



Dynamique du peuplement de Collemboles sous l'effet d'une pollution croissante par des ETM

Servane Gillet, Jean-François Ponge

► To cite this version:

Servane Gillet, Jean-François Ponge. Dynamique du peuplement de Collemboles sous l'effet d'une pollution croissante par des ETM. Cambier (P.), Schvartz (C.) & Van Oort (F.). Contaminations métalliques des agrosystèmes et écosystèmes péri-industriels, Quiaie, Paris, pp.219-227, 2009, Update Sciences & Technologies. hal-00567139

HAL Id: hal-00567139

<https://hal.science/hal-00567139>

Submitted on 18 Feb 2011

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.

Dynamique du peuplement de Collemboles sous l'effet d'une pollution croissante par des ETM

GILLET Servane, PONGE Jean-François

Muséum National d'Histoire Naturelle, CNRS UMR 7179, 4 avenue du Petit Château, 91800 BRUNOY, jean-francois.ponge@wanadoo.fr

English title : The impact of increasing pollution by zinc, lead and cadmium on collembolan communities (Arthropoda, Hexapoda)

Collembolan communities were sampled at three plots along a gradient of increasing pollution by heavy metals (Zn, Pb and Cd) in a poplar plantation downwind of a zinc smelter (Auby, France). Despite stability of both total abundance and total number of species, pronounced changes were observed in species distribution, gut contents and mode of reproduction. Metal pollution caused environmental changes which affected species assemblages both by changing habitat (shift from woodland to grassland, accumulation of undecayed litter) and food, together with probable toxicity. We observed that hemiedaphic species (species living in litter) were disfavoured compared to species living either at the ground surface or in deep soil, which we interpreted as avoidance of toxic litter. We also demonstrated plasticity of the food diet, together with other, more species-specific adaptive processes. *Protaphorura armata* increased its moulting rate, thereby detoxifying its gut, as assessed by a higher number of exuviae in its food bolus. *Mesaphorura macrochaeta* shifted from obligate parthenogenesis to sexual reproduction, thereby increasing fitness of the population.

Introduction

L'intense activité métallurgique que le nord de la France a connue au 19^{ème} siècle est à l'origine du nombre élevé de sites pollués par les métaux lourds actuellement recensés dans la région Nord-Pas-de-Calais. Au sein des écosystèmes contaminés, le sol, de par sa position d'interface entre l'atmosphère, la lithosphère, l'hydrosphère et la biosphère, se trouve être un réceptacle à plus ou moins long terme de la pollution métallique. Cette pollution altère les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol et, par conséquent, l'étude de la faune peut constituer un bon moyen de diagnostic de l'état de santé d'un sol.

Au sein du système sol, la faune participe à la transformation de la matière organique. Les collemboles, longtemps classés dans le groupe des insectes primitifs, sont des arthropodes, hexapodes, amétaboles et aptères appartenant à la mésofaune saprophage du sol. Ils interviennent principalement comme acteurs du second compartiment de la chaîne de décomposition, avec un régime alimentaire essentiellement fongivore mais aussi pollinivore, phytosaprophage, bactériophage, phytophage et parfois même carnivore. Les collemboles vivent en majorité dans les 10 premiers centimètres du sol au sein de l'épiédaphon (végétation basse), de l'hémiédaphon (litière) et de l'euédaphon (horizons du sol proprement dit).

L'étude d'un peuplement tel que celui des collemboles nous renseigne sur la toxicité des métaux lourds vis-à-vis des animaux mais aussi sur les stratégies mises en place pour limiter le contact et l'absorption du polluant. Ainsi une étude au niveau du peuplement nous renseigne sur le degré de sensibilité des espèces vis-à-vis de la pollution mais aussi sur le lien entre le lieu de vie des animaux et leur maintien dans un écosystème contaminé. De même, l'étude des contenus intestinaux nous renseigne sur le régime alimentaire des animaux en présence d'un taux de pollution croissant dans le milieu mais aussi sur le compartiment du sol dans lequel la faune prélève ses ressources alimentaires.

Lors de cette étude, nous nous sommes aussi intéressés au sex-ratio de *Mesaphorura macrochaeta*, espèce habituellement parthénogénétique obligatoire, en présence d'une pollution métallique du sol et nous avons tenté de déterminer si cette pollution avait un impact sur le mode de reproduction des animaux.

Matériel et méthodes

Présentation du site et des stations échantillonnées

Le Bois des Asturies est localisé sur la commune d'Auby dans la région du Nord-Pas-de-Calais en France. Ce terrain, situé à proximité de l'une des plus importantes raffineries de zinc au monde (production de 245 Mt/an), souffre actuellement d'une importante pollution en zinc, plomb et cadmium pouvant atteindre plusieurs centaines à plusieurs dizaines de milliers de mg/kg de sol sec. Une plantation de peupliers hybrides (*Populus sp.*) a été réalisée sur le site en deux étapes. La zone la plus éloignée de l'usine a été plantée entre 1974 et 1977 et la zone la plus proche de l'usine a été plantée entre 1981 et 1983.

Trois stations ont été échantillonnées le long d'un gradient de proximité de l'usine. La station P1, située à 490m de l'usine, se caractérise par une peupleraie dense (milieu fermé), une strate herbacée à *Arrhenaterum elatius* et *Arabidopsis halleri* et un humus de forme Mull avec une forte activité biologique à diplopodes (*Polydesmus angustus*) et vers de terre. La station P2, située à 340m de l'usine, se caractérise par une strate arborescente peu dense (milieu semi-ouvert), une strate herbacée à *Viola calaminaria* et un humus de forme Mor, sans activité visible de la faune. La station P3, située à 235m de l'usine, se caractérise par une strate arborescente éparse (milieu ouvert) avec des arbres chétifs, une strate herbacée à *Armeria maritima halleri* et *Phragmites australis* et un humus de forme Mor.

Échantillonnage et identification des animaux

Sur chaque station, cinq carottes de sol (avec leur litière) sont collectées à l'aide d'une sonde cylindrique en acier d'un diamètre de 5 cm et d'une profondeur de 10 cm. Au laboratoire, les microarthropodes sont extraits de chaque échantillon de sol par la méthode de Berlese-Tullgren, qui consiste à placer l'échantillon sur une grille métallique au-dessus d'un entonnoir en plastique et sous une ampoule électrique pendant 10 jours. Les arthropodes, fuyant la dessiccation progressive du sol, s'enfoncent dans l'échantillon puis tombent dans une fiole située sous l'entonnoir contenant de l'éthanol à 95% pour fixer la récolte.

Les collemboles sont ensuite triés à la loupe binoculaire puis déterminés à l'espèce à l'aide d'un microscope à contraste de phase (grossissement x500) après avoir été montés entre lame et lamelle dans une goutte de chloral-lactophénol (25 ml d'acide lactique, 50g d'hydrate de chloral, 25 ml de phénol).

Parallèlement à la détermination, le sex-ratio de *Mesaphorura macrochaeta*, espèce habituellement parthénogénétique obligatoire, est déterminé.

Observation des contenus intestinaux

L'observation des contenus intestinaux est réalisée sur les animaux, après identification, au microscope à contraste de phase au grossissement x500. Sept catégories de contenus ont été identifiées: matériel végétal, matériel fongique, bactéries, restes animaux (et exuvies), humus holorganique (matériel végétal humifié non reconnaissable), humus hémorganique (mélange de matière organique et de matière minérale) et intestins vides.

La proportion en volume de chaque catégorie est estimée visuellement à 5% près puis moyennée par espèce et par site.

Analyses chimiques du sol

Les teneurs totales en zinc, plomb et cadmium du sol sont mesurées après une combustion de la matière organique à 450°C et une solubilisation de la matière minérale par l'acide fluorhydrique et chlorhydrique. Le plomb et le cadmium sont mesurés par absorption atomique respectivement à 283,3 et 228,0 nm et le zinc par émission plasma à 213,6 nm. Des mesures de contrôle utilisant du matériel de référence certifié sont réalisées au début et à la fin de chaque mesure.

Résultats

Teneurs totales du sol en zinc, plomb et cadmium

Sur le Bois des Asturies, le zinc est le métal le plus abondant dans les 10 premiers centimètres du sol (lieu de vie de la faune), avec des teneurs pouvant atteindre jusqu'à 41570 mg/kg sur la station P3 (Tableau 1). Le test U de Mann-Whitney montre une augmentation croissante des teneurs moyennes en zinc de la station P1 à la station P3 alors que les teneurs en plomb et cadmium, identiques sur les stations P2 et P3, sont supérieures aux teneurs mesurées sur la station P1.

Dynamique du peuplement de collemboles

Malgré une richesse spécifique moyenne équivalente entre les trois stations (P1: 5,4; P2: 5,0; P3: 6,2) et une richesse spécifique totale plus faible sur les stations P2 (8 espèces) et P3 (9 espèces) par rapport à la station P1 (13 espèces), les collemboles sont significativement plus abondants sur les stations P2 et P3 (Figure 1). Cette haute densité d'individus sur les stations les plus fortement contaminées est le fait d'une seule espèce: *Mesaphorura macrochaeta*. Cette espèce représente en effet 94% de la communauté de collemboles en P2 et 67% en P3 alors qu'elle n'en représente que 1,7% en P1. Sur le Bois des Asturies *M. macrochaeta* semble être favorisée par les teneurs élevées de métal dans le sol. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer le fort développement de cette espèce, tolérante à la pollution, comme (1) la libération d'une niche écologique par les espèces les plus sensibles (augmentation du nombre d'habitats potentiels et de la nourriture disponible) et (2) l'amélioration des conditions environnementales (protection contre le froid et la dessiccation) liée à l'accumulation de matière organique en P2 et P3 (Gillet et Ponge, 2002).

Lorsque le milieu s'ouvre, de la peupleraie dense à la peupleraie éparse avec des arbres chétifs, le pourcentage d'espèces de milieu ouvert augmente, notamment de la station P1 aux stations P2 et P3 (Figure 2), alors que le pourcentage d'espèces de milieu fermé tend à diminuer de la station P1 (15%) à la station P3 (0%). Par son effet sur la densité et le degré de couverture de la strate arborescente, la pollution métallique a donc un impact sur la répartition des espèces de milieux ouvert et fermé.

Au sein du profil de sol, la répartition des espèces de collemboles est fonction du niveau de contamination de la station en métaux lourds (Figure 3). Ainsi, le pourcentage d'espèces épédaphiques augmente significativement lorsque les teneurs du sol augmentent en polluant (de P1 à P3), comme le pourcentage d'espèces euédaphiques, alors que le pourcentage d'espèces hémiedaphiques diminue significativement sur la station P3. Par conséquent, en présence d'une forte contamination du sol en zinc, plomb et cadmium, la proportion d'espèces vivant au-dessus et au-dessous de la litière augmente au détriment des espèces vivant en son sein. Etant donné la grande réactivité de la matière organique vis-à-vis

des métaux lourds (Lamy et al., 2002), ce résultat met en avant la toxicité de la litière vis-à-vis de la faune du sol.

Régime alimentaire

Sphaeridia pumilis est une espèce épigée uniquement présente sur les stations P1 et P3 (Figure 4). Lorsque les teneurs en zinc, plomb et cadmium du sol augmentent, *Sphaeridia pumilis* tend à consommer plus d'humus hémorganique (de 24% du volume total du bol alimentaire en P1 à 62% en P3), moins d'humus holorganique (de 19% du volume total du bol alimentaire en P1 à 1% en P3) et moins de matériel fongique (de 37% du volume total du bol alimentaire en P1 à 5% en P3). Ces observations indiquent qu'en présence d'une forte pollution, *S. pumilis* s'alimente en profondeur dans l'horizon organo-minéral du sol et délaisse la litière qui serait toxique. *S. pumilis* consomme également moins de mycélium. Les champignons sont connus pour hyperaccumuler les métaux (Michelot et al., 1998), par conséquent, en limitant sa consommation de mycélium, *S. pumilis* accumule moins de métaux dans son organisme. Ainsi les collemboles, au travers de leur plasticité alimentaire, s'adaptent aux fortes teneurs du sol en polluant. Il en est de même pour *Parisotoma notabilis*, espèce hémiedaphique présente sur les stations P1 et P3. Cette espèce consomme sur ces deux stations en majorité de l'humus hémorganique avec respectivement 45% et 54% du volume total du bol alimentaire. Comme *S. pumilis*, *P. notabilis* consomme plus d'humus hémorganique sur la station P3 et moins de mycélium (de 5% du volume total du bol alimentaire en P1 à 2% en P3).

Protaphorura armata est une espèce euédaphique présente sur les stations P1 et P3. Sur la station fortement contaminée par les métaux lourds (P3), *P. armata* consomme moins d'humus holorganique (de 17% du volume total du bol alimentaire en P1 à 9% en P3), plus de mycélium (de 8% du volume total du bol alimentaire en P1 à 26% en P3) et plus d'exuvies (de 1% du volume total du bol alimentaire en P1 à 3% en P3) que sur la station P1. La présence de mues dans l'intestin des collemboles s'explique par la consommation de sa propre exuvie à chaque mue de l'animal. Par conséquent, l'augmentation de la proportion d'exuvies dans le bol alimentaire de *P. armata* indique que l'animal a augmenté sa fréquence de mue. Chez les collemboles, le renouvellement de l'épithélium intestinal, à chaque période de mue, a lieu quelques jours après l'exuviation, ce qui constitue un moyen de détoxification très efficace puisque la majorité des métaux lourds sont piégés au sein des cellules intestinales (Humber, 1979, Van Straalen et Donker, 1994). Pour lutter contre les fortes teneurs du sol en polluant, *P. armata*, en plus de la plasticité alimentaire, a donc développé un mécanisme de détoxification qui rend sans doute possible pour cette espèce la consommation de champignons.

La pollution a-t-elle une influence sur la sexualité des collemboles?

Sur le site du Bois des Asturies, la population de *M. macrochaeta* échantillonnée présente des individus femelles et mâles. Le sex-ratio (M/F) observé est de $0,65 \pm 0,06$ en P2 et $0,47 \pm 0,07$ en P3. Etant donné le faible nombre d'individus collectés en P1, le sex-ratio n'a pas pu être établi sur cette station.

M. macrochaeta est une espèce parthénogénétique obligatoire qui présente dans ses gonades des bactéries féminisantes du genre *Wolbachia* (Vandekerckhove et al., 1999). Ces bactéries augmentent la fertilité des animaux, induisent la parthénogenèse et l'incompatibilité cytoplasmique. L'apparition des deux sexes, constatée sur le Bois des Asturies chez cette espèce, a déjà été observée dans le passé par Petersen (1971) dans une population échantillonnée sur une dune sableuse du littoral.

Deux hypothèses peuvent justifier l'apparition du sexe mâle chez *M. macrochaeta* en présence d'une pollution métallique:

- La reproduction sexuée permettrait d'obtenir des descendants avantagés lorsque la sélection devient trop forte, puisque la descendance d'origine biparentale présente une plus grande fitness que la descendance monoparentale
- Les populations denses de Collemboles favoriseraient la reproduction sexuée. Les femelles auraient alors une probabilité plus élevée d'être fécondées par un spermatophore émis au hasard par un mâle de la même espèce.

Le mécanisme d'apparition sur notre site de la sexualité chez *M. macrochaeta* est probablement basé sur l'inhibition des effets féminisants des *Wolbachia*, soit directement par toxicité du métal vis-à-vis des bactéries ou bien indirectement par l'émission d'une hormone inhibant l'effet des *Wolbachia* dans le cas d'un phénomène densité-dépendant.

Conclusions

Concernant les communautés animales du sol, l'impact des métaux lourds est essentiellement lié à la forte affinité qu'ils présentent vis-à-vis de la matière organique. La matière organique du sol constitue l'une des principales ressources pour la faune (lieu de vie, alimentation). Sa contamination et son altération ont donc des conséquences sur le comportement des animaux mais aussi sur la composition des communautés. Ainsi, nous avons observé que les collemboles vivant au sein de la litière disparaissaient lorsque les teneurs du sol en métaux augmentaient, au profit d'espèces vivant dans des compartiments moins contaminés comme l'horizon organo-minéral et la végétation basse. Afin de limiter le contact et l'absorption des métaux, les collemboles modifient aussi leur régime alimentaire (consomment moins de mycélium) et leur lieu d'alimentation (litière) pour des horizons du sol plus profonds.

Certaines espèces semblent même avoir développé des mécanismes adaptatifs pour se maintenir au sein des écosystèmes fortement contaminés par les métaux lourds. Au travers de l'augmentation de la fréquence de ses mues, *P. armata* a développé un mécanisme de détoxification alors que *M. macrochaeta* a développé sur notre site un mode de reproduction sexué.

En plus de sa toxicité directe, la pollution par les métaux lourds présente un impact indirect sur les communautés animales, puisque l'ouverture du milieu et l'accumulation de la matière organique à la surface du sol ont pour effet de favoriser certaines espèces au détriment d'espèces non adaptées aux nouvelles conditions environnementales.

Références

Gillet, S., Ponge, J.F., 2002. Humus forms and metal pollution in soil. *European Journal of Soil Science* 53, 529-539.

Humbert, W., 1979. The midgut of *Tomocerus minor* Lubbock (Insecta, Collembola): ultrastructure, cytochemistry, ageing and renewal during a moulting cycle. *Cell Tissue Research* 196, 39-57.

Lamy, I., Ducaroir, J., Sterckeman, T., Douay, F., 2002. Réactivité des matières organiques. In: Les éléments traces métalliques dans les sols, approches fonctionnelles et spatiales, Baize, D., Tercé, M. (Eds.), INRA, Paris, 269-282.

Michelot, D., Siobud E., Doré, J.C., Viel, C., Poirier, F., 1998. Update on metal content profiles in mushrooms – toxicological implications and tentative approach to the mechanisms of bioaccumulation. *Toxicon* 36, 1997-2012.

Petersen, H., 1971. Parthenogenesis in two common species of Collembola: *Tullbergia krausbaueri* (Börner) and *Isotoma notabilis* Schäffer. *Revue d'Ecologie et de Biologie du sol* 8, 133-138.

Vandekerckhove, T.T.M., Watteyne, S., Willems, A., Swings, J.G., Mertens, J., Gillis, M., 1999. Phylogenetic analysis of the 16S rDNA of the cytoplasmic bacterium *Wolbachia* from the novel host *Folsomia candida* (Hexapoda, Collembola) and its implications for wolbachial taxonomy. *FEMS Microbiology Letters* 180, 279-286.

Van Straalen, , N.M., Donker, M.H., 1994. Heavy metal adaptation in terrestrial arthropods: physiological and genetic aspects. *Proceedings of the Section Experimental and Applied Entomology of the Netherlands Entomological Society* 5, 3-17.

|

	P1	P2	P3
Zn (mg/kg)	4166±979c	23344±1778b	34794±3861a
Pb (mg/kg)	839±165b	4294±226a	5840±1030a
Cd (mg/kg)	47±14b	202±17a	192±24a

Tableau 1 - Teneurs totales des 10 premiers centimètres du sol en zinc, plomb et cadmium. Les moyennes sont suivies de l'erreur standard. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre stations (test U de Mann-Whitney $P < 0,05$)

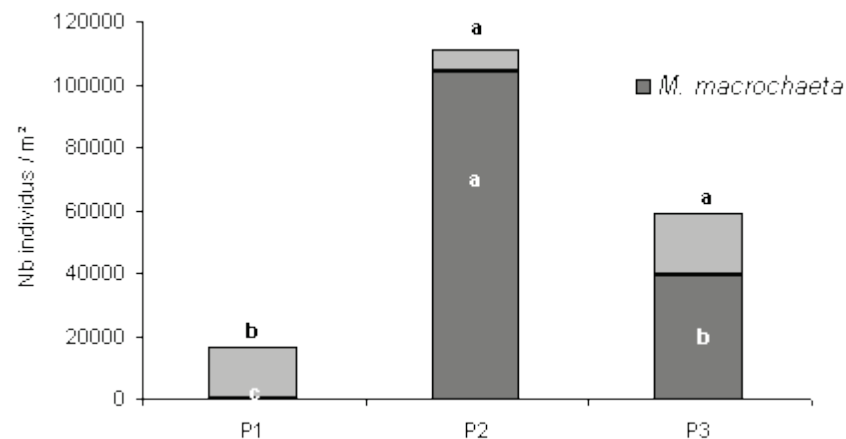


Figure 1 - Densité totale de collembolans sur les stations P1, P2 et P3. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre stations (test U de Mann-Whitney $P < 0,05$).

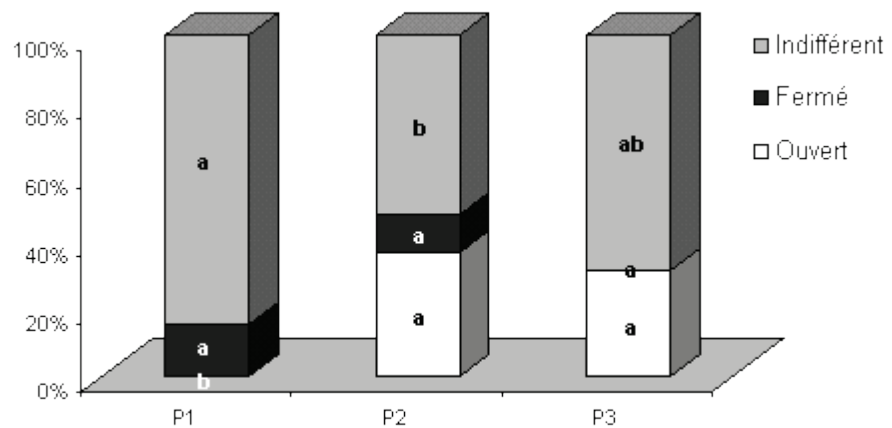


Figure 2 - Pourcentage d'espèces de collembolans de milieu ouvert, fermé ou indifférentes à l'ouverture du milieu sur les stations P1, P2 et P3. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre stations (test U de Mann-Whitney $P < 0,05$)

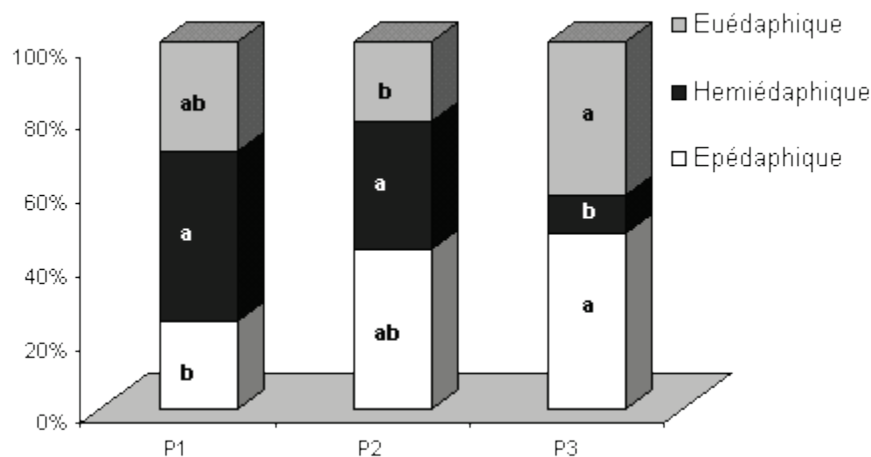


Figure 3 - Pourcentage d'espèces de collemboles épédaphiques (vivant à la surface du sol), hémiédaphiques (vivant au sein de la litière) et euédaphiques (vivant dans les horizons plus profonds du sol) sur les stations P1, P2 et P3. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre stations (test U de Mann-Whitney $P < 0,05$)

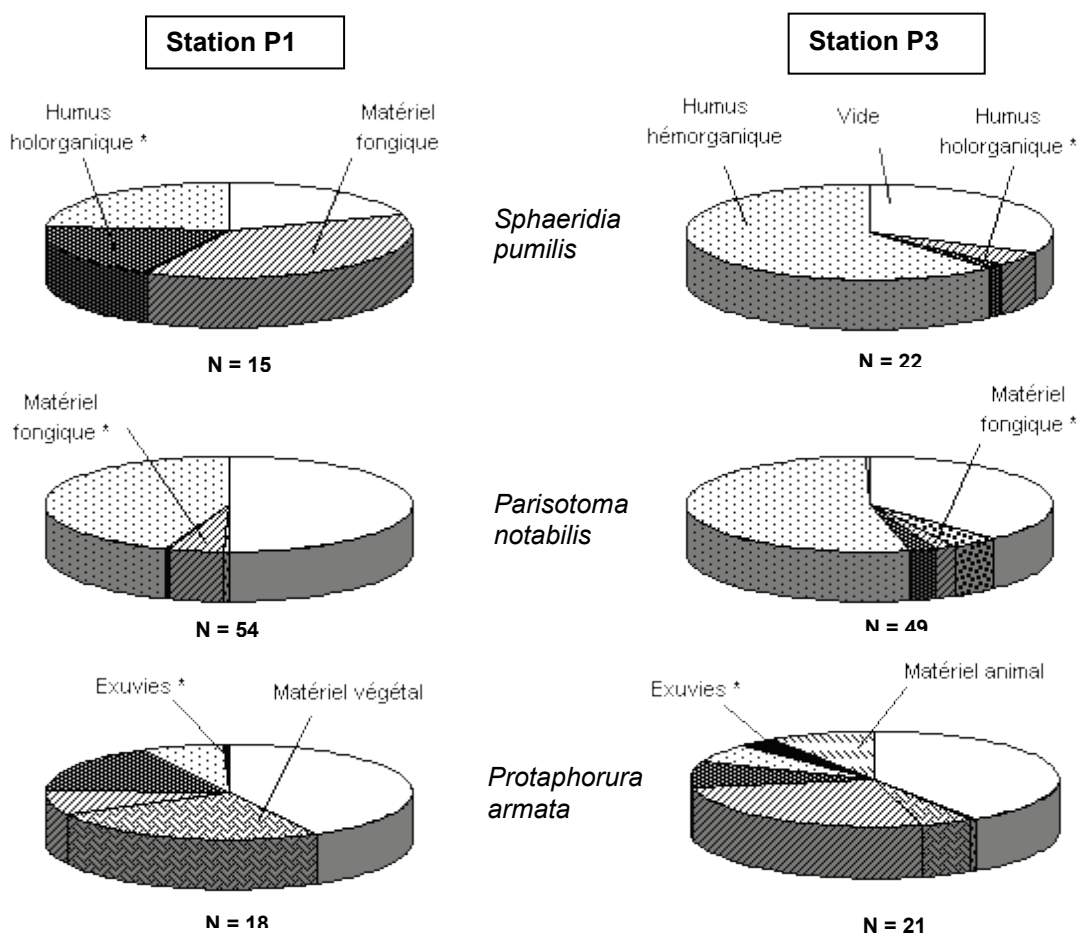


Figure 4 - Proportion des différentes catégories alimentaires observées dans l'intestin de *Sphaeridia pumilis*, *Parisotoma notabilis* et *Protaphorura armata*. Une étoile indique une différence significative entre stations dans la proportion d'une catégorie observée (test du χ^2 , $P < 0,05$)