DOCUMENTS PEDOZOOLOGIQUES

Tome 1 - Fascicule 1 - Mai 1979

SOMMAIRE

M.B. BOUCHE - Conséquences de l'apport de contaminants sur les lombriciens. I. Problèmes en cause et méthodologie..... 2

K. HADJIBIROS, L. FAYOLLE et M.B. BOUCHE - Conséquences de l'apport de contaminants sur les lombriciens. II. Estimation statistique des risques..... 24

L. FAYOLLE - Conséquences de l'apport de contaminants sur les lombriciens. III. Essais de laboratoire..... 34

M.B. BOUCHE et J. STAWIECKI - Séparation de la matière organique libre du sol : description d'un dispositif évitant les pertes d'éléments.... 66

G. FERRIERE - Etude micromorphologique des végétaux de la prairie de Cîteaux (Côte-d'Or), France..... 74

M.B. BOUCHE - Observations sur les lombriciens (5ème série). XII. Lumbricidae (Oligochaeta) du Guipúzcoa..... 90

CONTENTS

M.B. BOUCHE - Consequences of the impact of pollutants on earthworms. I. A critical review and methodology..... 2

K. HADJIBIROS, L. FAYOLLE et M.B. BOUCHE - Consequences of the impact of pollutants on earthworms. II. Statistical estimation of risks..... 24

L. FAYOLLE - Consequences of the impact of pollutants on earthworms. III. Laboratory tests..... 34

M.B. BOUCHE et J. STAWIECKI - Separation of free organic matter from soil : description of a method preventing component losses..... 66

G. FERRIERE - Micromorphologic study of grassland plants from Cîteaux (Côte-d'Or), France..... 74

M.B. BOUCHE - Observations on earthworms (serial number 5). XII. Lumbricidae (Oligochaeta) from Guipúzcoa..... 90

ISSN : 0180-9555 Doc. pédozool., 1, 1, 2-22 / Mai 1979

CONSEQUENCES DE L'APPORT DE CONTAMINANTS SUR LES LOMBRICIENS

I. PROBLEMES EN CAUSE ET METHODOLOGIE

par Marcel B. BOUCHE[1]

Mots-clés proposés : contaminants, polluants, pesticides, métaux lourds, évaluations technologiques.

Index taxonomique : Annelida, Oligochaeta, Megadrili.

Résumé : Les conséquences, au niveau des lombriciens, de la contamination de nos milieux par les produits chimiques (métaux lourds, pesticides, etc.) sont considérables en raison de l'importance économique et écologique de ces animaux. Notre méthodologie, actuellement très primitive, peut être fondée sur une démarche logique privilégiant l'étude des processus essentiels (létalité, bioaccumulation, palatabilité) au laboratoire et l'observation des peuplements et de leurs activités dans des conditions normalisables aux champs. L'évaluation technologique de ces contaminations, aujourd'hui rare et subjective, pourrait être fortement améliorée par une correction de nos hypothèses et techniques d'études.

CONSEQUENCES OF THE IMPACT OF POLLUTANTS ON EARTHWORMS

I. A CRITICAL REVIEW AND METHODOLOGY

by Marcel B. BOUCHE[1]

Suggested key-words : pollutants, pesticides, heavy metals, earthworms technological assessments.

Taxonomic index : (see above).

Summary : The study of effects of chemical pollutants (heavy metals, pesticides, etc.) in our environment, with special reference to earthworms, is an important need because of the ecological and agronomic contribution of these animals. Our technology, today very primitive, must be based on a logical approach founded on laboratory studies of some key processes (lethality, bioaccumulation, palatability) and on observations of earthworm populations and their activity under normal field conditions. Technical assesment of pollution effects, today scarce and subjective, would be greatly improved by greater precision in the formulation of hypotheses and use of correct methods of study.

---

(1) Adresse : Laboratoire de zooécologie du sol, I.N.R.A., 17, rue Sully F-21034-DIJON (France)

I. INTRODUCTION

Un contaminant est un produit chimique, ou un complexe de produits chimiques, libéré dans l'environnement et diffusant dans celui-ci. En contaminant notre environnement, il peut affecter soit directement l'homme, soit indirectement notre économie, notre cadre de vie ou l'équilibre des systèmes biologiques de notre entour.

Les contaminants appartiennent à des catégories d'origines très variées : polluants relâchés par les effluents industriels (fumées, etc.), urbains (eaux usées, boues d'épuration, fumée de pyrolyse d'ordures, etc.) ou agricoles (pesticides, engrais, déchets d'élevages, etc.).

Quelle que soit leur origine, ces contaminants agissent sur les lombriciens selon deux mécanismes :

- modification des niveaux, structures et activités des peuplements,
- s'il y a survie, bioaccumulation éventuelle du contaminant dans le chaînon lombricien.

Les contaminants sont la résultante des activités humaines et leurs conséquences ne sont pas nécessairement néfastes. Il faut être en situation d'apprécier aussi correctement que possible le bilan complet de leurs propriétés. En d'autres termes, il faut pouvoir apprécier, dans l'adoption, le maintien ou l'élimination de processus technologiques, les conséquences des contaminants liés à ces processus.

Considérer les lombriciens, dans l'établissement de ce bilan, peut paraître au profane une préoccupation de spécialiste borné, ces vers n'ayant "aucune importance". En fait, il s'agit de l'une des trois biomasses vivantes majeures de nos écosystèmes, dont les rôles sont aussi considérables que variés et dont les problèmes, relatifs aux contaminants, doivent être abordés vigoureusement et avec sérieux. Pour ceci il faut connaître à grands traits les lombriciens.

1.1 Importance des lombriciens

J'ai déjà présenté l'importance des modestes vers de terre (Bouché, 1974 et 1975 a), importance signalée très tôt par Darwin (1881) mais qui a été occultée en raison de la difficulté de leur étude (nécessairement multidisciplinaire), de leur discrétion (vie souterraine et activité surtout nocturne), de leur "inesthétique" (aspect gluant, serpentiforme) et de leur "marginalité" scientifique (rien à voir avec les courants de la mammalogie, de l'entomologie ou de l'ornithologie !).

Ce sont ces "raisons" qui ont conduit à la situation actuelle : un groupe majeur de nos écosystèmes pratiquement inétudié. Si les deux grandes autres biomasses, végétale et microbienne, ont leur science propre, réunissant de nombreux chercheurs, la géodrilologie est pratiquée par au plus quelques dizaines de scientifiques dans le monde. Mais les écosystèmes fonctionnent avec les lombriciens, mais les contaminants diffusent et agissent sur ce composant majeur : le retard des recherches devient injustifiable !

Présentons donc succinctement les lombriciens. D'abord leur biomasse : elle est normalement comprise entre 1 et 3 T/ha en poids frais, allant en s'annulant dans les sols salés, desséchés ou glacés (déserts) et pouvant atteindre 4 T/ha et peut-être même plus dans des milieux fertiles. Cette biomasse représente de 60 à 80 % de la zoomasse, elle est du même ordre que celle des micro-organismes, entre le dixième et le vingtième de la biomasse végétale active.

Comme les plantes et les micro-organismes, leur activité est constante dans un écosystème, ils s'y maintiennent toute l'année et y jouent un rôle fondamental. Saprophages, ils ingèrent l'essentiel de la production végétale, la brassent dans leur tube digestif et la conditionnent d'une façon globalement favorable à l'activité microbienne. En perforant de nombreuses galeries (au moins 4 000 km/ha, représentant 5 m^2 de surface développée par m^2) ils permettent un microdrainage atteignant couramment 1 à 2 m (parfois 6 m) de profondeur et favorisent le développement de la vie dans le sol. Cette vie endogée bénéficie de leur action par la pénétration de l'énergie (enfouissement des litières), par les échanges de fluides (gaz, eau, etc.). Les micro-organismes, racines et multiples animaux du sol s'installent dans ces galeries : la vie du sol est ainsi essentiellement digitée grâce au système de galeries. L'importance de l'activité physiologique des lombriciens n'est assurément pas moindre ; cette énorme biomasse est le siège de multiples échanges... malheureusement encore mal quantifiés. Cette importance n'est pas ponctuelle, elle concerne pratiquement tous les territoires tempérés (surtout du vieux monde où les lombriciens sont particulièrement "performants"). Si, en France, environ 16 millions d'hectares sont annuellement peu ou prou labourés mécaniquement, ce sont 50 millions d'hectares qui bénéficient du travail biologique des lombriciens. Plus un écosystème est "riche", biologiquement actif et ayant une biomasse globale élevée, plus les lombriciens sont nombreux et importants ; plus une zone est pauvre, plus le peuplement est réduit : rien d'étonnant puisqu'il s'agit d'un élément constitutif majeur de la biomasse totale.

L'agriculture intensive et les villes se sont surtout implantées dans les zones fertiles. Globalement observées sur une carte à petite échelle les fortes densités humaines coïncident généralement avec ces zones fertiles où les peuplements lombriciens sont normalement élevés. Les contaminations résultant de nos technologies touchent donc indubitablement l'essentiel de ces animaux : tenter un bilan des contaminations oblige à considérer les lombriciens.

Comme signalé plus haut, ce bilan doit tenir compte de l'action du contaminant sur le peuplement et son activité, et, par ailleurs, du transit de celui-ci dans ce peuplement ; nous allons successivement aborder ces deux aspects.

1.2 Effet retard et conséquences insidieuses

Les lombriciens dans les écosystèmes (agrosystèmes) ont une action fondamentale dont les conséquences ne sont pas instantanément perceptibles : selon le délai d'observation, la conclusion peut être différente. J'ai déjà illustré ce propos (Bouché, 1975 b) dans un article concernant les pesticides, j'en reprendrai schématiquement les termes sans revenir sur les travaux démonstratifs.

Considérons un pesticide géodrilicide (= destructeur de lombriciens) et plaçons-nous dans le cas d'une application conduisant à une destruction totale du peuplement lombricien.

L'effet à court terme, usuellement seul observé (essai aux champs sur une culture annuelle), peut être positif : la biomasse lombricienne détruite libère une masse considérable d'azote ayant un effet "coup de fouet" sur la végétation ; les acides aminés (et autres substances ?) brutalement disponibles favorisent une activation de la microflore stimulant le cycle des éléments biogènes. Beaucoup d'effets "positifs" de rendements agronomiques "accrus", pourraient trouver là une de leurs origines. Le système des essais classiques au terrain mettant en oeuvre des molécules souvent complexes dans un système complexe, mais n'observant que quelques paramètres (la cible, le rendement), ignorant entre autres les lombriciens interdit des conclusions scientifiquement (= logiquement) fondées.

L'effet à moyen terme a été plus rarement observé, car on sort du cadre des cultures annuelles ; toutefois, l'erradication des lombriciens entraîne une accumulation de la litière à la surface du sol, notamment dans les vergers. Les formes de résistance des parasites et singulièrement des inoculums printaniers normalement fortement, voire quasi-totalement, détruits par les lombriciens anéciques (consommant et enfouissant la litière) sont ainsi renforcées. Outre les pertes agronomiques résultant d'une décomposition partiellement bloquée de la nécromasse, les géodrilicides favorisent les parasites végétaux. Nous arrivons alors au paradoxe de la commercialisation d'un pesticide, insidieusement (parce que non étudié !) géodrilicide, qui favorise les parasites !

L'effet à long terme n'a été que partiellement démontré, car peu d'études sérieuses sur un laps de temps suffisant (au moins 10 ans !) ont été conduites. Toutefois, la connaissance que nous avons des mécanismes de cet effet existe. Il faut d'abord indiquer qu'une population lombricienne, totalement détruite, ne pourra se reconstituer que s'il y a migration latérale, laquelle est très lente (quelques mètres par an), ce qui a de lourdes conséquences pour les applications de produits géodrilicides en grandes parcelles. Souvent, la répétition des traitements dans le temps (cas des vergers "propres" entraîne une destruction totale du peuplement lombricien. (Heureusement, dans beaucoup de cas, la destruction n'est que partielle et le peuplement peut récupérer, lentement toutefois en raison de la démographie modérée des espèces agronomiquement importantes). Les effets à long terme sont essentiellement ceux associés à la disparition du labour-draînage biologique. Longtemps après l'élimination des vers de terre, les sols conservent les pédozoostructures (galeries, structures grumeleuses) résultant de leur action passée. Toutefois, plus un sol est fragile, soumis à des actions aratoires intenses, et plus tôt apparaissent des semelles de labour qui ne sont plus perforées par les lombriciens anéciques. Le remède habituel est alors la compensation de cette carence en lombriciens (non perçue par l'agronome) par des investissements mécaniques ou chimiques croissants et coûteux. Cette déstructuration du sol a des conséquences ruineuses... que l'on observe de plus en plus fréquemment sans que l'on puisse la rattacher exclusivement au facteur lombricien. Ce sont des difficultés de végétation racinaire, des asphyxies ou toxicités temporaires (réduction des nitrates en nitrites), des sols sans portance suffisante pour les machines agricoles, la battance, etc. Il est probable que certaines spéculations agricoles passent en dessous du seuil de rentabilité parce qu'un contaminant (ou une série d'actions équivalentes) a dessimé le peuplement lombricien depuis de nombreuses années.

Ces conséquences insidieuses et différées échappent actuellement au bilan socio-économique des contaminants.

1.3 Bioaccumulation

Selon leur nature ou leur état de liaison avec le sol, les contaminants peuvent être assimilés par les lombriciens et plus ou moins bioaccumulés. Comme les lombriciens constituent la première biomasse de chair disponible dans un écosystème, de nombreux animaux inscrivent ce mets dans leur régime. Les lombriciens contenant 72 % de leur poids sec en protéines riches en lysine et possédant une gamme variée d'acides gras rentrent de façon plus ou moins privilégiée dans ces régimes. L'abaissement du niveau des peuplements, dû aux effets létaux des contaminants, va donc priver toute une faune de l'une de ses proies, parfois exclusive.

La contamination des vers de terre a un certain nombre de conséquences :
- pour la protection de notre environnement : de nombreux prédateurs sauvages peuvent être intoxiqués (sans conséquences visibles dûes à l'absence d'études). Ceci a pu être montré, par exemple, dans le cas du merle migrateur intoxiqué par le DDT via les vers de terre (Hunt, 1965).
- pour l'homme : cette contamination contribue à la raréfaction et à la pollution du gibier ou des poissons dulçaquicoles.

N'oublions pas que certaines espèces sont relativement spécialisées dans la consommation de lombriciens (bécasse, sanglier) et que d'autres ont probablement besoin de cette proie pour faire la "soudure" en périodes fraîches et humides (= périodes d'activité lombricienne), tels les poissons qui reçoivent en rivière une abondante nourriture d'insectes en printemps-été et de lombriciens le reste de l'année.

Surveiller au niveau des lombriciens les principaux contaminants (métaux lourds, pesticides et leurs dérivés) est donc une nécessité évidente. Il serait normal que la concentration des produits présentant un risque soit systématiquement contrôlée dans la nature au niveau de la première biomasse animale. Il n'en est malheureusement rien. Le contrôle constituerait, par ailleurs, un moyen d'estimer le niveau de contamination des milieux (voir bioéchantillonnage, § 2.3.1.2).

II. OBJECTIFS DES RECHERCHES ET METHODOLOGIE

2.1 Complexité et moyens

Nous venons de montrer qu'il était difficile d'ignorer le paramètre lombricien dans l'étude des contaminations de milieux terrestres. Peut-on aborder cette étude et comment ? Avant d'esquisser une méthodologie, il est nécessaire de bien rappeler les objectifs : nous voulons connaître, dans la "nature", le devenir, le transit et les conséquences des contaminants atteignant le peuplement lombricien. A partir de cette connaissance, nous souhaitons être en position de juger correctement ces conséquences.

Les relations lombriciens/milieux sont extrêmement complexes. On peut certes, réduire à deux constats (effets sur le peuplement et bioaccumulation) l'étude à leur niveau. Mais les mécanismes "en amont" conditionnant ces deux constats sont très variés, notamment par le mode d'apport du contaminant, son stockage, sa rétention , son évolution dans le sol, son "reconditionnement" par les plantes ou micro-organismes, etc. Le devenir du contaminant "en aval" n'est pas plus simple, restitutions au sol (sous quelle forme ?), transferts à de multiples prédateurs plus ou moins étroitement inféodés aux lombriciens, plus ou moins sensibles, agissant à des périodes différentes, etc.

Les relations lombriciens/milieux sont extrêmement variées, les lombriciens étant pratiquement présents dans tous les écosystèmes spontanés ou plus ou moins intensifiés ; si leur rôle est pratiquement toujours déterminant, les mécanismes relationnels varient considérablement entre types forestiers, bords de rivières, prairies, types de sols, etc.

Ces variété et complexicité sont encore accrues si l'on considère l'action humaine. Pour nous en tenir à un exemple, l'apport d'un pesticide aux champs va pratiquement varier de dose d'un champ à l'autre, sa concentration au sol va dépendre de l'état du tapis végétal au moment du traitement, de la pluviosité, etc.

Il ne faut pas perdre de vue que notre objectif serait de comprendre, d'estimer, de quantifier, de maîtriser ces importants phénomènes dans leurs diversité et complexicité. En pratique, comme il n'existe pas de chercheur confirmé, dans le monde, se consacrant à plein temps à ce sujet et qu'il n'y en a jamais eu, nous n'avons que des connaissances frustres et ponctuelles. En pratique, des recherches de laboratoire permettent de mieux isoler ces mécanismes, tandis que des constats de terrains orientent des bilans. Actuellement, l'interprétation des résultats de terrains (milieux complexes) avec les mécanismes simplifiés observés au laboratoire, n'est qu'une extrapolation intellectuelle hasardeuse, en raison de notre ignorance étendue, et limitée par notre seul esprit critique. La coupure actuelle entre ces deux démarches justifie que l'on analyse successivement ce que l'on peut en attendre.

2.2 Essais de laboratoire

Les mécanismes d'action des contaminants, au niveau des lombriciens, sont très complexes, variés et ignorés, et donnent des effets également fort divers (létalité, modification du comportement ou de la physiologie, etc.) ; ils dépendent des interactions contaminant $\rightleftarrows$ milieu $\rightleftarrows$ lombriciens $\rightleftarrows$ temps.

La reproductibilité simultanée, au laboratoire, de la variété des sols dans leur situation réelle, des multiples variations climatiques, garantissant un comportement normal des contaminants et lombriciens, est impossible car les phénomènes en cause sont :

- inconnus pour la plupart,
- si on les a inventoriés, relatifs à des cas particuliers,
- d'une reproductibilité inaccessible, alors que gratuits in situ.

On s'efforcera donc, comme classiquement au laboratoire, d'isoler des mécanismes reproductibles. La nécessité d'utiliser les connaissances ainsi acquises oblige à préciser trois points importants : ces mécanismes doivent être connus comme ayant effectivement lieu dans la nature, y être importants et généralisés.

Ces objectifs de travaux de laboratoire sont rarement atteints. Une difficulté majeure actuelle vient du fait que l'on ne sait présentement pas maintenir des lombriciens dans des milieux réellement contrôlés et reproductibles. Les sols utilisés sont mal définis et varient d'une expérimentation à l'autre, les aliments sont peu ou pas standardisés. C'est que nos méthodes s'écartent insuffisamment du processus naturel, dès que l'on s'en écarte trop, c'est l'échec de l'essai par manque de maîtrise ou une artificialisation qui interdit toute signification, même qualitative, des résultats. Une autre cause de non rigueur provient de la création de systèmes facilement réalisables mais qui n'existent pas (inconnu) ; placer *Eisenia fetida* (Sav., 1826), espèce ne vivant jamais dans un sol minéral, dans un tel sol n'est pas impossible si l'on a morcelé celui-ci, mais le sens d'un tel dispositif doit être expliqué. Tremper un ver de terre dans une solution aqueuse plus ou moins soluble dans l'eau, permet d'obtenir des chiffres... mais à quoi peuvent-ils servir ? L'isolement d'un mécanisme, qui est un des buts des essais de laboratoire, oblige à choisir d'autres paramètres fixés arbitrairement. Si ces choix ne peuvent être justifiés par aucune véritable démarche écologique (puisque cette "fixité" n'existe pas), ils doivent néanmoins être choisis parmi la gamme des situations connues, si possible de la façon la plus fréquente. Arrêter un sol "standard", une température ou humidité constante, peut être affaire de commodité... mais seulement dans la gamme étroite des situations fréquemment observées et en ménageant l'extrapolabilité des résultats.

Pour observer sur une population expérimentale, les effets d'un contaminant et son comportement (bioaccumulation, taux de renouvellement métabolique) la standardisation doit porter sur :

- le mode d'apport du contaminant et sa dose,
- le milieu d'élevage,
- la souche lombricienne,
- la conduite de l'essai,
- les paramètres à étudier.

2.2.1 MODE D'APPORT

En rappelant (§ 2.2.3) le concept de catégories écologiques applicable aux lombriciens, nous pouvons constater que ces animaux peuvent être "réduits" à trois modes de vie avec deux types de milieu-alimentation (Tableau I). Les contaminants viennent en contact avec les lombriciens, soit par la litière de surface, soit après incorporation dans le sol.

Nous devons donc considérer deux situations :

a) le contaminant arrive avec l'aliment organique figuré (litière), soit par retombée dessus (pulvérisation agricole, retombée industrielle, etc.), soit après une contamination des végétaux du milieu.

b) le contaminant est incorporé au sol et agit ainsi par contact externe et par ingestion (s'il y a géophagie).

Bien des difficultés ont été rencontrées, notamment en raison des variations de palatabilité des litières ayant reçu un contaminant (cf. Fayolle, 3ème partie), mais la normalisation des essais implique d'autres choix arbitraires. Celui des doses de contaminant à expérimenter est aussi un choix délicat. Deux points

de vue peuvent guider ce choix :

- un point de vue "pragmatique" : on choisit de centrer la gamme testée sur une dose utilisée agricolement ou couramment observée.
- un point de vue théorique : on choisit les doses de telle manière que l'on établisse la relation mathématique effet/dose... utilisable ensuite par extrapolation à "toutes" les circonstances.

Nos recherches, essentiellement orientées vers la mesure de l'effet létal des pesticides agricoles, ont été marquées par l'approche pragmatique. Une dose N, correspondant à un usage agricole courant normal, sert de "point central" et d'autres doses, fractions ou multiples simples, sont définies à partir de celle-ci (par exemple : N/20, N/5, N, 10N, etc.). Cette approche, qui donne une réponse rapide, a été pratiquée dans nos essais (cf. Fayolle, 3ème possibilité) ; elle présente toutefois de sérieuses difficultés :

1) les doses N sont couramment exprimées en kg/ha : nous avons dû considérer que cette dose diffusait uniformèment sur 1 cm de sol. Choix arbitraire pour les essais "sol". La situation se complique encore si l'on considère les quantités apportées par enrobage d'une semence (en g/kg de semence) qui obligent à un choix, ici approximatif, de quantité de semence/ha.

2) les résultats obtenus sont surtout valables pour les conséquences d'un traitement pris isolément ; leur extrapolation aux champs, où il y a de multiples interventions humaines (dont la répétition des traitements), n'est pas facilitée par cette approche rigide.

3) lorsque le contaminant arrive dans le milieu d'une façon indépendante d'une pratique volontaire (retombée de fumée industrielle, pollution en élevage de lombriciens, par exemple) ou lorsque les cas de figures observables sont complexes, variables ou/et cumulatifs (apport de cuivre au sol par différents mécanismes : lisier de porcs, traitement pesticide, etc.), la dose N n'a plus aucun sens.

Le point de vue théorique , indépendant des conditions d'application, lève les difficultés indiquées ci-dessus : il s'agit d'établir une relation mathématique dose/effet qui permette ensuite l'application à des situations concrètes. Nous développerons dans la deuxième partie (Hadjibiros et al.) l'application de la relation log/probit qui s'est avérée satisfaisante. Un inconvénient d'une telle approximation est qu'elle peut conduire à mettre en oeuvre des doses qui n'existeront jamais, notamment pour les produits à vie courte et sans sous-produits remarquables. Cet inconvénient est mineur. Un deuxième inconvénient de cette approche est lié à la nécessité d'essais préalables déterminant les zones d'actions du produit pour faire un choix, ce qui alourdit certains travaux et double la durée des manipulations.

Dans tous les cas, une attention particulière doit être apportée à la dispersion effective du contaminant dans le milieu testé afin d'éviter les surdoses locales (voir Fayolle, 3ème partie).

2.2.2 MILIEU D'ELEVAGE

Au cours des essais de laboratoire, les lombriciens sont maintenus en "élevage". L'adoption d'un milieu d'élevage quel qu'il soit, n'est pas sans conséquences sur les résultats. Nous avons adopté, pour les essais "sol", un sol naturel de texture moyenne (limon) supportant habituellement une biomasse lombricienne normale (dans notre cas, 1,6 T poids humide/ha). Outre sa commodité, ce choix a l'avantage de permettre le développement de processus microbiologiques à un niveau "normal", ce qui n'est pas sans conséquences lorsque les contaminants n'expriment leur toxicité qu'après une modification microbiologique. Si cette commodité de re-

lative proximité des conditions "naturelles" est évidente, ses inconvénients en sont le corollaire :

- non reproductibilité d'un sol à l'autre,
- absence de maîtrise des mécanismes réellement mis en oeuvre (évolution microbienne, adsorption-désorption des contaminants, combinaison des éléments chimiques, etc.).

En clair, cet essai de laboratoire ne nous renseigne pas, au niveau du sol, sur son objectif : l'analyse des processus. C'est pourquoi le développement d'un milieu artificiel, aussi contrôlé que possible, est indispensable ; sa mise au point est en cours.

Le milieu d'élevage c'est aussi l'apport d'aliments. Ce point n'est pas crucial sur les essais "sol" de courte durée ; il est fondamental en matière d'essais "litière". Ici encore, l'adoption d'un aliment naturel nous écarte de la reproductibilité. De plus, des difficultés très précises relèvent du choix alimentaire des lombriciens : la palatabilité de la litière dépend de modifications subtiles des substrats alimentaires. Malgré les travaux antérieurs (Satchell et Lowe, 1967 ; Wright, 1972), celle-ci est loin d'être comprise. Elle semble dépendre, entre autres, de l'activité microbienne... qui peut être modifiée par le contaminant. Un essai "litière" doit donc également vérifier, ou contrôler, la prise d'aliments des lombriciens pour s'assurer que le contaminant a bien été ingéré. Dans ce domaine aussi, le développement d'une méthode rigoureuse s'impose ; elle fait encore défaut. D'autres paramètres du milieu d'élevage doivent être précisés... et le sont rarement dans les publications : volume de sol, forme et dimension des conteneurs, mode d'aération et d'humidification. Pour notre part, nous avons adopté une ventilation forcée d'air saturé d'humidité... ce qui évite les arrosages (qui sont souvent excessifs ou insuffisants) et les gleyifications résultant de trempage (Bouché, 1972, p. 53). La température retenue dépend du mode de vie des espèces (cf. § 2.2.3), 15°C pour l'endogé *Allolobophora chlorotica* et l'épianécique *Lumbricus terrestris*, et 22,5°C pour l'épigé thermophile *Eisenia fetida fetida*, ce qui n'est pas sans inconvénient pour la comparabilité des essais.

2.2.3 SOUCHE LOMBRICIENNE

Ici encore, les manipulations de laboratoire obligent à des choix, en partie arbitraires. Avant de justifier ce choix, je voudrai insister sur un fait essentiel, régulièrement "gommé" dans les raisonnements : nous ne savons pratiquement rien de la signification biologique des "espèces" que nous déterminons. Attribuer un nom à une population, c'est l'identifier donc apparemment garantir, sans preuve certaine, qu'elle est identique à l'individu type de l'espèce. Si cette identification n'est pas arbitraire et s'appuie sur une certaine identité morphologique, elle est loin de garantir la reproductibilité des résultats. J'ai déjà souligné ce point (Bouché, 1972, p. 122-128), qui doit être tenu en mémoire si l'on veut obtenir des résultats reproductibles. On ne peut présentement réduire cette incertitude que par une dénomination précise et l'indication de la souche (usuellement par l'indication de son origine indiquée par P. et un numéro Bouché, 1972). Un dernier point important dans le choix des espèces est de tenir compte de leur écologie : il y a de nombreux modes de vie des lombriciens et le choix doit être raisonné et non arbitraire. J'ai déjà proposé une classification écologique en 3 pôles : anéciques, épigés, endogés aux quels il convient de rajouter une "troisième dimension" : l'adaptation à l'humidité (Bouché, 1971) ; il s'agit d'une véritable stratégie évolutive, qui, comme je l'ai souligné, s'observe plus sûrement au plan morphologique (adaptation morpho-fonctionnelle traduisant le mode de vie) que par rapport à des milieux parfois profondément perturbés (Bouché, 1978). Cette primauté de la morphologie a été involontairement vérifiée par Sims (sous presse) (Bouché, sous presse a).

Ce classement est essentiel car il permet des simplifications logiques selon des démarches que j'ai développées ailleurs (Bouché, 1975 b). Au point de vue des essais de laboratoire, il y a lieu de considérer le lieu de vie et le mode d'alimentation (Tableau I).

Catégorie	Lieu de vie	Alimentation	Biomasse
Epigés.....	litière, matière organique	litière, matière organique	0 à 2 %
Anéciques....	sol	litière (sol ?)	70 à 80 %
Endogés.....	sol	sol	20 à 30 %

TABLEAU I : Traits schématiques du mode de vie des lombriciens et de leur importance en milieux fertiles.

De ce tableau, il ressort que l'étude au laboratoire des processus est effectivement assurée par les essais "sol" et les essais "litière". Ceux-ci se justifiant également par le mode d'action obligatoire (par contact = endogés de l'essai "sol" et par ingestion = épigés ou anéciques dans l'essai "litière").

Un troisième élément à prendre en compte est lié à la commodité offerte par l'espèce : facilité d'obtention du matériel de la souche et taille des individus. Plus les individus sont petits, plus il est possible d'en tester simultanèment un grand nombre.

Un quatrième élément est lié à la répartition de l'espèce ; il est préférable, bien que non indispensable, de choisir une espèce répandue (bien que cette notion puisse recouvrir des populations très diverses !).

Un cinquième élément est lié à la physiologie de l'espèce : celle-ci doit si possible ne pas avoir une régulation endocrinienne qui modifierait les résultats en fonction de l'état physiologique ou des saisons. Cela revient à dire qu'elle ne doit pas avoir de diapause "endocrine" se déclenchant spontanément ou entraînant un arrêt sexuel, même en conditions constantes, comme cela a été décrit par Evans et Guild (1948). Nous avons pour cette raison choisi pour les essais "litière" une espèce épi-anécique sans diapause *Lumbricus terrestris* L.(sensu *Lumbricus herculeus* Sav.) souche P. 343. Celle-ci présente toutefois l'inconvénient d'être de grande taille, pratiquement non élevable, c'est-à-dire d'un emploi exclusivement local. Nous avons donc entrepris de travailler avec *Eisenia fetida fetida* P. 1756, espèce épigée de plus petite taille pouvant être produite en grande quantité.

Pour les essais "sol", il faut éviter l'emploi d'animaux ayant une diapause "endocrine" (diapause stricte). Nous avons choisi *Allolobophora chlorotica chlorotica* forme albinique P. 1947 ; il s'agit d'une espèce endogée, géophage, ayant un développement continu en conditions constantes (= celles du laboratoire) (Omodeo, 1948 ; Evans et Guild, 1948 ; Michon, 1954), quoique des conditions d'environnement puissent, d'après Michon, déclencher une "diapause" chez cette espèce

(Michon ne précise pas sur quel *Allolobophora chlorotica* il a travaillé ; il est possible que, pour la "forme" endogée, il ne s'agisse que d'une para-diapause sensu Saussey (1966)).

Michon montre que le développement, en conditions constantes de laboratoire, est parfaitement homodyname (= comme des animaux sans diapause). La taille médiocre et la répartition circummondiale de l'espèce dictent également ce choix.

2.2.4 CONDUITE DE L'ESSAI ET CARACTERES OBSERVES

La conduite des essais de laboratoire est, pour une part, un problème d'attention visant à éliminer les biais systématiques (s'assurer, par exemple, que les lots d'animaux ont bien des qualités identiques) ou réduisant les erreurs (par exemple, assurer une dispersion effective du contaminant dans le milieu d'élevage). Mais la conduite des essais oblige aussi à la définition de normes arbitraires : densité animale placée dans le milieu, durée de l'essai, fréquence des lectures, etc. Ces points ne sont pas indépendants des objectifs de l'essai.

Au laboratoire, les objectifs visés dans l'étude des contaminants peuvent être très nombreux. Toutefois, si nous nous plaçons dans un cadre écologique ou agronomique, ceux-ci peuvent être rapportés à trois groupes de paramètres : les effets sur la vitalité du peuplement, l'accumulation du produit dans les tissus et les modifications comportementales et physiologiques.

Les effets sur le niveau du peuplement peuvent être observés selon deux critères généraux : l'effet létal et les modifications des potentialités vitales (reproduction, tératogénèse, etc.). Les modifications des potentialités vitales sont multiformes, longues et coûteuses à établir, et, si elles sont fort importantes d'un point de vue explicatif et physiologique, elles sont délicates à extrapoler au terrain. Les études de terrain peuvent beaucoup plus directement et globalement mesurer ces modifications de potentialité.

La mesure de l'effet létal est, par contre, classique car elle permet une première approximation du rôle des contaminants relativement aisée à utiliser in situ. Toutefois, cette létalité dépend de la mise en contact effective du contaminant avec les lombriciens ; si celle-ci est obligatoire, au moins par voie cutanée pour les contaminants arrivant au sol, elle n'est pas certaine pour les contaminants labiles (= dégradables) tombant sur une litière. En effet, certains produits sont apparemment répulsifs et les lombriciens ne consomment plus la litière contaminée. Cet aspect est important d'un point de vue pratique, notamment en agriculture, car il pourrait permettre la survie des lombriciens anéciques dans un champ dont la litière a été contaminée par des doses mortelles d'un produit géodrilicide, répulsif et labile. L'un des objectifs de nos essais "litière" est d'apprécier cette modification de palatabilité des litières.

La bioaccumulation éventuelle d'un contaminant doit être mesurée en comparant, en fonction du temps, le rapport de la concentration du contaminant dans le milieu à celui des tissus totaux des lombriciens jusqu'à l'équilibre. Si le contaminant a une existence brève dans le milieu, la connaissance de la vitesse de décontamination pourrait être intéressante, mais cette situation est exceptionnelle. La signification des mesures de bioaccumulation au laboratoire devra encore être largement explorée car les résultats peuvent dépendre largement du milieu d'élevage susceptible de mettre "hors circuit" une fraction du contaminant testé (adsorption des argiles, par exemple). Un milieu artificiel contrôlé semble indispensable ici, comme dans les essais de létalité (cf. § 2.2.2).

L'étude de l'activité et de l'état physiologique des animaux a encore été très peu explorée et souffre de limitations importantes. Il est nécessaire, très souvent, d'effectuer des essais sur des durées de plusieurs semaines et de lire des paramètres indirects (modifications du sol, consommation, etc.) qui dépendent largement des "dérives" dictées par les paramètres souvent arbitraires, inconnus et mal contrôlés (tassements du sol d'élevage, par exemple). Les distorsions sont d'autant plus grandes que l'essai dure longtemps et souvent, les conditions initiales, indépendantes du contaminant, dictent les résultats (cas des études de porosité/tassement : Thomson, 1974). Il semble prudent de limiter ces mesures à des individus mis en expérience pendant de courtes périodes sur des caractères immédiatement appréciables (modifications des poids individuels, consommation d'aliments) et de mesurer les conséquences pédologiques et modifications d'activité dans des conditions d'étude in situ.

2.2.5 CHAINES ALIMENTAIRES

Savoir que les lombriciens constituent la première biomasse animale "offerte" aux prédateurs, savoir que certains de ces prédateurs sont des aliments de l'homme, que beaucoup constituent des éléments d'équilibre des biocénoses (comme les Carabidae), implique une meilleure connaissance du passage des contaminants aux chaînons suivants. Ces études doivent surtout être conduites au terrain, ne serait-ce que pour mieux connaître ces prédateurs ; toutefois, un modèle expérimental prédateur/proie, où la proie est un lombricien, est souhaitable pour étudier les mécanismes du passage des contaminants à un prédateur. Trois niveaux devraient être expérimentés sol → lombriciens → prédateurs. Si nos connaissances de ces mécanismes expérimentaux sont relativement bien cernées en milieu aquatique (voir Boudou et al., 1978), elles restent très primitives en milieu terrestre, la plupart impliquant seulement un système sol, plantes, lombricides en réseau trophique complexe et non "contrôlé". Ces modèles d'écosystèmes (voir la synthèse de Metclaff, 1977) ne renseignent que très peu sur les mécanismes, le transfert des contaminants au niveau des maillons étant très imprécisé, et nous éloignent nettement des écosystèmes réels. A ma connaissance, de vraies chaînes trophiques terrestres permettant de suivre les polluants sur plus de deux compartiments sont exceptionnelles. Ireland (1977) décrit une chaîne expérimentale, parcourue par du plomb, utilisant le crapaud *Xenopus laevis* comme prédateur de lombriciens. La mise en oeuvre d'un mécanisme sol → lombriciens → prédateurs, ou sol → plantes → lombriciens → prédateurs, nous permettrait un progrès substantiel des risques réels en milieu terrestre.

2.2.6 LIMITATION DES TRAVAUX DE LABORATOIRE

Les travaux de laboratoire offrent, pour la compréhension du rôle des éléments dangereux, deux types de limitation :

- une limitation extrinsèque due à la rareté des travaux entrepris dans un secteur perçu, par défaut culturel, comme marginal (notion d'effets "secondaires" des pesticides !).
- une limitation intrinsèque due à la nature nécessairement artificielle et analytique de ces recherches (ce qui n'implique pas que le mécanisme observé soit artificiel).

Nous avons dû, au cours des paragraphes précédents, constamment justifier des choix réducteurs. Si nous ne pouvons reproduire la complexité des interactions des milieux où agissent réellement les éléments dangereux pour les lombriciens, nous pouvons espérer, par un choix si possible logique, étudier les mécanismes d'action et de transfert de ces contaminants. Nous pouvons enfin, par la recherche de systèmes expérimentaux et mathématiques adéquats (cf. Hadjibiros et al. 2ème partie) nous doter de moyens d'interprétation des phénomènes observables et prévisibles au terrain.

2.3 Recherches au terrain

Les recherches au terrain offrent l'avantage de se situer dans des conditions réelles d'action d'un contaminant, c'est-à-dire de se placer dans le cadre de la grande complexité des interactions contaminants $\rightleftarrows$ milieu $\rightleftarrows$ lombriciens $\rightleftarrows$ temps. Par ailleurs, beaucoup de conditions de réalisation sont gratuites (milieu, peuplement lombricien, temps, parfois contamination).

Deux inconvénients majeurs :

a) on est toujours dans un cas particulier plus ou moins extrapolable,

b) on observe des paramètres résultant d'interactions multiples... dont beaucoup nous échappent.

Outre notre inaptitude fréquente à mesurer les paramètres que l'on s'assigne de reconnaître (c'est le symétrique de notre absence de maîtrise des essais en laboratoire), l'interprétation des résultats est aléatoire, sa généralisation pratique toujours risquée. Ces incertitudes peuvent être limitées par :

a) une connaissance générale aussi approfondie que possible des interactions durant l'essai, ce qui implique une connaissance approfondie de notre actuel acquis en matière de lombriciens, contaminants et écologie générale.

b) une étude détaillée de quelques mécanismes précis et spécifiques conduite au laboratoire.

Les recherches de terrain présentent toutefois d'importantes qualités :

1) un cadre réel d'évolution des contaminants,

2) une possibilité de généralisation (traitement simultané de plusieurs espèces ou catégories écologiques). L'extension du facteur temps est souvent possible sans grandes difficultés,

3) si les points a) et b) sont suffisament satisfaits, la possibilité de conclusions pratiques peu hasardeuses.

Deux pratiques éventuelles sont possibles : l'observation d'un cas de contamination "involontaire" ou, à l'inverse, la création d'un dispositif d'essais au champ volontairement contaminé.

2.3.1 OBSERVATIONS DE CONTAMINATIONS INVOLONTAIRES

Les effets de contaminations involontaires peuvent s'observer :

1) par disparition des marques d'activité des lombriciens (entraînant une accumulation de litière, une mauvaise croissance racinaire, une destructuration - battance des sols, etc.) ; on doit alors contrôler le niveau des populations résidentes.

2) une certaine accumulation du contaminant dans les tissus.

2.3.1.1 Disparition d'activité

L'observation de la disparition de l'activité des lombriciens est rarement faite, faute de spécialistes conscients de cette activité, et doit nécessairement entraîner un contrôle car souvent cette modification pourrait être imputable à d'autres causes.

L'accumulation des litières a été observée notamment par Hirst et al. (1961) et contrôlée par Raw (1962) en vergers. De même, Turgeon (1972), a fait des observations analogues sur gazons. Beaucoup plus délicats sont, par exemple, les

phénomènes liés à la destructuration des sols, des causes multiples souvent simultanées, pouvant entraîner ce phénomène ; la relation cause-effet peut rarement être évoquée a priori de façon certaine. La superficie des sols qui sont actuellement touchés par ce phénomène est considérable et le contrôle des mécanismes effectivement en cause, dont la raréfaction des lombriciens, mériterait d'être effectué. Van de Westeringh (1972) a pu illustrer le lien existant entre destructuration des sols et géodrilicides.

2.3.1.2 Accumulation tissulaire, chaîne biologique et bioéchantillonnage

L'observation, à partir d'échantillons naturels, de l'éventuelle accumulation des contaminants dans les tissus de lombriciens a été effectuée à plusieurs reprises ; citons, à titre d'exemples, les travaux de Hunt (1965) sur l'accumulation de DDT ou ceux d'Ireland (1976) sur celle de métaux lourds.

Cette propriété peut être mise à profit pour bioéchantillonner le sol. Les lombriciens ont une distribution verticale dans le sol comparable à celle des racines et des micro-organismes ; ils s'alimentent de sol (micro-organismes et matière organique compris), de racines mortes et de litière, et ils vivent en moyenne plusieurs mois. Les lombriciens prélèvent donc un échantillon des contaminants bioaccumulables dans l'ensemble du profil, proportionnellement à la vie dans le sol et à la disponibilité biologique réelle du contaminant (qui peut être fortement lié au sol, donc non dangereux). Ce bioéchantillonnage fournit, par ailleurs, une intégration du profil et une médiation en fonction du temps. Le contaminant, enfin, est intégré à un complexe chimique (celui du lombricien) plus simple que celui du sol ce qui peut simplifier certaines analyses chimiques. Ce bioéchantillonnage pourrait être pour certains éléments un moyen économique de cartographier le niveau "biologiquement actif" de contaminants. L'établissement, au laboratoire, du rapport contaminant/bioaccumulation permettrait une généralisation des résultats.

La reconnaissance d'un certain nombre de chaînes biologiques, où le chaînon lombricien joue un rôle important parmi les réseaux trophiques, constitue encore un domaine de recherches peu exploré (§ 1.3). Signalons le cas des chaînes concernant directement l'homme, telle celle lombriciens → gibier (bécasses, sangliers, etc.) → homme ou oligochètes → poissons → homme qui impliquerait une meilleure connaissance des régimes alimentaires des prédateurs. Le développement de recherches permettant de mieux connaître le devenir des contaminants présents dans le chaînon lombricien est également nécessaire pour apprécier les risques au plan de la protection de la nature. L'étude du prédatisme des lombriciens devrait être conduite systématiquement.

2.3.2 DISPOSITIFS D'EXPERIMENTATION

Pour apprécier l'effet d'un contaminant, il est évidemment possible de réaliser un dispositif expérimental au champ. Deux objectifs peuvent être privilégiés : soit juger, dans les conditions pratiques d'emploi un élément dangereux (pesticide, par exemple), les conséquences de cet emploi, soit connaître de façon plus générale les modifications induites par un contaminant sur un peuplement lombricien ou sur son activité.

Dans le premier cas, les conditions de la pratique envisagée dictent les conditions de l'essai qui doit, par ailleurs, respecter les exigences générales que nous envisagerons plus bas. D'une façon générale, ce type d'essai se place souvent dans des conditions très précises et les résultats sont toujours peu

généralisables (il suffit de modifier un modèle de pulvérisateur de pesticides pour modifier les résultats !). Par ailleurs, au moins en champs labourés, la multitude des opérations agronomiques et l'état de continuel déséquilibre du peuplement lombricien rendent difficile une interprétation à moyen ou long terme.

La deuxième catégorie d'essais privilégie les milieux équilibrés (peu perturbés) dans lesquels l'incidence d'une contamination peut être comparée à un témoin sur une longue période. Il y a lieu de s'efforcer de choisir un milieu où les effets de la modification d'activité des lombriciens puissent être observés. Il semble que la prairie permanente subissant une exploitation homogène (pâture ou fauche) soit la meilleure situation car les conséquences comparatives témoin/traité peuvent être suivies sur plusieurs années sur l'ensemble du peuplement, du sol, etc. Il est possible de mesurer des résultantes directes de l'activité tel l'enfouissement de la litière à côté de l'évolution du peuplement (Bouché et Beugnot, 1978) ; de même d'autres paramètres (enracinement, croissance végétale, etc.) pourraient être observés (Turgeon, 1972).

Dans ces deux types d'études au terrain, il y a évidemment lieu de se mettre en situation convenable :

- échantillonner correctement le peuplement,
- travailler sur une faune si possible "complète" (trois catégories écologiques) et ayant un niveau de peuplement et d'activité suffisant,
- avoir des parcelles de dimensions suffisantes (migrations, effets de bordures),
- être intégré dans une étude plus large pour valoriser les résultats.

2.3.2.1 Echantillonnage

L'échantillonnage des populations de lombriciens est un travail très lourd qui est généralement pratiqué, faute de moyens, de façon insuffisante à la fois en nombre (échantillon trop petit) et en qualité (technique inadéquate).

Nous avons déjà discuté de ce problème à maintes reprises, car il est la condition de l'appréciation correcte des résultats. Il est hors de propos de revenir sur ce sujet en détail, signalons simplement un résultat global obtenu par Bouché et Gardner (in prep.) à partir d'un échantillon de 68 308 lombriciens comprenant des cocons et des postembryons (juvéniles, subadultes et adultes) et comparant trois méthodes auxquelles les autres procédés peuvent être comparés (Tableau II).

Quel que soit le mode de vie, le rendement de la meilleure méthode éthologique (celle au formol) est toujours en moyenne dérisoire. Une correction importante peut être apportée avec la méthode éthologique complétée par un prélévement de sol après ce premier traitement (méthode fo, bl_{20}).

De meilleurs résultats peuvent être obtenus (Bouché, 1975 c) :

- en choisissant les périodes climatiques les meilleures : ce qui interdit les études en fonction du temps,
- en introduisant des facteurs de correction pour évaluer le niveau approximatif du peuplement ; ce qui n'est qu'un pis-aller.

Nombre / Catégories écologiques		Anéciques	Endogés	Epigés	Peuplement
Postembryons + cocons	fo.....	17,59	13,86	13,67	16,24
	fo, bl_{20}...	83,21	82,45	72,11	82,31
Postembryons	fo.....	27,29	16,47	40,87	25,70
	fo, bl_{20}...	81,77	78,97	59,31	79,37

Biomasse / Catégories écologiques		Anéciques	Endogés	Epigés	Peuplement
Postembryons + cocons	fo.....	34,54	14,58	41,54	30,65
	fo, bl_{20}...	85,69	74,71	67,02	83,09
Postembryons	fo.....	35,68	14,69	44,29	30,96
	fo, bl_{20}...	85,69	74,64	65,75	82,97

TABLEAU II : Pourcentage moyen d'efficacité par rapport à la méthode bêche lavage 0 - 60 cm (= 100 % !) des méthodes fo (= méthode formol) et fo, bl_{20} (= formol + lavage tamisage sur - 20 cm).

Par ailleurs, les procédés éthologiques dépendent du comportement animal qui peut être modifié par le contaminant (par exemple, animaux réfugiés en profondeur sous l'action du lisier : Lebrun, com. pers.) et de l'état physique du sol, qui peut aussi avoir été modifié (par exemple, la destructuration découlant de l'action du chlorate de soude : Bouché et Beugnot, 1978).

On devrait donc, pour étudier les peuplements, mettre en oeuvre une méthode sérieuse, physique, indépendante des conditions climatiques et des effets du contaminant. En pratique, les laboratoires ne disposent pas des moyens nécessaires et les résultats risquent, sauf dans les cas très nets, d'être des artéfacts.

2.3.2.2 Etat du peuplement

Pour être en situation de tirer des conclusions intéressantes et générales, il faut assurer les études expérimentales au champ sur des peuplements complets possédant au moins les deux catégories écologiques importantes au point de vue de la pédogénèse et de la vie des sols (anéciques et endogés) (cf. § 2.2.3 pour l'importance des catégories écologiques). Par ailleurs, il y a lieu de choisir des localisations ayant des peuplements élevés afin d'obtenir les différences basées sur des sous-échantillons bien distincts. Cette dernière condition n'est pas toujours facile à satisfaire dans les zones de culture intensive qui ont souvent été très défaunées. Enfin, l'activité des peuplements peut être suspendue pour des

raisons saisonnières ou/et climatiques pendant la durée de l'essai : trop de résultats contradictoires au champ s'expliquent par la non-prise en compte des conditions d'activité (la description précise des conditions pendant l'expérience semble indispensable).

2.3.2.3 Dimension des parcelles

Les lombriciens étant mobiles, on peut s'inquiéter de l'influence des migrations sur les essais au champ surtout pour les études à long terme. Une étude des effets de bordure (Bouché et Beugnot, 1978) n'a pas permis de mettre en évidence l'importance de celui-ci, même sur 50 cm. L'étude des déplacements de lombriciens est encore peu entreprise et nous renseigne mal sur les cas qui peuvent se présenter dans les essais au champ. Il semble qu'une garde de 1 m à l'intérieur des parcelles soit une protection raisonnable pour les anéciques et les endogés, mais cet ordre de grandeur pourrait s'avérer insuffisant dans certains cas. Les épigés pourraient rapidement franchir des distances de 10 à 20 m.

2.3.2.4 Intégration de l'étude

L'étude au terrain s'inscrit toujours dans le cas particulier de l'environnement écologique et technico-économique où elle a lieu. L'interprétation des données sera largement améliorée si l'étude des contaminants in situ peut se situer dans un contexte multidisciplinaire. Inversement, bien des conclusions des autres spécialistes pourront être influencées par la prise en compte du phénomène lombricien. Signalons que la destruction d'un peuplement lombricien par un pesticide peut donner un effet instantanné positif sur les rendements (libération d'azote des cadavres notamment). L'apport de 75 kg p.s./ha de cadavres a permis d'accroître de 15 % le rendement en blé (cf. § 1.2) (Dreidax, 1931). Bien des interprétations erronées pourront être évitées.

III. LIMITATION DES ESSAIS

Essais au terrain et au laboratoire sont en tout état de cause limités à des cas particuliers et n'atteignent en l'état actuel que partiellement leurs objectifs.

Toutefois, la rapide utilisation d'un nombre croissant de contaminants nous oblige à faire le possible en ce domaine. Les difficultés d'extrapolation des résultats doivent être clairement perçues dès la définition méthodologique car elles peuvent conduire à la modification de protocoles d'essais ou guider la définition des limites d'usages. Deux types de difficultés se présentent au niveau des extrapolations :

- la généralisation des résultats aux situations concrètes pour apprécier les effets directs classiquement observés.
- l'appréciation des conséquences "indirectes" des effets directs observés ou non.

3.1. Généralisation des résultats

Si la généralisation des données discontinues (interpolation) ne présente pas de difficultés insurmontables (voir pour l'effet létal/dose, Hadjibiros et al., 2ème partie), l'interprétation pratique des effets observés dans les conditions standards au laboratoire ou les conditions particulières de l'essai au champ reste très délicate. Beaucoup de situations peuvent se présenter et je n'en évoquerai que quelques-unes :

- apport artificiel d'un géodrilicide modifiant la palatabilité des litières (cas de certains pesticides). Cet aspect déjà évoqué (§ 2.2.4) peut conduire à l'autorisation d'usage,même aux doses de risques létaux, si ce produit est rapidement dégradé et est fortement répulsif pour les lombriciens. Ce fait a conduit à considérer les études de palatabilité comme indispensables pour les lombriciens straminicoles ou straminivores (vivant dans, ou mangeant de, la litière).
- apport d'un géodrilicide pendant les périodes d'inactivité des lombriciens (cf. § 2.3.2.2). Une appréciation correcte des risques (certitude d'inactivité) peut conduire également ici à considérer comme sans risque l'usage d'un géodrilicide non rémanent.
- présentation particulière d'un composé. Certains composés sont distribués au champ dans des conditions particulières (enrobage de semences, granulés, etc.) qui modifient les risques. Ceci est appréciable par les essais au laboratoire qui devront alors prendre les deux cas en considération (dose diffuse, dose localisée) selon des protocoles spécifiques. L'interprétation des essais au champ devra alors s'efforcer de comprendre si les conditions de contact lombriciens (activité)/contaminant (diffusion) ont été normales (selon quel critère ?).
- un même effet n'a pas les mêmes conséquences en fonction du contexte si une action géodrilicide partielle peut être rapidement compensée par la dynamique démographique du peuplement éprouvé ou, à l'inverse, si une action géodrilicide partielle s'ajoute à d'autres actions déprimantes ; les conclusions peuvent être, pour une même conséquence, totalement différentes. Dans le premier cas, le peuplement cicatrise, sans conséquences graves, dans le second, il peut disparaître.

Ces exemples montrent que, à côté de tests standards d'étude des contaminants, certaines recherches complémentaires spécifiques peuvent être indispensables. Ils montrent aussi que l'interprétation finale des risques laisse une large part à l'interprétation subjective.

3.2 Appréciation des conséquences indirectes

J'ai déjà évoqué rapidement (§ 1.2) la nécessité d'apprécier l'impact d'un contaminant non seulement dans le court terme mais aussi dans le moyen et le long (plus de 10 ans) terme. Cette appréciation est encore très difficile en raison de notre absence de connaissances. Toutefois, il devrait être possible, au moins empiriquement sinon logiquement, d'apprécier la vitesse de "cicatrisation" d'un peuplement perturbé, soit par sa démographie, soit par migration. La modélisation de certaines conséquences de ces perturbations (dont le transit des contaminants) est, enfin, en cours dans un travail de longue haleine (REAL, Bouché et Kretzschmar, 1977 ; Bouché, sous presse b). Cette modélisation facilitera, à terme, un bilan économique de l'impact des contaminants. Ici encore, il y a lieu d'insister sur le fait que nous ne pouvons présentement assurer, sur la base semi-rigoureuse décrite ci-dessus, ces appréciations qui restent donc largement subjectives.

IV. REMERCIEMENTS

Ces recherches répondent à une préoccupation générale qui a reçu les aides du Ministère de l'Environnement, de l'Office National de la Chasse et de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique. Je tiens à remercier Messieurs Soyez et Yana pour l'attention bienveillante qu'ils ont porté à ces travaux.

V. BIBLIOGRAPHIE

BOUCHE, M.B., 1971 - Relations entre les structures spatiales et fonctionnelles des écosystèmes illustrées par le rôle pédobiologique des vers de terre. In Pesson "La vie dans les sols", éd. Gauthier Villars, 187-209.

BOUCHE, M.B., 1972 - Lombriciens de France. Ecologie et systématique. Ed. I.N.R.A., Ann. zool. - écol. anim., numéro spécial, 72 - 2, 1-671.

BOUCHE, M.B., 1974 - Le ver de terre : un laboureur biologique. Le Monde, 9 janvier 1974, dossier du Monde des Sciences et des Techniques, p. 14.

BOUCHE, M.B., 1975 a - Les vers de terre : un rôle écologique et économique paradoxal. Encyclopaedia Universalis, Universalia, (1975), 431-434.

BOUCHE, M.B., 1975 b - Fonctions des lombriciens. III. Premières estimations quantitatives des stations françaises du P.B.I. Coll. biol. sol, Montpellier, 27 mai - 2 juin 1973, Rev. écol. biol. sol, 12, 1, 25-44.

BOUCHE, M.B., 1975 c - Fonctions des lombriciens. IV. Corrections et utilisations des distorsions causées par les méthodes de capture. In "Progress in soil zoology", C.R. Vème coll. int. zool., éd. Academia, Prague, 571-582.

BOUCHE, M.B., 1978 - Stratégies lombriciennes. In U. Lohm and T. Persson "Soil organims as components of ecosystems", proc. 6th int. coll. soil zool., Ecol. bull. (Stockholm), 25, 122-132.

BOUCHE, M.B., sous presse a - Interprétation morphologique des lombriciens : un commentaire de l'évaluation numérique de R.W. Sims. C.R. coll. Padova, Pedobiologia.

BOUCHE, M.B., sous presse b - Objectifs, compartimentation et faisabilité du modèle R.E.A.L. (Rôle Ecologique et Agronomique des Lombriciens). C.R. symp. inter. Oligochètes, Padova, sept. 1977, Pedobiologia.

BOUCHE, M.B., et M. BEUGNOT, 1978 - Action du chlorate de soude sur un peuplement de lombriciens. Phytiatrie-phytopharmacie.

BOUCHE, M.B., et R.H. GARDNER, in prép. - Fonctions des lombriciens (earthworm functions). VII. Methodological bias on earthworms estimates.

BOUCHE, M.B., et A. KRETZSCHMAR, 1977 - R.E.A.L. : un modèle du Rôle Ecologique et Agronomique des Lombriciens. In U. Lohm and T. Persson "Soil organisms as components of ecosystems", proc. 6th int. coll. soil zool., Ecol. bull. (Stockholm), 25, 402-408.

BOUDOU, A., et Al., 1977 - Modèles expérimentaux en écotoxicologie : chaînes trophiques en milieu limnique. Bull. écol., 8, 4, 401-414.

DARWIN, C.R., 1881 - The formations of vegetable mould through the action of worms with observations on their habits. London, 366 pp., John Murrey and Co.

DREIDAX, L., 1931 - Untersuchungen über die Bedentung der Regenwürmer für den Pflanzenbau. Arch. Pflan., 7, 413-467.

EVANS, A.C., et W.D. GUILD, 1948 - Studies on the relationships between earthworms and soil fertility. IV. On the life cycle come british lumbricidae. Ann. appl. biol., 35, 471-484.

HIRST, J.M., et Al., 1961 - Copper accumulation in the soils of apple orchards near Wisbech. Pl. path., 10, 105-108.

HUNT, L.B., 1965 - Kinetics of pesticide poisoning in Dutch elm disease control. In "The effects of pesticides on fish and wildlife", U.S. fish wildlife service, Circ. 226, 12-13.

IRELAND, M.P., 1976 - Variations in the lead, zinc, and calcium content of *Dendrobaena rubida* (Oligochaeta) in a base metal mining area. Environ. pollut., 10, 3, 201-208.

IRELAND, M.P., 1977 - Lead retention in toads *Xenopus laevis* fed increasing levels of lead contaminated earthworms. Environ. pollut., 12, 2, 85-92.

METCALF, R.L., 1977 - Model ecosystem approach to insecticide degradation : a critique. Ann. rev. entomol., 22, 241-261.

MICHON, J., 1954 - Influence de l'isolement à partir de la maturité sexuelle sur la biologie des lombricides. C.R. acad. sci. Paris, 238, 2457-2458.

OMODEO, P., 1948 - Il letargo nei lombrichi. Boll. zool., 15, 11-18.

RAW, F., 1962 - Studies of earthworms population. I. Leaf burial in apple orchards. Ann. appl. biol., 50, 389-404.

SATCHELL, J.E., 1967 - Colour dimorphism in *Allolobophora chlorotica* Sav. (Lumbricidae). J. anim. ecol., 36, 623-630.

SAUSSEY, M., 1966 - Contribution à l'étude des phénomènes de diapause et de régénération caudale chez *Allolobophora icterica* Sav. (Oligochète lombricien). Mem. soc. linnéenne de Normandie, 1, 1-158.

SIMS, R.W., sous presse - A preliminary numerical evaluation of the taxonomic characters of *Allolobophora* auct. and some allies (Lumbricidae : Oligochaeta) occuring in France. Pedobiologia.

THOMSON, A.J., 1974 - Production of surface casts by the earthworm *Eisenia rosea*. Can. j. zool., 52, 5, 659.

TURGEON, A.J., 1972 - Preemergence herbicides and their effects on the turfgrass ecosystem. Proc. of the north central weed control conf., 27, 62.

VAN DE WESTERINGH, W., 1972 - Deterioration of soil structure in worm free orchards soils. Pedobiologia, 12, 6-15.

WRIGHT, M.A., 1972 - Factors governing ingestion by the earthworm *Lumbricus terrestris* L. with special reference to apple leaves. Ann. appl. biol., 70, 2, 175-188.