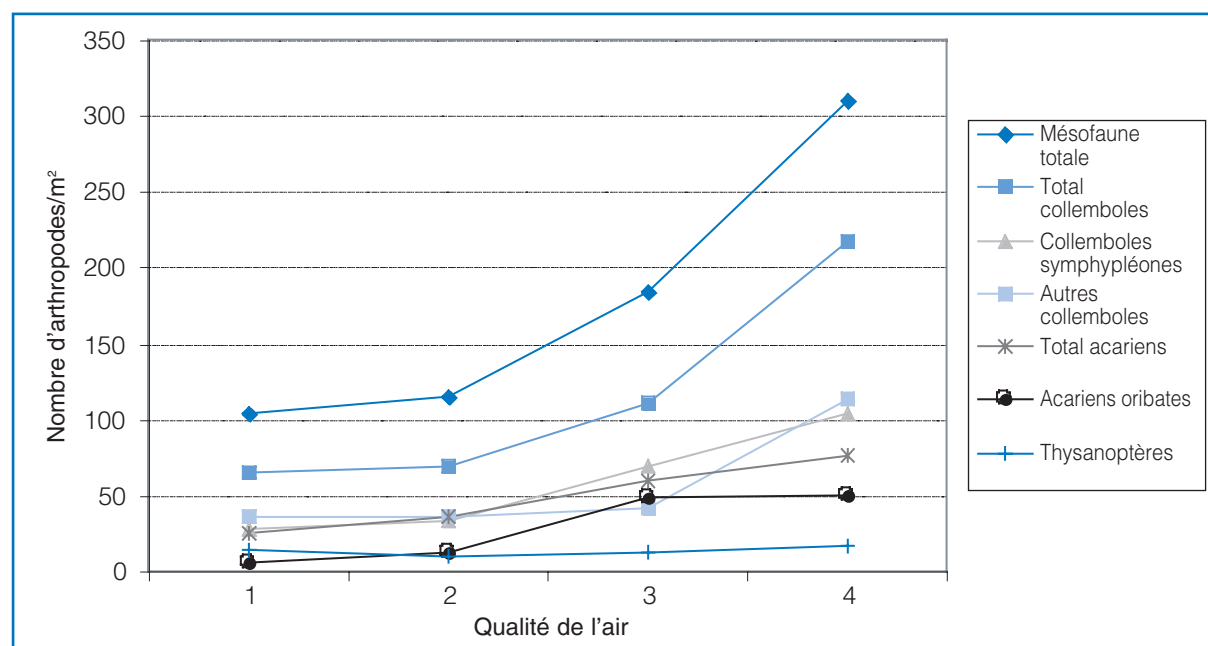


Figure 2.

Variation du nombre d'arthropodes/m² en fonction de la qualité de l'air.

Variation of number of arthropods/m² according to the air quality.

Qualité de l'air de niveau 1 (teneur en $\text{NO}_2 > 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Qualité de l'air de niveau 2 (teneur en NO_2 comprise entre 70 et $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Qualité de l'air de niveau 3 (teneur en NO_2 comprise entre 60 et $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Qualité de l'air de niveau 4 (teneur en NO_2 comprise entre 50 et $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Discussion

L'étude des mésofaunes en milieu urbain présente un certain nombre d'analogies avec celle des lichens. Ainsi dans un milieu naturel, les lichens comme les mésofaunes constituent des communautés stables adaptées aux conditions locales. Les modifications de la qualité de l'air auront, comme pour les lichens des conséquences variables selon les espèces, certaines disparaissant au profit d'autres, de meilleure adaptabilité ou plus résistantes. Ainsi pour les acariens, au sein même du groupe des oribates, André [14] note la sensibilité de *Tectocepheus sarekensis*, alors que *Humerobates rostolamellatus* est abondant dans les zones polluées.

Il n'est donc pas possible à la vue de cette simple étude d'envisager la mise en place directe d'une échelle permanente qualité de l'air/mésofaune comme cela existe avec les lichens. L'indice global de qualité de l'air, développé sur ce dernier modèle regroupe 40 espèces de lichens suivant leurs caractéristiques écophysiologiques dans une échelle de 6 niveaux de valeur écologique. La présente étude n'apporte pas d'élément suffisant pour une modélisation, mais pose des bases d'observation.

L'usage des mésofaunes des gazons comme bio-indicateurs de pollution urbaine se heurte à diverses objections :

- Ce modèle nécessite – évidemment – la présence d'une pelouse, ce qui est loin d'être la règle, en particulier dans les lieux les plus exposés à la pollution de nos grandes villes.
- Ces pelouses doivent être aussi homogènes et identiques entre elles que possible. En effet, l'échantillonnage en trois points distincts montre qu'il peut exister au sein d'un même site une variabilité importante quantitative et qualitative. Il est donc nécessaire de multiplier les points de prélèvement afin d'effectuer une moyenne des peuplements. Cette question se pose cependant fréquemment dès que l'on travaille sur un marqueur vivant. Ainsi la présence de lichens d'arbres urbains peut varier de manière significative au sein d'une même zone d'étude selon la nature botanique de l'arbre, sa taille, son environnement immédiat, la saison et le pH. L'action de ce dernier paramètre est, là encore, commune aux mésofaunes [11, 12, 15].
- L'hygrométrie est un paramètre important et inconstant. Les travaux de Kuperman *et al.* [41] suggèrent que l'association sécheresse et pollution présente une action défavorable sur les populations de collemboles par rapport à celles présentes dans des milieux à l'hygrométrie satisfaisante, moins perturbées.
- Ces peuplements, à développement rapide, varient dans le temps, comme pour de nombreux autres arthropodes. Les travaux de Krestyaninova et Kusnetsova sur un boulevard de Moscou [42] montrent que le maximum d'abondance est atteint après la période hivernale plus rapidement en milieu urbain que dans la nature.

- Cette étude a donc été menée sur une durée aussi concentrée que possible durant une période de bon peuplement. Il n'en reste pas moins vrai que si les mésofaunes peuvent être présentes de manière permanente sur un site, des prélèvements menés en une autre saison auraient abouti à des résultats différents.

- Ces pelouses peuvent être soumises à diverses perturbations dues aux activités humaines, difficilement quantifiables, comme dans le cas des squares Violet et Necker.

- Les taux d'arthropodes/m² paraissent faibles par rapport aux densités de population observées en milieu rural, posant le problème de la pertinence de la technique d'aspiration par rapport à celle de carottage, difficilement applicable en centre-ville.

L'évolution de la densité des communautés de microarthropodes est multiparamétrique et pourrait être présentée selon un diagramme d'Ishikawa dont la qualité de l'air ne serait qu'une des branches, les autres branches devant être maintenues aussi constantes que possible.

Conclusion

Un modèle de bio-indicateur reposant sur les microarthropodes n'a d'intérêt que s'il est exploitable en dehors du cercle très restreint des spécialistes. En conséquence, ce travail est conçu pour être utilisé de manière simple, au prix – sans doute – de quelques approximations, mais permettant une mise en pratique effective.

- Les mésofaunes sont présentes dans les centres des grandes villes françaises, même dans leurs sites les plus pollués.
- Elles présentent une meilleure tolérance à la pollution que les lichens, considérés comme un bio-indicateur classique.
- Elles peuvent être échantillonnées de manière simple et rapide.
- L'analyse en est aisée si l'on se limite à une quantification des populations totales et reste simple si l'analyste distingue seulement les grands groupes que sont les collemboles totaux et symphypléones, les acariens totaux et oribates, les thysanoptères.
- Plusieurs types de populations, mais plus particulièrement les mésofaunes totales, présentent dans cette étude une intéressante corrélation avec les classes de NO₂, bon marqueur des niveaux de la pollution urbaine.
- Cette étude, bien qu'imparfaite, tend à montrer que les mésofaunes des gazons pourraient constituer un bio-indicateur crédible de pollution urbaine, utilisable de manière pratique par un opérateur consciencieux, pourvu d'une formation simple.

Remerciements

Nous remercions C. Lohou (Direction des Parcs et Jardin de la Ville de Paris), C. Roth et F. Joly (AIRPARIF) pour leur aide très précieuse.

Mots clés

Pollution atmosphérique. Dioxyde d'azote, NO₂. Bio-indicateur. Mésofaune. Pelouse.

Keywords

Air Pollution. Nitrogen dioxide, NO₂. Bioindicator. Mesofauna. Lawn.

Références

1. Hawsworth DL, Rose F. Qualitative scale for estimating sulphur dioxide pollution in England and Wales using epiphytic lichens. *Nature London* 1970 ; 227 : 145-8.
2. Hawsworth DL, Rose F. Lichens as Pollution Monitors. Edward Arnold, London 1976.
3. Nylander. Les lichens du jardin du Luxembourg. *Bull Soc Bot France* 1866 ; 13 : 364-72.
4. Heggstad HE. Origin of Bel-W3, Bel-C, and Bel-B tobacco varieties and their use as indicators of ozone. *Environmental Pollution* 1991 ; 74 : 264-91.
5. Nali C, Crocicchi L, Lorenzini G. Plants as indicators of urban air pollution (ozone and trace elements) in Pisa, Italy. *J Environ Monit* 2004; 6 (7) : 636-45.
6. Saitanis C, Karandinos MG, Riga-Karandinos AN, Lorenzini G, Vlassi A. Photochemical air pollutant levels and ozone phytotoxicity in the region of Mesogia-Attica, Greece. *International Journal of Environment and Pollution* 2003 ; 19 (2) : 197-208.
7. Lorenzini G, Landi U, Loppi S, Nali C. Lichen distribution and bioindicator tobacco plants give discordant response: a case study from Italy. *Environmental Monitoring and Assessment* 2003 ; 82 (3) : 243-64.
8. Clausen IHS. The use of spiders (Araneae) as ecological indicators. *Bulletin of the British Arachnological Society* 1986 ; 7 (3) : 83-6.
9. Whittaker John B. Interactions between insects and air pollutants. In: Alscher RG, Wellburn AR (eds). Responses to the Gaseous Environment: Molecular, metabolic and physiological aspects. Chapman and Hall, London, Glasgow, New York 1994.
10. Van Straalen NM. Evaluation of bioindicator systems derived from soil arthropods communities. *J Appl Soil Ecol* 1998 ; 19 : 429-37.
11. Heneghan L, Bolger T. Effects of acid rain on soil microarthropods: a field manipulation. *Pedobiologia* 1996 ; 40 : 413-38.
12. Heneghan L, Bolger T. Effects of components of "acid rain" on the contribution of soil microarthropods to ecosystem function. *J Appl Ecol* 1996 ; 33 : 1329-44.
13. André H. Introduction à l'étude écologique des communautés de microarthropodes corticoles soumises à la pollution atmosphérique. I. Les microarthropodes corticoles. *Bull Ecol* 1977 ; 7 : 431-44.
14. André H. Introduction à l'étude écologique des communautés de microarthropodes corticoles soumises à la pollution atmosphérique. II. Recherche de bioindicateurs et d'indices biologiques de pollution. *Annales Soc r Zool Belg* 1977 ; 106 (2-4) : 211-24.
15. Kuposzki H. Effects of acid and nitrogen deposition on the mesofauna, especially the collembola. Proceedings of the 15th IUFRO International Meeting of Specialists on Air Pollution Effects on Forest Ecosystems, Tharandt/Dresden, Germany, 9-11 Sept, 1992.
16. Hagvar S. Why do collembolids and mites react to changes in soil acidity? *Ent Meddr* 1987 ; 55 : 115-9.
17. Paoletti MG, Favretto MR, Stinner BR, Purrington FF, Bajer JE. Invertebrates as bioindicators of soil use. In: Crossley DA, Jr, Coleman DC, Hendrix PF, Cheng W, Wright DH, Beare MH, Edwards CA (eds). Modern techniques in soil ecology. Elsevier, New York, NY 1991 : 341-62.
18. Kirschbaum U, Wirth V. Flechten erkennen, Luftgüte bestimmen, Ulmer, Stuttgart 1995 : 128.
19. Letrouit-Galinou MA, Ishiomin F, Déruelle S, Seaward MRD. Les lichens corticoles de Paris en 1991, 1993 et 1995. Poster, 6^e Journée UFR des Sciences de la Vie, Paris, 9-10 juillet 1997. <http://www.snv.jussieu.fr/UFR/Journees97/poster/letrouit.html>
20. Garty J, Levin T, Cohen Y, Lehr H. Biomonitoring air pollution with the desert lichen *Ramalina maciformis*. *Physiol Plant* 2002 ; 115 (2) : 267-75.
21. Kuperman RL, Potapov M, Sinizina EA. Precipitation and pollution effect on the abundance of Collembola in hardwood forests in the lower Midwestern United States. *European Journal of Soil Biology* 2002 ; 38 : 277-80.

22. Filser J, Hölscher G. Experimental studies on the reactions of Collembola to copper contamination. *Pedobiologia* 1997 ; 41 : 173-8.
23. Böckl M, Blay K, Fischer K, Mommertz S, Filser J. Colonisation of a copper-decontaminated soil by micro and mesofauna. *Applied Soil Ecology* 1998 ; 9 : 489-94.
24. Coineau Y. Introduction à l'étude des microarthropodes du sol et de ses annexes. Doin, Paris 1974 : 41.
25. Pedersen MB, Cornelis AM. Toxicity of copper to the collembolan *Folsomia fimetaria* in relation to the age of soil contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 2001 ; 49 (1) : 54-9.
26. Snider R. Laboratory observations on the biology of *Folsomia candida* (Willem) (Collembola: Isotomidae). *Rev Ecol Biol Sol* 1973 ; 1 : 103-21.
27. Kaneda S, Kaneko N. Influence of soil quality on the growth of *Folsomia candida* (Willem) (Collembola). *Pedobiologia* 2002 ; 46 (5) : 428-39.
28. Chauvat M, Ponge J-F. Colonization of heavy metal-polluted soils by collembola: preliminary experiments in compartmented boxes. *Applied Soil Ecology* 2002 ; 21 : 91-106.
29. Blakely JK, Neher DA, Spongberg AL. Soil invertebrate and microbial communities, and decomposition as indicators of polycyclic aromatic hydrocarbon contamination. *Applied Soil Ecology* 2002 ; 21 : 71-88.
30. Coineau Y. Introduction à l'étude des microarthropodes du sol et de ses annexes. Doin, Paris 1974 : 57.
31. Villiers A. Atlas des Hémiptères de France. Boubée, Paris 1977 : 219-34
32. Bach C. Mémoire d'Étude : Mésofaune du centre-ville de Valence en période froide, novembre-décembre 1999.
33. Edwards CA. The assessment of populations of soil-inhabiting invertebrates. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 1991 ; 34 : 145-76.
34. Lee Joon-Ho, Hong-Hyun Park, Banghun Kang, Chul-Eui Jung, and Seong-Sik Choi. Comparison of Oribatids Mite (Acari: Oribatida) Communities among City, Suburban, and Natural Forest Ecosystems, Namsan, Kwangreung, and Mt. Jumbong 1999.
<http://klter.kookmin.ac.kr/events/conference99/doc/LeeJoon.htm>
35. Krantz GW. A manual of Acarology, 2nd edition. Oregon State Univ. Book Stores, Inc., Corvallis. 1978 : 509.
36. AIRPARIF. Bulletin de la Surveillance de la Qualité de l'Air en Ile-de-France. 2001 ; 14 : 1.
37. LIFE « RESOLUTION » 1^{er} bilan d'étape. Les premiers résultats de la campagne LIFE RESOLUTION : un effet de loupe sur l'Ile-de-France. *AIRPARIF Actualité* 2001 ; 14 : 1-17.
38. Météo-France, Station Paris-Montsouris, Tableau climatique mensuel 2001.
39. Penel V, List O, Habrard J. A meso-fauna/atmospheric pollution correlation. Abstract, annual symposium of the Pan-American Aerobiology Association, North Carolina State University, Raleigh NC, USA, June 16-19, 2001 ; 27.
40. Penel V, List O, Pourret S. Lawn mesofauna: a bioindicator for urban atmospheric pollution. Abstract, 7th International Congress on Aerobiology, Montreal, Canada, August 5-9, 2002 : 104.
41. Kuperman RL, Potapov M, Sinitzina EA. Precipitation and pollution effect on the abundance of Collembola in hardwood forests in the lower Midwestern United States. *European Journal of Soil Biology* 2002 ; 38 : 277-80.
42. Krestyaninova AI, Kusnetsova NA. Dynamics of Collembolan (Hexapoda, Collembola) association in the soil of an urban boulevard. *Entomological Review* 1996 ; 76 : 1220-30.