

Écotoxicologie des lombriciens

II. — Surveillance de la contamination des milieux

Marcel B. Bouché

INRA, Laboratoire de zooécologie du sol, CEPE/CNRS,
B. P. 5051, 34033 Montpellier Cedex

RÉSUMÉ

Les produits chimiques diffusent dans notre environnement par des contaminations plus ou moins bien surveillées; l'article a trait à l'exposé critique des informations pouvant être obtenues à partir des lombriciens en terme de contamination des lombriciens, conséquences sur leurs prédateurs, cartographie des pollutions, bioaccumulation, signification des analyses de sols et lombriciens, bioéchantillonnage, bioindication et détoxification des sols. Cet ensemble de méthodes permet de conclure que les lombriciens constituent l'un des paramètres essentiels qui devrait être pris en compte dans toutes applications ou surveillances chimiques de notre environnement. Les méthodes nécessaires peuvent largement être mises en œuvre sur une base rigoureuse.

MOTS-CLÉS : Contaminant - Écotoxicologie - Indicateur biologique - Échantillonnage -
Pollution - Bioaccumulation - Sol - Plomb - Mercure - Lindane -
Annelida - Oligochaeta - Lumbricidae.

ABSTRACT

Chemicals diffuse in our environment and diffusions are more or less well evaluated. The paper deals with the critical descriptions of environmental data which could be gathered thanks to earthworms. These data are keeping with earthworm contaminations, consequences on predators, pollution mapping, bioaccumulation, soil analyse meaning, chemical earthworm concentration meaning, bio-sampling, bioindication and soil detoxication. This global methodology leads to the conclusion that earthworms are one of the major component which should be taken into account for every chemical use or chemical evaluation in our environment. The methods to make such an assessment are widely available.

KEY-WORDS: Pollutant - Ecotoxicology - Bioindicator - Sampling - Pollution - Bioaccumulation -
Soil - Lead - Mercury - Lindane - Annelida - Oligochaeta - Lumbricidae.

1. — INTRODUCTION

Dans le premier article de cette série, j'ai montré que nous disposions maintenant de moyens techniques de mesure de la toxicité des substances vis-à-vis des lombriciens d'une part, et d'autre part, qu'il est possible de mettre en œuvre une méthodologie d'appréciation des risques encourus par l'introduction de substances nouvelles entraînant une éventuelle modification du peuplement lombricien : il s'agissait de l'usage contrôlé de substances sur le milieu.

Dans le présent article, nous considérerons au contraire les substances présentes de façon diffuse et complexe dans le sol.

Diverses activités humaines s'ajoutant, se diluant, se combinant dans les processus spontanés conduisent à l'existence dans les sols d'un certain nombre de substances pouvant constituer un risque, un danger. Le plus souvent ce risque ne s'exprime pas sous forme de dégâts, de maladies ou de mortalité pour diverses raisons :

— au temps actuel, le seuil de nocivité n'est pas atteint; par contre il résultera des apports successifs de la substance à partir d'une ou plusieurs sources (exemple : mercure du sol = impuretés des engrais + fumées industrielles + boues d'épuration recyclées + apports des pesticides mercuriels, etc.);

— le seuil de nocivité est atteint mais les effets sont inobservables en raison de leur dilution dans un complexe multifactoriel rendant l'étude épidémiologique inopérante (exemple : carcinogenèse humaine, disparition du gibier...);

— la nocivité est observable mais non observée (exemple : disparition d'espèces inconnues de la science; absence ou quasi-absence de spécialiste...);

— la substance n'a pas encore diffusé vers son lieu de nocivité (exemple : très lente diffusion de la plupart des contaminants dans le sol vers les nappes phréatiques; exception : les nitrates);

— le risque, localement élevé, n'est pas observé en ce lieu.

A cette absence apparente de nocivité s'ajoute la complexité des apports et de la stabilité des substances :

— caractère diffus souvent incontrôlé des apports en un lieu; aux apports intentionnels liés aux impuretés des pesticides, engrais, additifs, déchets organiques (lisiers, ordures ménagères, boues, etc.) s'ajoutent les entrées spontanées (fumées d'usines, poussières et aérosols, produits d'érosion, apports par l'eau) et la genèse *in situ* à partir d'autres composés (produits de dégradation). Des départs se font aussi par voies spontanées (lessivage, érosion, émanations gazeuses, dégradations...).

Objectivement, la surveillance de nombreux processus d'apport et de départ est directement irréalisable. Elle est à confronter aux déversements réitérés de substances nombreuses, nouvelles, et aux effets inconnus (pas nécessairement négatifs mais pouvant être très pernicieux). Ces effets pernicieux ne sont généralement pas observés pour les raisons évoquées ci-dessus mais ont parfois été déjà notés même lorsque tout était fait pour éviter leurs observations (exemple : cas caricatural du mercure de Minabata). Ce dilemme technique a été en partie abordé : des progrès ont été effectués dans les milieux fluides (eau, air) par la mise en œuvre de procédés physico-chimiques souvent directement applicables. Dans le sol, par contre, les méthodes utilisées sont souvent grossières et le problème y est particulièrement sensible. Le sol est le réceptacle terrestre le plus exposé aux contaminations d'origine humaine. Ce réceptacle est aussi un lieu de stockage considérable et de transformation des substances susceptibles d'être reprises par la végétation, d'atteindre les animaux ou après un délai souvent important, d'être lessivées vers les eaux douces. A certains égards, on peut regarder le sol, ce réceptacle-réservoir, comme constituant une « bombe à retardement » dont les effets pernicieux n'interviendront que bien après la contamination.

Les lombriciens, en tant que première masse animale des milieux terrestres émergés et en tant que consommateurs de sol peuvent à de nombreux égards contribuer à notre surveillance des sols. Ces animaux nous fournissent une série d'informations variées qui doivent être clairement classées.

— Un état du bilan entrée-sortie de l'organisme lombricien pour chaque sub-

stance nous informe sur la *concentration* de celle-ci dans leurs tissus : ce que l'on exprime improprement par *bioaccumulation*.

— Le lombricien traitant le sol dans tous les niveaux (horizons) et micro-habitats biologiquement actifs assimile directement (ou *via* les plantes et les micro-organismes) les substances en intégrant la diversité des micro-situations temporaires : il *bioéchantillonne* ainsi une substance chimique.

— La masse lombricienne constituant la première masse animale très riche en protéines (72 % du poids sec) riche en lysine, méthionine, etc. (acides aminés indispensables) constitue l'aliment normal de nombreux oiseaux, mammifères, poissons, etc. Ils sont donc un *chaînon trophique* dans de nombreuses chaînes alimentaires dont certaines aboutissent à l'homme.

— La présence de lombriciens dans presque tous les sols se traduit par la diversité et par l'abondance absolue et relative de chacune de ses composantes (espèces, catégories écologiques) reflétant les phénomènes historiques anciens ou récents qui ont présidé à la constitution des éléments de la communauté (y compris les actions anthropiques présentes). Les lombriciens omniprésents et dominants dans leur type d'activité reflètent largement l'état du système et sont alors des *bioindicateurs* (cf. § 7).

— Dans tous les cas (concentration, bioéchantillonnage, chaîne trophique et bioindication) l'effet des substances chimiques se fait *via* un tractus intestinal malaxant intimement le sol (et une peau en étroit contact). De ce point de vue, les lombriciens sont une « *avant-garde* » animale sensible aux contaminants stockés dans les sols bien avant leur manifestation en eau douce ou en atmosphère.

2. — CONCENTRATION CHIMIQUE CORPORELLE

Les lombriciens ont une constitution corporelle globale relativement constante. Lorsque les précautions analytiques sont prises, celles-ci conduisent usuellement aux valeurs globales suivantes : eau 83 à 88 % du poids total; par rapport au poids sec, protéines : 64-77 %; lipides : 12-16 %; cendres : 4 à 7,5 %. Ces valeurs sont peu variables et indiquent une composition sans substances résistantes aux attaques chimiques simples (comme la cellulose, la lignine) et l'absence de structures mineures complexes. Jusqu'à présent les problèmes d'extraction chimique par analyse des divers contaminants que nous avons eus à connaître (métaux lourds, pesticides organo-chlorés, *PCB*) n'ont pas posé de problèmes spécifiques. Il s'agit là d'un atout majeur très important, non seulement les lombriciens présents dans presque tous les sols sont faciles à collecter par diverses méthodes (passées en revue dans BOUCHÉ & GARDNER, 1984 a) mais encore leur analyse chimique des contaminants est aisée.

Notons toutefois que le vidage du tube digestif est souvent mal effectué, ce qui augmente sensiblement la proportion de « cendres » et modifie nettement l'expression des résultats par rapport au poids sec, et interfère avec la concentration de l'endentère (= contenu du tube digestif). La dissection peut être pratiquée pour éliminer l'endentère mais celle-ci entraîne des pertes d'éléments préjudiciables à une grande précision. Un nettoyage très correct est obtenu en « alimentant » les animaux au papier-filtre dont on peut ensuite corriger l'erreur induite dans les pesées (elle est usuellement de $+ 2 \pm 0,2$ % du poids sec). Le vidage par alimentation à la silice pure a été également pratiqué pour des études fines (cas des *PCB* : TARRADELLAS *et al.*, 1982), et il semble que cela soit la meilleure méthode, les quantités sont exprimées en ppm ou ppb de la substance par rapport au poids sec tube digestif vide (*pvs*).

L'analyse corporelle globale est seule comparable car les organes pris isolément accumulent de façon variée les divers éléments.

Cette analyse corporelle globale permet de doser des éléments dans une large échelle, de l'ordre de la partie pour milliard pour les *PCB*, à plusieurs centaines de ppm pour certains métaux lourds (cadmium notamment). La dispersion des valeurs observées est généralement très inférieure à celle d'analyses de sols comparables pour des raisons logiques abordées au paragraphe 3 ; par exemple TARRADELLAS *et al.* (1982) observent sur les lombriciens, les endentères (contenus du tube digestif) et les sols des écarts à la moyenne des concentrations en *PCB* respectivement de 8,5 %, 12 % et 60 %.

De même le mode de liaison, lorsque celle-ci existe, varie à l'intérieur d'un individu. SUZUKI *et al.* (1980) ont mis en évidence trois types de protéines liant le cadmium. Au niveau du corps entier la séparation des contaminants (du complexe protéique et lipidique des lombriciens), leur analyse et le calcul de leur concentration ont toujours pu être effectués. Cette concentration corporelle est elle-même un équilibre entre les entrées (assimilations intestinales et cutanées), l'aptitude à la fixation tissulaire (cas des protéines induites par les apports de cadmium : SUZUKI *et al.*, *op. cit.*) et l'élimination (excrétion, détoxification). Ces divers processus peuvent être l'objet de régulations physiologiques de sorte que les concentrations gagneront à être considérées sur des animaux « à l'équilibre ».

3. — BIOACCUMULATION ET ANALYSE DES SOLS

C'est notamment à la suite de contaminations mortelles d'oiseaux, telle celle du merle américain (*Turdus migratorius*) que des études recherchant la cause dans les aliments de ces oiseaux ont mis en évidence la bioaccumulation lombricienne de pesticides organo-chlorés (particulièrement du *DDT* et de ses dégradats, *DDE*..., indiqués usuellement par ΣDDT). Depuis de nombreux travaux disparates ont apporté une information non négligeable sur ce point.

Une des difficultés majeures du concept de bioaccumulation réside dans le fait qu'il s'agit d'un rapport entre la *concentration du sol* et la *concentration des lombriciens*.

Si l'analyse des concentrations dans les lombriciens et l'expression des résultats ne présentent aucune difficulté il n'en est pas de même pour le sol : l'expression des concentrations dans le sol présente des limitations pour des raisons analytiques et conceptuelles.

Difficultés analytiques d'abord; elles résultent de l'extractibilité incomplète (et parfois variable en fonction de la nature des sols), et les valeurs obtenues peuvent donc être entachées d'erreurs variant avec l'art du manipulateur.

Incohérences conceptuelles ensuite; elles résultent de l'expression des résultats par rapport à une matrice support de signification totalement différente. On ne peut en aucun cas comparer une même concentration (en ppm masse sèche) dispersée intimement dans un substrat finement divisé (par exemple argiles) d'une part, et d'autre part, concentrée à la périphérie de cailloux impénétrables (graviers).

Enfin, on peut s'interroger sur l'intérêt du rapport de bioaccumulation dans l'absolu, car celui-ci ne reflète pas que le pouvoir du lombricien à concentrer la substance, mais aussi celui du sol à la libérer, c'est-à-dire la disponibilité biologique effective de la substance. A cet égard, il peut être plus intéressant de chercher à obtenir une bioaccumulation de référence à l'équilibre en conditions expérimentales (fig. 1)

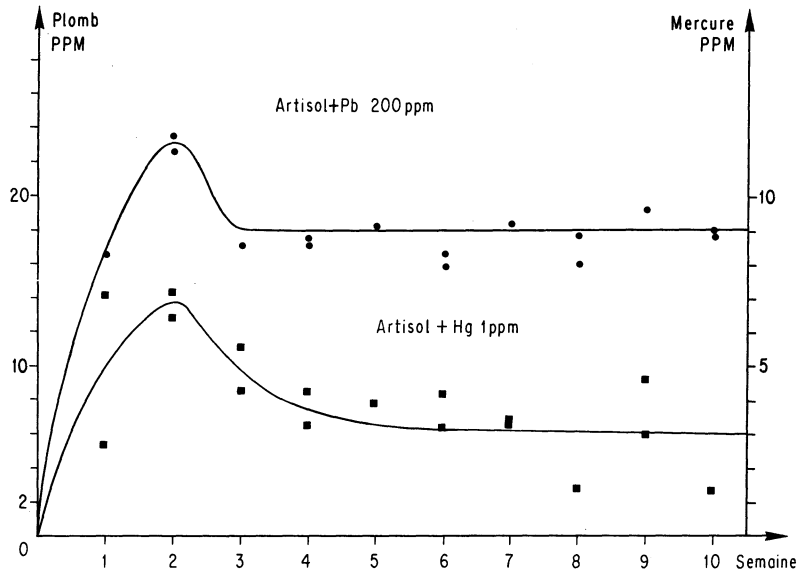


FIG. 1. — Bioaccumulation standardisée dans l'artisol sur 10 semaines pour le Mercure (rapport $\times 3$) et le Plomb (rapport 0,09).

en recherchant une position d'équilibre entre lombricien et artisol (= sol synthétique, selon le protocole de milieu décrit en Annexe du premier article de cette série).

En fait le fond du problème est le suivant : la majorité des mesures et la pratique courante veulent que l'on réfère un niveau de pollution au sol — or nous venons de voir que la mesure et l'expression des résultats font problème. Les mesures sur les lombriciens, exceptionnelles, rares, peuvent être faites avec précision et exprimées de façon comparable en concentration; elles nous indiquent par ailleurs des risques pour un « intestin traitant le sol ». Cette concentration dans les lombriciens ne doit pas être expliquée par rapport aux « concentrations » du sol mais à l'inverse « celle » du sol par rapport au lombricien. A cet égard, l'étude de MA (1982) donne un éclairage important sur la signification de la concentration des métaux lourds dans les lombriciens en regard d'une « disponibilité » possible de ces métaux dans le sol en fonction de la Capacité d'Échange Cationique (CEC) et du pH. A l'intérieur d'une zone donnée toutefois une certaine relation sol/lombricien peut être établie comme cela a été fait à Seveso (MARTINUCCI *et al.*, 1983). Rappelons aussi que la partie du sol prospectée par les lombriciens n'est pas quelconque, mais s'adresse à l'échelle millimétrique à la partie biologiquement active du sol à la différence des prises de sol pour analyses que nous effectuons. L'établissement d'un rapport de bioaccumulation des concentrations sol complexe/lombriciens n'a ici aucun sens, les caractéristiques des endentères étant fort différentes de celles du sol environnant (BOUCHÉ *et al.*, 1983), ce qui se reflète également dans les contaminants (TARRADELLAS *et al.*, 1982). En conclusion plutôt que d'établir des rapports de bioaccumulation basés sur une donnée (analyse de sol) de fiabilité relative, très dispersée et non relative aux lombriciens, il est de loin préférable de s'en tenir à l'expression des contaminations à travers l'indice que constitue la concentration lombricienne tissulaire globale.

4. — BIOÉCHANTILLONNAGE ET DISPONIBILITÉ BIOLOGIQUE D'UNE SUBSTANCE

Les lombriciens s'alimentent de matières organiques mortes sous la forme de litière, de débris racinaires, de matières fragmentées ou très décomposées. Tous ces aliments sont le siège de colonies microbiennes et sont souvent étroitement mêlés à la matière minérale. Par exemple, nous avons pu montrer (BOUCHÉ *et al.*, 1983) que le lombricien anécique *Nicodrilus velox* constitue son ingestat au printemps avec 20 % de feuilles de litière, et respectivement 14 %, 9,5 % et 2,5 % des horizons A1, A2 et B auxquels il ajoute un mélange d'anciens fèces (54 % !). Le recyclage de fèces après incubation microbienne est ici très net... et a un caractère général.

Les lombriciens exploitent donc les zones d'activité biologique des sols; leurs propriétés intestinales sont celles des animaux et ne sont pas liées aux processus osmotiques et au système aqueux ouvert régulant l'absorption végétale (évapotranspiration). Ils ne sont pas comme les plantes un réceptacle aérien interceptant constamment les aérosols en fonction de propriétés épidermiques (cireuses) particulières mais au contraire n'entretiennent qu'un contact édaphique intime. Enfin, ils ne peuvent extraire les substances chimiques fortement liées à la matrice du sol et indisponibles tant pour eux que pour les autres éléments biologiques (plantes, micro-organismes...) qui les nourrissent : leur échantillonnage porte sur la fraction biologiquement importante des contaminants.

Il y a une certaine variabilité spatiale des concentrations chimiques disponibles biologiquement. Si l'ensemble du peuplement (toutes les espèces) explore la zone racinaire et microbienne de façon comparable à celle de ces organes et organismes endogés, les diverses espèces lombriciennes prises isolément se partagent cette niche globale. Même si la mobilité individuelle des vers de terre est limitée verticalement et horizontalement entre quelques dizaines de centimètres et 1 ou 2 m, cette intégration spatiale est fort intéressante comparativement à la taille d'une prise de sol. La signification de la distribution en profondeur de l'échantillonnage ne se pose plus : c'est le profil qui est observé *via* des lombriciens.

Cette intégration spatiale se double d'une intégration temporelle. La vie d'un lombricien est, pour la partie dominante de la biomasse (capturable par tri manuel) de plusieurs mois à plusieurs années. Au cours de cette période, un individu intègre les variations relativement brèves de disponibilité biologique des substances, variation due aux aléas climatiques notamment, de sorte que les observations au niveau des tissus lombriciens tamponnent en partie les écarts intempestifs des échantillons.

Ces diverses propriétés :

- a) exploitation de la fraction biologiquement fonctionnelle de substances du sol,
- b) et du sol seulement,
- c) interception purement métabolique (et non physique comme les plantes),
- d) mode d'assimilation comparable à celui des animaux,
- e) contact intime sol/lombricien (cutané et intestinal),
- f) omniprésence,
- g) facilité de capture et de manipulation,
- h) analyse chimique réalisable (extraction et caractérisation),

- i) expression des concentrations non ambiguës,
- i) intégration spatiale temporelle des paramètres standards,

font des lombriciens un moyen privilégié d'observer l'état de la contamination chimique du sol.

Les diverses espèces, attribuables à des catégories écologiques spécialisées, se partageant une fonction et une niche dans le sol, apportent une information encore plus précise sur le mode de dispersion et de disponibilité des éléments chimiques tandis que le peuplement (somme des espèces) nous donne une image globale de la zone explorée par la vie. Seules des aires très limitées, glacées ou désertiques ne relèvent pas de cette technique d'échantillonnage en raison de l'absence de ces animaux. On peut ainsi considérer que les lombriciens échantillonnent pour nous dans le sol et nous aident à obtenir une image plus objective de ce lieu de réception-stockage des principaux contaminants. Ceci peut se pratiquer en mettant en évidence des espèces chimiques transformées par l'activité microbienne (méthylation du mercure : BULL *et al.*, 1977) ou des micro-contaminants (polychlorobiphénols : TARRADELLAS *et al.*, 1982). D'une façon générale, le bioéchantillonnage devrait se prêter à la localisation et à la cartographie des contaminations effectivement dangereuses (biodisponibles). Par exemple, MA (1983) montre la décroissance de la concentration du cadmium tissulaire d'un lombricien à partir d'une fonderie de zinc (décroissance d'environ 150 ppm à 30 ppm sur 20 km). Soulignons enfin la sensibilité de la méthode de cartographie des contaminants biodisponibles : HEIDET (1981) observe, dans des sols ayant subi une contamination industrielle, et dont l'analyse chimique ne révèle que des traces de cadmium, ... 17 à 176 ppm de cet élément.

5. — CHAINES TROPHIQUES

La connaissance de la concentration naturelle d'un contaminant chimique dans les lombriciens peut, comme nous venons de le voir, nous donner une information sur la disponibilité biologique de l'élément et sur sa répartition spatiale... mais cette connaissance peut également être utilisée comme variable explicative de la contamination d'autres animaux, particulièrement de vertébrés. C'est historiquement en raison du nombre proportionnellement très élevé des chercheurs s'intéressant aux vertébrés, que la plupart du temps, les observations de contaminations écotoxiques ont été observées (oiseaux, mammifères dont gibiers, poissons). Ces contaminations ont souvent été attribuées à des sources alimentaires dans lesquelles les lombriciens ont été étudiés *lorsque cela était évident* (cas du merle). Dans de nombreux cas toutefois, l'importance alimentaire des lombriciens dans les régimes est ignorée ou sous-estimée. Qui croirait que dans son séjour en Suisse (Vaud) la mouette rieuse se nourrit de 93 % de lombriciens ? (CUENDET, 1979). Que le renard a un comportement spécifique de chasse de lombriciens (MACDONALD, 1983) ? Que les zootechniciens découvrent que le porc y trouve normalement sa source protéique (ROSE & WILLIAM, *in litt.*) alors que les suidés ont un groin spécialisé dans le fouissage du sol.

En fait, la connaissance des sources alimentaires réelles devient absolument nécessaire et nous avons élaboré une méthode de quantification des lombriciens dans les régimes alimentaires des prédateurs (BOUCHÉ *et al.*, 1984 *b*) permettant d'établir la contribution du chaînon trophique lombricien dans la circulation des contaminants. Le modèle REAL (BOUCHÉ, 1980) se prête ici à une simulation de la « remise en circuit » des contaminants du sol vers la vie épigée.

6. — DÉTOXICATION DES SOLS

Les lombriciens « traitent » environ 300 tonnes poids sec/ha/an de sol par tonne poids vif de biomasse. La biomasse « normale » variant de 500 kg (terrain cultivé) à 2 et même 4 tonnes/ha (prairies), les processus de dégradation des contaminants au cours de ces processus ne sont pas négligeables.

Cet aspect de leur rôle est d'autant plus important que ces tonnes de sol traitées et retraitées (puisque réingérées) ne sont pas quelconques mais correspondent aux microhabitats à activité biologique, donc, en matière de risques, aux « zones sensibles ».

Aucune étude spécialement orientée n'a été consacrée à ce sujet. Nous ignorons notamment quelle est la biodégradation de produits les plus persistants induite au cours du transit intestinal. Nous avons toutefois une information plus précise pour la dégradation induite dans le métabolisme propre du ver c'est-à-dire après assimilation. STENERSEN & ØIEN (1981) donnent une brève bibliographie des travaux ayant envisagé le rôle des lombriciens dans la détoxification et considèrent le rôle de la glutathion-S-transférase, quantitativement importante dans ces processus.

En recherchant un équilibre du taux de bioaccumulation du lindane dans les lombriciens, connus pour leur aptitude à stocker les pesticides organo-chlorés, nous avons eu la surprise en conditions contrôlées (artisol) de constater une déconcentration rapide suivant la spectaculaire accumulation initiale (fig. 2). Cette dynamique s'apparente fort à un processus de détoxification métabolique induit après l'assimilation initiale du lindane. Ce point est important car il pourrait expliquer pour partie la

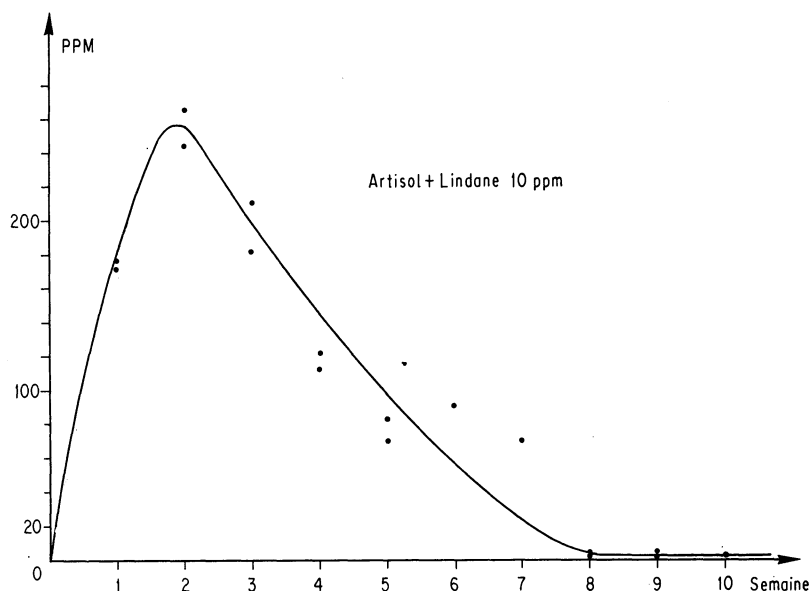


FIG. 2. — Cinétique de la bioaccumulation apparente du Lindane dans *Eisenia fetida andrei* P. 1756, montrant une très probable détoxification après une accumulation initiale $\times 26$, il y a équilibre à environ $\times 0,5$.

résistance des lombriciens aux doses élevées de lindane mais aussi souligner leur contribution à la dégradation des pesticides dans les zones de sol biologiquement actives. Le lindane a été mis en cause maintes fois et notamment récemment (PICOT, 1983). Ses mouvements dans les sols sont relativement limités comme l'indique l'étude purement physico-chimique de SNEGAROFF & JAMET (1976), et les risques de reprise à partir de la partie biologiquement active du sol pourraient être réduits par la consommation lombricienne de la zone rhizosphérique des sols. Au cours du transit intestinal, il est probable que la désorption des argiles, l'assimilation puis la détoxification interviennent normalement. On voit ici l'intérêt qu'il y aurait à étudier ces processus écotoxicologiques... dans des terrains où l'éradication lombricienne par d'autres pesticides n'a pas encore eu lieu.

7. — INDICATEURS BIOLOGIQUES

Je n'évoquerai ici brièvement que la valeur bioindicatrice des peuplements lombriciens en terme de fertilité (souvent directement reflétée par le niveau de leur biomasse), en terme de partage des ressources (reflétée par les catégories écologiques), en terme de définition plus précise des conditions écologiques prévalant dans le milieu (reflétée par les espèces). Constamment accumulée depuis 1968, une information importante des relations espèces-milieu, interprétée d'abord en 1970 (BOUCHÉ, 1972), constitue un capital en continuelles constitution et valorisation. L'étude des peuplements lombriciens peut donc refléter :

- une toxicité très aiguë ayant entraîné l'éradication des lombriciens,
- un déséquilibre profond résultant de la somme de toxicité + malpratiques répétées. A cet égard, la comparaison entre la situation observée dans un champ et celle qui devrait normalement exister (cette normale pourrait être décrite d'après les caractéristiques des sols et du climat) donne une excellente indication de la dégradation biologique des sols de cultures,
- une contamination organique putride (lisiers, épuration organique insuffisante) entraînant une modification caractéristique des communautés en raison de :
 - a) l'anaérobiose fréquente,
 - b) l'accumulation organique,
- un effet favorable de certains apports d'engrais, qui, en accroissant la production globale du système végétal, favorise le peuplement lombricien (particulièrement anécique),
- un effet des radiations artificielles ou naturelles à la fois sur le niveau des populations et sur l'état morphologique (physiologique) des tissus cutanés et intestinaux soumis à ces radiations (KRIVOLUTSKY, 1980).

L'état d'un peuplement, hors le problème écotoxicologique, reflète en effet de nombreux phénomènes historiques, y compris les effets de la gestion humaine. Cette « bioindication » qui sort du cadre de cet article peut toutefois être utilisée dans le cadre d'une interprétation écotoxicologique. L'étude quantitative ou semi-quantitative du peuplement lombricien associée à celle de l'analyse corporelle précise peut donc contribuer de façon importante à la surveillance des contaminations. Elle s'intègre alors remarquablement bien à des demandes de bioindication globale du type « observatoire du milieu », le lombricien étant par le reflet qu'il en donne, un « observatoire du sol ».

8. — CONCLUSION

Les études de toxicologie classiques semblent, proportionnellement aux problèmes qu'elles couvrent, très peu développées. La recherche écologique *appliquée scientifiquement* n'ayant qu'un développement symbolique, rien d'étonnant que l'écotoxicologie soit à un stade embryonnaire. Malgré le fait que la première synthèse sur le sujet fût française (RAMADE, 1977), les recherches restent largement à programmer en France. Au plan mondial, les seules études consistantes sont conduites dans le milieu aquatique qui a fourni souvent des exemples spectaculaires y compris dramatiques alors que l'homme induit la contamination à partir de la terre ferme et souvent *via* le sol. Les lombriciens, principaux commensaux de l'homme, sont les premiers animaux en importance exposés à ses agissements et les conséquences des perturbations de leur peuplement sont économiquement et écologiquement considérables. Les lombriciens, omniprésents et d'analyse facile, constituent un outil de choix pour surveiller l'état de notre environnement et étudier la contamination édaphique si difficilement accessible — ils sont peut-être même un outil de détoxification. Les outils techniques et les méthodes d'interprétation ont pu être développés et sont aujourd'hui utilisables, seule leur mise en œuvre fait généralement défaut.

REMERCIEMENTS

Les recherches d'écotoxicologie ont été pratiquées avec des moyens momentanés et doivent beaucoup à des étudiants, stagiaires ou techniciens qui ont réalisé les expériences, à la contribution de laboratoires maîtrisant les techniques d'analyses chimiques et aux discussions fructueuses de tous. Les deux articles de cette série reflètent cette situation et coopération.

Mes remerciements s'adressent plus particulièrement à Mme le Professeur AUTISSIER (pharmacie, Dijon), Mme le Professeur OLSON (ENITA, Dijon), M. CABRIDENC (IRCHA, Vert-le-Petit), M. JUSTE (INRA, Bordeaux), à l'équipe du Génie de l'environnement : MM. TARRADELLAS et DIERCXSENS (École Polytechnique Fédérale de Lausanne), aux collègues de l'Université Catholique de Louvain-la-Neuve (MM. LEBRUN, DE METDS...) et de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'État de Gembloux (GASPAR, HENNUY...) ainsi qu'à tous ceux qui sont intervenus dans le cadre du laboratoire de zooécologie du sol (Mlle R. ALIAGA, MM. J. F. CANAUD, C. COURVOISIER, J. C. HEIDET, S. JAY, L. FAYOLLE, G. FERRIÈRE, C. LAURIAUT, P. SOTO). Ces recherches ont bénéficié d'aides contractuelles de la Commission des Communautés Européennes, du Ministère de l'Environnement et de l'Office National de la Chasse.

RÉFÉRENCES

- BOUCHÉ M. B., 1972. — Lombriciens de France. Écologie et systématique. *Ann. zool. Écol. anim.*, n° spécial, 72-2, 1-671.
- BOUCHÉ M. B., 1980. — Objectifs, compartimentation et faisabilité du modèle REAL (Rôle Écologique et Agronomique des Lombriciens). *Pedobiologia*, 20, 3, 197-211.
- BOUCHÉ M. B., RAFIDISON Z. & TOUTAIN F., 1983. — Étude de l'alimentation et du brassage pédo-intestinal du lombricien *Nicodrilus velox* (Annelida, Lumbricidae) par l'analyse élémentaire. *Rev. écol. biol. sol.*, 20, 1, 49-75.
- BOUCHÉ M. B. & GARDNER R. H., 1984 a. — Earthworm functions (Fonction des lombriciens). VII. Population estimation techniques. *Rev. écol. biol. sol.*, 21, 1, 37-63.
- BOUCHÉ M. B., FAYOLLE L. & RICHARD Ph., 1984 b. — Mesure de l'importance des lombriciens dans le régime alimentaire de leurs prédateurs. *Gibier, faune sauvage* 1, 57-71.
- BULL K. R., ROBERTS R. D. *et al.*, 1977. — Mercury concentrations in soil grass earthworms and small mammals near an industrial emission source. *Environm. Pollut.*, 12, 2, 135-140.

- CUENDET G., 1979. — Étude du comportement alimentaire de la mouette rieuse (*Larus ribibundus* L.) et de son influence sur les peuplements lombriciens. Thèse doct. Fac. sci. Univ. Lausanne (Suisse) 1-111.
- HEIDET J. C. 1981. — Bioaccumulation et transfert de contaminants par les lombriciens. Mémoire de fin d'études ENITA, Quétigny, septembre 1981, 1-75.
- KRIVOLUTSKY D. A., 1980. — The effect of an increased Ra content in the soil on soil animals. In: D. L. DINDAL, ed., *Soil biology as related to land use practices*. Proc. VIIth Int. coll. on soil zool., Syracuse (NY), 29 juillet-3 août 1980, 391-396.
- MA W., 1982. — The influence of soil properties and worm-related factors on the concentration of heavy metals in earthworms. *Pedobiologia*, **24**, 109-119.
- MA W., 1983. — Biomonitoring of soil pollution: ecotoxicological studies of the effect of soil-borne heavy metals on lumbricid earthworms. *Res. instit. natur. manag., ann. rep.*, 1982, 83-97.
- MACDONALD D. W., 1983. — Predation on earthworms by terrestrial vertebrates. In: J. E. SATCHELL, ed., *Earthworm ecology from Darwin to vermiculture*. Chapman and Hall, London, 393-414.
- MARTINUCCI G. B., CRESPI P., OMODEO P., OSELLA G. & TRALDI G., 1983. — Earthworms and TCDD (2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin) in Seveso. In: J. E. SATCHELL, ed., *Earthworm ecology from Darwin to vermiculture*. Chapman and Hall, London, 275-296.
- PICOT A., 1983. — Le lindane : un insecticide en sursis. *La Recherche*, **150**, 1584-1587.
- RAMADE F., 1977. — *Écotoxicologie*. Coll. d'Écologie 9. Ed. Masson, Paris, 1-201.
- SNEGAROFF N. & P. JAMET, 1976. — Résidus de pesticides dans les eaux de drainage de cases lysimétriques. *Phytiatrie-phytopharmacie*, **25**, 223-244.
- STENERSEN J. & ØIEN N., 1981. — Glutathione S-transferase in earthworms (Lumbricidae) substrate specificity, tissue and species distribution and molecular weight. *Comp. biochem. physiol.*, **69 C**, 243-252.
- SUZUKI K. T., YAMAMURA M. & MORI T., 1980. — Cadmium binding proteins induced in the earthworm. *Arch. environm. contamin. toxicol.*, **9**, 4, 415-424.
- TARRADELLAS J., DIERCXSENS P. & BOUCHÉ M. B., 1982. — Methods of extraction and analysis of PCBs from earthworms. *Int. J. environm. analyt. chemistry*, **13**, 55-67.

