Publ. 119

EXEMPLAIRE RÉSERVÉ

T H E S E

présentée à

L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON-1

pour obtenir le diplôme de

DOCTEUR - INGENIEUR

par

L é o n F A Y O L L E

E T U D E D E L' E V O L U T I O N D U S Y S T E M E D E C H E T S - L O M B R I C I E N S - M I C R O O R G A N I S M E S : P E R S P E C T I V E S A P P L I Q U E E S

Soutenue le 19 mars 1982 devant la commission d'examen :

R. BARDIN	Président
M.B. BOUCHE	Rapporteur
A.M. GOUNOT	
G.de BEAUCORPS	Examinateurs
D. BERNARD	

Le on T...

Errata

Page 6, ligne 16 - le naphtalène

11, ligne 14 - stockage

14, ligne 10 - DINDAL

15, ligne 16 - Artificiellement

22, dernière ligne - Individuel

22, ligne 11 - Megascolecina

29, ligne 7 - lire : Parmi les matières ...

34, ligne 2 - nous

45, ligne 2 - dangereux

54, fig. 7, axe des ordonnées (à droite) : ajouter % d'adultes

57, ligne 15 : fréquentes

59, ligne 21 - lire : 5,10, 15 et 20 animaux

97, ligne 13 - lire : de dénitrification n'est apparu ...

113, ligne 16 - hypoxie

- UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON I -

Président honoraire : M. le Pr J. BOIDIN

A M. Boucle
Cordialement
J. Boidin

Président : M. le Pr L. DAVID
Premier Vice-Président : M. le Pr R. MORNEX
Deuxième Vice-Président : Mme A. VARAGNAT, M.A.
Troisième Vice-Président : M. DUGNAT, Etudiant
Secrétaire Général de l'Université : M. F. MARIANI

UNITES D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE (U.E.R.)

U.E.R. de Médecine GRANGE-BLANCHE ..... : M. le Pr Paul ZECH

U.E.R. de Médecine ALEXIS-CARREL ..... : M. le Pr René MORNEX

U.E.R. de Médecine LYON-NORD ..... : M. Yves MINAIRE, M.C.A.

U.E.R. de Médecine LYON-SUD ..... : M. le Pr Jean NORMAND

U.E.R. Faculté de Pharmacie ..... : M. le Pr C.A. BIZOLLON

U.E.R. de Techniques de Réadaptation ..... : M. le Pr Alain MORGON

U.E.R. de Biologie Humaine ..... : M. Jean-Pierre REVILLARD, MCA

U.E.R. E.P.S. ..... : M. Albert MILLON, Pr d'E.P.S.

U.E.R. Faculté d'Odontologie de Lyon ..... : M. le Pr Jean PARRET

U.E.R. de Mathématiques ..... : M. le Pr Maurice FLAMANT

U.E.R. de Physique ..... : M. le Pr Jean DELMAU

U.E.R. de Chimie et Biochimie ..... : Mme Annick VARAGNAT, M.A.

U.E.R. des Sciences de la Nature ..... : M. le Pr Yves LEMOIGNE

U.E.R. des Sciences Physiologiques ..... : Mle le Pr J.F. WORBE

U.E.R. de Physique Nucléaire ..... : M. le Pr E. ELBAZ

I.U.T. I ..... : M. le Pr Albert VILLE

I.U.T. II ..... : M. le Pr P. MICHEL

Observatoire de Lyon ..... : M. G. MONNET, Astronome

U.E.R. de Mécanique ..... : Mle le Pr. G. COMTE-BELLOT

Avant- propos

Ce travail a été réalisé à l'I.N.R.A. de Dijon, station de recherches sur la Faune du sol, dirigée par Monsieur A. BESSARD, puis par Monsieur M. PUSSARD, sur un sujet proposé par Monsieur M.B. BOUCHE.

J'exprime ma gratitude à toutes les personnes qui, à des degrés divers, ont rendu ce travail possible :

Monsieur BARDIN de l'Université de Lyon-1 qui a accepté le patronnage de cette thèse,

Monsieur BERNARD, de l'A.N.R.E.D. à Angers, qui a bien voulu faire partie du jury et qui m'a prodigué ses conseils en matière de compostage des déchets,

Monsieur BOUCHE, de l'I.N.R.A., qui m'a guidé avec compétence tout au cours de ce travail ; j'ai pu bénéficier de son expérience sur l'étude des lombriciens,

Monsieur DE BEAUCORPS, de la S.C.P.A., pour l'intérêt qu'il a porté à ces recherches,

Mademoiselle GOUNOT, de l'Université de Lyon-I, qui a accepté de juger ce travail.

Je remercie également Monsieur J. ROUELLE ; j'ai pu bénéficier de ses conseils pour la partie microbiologie.

Mes remerciements vont également à Madame M. JANISZ, pour sa participation à la réalisation de ce mémoire, et à toutes les personnes qui à des dégrés divers m'ont apporté leur aide.

P l a n

Introduction 2

I - Importance des lombriciens dans les processus de dégradation et d'humification

1.1 - Cycle de la matière organique 4
1.2 - Faune du sol et matière organique 5
1.2.1 - Matière organique et humification 5
1.2.2 - Rôle de la faune du sol 6
1.2.3 - Les lombriciens 7
1.2.3.1 - La classification et ses limites 8
1.2.3.2 - Rôle des vers de terre 9
1.3 - Compostage des matières organiques 10
1.3.1 - Introduction 10
1.3.2 - Déchets et compostage 12
1.3.2.1 - Ordures ménagères et compostage 12
1.3.2.2 - Avenir du compostage des déchets urbains 13
1.3.2.3 - Les déchets liquides 13
1.3.3 - Compélevage et lombricompost 14
1.3.3.1 - Historique 14
1.3.3.2 - Objectif 15
1.3.4 - Cadre de l'étude 16

II - Méthode d'élevage et choix des matériels

2.1 - Elevage des lombriciens 17
2.1.1 - Techniques courantes d'élevage 17
2.1.2 - Techniques utilisées 18
2.1.2.1 - Elevage de masse 18
2.1.2.2 - Dispositif d'élevage sans humidification 18

...

2.2 - Manipulations des animaux et mesures 21

2.2.1 - Séparation des vers de terre de leur milieu 21

2.2.2 - Pesée des animaux et stades 23

2.3 - Choix des animaux 24

2.3.1 - Lumbricidae 24

2.3.1.1 - Eisenia fetida 24

2.3.1.2 - Eiseniella tetraetra 26

2.3.1.3 - Dendrobaena subrubicunda 26

2.3.2 - Glossoscolecidae 26

2.3.3 - Conclusions 27

2.4 - Choix des matières organiques et préparation 27

2.4.1 - Choix des matières organiques 27

2.4.2 - Préparation et caractérisation des milieux 28

III - *Etude des performances des animaux*

3.1 - Etude des souches et de leur adaptation 29

3.1.1 - Conduite des élevages de masse 29

3.1.2 - Adaptation des souches en élevage de masse 30

3.1.3 - Choix des souches 32

3.2 - Valeur de quelques substrats organiques pour le compélevage 33

3.2.1 - Cas des ordures ménagères (OM) 33

3.2.2 - Toxicité de quelques substrats organiques 36

3.2.3 - Evaluation de la toxicité de divers déchets 38

3.2.3.1 - Type de substrat 38

3.2.3.2 - Résultats 41

3.2.4 - Causes de la toxicité des substrats d'élevage 42

3.2.4.1 - Essai sur papier filtre 42

3.2.4.2 - Essai sur "artisol". 42

3.2.4.3 - Discussion 45

3.2.5 - Résistance des souches lombriciennes Eisenia 46

...

IV - *Réalisation des élevages, recherches des conditions optimales* 46

4.1 - Etude de quelques paramètres agissant sur la croissance 48

4.1.1 - Humidité 48

4.1.1.1 - Boues digérées en provenance de Dijon 48

4.1.1.2 - Ordures ménagères en provenance de Montargis 50

4.1.2 - Température 52

4.1.2.1 - Boues digérées en provenance de Dijon 52

4.1.2.2 - Ordures ménagères en provenance de Montargis 53

4.1.3 - Fréquence du tri 57

4.1.4 - Charge et nombre de cycles d'élevage 59

4.1.4.1 - Influence de la charge 59

4.1.4.2 - Influence du nombre de cycles 64

4.1.5 - Préparation du substrat 65

4.1.6 - Granulométrie des OM 66

4.1.7 - Origine et degré d'évolution des OM 67

4.1.8 - Comparaison des souches 68

4.1.9 - Conclusions 69

4.2 - Etude de la reproduction 70

4.2.1 - Introduction 70

4.2.2 - Fécondité sur boues digérée et incubation des cocons 71

4.2.2.1 - Fécondité 71

4.2.2.2 - Durée d'incubation des cocons 72

4.2.3 - Influence de la température sur la fécondité .. 74

4.2.4 - Influence des milieux et des souches 77

4.2.4.1 - Milieu à base de fèces de cheval 77

4.2.4.2 - Milieu à base de terreau 78

4.2.4.3 - Comparaison de fécondité entre souches 79

...

4.2.5 - Conclusions 80

4.3 - Accroissement de biomasse lombricienne sur déchets 81

4.3.1 - Production de vers de terre 81

4.3.2 - Qualité de l'aliment "ver de terre" 84

V - *Evolution des matières organiques*

5.1 - Aspect physique 85

5.2 - Echanges gazeux : perte de carbone 86

5.2.1 - Mesure de l'activité biologique globale 86

5.2.1.1 - Matériel et méthode 86

5.2.1.2 - Première expérimentation 86

5.2.1.3 - Seconde expérimentation 89

5.2.2 - Conséquences de la ventilation des OM 90

5.2.2.1 - Expérimentation 90

5.2.2.2 - Résultats et discussion 92

5.2.3 - Conclusions 93

5.3 - Fixation d'azote et germes responsables du cycle de l'azote 94

5.3.1 - Activité nitrogénasique 94

5.3.1.1 - Matériel et méthode 94

5.3.1.2 - Résultats 95

5.3.2 - Activité nitrogénasique et germes responsable du cycle de l'azote 95

5.3.2.1 - Matériel et méthode 95

5.3.2.2 - Résultats : bilan azoté 97

5.3.2.3 - Résultats sur l'évolution des peuplements microbiens responsables du cycle de l'azote 99

5.3.3 - Conclusions 103

5.4 - Analyse chimique 104

5.4.1 - Matériel et méthode 104

...

5.4.2 - Résultats 106
5.4.3 - Discussion 106

5.5 - Test sur végétaux 107

5.5.1 - Objectif du test 107

5.5.2 - Mise en place du test 107

5.5.3 - Comparaison du compost et du lombricompost 109

5.5.3.1 - Première expérience 109
5.5.3.2 - Seconde expérience 109

5.5.4 - Conclusions 112

Conclusions générales 113

Références bibliographiques 117

Introduction

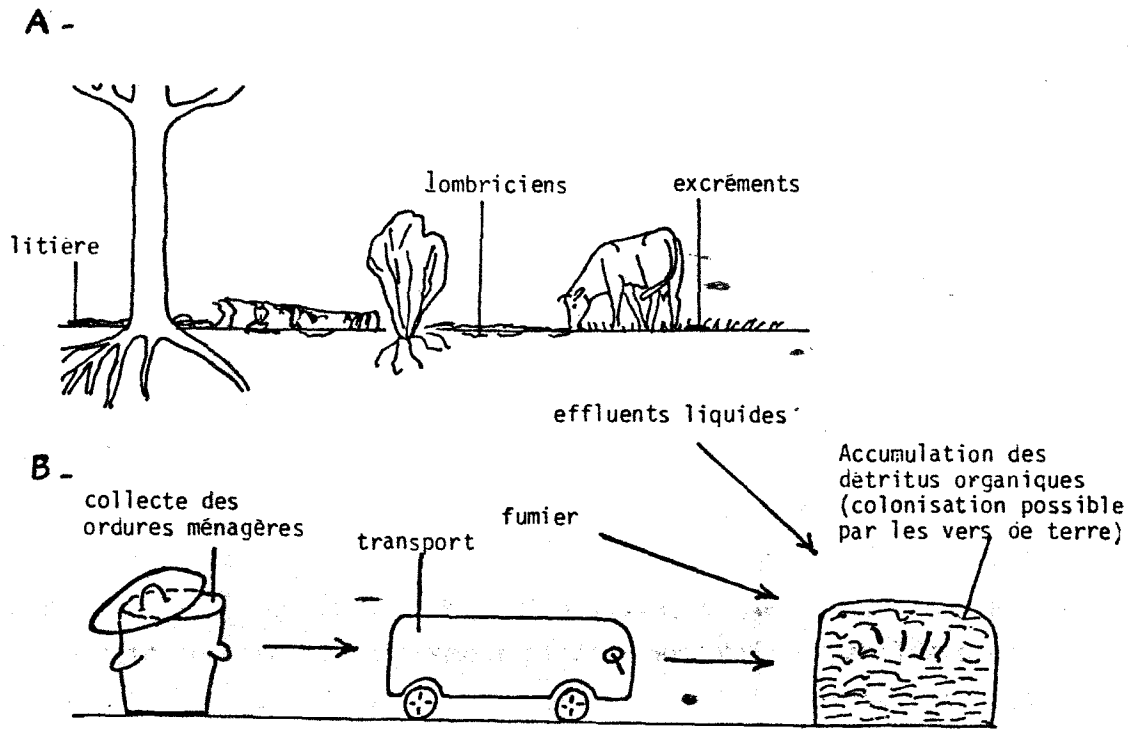
Les organismes autotrophes que sont les végétaux chlorophylliens édifient leur propre substance notamment à partir du gaz carbonique atmosphérique et fixent une partie de l'énergie solaire. Cette biomasse sera à son tour dégradée par les consommateurs (herbivores, carnivores, détritivores) avec production d'énergie, rejet de gaz carbonique et synthèse de nouvelles substances. A chaque stade, la quantité de matière organique et d'énergie diminue et tend à s'annuler. L'homme intervient dans cette chaîne alimentaire et essaie de récupérer à son profit les matières premières indispensables à son activité ; elles seront pour lui source d'aliments et d'énergie. Les résidus biodégradables résultant de cette activité devraient logiquement retourner au sol pour être recyclés comme fertilisants. Toutefois, certains déchets organiques urbains riches en fractions fermentescibles (ordures ménagères, boues d'épuration, ...) devront subir des traitements pour améliorer la qualité du produit final ; ces opérations (tri, compostage) sont indispensables notamment pour la protection de notre environnement.

Les lombriciens, en tant qu'organismes hétérotrophes, accélèrent la décomposition de la matière organique (ANSTETT, 1951) et permettent d'obtenir un produit plus stable, riche en humus. L'aptitude à la croissance et à la reproduction d'espèces lombriciennes sur déchets organiques et fumiers a déjà été signalée par GRAFF (1974), WATANABE et TSUKAMOTO (1976), HARTENSTEIN *et al.* (1979). En conditions naturelles, les lombriciens sont soumis à un prédatisme intense (FUNMILAYO, 1977 ; CUENDET, 1979) qui peut s'expliquer par la bonne qualité nutritionnelle de cet aliment (CHAUDONNERET, 1977).

L'apport de ces animaux sur déchets urbains ne fait que reproduire un processus qui existe à l'état naturel (fig. 1).

...

Fig. 1 - Analogie entre le rôle de certains vers de terre en milieux naturel (A) ou artificiel (B)



Nous avons pensé conjuguer l'action des lombriciens à celle des microorganismes pour accroître la vitesse de dégradation des matières organiques. L'intérêt de cette opération est double puisque d'une part la biomasse lombricienne obtenue peut après séparation être introduite dans l'alimentation animale et que d'autre part on peut aussi obtenir un substrat organique à base de fèces de vers de terre.

La présente étude vise à connaître le rôle global des lombriciens et microorganismes lors de la transformation par voie biologique aérobie des détritus organiques. Il s'agit à ce stade de juger de la réalisation technique et de l'efficience de ce procédé et non de préciser chaque phase de processus par ailleurs complexes.

...

I - Importance des lombriciens dans les processus de dégradation et d'humification

1.1 - Cycle de la matière organique

En milieu terrestre, les êtres vivants sont agencés en chaînes trophiques reliant le niveau de production à un certain nombre de niveaux de consommation. Les végétaux chlorophylliens situés en début de chaîne sont des producteurs autotrophes ; ils seront consommés par les organismes hétérotrophes (ongulés, insectes, rongeurs). Les détritivores (vers de terre notamment) se nourrissent de matière organique morte ; les éléments ainsi fragmentés sont plus facilement attaqués par les décomposeurs que sont les microorganismes (bactéries, levures, champignons). Dans cette suite de niveaux trophiques, les êtres vivants utilisent les produits du stade précédent ou les sous-produits de leur activité. En terme énergétique, les végétaux ne fixent au départ qu'une fraction de l'énergie solaire. L'efficacité photosynthétique, ou rapport entre l'énergie chimique et l'énergie solaire incidente, serait pour une année de 0,3 % en milieu terrestre, avec des valeurs qui peuvent atteindre 4,5 % en période de végétation optimale (DUVIGNEAUD, 1980). MACFADYEN (1961) estime à 0,5 % le pourcentage d'énergie solaire effectivement utilisé en prairie par les producteurs. D'après cet auteur, 1/6 de l'énergie sert à la respiration des plantes et, sur le quart utilisé par les herbivores, la moitié retourne au sol sous forme de fèces et de cadavres. Ainsi, plus des deux tiers de cette énergie vont transiter sous forme de matière organique morte. L'énergie solaire stockée au départ et perdue à chaque niveau trophique avec un recyclage partiel sera peu à peu dégradée dans les écosystèmes (BOUCHE, 1978a).

Les divers éléments qui constituent la matière sont constamment recyclés. Les débris végétaux, les excréments ou les cadavres sont dégradés et libèrent les éléments gazeux (carbone, azote, ...) ou solides (phosphore, fer, soufre, ...) qui les constituent.

La "litière",dont l'importance varie suivant les sols, va subir l'action de divers facteurs biologiques qui assurent sa dégradation. Dans les sols à végétation permanente, la vitesse de décomposition de la matière organique, source d'éléments fertilisants, influera tout particulièrement

...

sur la productivité primaire. En conditions aérobies, une fraction de la matière organique fraîche se "minéralise" avec libération de composés gazeux (CO_2, NH_3, ...) tandis qu'une autre partie se transforme en matière organique "humifiée", cette dernière sera à son tour minéralisée mais beaucoup plus lentement.

1.2 - Faune du sol et matière organique

1.2.1 - Matière organique et humification

Le concept d'humus pour décrire l'état de la matière organique dans les sols est ancien (MULLER, 1889). Plus récemment (MANGENOT, 1975) définit l'humification comme un "phénomène de polycondensation oxydative conduisant à des substances brunes présentes aussi bien dans l'humus lié que dans l'humus libre et même chez le vivant". L'humus est un mélange complexe formé en proportion variable d'acides fulviques, d'acides humiques, de polyuronides et de polysaccharides. La présence d'humus, produit élaboré pendant les processus d'humification, est une étape intermédiaire qui intervient lors de la décomposition des matières organiques fraîches.

Nous devons à MULLER (1889) une classification des sols en fonction de l'évolution des matières organiques ; les humus évolués correspondent à une importante population lombricienne. Pour KUBIENA (1955), l'activité animale est liée aux phénomènes d'humification qui se développent parallèlement aux rejets des animaux dans le sol. La présence de la nappe phréatique,où les conditions d'anaérobiose dominent,donne naissance à des tourbes où l'humification de la matière organique est très lente et la faune du sol très réduite. En milieu aérobie, la dégradation de la litière forestière fournira trois types d'humus très différents : les mulls, les moders et les mors (DUCHAUFOUR, 1965). Plusieurs facteurs (température, aération, matière végétale, type de sol et faune), dont l'importance varie d'un milieu à un autre, vont orienter sous nos climats la transformation de la matière organique vers l'un ou l'autre de ces humus.

Ainsi, les mulls calciques à C/N faible, caractéristique des sols à pH alcalin, proviennent de la décomposition de débris végétaux feuillus. Les conditions favorables à une intense activité biologique (bonne aération

notamment) entraînent une disparition rapide de la litière (horizon Ao très mince et bien humifié). A l'opposé, les mors à C/N élevé et pH acide sont fréquents en forêt de résineux et la matière organique peu humifiée se décompose lentement. On assiste à une absence de toute humification biologique dans l'horizon Ao très épais et à un blocage des éléments nutritifs, en particulier de l'azote.

Pour DUCHAUFOUR (1972), l'espèce végétale plus que le milieu serait déterminante dans les procesus d'humification. Certains végétaux sont connus pour être "acidifiants", tel le pin, et favoriser les mors alors que d'autres espèces végétales (frêne, aulne, graminées, légumineuses) sont génératrices de mulls. C'est lors de la première phase essentiellement biologique et dans des délais souvent très courts que s'orientent les processus d'humification.

1.2.2 - Rôle de la faune du sol

L'activité animale des sols est étroitement liée aux phénomènes d'humification (KUBIENA, 1955 ; JONGERIUS *et al.*, 1960). En utilisant la naphtalène pour réduire l'activité de la faune du sol en surface, KURCHEVA (1960) a montré dans ce cas que les litières disparaissent plus lentement. L'humification est sous la dépendance des groupes d'animaux présents ; ainsi la macrofaune (vers de terre principalement) assure un brassage intime sol-matière organique et la formation d'agrégats stables.

Dans deux types de sols différents de la hêtraie danoise, BORNEBUSCH (1930) a comparé les densités de populations animales. En présence de mulls, les biomasses animales sont importantes et essentiellement représentées par les lombriciens qui peuvent atteindre 80 % du poids animal. Toujours d'après cet auteur, les sols bruns peu évolués sont pauvres en vers de terre alors que dans les moders la mésofaune (collemboles et acariens) abonde en nombre mais reste faible en biomasse. Pour BORNEBUSCH (1950), les vers de terre et surtout ceux de grande taille (*Lumbricus terrestris*) sont présents dans les mulls bien structurés à pH neutre ; les arthropodes prédominent dans les moders et assurent une dégradation des matières organiques mais sans fournir toutefois un mélange aussi efficace avec la fraction minérale que dans les mulls.

...

MALDAGUE (1970) étudie le rôle de la pédofaune sur trois types de sol en forêt feuillue caducifoliée du Québec dominée par l'érable à sucre. Le turn-over de la matière organique en humus de type mor est dû à une mésofaune réduite, les conditions climatiques ayant à cette latitude peu d'influence. Les populations qui constituent la mésofaune croissent lors du passage du mor vers le moder et sont peu à peu remplacées par les lombricidés au fur et à mesure que l'on s'oriente vers un mull évolué. Pour cet auteur, le dynamisme de la pédobiocénose, ou rapport entre l'énergie mise annuellement à sa disposition et le temps nécessaire à la disparition de la litière, serait pour une érablière à sucre établi sur mor, moder et mull respectivement de 56,260 et 117 kcal par mètre carré et par an.

BOUCHE (1975a) souligne pour sa part l'importance du rôle des vers de terre dans l'enfouissement des litières avec pour conséquence une attaque plus rapide par les microorganismes. La biomasse lombricienne qui est une façon de traduire l'importance de ces animaux serait de 1 à 2 tonnes par hectare en prairie ou dans les mulls forestiers, soit 60 à 80 % de la masse animale des sols (BOUCHE, 1975b). En zone cultivée, les peuplements et biomasses lombriciennes augmentent dans les sols fertiles et assurent une rotation rapide de la matière organique (TEOTIA *et al.*,1950 ; BARLEY,1961). Les populations de vers de terre sont sous la dépendance des agrotechniques (travail du sol, traitements phytosanitaires, ...). EVANS et GUILD (1948a). ont montré que le labour à la charrue réduit de 30 % le niveau du peuplement initial. BACHELIER (1963) en se basant sur les données de divers auteurs rapporte un chiffre moyen de 1 tonne de lombriciens par hectare (avec des variations de 0,2 à 2,5 tonnes). Le métabolisme (mesuré il est vrai au laboratoire) est en rapport avec la quantité de matière organique assimilée ; il décroît à mesure que la taille des animaux augmente. Ainsi, dans les mulls où la biomasse lombricienne (macrofaune) prédomine, son besoin en oxygène serait au plus égal à celui des nématodes, des acariens et des collemboles (BACHELIER, 1963).

1.2.3 - Les lombriciens

Les observations de BORNEBUSCH (1950) montrent que les espèces lombriciennes de grande taille (*Lumbricus terrestris*) sont présentes dans les mulls alors que des animaux plus petits appartenant à des genres dif-

...

férents (*Dendrobaena*) se retrouvent dans les mors. Le rôle des vers de terre est sous la dépendance des espèces présentes ; la reconnaissance de ces espèces est indispensable lorsqu'on veut étudier et comprendre leur fonction.

1.2.3.1 - La classification et ses limites

La systématique classique,fondée essentiellement sur les caractères morphologiques, vise à classer les lombriciens en fonction de leur probable filiation. Elle ne nous renseigne donc pas sur la fonction de chaque espèce.

BOUCHE (1971) propose une classification de type fonctionnel en trois catégories écologiques ; elle tient compte à la fois de l'écologie, de la morphologie et de la distribution verticale des espèces terrestres.

La première catégorie, ou vers épigés, correspondent aux animaux très pigmentés sur la partie supérieure (couleur rouge), mobiles, sans diapause (seulement des quiescences) et à cycle de reproduction rapide ; ils sont bien adaptés à l'horizon de surface. Les épigés se subdivisent en trois sous-groupes : les corticoles vivant sous les écorces de troncs morts, bien adaptés aux fumiers et composts (genre *Eisenia*), les straminicoles colinisant les litières tandis que les pholéophiles habitent les galeries et les fissures.

Les vers anéciques, animaux de taille plus importante, pigmentés de brun ou de gris, très contractibles (retrait dans les galeries) constituent la seconde catégorie écologique ; ils vivent dans le sol et prélèvent la nuit la litière de surface. Les anéciques jouent un rôle important dans la fertilité des sols ; là où ils sont présents (mulls notamment), ils représentent couramment les 3/4 de la biomasse lombricienne (BOUCHE, 1975b).

La dernière catégorie, ou vers endogés, apigmentés, à forte musculature dissépimentaire sont des animaux fouisseurs et en partie géophages.

Une grande variabilité génétique existe chez les vers de terre comme chez tous les invertébrés (LUCOTTE, 1978) ; elle est due à leur mode

...

de reproduction (amphigonie, parthénogénèse, polyploïdie, ...) et à leur répartition géographique. STILLE (1980), en différenciant par électrophorèse les protéines et les enzymes qui sont les traducteurs du code génétique, a mis en évidence sur une espèce (*Aporrectodea tuberculata*) un polymorphisme important.

On considère comme appartenant à la même espèce tous les individus interféconds ; cette notion présente des limites chez les lombriciens (BOUCHE, 1972). Une démonstration de l'interstérilité chez *Eisenia fetida* a été faite par ANDRE (1963) ; nous sommes en présence de deux espèces distinctes : *Eisenia fetida andrei* et *Eisenia fetida fetida* (BOUCHE, 1972). Cette difficulté à laquelle s'ajoutent les appelations commerciales (rouge de Californie, ...) est mise à profit depuis longtemps par les marchands de vers (WILCKE, 1952). Les vers de terre issus d'élevage correspondent en réalité à un nombre restreint d'espèces (essentiellement *Eisenia fetida*).

1.2.3.2 - Rôle des vers de terre

L'importance du rôle des vers de terre a été établie par DARWIN (1881) ; depuis lors, les nombreux travaux réalisés sur les lombriciens n'ont fait que confirmer les conclusions de cet auteur.

Dans les sols, le travail mécanique ainsi que les actions métaboliques induites par les vers de terre augmentent l'activité biologique globale. Le réseau de galeries créé par ces animaux favorise également le drainage et l'aération du sol. Sur une prairie permanente dont la biomasse lombricienne représente 1,5 T en poids frais/hectare, KRETZSCHMAR (1978) rapporte les chiffres suivants pour le réseau de galeries : 380 mètres par mètre carré de surface au sol, soit un volume de 5 l/m2.

Les lombriciens absorbent et brassent une quantité importante de terre. STOCKLI (1928) estime à 10 T/ha/an la quantité de rejet émise en surface pour un jardin et à 80 T/ha pour un terrain de golf. D'après BEUGNOT (1977), la production annuelle de turricules sur une prairie naturelle varie de 29,3 T/ha à 134 T/ha ; ces rejets sont fonction des

...

espèces présentes (importants pour les anéciques) et plus forts à l'époque où l'activité des vers de terre est maximale (automne et printemps). Cette activité, d'autant plus marquée que le sol est compact, se traduit par une remontée des particules fines en surface (STOCKLI, 1928).

Les vers de terre ont un rôle catabolique important ; ils participent activement à la dégradation des matières organiques. Quelques auteurs ont tenté de chiffrer le mouvement d'éléments effectivement assimilés par les lombriciens et ceci à partir de cadavres, mucus, rejets, ... Le flux d'azote serait de l'ordre de 100 kg/ha/an en zone équatoriale (DASH et PATRA, 1979) ou tempérée (SATCHELL, 1967), alors que pour le carbone, en tenant compte du C/N moyen des lombriciens, cette valeur serait 4 à 5 fois plus forte (BOUCHE, 1967).

La litière de surface entraînée dans les galeries et placée à température et humidité constantes sera plus rapidement attaquée par les microorganismes. L'ingestion des fractions minérales et organiques assure un bon brassage des éléments, ceci accroît la surface des débris végétaux et facilite l'attaque par la microflore. ROUELLE (1977) a mis en évidence la présence d'importants peuplements microbiens dans les turricules et les galeries de vers de terre par rapport au sol en place. ANSTETT (1951), lors de la fabrication de fumier artificiel à partir de sarments de vigne, montre qu'en présence d'*Eisenia fetida* la minéralisation est plus intense ; ce surcroît de minéralisation se poursuit même après l'élimination des lombriciens.

1.3 - Compostage des matières organiques : utilisation des lombriciens

1.3.1 - Introduction

Sur la fraction de biomasse élaborée par les plantes, une quantité importante (litière, racines, ...) retourne directement au sol pour subir l'action des décomposeurs. En pâturage sur prairie, la biomasse végétale est restituée directement et en quasi totalité au sol (seuls la viande ou le lait sont exportés). Lorsque le végétal est destiné à un usage énergétique (bois pour chauffage par exemple), la dégradation des substances carbonées est totale et seule la fraction minérale reste disponible.

...

De tout temps l'homme a utilisé la biomasse végétale pour répondre à ses besoins (aliments, combustible, ...) ; l'apparition de procédés industriels et leur concentration lui permettent d'utiliser au mieux cette biomasse. Toutefois, les résidus biodégradables issus de ces activités (effluents d'élevage, déchets urbains, boues de laiterie ou de conserverie, ...) devront être restitués au sol comme amendement organique.

En agriculture traditionnelle, l'association polyculture-élevage conduit à produire un résidu "le fumier", mélange de substances végétales et de fèces directement recyclé sur la ferme. L'évolution technologique de certaines productions animales conduit à concentrer et modifier la composition de l'effluent (c'est le cas du lisier de porc). Les nouvelles contraintes ainsi créées, aussi bien environnementales (dégagement d'odeur, risque de pollution des nappes phréatiques lors de l'épandage massif de l'effluent liquide) qu'économiques (problème de strockage, coût du transport), augmentent les difficultés de valorisation et d'utilisation de ces résidus. Certains traitements appropriés (séchage, désodorisation, ...) devront être effectués pour notamment réduire les nuisances.

Le même type de problème apparaît en zone urbaine où le résultat de l'activité humaine conduit à la production d'ordures ménagères qu'il faut faire disparaître : 11 millions de tonnes ont été produites en 1972 (G.E.E.R.S., 1974). Divers procédés de traitement sont utilisés pour éliminer les ordures ménagères collectées ; aucun ne permet de satisfaire les exigences économiques (ils sont tous déficitaires). Trois types de traitements sont les plus utilisés : le broyage avec mise en décharge, l'incinération avec ou sans récupération d'énergie et enfin le compostage de la fraction organique obtenue après un tri partiel des produits recyclables (verre, métaux, plastique). Ce dernier procédé s'il marque le pas actuellement au niveau national et ne dessert que 18 % de la population (Anonyme, 1979) permet un recyclage d'une matière première. Les boues de station d'épuration des eaux usées ainsi que d'autres résidus organiques urbains (matières de vidange) ou industriels (déchets de conserveries) peuvent au même titre être utilisés en agriculture.

...

1.3.2 - Déchets et compostage

On considère comme déchets l'ensemble des biens (matériaux et éléments) qui ne possèdent dans des conditions de lieu et de temps de leur production ni valeur marchande ni état suffisant pour une valorisation éventuelle compte tenu soit des connaissances technologiques, soit des données économiques du moment. Les matières organiques représentent une importante fraction de certains déchets (ordures ménagères, déchets de conserveries, etc.) voire leur totalité (boues de stations d'épuration, lisiers, ...). La production de ces déchets organiques tend à augmenter (une réduction de leur formation paraît difficile) ; il faut les éliminer tout en les valorisant.

1.3.2.1 - Ordures ménagères et compostage

L'incinération des ordures ménagères, procédé largement utilisé, consiste à détruire un engrais et un amendement organique avec gaspillage d'énergie pour la combustion. Les produits issus des décharges brutes fournissent à l'agriculture un matériel appauvri. De plus, ces décharges occasionnent des nuisances pour les riverains avec risque de pollution pour les eaux superficielles et souterraines.

La fraction organique des ordures ménagères destinée à subir une fermentation est obtenue après récupération des matières premières (carton notamment) contenues dans les déchets bruts. Les systèmes les plus sophistiqués de récupération des cartons sont très partiels ; la fraction organique recueillie est encore riche en cellulose et biologiquement active.

Deux types de traitement utilisent cette aptitude naturelle à la dégradation des déchets organiques urbains. L'un d'eux consiste en une fermentation par voie biologique anaérobie avec production d'un combustible (le méthane) et d'une boue à usage agricole alors que l'autre permet d'obtenir en conditions d'aérobiose un produit riche, ou compost, destiné à l'amendement des sols. Ce dernier procédé aérobie permet grâce aux populations de microorganismes indigènes (bactéries, champignons,...) une stabilisation des déchets organiques (réduction des fermentations spontanées, des mauvaises odeurs, ...) et la production de composés simples : CO_2, H_2O, minéraux, humus, ... La norme Afnor U.F.U. 44051 définit le compost comme

...

un mélange de produits domestiques qui, au cours de sa fabrication, a subi un échauffement naturel de 60°C ou plus, pendant une durée au moins égale à 4 jours et précédé ou suivi de certaines opérations mécaniques (triage, broyage, tamisage, ...). Selon cette norme, les composts urbains sont classés selon leur degré de maturité (frais, demi-mûr, mûr) et leur composition granulométrique, alors que leur teneur par rapport à la matière sèche doit être pour la matière organique supérieure à 20 % et pour l'azote inférieure à 2 %.

Lors du compostage, les germes pathogènes et les graines ont été partiellement détruits durant la phase thermophile. Le compost mûr constitue un excellent engrais organique bien stabilisé, à faible rapport C/N et dont les risques d'effet dépressif sur les cultures ne sont plus à craindre. En réalité, les composts sont loin de répondre à cet idéal de maturité. Notons enfin que les opérations de tri pour éliminer les impuretés des ordures ménagères (plastique, verre) sont facilitées après compostage : les matières organiques dégradées sont de granulométrie plus fine.

1.3.2.2 - Avenir du compostage des déchets urbains

La nature des ordures ménagères,avec l'emploi de matières non dégradables,s'est modifée depuis quelques années (accroissement de la quantité de verre, de plastique, ...) ; le tri du compost avant une utilisation agricole s'avère indispensable. Parallèlement, le tonnage des ordures ménagères produit continue à croître et la composition évolue ; 12 millions de tonnes contenant 30 % de papiers et cartons ont été produites en 1972 alors que la prévision pour 1985 est estimée à 24 millions de tonnes avec 45 % de papiers et cartons (BAILLY, 1975). Cette augmentation des matières premières compostables montre que le procédé de compostage devrait être plus largement utilisé à l'avenir.

1.3.2.3 - Les déchets liquides

Des procédés de traitement analogues sont utilisés pour l'épuration des eaux résiduaires d'origine urbaine ou agro-alimentaire. Ils visent à augmenter la siccité des boues obtenues après épuration, à sta-

...

biliser le produit par dégradation des matières les plus fermentescibles et à l'hygiéniser. Les boues liquides provenant de digesteurs aérobies sont riches en matières facilement dégradables et éléments fertilisants (N, P_2O_5). L'adjonction de ces boues à un produit carboné plus sec (ordures ménagères notamment) fournit un substrat qui se prête bien à un compostage rapide (THIBAUDAT, 1977) ; le rapport C/N voisin de 25 à 30 est propice au développement des microorganismes (PARENT, 1976).

1.3.3 - Compélevage et lombricompost

1.3.3.1 - Historique

Très tôt, BARRETT (1949), aux U.S.A., attribue aux vers de terre épigés (*Eisenia fetida* en particulier) les propriétés des espèces lombriciennes anéciques et endogées des auteurs européens. Cette publicité mensongère est à l'origine de la création de nombreuses entreprises de vermiculture (WILCKE, 1952) qui ont trouvé un débouché auprès des amateurs.

Quelques chercheurs ont mis l'accent sur l'intérêt des lombriciens comme source de protéines (McINROY, 1971) sans pour autant envisager leur production. GRAFF (1974) a montré l'aptitude sur déchets organiques d'*Eisenia fetida* à une production rapide de biomasse ; alors qu'aux U.S.A., à partir d'animaux fournis par les vermiculteurs, l'équipe de Syracuse, sous la direction de Daniel DINDAL, cherche à faciliter le recyclage des boues d'épuration. Aujourd'hui, valorisation des matières organiques et production de lombriciens sont considérées simultanément par plusieurs équipes (HARTENSTEIN aux U.S.A., GRAFF en Allemagne, nous-mêmes en France).

Suivant une nomenclature proposée par BOUCHE, j'appellerai d'une façon générale lombricompostage tout traitement de matières organiques où l'on utilise les lombriciens ; que ce procédé vise à un élevage de lombriciens ou à une production de matières organiques sous les effets synergiques macrobiologiques et microbiologiques. Nous appellerons la fraction organique ainsi obtenue "lombricompost". Le lombricompostage poursuivra différents objectifs :

...

- produire des lombriciens : vermiculture aux U.S.A. principalement,
- produire un lombricompost : vercomposting (U.S.A., Italie, ...),
- produire les deux à la fois : c'est le cas du compélevage.

1.3.3.2 - Objectif

L'élevage sur déchets organiques de vers de terre convenablement choisis peut s'inscrire dans le cadre du traitement par voie biologique aérobie ; les lombrics participent activement aux phénomènes d'humification pour donner des humus bien évolués (cf. § 1.2.2). Les conditions propices à leur développement sont naturellement créées lors du compostage : aliment en cours de dégradation, aération, humidité. Seule la température élevée durant la phase thermophile est incompatible avec la survie des animaux. MILES (1963a)observe qu'après une exposition de 12 heures à 33,3°C pour *Eisenia fetida* (Sav.) et 25,7°C pour *Allolobophora terrestris* la mortalité atteint 80 %, 48 heures après la remise des animaux à température ambiante. Pour obtenir une croissance optimale, des températures de 25°C (TSUKAMOTO *et al.*, 1977) ou comprises entre 20°C et 29°C (KAPLAN *et al.*,1980a) seraient nécessaires pour *Eisenia fetida* alors que pour *Eudrilus eugeniae* cet optimum est atteint pour des températures situées entre 24 et 29°C (NEUHAUSER *et al.*, 1979).

Le choix de procédés adéquats devrait permettre de contrôler et d'optimiser ces paramètres et de les adapter à la biologie des lombriciens. Le maintien d'une température optimale pour l'activité des vers (supérieure à la température moyenne du sol pour les espèces épigées) serait fourni par la thermogenèse.

Les déchets organiques dans lesquels les lombriciens sont introduits actificiellement vont subir en leur présence un compostage accéléré avec production d'une biomasse animale. Les vers de terre, lors de l'ingestion, prélèvent et fractionnent les débris organiques ; ce brassage des éléments modifie le milieu d'élevage et la microflore présente. Les sécrétions digestives des vers de terre détruiraient certaines bactéries (DAY, 1950) alors que PARLE (1963a) observe une croissance exponentielle de bactéries et actinomycètes dans l'intestin de *Lumbricus terrestris*. L'activité microbienne mesurée par respirométrie serait 2 à 3 fois plus élevée dans

...

les rejets des vers de terre que dans le sol en place (PARLE, 1963b). Les interactions matière organique-lombriciens-microorganismes sont étroitement liées. Nous appellerons "compélevage" la dégradation des substances organiques sous l'action des microorganismes et des lombriciens ; ce milieu constamment en évolution sert de support pour l'élevage des vers de terre. Le substrat organique va être soumis aux ingestions (avec coprophagie probable) et brassages successifs des lombriciens ; "le lombricompost" essentiellement composé de fèces de vers de terre désignera le produit obtenu après leur action.

1.3.4 - Cadre de l'étude

Les performances (croissance, reproduction) des vers de terre sur matières organiques vont dépendre de nombreux facteurs : espèces de vers de terre, charge lombricienne, température, humidité, type de substrat qui feront l'objet de notre étude. Les prélèvements directs de vers de terre autochtones (WATANABE, 1976) sur matières organiques en décomposition sont difficilement interprétables en raison de la complexité du milieu et des conditions peu ou pas contrôlées. De plus, la seule migration des vers au sein d'un tas de compost soumis aux aléas climatiques (dessiccation, température, ...) rend difficile leur échantillonnage.

Les études en conditions contrôlées nous ont paru plus adaptées pour définir les paramètres optimaux de conduite du compélevage. L'accroissement en poids des vers, organismes hétérotrophes, ne peut se faire qu'à partir de sources organiques dégradables (cellulose, microorganismes, ...). Ces processus d'anabolisme (croissances bactérienne et lombricienne) sont couplés à des réactions de dégradations ou catabolisme qui se produisent lors du compélevage.

La biomasse microbienne contenue dans les composts peut être déterminée par la mesure de l'Adénosine-Tri-Phosphate (A.T.P.) (COLIN,1977) alors que des tests respirométriques caractérisent l'activité globale (BENISTANT, 1978 et NICOLARDOT, 1979). Ces derniers tests ont montré que la consommation d'oxygène qui traduit l'intensité des processus cataboliques décroît au cours du compostage. L'aptitude des substrats organiques à la dégradation conditionnera dans une large mesure le métabolisme lombricien.

...

Les sources alimentaires nécessaires aux vers peuvent provenir du substrat organique, des microorganismes présents ou des produits de dégradation ; l'introduction de vers de terre accroîtra les processus cataboliques lors du compélevage.

Des études complémentaires sur la valeur du compost et du lombricompost permettront de préciser l'influence des vers de terre sur l'intensité des processus de dégradation des matières organiques.

II - Méthode d'élevage et choix des matériels

Les Oligochètes, animaux marins à l'origine, se sont adaptés à la vie terrestre. Les formes épigées ont conservé leurs moeurs saprolytiques et vivent dans des litières en décomposition. La pigmentation rouge des tissus cutanés, caractéristique des formes épigées, aurait un rôle protecteur contre les radiations lumineuses et son mimétisme avec la litière leur permettrait d'échapper aux prédateurs (oiseaux, ...). Leurs téguments mous les protègent peu contre la dessiccation et leur adaptation à la vie terrestre reste fragile. Toutefois, leur rythme de reproduction et de croissance rapide ainsi que leur grande mobilité (BOUCHE, 1972) permettent une colonisation rapide des milieux organiques créés par l'homme (tas de fumier, ..). Inversement, les déchets organiques destinés à l'élevage de ces espèces doivent posséder une énergie potentielle qui mise à la disposition des organismes vivants (vers de terre et microorganismes) assurera leur croissance.

2.1 - Elevage des lombriciens

2.1.1 - Techniques courantes d'élevage

Le dispositif d'élevage doit permettre de contrôler les paramètres suivants : température, aération et humidité du substrat. Les élevages sont souvent réalisés dans des caves (AVEL, 1929) ou des chambres

...

climatisées (MICHON, 1954) pour maintenir la température constante. Ces techniques ne tiennent pas compte des gradients et des cycles thermiques qui existent en milieu naturel. L'aération des milieux d'élevage doit être efficace afin d'éviter les problèmes d'anoxie qui peuvent entraîner des retards de croissance, des mortalités et modifier la microflore existante. Cette ventilation produit une dessiccation du substrat qu'il faut réhumidifier ; MICHON (1954) procède par arrosage périodique alors que AVEL (1929) et JEANSON (1968) utilisent l'humectation par ascension capillaire.

2.1.2 - Techniques utilisées

2.1.2.1 - Elevage de masse

L'objectif de ces élevages consiste à maintenir une population suffisante de vers (tous stades confondus) destinée à la réalisation d'expériences pour contrôler les performances des animaux.

Ces élevages sont réalisés dans des bacs de 40 l remplis aux 2/3 de substrat ; un couvercle grillagé assure l'aération et évite la fuite des animaux. Un orifice au fond du bac permet d'évacuer l'excès d'eau.

Les bacs sont placés à 22,5°C dans une atmosphère à 80-90 % d'humidité relative ; une pulvérisation d'eau hebdomadaire entretient l'humidité du substrat.

2.1.2.2 - Dispositif d'élevage sans humidification

Cette technique d'élevage permet de placer les animaux en conditions aussi contrôlées que possible sans perturber le milieu d'élevage. Les boîtes, bien hermétiques pour éviter la fuite des animaux, sont placées à l'obscurité en salles thermostatées ($\pm$ 0,5°C). Un dispositif à ventilation, décrit par BOUCHE (1972) et modifié par FERRIERE *et al.* (1981) est utilisé (fig. II). L'air saturé d'eau et ramené à la température de la case est renouvelé constamment au niveau des boîtes ; un débit minimal de 6 l/h est fourni à chaque robinet. Les boîtes utilisées sont en polyéthylène d'une contenance de 1,5 et 3 l ; le remplissage n'excède jamais les 3/4 de leur capacité (fig. III).

...

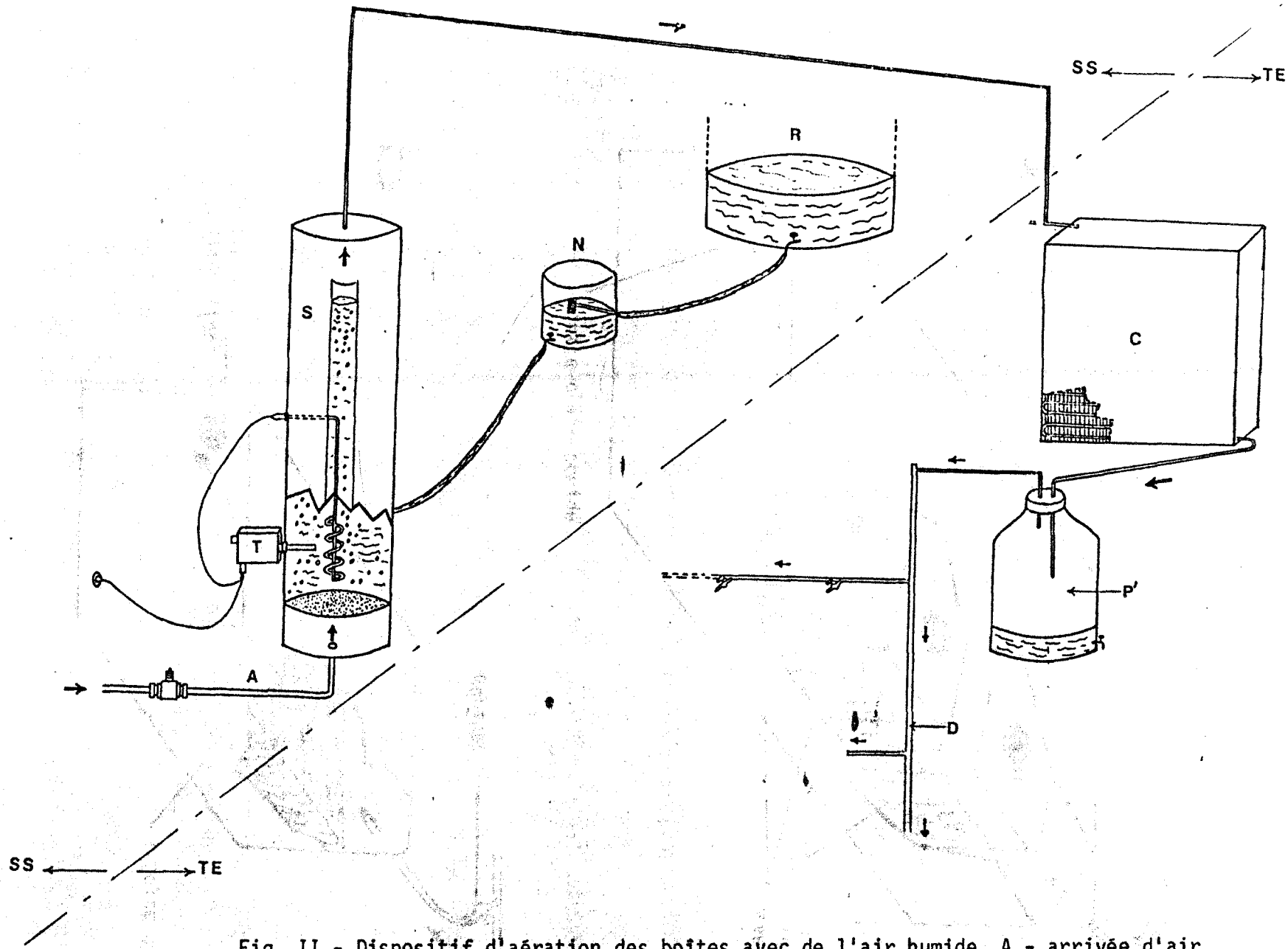
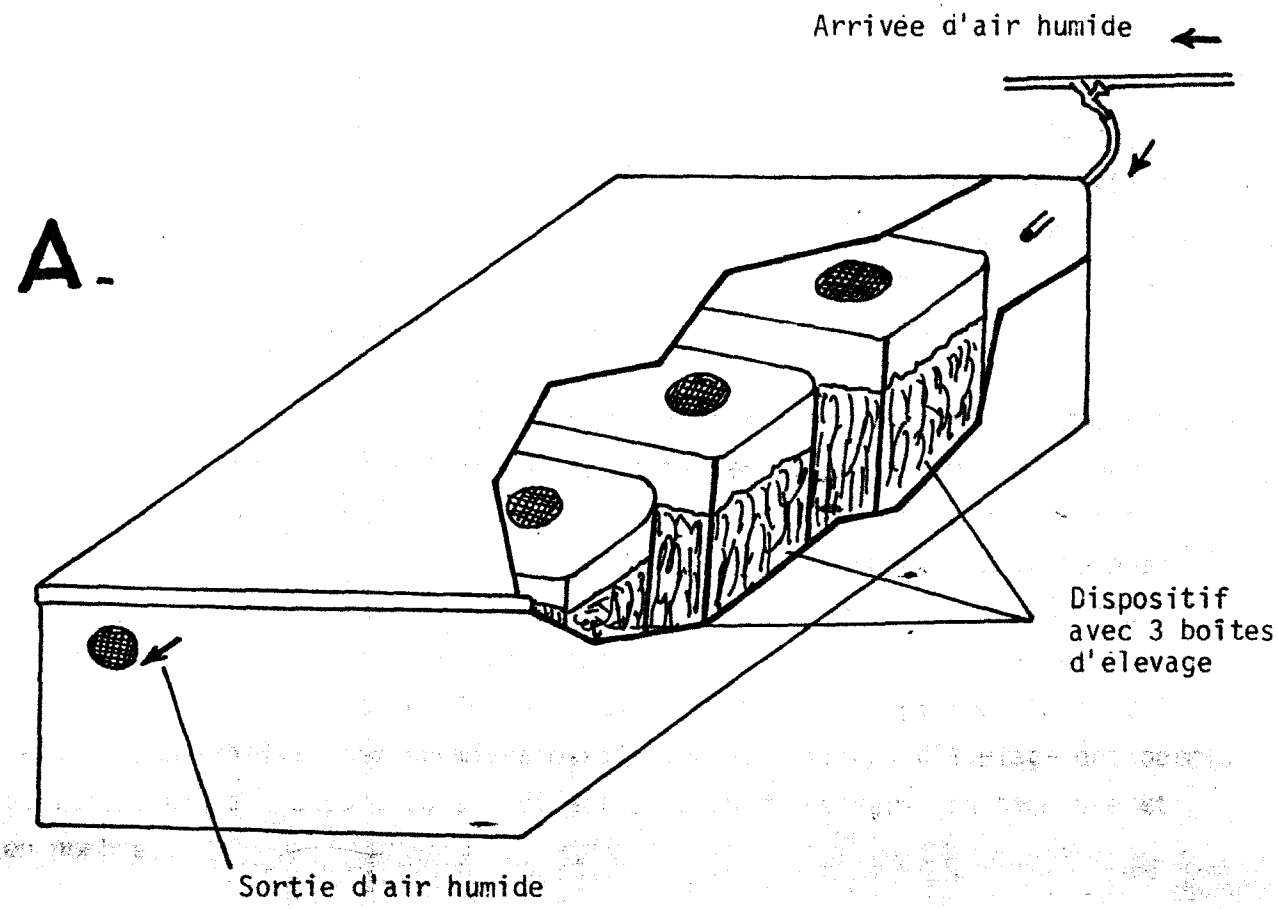
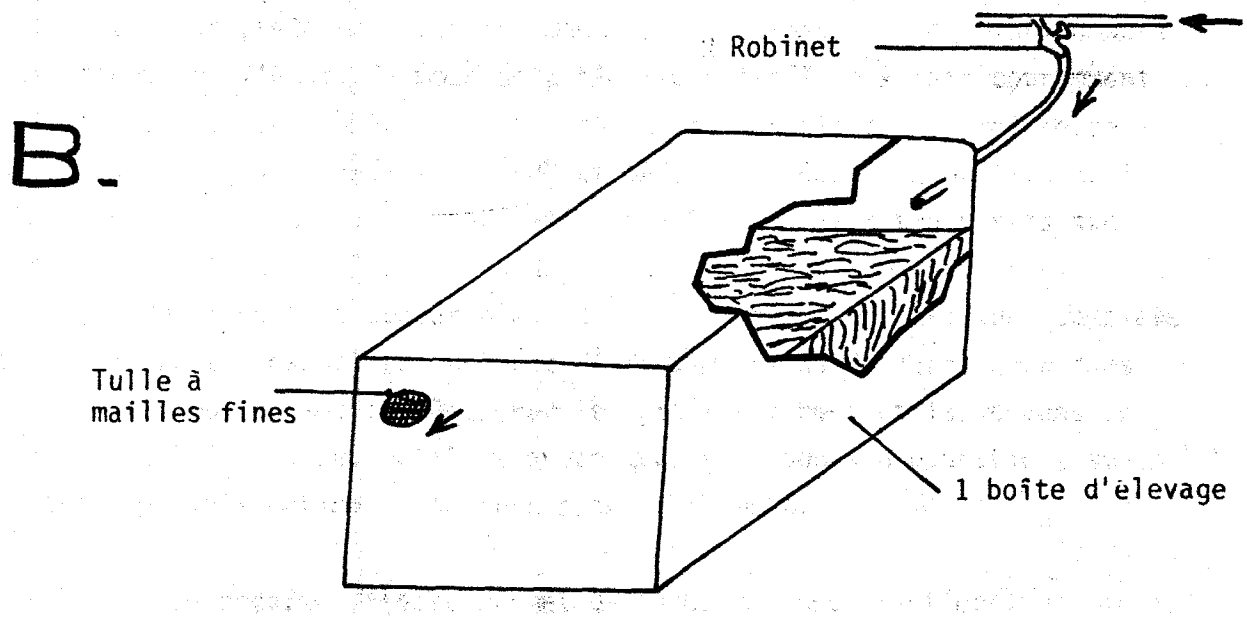


Fig. II - Dispositif d'aération des boîtes avec de l'air humide. A - arrivée d'air, T - thermo-contrôle, S - saturation, N - bac à niveau, R - réserve d'eau, C - condenseur, P' - piège à eau, D - distributeur d'air, SS - dispositif de sursaturation, TE - salle d'élevage climatisée.

Fig. III - Schéma des boîtes d'élevage pour 500 g (A) ou 1 kg (B) de substrat humide, aérées avec de l'air saturé d'eau.





2.2 - Manipulations des animaux et mesures

2.2.1 - Séparation des vers de terre de leur milieu

Une séparation automatique des animaux du substrat d'élevage permet d'alléger les travaux de tris manuels dans le cas d'études portant sur un grand nombre d'individus. Une telle méthode s'avère indispensable si l'on veut produire au niveau industriel un aliment vers de terre dans des conditions économiques satisfaisantes.

Deux types de procédés sont utilisés pour séparer les lombriciens : l'un deux, ou procédé éthologique, exploite les propriétés de fuite des animaux sous divers stimulus alors que l'autre met en oeuvre des moyens physiques. Des mises au point sur l'efficacité des méthodes de prélèvement figurent dans BOUCHE (1969) et SATCHELL (1969). Un procédé nouveau, non décrit ici, qui tient compte des méthodes existantes, donne déjà satisfaction ; il permet de séparer les animaux et ceci dans l'optique d'une utilisation industrielle. Des premiers essais sur nos milieux d'élevage ont permis de récupérer,par rapport au tri direct,80 à 90 % des vers (en biomasse et en nombre).

La récolte directe adoptée pour nos essais est l'une des méthodes de tri les plus précises ; par tri manuel, les animaux et le lombricompost sont obtenus en l'état. Ce mode de prélèvement fastidieux mais couramment utilisé (ZICSI, 1962 ; ZAJONC, 1967) permet de recueillir de préférence les animaux de grande taille (NELSON et SATCHELL, 1962). La qualité de la séparation dépend du trieur (habileté, assiduité, ...) ; trois tris successifs ont été ici réalisés afin de récupérer le maximum de vers et d'obtenir des résultats comparables. J'ai, à titre de comparaison, complété la méthode de tri manuel par un procédé densimétrique de flottation dans l'eau sucrée qui permet de récupérer les petites formes et les cocons en surface (tableau I). Les matières organiques (ici boues d'épuration) sont restées dans la fraction inférieure essentiellement.

La récolte directe permet de récupérer une fraction importante de la biomasse présente (au moins 90 %) ; par contre, elle sous-estime le nombre de jeunes et de cocons contenus dans le milieu (tab.1).

...

Milieu	Tri manuel		Tri complémentaire par densité		Efficacité du tri manuel	
	Nombre	Biomasse	Nombre	Biomasse	Nombre	Biomasse
2 kg de boues de station d'épuration (jeunes et cocons)	126 jeunes $\bar{x}$ = 45,3 mg ± 41,2	8 426 mg	48 jeunes $\bar{x}$ = 17,4 mg ± 10,3	236 mg	72,4 %	97,3
	16 cocons	-	6 cocons	-	72,7 %	-
2 kg de boues de station d'épuration (adultes et jeunes)	110 adultes $\bar{x}$ = 345,2 mg ± 46,2	37 972 mg	2 adultes $\bar{x}$ = 310 mg	620 mg	98,2	98,4 %
	45 jeunes $\bar{x}$ = 170,1 mg ± 84,3	7 654 mg	10 jeunes $\bar{x}$ = 46,1 mg	461 mg	81,8 %	94,3 %

Tableau I - Efficacité du tri manuel sur boues d'épuration ($\bar{x}$ est le poids moyen indivuduel) avec l'espèce *Eisenia fetida*.

2.2.2 - Pesée des animaux et stades

La vie des lombriciens est marquée par plusieurs étapes caractéristiques de l'âge des animaux : cocons, immatures, subadultes et adultes. L'accouplement est de règle chez les lombriciens (animaux hermaphrodites) avec fécondation croisée. J'ai fréquemment trouvé lors des manipulation des animaux bien clitellés accouplés. La présence du clitellum, ou selle sous forme d'anneau située entre le 26ème et le 32ème segment chez *Eisenia fetida*, caractérise l'état adulte. A ce stade où le poids est maximal débute la production de cocons.

La période qui s'étend de l'éclosion jusqu'à l'apparition des caractères sexuels traduit l'état juvénile ou immature. Les subadultes comprennent les jeunes animaux dont les organes sexuels sont en cours de formation et les adultes qui pour diverses raisons (pénurie alimentaire) ont un clitellum en régression.

En plus de ces caracteres, nous avons utilisé la pesée qui beaucoup plus que d'autres critères morphologiques (longueur, diamètre) jadis utilisés traduit avec précision les variations liées à un gain ou une perte de tissus. Les variations pondérales inhérentes aux diverses manipulations qui précèdent la pesée peuvent être importantes. MAZAUD (1979) a observé en une heure des pertes de poids de 20 % pour des animaux placés à l'air libre alors qu'un accroissement pondéral est observé après immersion dans l'eau. Un séjour prolongé en l'absence d'alimentation provoque également une perte de poids par défécation des vers.

Les animaux sont prélevés du substrat d'élevage à la pince Brucelle et déposés dans une boîte qui contient 3 à 4 cm d'eau ; la fuite des vers par reptation verticale est alors impossible. Plusieurs lavages successifs avec décantation permettent d'éliminer une fraction importante des matières organiques en suspension. Le contenu du bac est déversé sur un tamis à mailles très fines (0,200 mm) qui retient les animaux. Ces derniers seront mis sur papier filtre humide en attendant la pesée qui s'effectue après ressuyage des vers sur papier filtre. Les cocons sont traités de la même manière avant la pesée ; il faut éviter la dessiccation des cocons qui entraîne une rétraction des parois et la mort des embryons.

...

Les diverses opérations nécessaires avant la pesée n'excèdent jamais une heure (le lavage doit être rapide) ; la reproductibilité des manipulations permet d'obtenir des mesures comparables.

2.3 - Choix des animaux

En conditions naturelles, le déboisement conduit à un appauvrissement faunistique qui affecte particulièrement les lombriciens épigés. La moindre production de litière sous prairie, les écarts de température en surface et la dessiccation plus forte qu'en zone boisée expliquent la quasi disparition de certaines espèces : *Dendrobaena, Eisenia,* ... (BOUCHE, 1972). Par contre, *Lumbricus castaneus*,espèce straminivore, se rencontre fréquemment dans les prairies où il pullule dans les déjections de bovins. De fortes doses d'application de lisier de bovins en prairie (2 ou 3 épandages annuels à raison de 112 m3/ha) provoquent une diminution des peuplements lombriciens, puis une recolonisation rapide par les formes épigées (*L. castaneus, L. rubellus,* ...) qui utilisent les excréments (CURRY, 1976).

Notre choix d'espèces s'est porté sur les formes épigées, déjà préadaptées à la litière ou aux tas de matière organique en décomposition (*Eisenia fetida*).

2.3.1 - *Lumbricidae*

2.3.1.1 - *Eisenia fetida*

a) *Eisenia fetida andrei* (P 1756). Longueur : 50-90 mm. Poids : 200-600 mg. Pigmentation rouge vineux uniforme, clitellum orange. Cette sous-espèce épigée corticole se rencontre rarement en milieu naturel ; on peut cependant la collecter dans les sols riches en matières organiques (jardins,...) souvent à proximité des tas de compost. DE BLIGNIERES (1980) a pu constater une absence de colonisation par *Eisenia fetida* de déchets urbains mis en décharge sur lande de bruyère. L'inexistence dans l'aire immédiate d'accumulations organiques où prolifèrent ces animaux expliquerait cette carence.

...

Les animaux collectés pour l'élevage proviennent d'un tas de fumier de bovins (1 m de hauteur) en cours de compostage (P 1756). Les adultes et cocons abondent dans les endroits aérés où la décomposition est active alors que sur milieu compact et bien décomposé je n'ai collecté que quelques larves. Des animaux appartenant à des espèces différentes : *Eisenia eiseni*(Levinsen, 1884)et *Dendrobaena rubida rubida* (Savigny, 1826) ont été également identifiés.

D'autres individus ont été collectés sur l'aire de compostage des ordures ménagères en provenance de Châlon-sur-Saône (P 1759). De couleur rouge foncé, ces vers étaient présents en bordure de tas d'ordures ménagères âgées de trois semaines et en pleine fermentation (endroits humides et température comprise entre 20 et 30°C). Cette espèce a été identifiée sur ordures ménagères broyées provenant de décharges de deux ans d'âge (F-44 Châteaubriand), en bordure des lits d'épandage de boues d'épuration issues de fermenteurs anaérobies (Longvic) et en mélange avec l'espèce *Eisenia fetida fetida* sur tas de fumier en cours de compostage. Nous appellerons Efp 1756 la souche issue de ces divers prélèvements.

b) *Eisenia fetida fetida* (P 1758)

Le seul critère qui permet de différencier cette espèce de la précédente est la coloration. Pour chaque anneau, la surface pigmentée rouge occupe une bande médiane transversale ; elle alterne avec une bande non pigmentée qui prend par transparence la couleur jaune du tissu chloragogène. Par comparaison avec *Eisenia fetida andrei*, la taille des animaux est ici plus importante (50-120 mm) ; ils sont hypersensibles aux excitations cutanées (toucher, lumière). Ces stimulations provoquent le rejet d'un liquide coelomique jaune, d'odeur fétide ; cet animal est pour cette raison peu prisé des pêcheurs.

J'ai collecté les animaux à Plombières-lès-Dijon à la base d'un lit de séchage de boues urbaines âgées de 6 mois (sous Efp 1758).

...

c) Conclusions

Les deux espèces d'*Eisenia fetida* sont aisément identifiables ; on remarque malgré tout une variation dans la taille des bandes pigmentées pour *Eisenia fetida fetida* (ou de l'hybride stérile issu du croisement entre ces deux espèces) et un changement de l'intensité de coloration pour *Eisenia fetida andrei*. ANDRE (1963) a montré que l'hybridation entre ces deux espèces fournissait des cocons généralement stériles (5 cocons éclos sur 137 mis à éclore) et seuls les hybrides issus du croissement: *f typica* (*E. fetida fetida*) x *f unicolor* (*E. fetida andrei*) fourniraient des cocons eux-mêmes stériles.

Nous avons isolé ces deux espèces afin d'éviter les risques de production d'hybrides ou de cocons stériles.

2.3.1.2 - *Eiseniella tetraedra*

Longueur 30-60 mm ; poids 85-150 mg ; forme quadrangulaire avec souches parthénogénétiques ; pigmentation cutanée brun vert. Cette espèce a été prélevée à Lacaune dans les alluvions et détritus organiques rejetés en bordure de rivière (P 1099).

2.3.1.3 - *Dendrobaena subrubicunda*

Longueur 30-60 mm ; poids 80-100 mg ; pigmentation cutanée rouge violacé. Les individus ont été collectés à Lacaune, au même endroit que l'espèce précédente, de préférence dans des milieux putrides (P 1099).

2.3.2 - Gossoscolecidae

Ces individus rapportés du Vénuezuela ont tous les caractères des animaux épigés (couleur rouge, animaux très mobiles). Ils proviennent d'un sol organique.

...

2.3.3 - Conclusions

Tous les vers de terre utilisés pour nos élevages appartiennent à la série des *Lumbricina*. Les élevages de *Lumbricus castaneus* en mélange avec d'autres espèces (*Allolobophora chlorotica*) entrepris sur terre humifère ont été peu concluants. Cette espèce s'est par ailleurs mal adaptée sur déchets organiques ; nous l'avons donc éliminée.

Une autre espèce *Eudrilus eugeniae*, vivant sous climat équatorial et très active en surface pendant la saison des pluies (MADGE, 1969) serait une excellente candidate pour le compostage du fumier de cheval et des boues résiduaires de stations d'épuration (NEUHAUSER *et al.*, 1979). Elle appartient à la série des *Magascolecina*.

La confusion dans les termes (1.2.3.1) pour désigner les lombrics ou les espèces lombriciennes contribue à attribuer à certains vers des propriétés qu'ils n'ont jamais eues. Sous le vocable *Lumbricus terrestris*, on désigne une espèce lombricienne particulière (*Lumbricus herculeus* Savigny, 1826) ou plus généralement les vers de terre dans leur ensemble (BOUCHE, 1970). L'espèce *Lumbricus terrestris* appartient à la catégorie des épi-anéciques et est donc mal adaptée aux composts ; de fait, je n'ai collecté qu'un individu beaucoup moins coloré qu'à l'habitude sur boue bien décomposée. Sous le vocable "*Lumbricus terrestris*", vers qui dégradent activement les fèces d'animaux domestiques, FOSGATE (1972) désigne probablement des vers de terre appartenant à la catégorie des épigés. Inversement, BARRETT(1949) attribue à "*L. terrestris*" élevé sur composts les propriétés agronomiques d'autres lombriciens (anéciques notamment) alors que dans les sols ils meurent très vite après leur introduction (WILCKE, 1952).

2.4 - Choix des matières organiques et préparation

2.4.1 - Choix des matières organiques

Pour les élevages de masse, la conduite a été réalisée sur des matières diverses : ordures ménagères, boues d'épuration, fumier de bovins

...

ou de cheval, terreau, litières forestières de feuillus. Un apport de calcium (sous forme de $CaCO_3$ à 0,5 %) a été effectué ; ce cation est indispensable à la glande de Morren qui assurerait les fonctions homéostatiques (rejet de CO_2 sous forme de $CaCO_3$) lorsque le milieu est riche en gaz carbonique (AVEL, 1959). Cette hypothèse sur le rôle de la glande de Morren est discutée (PIEARCE, 1972) ; elle servirait d'après cet auteur à éliminer le calcium en excès.

Notre choix pour étudier les performances des lombriciens s'est porté sur des déchets organiques urbains destinés au compostage et en provenance d'unités de traitement existantes. Pour les ordures ménagères, nous avons recueilli la fraction organique obtenue après broyage, déferraillage puis tamisage ; le produit a, suivant les cas, subi une fermentation accélérée et parfois un début de compostage. Les boues de station d'épuration sont obtenues après ressuyage sur lit de séchage ou après dessication. Pour leur conservation, les échantillons ont été séchés à l'air libre ou maintenus à basse température (+ 4°C). Notre choix a porté sur des déchets organiques solides qui font problème et doivent subir un compostage ou une stabilisation ; aucun procédé de traitement pour valoriser ces résidus urbains n'est rentable à l'heure actuelle.

2.4.2 - Préparation et caractérisation des milieux

L'homogénéisation des substrats est assurée par brassage à la bétonnière ; une pulvérisation d'eau pendant sa rotation permet d'assurer l'humidification du matériel.

Pour un même état de l'eau dans un milieu tel que le sol, le taux d'humidité varie suivant la nature et la texture du produit. Des méthodes de mesure permettent au laboratoire de traduire l'état de l'eau et de dresser pour chaque milieu les courbes de potentiel capillaire en fonction de l'humidité. Pour mesurer les forces de rétention d'eau, j'ai utilisé la centrifugation ; 150 g de produit préalablement saturés d'eau ont été centrifugés pendant 5 mn. Des rotations de 500, 1000 et 1500 tours par minute correspondent aux accélérations respectives de 44 G, 175 G et et 380 G ; pour 175 G, le potentiel capillaire est proche de la capacité

...

de rétention. L'humidité a été calculée après séchage à 105°C pendant 24 h. J'ai effectué une mesure électrométrique du pH sur la fraction diluée au dixième (soit 90 % d'eau/poids total).

III - Etude des performances des animaux

3.1 - Etude des souches et de leur adaptation

3.1.1 - Conduite des élevages de masse

Sur les matières organiques utilisées, la litière de forêt apporte une multitude d'animaux qui pullulent dans nos élevages et dont certains (chilopodes, acariens) sont signalés comme prédateurs de larves de vers de terre. Les élevages sur litière ont été abandonnés à cause du mauvais rendement (larves et cocons) dû au prédatisme ou à la matière elle-même à biodégradation lente (lignine, feuilles coriaces, ...).

Pour tous les élevages, la valeur alimentaire des substrats décroît au cours du temps; nous avons dû effectuer, dès la quatrième semaine, un apport hebdomadaire d'aliments riches à la surface des boîtes. Les feuilles de tilleul (AVEL, 1929 ; MICHON, 1954) ou un mélange de divers aliments (son, foin broyé, ...) sont généralement utilisés pour les élevages. J'ai choisi comme aliment le son, bien apprécié des vers épigés ; toutefois, l'apparition en quelques jours de champignons blancs filamenteux conduit à une ingestion moindre de nourriture. Des apports hebdomadaires de matières organiques fermentescibles (fumier de cheval, ..) en fines couches ont été effectués ; ils permettent une croissance des vers et ne présentent pas cet inconvénient.

La fragmentation des matières végétales (paille, cellulose, ..) et les déplacements des vers provoquent peu à peu un tassement du milieu et créent des conditions d'anaérobiose défavorables au compélevage. Les galeries lombriciennes aisément identifiables dans les sols de prairies sont inexistantes dans nos élevages. La texture du substrat, son humidité

...

élevée et la présence de vers de petite taille à musculature dissépimentaire réduite, incapables de creuser des galeries (ils empruntent les macro-pores existants) peuvent expliquer cette absence de réseaux de galeries.

Malgré l'apport d'aliment en surface pour pallier un appauvrissement des substrats d'élevage, les conditions (tassement, mauvaise aération) pour le maintien de performances élevées des animaux deviennent défavorables au cours du temps. L'activité métabolique des lombriciens conduit à la production d'excrétats riches en azote : mucus protéique, urine, azote ammoniacal (NEEDHAM, 1957 ; EL DUWENI et GHABBOUR, 1971) ; l'anaérobiose qui se produit au cours de l'élevage peut favoriser une accumulation d'azote ammoniacal. Cette forme d'azote toxique pour des fortes concentrations (§ 3.4.2) pourrait expliquer cette réduction des performances lombriciennes. KAPLAN *et al.* (1980b) ont également observé des pertes de poids pour des larves d'*Eisenia fetida* remises en culture sur des fèces de la même espèce. La modification des peuplements microbiens et (ou) de leurs excrétats après le transit intestinal du ver pourraient d'après ces auteurs expliquer cette relative "toxicité" des fèces.

Pour maintenir une population active, nous avons renouvelé partiellement ou totalement le milieu d'élevage tous les trois mois. Un lit de culture (compost + vers de terre) de 2 à 3 cm est réalisé au fond d'un bac ; une couche de matière organique fraîche est ensuite rapportée sur 20 cm. Cette procédure permet une colonisation progressive des matières organiques par les vers et évite les accidents en début d'élevage.

3.1.2 - Adaptation des souches en élevage de masse

Pour les deux souches d'*Eisenia fetida*, l'adaptation sur tous les milieux a été rapide. La présence de débris de verre dans les ordures ménagères ne paraît pas occasionner de blessures cutanées propices aux infections souvent mortelles d'origine bactérienne (genre *Aeromonas*) observées par HEITOR *et al.* (1978). Les autres espèces lombriciennes ont pu être maintenues en élevage sur terre humifère, mais le passage sur milieu organique moins décomposé a entraîné une disparition progressive des animaux.

...

Seule l'espèce *Dendrobaena subrubicunda* s'est mieux adaptée à un substrat organique en cours de dégradation. Des expériences d'élevage de masse,où les deux souches *Eisenia fetida andrei* et *Dendrobaena subrubicunda* étaient mêlées à l'état adulte, ont permis en trois mois à 22,5°C d'observer des différences (tab. II).

Substrat d'élevage	Souche	Départ	118ème jour
Fumier de bovins (20 kg en début d'expérience)	*Eisenia fetida andrei* (Ef P 1756)	100 adultes	164 adultes et subadultes 229 larves
	Dendrobaena subrubicunda (Ds P 1099)	100 adultes	64 adultes et subadultes 71 larves

Tableau II - Résultats d'élevage de masse (à 22,5°C) où deux espèces étaient présentes (les cocons n'ont pas été comptés).

Les performances de la souche Ds P 1099 ont été nettement inférieures à celles de la souche Ef P 1756 pour le nombre de larves produites. La diminution du nombre de vers adultes et subadultes par rapport au nombre initial de vers pour la souche Ds P 1099 peut s'expliquer par la régression clitellaire ou par une mortalité élevée. J'ai pu constater dans d'autres bacs,où seule la souche Ds P 1099 était présente,une disparition totale des animaux alors que la souche Ef P 1756 s'est toujours maintenue dans ces élevages.

EVANS et GUILD(1948b) ont pu montrer qu'en conditions semi-naturelles *Eisenia fetida* produit moins de cocons que *Dendrobaena subrubicunda*. Le sol utilisé comme milieu d'élevage et la basse température peuvent expliquer ici la moindre performance d'*Eisenia fetida* ; plusieurs larves par cocon ont été obtenues pour chacune de ces espèces par ces auteurs. Au regard des résultats de BYZOVA (1965) sur la consommation d'oxygène, le métabolisme que nous voudrions élevé pour les espèces choisies serait plus faible pour *Eisenia fetida* que pour d'autres espèces (*Dendrobaena octaedra, Lumbricus castaneus*).

...

L'adaptation et la prolifération de l'espèce *Eisenia fetida* dans nos élevages sur matière organique sont probablement dues aux conditions particulières règnant dans ce milieu (température élevée, anaérobiose relative,activité microbienne intense);l'absence de végétation peut également expliquer le fait que les autres espèces rencontrées dans les sols disparaissent peu à peu de nos élevages. La chute du taux d'oxygène probable dans nos milieux en pleine fermentation provoque une diminution du métabolisme pour les formes épigées (*Dendrobaena subrubicunda*) ; en outre, la réduction de la consommation d'oxygène en anaérobiose partielle serait moins rapide pour *Eisenia fetida* (BYZOVA, 1966). Le taux d'ingestion qui va influencer la vitesse de dégradation des matières organiques et les performances des animaux dépend du type d'aliment (SATCHELL et LOVE, 1977), de sa texture (WRIGHT, 1972) et des espèces lombriciennes présentes (FERRIERE, 1980). La faculté de supporter des conditions d'anaérobiose pour *Eisenia fetida* et une bonne ingestion des matières organiques en décomposition peuvent expliquer la croissance et la multiplication plus rapides de cette espèce.

3.1.3 - Choix des souches (*Eisenia fetida*)

Les souches appartenant à l'espèce *Eisenia fetida* ont seules été retenues pour des expériences destinées à préciser certains paramètres du compélevage.

En conditions semi-naturelles, DE BLIGNIERES (1980) a pu observer que dans les décharges d'ordures ménagères les espèces épigées *Lumbricus rubellus* et *Eisenia eiseni* sont présentes à la surface des tas. Lors d'essais d'introduction de vers appartenant à l'espèce *Lumbricus rubellus* dans des tubes contenant 50 cm d'ordures ménagères, cet auteur a montré qu'en 37 jours ces vers ne se sont pas multipliés. Placés dans les mêmes conditions, des *Eisenia fetida* se sont reproduits activement et ont entièrement colonisé les ordures ménagères.

...

3.2 - Valeur de quelques substrats organiques pour le compélevage

Les souches de vers de terre collectées ont été conservées et multipliées en élevage de masse ; ce sont les lignées Ef P 1756, Ef P 1758 et Ds P 1099. Des essais d'élevage à partir de ces souches ont été réalisés sur divers substrats organiques dont certains se sont révélés toxiques pour les lombriciens. Il est plus logique d'exploiter des déchets n'ayant pas encore subi de compostage et constituant un aliment plus riche pour les vers de terre.

3.2.1 - Cas des ordures ménagères (OM)

J'ai utilisé un concentré de matières organiques (granulométrie fine) en provenance d'Orléans et obtenu par le système de tri Revalord. Une matière organique de taille plus importante (granulométrie intermédiaire) a déjà été retirée de ces ordures. Deux échantillons de la fraction fine ont été utilisés et présentent les caractéristiques suivantes :

Echantillon n° 1 : pH = 5,7 - 67,0 % d'eau/poids sec,
Echantillon n° 2 : pH = 5,8 — 48,0 % d'eau/poids sec.

Les essais d'introduction d'animaux se sont soldés par une mortalité totale qui apparait quelques heures après la mise en élevage. Les vers déposés sur leur nouveau milieu sont très mobiles ; ils adoptent une attitude de fuite et préfèrent se placer sur les parois des boîtes. On assiste, après le dépôt des animaux sur ce nouveau milieu, à un rejet de liquide coelomique, puis au bout de quelques heures les vers de terre s'étirent (relâchement musculaire) et s'immobilisent (paralysie). Certains segments se gonflent et la mort survient très rapidement. Les conditions d'anaérobiose (transport, stockage) ont conduit à une acidification du produit et à la formation de composés volatils préjudiciables aux lombriciens.

A partir de ces quelques observations, j'ai réalisé un essai pour établir la toxicité de chaque échantillon dont l'un a été aéré 7 jours à l'air libre et ceci vis-à-vis de 3 souches lombriciennes (tab. III).

...

Substrat / Souche	OM Echantillon n° 1 pH = 5,7	OM Echantillon n° 2 pH = 5,8	OM Echantillon n° 2 aéré 7 jours pH = 6,7
Ds P 1099	100 %	100 %	100 %
Ef P 1756	100 %	100 %	100 %
Ef P 1758	100 %	100 %	100 %

Tableau III - Toxicité du substrat OM exprimée en mortalité pour trois souches de vers de terre après 48 heures d'élevage (n = 5 répétitions avec 10 vers adultes et 500 g de substrat à 120 % d'humidité/poids sec).

Dans tous les cas, la mortalité est totale et pourrait s'expliquer par l'acidité du milieu ; nos sommes pourtant en présence d'espèces neutrophiles et relativement acidotolérantes (BOUCHE, 1972).

Une aération de 7 jours provoque une remontée du pH à 6,7 sans que l'on observe pour autant une réduction de la mortalité.

Des petites boîtes aérées et contenant 5 vers de terre placés sur papier filtre humide ont été mises dans nos récipients d'élevage ; aucune mortalité n'est décelable en 48 heures. Plus que les gaz émanant de ces matières organiques, ce sont probablement les sels minéraux, et surtout les cations, qui provoquent une réaction au niveau cutané (AVEL, 1959). La régulation osmotique très imparfaite chez les vers pourrait expliquer que KAPLAN et al(1980a) aient pu observer une toxicité de certains ions apportés dans les milieux d'élevage et qui pourraient se trouver dans nos échantillons.

J'ai effectué pour l'échantillon n° 2 un apport de calcium (sous forme de $CaCO_3$) pour à la fois augmenter le pH et fournir des ions Ca^{++} en excès à la glande de Morren dont le rôle homéostatique a été discuté (§ 2.4.1). Le produit a également été stérilisé à la vapeur afin de détruire la microflore existante. Les résultats de mortalité sont présentés dans le tableau IV .

...

Substrat / Souche	(OM) et 1 % de $CaCO_3$	(OM) et 2 % de $CaCO_3$	(OM) et 3 % de $CaCO_3$	(OM) et 4 % de $CaCO_3$	(OM) et 5 % de $CaCO_3$	(OM) stérilisée
Ef P 1756	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Ef P 1758	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Tableau IV - Toxicité du substrat (OM) exprimée en mortalité pour deux souches d'*Eisenia fetida* après 48 heures d'élevage (n = 5 répétitions avec 10 vers adultes et 500 g de substrat à 120 % d'humidité/poids sec).

L'apport de calcium ne provoque aucune modification du substrat qui puisse diminuer sa toxicité vis-à-vis des vers de terre. La mortalité ne peut pas être d'origine microbienne puisque la stérilisation qui a détruit une partie des germes n'améliore pas la survie des lombriciens.

D'autres solutions ont également été retenues : congélation, ablation du verre et aération pendant un mois. La mortalité observée sur 20 animaux a été totale dans tous les cas.

Un lavage des ordures ménagères (solution à 90 % d'eau/poids total) puis une filtration nous ont permis de recueillir sur le filtre un substrat sur lequel nous avons mis 20 animaux de chaque souche en élevage. La mortalité observée au 2ème jour a été de 95 % pour la souche Ef P 1756, 90 % pour la souche Ef P 1758 et 100 % pour la souche Ds P 1099. Au 7è jour, cette mortalité n'a pas varié et quelques graines (melon, ...) ont commencé à germer ; le produit toxique a en partie été solubilisé et éliminé.

Des essais en élevage de masse dont le substrat est constitué d'une couche inférieure de lombricompost (avec la souche Ef P 1756) surmonté d'une couche (OM) de la même épaisseur nous ont permis d'observer une colonisation progressive du nouveau milieu. Des mélanges comprenant 2/3 d'OM et 1/3 de terreau ne sont plus toxiques pour ces vers de terre. Les matières

...

organiques humides contiennent des acides humiques et fulviques qui, grâce à leur surface réactionnelle et à leur capacité d'échange, adsorbent certains ions et molécules présents dans les ordures ménagères fraîches. Ce phénomène qui s'ajoute à la dilution des produits frais explique la disparition de toxicité du nouveau milieu vis-à-vis d'*Eisenia fetida*.

La mortalité lombricienne est due pour une part au changement brusque de milieu d'élevage (les vers peuvent coloniser progressivement un substrat organique "toxique" déposé à la surface d'un milieu d'élevage) et d'autre part à la toxicité d'un produit soluble contenu dans les ordures ménagères.

KAPLAN (1980a)observe des pertes de poids et des mortalités pour des individus appartenant à l'espèce *Eisenia fetida* lors de l'apport de certains sels (Chlorure de potassium, Chlorure de sodium, Acétate de potassium, Acétate de sodium) à la concentration de 0,5 % sur substrat organique. Une concentration de NH_4^+ provoque dès 0,1 % une mortalité totale : le cation NH_4^+ serait le plus toxique. GRAFF (1974) observe une mortalité d'*Eisenia fetida* sur milieu constitué de fanes de pommes de terre enrichi en urée ; la toxicité serait due pour cet auteur à la formation d'ammoniaque. CURRY (1976) a mis en évidence une toxicité pour les lombriciens de quelques substances présentes dans le lisier : carbonate d'ammonium, acide benzoïque et sulfure de sodium. L'épandage de lisier en quantités importantes provoque une mortalité des vers de terre (CURRY, 1976 ; FAYOLLE,1979) mais le produit se détoxifie rapidement après l'épandage.

J'ai, pour ma part, mis en évidence avec le réactif de Nessler la présence d'ions ammonium sur le produit de filtration obtenu à partir des ordures ménagères .

3.2.2 - Toxicité de quelques substrats organiques (tableau 5)

Nous avons mesuré pour divers substrats destinés à l'élevage des vers de terre le pourcentage d'eau/poids sec, le pH, et caractérisé les différentes formes d'azote minéral. La teneur en azote ammoniacal a été évaluée grâce au réactif de Nessler après dilution au dixième.

J'ai mesuré la quantité de nitrites et de nitrates

...

présents dans ces matières organiques en solution grâce à des bandelettes Merckoquant (dosage semi-quantitatif par colorimétrie). La mortalité a été observée sur 10 vers adultes placés individuellement sur papier filtre imbibé du jus de ces substances. Elle a été également mesurée directement sur le substrat aux 2ème et 7ème jours (5 répétitions à raison de 10 vers adultes et 500 g de substrat d'élevage).

Pour les substrats contenant déjà des vers de terre, aucune mortalité importante n'a été observée. Pour les substrats nouvellement colonisés par *Eisenia fetida*, la survie est faible 48 heures après la mise en élevage et pratiquement nulle le 7ème jour. Les ordures ménagères de Châlons ont subi, après un apport de sulfate d'ammoniaque et de carbonate de chaux, une fermentation accélérée de 4 jours en benne. Un compostage de 4 semaines fait disparaître la toxicité de ces ordures ménagères. Une bonne corrélation existe entre la présence d'azote ammoniacal en quantités importantes et la toxicité des substrats. Tous les milieux contiennent peu d'azote sous forme de nitrites (NO_2^-) ou nitrates (NO_3^-) alors que le pH est dans tous les cas voisin de la neutralité.

Les matières organiques fermentescibles se dégradent activement et, suivant les conditions d'anaérobiose, libèrent différentes substances : CO_2, CH_4, NH_3, acides volatils, ... En conditions aérobies, la nitrification est rapide et l'ammoniaque formée est immédiatement utilisée par les microorganismes nitrifiants. En milieu non aéré (trop humide ou tassé), on assiste à la formation d'acide butyrique, de mercaptans et de méthane, ..., qui acidifient le milieu alors que l'azote ammoniacal s'accumule. MITCHELL *et al.* (1977) observent que des boues produites en aérobiose ne sont pas toxiques pour *Eisenia fetida* et sont bien ingérées par des vers de terre de la même espèce ; la toxicité de boues provenant de digesteurs anaérobies, puis placées en fines couches à température ambiante, disparaît au bout de deux mois.

Le type de matières organiques et les conditions de leur décomposition (aération, humidité, ...) vont influer sur la nature et la quantité des produits de dégradation ainsi que sur la survie et les performances lombriciennes en cas d'inoculation de vers de terre.

...

3.2.3 - Evaluation de la toxicité de divers déchets urbains de provenances et d'âges différents

3.2.3.1 - Type de substrat

La toxicité des matières organiques semble disparaître avec l'âge ; les ordures ménagères de Châlons ont pu être colonisées naturellement par *Eisenia fetida* (tableau V).

J'ai choisi des déchets urbains de compositions et d'âges différentes pour évaluer leur toxicité au 7ème jour sur la souche *Eisenia fetida* Ef P 1756 (tableau VI). Certains résidus organiques proviennent du programme "déchets solides" du Ministère de la Qualité de la Vie. Ces déchets utilisés sont souvent des mélanges ; les codes-lettres signifient : M = ordures ménagères, B = boues, L = lisier et V = vidange de fosses septiques,avec en indice les proportions dans le mélange. La durée du compostage à l'air libre est également indiquée ; ainsi M_4V 240 signifie : mélange de 4 parties d'ordures ménagères et d'une partie de vidange ayant subi 240 jours de compostage.

Tous les substrats organiques contenant moins de 100 % d'eau/poids sec ont été humidifiés afin d'atteindre cette valeur pour la mise en élevage. Une humidité trop élevée risque de créer des conditions d'anaérobiose défavorables à la survie et à la bonne croissance des lombriciens.

Pour chaque échantillon, nous avons, dès la réception, effectué une analyse chimique puis un début d'élevage (20 vers adultes sur 500 g de substrat). L'autre fraction a été soumise à ventilation pendant 7 jours à 22,5°C. Pour les échantillons où la mortalité est élevée le 7ème jour, un nouvel élevage sur substrat aéré, suivi d'un contrôle le 7ème jour, a été réalisé. Tous les lots où la mortalité est faible ($\leq$ 20 %) ont été complétés le 7ème jour et un contrôle du peuplement a été effectué le 60ème jour.

Les boues digérées en provenance de Dijon (tableau VI) sont des boues primaires et secondaires activées ayant subi une digestion anaérobie avant leur mise sur lit de séchage. Les boues obtenues, destinées à l'incinération, sont des boues primaires et secondaires chauffées 30 minutes

....

Tableau V - Composition de quelques substrats organiques et mesure de leur toxicité sur des vers adultes (souche EfP1756)

Type de substrat / Caractéristiques	Fumier frais de bovins	Ordures ménagères d'Orléans: granulométrie		Ordures ménagères de Châlons	Milieux ayant contenus des Eisenia fetida			
		fine	intermédiaire		Fumier de bovins	Fumier de bovins + ordures ménagères	Boue de station d'épuration	Ordures ménagères de de Châlons âgées de 4 semaines
% eau/poids sec	136,0	125,4	117,4	120,2	140,3	150,2	160,4	140,2
pH	7,7	7,7	7,0	7,3	7,1	7,2	7,3	6,7
Présence d'Azote ammoniacal notée de 0 à 8 (réactif de Nessler)	5 +	7 +	6 +	8 +	2 +	1 +	0	0
Teneur en nitrites (‰)	0,53	0,20	0,07	0,06	1,43	0,27	0	0,20
Teneur en nitrates (‰)	0,06	0,04	0,12	0,03	0,24	0,07	0	0,07
Mortalité observée le 2è jour sur papier filtre imbibé du jus des substrats	20 %	100 %	10 %	100 %	0 %	0 %	0 %	5 %
Mortalité observée le 2è jour après la mise en élevage	28 %	100 %	20 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Mortalité observée le 7è jour après la mise en élevage	82 %	100 %	100 %	100 %	8 %	0 %	0 %	6 %

Tableau VI - Caractérisation des milieux organiques : analyse chimique, toxicité, valeur comme milieu d'élevage. Pour 500 g de substrat humide, 20 vers adultes (souche Ef P 1756) sont mis en élevage à 22,5°C. S'il y a eu mortalité le 7ème jour, on observe à nouveau la toxicité sur un échantillon aéré pendant une semaine. Un contrôle de population a été effectué le 60ème jour sur les substrats non toxiques (A = adultes ; L = jeunes ; C = cocons).

Type de substrat	% eau/ poids sec	pH	$N\text{-}NH_4^+$ ‰	$N\text{-}NO_2^-$ ‰	$N\text{-}NO_3^-$ ‰	Mortalité observée (en %)		Contrôle 60ème jour
						7ème jour	7 jours suivants	
I. Boues digérées (Dijon)	220	7,3	0,63	0,00	1,00	50	0	20A - 40L - 10C
	162	6,7	0,27	0,04	6,56	0	-	18A - 32L - 10C
	190	5,2	0,73	0,07	0,45	100	100	-
. Boues avant incinération (Dijon)	106,3	6,2	0,00	0,01	0,01	5	-	16A - 5L - 0C
. OM de Montargis avant secnage	90,5	8,1	0,12	0,06	0,06	20	0	19A - 7L - 10C
. OM de Montargis après séchage à l'air libre	-	7,8	0,11	0,01	0,00	0	-	18A - 6L - 2C
II. Déchets de tannerie	120,2	6,2	1,20	0,00	1,20	100	100	-
. Ordures de Conakry (Guinée)	100,3	6,9	0,56	0,10	0,04	80	20	20A - 8L - 4C
. M_2B_2 60	89,9	7,3	0,38	0,47	0,05	90	10	10A - 2L - 0C
. M_3B_3 60	86,7	7,6	0,54	0,20	0,02	100	0	16A - 6L - 0C
. M_4V 60	80,6	7,8	0,26	0,18	0,03	20	0	19A - 1L - 0C
. M_5L 120	71,0	7,5	0,20	0,60	0,08	5	-	19A - 30L - 2C
. M_4V 120	75,7	7,3	0,13	0,13	0,04	10	-	18A - 10L - 1C
. M_2B_2 120	80,4	7,7	0,20	0,36	0,03	0	-	20A - 15L - 3C
. M_3B_3 120	92,6	7,6	0,11	0,25	0,02	0	-	17A - 13L - 2C
. M_1B_1 240	60,4	7,1	0,32	0,10	0,07	100	10	19A - 10L - 0C
. M_5L 240	76,2	7,2	0,16	0,08	0,10	0	-	20A - 13L - 12C
. M_4V 240	70,5	7,4	0,13	0,09	0,06	5	-	20A - 6L - 0C
. M_2B_2 240	73,3	7,3	0,08	0,04	0,09	0	-	20A - 3L - 2C
. M_3B_3 240	71,6	7,0	0,12	0,02	0,07	0	-	17A - 10L - 1C

à 200°C, puis floculées avant pressage. Les ordures ménagères en provenance de Montargis ont subi une fermentation de 4 jours en aération forcée (leur taille est inférieure à 30 mm). Les caractéristiques concernant les déchets du programme "sols et déchets solides" figurent aux tableaux VI *(II)*.

3.2.3.2 - Résultats

Les boues digérées prélevées sur lit de séchage ont subi un bon égouttage ; elles contiennent beaucoup d'azote ammoniacal et l'une d'elles est toxique malgré l'aération. La lecture au deuxième mois montre que le taux de repeuplement (larves et cocons) a été plus élevé que dans les autres substrats.

Les ordures ménagères en provenance de Montargis ont subi une aération pendant 4 jours (avec thermogénèse) et sont peu toxiques pour les vers de terre. Tous les autres produits du programme "sols et déchets solides" ont subi durant le transport en sac plastique hermétique des conditions d'anaérobiose propices à la formation de substances toxiques pour les lombriciens. Cette toxicité disparaît après une aération de 7 jours, sauf pour les déchets de tannerie riches en azote ammoniacal. En deux mois, la production de larves et de cocons a été faible, y compris pour les boues de station d'épuration qui permettent cependant une bonne reproduction de *Eisenia fetida* (HARTENSTEIN *et al.*, 1979). La composition différente des ordures ménagères (faible taux d'azote) peut expliquer ce médiocre taux de reproduction ; ceci est également vrai pour les boues sorties du filtre-presse dont l'azote s'est volatilisé. Les performances plus élevées obtenues sur boues digérées peuvent être dues également à une plus forte humidité du substrat. En milieu naturel, l'activité mesurée par la production de turricules est importante lorsque le sol est humide (LAVELLE, 1971 ; EVANS et GUILD,1948b). De même, la mobilité est meilleure pour des pF compris entre 2,31 et 2,57 proches de la saturation (MAZAUD, 1979). Lors de nos essais, des problèmes de ventilation (air non saturé d'eau) ont provoqué une dessiccation en surface des milieux d'élevage et pourraient expliquer la faible fécondité. En élevage de masse, les animaux préfèrent coloniser les zones humides (fond des bacs), conditions à priori plus favorables à leur croissance et à leur reproduction.

...

3.2.4 - Causes de la toxicité des substrats d'élevage

3.2.4.1 - Essai sur papier filtre

La mortalité observée pour certaines matières organiques apparaît en début d'élevage ; elle peut se manifester jusqu'au 7ème jour (tableau V), mais ne semble pas apparaître ultérieurement.

Des élevages de vers de terre (souche Ef P 1756) sur papier filtre humidifié avec des doses croissantes d'ammoniaque en solution aqueuse ont été réalisés à 22,5°C (tableau VII). La mortalité observée à la 48ème heure est calculée sur 10 animaux par concentration à raison d'un individu par boîte d'élevage.

La mortalité des animaux en fonction de la concentration du toxique est une courbe sigmoïde qui peut être linéarisée par le modèle log-probit. Cette représentation permet une mesure précise des probabilités de mortalité aux diverses doses (HADJIBIROS *et al.*, 1979). Elle permet de calculer la CL50 (concentration létale 50) qui entraîne la mort de 50% des individus. Ce modèle mathématique permet d'établir une CL50 de 6,97 mg de NH_4^+/l (figure 4).

3.2.4.2 - Essai sur "artisol"

Un milieu d'élevage normalisé ou "artisol", décrit par FERRIERE *et al.*, 1981) a été utilisé pour définir la toxicité de l'ion ammonium. L'artisol comprend un squelette (billes de verre) enrobé d'une matrice , la lévilite (poudre de silice), dans laquelle le toxique est mêlé. Des essais avec ce milieu d'élevage ont été effectués sur pesticides (CANAUD, 1981).

L'ion ammonium est apporté sous la forme NH_4OH et mêlé à la lévilite, aux concentrations indiquées au tableau VIII. Pour chaque dose de produit, 20 vers *Eisenia fetida* (Ef P 1756) ont été apportés et mis en élevage à 15°C, pendant une durée de 7 jours.

La CL50 calculée d'après le modèle log-probit est de 1011 ppm (mg/kg) avec une bonne corrélation pour la droite de régression (r = 0,96).

...

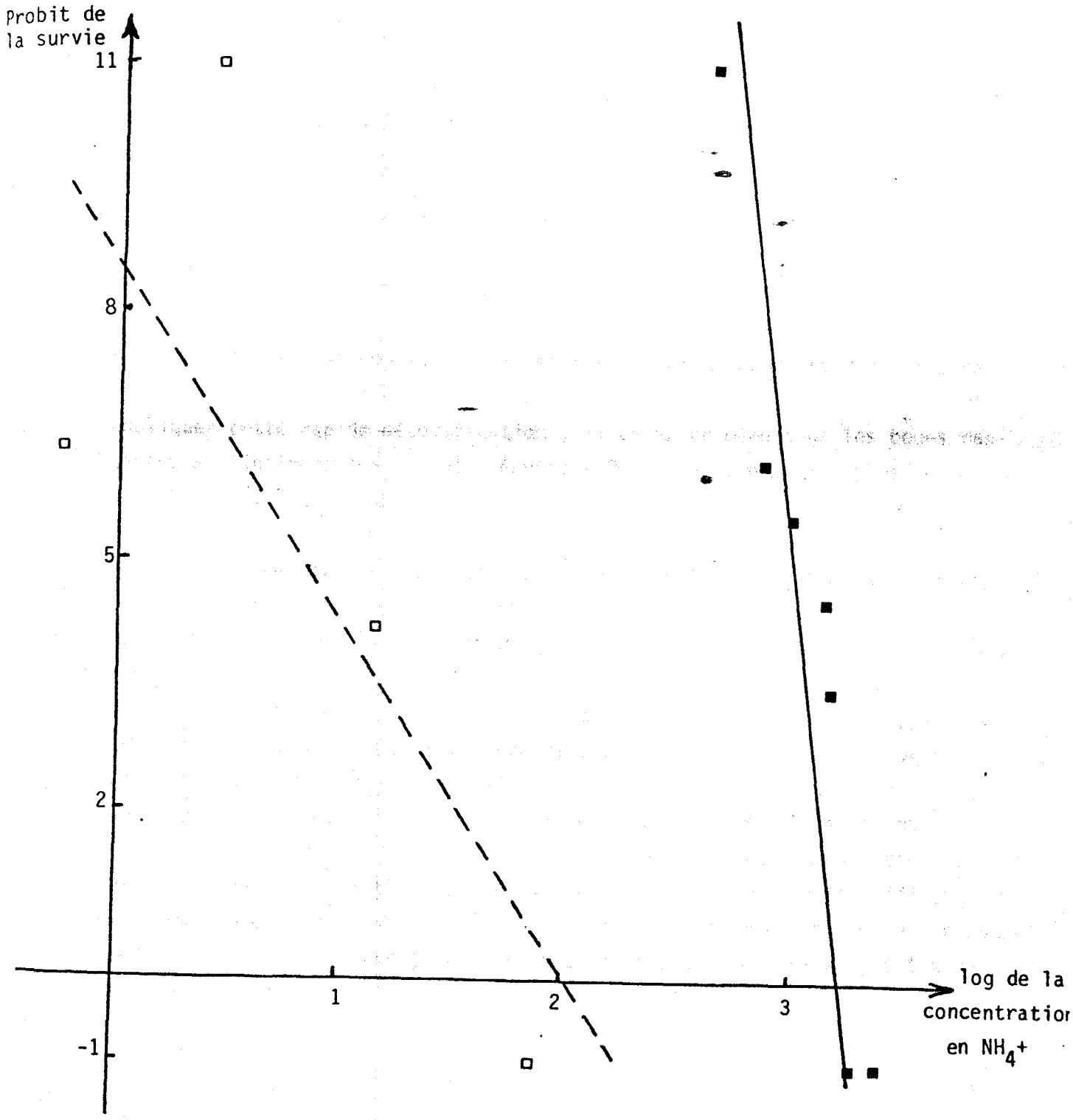
Tableau VII - Mortalité des animaux mis en élevage sur papier filtre imbibé d'ammoniaque en solution.

Concentration de la solution (mg de NH_4^+/l)	46.10^3	$9,2.10^3$	$1,8.10^3$	$0,4.10^3$	73,6	14,8	2,9	0,6	Témoin
Mortalité en %	100	100	100	100	100	80	0	10	0

Concentration de NH_4^+ en ppm/poids sec de lévilite	2000	1750	1500	1250	1000	750	500	Témoin
pH du milieu	8,3	8,1	8,0	7,9	7,7	7,6	7,5	6,9
Mortalité en %	100	100	95	70	30	10	0	0

Tableau VIII - Résultats du test "artisol"
7 jours à 15°C

Fig. 4 - Application du modèle log-probit pour l'essai sur papier filtre avec lecture au bout de 2 jours (tirets) et l'essai sur lévilite avec lecture le 7ème jour (traits pleins).



3.2.4.3 - Discussion

L'ion ammonium, dont la toxicité a été établie à 22,5°C sur papier filtre à partir d'une solution d'ammoniaque,est très dangeureux.Toutetefois, cette toxicité déterminée sur artisol à 15°C (les vers résistent mieux à cette température) est beaucoup plus élevée. La lévilite a servi de tampon à l'ammoniaque; les pH mesurés, compris entre 6,9 et 8,3 pour les fortes doses, sont bien tolérés par le ver *Eisenia fetida*. La toxicité établie sur artisol est du même ordre de grandeur que celle observée par KAPLAN *et al.* (1980a). les phénomènes d'adsorption possibles sur lévilite et bien connus pour les substrats organiques expliqueraient cette différence entre les deux tests.

Une élévation de la température s'accompagne d'une volatilisation de l'ammoniaque. Sur le substrat $M_3B_3$60 séché 24 heures à 105°C, j'ai, pour 500 g de produit ramené à 100 % d'eau/poids sec, mis en élevage 20 individus adultes (souche Ef P 1756). La survie a été totale le 7ème jour alors que le produit non séché à l'étuve est toxique pour les vers (tableau VI). La volatilisation de l'azote lors du séchage (sous la forme NH_3) peut expliquer cette rapide détoxification ; il en va de même pour les boues destinées à l'incinération et qui, séchées à 200°C, ne provoquent plus de mortalité lombricienne (tableau VI).

La toxicité pourrait être due aux sels minéraux et aux métaux lourds présents dans ces déchets notamment pour les boues où des quantités importantes de plomb, de zinc et de cuivre, sous forme échangeable, absorbée ou liée à la matière organique, ont été relevées (POMMEL, 1979). Des toxicités ont pu être établies en 7 jours pour le plomb (CL50 > 10 000 ppm), le cadmium (CL 50 = 813 ppm) et le mercure (CL50 = 154 ppm) avec la souche Ef P 1756 en milieu artificiel (JAY, 1979). La toxicité aiguë de ces éléments, présents à dose modérée et peu disponibles pour les êtres vivants dans les déchets organiques, est peu probable ; elle pourrait se manifester seulement sur une période plus longue. Notons pour conclure que les effluents d'élevage (fumier de bovins, lisier, ...), où les contaminants (métaux lourds, pesticides, ...) ne peuvent être présents qu'à l'état de trace, sont toxiques pour *Eisenia fetida*.

...

Les déchets rapidement fermentescibles et riches en azote peuvent en conditions d'anérobiose donner naissance à un produit acide où l'azote est bloqué sous forme $N\text{-}NH_4^+$. Sur de tels milieux, des risques de mortalité de vers de terre peuvent apparaître en début d'élevage. Une bonne ventilation des matières organiques est suffisante pour éviter ces accidents.

3.2.5 - Résistance des souches lombriciennes *Eisenia fetida*

Sur boues digérées en provenance de Dijon et convenablement choisies (un test préliminaire a montré que ces boues étaient assez peu toxiques), j'ai comparé la résistance de deux souches de vers de terre Ef P1756 et Ef P 1758 aux stades juvénile et adulte (tableau IX).

Dans les boîtes d'élevage contenant à la fois des jeunes et des adultes, la mortalité a été plus importante pour les jeunes et ceci quelle que soit la souche considérée. La mortalité calculée sur des boîtes contenant des adultes de chaque lignée est plus élevée pour la souche Ef P 1758. La souche Ef P 1756 a été retenue pour des études plus approfondies ; les animaux s'adaptent plus facilement aux substrats organiques toxiques (avec une mortalité moindre dans ce cas) et rejettent peu de liquide coelomique, d'odeur repoussante pour les prédateurs, lorsqu'on les tue.

IV - Réalisation des élevages - recherche des conditions optimales

L'objectif de ce paragraphe est d'analyser l'influence de quelques paramètres pour optimiser les performances d'*Eisenia fetida*. L'élevage de lombriciens sur déchets urbains, s'il constitue une originalité de ce travail, représente une contrainte qui nous a posé quelques problèmes (toxicité, hétérogénéité, ...). Une approche plus analytique et prudente a été choisie pour résoudre ces problèmes ; c'est pourquoi, nous avons choisi d'étudier séparément les deux phases de la vie d'un ver : croissance et reproduction.

...

1 répétition	Souche Ef P 1756 : 10 adultes, $\bar{x}$ = 493 mg $\pm$ 60 et 10 jeunes, $\bar{x}$ = 76 mg $\pm$ 11	Souche Ef P 1758 : 10 adultes, $\bar{x}$ = 460 mg $\pm$ 53 et 10 jeunes, $\bar{x}$ = 81 mg $\pm$ 7	10 vers adultes Ef P 1756 et 10 vers adultes Ef P 1758
Mortalité en % observée pour 5 répétitions	Adultes = 34,0 $\pm$ 10,2	Adultes = 68,0 $\pm$ 17,2	Souche Ef P 1756 = 88,0 $\pm$ 11,7
	Jeunes= 100	Jeunes = 100	Souche Ef P 1758 = 98,0 $\pm$ 4,0

Tableau IX - Mortalité observée au 7ème jour sur 500 g de boue digérée humide à 22,5°C.

4.1 - Etude de quelques paramètres agissant sur la croissance

4.1.1 - Humidité

Parmi les multiples facteurs susceptibles d'influencer l'activité et les performances des animaux, une humidité élevée paraît souhaitable aussi bien en conditions naturelles (SATCHELL, 1955) qu'en élevage de laboratoire. Dans ce cas, les techniques utilisées visent à maintenir le substrat à une humidité proche de la saturation (AVEL,1929 ; MICHON, 1954 ; JEANSON, 1968 ; MAZAUD, 1979). Une forte dessiccation du milieu provoque une quiescence chez certains vers comme *Eisenia fetida* (MICHON, 1954), alors que d'autres espèces entrent en diapause ; ces deux types de léthargie constituent une forme de lutte contre la sécheresse. L'eau est absorbée par la peau et rejetée par les néphridies avec un renouvellement qui atteint quotidiennement 60 % du poids du corps (WOLF, 1940).

Nos techniques d'élevage permettent de maintenir le substrat à la même humidité ; seule, la dégradation de celui-ci, qui conduit à la formation d'eau "métabolique" et à une perte de matière sèche, la modifie légèrement.

4.1.1.1 - Boues digérées provenant de Dijon (B_1)

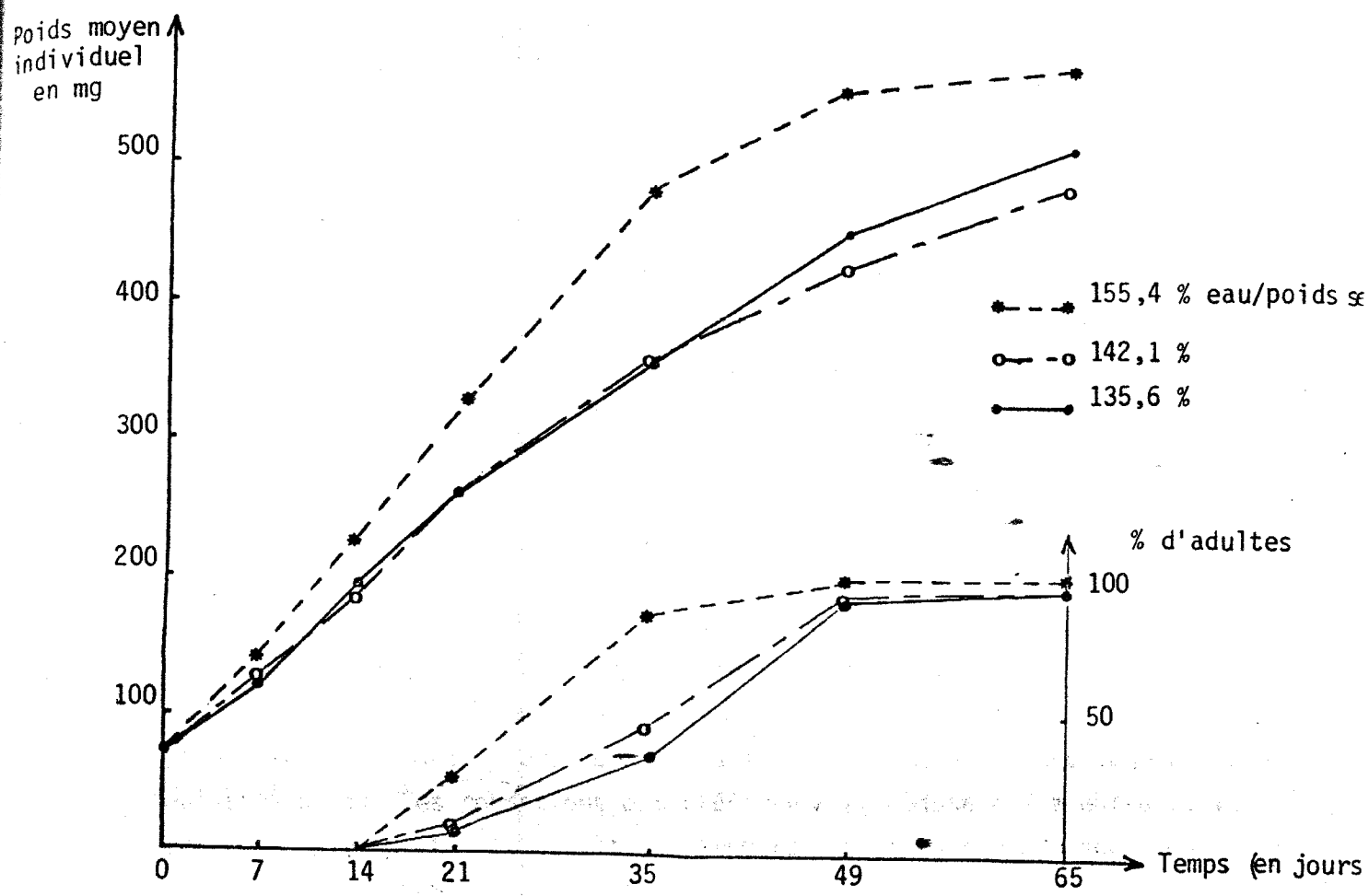
J'ai étudié sur boues digérées (en provenance du digesteur anaérobie, Dijon), que nous appellerons B_1, la croissance de jeunes (souche Ef P 1756) pour trois humidités différentes et à 20°C.

Pour chaque humidité, 5 répétitions de 5 jeunes animaux (de poids individuel compris entre 50 et 100 mg) ont été effectuées ; le substrat d'élevage équivaut à 200 g de produit sec par boîte. Les résultats de croissance sont portés sur la figure 5 : l'accroissement maximal se situe durant la phase préclitellaire. Le plateau observable dès le 35ème jour correspond à l'apparition de l'état adulte (puberté).

Afin d'atténuer l'hétérogénéité des lots mis en élevage, j'ai calculé le pourcentage d'accroissement journalier par rapport au poids initial. L'analyse de variance montre qu'aucune différence significative n'existe entre ces 3 humitités (tableau X).

...

Fig.5 - Croissance individuelle et apparition d'adultes (souche Ef P 1756) sur boue digérée en provenance de Dijon, à 20°C et 3 humidités différentes (44G = 155,4 % d'eau/poids sec - 175 G = 142,1 % d'eau/poids sec - 380 G = 135,6 % d'eau/poids sec).



Tab. X - Performances comparées des jeunes (souche Ef P 1756) entre 0 et 21 jours pour trois humidités.

Humidité des boues	155,4 %	142,1 %	135,6 %
% d'accroissement journalier par rapport au poids initial	17,20 ± 2,56	18,21 ± 4,8	20,77 ± 1,25

Effet humidité F = 1,64 N.S.
Ecart-type de la moyenne $S\bar{x}$ = 1,44
Coefficient de variation CV = 17,2 %

4.1.1.2 - Ordures ménagères en provenance de Montargis (OM_1)

Ces ordures de taille inférieure à 30 mm proviennent de l'usine de compostage de Montargis ; elles ont subi une aération forcée de quelques jours avec une thermogenèse qui peut atteindre 60°C.

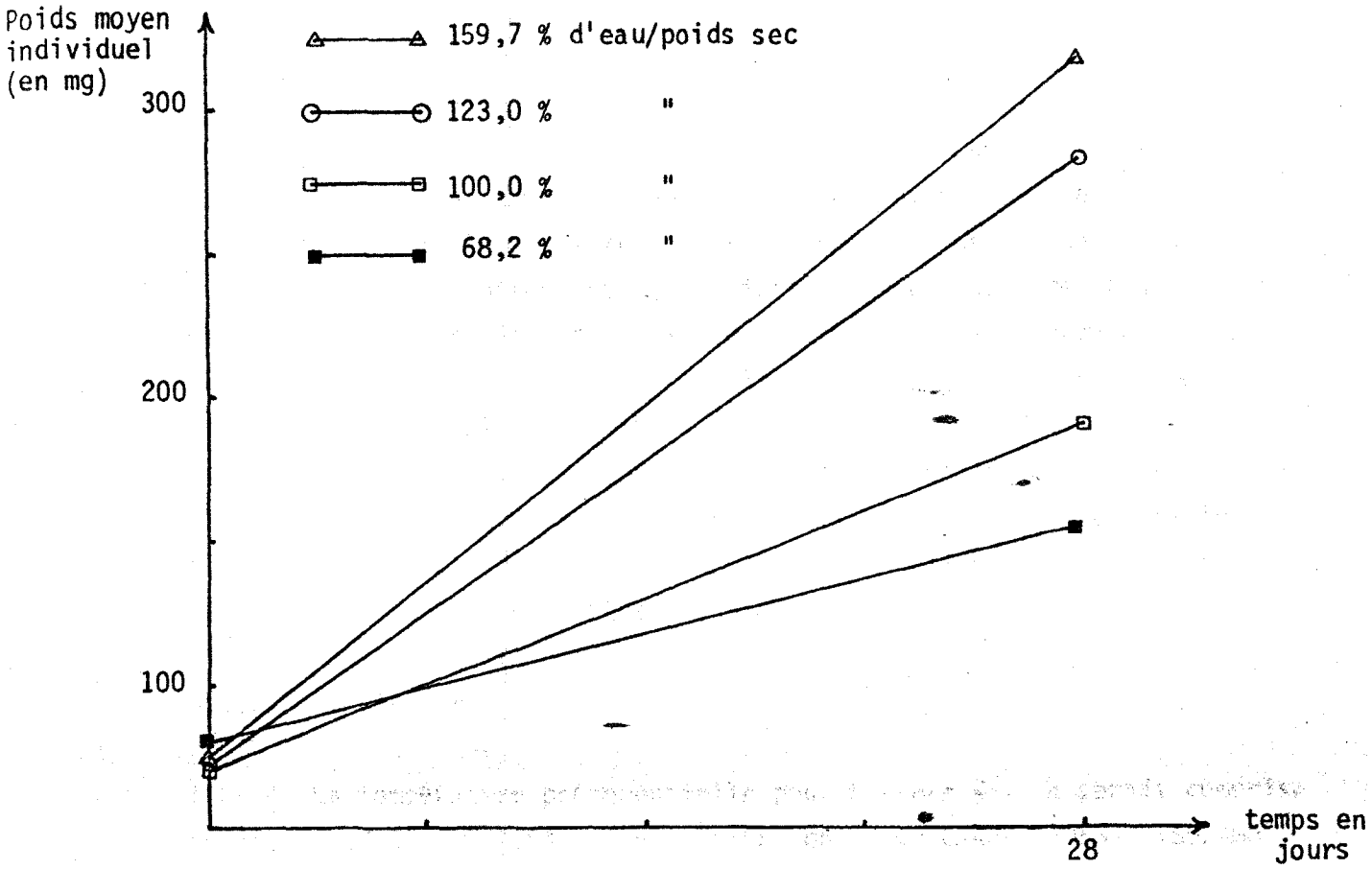
Une gamme d'humidités plus étendue a été choisie et correspond aux pourcentages d'eau suivants, calculés par rapport au poids sec : 70, 100, 130, 160 et 190. Des lots de 20 jeunes de poids compris entre 50 et 100 mg ont été mis en élevage à 22,5°C, sur une quantité de substrat qui correspond à 200 g de produit sec, à raison de 3 répétitions par traitement. La pesée des vers ainsi qu'une mesure de l'humidité du milieu d'élevage ont été effectuées la quatrième semaine. Une surveillance hebdomadaire est nécessaire pour noter les accidents éventuels (mortalité notamment).

Par référence à la succion, nous avons obtenu sur ordures ménagères pour 44, 175 et 380 G des humidités respectives de 170,7 - 154,5 et 134,7 % d'eau par rapport au poids sec. Une humidité de 190 % d'eau/poids sec correspond à la saturation avec en fond de boîte une légère accumulation d'eau. Ces conditions ont créé une anaérobiose qui a entraîné la mort des animaux et ceci dès la première semaine ; en conséquence, nous n'avons pas pu établir des courbes de croissance pour cette humidité. La figure 6 montre que la vitesse de croissance augmente au fur et à mesure que l'humidité croît ; elle est maximale pour le milieu à 160 % d'eau/poids sec.

Le pourcentage d'accroissement pondéral soumis à l'analyse de variance est significativement différent pour les quatre humidités testées ($P < 0,01$). Nous avons dans ce cas utilisé la méthode de Newmann et Keuls pour classer et comparer les moyennes (seuil à 5 %) qui diffèrent entre elles (tableau XI).La croissance individuelle augmente lorsqu'on humidifie le substrat (elle double lorsqu'on passe de 70 à 130 % d'eau/poids sec). La croissance est identique pour des humidités comprises entre 130 et 160 % d'eau/poids sec et correspond comme pour les boues à des accélérations variant de 44 à 380 G. L'accroissement plus faible sur ordures ménagères que sur boues, pour des humidités identiques (44 G),provient de la nature du produit, de la charge (quatre fois plus élevée sur ordures) et de la durée

...

Fig. 6 -Croissance individuelle (Ef P 1756) sur ordures ménagères en provenance de Montargis, à 22,5°C pour 4 humidités différentes (mesures effectuées en fin d'élevage).



Tab. XI - Performances comparées des jeunes (souches Ef P 1756) en 28 jours à 4 humidités

Humidités des ordures ménagères	68,2 %	100,0 %	123,0 %	159,7 %
Pourcentage d'accroissement journalier par rapport au poids initial	$7,20^{a} \pm 0,49$	$9,65^{b} \pm 0,70$	$13,81^{c} \pm 0,70$	$14,84^{c} \pm 0,74$

Effet humidité F = 57,300 ** (significatif à 1 %)

Ecart type de la moyenne $S\bar{x}$ = 0,39

Coefficient de variation CV = 6,8 %

qui en 4 semaines correspond à l'apparition du stade adulte. Par contre, la variabilité moindre sur ordures ménagères pour seulement trois répétitions provient du nombre plus important d'animaux affectés à chaque lot.

La croissance maximale d'*Eisenia fetida* sur boue activée serait obtenue pour des humidités comprises entre 70 et 85 % d'eau par rapport au poids total, soit 233 à 500 % d'eau/poids sec (KAPLAN *et al.*,1980a). Pour ces auteurs, une humidité trop importante provoque une mortalité qui s'accroît lorsque la température d'élevage augmente. Ces données, en accord avec nos résultats, montrent qu'une humidité élevée proche de la saturation permet d'obtenir la croissance maximale. Les principales fonctions (respiration, excrétion) qui entraînent chez le ver de terre un renouvellement fréquent de l'eau semblent exiger une bonne hydratation du milieu (MAZAUD 1979). Cette forte humidité favorise également la prolifération dans le substrat des microorganismes qui pourraient être utilisés (notamment les protozoaires) par le ver de terre pour son alimentation (MILES, 1963b ; NEUHAUSER *et al.*,1980 ; ROUELLE et PUSSARD, 1981).

4.1.2 - Température

La température préférentielle pour *Eisenia fetida* serait comprise entre 15,7°C et 23,2°C (GRANT , 1955) alors que pour GRAFF (1953), TSUKAMOTO *et al.* (1977) une température de 25°C serait l'optimum. KAPLAN *et al.*(1980a) obtiennent le maximum d'accroissement pondéral sur fumier de cheval pour des températures situées entre 20 et 29°C avec l'espèce *Eisenia fetida* ; la croissance est quatre fois plus faible pour une température de 5°C. TOMLIN et MILLER (1979) obtiennent des adultes à partir de larves en moins de 4 semaines avec des températures de 22°C ou 25°C. Le cycle s'allonge avec des valeurs plus faibles.

4.1.2.1 - Boues digérées en provenance de Dijon (B_1)

Sur le substrat B_1, amené à l'humidité optimale (138,2 % d'eau/poids sec), une étude de la croissance a été réalisée pour trois températures : 15°C, 20°C, 25°C, à raison de 5 répétitions (5 jeunes et 200 g de substrat sec/répétition).

...

L'accroissement pondéral est plus rapide à 25°C (fig. 7) ; toutefois, le poids moyen individuel est plus élevé pour les températures de 15 et 20°C au 65ème jour. Le pourcentage d'accroissement pondéral entre 0 et 21 jours varie avec les températures ($P < 0,01$) ; il est multiplié par 1,5 et 2 lorsque de 15°C on passe aux températures de 20 et 25°C respectivement (tableau 12). Le test de Newmann et Keuls permet de conclure à une différence significative entre chacune des trois moyennes. L'accroissement entre 0 et 35 jours est significativement différent au seuil de 5 % alors qu'aucune différence n'est décelable entre 0 et 49 jours. A ce stade où la majorité des vers sont adultes, la phase de croissance se ralentit (MICHON, 1954). Ainsi, l'optimum thermique pour la croissance est obtenu à 25°C, une diminution de température la freine. Dès le 49ème jour, le pourcentage d'adultes est élevé quelles que soient les températures d'élevage.

La courbe de croissance du log du poids en fonction du temps est linéaire ($r = 0,99$) et dépend dans ce cas précis des températures d'élevage (fig. 8). D'après ces droites, les poids moyens individuels au 21ème jour d'élevage pour les températures de 15, 20 et 25°C seraient respectivement de 185 mg, 275 mg et 386 mg.

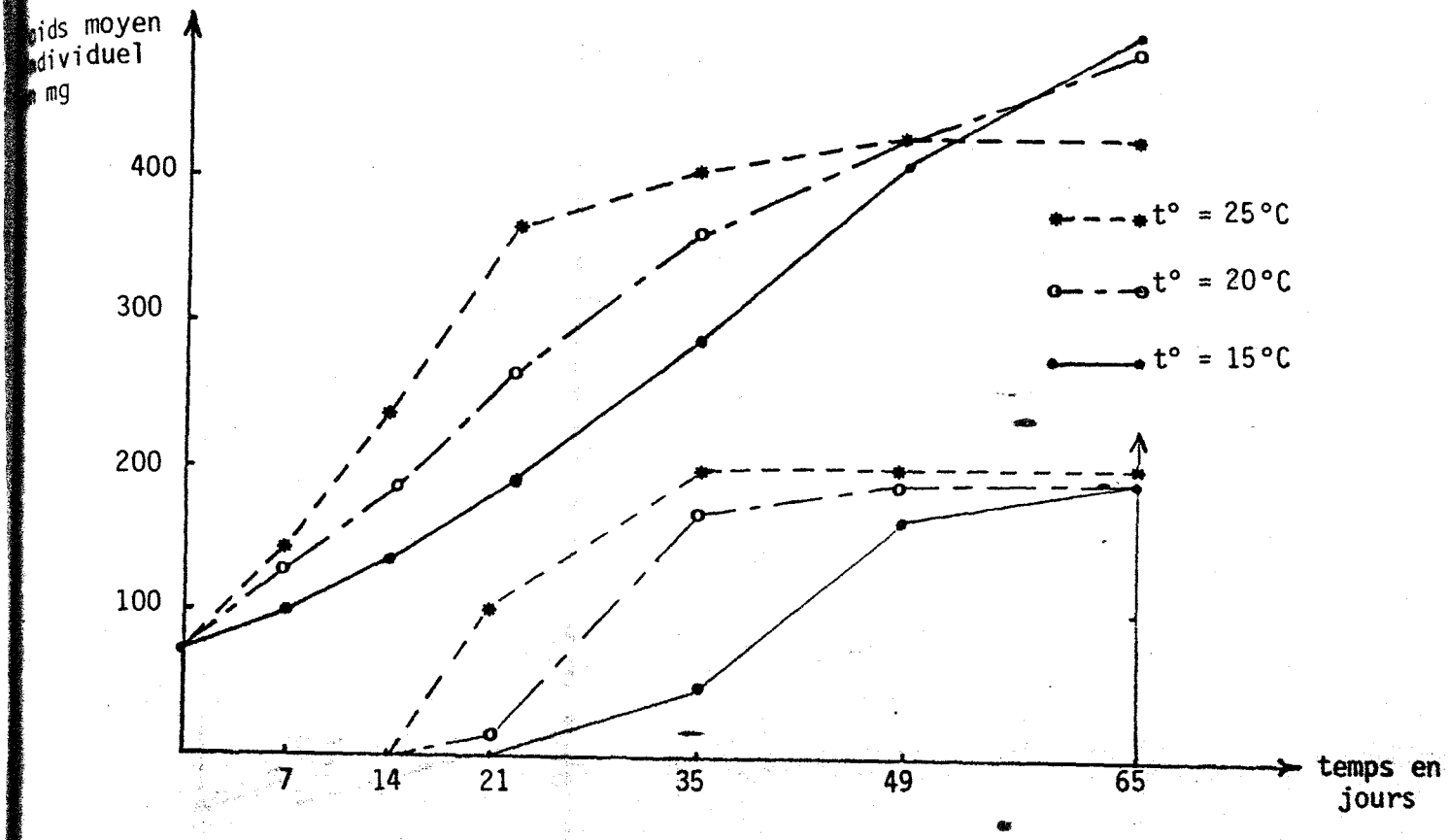
4.1.2.2 - Ordures ménagères en provenance de Montargis (OM_1)

J'ai choisi une gamme de 7 températures avec des intervalles de 2,5°C et des ordures OM_1 humidifiées à 140 % d'eau/poids sec, comme substrat d'élevage. Des lots de 20 vers (poids moyen individuel : 9,0 mg) ont été constitués et affectés au hasard à l'une des 7 températures, à raison de 2 répétitions. Le même schéma a été répété pour des jeunes de poids supérieur (poids moyen individuel : 33,7 mg) ; chaque lot est mis en élevage sur 200 g de produit sec pendant 4 semaines.

Les poids moyens individuels en fin d'élevage (fig. 9) sont fonction de la température et du poids initial. Une analyse de variance sur le pourcentage d'accroissement journalier permet de mettre en évidence un effet température ($P < 0,01$). Les meilleurs résultats de croissance sont obtenus pour des températures comprises entre 22,5 et 30°C (tableau 13), ce qui confirme les résultats de KAPLAN *et al.* (1980a). Les jeunes de 9 mg, âgés de quelques jours, sont devenus adultes en 4 semaines avec un double-

...

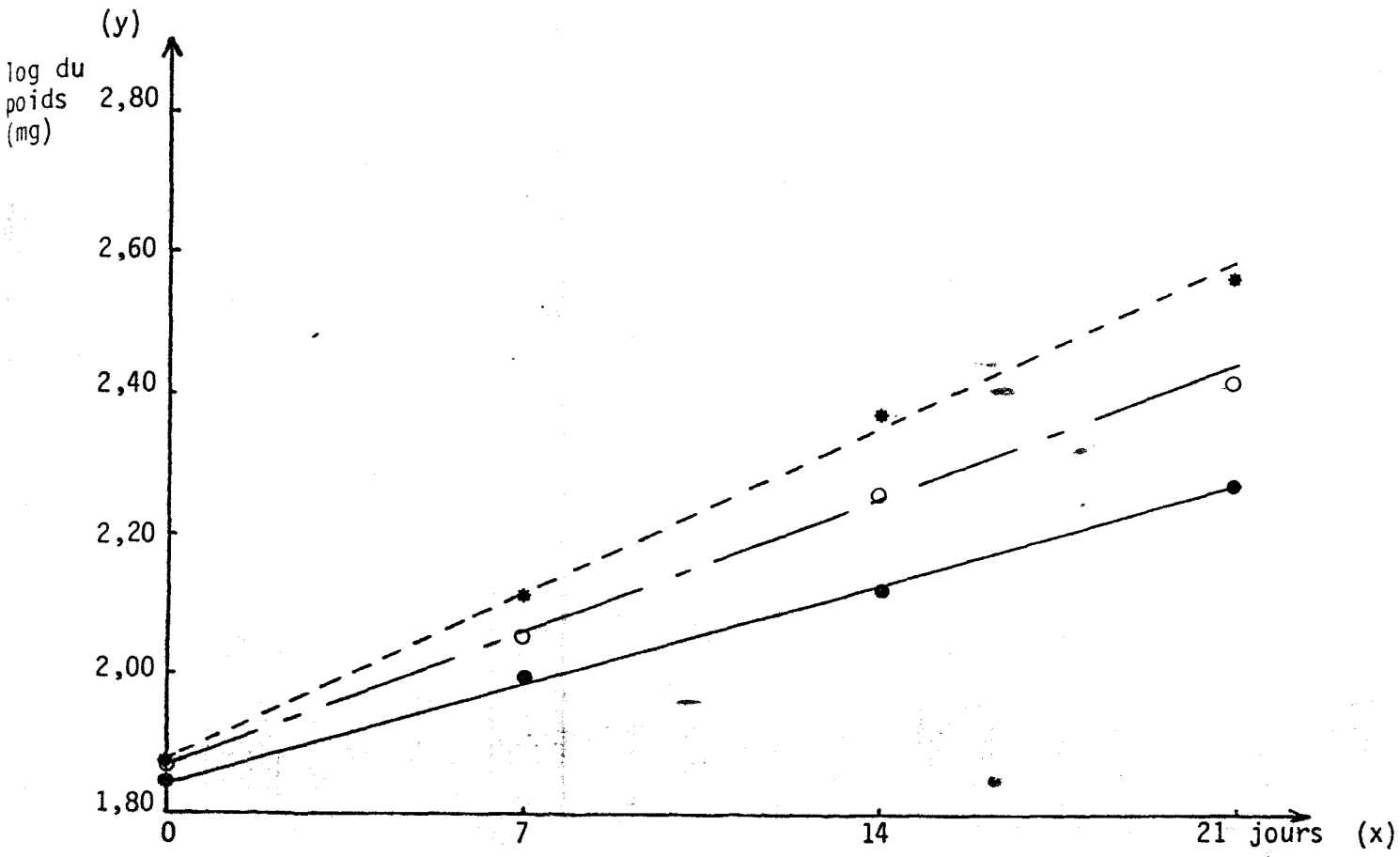
Fig. 7- Croissance individuelle d'*Eisenia fetida* Ef P 1756 sur boue digérée en provenance de Dijon (humidité : 138,2 % d'eau/poids sec) à 3 températures.



ab. 12 - Pourcentage d'accroissement journalier par rapport au poids initial pour 3 températures à des intervalles de temps différents (souche Ef P 1756).

Durée	Températures			
	15°C	20°C	25°C	
0-21 j	12,66^{a} ± 1,61	18,21^{b} ± 4,07	24,29^{c} ± 2,76	F = 15,10** (1%) CV = 18,2
0-35 j	12,42^{a} ± 1,84	14,87^{b} ± 2,09	16,06^{c} ± 0,51	F = 5,2 * (5%) CV = 12,7
0-49 j	11,80 ± 1,50	12,54 ± 1,08	12,17 ± 0,28	F = 0,46 (N.S.) CV = 9,9

Figure 8 - Courbes de croissance d'*Eisenia fetida* à trois températures (durée = 21 jours)

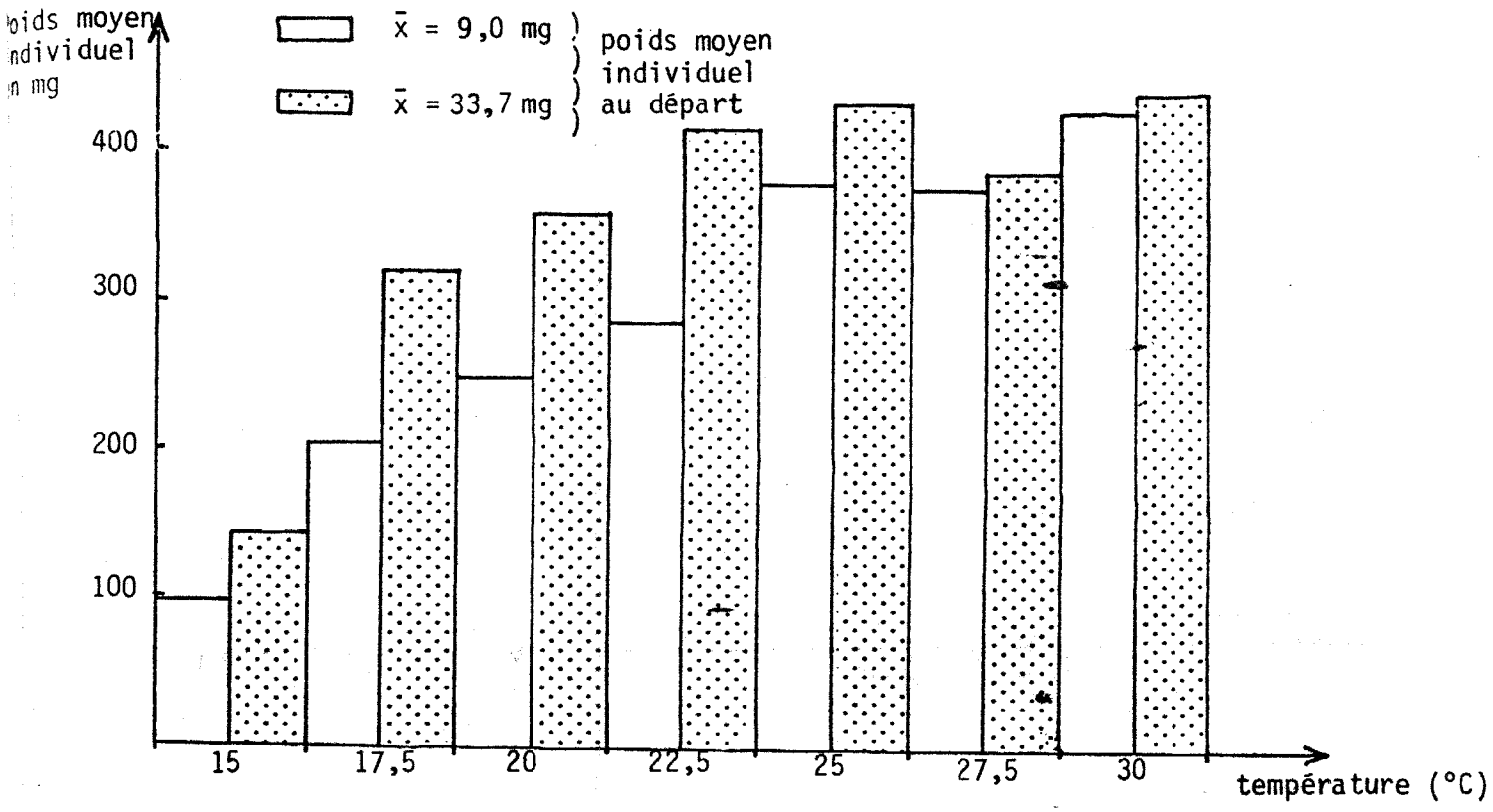


15°C - y = 0,0199 x + 1,8510 r = 0,99

20°C - y = 0,0268 x + 1,8758 r = 0,99

25°C - y = 0,0333 x + 1,8888 r = 0,99

Fig. 9 - Croissance individuelle d'*Eisenia fetida* Ef P 1756 sur OM_1 (147,0 % d'eau/ poids sec) pour 7 températures en 4 semaines.



Tab. 13 - Pourcentage d'accroissement journalier par rapport au poids initial en 4 semaines avec comparaison des moyennes (test de Newman et Keuls)

Poids individuel de départ	Température						
	15°C	17,5°C	20°C	22,5°C	25°C	27,5°C	30°C
9,0 mg ± 2,7	39,0[a]	81,0[b]	98,7[bc]	112,9[c]	151,6[d]	149,2[d]	168,9[d]
33,7 mg ± 5,8	15,2[a]	34,0[b]	38,1[b]	44,1[cd]	45,9[d]	40,8[c]	46,7[d]

ment de poids tous les 5 jours. MICHON (1954) a observé le même accroissement pour une période de 7 jours à 28°C.

Pour l'ensemble des boîtes, la mortalité a été négligeable (5 %) ; pour des températures de 30°C, elle augmente légèrement chez les immatures (12,5 %). L'action conjuguée d'une température et d'une humidité élevées seraient source de mortalité (KAPLAN *et al.*, 1980a).

4.1.3 - Fréquence du tri

Pour trois températures, j'ai comparé l'influence de la fréquence des tris et pesées sur la vitesse de croissance ; le schéma d'expérience adopté est celui décrit au paragraphe 4.1.2.1.

Les résultats présentés à la figure 10 montrent que la croissance se ralentit lorsque la fréquence des pesées augmente. Cet effet est confirmé par l'analyse de variance ($P < 0,01$) sur le pourcentage d'accroissement journalier des 21 premiers jours d'élevage.

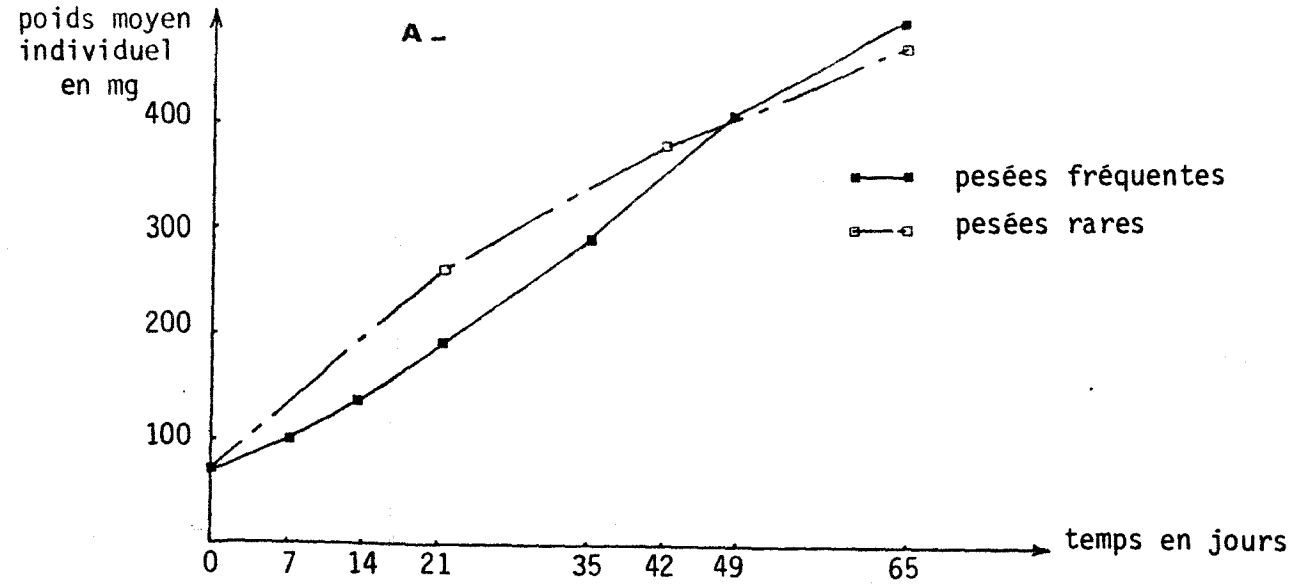
Fréquence des pesées	Température		
	15°C	20°C	25°C
7ème, 14ème et 21ème jours	$12,66^{a}$	$18,21^{b}$	$24,29^{c}$
21ème jour	$18,37^{b}$	$21,87^{bc}$	$24,65^{c}$

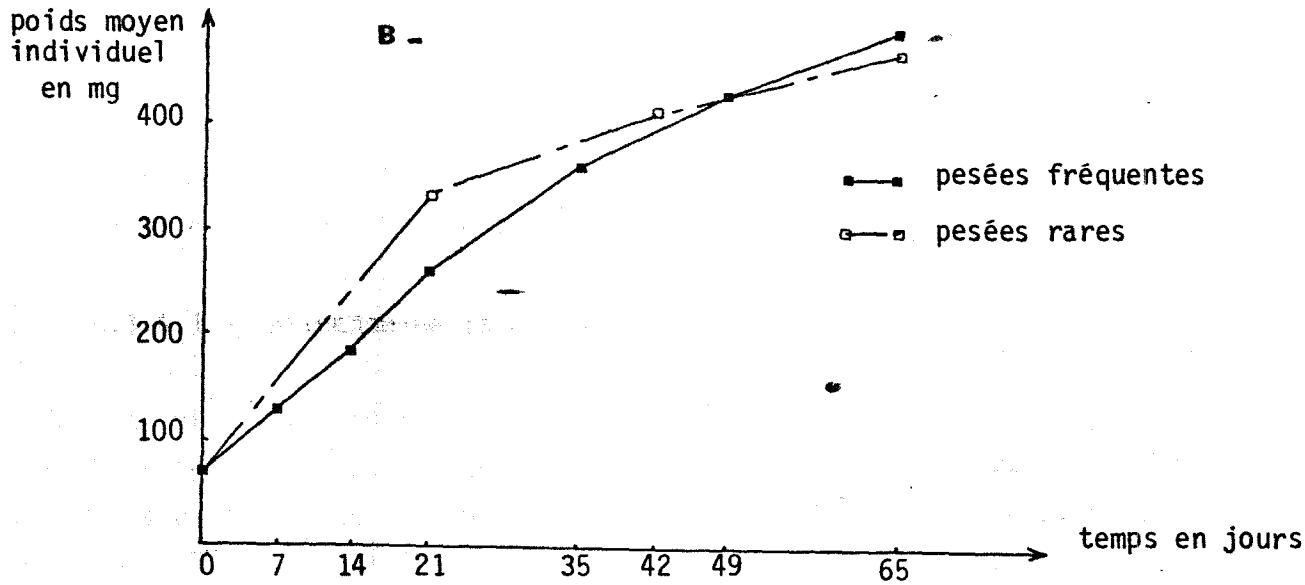
Tableau 14 - Pourcentage d'accroissement journalier en 21 jours d'élevage avec comparaison des moyennes (test de Newmann et Keuls)

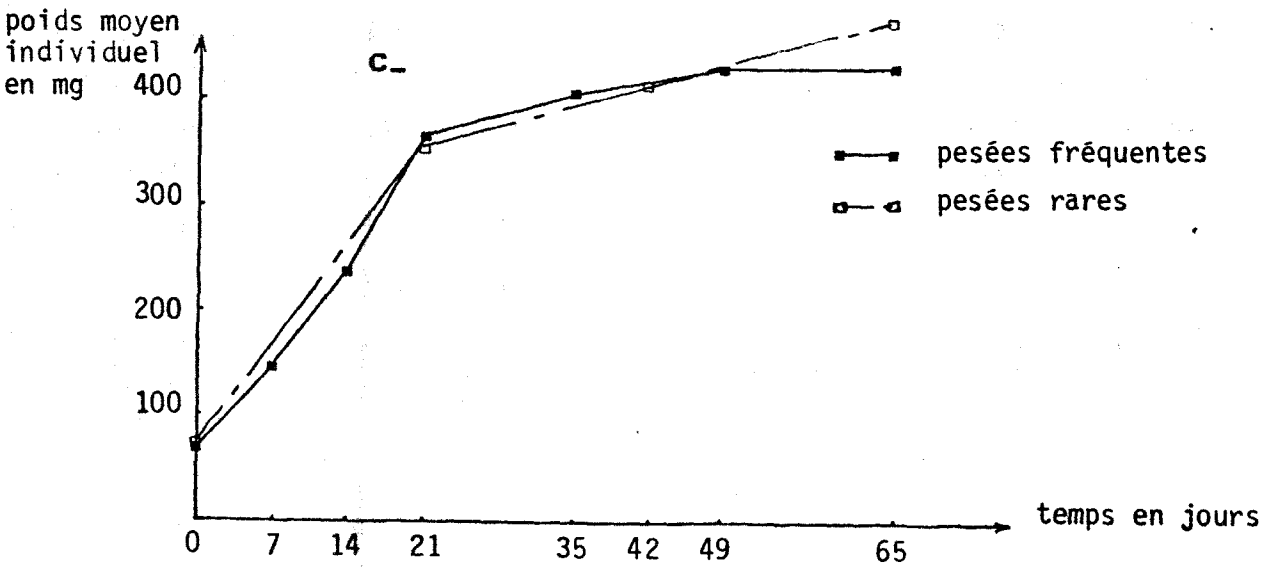
Lorsqu'à 15°C l'élevage est perturbé par des pesées fréquences, la croissance des jeunes est plus faible que celle du lot contrôlé une seule fois (tableau 14). Ces différences n'apparaissent pas pour des températures plus élevées (20° et 25°C).

...

Figure 10 - Influence de la fréquence des pesées sur l'accroissement pondéral à trois températures : A = 15°C ; B = 20°C ; C = 25°C







GRAFF (1974) a également mis en évidence des retards de croissance pour les animaux pesés deux fois par semaine en comparaison avec ceux contrôlés une seule fois. Cependant, HARTENSTEIN (1981) n'observe pas de différence de croissance entre lots de vers *Eisenia fetida* transférés dans de nouveaux milieux d'élevage, à des fréquences variables (2, 4 et 8 semaines). Des retards de croissance sont à craindre lorsque les animaux sont perturbés par des transferts ou des pesées rapprochées, égales ou inférieures à la semaine (HARTENSTEIN, 1981).

4.1.4 - Charge et nombre de cycles d'élevage

Un autre facteur qui va influencer la croissance individuelle des animaux et l'accroissement de biomasse lombricienne est le nombre de jeunes introduits dans une quantité connue de substrat. Nous appellerons charge le nombre d'animaux mis en élevage pour un poids donné de matière organique. La période qui s'étend depuis la mise en élevage des jeunes jusqu'à la récolte constitue un cycle d'élevage ; chaque substrat pourra subir un ou plusieurs cycles.

4.1.4.1 - Influence de la charge

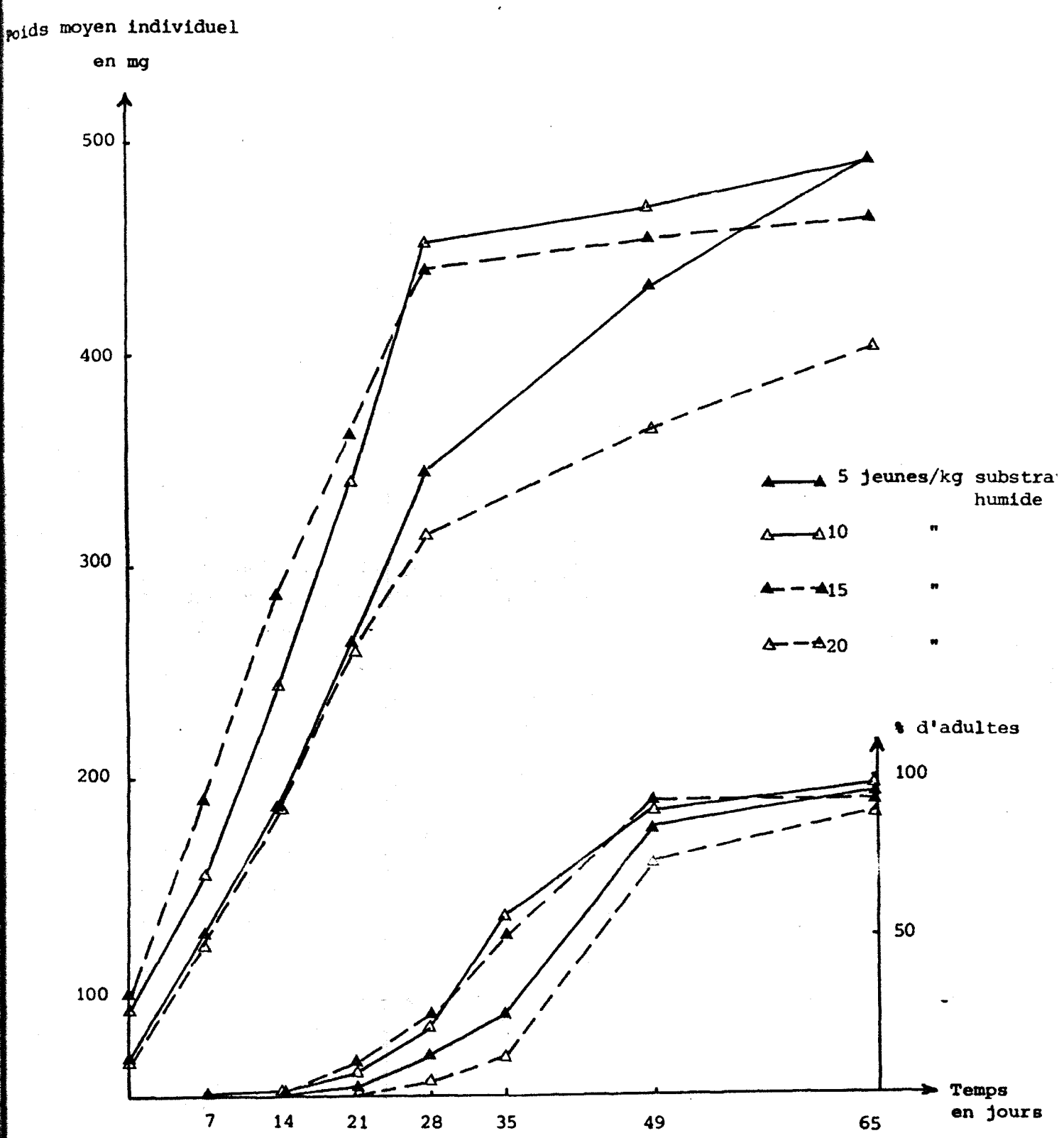
A - Une étude de l'accroissement pondéral, en fonction de la charge, a été entreprise sur boues digérées (142,3 % d'eau/poids sec). L'expérience a porté sur des jeunes (souche Ef P 1756) mis en élevage à 20°C avec respectivement 5, 10, 15 et 20 animaux par boîte contenant 1 kg de substrat humide.

Les courbes (figure 11) montrent que l'accroissement pondéral n'est pas modifié les 21 premiers jours d'élevage ; par contre, le poids moyen individuel est modifié le 65ème jour d'élevage. A ce stade, les poids moyens individuels diffèrent significativement ($P < 0,01$) ; le poids moyen plus faible pour la charge la plus élevée (tableau 15) serait dû à un appauvrissement du milieu.

Tableau 15 - Comparaison des poids moyens individuels (test de Newmann et Keuls)

Nombre de larves par kg de boue humide	5	10	15	20
Poids moyen individuel le 65ème jour en mg	$489,2^a$	$491,0^a$	$462,0^a$	$400,3^b$

Fig. 11 - Croissance de Eisenia fetida sur boues digérées pour différentes densités de jeunes (n = 5 répétitions).



B - L'expérience précédente nous montre que la charge (20 jeunes/kg de boue humide) pourrait être augmentée afin d'obtenir une biomasse maximale. Des essais sur deux substrats OM_1 et B_1 ont été reconduits dans cette optique,avec un choix de paramètres permettant d'obtenir la croissance maximale : température = 25°C, humidité proche de la saturation, durée = 28 jours (qui correspond à la phase de croissance).

Pour les ordures OM_1, les résultats de croissance sont présentés à la figure 12. Le ralentissement de croissance observé sur boues se confirme ici ; lorsque la charge s'accroît de 20 à 160 immatures/500 g d'OM_1 humides le poids moyen individuel au 28ème jour passe de 400 à 120 mg. La biomasse lombricienne obtenue augmente dans tous les cas du 14ème au 28ème jour avec un maximum pour la charge la plus forte (tableau 16). Toutefois, le surplus de biomasse lombricienne obtenue pour des charges supérieures à 80 vers/kg d'OM_1 humides est assez faible. La compétition intra-spécifique (manque de place, nourriture, ...),qui se traduit pour des charges élevées par une réduction de croissance, aurait également pour conséquence une augmentation de la mortalité (tableau 17).

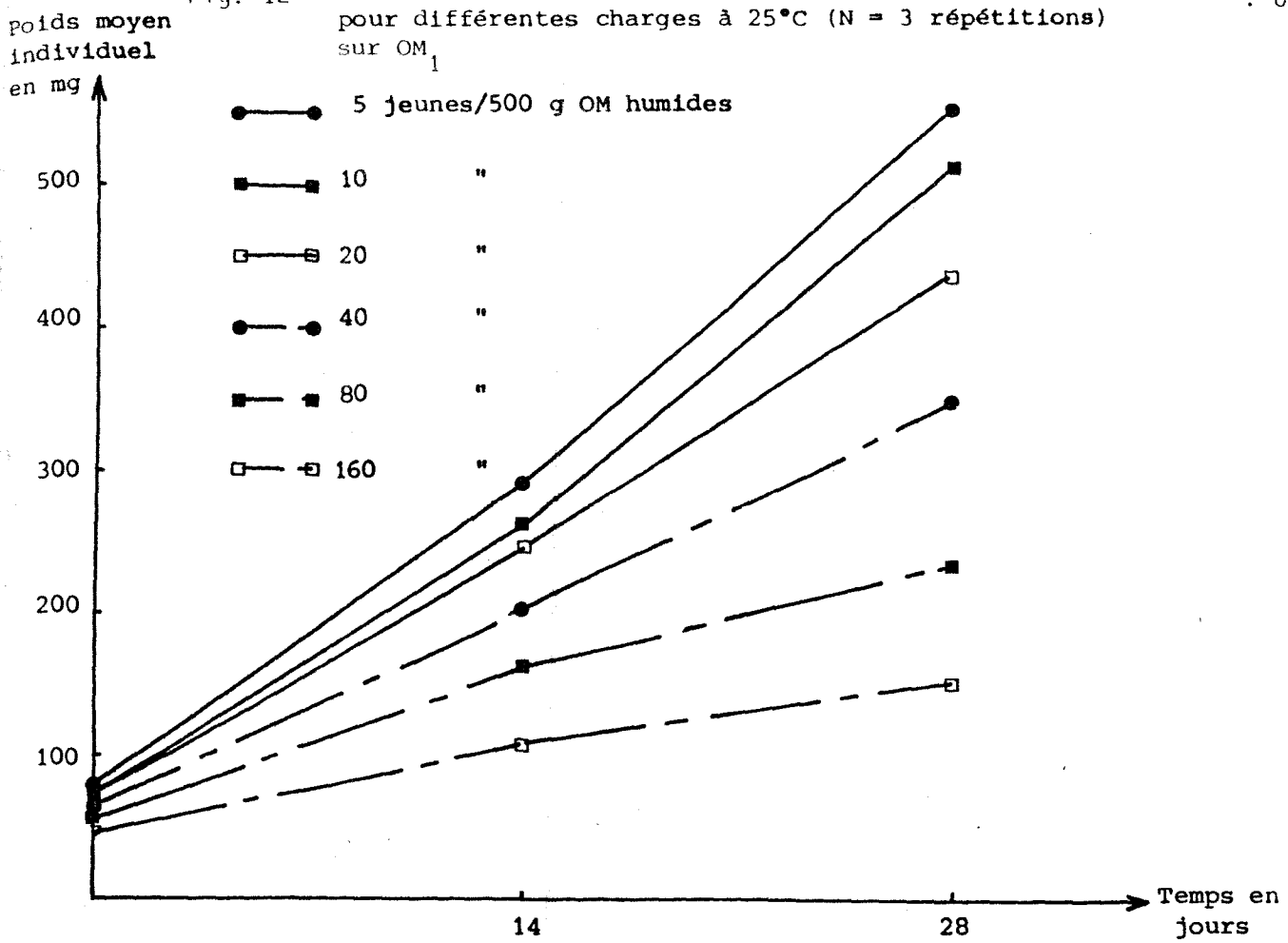
Une étude de la charge sur boue digérée effectuée dans les mêmes conditions confirme ces résultats, à savoir que l'accroissement de biomasse lombricienne augmente avec la charge (figure 13). Si nous comparons la biomasse lombricienne produite sur OM_1 et B_1, pour des charges identiques (20 à 40 vers/kg), la biomasse lombricienne obtenue sur boue est légèrement inférieure (de l'ordre de 20 %).

C - Ces matières organiques de composition très différente (C/N notamment) constituent un bon support pour l'élevage des vers de terre. NEUHAUSER *et al.* (1980) observent également une bonne croissance pour des boues mélangées à la cellulose dont le C/N varie de 15 à 35.

La mortalité dans ces élevages est toujours très faible ; elle semble augmenter légèrement sur ordures ménagères lorsque la charge s'élève (tableau 17). Dans les boîtes à forte charge, les animaux adoptent une attitude de fuite du milieu d'élevage (reptation sur les parois). Ce phénomène qui ne s'observe pas dans les boîtes où la charge est faible paraît s'accentuer au cours de l'élevage, là où la charge est forte. Les mouvements des animaux

...

Fig. 12 - Croissance individuelle de jeunes (souche Efp1756) pour différentes charges à 25°C (N = 3 répétitions) sur OM_1



Tab. 16. **Biomasse lombricienne obtenue sur 500 g de OM_1 humides pour différentes charges à 25°C (N = 3 répétitions).**

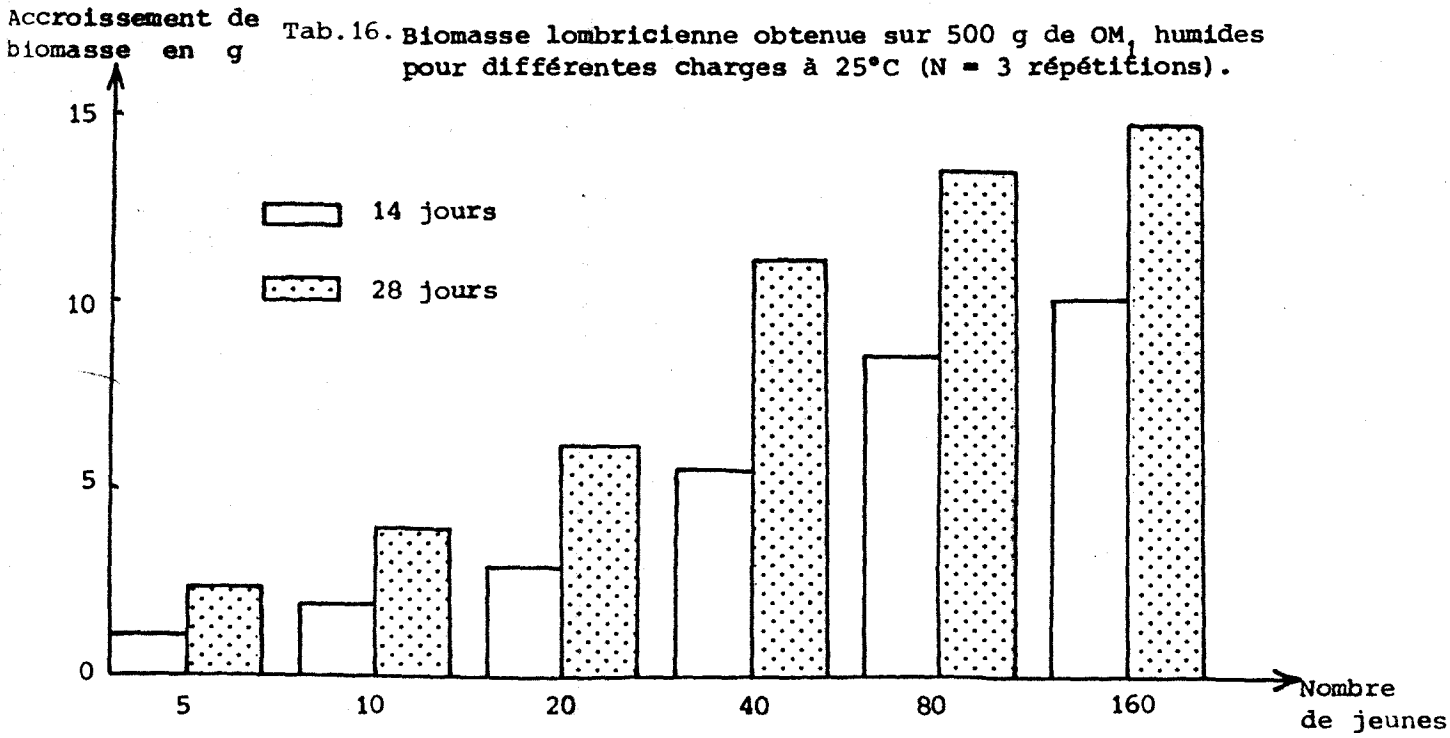
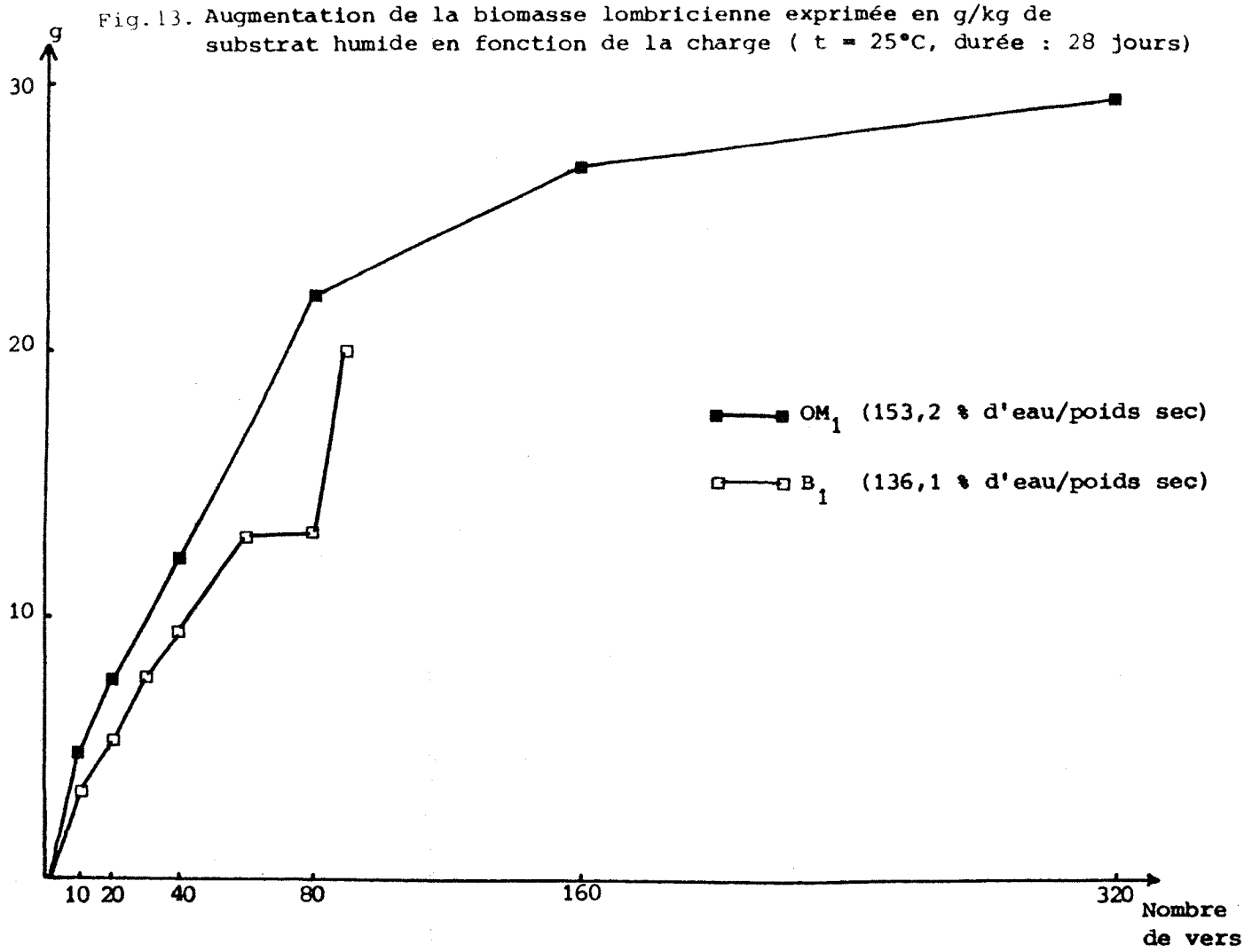


Fig. 13. Augmentation de la biomasse lombricienne exprimée en g/kg de substrat humide en fonction de la charge (t = 25°C, durée : 28 jours)



Substrat 1 kg humide	Nombre de vers mis en élevage								
	10	20	30	40	60	80	90	160	320
OM_1	0,0	6,7	-	5,0	-	2,5	-	5,4	9,8
B_1	0,0	5,0	6,7	0,0	6,7	7,5	0,0	-	-

Tab. 17 - **Mortalité exprimée en % par rapport aux nombre de vers mis en élevage.**

et la fragmentation des particules organiques créent dans ce substrat humide un tassement propice à l'anaérobiose ; ces mauvaises conditions ainsi que l'effet de masse peuvent expliquer cette tendance à la fuite. Notons enfin que la surpopulation conduit à une réduction générale de la croissance de tous les individus.

4.1.4.2 - Influence du nombre de cycles

J'ai étudié pour une charge moyenne (40 vers/500 g d'OM_1 humides) la croissance de jeunes sur 2 cycles d'élevage consécutifs de 6 semaines chacun à 25°C (tableau 18).

	Poids moyen individuel en mg		% adultes	Mortalité en %	Biomasse produite en g/kg d'OM humides
	départ	fin d'élevage			
1er cycle de 6 semaines	33,0	486,4 ± 26,6	96,0	5,5	34,3 ± 2,6
2ème cycle de 6 semaines	41,1	145,9 ± 16,2	0,0	18,5	6,9 ± 1,6

Tableau 18 - Résultats d'élevage sur 2 cycles à 25°C (40 vers/500 g d'OM_1 humides, 5 répétitions).

Lors du premier cycle d'élevage de 6 semaines, nous obtenons une majorité de vers adultes, bien développés. L'accroissement de biomasse lombricienne (34,3 g) est plus important que celui obtenu sur ces mêmes ordures ménagères en 28 jours (§ 4.1.4.1). Un second cycle d'élevage montre que les performances sont fortement ralenties (faible croissance individuelle, absence d'adultes).

Eisenia fetida ingère journellement une quantité de matière organique équivalente à son poids (MITCHELL *et al.*, 1977). En admettant une charge moyenne de 30 à 40 vers par kg d'ordures humides lors du premier cycle, la majorité du substrat d'élevage serait ingérée en 42 jours. En déduisant de

...

ces ordures les matières inertes (verre, plastique) de granulométrie élevée qui représentent 10 à 30 %/poids sec de nos ordures ménagères, nous obtenons lors du second cycle une réingestion probable des fèces. L'ingestion par *Eisenia fetida* de ses propres fèces provoque une perte de poids (KAPLAN *et al.*, 1980b) et pourrait expliquer ici les performances moindres du second cycle (entre 6 et 12 semaines d'élevage). Si une nouvelle réutilisation des matières organiques par les lombriciens n'est pas douteuse (BOUCHE, 1981), nous ne savons pas à quel rythme elle s'opère.

4.1.5 - Préparation du substrat

Deux types de boues urbaines en provenance de Dijon ont servi de support d'élevage pour étudier la croissance des vers de terre ; les unes, prélevées sur lit de séchage, proviennent de digesteur anaérobie, tandis que les secondes (boues primaire et secondaire activées) ont été séchée à 200°C, puis pressées. Des lots de 10 vers, pesant entre 50 et 100 mg sont mis en élevage dans 500 g de substrat humide (température : 22,5°C ; 5 répétions).

Support d'élevage	Poids individuel au départ en mg	Poids individuel la 4ème semaine en mg
Boue digérée	70,7 ± 6,3	335 ± 25,2
Boue séchée à 200°C	75,3 ± 7,4	50,2 ± 10,7

Tableau 19 - Croissance de jeunes vers (Ef P 1756) sur boues urbaines à 22,5°C.

Les résultats de croissance indiquent que les vers de terre, mis en élevage sur boue obtenue après séchage à 200°C et pressage, ont perdu du poids en 4 semaines tandis que sur boue en provenance de lit de séchage la croissance a été bonne (tableau 19). Ce dernier résultat est en accord avec celui de MITCHELL *et al.* (1977) pour qui les boues en provenance de digesteur anaérobie sont, après aération, bien ingérées par *Eisenia fetida* et favorables à la croissance.

...

Le traitement subi par les boues séchées puis pressées conduit à des produits beaucoup plus pauvres en azote. Lors du séchage, les corps microbiens ou les produits d'excrétion de ces derniers (polysaccharides), qui constituent la partie essentielle de la matière organique contenue dans les boues, ont été détruits. Les mauvaises performances de croissance lombricienne enregistrées sur ces boues témoignent de l'importance des microorganismes (NEUHAUSER *et al.*, 1980) et animaux du sol (ROUELLE et PUSSARD, 1981 ; DASH *et al.*, 1980) dans la nutrition du ver de terre.

4.1.6 - Granulométrie des OM

Pour des ordures ménagères de même provenance (Montbéliard), et qui ont subi une aération de quelques jours en tour, j'ai comparé sur deux cycles d'élevage de 6 semaines la croissance sur ordures ménagères brutes (< 80 mm) et ordures ménagères broyées et criblées (< 20 mm). Un cycle d'élevage a été réalisé sur des ordures non broyées, préalablement compostées 6 semaines à 22,5°C.

Support d'élevage		Poids moyen individuel en mg		Mortalité en %	Adultes %
		initial	final		
ordures brutes (≤ 80mm)	1er cycle	36,7 ± 3,0	150,5 ± 26,2	61,5	0
	2è cycle	59,6 ± 12,7	268,8 ± 35,4	11,5	26,4
Ordures broyées (≤20mm)	1er cycle	48,2 ± 5,5	373,5 ± 20,9	42,5	60,4
	2è cycle	53,3 ± 8,2	206,4 ± 20,4	6,5	5,6
Ordures brutes déjà compostées 6 semaines sans vers de terre		58,3 ± 14,8	324,7 ± 15,0	2,5	55,0

Tableau 20 - Résultats d'élevage à 22,5°C sur ordures ménagères en provenance de Montbéliard en 6 semaines (40 vers/500 g d'OM_1 humides, 5 répétitions).

La croissance d'*Eisenia fetida* sur ordures brutes a été faible lors du premier cycle d'élevage alors qu'au second cycle nous avons obtenu de meilleurs résultats (tableau 20). Sur les mêmes ordures broyées, nous avons enregistré, dès le premier cycle, une croissance analogue à celle obtenue sur d'autres substrats organiques (§ 4.1.4), ainsi qu'une réduction de croissance au second cycle. La croissance des vers mis en élevage sur des ordures brutes soumises à un précompostage de 6 semaines est fortement améliorée par comparaison avec celle obtenue sur les mêmes ordures utilisées en l'état.

L'accroissement de biomasse lombricienne (20 g/kg OM broyées) a été, en 6 semaines, inférieur à celui enregistré sur OM de Montargis. Le broyage améliore la qualité des ordures ménagères comme substrat d'élevage en augmentant la proportion de particules fines bien ingérées par le ver de terre (NEUHAUSER *et al.*,1980). Le précompostage, au même titre que le broyage, favorise également l'attaque du substrat par les microorganismes (source d'aliment pour le ver de terre) et pourrait expliquer ici les performances lombriciennes supérieures enregistrées sur les ordures ayant subi ces traitements.

4.1.7 - Origine et degré d'évolution des OM

Pour trois types d'ordures ménagères d'origines différentes, j'ai étudié la croissance des jeunes (souche Ef P 1756) sur une période de 6 semaines. Les résultats d'élevage sont présentés au tableau 21.

Les ordures ménagères "fraîches" (OM fraîches) ont subi une aération de quelques jours en tour, suivie ou non d'un compostage lent en plein air. Dans tous les lots la mortalité a été élevée et serait provoquée par une toxicité des substrats en début d'élevage (§ 3.2.3). Sur les OM de Pontenx- les-Forges, âgées de 6 jours, nous avons obtenu les meilleurs résultats de croissance, alors que pour les deux autres types d'OM la croissance a été moins élevée. Un accroissement de la biomasse lombricienne, d'environ 32 g/kg d'OM humides, a pu être obtenu pour les OM de Pontenx et ceci malgré la faible charge due à la mortalité en début d'élevage. La croissance est fortement ralentie pour les vers mis en élevage sur OM de Pontenx âgées de 120 jours.

...

Provenance et degré d'évolution des OM		Poids moyen individuel en mg		Mortalité en %	Adultes en %
		initial	final		
Pontenx les Forges	OM fraîches 40 jeunes/500g	28,0 ± 2,5	604,9 ± 14,5	42,0	97,8
	OM fraîches 60 jeunes/500g	32,3 ± 4,7	587,1 ± 73,1	50,9	98,3
	OM âgées de 120 jours 40 jeunes/500g	61,5 ± 7,6	119,4 ± 12,2	46,5	0
Auxerre (OM fraîches) 40 jeunes/500 g		20,8 ± 6,9	311,3 ± 26,7	13,0	45,3
La Loupe (OM fraîches) 40 jeunes/500 g		52,3 ± 32,9	254,3 ± 29,6	74,0	0

Tableau 21 - Etude des performances des animaux mis en élevage pendant 6 semaines sur des ordures ménagères de provenance et de degré d'évolution différents (t°= 22,5°C 5 répétitions pour 500 g d'OM humides à 150 % d'eau/poids sec).

Les performances de croissance des animaux sont variables suivant la provenance des ordures ménagères ; un précompostage de 120 jours diminue la valeur des ordures en tant que substrat pour l'élevage d'*Eisenia fetida*.

4.1.8 - Comparaison des souches

Une comparaison de croissance pondérale a été effectuée sur les deux espèces *E.f. andrei* (Ef P 1756) et *E.f. fetida* (Ef P 1758) mise en élevage sur OM en provenance de Montargis pour une durée de 21 jours.

Les résultats qui portent sur la phase de croissance rapide (tableau 22) montrent qu'aucune différence de croissance n'a pu être mise en évidence dans ces conditions.

...

Souches	Poids moyen individuel en mg	
	initial	final
Ef P 1756	52,6 ± 4,7	217,4 ± 25,4
Ef P 1758	51,5 ± 5,9	200,9 ± 31,9

Tableau 22 - Résultats de croissance de deux souches d'*Eisenia fetida* sur OM de Montargis à 22,5°C (durée = 3 semaines ; 5 répétitions de 20 vers/500 g OM humides)

4.1.9 - Conclusions

Le ver *Eisenia fetida andrei* (souche Ef P 1756) a été retenu pour le compélevage ; une bonne adaptation et des performances élevées ont pu être obtenues sur déchets urbains. Un accroissement de biomasse lombricienne de 36 g/kg d'OM humides (150 % d'eau/poids sec) a pu être enregistré dans des conditions de croissance optimales. Les individus utilisés pour nos essais sont de petite taille (500 mg à l'état adulte) avec l'avantage d'avoir un métabolisme élevé. La dimension des déchets ingérés serait fonction de la taille des vers : espèces et stades (FERRIERE, 1980) ; ce paramètre est important pour l'optimisation du compélevage. Des vers adultes introduits sur des ordures ménagères grossières seraient sans doute plus aptes à ingérerce substrat ; toutefois l'accroissement de biomasse lombricienne serait faible ou nul. D'autres espèces lombriciennes de grande taille comme *Eudrilus eugeniae* (NEUHAUSER *et al.*, 1979) ou des souches d'*Eisenia fetida* qui atteindraient 1 g à l'état adulte (NEUHAUSER *et al.*, 1980) mériteraient d'être utilisées pour le compélevage.

...

4.2 - Etude de la reproduction

Contrairement aux microorganismes dont le pouvoir de colonisation est considérable, l'augmentation des populations lombriciennes s'effectue beaucoup plus lentement. La reproduction est en général croisée et les individus adultes commencent à pondre des cocons après l'accouplement.Durant l'incubation qui dure plusieurs semaines, un ou plusieurs embryons se développent à l'intérieur du cocon et vont donner naissance à l'éclosion à de jeunes vers. Pour notre étude, la prolificité (ou nombre de jeunes par adulte) est indispensable à connaître car d'elle va dépendre la colonisation de nouveaux milieux et l'accroissement de la biomasse lombricienne. Lors des essais précédents, les cocons produits dans nos élevages, où nous obtenons une majorité d'adultes en 6 semaines, n'ont pas été comptabilisés.

4.2.1 - Introduction

Chez les lombriciens, l'apparition du clitellum qui survient par étapes successives est caractéristique de l'état adulte. Il se présente sous forme d'un anneau saillant chez le ver bien alimenté et en période de reproduction. Son rôle est de produire un tube muqueux que l'animal fait glisser vers l'avant par gonflement des segments pour former le cocon. Chez *Eisenia fetida*, animal hermaphrodite, la production de cocons nécessite un accouplement préalable et la ponte a lieu deux jours plus tard (HERLANT-MEEWIS, 1954). La production de cocons après autofécondation a pu être observée chez 5 individus sur 15 isolés dès la naissance (HARTENSTEIN *et al.*, 1980).

En raison de l'hétérogénéité des conditions expérimentales, les données de fécondité sont très variables ; pour EVANS et GUILD (1948b), quelques cocons seraient produits par an et par ver *Eisenia fetida* alors que GRAFF (1974)et HARTENSTEIN *et al.* (1979) obtiennent jusqu'à 3 cocons par ver et par semaine. La polyembryonnie existe chez de nombreuses espèces lombriciennes mais il n'éclot généralement qu'un seul jeune. *Eisenia fetida* est l'une des rares espèces dont le nombre de jeunes par cocon est supérieur à 1 avec des chiffres moyens de 2,6 (VAIL, 1974) à 3,35 (TOMLIN et MILLER, 1979).

...

Les cocons sont protégés par une enveloppe résistante qui supporte bien des conditions défavorables. La durée d'incubation est inversement proportionnelle à l'élévation de température ; elle serait de 85,5 jours à 10°C et 19,5 jours à 25°C (TSUKAMOTO et WATANABE, 1977). Nous avons donné ici une priorité à l'étude de la fécondité sur divers substrats organiques.

4.2.2 - Fécondité sur boue digérée et durée d'incubation des cocons

4.2.2.1 - Fécondité

Des lots de 5 vers adultes de même poids sont mis en élevage sur 500 g de boues à 140 % d'eau/poids sec (5 répétitions à 20°C). A chaque contrôle, les adultes sont pesés et les cocons prélévés des milieux d'élevage.

	Intervalle des contrôles			
	0-14 jours	14-28 jours	28-42 jours	42-66 jours
% d'accroissement pondéral/ poids initial	47,2	48,7	35,2	28,0
Cocons produits par ver et par semaine	0,42 ± 0,29	1,75 ± 0,32	1,61 ± 0,21	0,91 ± 0,39

Tableau 23 - Fécondité du ver Ef P 1756 sur boue d'épuration

Les résultats de fécondité et de variations pondérales pour les adultes sont présentés au tableau 23.

Lors de la première phase, on assiste à une prise de poids des animaux alors que la fécondité est relativement faible. De 14 à 42 jours,

...

la fécondité augmente alors que durant cette phase aucune variation pondérale n'est enregistrée. Du 42ème au 66ème jours, on assiste à une perte de poids et à une diminution de la fécondité qui pourrait traduire un vieillissement des adultes ou un appauvrissement du substrat d'élevage.

Ces résultats de fécondité d'*Eisenia fetida* sur boues urbaines sont moyens ; 3 à 4 cocons par ver et par semaine sur fumier de cheval ont pu être obtenus (HARTENSTEIN *et al.*, 1979).

La fécondité d'*Eisenia fetida* croît régulièrement entre l'âge de 5 et 10 semaines pour atteindre un maximum, puis décroît ensuite régulièrement (HARTENSTEIN *et al.*, 1979). Les résultats de fécondité enregistrés ici sont certes une moyenne mais non l'optimum, en raison de l'âge inconnu des adultes.

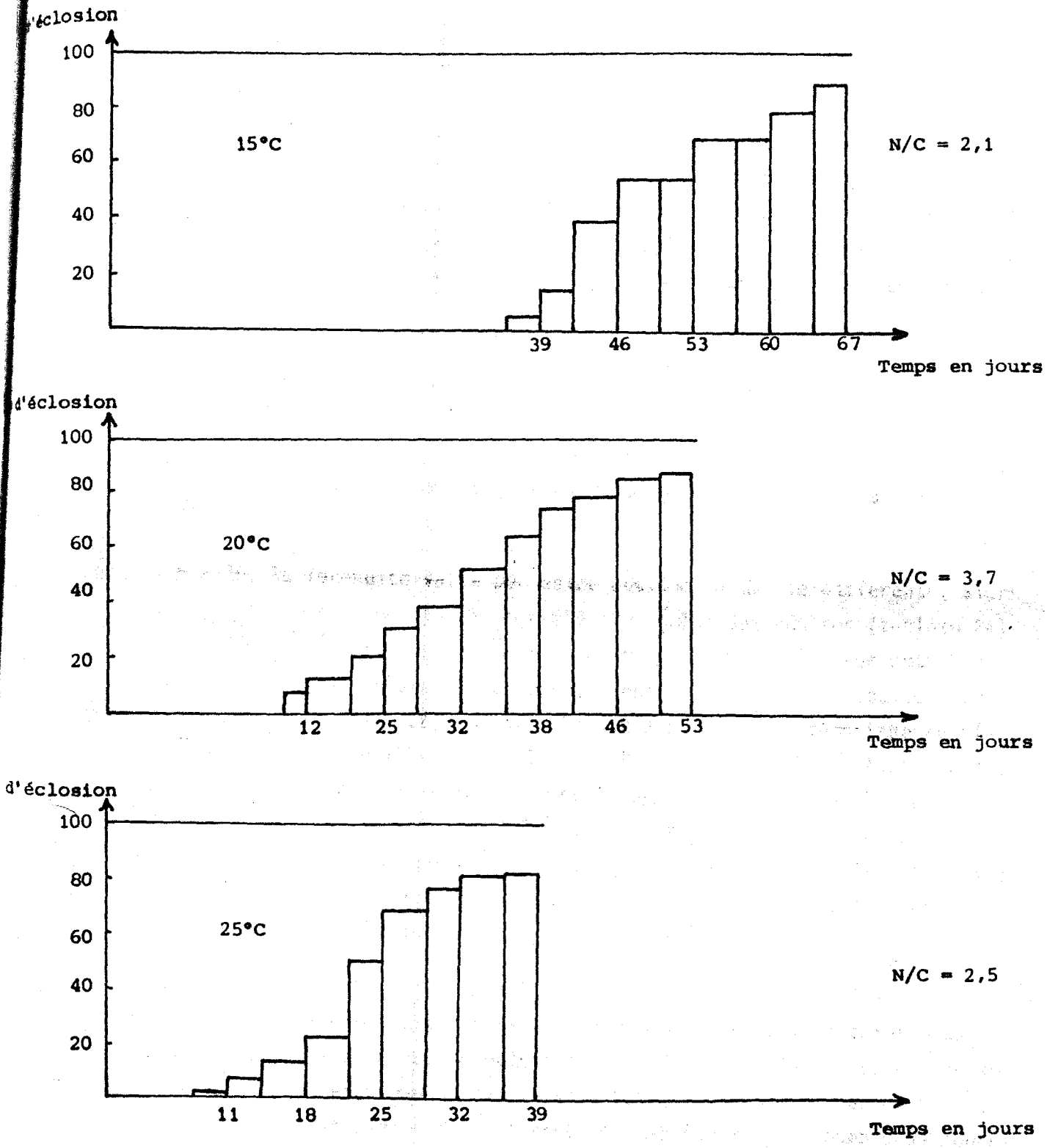
4.2.2.2 - Durée d'incubation des cocons

Les cocons âgés de 0 à 14 jours sont mis en incubation par lot de 4 dans des creusets en verre fritté, obturés par un bouchon en caoutchouc ; ces creusets sont placés dans un bac contenant un peu d'eau, de manière à empêcher la dessiccation du cocon. Des lots de 20 cocons sont placés à 15°C, 88 cocons à 20°C et de 79 cocons à 25°C. Les contrôles sont effectués tous les 3 et 4 jours.

Les résultats donnant les nombres de jeunes éclos par cocon et la durée d'incubation sont présentés à la figure 14. Aux températures de 15, 20 et 25°C, nous obtenons un taux d'éclosion respectif de 90,0 %, 86,4 % et 82,3 % avec une durée moyenne d'incubation de 46, 33 et 25 jours. Le taux d'éclosion demeure élevé malgré un léger fléchissement lorsque la température augmente. REINECKE et KRIEL (1980) ont enregistré des taux d'éclosion identiques aux nôtres et un nombre de jeunes/cocon optimal à 20°C. Pour TSUKAMOTO et WATANABE (1977), le taux d'éclosion diminue lorsque la température d'incubation des cocons augmente ;ainsi ces auteurs n'obtiennent que 30 % d'éclosion à 25°C. Notons enfin que le nombre de jeunes éclos par cocon croît avec la taille du cocon (HARTENSTEIN *et al.*, 1979).

...

Fig. 14 Effet de la température sur le % d'éclosion et la durée d'incubation à 3 températures (N/C = nombre de jeunes par cocon)



4.2.3 - Influence de la température sur la fécondité

A - Des lots de 5 vers adultes (souche Ef P 1756), âgés de 6 à 8 semaines sont mis en élevage sur 300 g d'OM humides (150 % d'eau/poids sec) en provenance de Montargis, pendant une durée de 28 jours. Les boîtes sont placées à 3 températures (15, 20 et 25°C) à raison de trois répétitions par traitement. Une étude de la ponte a également été réalisée sur des lots d'animaux plus gros (souche Ef P 1756) à 25°C. Les adultes de poids moyen égal à 1102 mg (tableau 23) ont été prélevés dans des milieux très humides et "pâteux" (boues urbaines) qui ont permis de prolonger la croissance. Les cocons et adultes sont pesés chaque semaine et les animaux sont remis en élevage sur le même milieu.

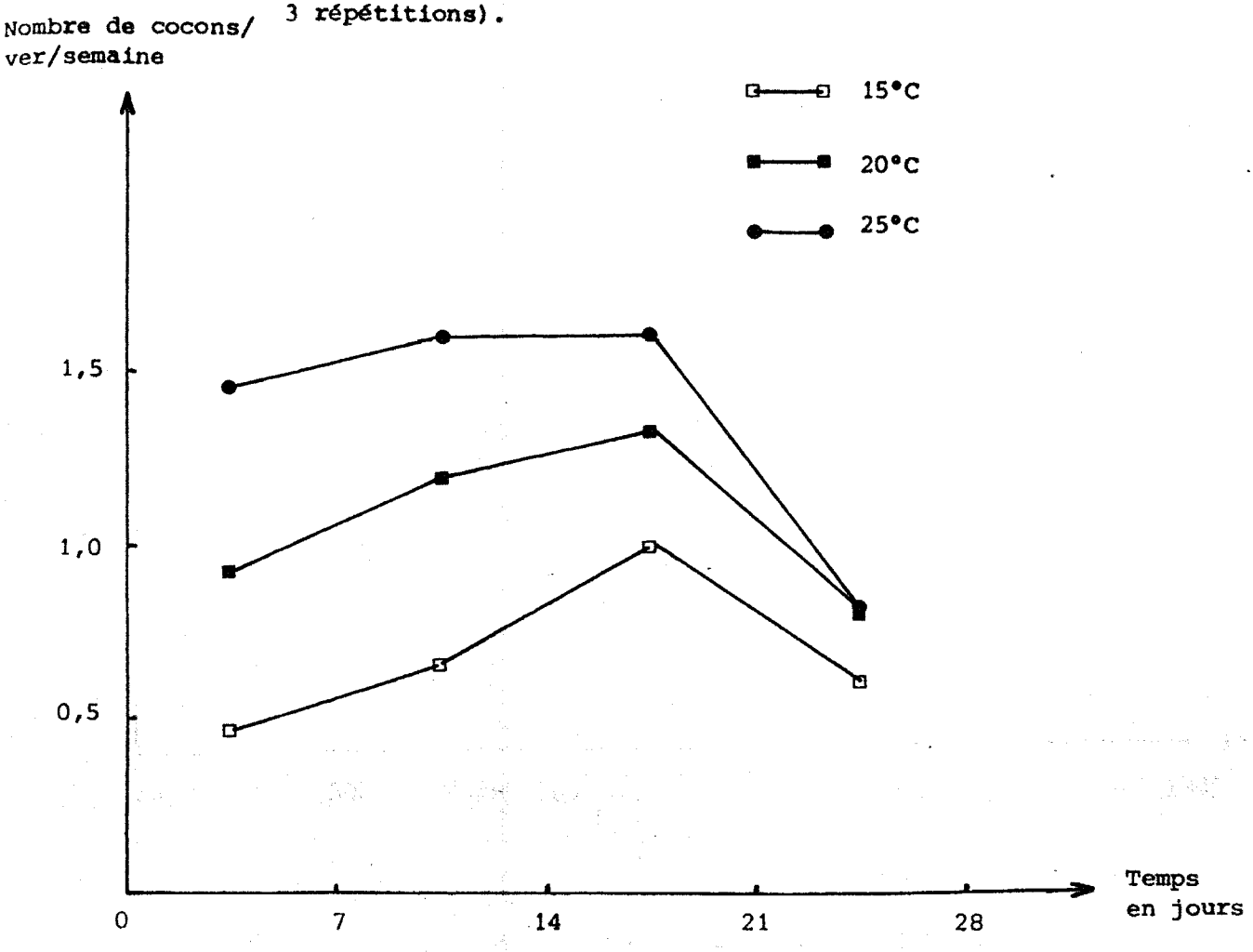
La fécondité (fig.15), pour les vers de poids moyen individuel égal à 500 mg, augmente avec la température ($P < 0,01$). On observe une réduction de la fécondité la quatrième semaine, réduction qui serait plutôt due ici à un appauvrissement du milieu d'élevage plus qu'à un vieillissement des adultes.

A 25°C, la fécondité varie peu entre adultes de taille différente, alors que le poids des cocons paraît corrélé avec celui des adultes (tableau 24). A cet effet, à partir des lots mis en élevage à 25°C (4 prélèvements X 3 répétitions), j'ai pu établir un rapport entre la taille des adultes et celle des cocons (fig. 16). Cette relation a surtout été démontrée au niveau interspécifique (EVANS et GUILD, 1948b ; BOUCHE, 1972 ; LAVELLE,1981) mais rarement au niveau intraspécifique. Pour *Eisenia fetida*, le poids des cocons croît linéairement avec celui des adultes (HARTENSTEIN *et al.*,1979). D'après ces auteurs, un poids moyen de 11,8 mg par cocon serait obtenu pour un adulte de 500 g, valeur très voisine de celle que l'on peut tirer de la figure 16 (12,7 mg/cocon).

B - A 25°C, la fécondité est plus élevée que pour des températures plus faibles, par contre le taux d'éclosion et le nombre de jeunes par cocon sont optimaux à 20°C. Pour une température de 25°C, le nombre de jeunes par ver adulte , qui tient compte de la fécondité (tableau 24), du nombre de jeunes par cocon et du taux d'éclosion (fig. 14) est de 2,8 par adulte et par

...

Fig. 15 - **Influence de la température sur la fécondité du ver Eisenia fetida (Efp1756) sur OM (N = 3 répétitions).**



Tab. 24 Fécondité de Eisenia fetida (Efp1756) en 28 jours

	Températures			
	15°C	20°C	25°C	
Poids moyen individuel en g des adultes	508,9	481,1	489,7	1102,6
Nombre de cocons par ver et semaine	0,68 ± 0,15	1,06 ± 0,20	1,37 ± 0,20	1,51 ± 0,33
Poids moyen individuel en mg des cocons	11,8 ± 2,9	12,4 ± 3,1	13,2 ± 3,2	21,8 ± 4,4

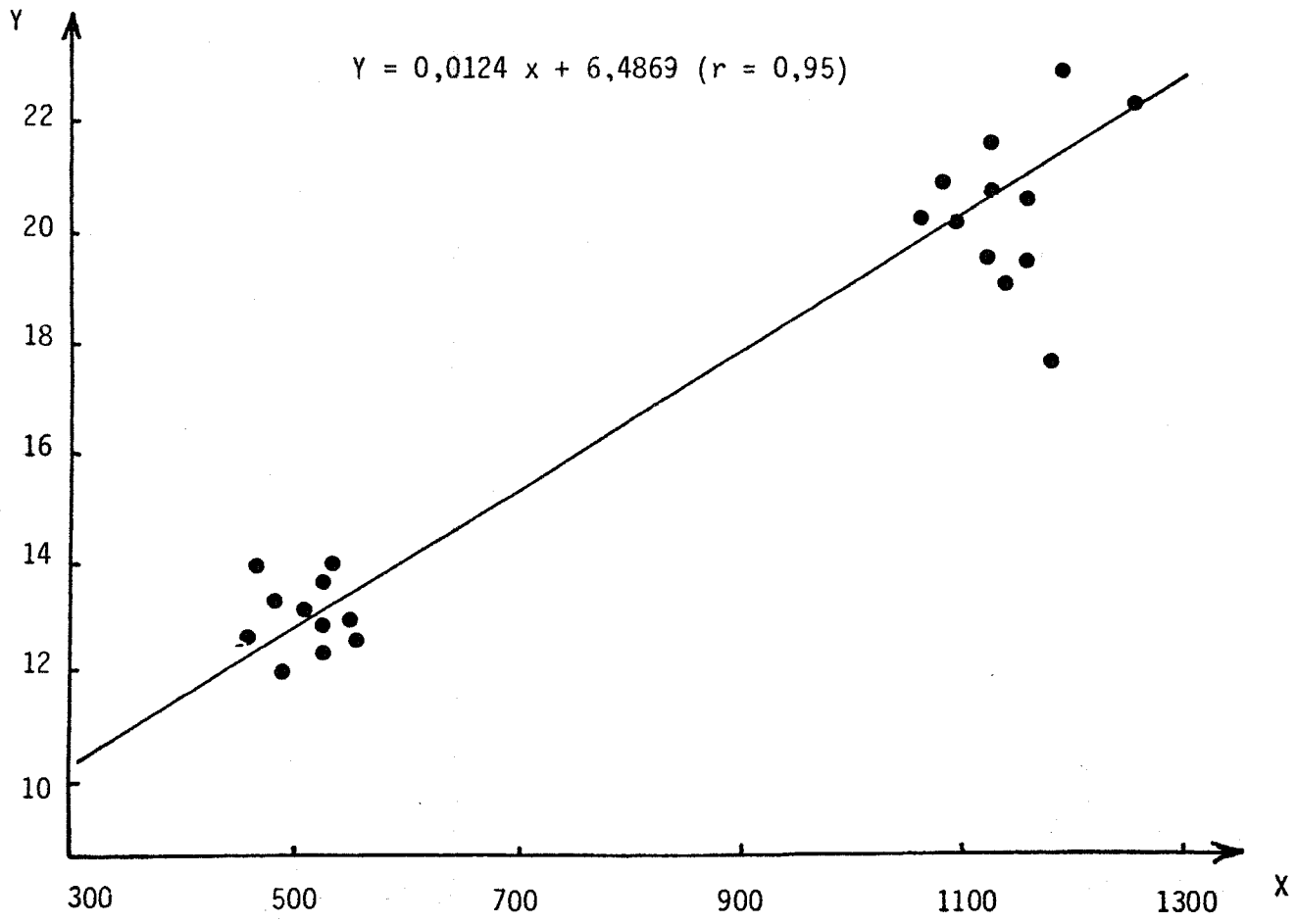


Fig. 16 - Relation entre le poids moyen individuel des adultes en mg (X) et le poids moyen individuel des cocons en mg (Y) pour la souche Ef P 1756

semaine. Cette température permet en outre d'obtenir une durée d'incubation minimale des cocons (25 jours environ).

4.2.4 - Influence des milieux d'élevage et des souches lombriciennes

4.2.4.1 - Milieu à base de fèces de cheval

Un mélange contenant 1/3 de fèces de cheval (fraction fine obtenue par tamisage du fumier sur tamis à maille carrée de 2 cm) et 2/3 de terreau humidifié à 180 % d'eau/poids a servi de milieu d'élevage. Des lots de 20 adultes (souche Ef P 1756) d'âge inconnu sont placés à 25°C dans 500 g de substrat à raison de trois répétitions. Les résultats d'élevage figurent au tableau 25.

	Période de ponte			
	0-7ème jour	7-14ème jour	14-21ème jour	21-28è jour
Poids moyen des adultes en mg	654,7 ± 9,5	617,2 ± 25,2	517,8 ± 23,0	529,5 ± 15,3
Poids des cocons en mg	12,8 ± 0,9	14,8 ± 0,5	14,5 ± 0,2	14,5 ± 0,2
Nombre de cocons par ver et par semaine	1,7 ± 0,2	3,3 ± 0,4	3,0 ± 0,4	1,4 ± 0,4

Tableau 25 - Fécondité de vers adultes à 25°C sur milieu : 1/3 fèces de cheval et 2/3 de terreau.

La production de cocons est maximale entre le 7ème et le 21ème jour ; plus de 3 cocons par ver et par semaine ont été obtenus durant cette période. La baisse de fécondité durant la quatrième semaine pourrait être due à la diminution de la qualité nutritionnelle du milieu d'élevage. GRAFF (1974) observe une fécondité de 3 cocons par ver et par semaine à 25°C ; HARTENSTEIN

...

et al.,(1979) ont pu obtenir jusqu'à 5 cocons par ver et par semaine pour des *Eisenia fetida* âgés de 10 semaines et élevés sur fumier de cheval.

Malgré la densité élevée des vers sur milieu à base de fumier de cheval, la fécondité est plus forte ici que sur boue digérée de station d'épuration (§ 4.2.2) ou sur ordures ménagères (§ 4.2.3).

4.2.4.2 - Milieu à base de terreau

A - Des vers de terre adultes (souche Ef P 1756) de poids moyen individuel égal à 490 mg sont mis en élevage sur un milieu terreau à 160 % d'eau/ poids sec. Dans l'un des lots (50 adultes pour 3 kg de terreau), les vers sont alimentés par un apport de 20 g de son en surface (tableau 26).

		Terreau + 20 g de son en surface		Terreau seul	
		a	b	a	b
Contrôle le 21è jour	Poids moyen des vers en mg	447,1	478,9	445,8	452,4
	Poids moyen des cocons en mg	14,5	13,9	12,6	13,6
	Nombre de cocons par ver et par semaine	1,43	1,40	0,54	0,51
Contrôle le 42è jour	Poids moyen des vers en mg	414,1	438,3	390,1	380,6
	Poids moyen des cocons en mg	14,1	13,9	11,2	12,4
	Nombre de cocons par ver et par semaine	1,07	0,95	0,13	0,22

Tableau 26 - Fécondité sur milieu terreau seul et milieu terreau avec apport de son en surface (T = 22,5°C) (2répétitions a et b par milieu).

La fécondité notée les 21ème et 42ème jours d'élevage est meilleure lorsque les animaux sont alimentés par un apport de son en surface. Le terreau, ou matière organique dégradée, est un substrat médiocre pour la fécondité du ver *Eisenia fetida*.

B - Deux cents cocons en provenance de l'élevage précédent (âgés de 0 à 21 jours) sont prélevés au hasard et mis en incubation dans 3 kg de terreau, à une température de 22,5°C

Lors du contrôle, 5 semaines plus tard, 282 immatures de poids compris entre 10 et 90 mg ont été dénombrés. Les 22 cocons non éclos et remis en incubation pour une durée de trois semaines n'ont pas donné de jeunes. Le taux d'éclosion observé ici est de 89 % et nous avons obtenu 1,41 immatures par cocon.

4.2.4.3 - Comparaison de fécondité entre souches

Différents milieux ont été réalisés pour étudier la fécondité de deux souches d'*Eisenia fetida* adultes (Ef P 1756 et Ef P 1758) avec adjonction de nourriture en surface : son, OM ou fumier de bovins (tableau 27).

	500 g de terreau humide				500 g d'OM de Montargis + fibres	500g de fumier de bovins + fibres
	seul	avec 10 g de son	avec 500 g d'OM de Montargis	avec 500 g de fumier de bovins		
Souche Ef P 1756	$0,22^{c}$	$0,48^{c}$	$1,16^{b}$	$0,52^{c}$	$2,26^{a}$	$0,25^{c}$
Souche Ef P 1758	$0,21^{c}$	$0,79^{bc}$	$0,91^{bc}$	$0,40^{c}$		

Tableau 27 - Comparaison de la fécondité entre souches sur différents milieux d'élevage.

Pour la souche Ef P 1756, l'apport de fibres végétales en surface avait pour objectif de récupérer les cocons. ROUELLE (communication personnelle) a pu constater que la majorité des cocons se retrouve dans la mousse déposée à la surface des milieux d'élevage. Dix vers adultes par boîte sont placés en élevage à 22,5°C à raison de trois répétitions par traitement ; les contrôles sont effectués le 21ème jour d'élevage (tableau 27).

L'analyse de variance permet de mettre en évidence une différence significative entre les traitements ($P < 0,01$). Le test de comparaison des moyennes (tableau 27) montre que le milieu OM + fibres en surface a fourni les meilleurs résultats de fécondité ; alors qu'aucune différence n'a pu être mise en évidence entre les souches lombriciennes. L'apport de matières organiques biodégradables (son, ordures ménagères ou fumier de bovins) à la surface d'un milieu à base de terreau permet d'augmenter la fécondité des animaux. La présence de fibres en surface ne permet en aucun cas de récupérer les cocons ; ces derniers ont tous été déposés dans les matières organiques

4.2.5 - Conclusions

A 25°C, l'apparition de l'état adulte survient, en conditions favorables, 4 à 6 semaines après l'éclosion du cocon. Des jeunes *Eisenia fetida* élevés sur des matières organiques dégradées sont restés au stade juvénile pendant 6 mois. Le renouvellement du milieu a permis une reprise de croissance suivie d'une période de ponte normale.

La fécondité est sous la dépendance étroite du milieu d'élevage ; une alimentation en surface permet de l'accroître sur des matières organiques dégradées. Nous avons montré qu'elle est plus importante sur un substrat à base de fèces de cheval que sur des boues urbaines ou des ordures ménagères. Pour le *Megascolecidae* africain *Millsonia anomala*, seulement 5 % de l'énergie assimilée sert à la reproduction tissulaire et 0,3 % est affectée à la reproduction (LAVELLE, 1977). A 20-25°C, où le métabolisme est élevé (animaux poïkilothermes), les facteurs nutritionnels semblent jouer un rôle important sur la fécondité d'*Eisenia fetida*. Le développement et le fonctionnement de l'appareil génital et des caractères

...

sexuels secondaires sont également commandés par des neurosécrétions véhiculées par l'appareil circulatoire (AVEL, 1959).

Le cocon est entouré d'une enveloppe imputrescible qui le protège des conditions défavorables ; nous avons obtenu un taux d'éclosion élevé avec une durée d'incubation minimale à 25°C.

4.3 - Accroissement de biomasse lombricienne sur déchets : qualité du produit "ver de terre"

4.3.1 - Production de vers de terre

Le ver *Eisenia fetida* est parmi les lombriciens une espèce bien adaptée pour le compélevage : croissance rapide, taux de reproduction élevé, absence de diapause. La figure 17 représente le schéma de la croissance et de la reproduction de ce ver à 25°C, température optimale pour l'obtention de performances élevées. Au sortir du cocon, le jeune ver pèse seulement quelques milligrammes. Durant la phase juvénile, le taux de croissance élevé suit une progression logarithmique ; il permet d'obtenir en 4 à 6 semaines des individus pubères de 400 à 500 mg. Arrivés au stade adulte caractérisé par l'apparition du clitellum, les vers s'accouplent, puis pondent des cocons à raison de 1 à 3 par ver et par semaine. Après une durée d'incubation de trois semaines, plusieurs jeunes (1 à 3 en moyenne) éclosent par cocon.

Un schéma récapitulatif de la production de vers de terre sur ordures ménagères est présenté au tableau 28. La phase d'accroissement de biomasse lombricienne est obtenue à partir d'immatures mis en élevage pendant 6 semaines (1 cycle d'élevage), à 25°C, sur ordures ménagères. Avec un taux de mortalité de 5 %, nous avons obtenu en fin d'élevage une majorité d'adultes (95 %) et un accroissement de biomasse de 33,8 g en poids frais. Pour la reproduction, 13 adultes ont été remis en élevage pendant 3 semaines dans 1 kg d'OM. Les 63 cocons produits ont donné naissance durant les 3 semaines suivantes à 80 jeunes destinés à coloniser des OM fraîches pour une nouvelle phase de croissance.

...

Fig. 17 - Croissance et reproduction du ver *Eisenia fetida* à 25°C.

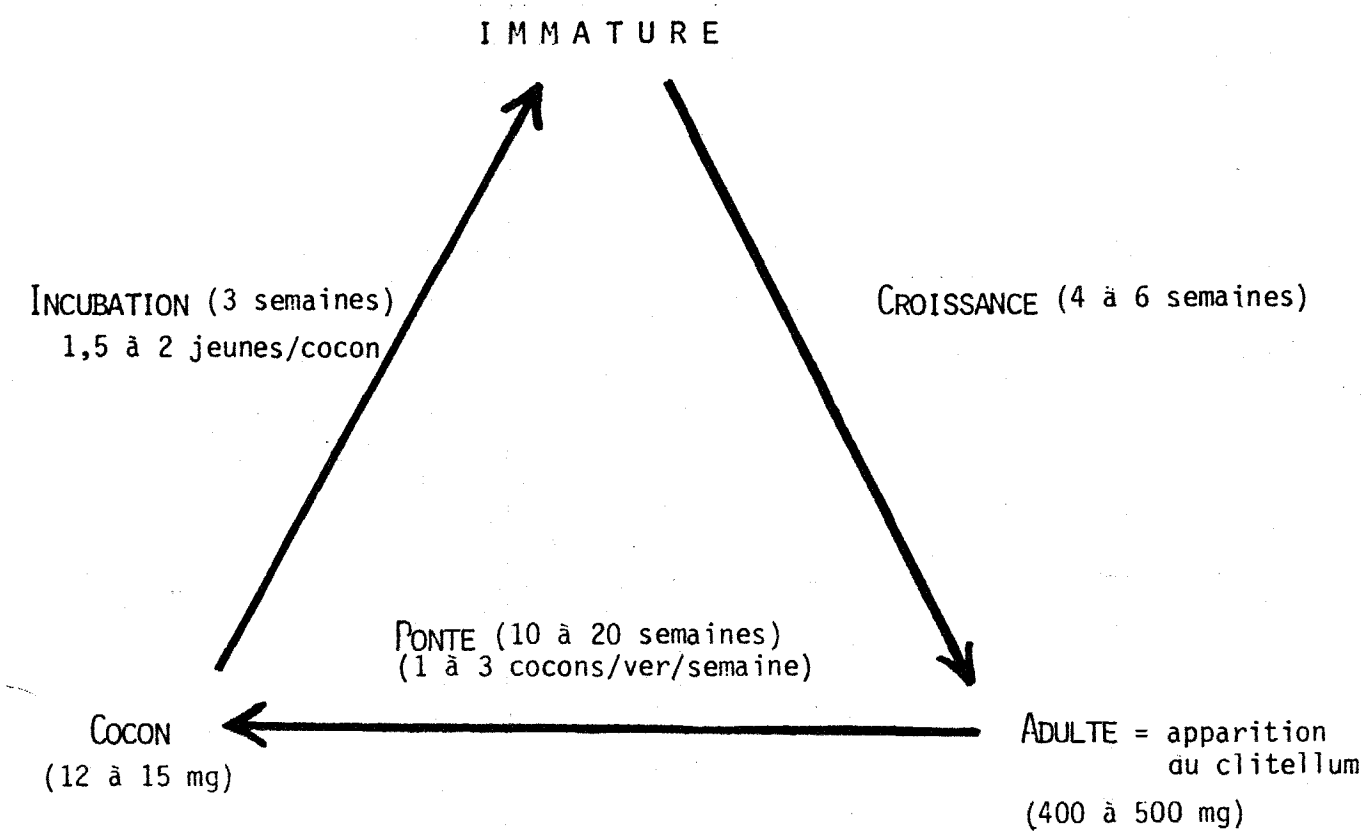


Tableau 28 - Schéma de production de vers *Eisenia fetida andrei* (souche Ef P 1756) sur ordures ménagères de Montargis à 25°C (les OM sont humidifiées à 150% d'eau/poids sec).

A - Croissance

	1 kg d'OM humides	
	Initial	Final
Nombre	80 jeunes → 6 semaines (5 % de mortalité)	72 adultes + 4 jeunes
Poids moyen individuel	5 mg	450 mg
Biomasse totale	0,400 g	34,2 g

B - Reproduction

1 kg d'OM humides	
Initial	Final
Fécondité	Incubation des cocons
13 adultes → 3 semaines 63 cocons (5% de mortalité) Fécondité : 1,7 cocons par ver/semaine	→ 3 semaines 80 jeunes Taux d'éclosion : 85 % 1,5 jeunes par cocon

4.3.2 - Qualité de l'aliment "ver de terre"

Le ver de terre *Eisenia fetida* contient 87,1 % d'eau/poids total et 61,3 % de protéines/poids sec (McINROY, 1971). Cet auteur a démontré la richesse de ce ver en acides aminés et ses bonnes qualités zootechniques (expérience sur la souris). CHAUDONNERET (1977) a analysé la composition de diverses espèces de vers de terre (dont *Eisenia fetida*) ; ceux-ci comportent un taux élevé de protéines (72 % en moyenne) et un taux de lipides variant de 12 à 15,3 %. Les acides gras (45 % des lipides) sont caractérisés par l'étendue de leur spectre qui varie de 11 à au moins 24 atomes de carbone et pourraient être intéressants en alimentation animale. D'autres auteurs (FRENCH *et al.*, 1957 ; SCHULZ et GRAFF, 1977) fournissent des données similaires sur la teneur en azote et la richesse en acides aminés du ver de terre qui en feraient un aliment de composition voisine de la farine de poissons.

Certains produits indésirables présents dans les déchets urbains peuvent se retrouver dans l'aliment ver de terre. Alors que les pesticides sont présents à l'état de traces, les teneurs en métaux lourds atteignent parfois des valeurs élevées (POMMEL, 1979). Si les taux de ces minéraux perturbent peu la croissance des animaux (HARTENSTEIN *et al.*, 1981), ils peuvent se bioaccumuler dans les tissus lombriciens. Tel est le cas du cadmium, du mercure et, à un moindre degré,du plomb (ANDERSEN, 1979 ; IRELAND, 1979 ; GISH *et al.*, 1973 ; HEIDET, 1981). Un choix de déchets peu ou pas contaminés devrait permettre d'éliminer ces risques d'accumulation.

V - Evolution des matières organiques

Les vers de terre ingèrent et brassent les matières organiques, stimulent l'activité de la microflore existante avec pour conséquence un accroissement probable de la dégradation du substrat. MITCHELL *et al.*(1977) ont montré que la vitesse de minéralisation des boues résiduaires est accrue en présence de vers de terre ; le pourcentage de cendres serait respectivement de 43,68 , 45,38 et 47,20 % pour des boues ayant évolué en l'absence de lombriciens, avec *Lumbricus terrestris* et *Eisenia fetida*.

La croissance lombricienne, ou processus d'anabolisme, est liée à des réactions cataboliques de dégradation du substrat d'élevage. J'ai tenté de caractériser l'état de la matière organique en comparant le substrat ayant évolué en présence (lombricompost) ou en l'absence (compost) de vers de terre. Plusieurs tests (mesures respirométriques, dénombrement des germes responsables du cycle de l'azote, analyse chimique, croissance végétale) ont été utilisés en vue de contrôler l'évolution des substrats et le degré de maturité des produits obtenus à usage agricole.

5.1 - Aspect physique

L'activité lombricienne s'accompagne d'une fragmentation et d'un brassage intense des matières organiques. La planche I montre la surface des boîtes d'élevage contenant des ordures ménagères en provenance de Montargis avec (40 jeunes pour 500 g d'OM) ou sans vers de terre, après 6 semaines d'évolution à 22,5°C. La fraction organique des boîtes avec vers de terre a été calibrée après passage dans le tube digestif d'*Eisenia fetida*. Le dépôt de fèces en surface témoigne du transit important et d'une division en fines particules des matières organiques.

Le travail des vers de terre conduit à la formation d'un lombricompost à base de fèces de taille très fine qui facilitera le tamisage ultérieur. La fraction plus grossière destinée à l'incinération sera ainsi appauvrie en matières organiques de forte taille fragmentées par les vers de terre.

...

5.2 - Echanges gazeux : pertes de carbone

5.2.1 - Mesure de l'activité biologique globale

Lors du compostage des matières organiques, les transformations par voie biologique sous l'action des microorganismes provoquent une perte de carbone (sous forme de CO_2 essentiellement) avec thermogenèse. Des tests respirométriques ont été proposés pour caractériser la maturité des composts urbains. La consommation d'oxygène des ordures ménagères diminue lors du compostage (NICOLARDOT, 1979) ; cet auteur démontre qu'un compost mûr, qui n'exerce aucun effet dépressif marqué sur les végétaux, consomme moins de 10 mg d'O_2/g de matière sèche en 7 jours.

5.2.1.1 - Matériel et méthode

La mesure du dégagement de gaz carbonique est réalisée selon une méthode qui permet de juger de l'activité globale sans perturber les élevages . J'ai choisi de mesurer le dégagement de CO_2 à l'aide d'un dispositif d'aération continu par circulation d'air à la surface des milieux d'élevage (fig. 18). Une pompe péristaltique (à débit d'air constant) aspire l'air humide qui provient de notre dispositif d'élevage à ventilation; le gaz carbonique est piégé par une solution de soude. Les Erlenmeyers A et B servent à débarrasser l'air de son gaz carbonique (on s'est assuré que le flacon B ne contient pas de CO_2) ; les flacons C et D permettent de récupérer le CO_2 produit par la dégradation du substrat. J'ai recueilli 96 % du CO_2 dégagé dans le flacon C et 5% dans le flacon D. Pour chaque Erlenmeyer, une pierre à aquarium assure une bonne diffusion de l'air dans la solution. Le gaz carbonique, au contact de la solution de soude, passe à l'état de carbonate de sodium. Pour le dosage, on précipite les carbonates à l'état de carbonates de baryum et on dose la soude en excès par de l'acide chlorhydrique en présence de phtaléine.

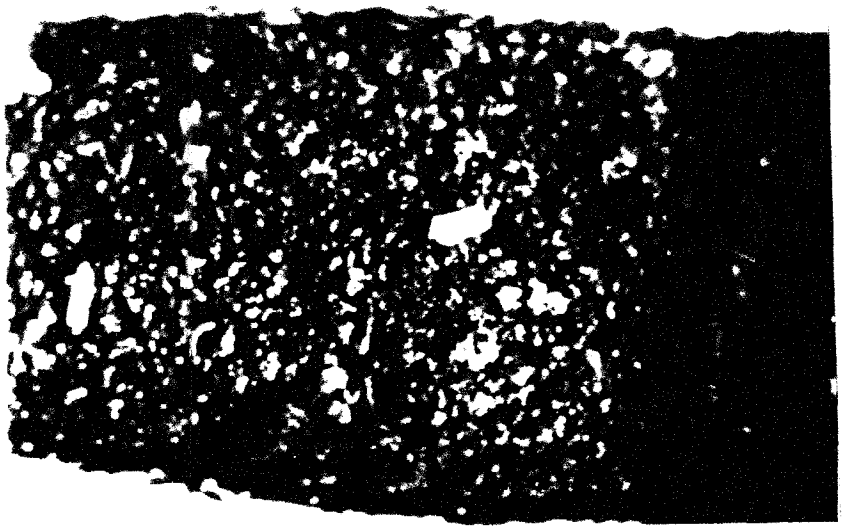
5.2.1.2 - Première expérimentation

A - 500 g d'OM fraîches en provenance de Montargis, contenant 150 % d'eau/poids sec, sont placés dans le grand Erlenmeyer avec 40 jeunes vers (souche Ef P 1756) ; le même dispositif est réalisé avec des OM sans ver de terre. Chaque enceinte est ventilée à raison de 5 litres d'air par heure ; deux

...

Planche I - Etat des ordures ménagères ayant évolué durant 6 semaines à 22,5°C en présence (A) ou en l'absence (B) d'*Eisenia foetida*.

A



B

Fig. 18 - Dispositif de piégeage du CO_2 par aspiration

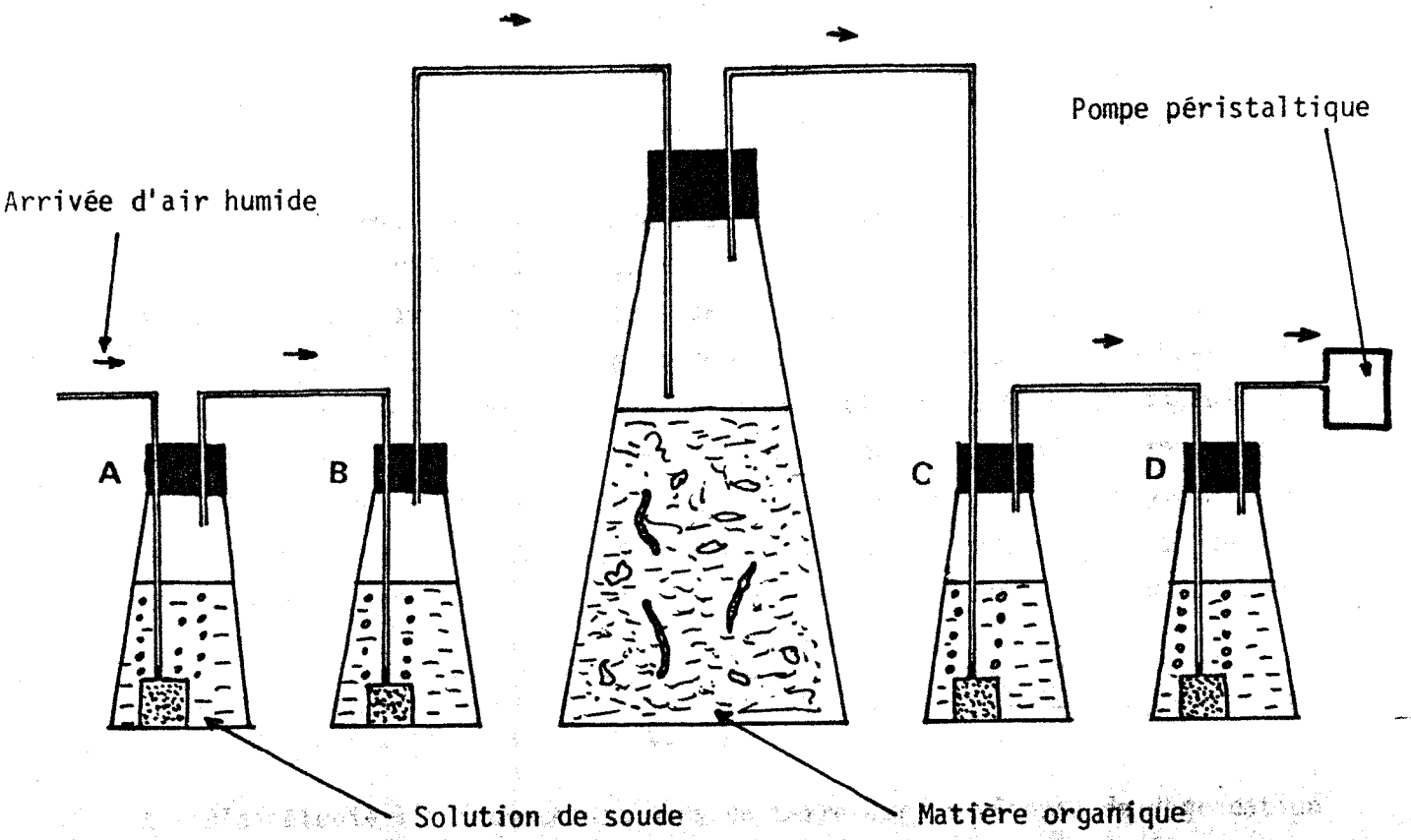
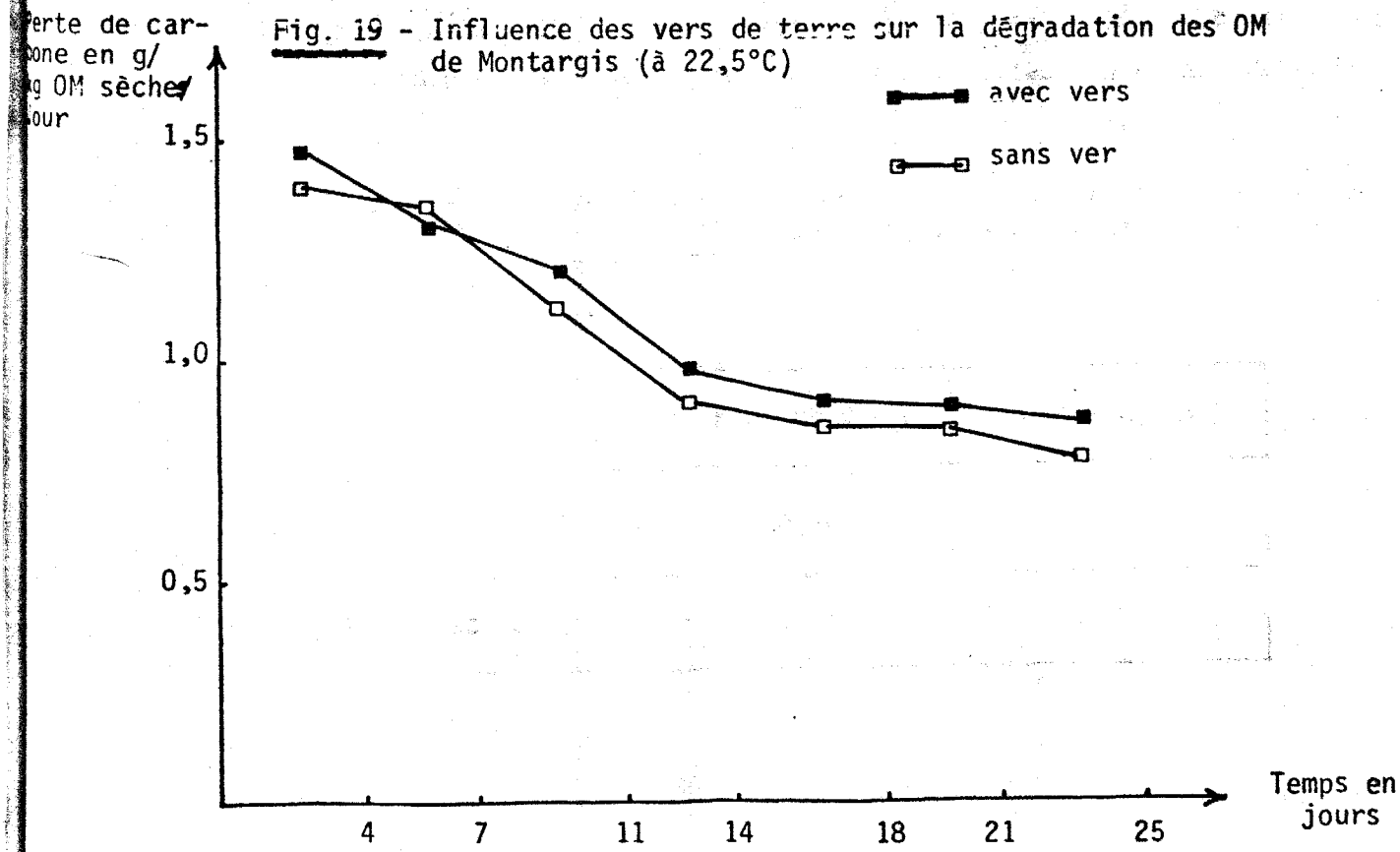


Fig. 19 - Influence des vers de terre sur la dégradation des OM de Montargis (à 22,5°C)



répétitions sont effectuées pour chaque traitement. Les dosages sont réalisés tous les trois et quatre jours, et les quantités de CO_2 dégagées sont converties en perte de carbone (g/kg d'ordures ménagères sèches).

B - De poids moyen individuel égal à 50,9 mg à la mise en élevage, les jeunes vers ont atteint un poids de 280,6 mg le 25ème jour, avec un taux de mortalité de 5 %. La dégradation des OM, importante au départ, diminue au cours du temps ; elle est légèrement plus élevée en présence qu'en l'absence de vers de terre (fig. 19). L'activité biologique globale est stimulée après passage du substrat dans le tube digestif du ver de terre. Pour MITCHELL *et al.* (1977), la consommation d'oxygène d'une boue avant et après ingestion lombricienne atteint respectivement 45 et 86 microlitres par gramme de poids sec et par heure à 25°C. Dans nos essais, l'influence des lombriciens sur la dégradation des ordures ménagères est beaucoup plus faible ; les vers modifiant le milieu (fragmentation, brassage, ...) ont tendance à le compacter et à créer une anaérobiose. Une partie du carbone a pu être perdue sous forme de CH_4 ou d'autres produits volatils.

5.2.1.3 - Seconde expérimentation

A - J'ai étudié l'influence des vers de terre sur la vitesse de dégradation des ordures ménagères en provenance de Montargis, sur deux cycles d'élevage de 6 semaines, à 22,5°C. Le dispositif d'élevage précédent est utilisé avec une répétition par traitement ; les dosages sont effectués hebdomadairement.

Tableau 29 - A : résultats de la perte de carbone exprimés en gramme par kg d'OM sèches et par jour, pour 2 cycles de 6 semaines

	Premier cycle	Second cycle
Sans ver	0,96	0,39
Avec ver	1,15	0,40

...

B - Performances des animaux

		Premier cycle	Second cycle
Initial	Nombre de vers	40	40
	Poids moyen individuel en mg	56,7	49,7
Final	Nombre de vers	36	32
	Poids moyen individuel en mg	387,9	185,9

Les résultats (fig. 20) montrent que la perte de carbone diminue au cours du temps et est beaucoup plus faible lors d'un second cycle d'élevage. La présence de vers de terre accélère les processus de dégradation au cours du premier cycle. Une perte de 65,1 g de carbone est obtenue durant les 84 jours d'élevage (tableau 29-A). Les performances des animaux sont moindres pour un second cycle d'élevage (tableau 29-B), ce qui confirme les résultats précédents (§ 4.1.4.2). Ces moindres performances peuvent s'expliquer par la chute de l'activité microbienne ; les microorganismes étant source de nourriture pour les vers de terre.

5.2.2 - Conséquences de la ventilation des ordures ménagères

Cet essai a comme objectif d'étudier la croissance lombricienne en fonction de l'aération et d'en tirer les conséquences pour des élevages en conditions contrôlées.

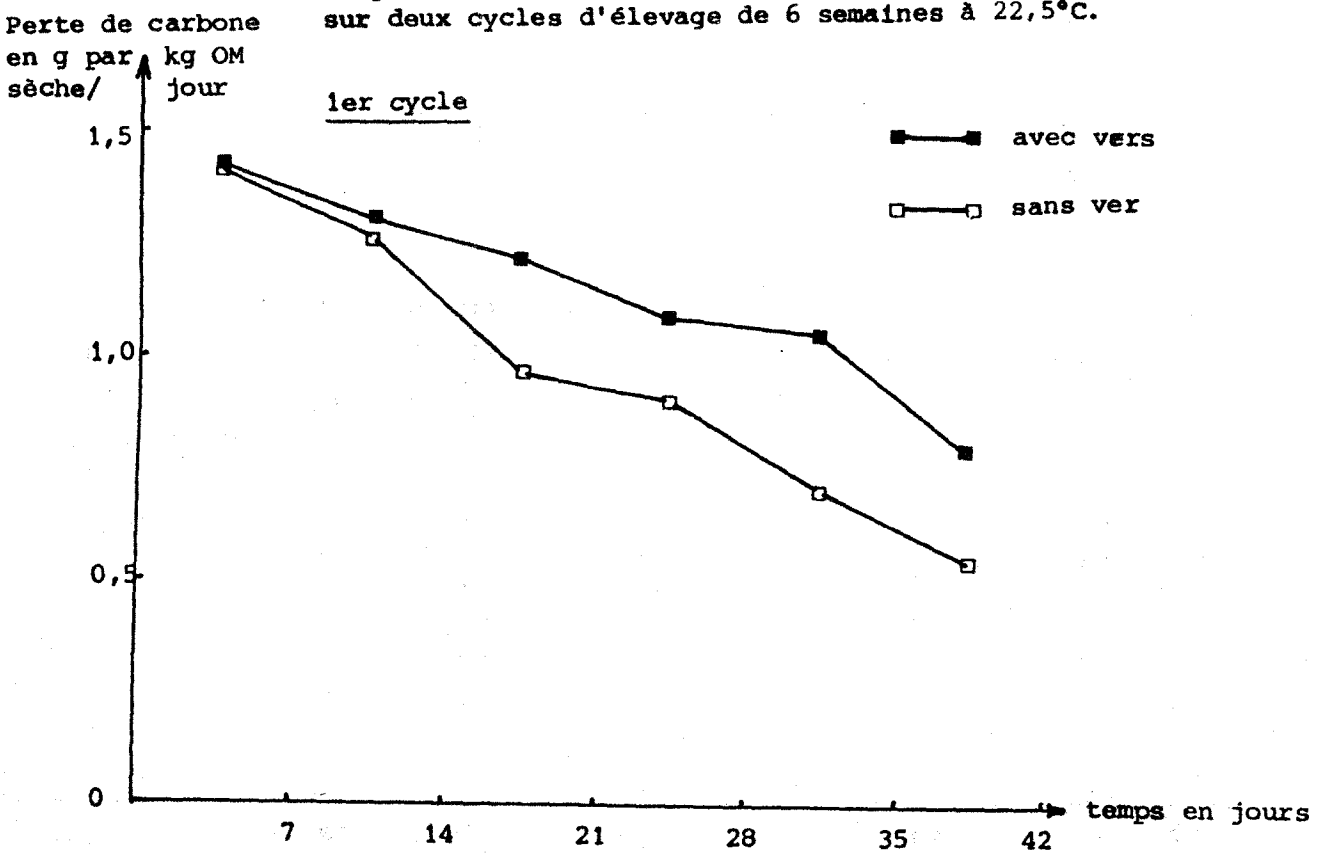
5.2.2.1 - Expérimentation

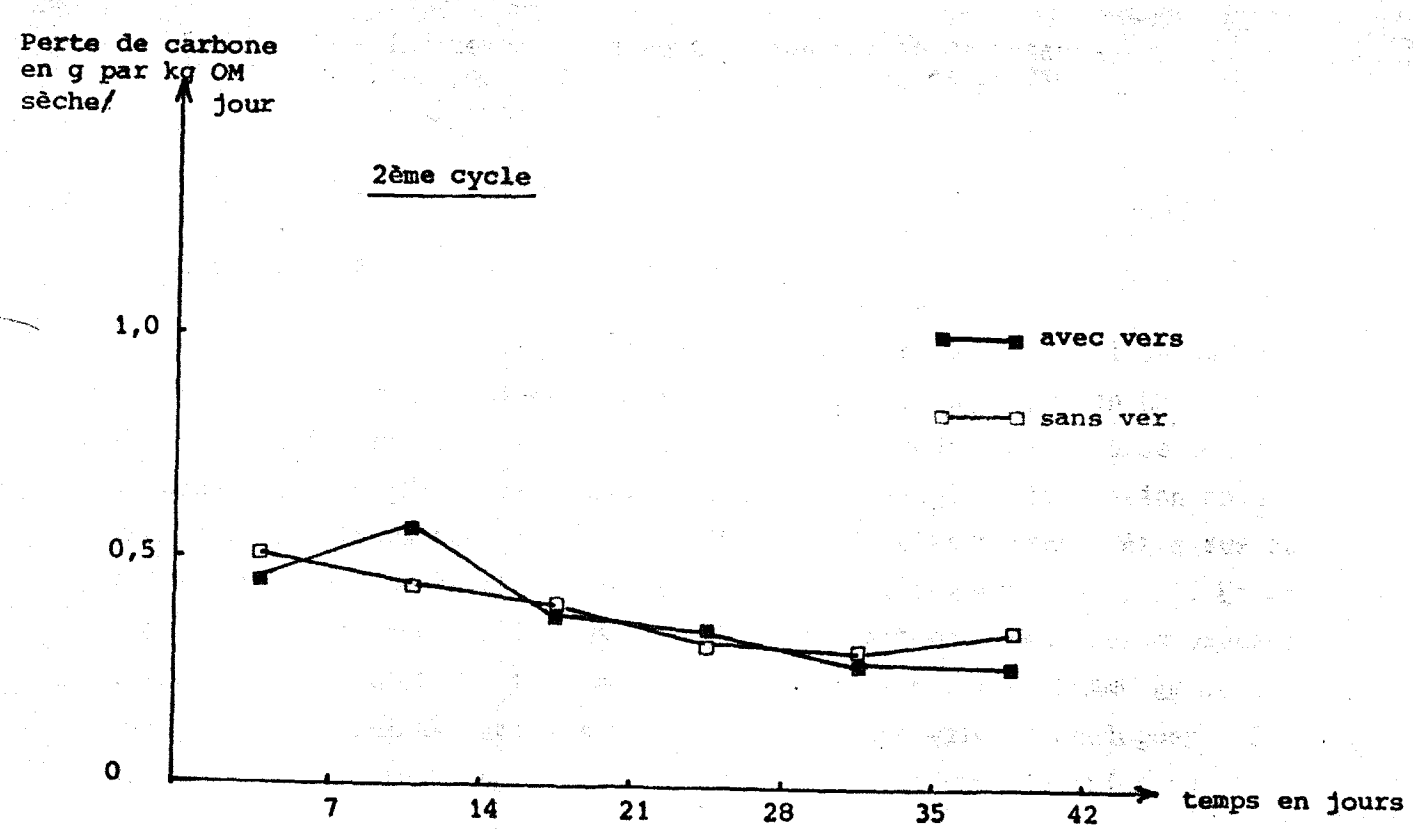
A - Dans trois Erlenmeyers de même taille, nous avons mis des ordures ménagères humides (à 150 % eau/poids sec) correspondant respectivement à 100, 200 et 400 g de substrat sec. Des lots de jeunes vers (20, 40 et 80 animaux) sont

...

Figure 20 :

Comparaison du compostage avec et sans ver de terre sur deux cycles d'élevage de 6 semaines à 22,5°C.





placés dans ces flacons et mis en élevage pour une durée de 6 semaines à 22,5°C. En estimant la perte de carbone à 1 g/kg OM sèches/jour lors du premier cycle (tableau 29-A) et un débit d'air constant pour chaque récipient (1,55 l/heure) , le taux moyen calculé de CO_2 à la sortie des récipients contenant 100, 200 et 400 g d'OM atteint respectivement 0,5, 1,0 et 2,0 %.

B - Les résultats de performance des animaux figurent au tableau 30. La mortalité a été très faible dans toutes les boîtes et nous avons obtenu une bonne croissance quelle que soit la ventilation.

Teneur de l'air en CO2 à la sortie des boîtes d'élevage	Poids moyen individuel au départ (en mg)	Poids moyen individuel la 6ème semaine(en mg)	Accroissement de biomasse (en mg) de vers par kg d'ordures humides	Mortalité en %
0,5 %	59,0	343,2	22,7	0
1,0 %	53,4	382,4	23,3	8,3
2,0	65,9	395,9	24,8	5,0

Tableau 30 - Influence de la ventilation sur la croissance des jeunes *Eisenia fetida* (souche Ef p 1756) en 6 semaines à 22,5°C.

5.2.2.2 - Résultats et discussion

Des études respirométriques réalisées en appareil de Warburg montrent que la consommation d'oxygène mesurée pour des taux de CO_2 variant de 0,4 à 4,25 % diminue de 13 % par rapport à la consommation observée en l'absence de CO_2 (MOMENT et HABERMANN, 1979). La légère stimulation observée par ces auteurs pour des taux de CO_2 plus faibles pourrait être due aux conditions expérimentales (durée de l'expérience, température, ...). La migration des vers hors de leur milieu se produirait pour des taux d'oxygène inférieurs à 15 % et des taux de CO_2 supérieurs à 6 % (BROCKMANN *et al.*, 1980). Pour *Lumbricus terrestris* placé à 10°C, des valeurs analogues (76 mm de Hg) sur la tension critique du taux d'oxygène sont fournies par AVEL (1959).

D'après PETRUCCI (1951), *Eisenia fetida* pourrait vivre en anaérobiose relative (avec accumulation d'acide lactique) et paierait une dette en oxygène lors du retour en milieu oxygéné.

5.2.3 - Conclusions

La minéralisation des ordures ménagères est importante pour des matières fraîches ; elle peut être augmentée en présence de vers de terre (stimulation de la microflore et de l'activité enzymatique). Les processus de biodégradation sont ici essentiellement aérobies ; les conditions d'anaérobiose relative auraient pu être mises en évidence par l'analyse des gaz produits (CH_4, NH_3, acide acétique, H_2S, ...).

A - Par un calcul théorique, on peut chercher à apprécier la part des lombriciens dans l'activité biologique globale du système. D'après les données de BYZOVA (1965), le ver *Eisenia fetida* consommerait 95 ul d'O_2 par g p h/h à 19°C. Pour 1 kg d'ordures ménagères humides à 150 % d'eau/poids sec renfermant un poids moyen de 50 g de vers en poids frais, la quantité d'oxygène nécessaire à ce peuplement lombricien serait de 0,12 l. Le dégagement de gaz carbonique pour l'ensemble (ordures ménagères + vers de terre) serait en moyenne de 3,66 g/jour, soit 1,87 l de CO_2. En prenant un quotient respiratoire moyen de 0,85 la fraction d'oxygène utilisée par les vers de terre, soit 0,12 l, ne représente que 5,4 % de la consommation globale du système (soit 1,87 : 0,85 = 2,2 l).

B - La minéralisation des ordures ménagères conduit à la production de CO_2, valeur bien corrélée avec la thermogénèse (HELMER, 1973). Dans les tours de compostage, une ventilation forcée des ordures ménagères permet d'atteindre en quelques jours une température élevée (70 à 90°C). J'ai, à partir des résultats obtenus pour le dégagement de CO_2, calculé l'énergie produite au cours du compostage. La consommation d'un litre d'oxygène par voie biologique fournit 4775 cal., chiffre moyen calculé à partir des données de plusieurs auteurs (BOUCHE, 1978b). D'après ces valeurs, 1 kg d'ordures ménagères en cours de compostage dégage journellement : 4775 x 2,2 l d'O_2 = 10 505 cal. Nous tirons de WEAST (1964) les coordonnées suivantes : chaleur spécifique de l'air saturé d'eau à 20°C = 1 cal/g, densité de l'air humide à 20°C et 760 mm de Hg = 1,20. Dans notre étude, un taux de 1 % de CO_2 à la sortie

...

des boîtes d'élevage n'affecte pas les performances des animaux. Un total de 187 l d'air est nécessaire à l'aération quotidienne d'1 kg d'ordures ménagères sèches. La thermogénèse de notre milieu suffit théoriquement à élever de 36°C les 187 l d'air qui transitent journellement dans un récipient contenant la valeur de 1 kg d'ordures ménagères sèches.

Le compélevage peut en conditions contrôlées évoluer à 25°C (température optimale pour la croissance et la reproduction du ver *Eisenia fetida*), sans chauffage; la thermogénèse permet de compenser les pertes de chaleur (ventilation, diffusion thermique, ...).

5.3 - Fixation d'azote et germes responsables du cycle de l'azote

Les ordures ménagères sont riches en produits carbonés et assez pauvres en azote (le rapport C/N est, nous le verrons, voisin de 30). Ces conditions, propices à la fixation d'azote, devraient être accrues en présence de lombriciens (CITERNESI, 1977). D'importants peuplements microbiens (germes responsables du cycle de l'azote notamment) ont été dénombrés dans le pourtour des galeries et les turricules des vers de terre (ROUELLE,1977). L'expérience présentée ici a pour but d'étudier l'influence des vers de terre sur la fixation d'azote et sur la stimulation des germes responsables du cycle de l'azote.

5.3.1 - Activité nitrogénasique

5.3.1.1 - Matériel et méthode

Afin de mesurer l'activité de l'enzyme nitrogénase qui catalyse la fixation de l'azote atmosphérique, nous avons utilisé la technique de KOCH et EVANS (1966), modifiée et mise au point au Centre de Pédologie biologique de Nancy (BALANDREAU et VILLEMIN, 1974 ; BALANDREAU, 1975). Le principe de la méthode consiste à inhiber la réduction de l'azote en présence d'acétylène ; la réduction de ce gaz en éthylène permet de mesurer l'activité nitrogénasique. La fixation d'une molécule d'azote correspond à la formation de trois molécules d'éthylène à partir d'acétylène.

Des boîtes contenant 500 g d'ordures ménagères en provenance de Montargis sont préparées avec ou sans vers de terre. Elles sont

...

placées à 22,5°C et sacrifiées au 14è, 28è et 42è jours d'élevage, à raison de deux répétitions par traitement.

Pour la mesure de la fixation d'azote, les boîtes contenant ou non des vers de terre sont enfermées dans une enceinte plastique de 5 l. On créée à l'intérieur , à l'aide du CaC_2 un dégagement d'acétylène pour obtenir une teneur minimale de 10 % de ce gaz ; on utilise le propane comme gaz traceur. Les études de fixation sont réalisées à 22,5°C à l'obscurité, puis les échantillons sont analysés par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme.

5.3.1.2 - Résultats

En 6 semaines, nous obtenons une majorité d'adultes dans les boîtes contenant des vers de terre et un début de ponte.

L'activité nitrogénasique varie peu pendant la mesure ; toutefois, elle aurait tendance à augmenter après 2,5 heures d'incubation (fig. 21).

J'ai mesuré l'activité nitrogénasique après deux heures d'incubation ; on évite ainsi les risques de perturbation qui peuvent apparaître ultérieurement. La fixation d'azote est plus élevée en début d'élevage (14 et 28ème jours) pour les boîtes contenant des vers de terre. (fig. 22).

5.3.2 - Activité nitrogénasique et germes responsables du cycle de l'azote

5.3.2.1 - Matériel et méthode

Nous avons simultanément mesuré l'activité nitrogénasique et dénombré les germes du cycle de l'azote au cours du temps. Des lots de boîtes contenant 500 g d'ordures ménagères (avec ou sans ver de terre) sont placées à 22,5°C. Chaque semaine, et ceci pendant 6 semaines, nous avons sacrifié un premier lot de 2 boîtes (une avec et l'autre sans ver de terre) pour mesurer l'activité nitrogénasique ; sur un second lot on dénombre les germes responsables du cycle de l'azote. Ce comptage a été réalisé selon les techniques de suspension-dilution de substrat organique (ROUELLE, 1977), d'après POCHON et TARDIEUX (1962).

...

Fig. 21 - Cinétique du dégagement d'éthylène pour des OM âgées de deux semaines

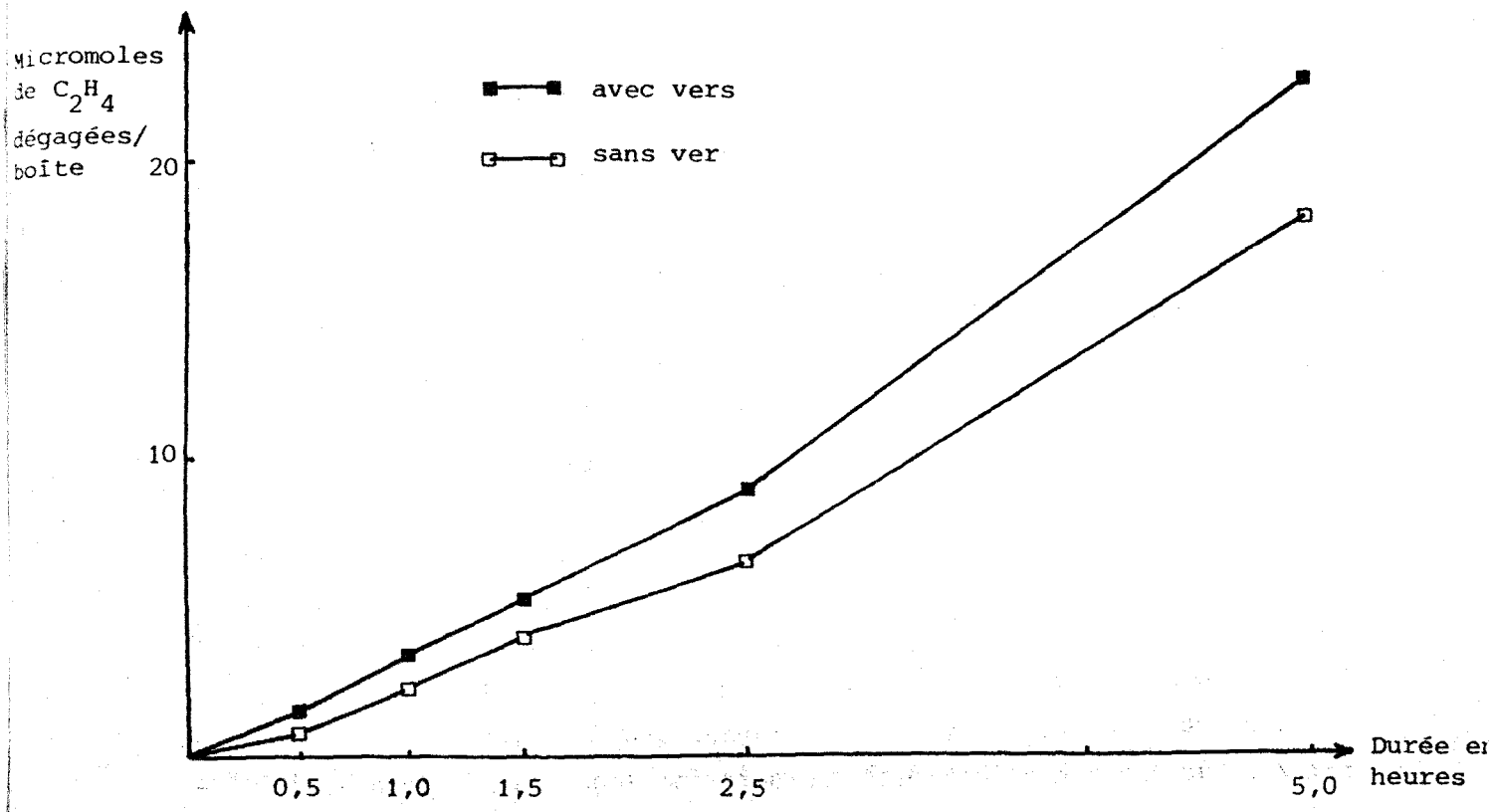
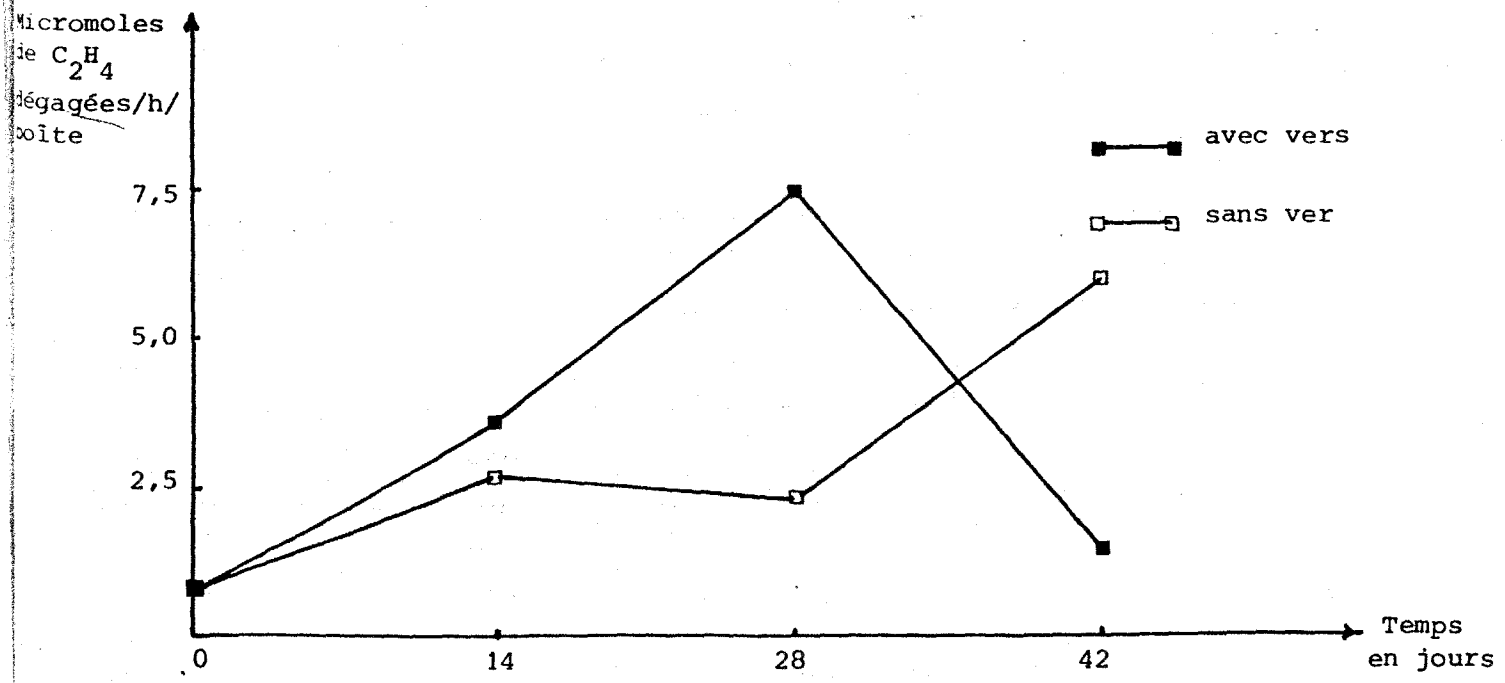


Fig. 22 - Variation de l'activité nitrogénasique au cours du temps pour des OM contenant ou non des vers



5.3.2.2 - Résultats : bilan azoté

Les résultats de croissance lombricienne (tableau 32) sont homogènes aux différents contrôles ; l'accroissement de biomasse au 14ème jour a été plus faible en raison de la petite taille des vers au départ. La fixation d'azote augmente entre le 14ème et le 35ème jour, que les boîtes contiennent ou non des vers de terre. La quantité d'azote fixée est légèrement plus importante dans les boîtes contenant des vers de terre (fig. 23).

En présence d'acétylène, la réduction du N_2O apparu durant la dénitrification est bloquée (YOSHINARI *et al.*, 1977). Sur nos échantillons gazeux, qui contiennent de l'acétylène, nous avons mesuré par chromatographie en phase gazeuse la quantité de N_2O produite. L'absence de N_2O en quantités mesurables prouve qu'aucun phénomène de dénitrification n'est pas apparu dans nos boîtes. La recherche d'une aérobiose maximale (évolution en couches minces, aération des milieux, ...) évite la dénitrification et les pertes d'azote sous forme de NH_3.

Le tableau 31 récapitule les résultats de fixation d'azote pour les deux expériences. Les quantités d'azote fixées (de l'ordre de 50 à 150 kg d'azote/ha/an) sont relativement importantes par rapport aux valeurs obtenues sur cultures de maïs, sur graminées ou en rizières (BALANDREAU, 1975).

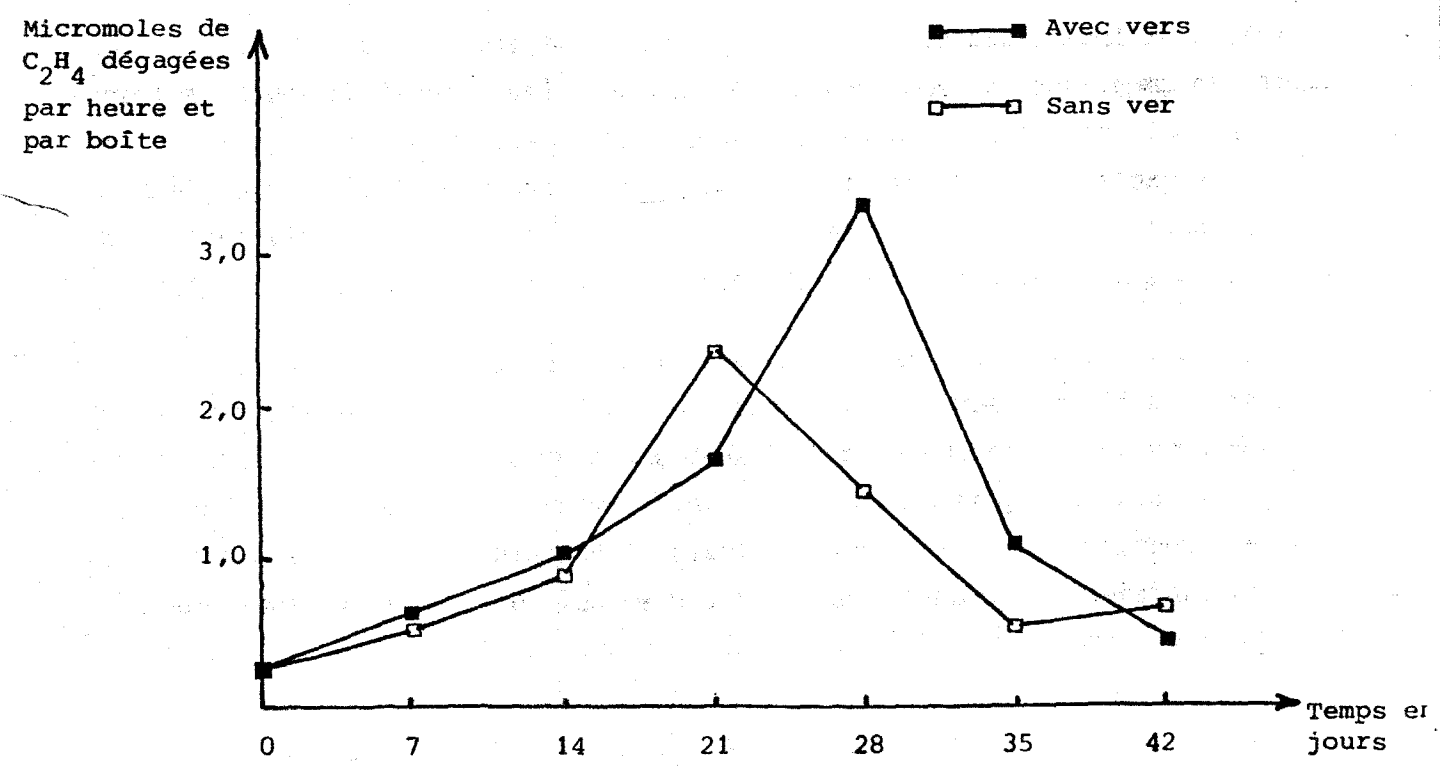
		Fixation asymbiotique de l'azote sur OM (en 42 jours)	
		Mesure par quinzaine	Mesure hebdomadaire
A	Avec vers	190,5	66,4
	Sans ver	131,1	49,6
B	Avec vers	157,7	54,9
	Sans ver	108,5	41,0

Tableau 31 - Quantité d'azote fixée exprimée en g d'azote par tonne d'OM sèches (A) et en kg d'azote/ha /an (B), à 22,5°C

Tableau 32. Performances des animaux sur OM à 22,5°C

		Date du contrôle en jours					
		7è	14è	21è	28è	35è	42è
1 kg OM humides	Accroissement de biomasse en g	5,4	4,3	17,1	23,2	34,5	28,6
	Nombre de cocons	0	0	0	0	25,0	23,7
Pourcentage d'adultes		0	0	0	23,1	59,5	90,5
Mortalité en pourcentage		5,0	5,0	7,5	2,5	1,3	12,1

Figure 23. Variation de l'activité nitrogénasique au cours du temps pour des OM contenant ou non des vers de terre



La quantité d'azote fixée, en 42 jours, (azote réincorporé dans les matières organiques) par tonne d'ordures ménagères sèches est de l'ordre de 100 g et ne représente que 1 % de l'azote total contenu dans le substrat. L'existence d'une fixation d'azote témoigne d'un besoin et donc d'une réorganisation de l'azote. Tous ces éléments vont dans le sens d'une conservation de l'azote.

5.3.2.3 - Résultats sur l'évolution des peuplements microbiens responsables du cycle de l'azote

Les résultats concernant le nombre de germes par gramme de substrat sec sont présentés au tableau 33. Sur des ordures ménagères ayant incubé à 15°C, nous avons, à titre de comparaison, dénombré les peuplements microbiens au 42ème jour. Les courbes (fig. 24) représentent le logarithme du nombre de germes en fonction de la durée du compostage ou du lombricompostage.

Si nous comparons nos résultats aux données trouvées sur sol de prairie (GOUNOT, 1967 ; ROUELLE, 1977), les germes fixateurs aérobies d'azote et les ferments nitriques sont plus importants dans les ordures ménagères. La température influe sur certains peuplements microbiens (Tab. 33) à 15°C les germes fixateurs anaérobies d'azote et les ferments nitriques sont moins nombreux que dans les mêmes ordures ayant évolué à 22,5°C.

Les germes fixateurs aérobies d'azote augmentent régulièrement au cours du temps aussi bien dans le compost que le lombricompost(fig.24).Les germes fixateurs anaérobies d'azote sont plus nombreux entre les 7ème et 21ème jours de lombricompostage ; cette augmentation pourrait s'expliquer par l'activité des vers qui conduit à un tassement du milieu. La fixation d'azote asymbiotique atteste l'une activité des germes fixateurs d'azote.

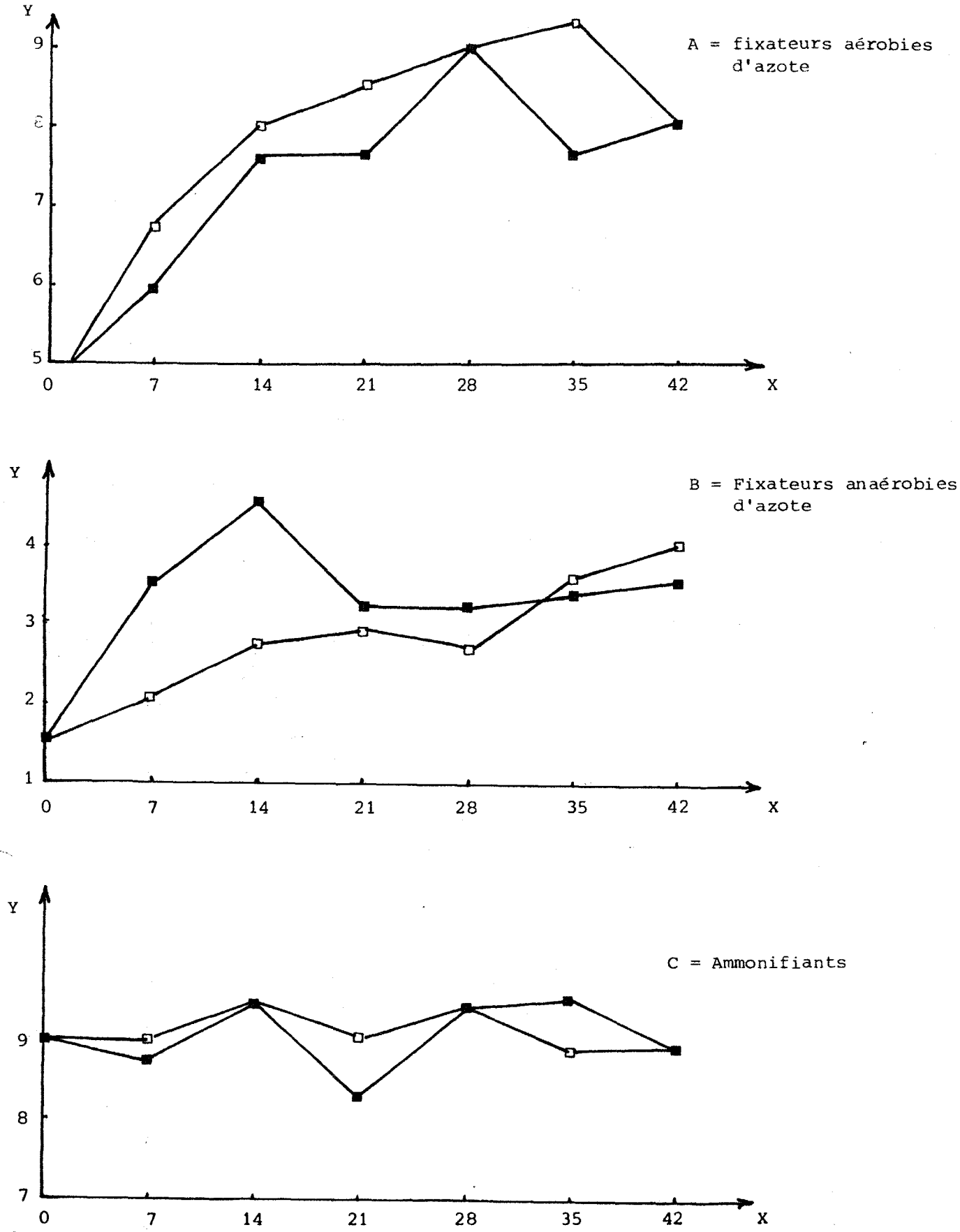
Les germes protéolytiques sont bien représentés et correspondent à une activité biologique importante. Les germes ammonifiants abondent aussi bien dans le compost que dans le lombricompost ; leur présence est liée à la minéralisation importante des ordures ménagères. Pour les microorganismes responsables de la nitrification, les germes nitreux oxydent l'ammoniaque en nitrites et les germes nitriques oxydent ces derniers en nitrates. Les germes nitreux présents dans les ordures ménagères sont moins

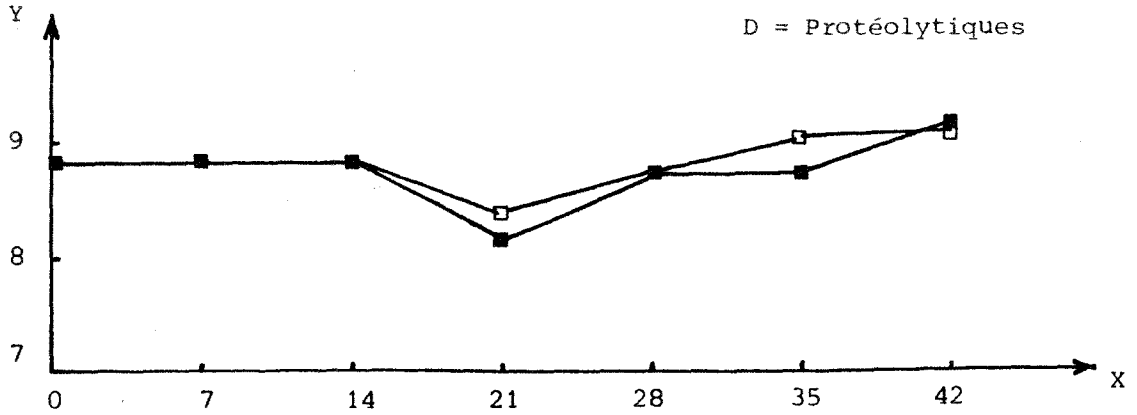
...

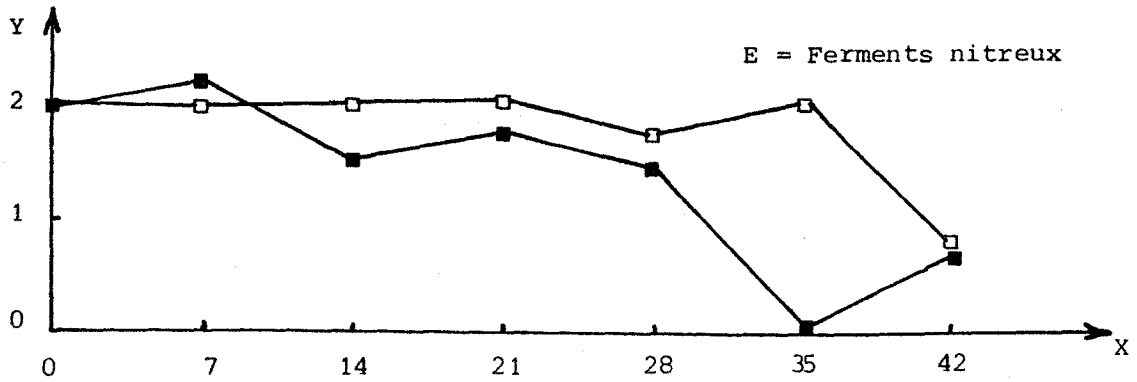
		DUREE EN JOURS à :							
		22,5°C							15°C
		0	7	14	21	28	35	42	42
Fixateurs aérobies d'azote	A	$3,8.10^{3}$	$1,0.10^{6}$	$5,0.10^{7}$	$6,3.10^{7}$	$1,1.10^{9}$	$6,3.10^{7}$	$1,9.10^{8}$	$2,7.10^{7}$
	B	$3,8.10^{3}$	$7,5.10^{6}$	$1,1.10^{8}$	$2,9.10^{8}$	$1,1.10^{9}$	$2,7.10^{9}$	$1,9.10^{8}$	$2,7.10^{7}$
	A/B	-	0,13	0,45	0,22	1,00	0,03	1,00	~ 1,00
Fixateurs anaerobies d'azote	A	3,7.10	$3,8.10^{3}$	$3,8.10^{4}$	$1,9.10^{3}$	$1,9.10^{3}$	$2,4.10^{3}$	$3,5.10^{3}$	1,7.10
	B	3,7.10	$1,1.10^{2}$	$6,3.10^{2}$	$8,8.10^{2}$	$5,0.10^{2}$	$3,8.10^{3}$	$1,2.10^{4}$	5,0.10
	A/B	-	33,93	60,32	2,16	3,80	0,63	0,29	0,34
Ammonifiants	A	$1,9.10^{9}$	$6,3.10^{8}$	$2,7.10^{9}$	$2,4.10^{8}$	$2,7.10^{9}$	$3,7.10^{9}$	$0,9.10^{9}$	$6,3.10^{8}$
	B	$1,1.10^{9}$	$1,1.10^{9}$	$2,7.10^{9}$	$1,1.10^{9}$	$2,7.10^{9}$	$6,3.10^{8}$	$0,9.10^{9}$	$3,8.10^{8}$
	A/B	-	0,56	1,00	0,21	1,00	5,95	1,00	1,65
Protéolytiques	A	$\geqslant 7,0.10^{8}$	$\geqslant 7,0.10^{8}$	$\geqslant 7,0.10^{8}$	$\geqslant 5,5.10^{8}$	$5,5.10^{8}$	$5,5.10^{8}$	$2,2.10^{9}$	$1,0.10^{8}$
	B	$\geqslant 7,0.10^{8}$	$\geqslant 7,0.10^{8}$	$\geqslant 7,0.10^{8}$	$\geqslant 2,3.10^{8}$	$7,5.10^{8}$	$1,2.10^{9}$	$1,7.10^{9}$	$5,5.10^{9}$
	A/B	-	-	-	-	0,73	0,44	1,23	0,02
Ferments nitreux	A	$1,2.10^{2}$	$1,8.10^{2}$	5,5.10	7,5.10	7,5.10	0,0	0,5.10	2,0.10
	B	1,2.10	1,2.10	1,2.10	1,5.10	7,5.10	1,0.10	0,7.10	0,0
	A/B	-	1,50	0,46	0,50	0,46	0,00	0,71	-
Ferments nitriques	A	$1,1.10^{4}$	$1,1.10^{4}$	$3,5.10^{4}$	$3,5.10^{3}$	$2,8.10^{4}$	$1,1.10^{5}$	$1,3.10^{6}$	$1,1.10^{4}$
	B	$1,1.10^{4}$	$1,1.10^{4}$	$6,3.10^{3}$	$3,7.10^{4}$	$5,0.10^{4}$	$3,7.10^{4}$	$\geqslant 3,5.10^{6}$	$3,5.10^{4}$
	A/B	-	1,00	5,83	0,09	0,56	2,97	≃ 0,38	0,31
Dénitrifiants	A	$6,3.10^{8}$	$6,3.10^{5}$	$1,0.10^{7}$	$2,7.10^{8}$	$1,1.10^{7}$	$3,7.10^{7}$	$1,6.10^{7}$	$5,0.10^{7}$
	B	$6,3.10^{8}$	$1,1.10^{8}$	$3,8.10^{7}$	$6,3.10^{7}$	$1,1.10^{7}$	$3,8.10^{6}$	$0,9.10^{8}$	$6,3.10^{7}$
	A/B	-	0,01	0,26	4,36	1,00	9,36	0,18	1,26

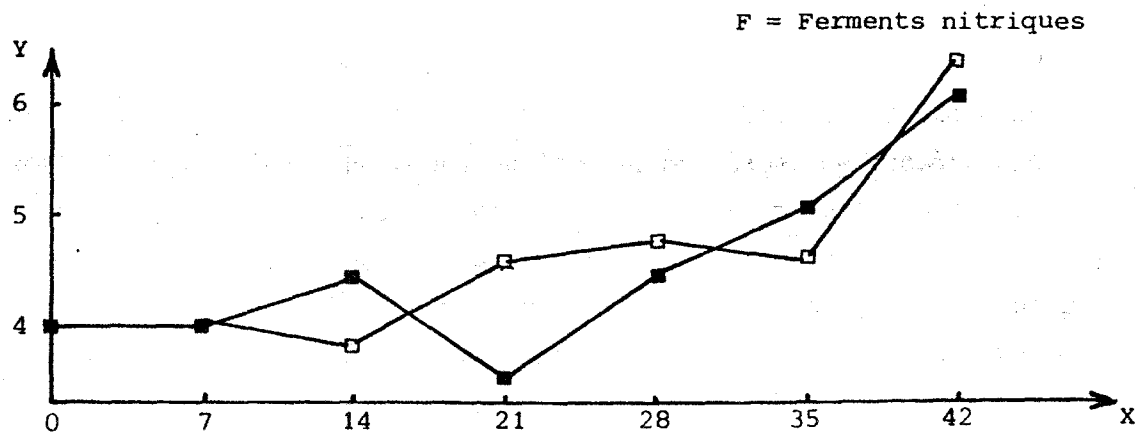
Tab. 33 - Peuplements microbiens exprimés en nombre de germes par gramme d'OM sèches avec vers (A) et sans ver (B) à deux températures.

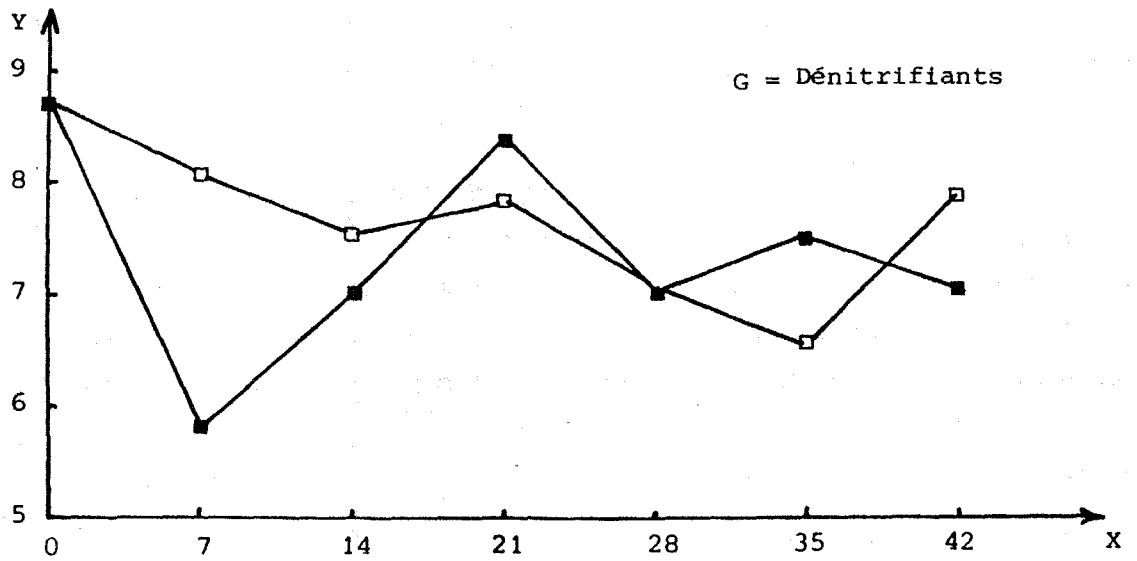
Figure 24 - Dénombrements des germes du cycle de l'azote où Y représente le log du nombre de germe par gramme d'ordures ménagères sèches contenant (■) ou non (□) des vers de terre et X la durée du compostage en j à 22,5°C.




D = Protéolytiques
Y
9
8
7
0
7
14
21
28
35
42
X


E = Ferments nitreux
Y
2
1
0
0
7
14
21
28
35
42
X


F = Ferments nitriques
Y
6
5
4
0
7
14
21
28
35
42
X


G = Dénitrifiants
Y
9
8
7
6
5
0
7
14
21
28
35
42
X

nombreux que les germes nitriques (tableau 33) alors que dans les sols les quantités de germes nitreux et nitriques diffèrent peu (ROUELLE, 1977). La densité des ferments nitriques est plus importante pour des composts et lombricomposts âgés de 42 jours (fig. 24) ; elle est plus importante à 22,5°C qu'à 15°C. Le nombre de germes autotrophes est important aussi bien dans le compost que dans le lombricompost ; l'interprétation des numérations reste délicate (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970).

Les dénitrifiants sont particulièrement abondants ; la présence de vers de terre, qui dans un premier temps facilite l'aération du milieu, réduit considérablement leur nombre en début de lombricompostage (7ème et 14ème jours). La présence de germes dénitrifiants ici est provoquée par une demande abondante d'oxygène et(ou) une mauvaise diffusion de l'air dans les matières organiques.

5.3.3 - Conclusion

Une variété de microorganismes présents dans les composts va assurer la dégradation des débris végétaux et une synthèse de biomasse microbienne et lombricienne au cours du lombricompostage. Le rapport C/N élevé des ordures ménagères a favorisé l'apparition en quelques jours de champignons à la surface des milieux. Leur disparition, qui intervient un peu plus tard (20 à 30 jours) est plus rapide là où les vers de terre sont présents. PARLE (1963b) montre que le nombre de champignons demeure inchangé dans l'intestin du ver de terre alors que KAMAL et SINGH (1970) trouvent moins de champignons dans les turricules que dans le sol voisin. L'ingestion et les brassages successifs effectués par les lombriciens modifient le milieu et pourraient gêner la prolifération des champignons (lésion des hyphes mycéliens, ...).

L'hétérogénéité des ordures ménagères et la présence de matières inertes sont un frein pour l'étude microbiologique (difficulté d'échantillonnages). Nous avons montré que les ordures ménagères sont un milieu propice à la prolifération des germes fixateurs d'azote et à leur activité. La présence de germes protéolytiques et ammonifiants témoigne d'une dégradation importante des ordures ménagères. Le ver de terre intervient favorablement dans les processus de nitrification soit en stimulant la dégradation des substrats organi-

...

ques, soit en produisant des composés (ammoniaque notamment) nécessaires aux ferments nitreux. L'excrétion de cristaux de calcite par la glande de Morren favoriserait également les nitrifiants. La présence de vers de terre ne stimule pas ici les germes responsables de la nitrification (tableau 33) bien représentés dans nos milieux. On observe une diminution des germes dénitrifiants du lombricompost par suite du brassage et de la fragmentation du milieu par les vers de terre.

Les vers de terre stimulent les peuplements de germes qui interviennent dans le cycle du carbone (LOQUET, 1974) ainsi que l'activité enzymatique. *Eisenia fetida* facilite une disparition plus rapide de *Salmonella enteritidis ser. typhimurium*, bactérie pathogène pour l'homme et présente dans les boues urbaines (BROWN et MITCHELL, 1981).

5.4 - Analyse chimique

Le rapport C/N est un critère couramment utilisé pour apprécier l'état de maturité d'un compost. La teneur en cendres permet de nous rendre compte du degré de minéralisation de la matière organique. Tous ces critères ont été utilisés pour caractériser les composts et lombricomposts obtenus sur déchets urbains.

5.4.1 - Matériel et méthode

Les milieux d'élevage sont séchés à 40°C, puis broyés (200 g de produit sec environ) et calibrés à 2 mm. Les analyses ont été effectuées par le laboratoire d'analyses des sols d'Arras ; le carbone organique a été déterminé par la méthode Anne d'où l'on tire la quantité de matières organiques présente (C x 1,72). L'azote total a été obtenu par la méthode Kjeldahl et le rapport C/N calculé ; le calcaire total a été dosé pour certains échantillons. J'ai calculé le pourcentage de cendres après minéralisation des matières organiques.

Une première étude a porté sur des boues de stations d'épuration et sur des ordures ménagères en provenance de Montargis (tableau 34, 1 et 2) dont les résultats de performance des animaux figurent au paragraphe 4.1.4.2). Les analyses ont été effectuées avant et après un compostage de 4 semaines à 22,5°C.

...

Tableau 34 - Résultats d'analyses chimiques des substrats organiques en % de produit sec.

Substrat			C organique %	Matières organiques %	Azote "Kjehdhal" %	C/N	Calcaire total %	Cendres %
1 BOUES LONGVIC	Non compostées		274,4	472,0	24,2	11,4	-	530
	Compostées 4 semaines	sans ver	182,5	313,9	14,8	12,3	-	598
		40 jeunes/kg	149,0	256,3	13,9	10,7	-	619
		80 jeunes/kg	154,0	264,9	13,9	11,0	-	653
2 OM MONTARGIS	Non compostées		302,8	520,8	9,6	31,8	-	449
	Compostées 4 semaines	sans ver	170,0	292,4	12,9	13,2	-	482
		10 jeunes/kg	201,9	347,3	10,3	19,6	-	555
		20 jeunes/kg	175,5	301,9	14,5	12,0	-	519
		40 jeunes/kg	266,4	458,2	12,1	22,0	-	482
		80 jeunes/kg	153,0	263,2	9,7	15,8	-	570
3 OM MONTARGIS	Non compostées		206,7	355,5	11,1	18,7	55	561
	Compostées 2 semaines	sans ver	218,2	375,3	14,5	15,0	57	538
		40 jeunes/kg	246,3	423,6	11,1	22,3	51	494
		80 jeunes/kg	272,6	468,9	8,8	31,1	55	545
	Compostées 4 semaines	sans ver	252,1	433,6	8,4	30,1	76	463
		40 jeunes/kg	204,2	351,2	10,3	19,8	55	405
		80 jeunes/kg	248,4	427,2	11,7	21,3	75	433
	Compostées 6 semaines	sans ver	211,2	363,3	10,4	20,3	89	453
		40 jeunes/kg	214,5	368,9	9,5	22,5	70	574
		80 jeunes/kg	204,5	351,7	8,4	24,4	73	426

Sur un second lot d'ordures ménagères, j'ai effectué des analyses aux 14è, 28è et 42è jours de compostage à 22,5°C avec ou sans vers de terre (tableau 34,3).

5.4.2 - Résultats (tableau 34)

Pour les boues urbaines la dégradation des matières organiques a été rapide et accrue en présence de vers de terre. Le taux d'azote a diminué plus rapidement en présence de vers alors que le rapport C/N a peu varié en 4 semaines. La minéralisation a été rapide et les pertes d'azote importantes dans le compost et le lombricompost en 28 jours.

Les ordures ménagères mises à composter ou à lombricomposter durant 4 semaines à 25°C se sont dégradées rapidement par rapport aux matières organiques non compostées. Le taux d'azote a légèrement augmenté mais le rapport C/N a considérablement diminué (tab. 34-2).

Pour les ordures ménagères analysées à différents degrés d'évolution, les résultats sont très variables et difficilement interprétables. Le taux de carbone est plus faible avant qu'après compostage ou lombricompostage ; le contenu en azote est très fluctuant, ainsi que le rapport C/N. La teneur totale en calcaire (5 à 8 %) est beaucoup plus élevée sur ordures ménagères que dans le fumier en général. En admettant que ce calcium soit bien dispersé sur ce milieu et en partie disponible pour les animaux, la quantité serait largement suffisante pour satisfaire leur besoin nutritionnel.

5.4.3 - Discussion

Les résultats du dosage du carbone, très fluctuants sur ordures ménagères, sont dus à leur hétérogénéité et à la présence, à des taux variables, de matières organiques non biodégradables (plastique, ...). Des résultats plus fiables devraient être obtenus après élimination des matières inertes (verre, plastique, ...). Sur boues urbaines, les résultats sont cohérents : le lombricompost est plus pauvre en carbone et plus riche en cendres que le compost ; dans les deux cas, le taux d'azote a rapidement diminué. Le rapport C/N a peu varié au cours de l'évolution des boues ; on peut s'interroger sur la validité de ce critère pour apprécier leur maturité.

...

5.5 - Test sur végétaux

La détermination du rapport C/N est un critère couramment retenu pour apprécier la maturité du compost. Toutefois, ce rapport limite est fixé arbitrairement et nous avons vu que la présence de matières inertes, dans le cas des ordures ménagères, conduit à une grande variabilité des résultats. Une analyse chimique complète serait longue à réaliser et la présence de molécules complexes comme la vitamine B12, dont le sol serait enrichi par la présence de vers de terre (ATLAVINYTE, 1969), ne peut être dosée.

5.5.1 - Objectif du test

Le test doit répondre à un certain nombre de critères : rapidité de réponse, fiabilité et reproductibilité. Le *Bryophyllum laigremontianum* L. ou Kalankoé a été choisi en raison de sa croissance rapide et de son mode de multiplication par reproduction végétative qui permet d'obtenir à partir d'une même plante des individus génétiquement homogènes. Les seules variations génétiques touchent aux organites cytoplasmiques et non au noyau. Cette plante, placée en jours longs, produit des bulbilles à la périphérie des limbes.

La perlite a été choisie comme support de culture (milieu chimiquement neutre et inerte) ; elle permet de reconstituer la structure physique du sol et de mettre en évidence la maturité des composts.

5.5.2 - Mise en place

Les composts et lombricomposts sont issus des ordures ménagères en provenance de Montargis ; ils ont été tamisés sur tamis à maille carrée de 1 cm afin d'éliminer les matières inertes les plus grosses (verre et plastique) qui gênent l'enracinement des plantes.

Les bulbilles sont prélevées sur la plante au stade 4 feuilles et déposées sur le milieu de culture. Nous avons utilisé comme récipients des bacs plastique à fond perforé afin de faciliter l'aération et l'écoulement de l'eau. Une expérience préliminaire nous a montré que la longueur des racines pendant l'expérience ne dépasse pas 4 centimètres ; c'est la

...

hauteur de pot que nous avons donc retenue. Six plantules placées dans chaque pot (surface 64 cm2) constituent une répétition.

Le maintien de l'humidité dans les pots se fait par trempage de 30 mn suivi d'un égouttage ; ce dispositif évite les phénomènes d'asphyxie et d'anaérobiose. L'arrosage est constitué, suivant le cas, d'une solution nutritive pure ou d'une solution nutritive coupée d'eau dans les proportions 50-50 (tableau 35). Il est répété chaque jour la première semaine pour permettre l'enracinement des plantes, puis ensuite tous les deux ou trois jours. Les essais sont conduits en phytotron : température = 21-22°C, 70 % d'humidité atmosphérique, 13 heures d'éclairement journalier à 4000 lux.

Tableau 35 - Solution nutritive : composition pour 1000 l

		Quantité en g
Nitrate de potassium		202
Nitrate de calcium pur sec		328
Nitrate d'ammonium		320
Sulfate de potassium		43,5
Sulfate de magnésium cristallisé		123,0
Phosphate monopotassique		122,4
Phosphate bipotassique		17,4
Oligoéléments	Molybdate d'ammonium	0,050
	Acide borique	1,500
	Sulfate de manganèse	2,000
	Sulfate de cuivre	0,250
	Sulfate de zinc	0,500
	Sequestrène de fer	10,000

...

5.5.3 - Comparaison du compost et du lombricompost

5.5.3.1 - Première expérience

Pour ce test, trois substrats ont été mis en présence : la perlite, un terreau horticole, un compost d'ordures ménagères provenant de Montargis qui a évolué 6 semaines à 22,5°C avec ou sans ver de terre. Le terreau, le compost et le lombricompost sont mélangés en proportions variables ; les milieux sont arrosés avec l'une ou l'autre des solutions nutritives (tableau 36). Les lots sont contrôlés les 3ème et 6ème semaines qui suivent la mise en place des bulbilles. On indique pour chaque traitement le poids frais des parties aériennes du végétal et le rapport poids frais sur poids sec (séchage 24 heures à 105°C).

Aux deux dates de contrôle, les rendements obtenus sur perlite seule ou sur terreau sont nettement plus élevés que ceux enregistrés sur compost ou lombricompost. Le rapport matière organique fraîche sur matière organique sèche est également plus élevé pour les plantes en provenance de ces milieux (terreau et perlite) ; il traduit une turgescence des cellules végétales.

Aucune différence de croissance notable n'a pu être mise en évidence entre plantes issues de ces composts et lombricomposts et ceci quelle que soit la durée de l'expérience. Seul, pour ces lots, le rapport matière fraîche sur matière sèche a augmenté entre la 3ème et la 6ème semaines. La solution nutritive additionnée d'eau donne d'aussi bons résultats que la solution nutritive pure. Pour les milieux contenant 50 % de compost ou de lombricompost, les résultats sont plus fluctuants ; l'apport de solution nutritive a, dans certains bacs, masqué l'effet dépressif du substrat.

5.5.3.2 - Seconde expérience

Les matières organiques ont été mélangées à 100 et 200 % à la perlite et arrosées avec une solution nutritive à 50 % d'eau. Pour chaque traitement, nous avons réalisé 4 répétitions ; les contrôles ont été effectués après 6 et 12 semaines de croissance végétale. La valeur agronomique de plusieurs substrats organiques (compost et lombricompost âgés de 6 semaines, lombricompost âgé de 12 semaines, compost de la Loupe âgé de 120 jours) a été comparée à celle du milieu terreau qui sert de témoin.

...

Tab. 36 - Résultats de croissance de Bryophyllum dont les bacs sont humidifiés avec une solution nutritive pure (A) ou une solution à 50% d'eau (B)

				Contrôle de la 3è semaine		Contrôle de la 6è semaine	
				Poids sec en g	Poids frais / Poids sec	Poids sec en g	Poids frais / Poids sec
Perlite seule			A	0,076	24,4	0,743	25,7
			B	0,099	27,7	0,722	21,4
Substrats organiques en % par rapport à la perlite	Terreau	50 %	A	0,104	22,8	0,532	23,4
			B	0,089	24,1	0,582	25,4
		100 %	A	0,166	24,9	0,618	23,2
			B	0,088	23,4	0,661	27,9
		200 %	A	0,107	23,1	0,720	22,2
			B	0,076	24,6	0,580	26,2
	Compost avec vers	50 %	A	0,090	12,6	0,114	16,3
			B	0,045	14,4	0,124	15,6
		100 %	A	0,080	11,7	0,090	14,1
			B	0,062	13,5	0,147	14,4
		200 %	A	0,060	10,7	0,104	16,0
			B	0,066	9,5	0,105	16,9
	Compost sans ver	50 %	A	0,068	11,1	0,113	15,9
			B	0,110	18,1	0,136	15,5
		100 %	A	0,062	10,5	0,103	16,2
			B	0,063	14,2	0,164	17,8
		200 %	A	0,050	8,8	0,092	16,8
			B	0,057	6,5	0,079	16,7

		Substrats organiques en % par rapport à la perlite								
		Terreau		Compost sans ver (1er cycle)		Lombricompost (1er cycle)		Lombricompost (2è cycle)	Compost "La Loupe" âgé de 120j.	
		100	200	100	200	100	200	200	200	
Contrôle 6ème semaine	Poids sec en g	870,5[a]	862,5[a]	180,3[b]	131,3[b]	174,0[b]	147,0[b]	203,3[b]	198,3[b]	F = 206 (7 et 24 d.l.) $\bar{x}$ = 34,5 g $s\bar{x}$ = 22,4 cv = 12,96
	Poids frais / Poids sec	26,16	26,06	14,80	15,09	15,77	14,63	16,93	17,05	$\bar{x}$ = 18,31
Contrôle 12ème semaine	Poids sec en g	2252,8[a]	1653,8[b]	690,3[c]	767,0[c]	689,5[c]	810,0[c]	872,0[c]	896,5[c]	F = 103,5 (7 et 24 d.l.) $\bar{x}$ = 1079,7 $s\bar{x}$ = 55,8 cv = 10,33
	Poids frais / Poids sec	13,22	18,39	16,29	16,98	18,33	17,95	19,30	20,12	$\bar{x}$ = 17,57

Tableau 37 - Résultats de croissance de Bryophyllum dont les bacs sont humidifiés avec une solution nutritive à 50 %.

Les résultats sont présentés au tableau 37. L'analyse de variance permet de mettre en évidence un effet traitement la 6ème semaine. Le test de Newman et Keuls de comparaison des moyennes montre que le terreau est de meilleure qualité que les autres milieux. La croissance végétale est légèrement plus élevée (résultats à confirmer) sur lombricompost âgé de 12 semaines et sur compost classique âgé de 120 jours. Pour les lots témoins, le rapport poids frais sur poids sec diminue entre la 6ème et la 12ème semaines. Il traduit un vieillissement des plantes et une phase d'accroissement moins rapide durant cette période.

5.5.4 - Conclusion

Le test sur Bryophyllum présenté ici nous a permis de mettre en évidence l'insuffisante maturité du compost et lombricompost sans qu' aucune différence notable n'apparaisse entre ces deux substrats. Les manifestations marquées d'effets phytotoxiques pour un compost classique âgé de 120 jours montrent la grande sensibilité du test. Un certain nombre de paramètres liés au compost (excès de salinité, blocage de l'azote, hypoxie) peuvent expliquer cet effet dépressif.

Ce test où la perlite intervient seulement pour reconstituer la structure physique du sol permet de ne juger que l'effet "compost" : effet dépressif ou qualités éventuelles. Certaines propriétés masquées par les essais où les composts sont mêlés au sol peuvent apparaître ici. Ainsi, JUSTE *et al.* (1980) ont pu montrer que les composts considérés comme mûrs par ces mêmes tests étaient, utilisés à l'état pur, phytotoxiques à cause de leur excès de salinité.

CONCLUSIONS GENERALES

Le compostage est une technique qui s'avère indispensable pour certaines matières organiques à C/N élevé (cas des ordures ménagères) avant leur utilisation comme fertilisant ; cette pratique est généralisée en agriculture biodynamique.

Durant le compostage, de nombreux microorganismes et animaux de la faune du sol vont se succéder (HUHTA *et al.*, 1979) et concourir à la formation d'un produit final stable. Les vers de terre colonisent naturellement les morceaux de détritus organiques ; leur activité contribue à accroître la vitesse de dégradation des matières organiques.

Le travail présenté ici vise à optimiser à la fois le compostage et l'élevage des lombriciens ; le procédé "compélevage" permet d'obtenir deux produits valorisables : un lombricompost et une biomasse de vers de terre. Notre choix de matières organiques pour cette étude s'est porté sur les déchets urbains qui font problème à l'heure actuelle et doivent subir un compostage plus ou moins long avant leur usage agricole.

Les vers de terre appartenant à la catégorie des épigés sont bien adaptés à ce biotope : croissance rapide, taux de reproduction élevé, absence de diapause. Les essais d'introduction de quelques espèces de vers épigés ont montré leur limite. Seules les souches appartenant à l'espèce *Eisenia fetida* se sont bien adaptées ; *Eisenia fetida andrei* (souche Ef P 1756) a été retenue pour une étude plus approfondie visant à optimiser le compélevage. Ce choix de souches n'est pas exhaustif, des progrès sont à attendre avec d'autres variétés ou espèces lombriciennes (*Eudrilus eugeniae* notamment).

Les déchets organiques non encore dégradés et utilisés en l'état sont souvent toxiques pour les vers de terre avec une mortalité plus élevée chez les jeunes animaux. L'azote, sous forme ammoniacale disponible (essentiellement soluble), à une concentration supérieure à 500 ppm, est l'un des produits responsables de cette toxicité. La présence de $N\text{-}NH_4^+$ s'observe dans les produits en cours de dégradation, riches en azote et(ou) ayant évolué en anaérobiose (cas des lisiers). Un mélange de ces substrats toxiques avec une matière organique dégradée qui adsorbe les produits lé-

...

taux (NH_4+, acides organiques, ...) évite les mortalités lombriciennes de début d'élevage.

Une température voisine de 25°C, ainsi qu'une humidité proche de la saturation pour le milieu d'élevage, paraissent être l'optimum pour la croissance et la reproduction d'*Eisenia fetida andrei*. Les performances des animaux sont largement conditionnées par le substrat d'élevage : nature du produit, stade de décomposition, taille des éléments. De bons résultats de croissance individuelle et d'accroissement de biomasse lombricienne ont été obtenus sur ordures ménagères (à C/N voisin de 30) ayant subi un compostage accéléré et sur boues urbaines (à C/N voisin de 15),en provenance de digesteur anaérobie,et détoxifiées à l'air (tab. 38). Le milieu à base de fèces de cheval permet une bonne fécondité (jusqu'à 3 cocons/ver/semaine) alors que les déchets urbains sont moins favorables.

Le jeune ver *Eisenia fetida* qui pèse quelques milligrammes à la naissance devient adulte en 4 à 6 semaines en conditions optimales (avec un poids de 400 à 500 mg). Arrivé à ce stade, les vers commencent à pondre à raison de 1 à 3 cocons par ver et par semaine. La période d'incubation des cocons dure 3 semaines à 25°C ; 1 à 3 jeunes éclosent par cocon.

Une charge de 80 jeunes par kg d'ordures ménagères humides (150 % d'eau/poids sec) ne freine pas le développement des animaux et n'entraîne pas de mortalité importante. Pour un cycle d'élevage de 6 semaines, un accroissement de biomasse lombricienne de 33,8 g en poids frais a été obtenu par kg d'ordures ménagères humides. Cet accroissement est 6 fois plus faible lors d'un second cycle d'élevage de 6 semaines réalisé sur ces mêmes ordures ménagères.

L'activité lombricienne conduit à une fragmentation du substrat d'élevage et à la production de fèces de vers de terre. Cette propriété lombricienne est intéressante car elle facilitera dans le cas des ordures ménagères la séparation entre les matières inertes et le lombricompost.

La présence de vers de terre accroît l'activité biologique globale des composts ; une perte de 1 g de carbone par kg d'ordures ménagères

...

sèches a été enregistrée pendant les 42 premiers jours de lombricompostage (tab. 38). Les performances des animaux ne paraissent pas réduites pour des faibles taux de CO_2 (1 à 2 %). La production de chaleur provoquée par cette dégradation aérobie permettrait le maintien d'une température adéquate pour le lombricompostage réalisé en enceinte.

Les résultats des analyses chimiques sont très fluctuants sur ordures ménagères en raison de l'hétérogénéité du matériel. Le ver de terre accroît la minéralisation des boues urbaines en provenance du digesteur anaérobie ; on constate ici une perte d'azote dans le compost et le lombricompost.

Le test de végétation sur *Bryophyllum* n'a pas permis de mettre en évidence une supériorité du lombricompost ; dans les deux cas, on enregistre une insuffisante maturité des substrats organiques.

Certains tests présentés ici pour caractériser la maturité et la valeur agronomique du compost et du lombricompost ont montré leur limite (analyse chimique dans le cas des ordures ménagères). Le manque de méthodes précises pour déterminer la qualité des composts suscite encore des recherches à l'heure actuelle (BERNARD, 1977).

La dégradation des matières organiques solides sous l'action conjuguée des lombriciens et des microorganismes saprophytes est une respiration aérobie. Une succession de microflores différentes apparaît au cours de ce processus et conduit à la synthèse de tissus lombriciens et de substances humiques qui concourent à la formation d'un produit final : le lombricompost. Pour optimiser le procédé du compélevage, l'homme doit intervenir pour maintenir les conditions d'aérobiose, de température et d'humidité nécessaires au développement des microorganismes et des lombriciens, et ceci en tenant compte du contexte économique. Des recherches sur l'utilisation des vers de terre pour le traitement des déchets urbains ou "vermicomposting" se poursuivent (PINCINE *et al.*, 1980) ; les études économiques montrent que ce procédé est compétitif.

Substrat	*Eisenia fetida andrei* (souche Ef P 1756) ; performance à 25°C pour 1 kg de substrat humide	Lombricompost
Ordures ménagères Montargis (150% d'eau/pds sec)	Croissance 1) 1er cycle de 6 semaines = 33,8 g d'accroissement de biomasse lombricienne 80 jeunes ⟶ 72 adultes, 4 jeunes 2) 2è cycle de 6 semaines = 6,9 g d'accroissement de biomasse lombricienne Reproduction Cycle de 3 semaines : 6,1 jeunes par adulte et par semaine 13 adultes ⟶ 63 cocons, soit 80 jeunes (taux d'éclosion de 85 % et 1,5 jeunes/cocon)	- Fragmentation et calibrage (fèces de vers de terre ⩽ 2 mm) - perte de 1 g de carbone/kg d'ordures sèches et par jour ; activité biologique globale accrue en présence de vers de terre. - Léger gain d'azote (plus important dans le lombricompost). - Test sur *Bryophyllum* : insuffisance de maturité du lombricompost en 2 cycles d'élevage.
Boues urbaines anaérobies Dijon (140% d'eau/pds sec)	Croissance (4 semaines) - 20 g d'accroissement de biomasse lombricienne pour une charge de 80 jeunes/kg Reproduction (6 semaines) - 5 jeunes/adulte et par semaine pour une charge de 10 adultes/kg	- Minéralisation plus rapide dans le lombricompost

Tableau 38 - Bilan du compélevage

Références bibliographiques

ANDERSON C., 1979 - Cadmium, lead and calcium content, number and biomass,in earthworms (*Lumbricidae*) from sewage sludge treated soil. Pedobiologia 19,309-319.

ANDRE F., 1963 - Contribution à l'analyse expérimentale de la reproduction des lombriciens. Bull. biol. Fr. Belg. 81, 1-101.

Anonyme, 1979 - Techniques et Sciences municipales.2è inventaire des installations de traitement des ordures ménagères. 103 p.

ANSTETT M.A., 1951 - Sur l'activation macrobiologique des phénomènes d'humification. C.R. acad. agr. 37, 262-264.

ATLAVINYTE O., 1969 - The effect of earthworms on the accumulation of vitamin B12 in soil. Pedobiologia 9, 5, 165-170.

AVEL M., 1929 - Recherches expérimentales sur les caractères sexuels somatiques des lombriciens. Bull. biol. Fr. Belg. 63, 149-318.

AVEL M., 1959 - Classe des Annélides Oligochètes. In P.Grassé "Précis de Zoologie", éd. Masson et Cie, Paris, 5, I,224-270.

BACHELIER G., 1963 - La vie animale dans les sols. Ed. ORSTOM, Paris, 1-279.

BAILLY H.C., 1975 - Gestion des déchets solides par crises ou par objectifs. Nuisances et environnement, mars 1975, 39-41.

BALANDREAU J., 1975 - Activité nitrogénasique dans la rhizosphère de quelques graminées. Thèse, C.N.R.S. n° AO 11699, Nancy-I, 159 p.

BALANDREAU J. et VILLEMIN G. (1973). Application du test de réduction de l'acétylène à la numération des microorganismes telluriques fixateurs d'azote libre. Bull. int. inf. biol. sol 17, 14-15.

BARLEY K.P., 1961 - The abundance of earthworms in agricultural land and their possible significance in agriculture. Adv.agron. 13, 249-268.

...

BARRETT T.J.,1949 - Harnessing the earthworms. Faber and Faber ed., London, 1-166.

BENISTANT D., 1978 - Contribution à la maturité des composts d'ordures ménagères. Mémoire de fin d'études E.N.I.T.A., Dijon, 1-38.

BERNARD D., 1977 - Recherches sur les composts urbains et les déchets broyés. Collection "Recherches et environnement" n° 11 (sol et déchets solides), Orléans, mars 1977, 321-332.

BLIGNIERES F. de, 1980 - Contribution à l'étude de l'impact d'épandage d'ordures ménagères broyées sur une lande xérophile. Etude expérimentale du rôle des lombriciens. D.E.A., UER Sciences de la Vie, Rennes, 1-41.

BEUGNOT M., 1978 - Recherches sur la dynamique de production des turricules de vers de terre d'une prairie permanente. D.E.S., Univ. Dijon, 1-55.

BORNEBUSCH C.H.,1930 - The fauna of forest soil. Forstlige Forsoksvaesen i Danmark, II, 1-158

BORNEBUSCH C.H., 1950 - Soil fauna and its importance in soil type formation. Trans. Ath. Int. Congr. Soil Sci. I, 173-184.

BOUCHE M.B., 1967 - Etablissement et comparaison de diverses bioquantités pour trois espèces de *Lumbricidae*. C.R. coll. dynamique de la biocénose du sol, "Progress in soil biology", North-Holland publ. co., Amsterdam, 595-600.

BOUCHE M.B., 1969 - Comparaison critique de méthodes d'évaluation des populations de lombricidés. Pedobiologia 9, 1/2, 26-34.

BOUCHE M.B., 1970 - Observations sur les lombricidés (3ème série :VII, VIII, IX). VII. Une adaptation écologique à la vie amphibie : la respiration caudale aquatique. VIII. Un cas de convergences morphologiques : celui d'*Allolobophora icterica* et *Eophila bartolii*, nov. sp. IX. *Lumbricus terrestris* Linné, 1758, est-il *Lumbricus herculeus*(Savigny, 1826). Rev. écol. biol. sol 7, 4, 533-547.

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., 1975a - Action de la faune sur les états de la matière organique dans les écosystèmes. In Kilbertus et al. "Humification et biodégradation". Ed. Pierron, Sarreguemines, 157-168.

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

BOUCHE M.B., 1978a - Discussion d'écologie. III. Transferts d'énergie entre maillons trophiques. Bull. écol. 9, 4, 289-299.

BOUCHE M.B., 1978b - Fonctions des lombriciens. I. Recherches françaises et résultats d'un programme forestier coopératif (R.C.P. 40). Bull. scient. Bourgogne 30, 139-228.

BOUCHE M.B., 1981 - Contribution des lombriciens à la migration des éléments dans les sols en climats tempérés. C.R. Coll. Int. "CNRS, Migrations organo-minérales dans les sols tempérés", Nancy, 24-28 septembre 1979. Ed. C.N.R.S., Paris, 145-153.

BROCKMANN W., KOEHLER H. et SCHRIEFER T., 1980 - Recultivation of refuse tips : soil ecological studies. 7è Intern. Coll. of soil Zoology, Syracuse, 29 juillet-3 août 1979. E.P.A. ed., Washington, 161-168.

BROWN B.A. et MITCHELL M.J., 1981 - Role of the earthworm, *Eisenia foetida*, in affecting survival of *Salmonella enteritidis* ser.*typhimurium*. Pedobiologia 22, 434-438.

BYZOVA J.B., 1965 - Comparative rate of respiration in some earthworms (Lumbricidae, Oligochaeta). Rev. ecol. biol. sol, 2,2, 207-216.

BYZOVA J.B., 1966 - On the effect of oxygen tension upon the respiration rate in earthworms (Lumbricidae, Oligochaeta). Rev. écol. biol. sol 3, 2, 273-276.

...

CANAUD J.F., 1981 - Contribution à l'étude des relations pesticides-lombriciens : dangers et toxicités. Mémoire de fin d'études ENITA, 1-92.

CHAUDONNERET M.B., 1977 - Quelques données sur la composition biochimique des vers de terre, aliment éventuel du bétail et de l'homme. Rapport de stage de fin d'études de l'INSA, Lyon 5BC, juin 1977, doc. multigr., 1-37.

CITERNESI U., NEGLIA R., SERITTI A., LEPIDI A., FILIPPI C., GIOVANNA BAGNOLI, NUTI M.P. et GALLUZZI R., 1977 - Nitrogen fixation in the gastro enteric cavity of soil animals. Soil biol. biochem. 9,71-72.

COLIN F., 1977 - Mise au point d'une méthode de détermination de l'A.T.P. dans les composts et application à leur caractérisation. Journées Sol et déchets solides, Orléans, 15,16 et 17 mars 1977. Collection "Recherches et environnement n°11", 355-360.

CUENDET G. , 1979 - Etude du comportement alimentaire de la mouette rieuse (*Larus ridibundus* L.) et de son influence sur les peuplements lombriciens. Thèse de doctorat, fac. sci. de l'Univ. de Lausanne, 1-111.

CURRY J.P., 1976 - Some effects of animal manures on earthworms in grassland. Pedobiologia 16, 425-438.

DARWIN C.R., 1881 - The formation of vegetable mould through the action of worms with observations on their habits. Ed John Murray and co., London, 1-326.

DASH M.C. et PATRA U.C., 1979 - Wormcast production and nitrogen contribution to soil by a tropical earthworm population from a grassland site in Orissa,India. Rev. écol. biol. sol 16,1,79-83.

DASH M.C., SENAPATI B.K. et MISHRA C.C., 1980 - Nematode feeding by tropical earthworms. Oikos 34, 322-325.

...

DAY G.M., 1950 - Influence of earthworms and soil microorganisms.Soil Sci. 69, 175-184.

DOMMERGUES Y., MANGENOT F., 1970 - Ecologie microbienne du sol. Masson Paris, 1-796.

DUCHAUFOUR Ph., 1965 - Précis de pédologie. Masson, Paris, 1-481.

DUCHAUFOUR Ph., 1972 - Processus de formation des sols. Biochimie et géochimie. C.R.D.P., Nancy, 1-182.

DUVIGNEAUD P., 1980 - La synthëse écologique. Doin, Paris, 1-379.

EL DUWEINI K.A. et GHABBOUR S.I., 1971 - Nitrogen contribution by live earthworms to the soil. IV. Coll. Intern.Zool. Sol, 1970. Ann. Zool. Ecol. Anim., hors série, 495-501.

EVANS A.C., GUILD W.J.Mcl., 1948a - Studies on the relationships between earthworms and soil fertility. V. Field populations. Annals of applied biology 35,4, 485-493.

EVANS A.C. et GUILD W.J.Mcl., 1948b - Studies on the relationships between earthworms to the soil. IV. On the life cycles of some British Lumbricidae. Annals of applied biology 35,4, 471-484.

FAYOLLE L., 1979 - Conséquences de l'apport de contaminants sur les lombriciens. III. Essais de laboratoire. Doc. pédozool. 1,1,34-65.

FERRIERE G., FAYOLLE L. et BOUCHE M.B., 1981 - Un nouvel outil essentiel pour l'éco-physiologie et l'écotoxicologie : l'élevage des lombriciens en sol artificiel. Pedobiologia 22, 196-201.

FERRIERE G., 1980 - Fonctions des lombriciens. VII. Une méthode d'analyse de la matière végétale ingérée. Pedobiologia 20, 263-273.

FOSGATE O.T. et BABB M.R., 1972 - Biodégradation of animal wastes by *Lumbricus terrestris*.J. DAIRY Science 55, 870-872.

...

FRENCH C.E., LISCINSKY S.A. et MILLER D.R., 1957 - Nutrient composition of earthworms. J. Wildlife Management 21, 348.

FUNMILAYO O., 1977 - Distribution and abundance of moles (*Talpa europaea* L.) in relation to physical habitat and food supply. Oecologia 30, 277-283.

G.E.E.R.S., 1974 - Les déchets solides : proposition pour une politique. Rapport du groupe d'étude sur l'élimination des résidus solides. La Documentation française, Paris, 1-190.

GISH C. et CHRISTENSEN R.E., 1973 - Cadmium, Nickel, Lead and Zinc in earthworms from roadside soil.Environmental Science et Technology, 7,11, 1060-1062.

GOUNOT A.M., 1967 - La microflore des limons argileux souterrains : son activité productrice dans la biocénose cavernicole. C.N.R.S., ann. spéléol. 22, 1, 1-121.

GRAFF O., 1953 - Die Regenwürmer Deutschlands. Ed. Schaper, Hanovre, 1-81.

GRAFF O., 1974 - Gewinnung von Biomasse aus Abfallstoffen durch Kultur des Kompostregenwurms *Eisenia foetida* (Savigny, 1826). Landbauf. Völken. 24,2,137-142.

GRANT W.C., 1955 - Temperature relationships in the megascolecid earthworm *Pheretima hupeiensis*. Ecology 36, 3, 412-417.

HADJIBIROS K., FAYOLLE L. et BOUCHE M.B., 1979 - Conséquence de l'apport de contaminants sur les lombriciens. II. Estimation statistique des risques. Doc. pédozool. 1,1, 23-32.

HARTENSTEIN R., 1981 - - Production of earthorms as a potentially economial source of protein. Biotechnology and bioengineering 23, 1797-1811.

HARTENSTEIN R., NEUHAUSER E.F. et KAPLAN D., 1979 - Reproductive potential of the earthworm *Eisenia foetida*. Oecologia 43, 329-340.

HARTENSTEIN R., NEUHAUSER E.F. et EASTON E.G., 1980 - Growth and fecundity of F2 *Eisenia foetida*, derived from F1s both reared in isolation from birth. Megadrilogica 3,11, 185-187.

HARTENSTEIN R., NEUHAUSER E.F. et NARAHARA A., 1981 - Effects of heavy metal and other elemental additives to activated sludge on growth of *Eisenia foetida*. J. environ. qual. 10,3,1981.

HEIDET J.,1981- Bio-accumulation et transfert de contaminants par les lombriciens. Mémoire de fin d'études E.N.I.T.A., Dijon, 1981, 1-75.

HEITOR F., BOEMARE N. et AMARGIER A., 1978 - Mise en évidence d'une infection bactérienne chez les vers de terre. Ann. zool. écol. anim. 10,3,507-514.

HELMER R., 1973 - Phénomènes thermiques et émissions de gaz lors du compostage. Recherches avec des cellules, modèles d'andain. Bull. ISWA., 10, 27-42.

HERLANT-MEEWIS H., 1954 - Croissance et reproduction du lombricien *Eisenia foetida* (Sav.). Ann. soc. roy. zool. Belgique, 85, 119-151.

HUHTA V.,IKONEN E. et VILKAMAA P.,1979-Succession of invertebrate populations in artificial soil made of sewage sludge and crushed bark. Ann. zool. fennici 16, 223-270.

IRELAND M.P., 1979 - Metal accumulation by the earthworms *Lumbricus rubellus*, *Dendrobaena veneta* and *Eiseniella tetraedra* living in heavy metal polluted sites. Environ. Pollut. 19, 3, 201-206.

JAY S., 1979 - Etude de l'écotoxicité de quelques métaux lourds sur le chaînon lombricien. Mémoire de fin d'études E.N.I.T.A., Dijon, 1-91.

JEANSON C., 1968 - Essai de pédozoologie expérimentale : morphologie d'un sol artificiel structuré par les lombricides. Thèse Fac. Sci. Paris, section "sciences naturelles". Mém. Muséum Nat. hist. nat., Zoologie, 46, 215-327.

JONGERIUS A. et SCHELLING J., 1960 - Micromorphology of organic matter formed under the influence of soil organisms, especially soil fauna. Proc. 7th. int. congr. soil sci., 3, 35, 702-710.

JUSTE C., SOLDA P., DUREAU P., 1980 - Mise au point de tests agronomiques légers permettant de déterminer simultanément la phytotoxicité globale des composts d'ordures ménagères et leur degré de maturation. (INRA, Agronomie, Bordeaux-Pont de la Maye). Ministère de l'Environnement et du Cadre de vie (convention d'étude n°77-147), 1-19 + les annexes.

KAMAL et SINGH C.S. 1970 - Studies on soil fungi from teak forests of Gorakhpur. VIII. A comparative account of fungi of earthworms casts, termitarium and surrounding soil from a teak stand. Annls. Inst. Pasteur, Paris, 119, 249-259.

KAPLAN D.L., HARTENSTEIN R., NEUHAUSER E.F. et MALECKI M.R., 1980a - Physicochemical requirements in the environment of the earthworm *Eisenia foetida*. Soil biol. biochem. 12, 347-352.

KAPLAN D.L., HARTENSTEIN R. et NEUHAUSER E.F., 1980b - Coprophagic relations among the earthworms *Eisenia foetida*, *Eudrilus eugeniae* and *Amynthos* spp. Pedobiologia 20, 74-84.

KOCH B., EVANS H.J., 1966 - Reduction of acetylene to ethylene by soybean root nodules. Plant physiol. 41, 1748-1750.

KRETZSCHMAR A., 1978 - Quantifications écologiques des galeries de lombriciens. Technique et premières estimations. Pedobiologia 18, 31-38.

KUBIENA W.L., 1955 - Animal activity in soils as a decisive factor in establishment of humus forms. In "Soil zoology". Ed Butterworths, London, 73-82.

KURCHEVA G.F., 1960 - Role of invertebrates in the decomposition of oak litter.Soviet soil sci. 4, 360-365.

LAVELLE P., 1971 - Etude préliminaire de la nutrition d'un ver de terre africain *Millsonia anomala* (*Acanthodrilidae, Oligochaeta*). Ann. zool. écol. anim. 145, 71/7, 131-146.

LAVELLE P., 1977 - Bilan énergétique des populations naturelles du ver de terre géophage *Millsonia anomala* (*Acanthodrilidae, Oligochaeta*) dans la savane de Lamto (Côte d'Ivoire. 3è coll. ecol. trop. Lubumboski (Zaïre), avril 1975. Géo. eco. trop. 1,2;149-157.

LAVELLE P., 1981 - Stratégies de reproduction chez les vers de terre. Acta oecologica/Oecol. gener. 2,2, 117-133.

LOQUET M., 1974 - Etude de l'activité microbiologique d'une prairie perpermanente : le Haras du Pin, comparaison avec les turricules de vers. Rev. écol. biol. sol 11,1,47-65.

LUCOTTE G., 1978 - Variabilité génétique et évolution. Ed. Franc. de Scientific American, 13, 83-97.

MACFADYEN A., 1961 - Metabolism of soil invertebrates in relation to soil fertility. Ann. appl . biol. 49, 215-218.

Mc INROY D.M., 1971 - Evaluation of the earthworm *Eisenia foetida*"as food for man and domestic animals. Feedstuffs, 20,45-47.

MADGE D., 1969 - Field and laboratory studies on the activities of two species of tropical earthworms. Pedobiologia 9, 188-214.

MALDAGUE M.E., 1970 - Rôle des animaux édaphiques dans la fertilité des sols forestiers. INEAC, sér. scient., 112, 1-245.

MANGENOT F., 1975 - "Biodégradation et humification". Rapport premier. Coll. Intern., Univ. Nancy-I, 1-14.

MAZAUD D., 1979 - Evaluation de méthodes de marquage permettant le repérage des lombriciens au terrain ; premières applications. Thèse Docteur-Ingénieur, sciences agronomiques, I.N.R.A., Paris-Grignon, 1-178 + annexes 1-80.

MICHON J., 1954 - Contribution expérimentale à l'étude de la biologie des Lumbricidae. Les variations pondérales au cours des différentes modalités du développement embryonnaire. Thèse Univ., Poitiers,1-192.

MILES H.B., 1963a - Heat-death temperature in A. *terrestris* (Sav.). form. *longa* (Ude) and *Eisenia foetida* (Sav.). Nature, London, 199, 826.

MILES H.B., 1963b - Soil protozoa and earthworm nutrition. Soil Sci. 95, 407-409.

MITCHELL M.J., MULLIGAN R.M., HARTENSTEIN R. et NEUHAUSER E.F., 1977. Conversion of sludges into "topsoils" by earthworms. Compost science 18, 4, 28-32.

MOMENT G.B. et HABERMANN H.M., 1979 - Thermal acclimation and compensation of respiratory oxygen uptake in an earthworm *Eisenia foetida*. Physiol. zool. 52,4, 542-548.

MULLER P.E., 1889 - Recherches sur les formes naturelles de l'humus. Trad. française de l'édition allemande de 1884. Ann. sc. agron. fr. étrang. 1, 1-351.

NEEDHAM A.E., 1957 - Components of nitrogenous excreta in the earthworms *Lumbricus terrestris* L. and *Eiseinia foetida* (Sav.). J. exp. biol. 34, 425-446.

NELSON J.M. et SATCHELL J., 1962 - The extraction of Lumbricidae from soil with special reference to the hand sorting method. In "Progress in soil zoology. Ed. P.W. Murphy, Butterworths, London, 294-299.

...

NEUHAUDER E.F., KAPLAN D.L. et HARTENSTEIN R., 1979 - Life history of the earthworm *Eudrilus eugeniae*. Rev. écol. biol. sol 16,4,525-534.

NEUHAUSER E.F., KAPLAN D.L., MALECKI M.R. et HARTENSTEIN R., 1980 - Materials supporting weight gain by the earthworm *Eisenia foetida* in waste conversion systems. Agric. wastes 2, 43-60.

NICOLARDOT B., 1979 - Valorisation agricole des composts d'ordures ménagères, caractérisation de leur maturité, accélération de leur évolution dans le sol. Mémoire de fin d'études E.N.I.T.A., Dijon, 1-59.

PARENT B., 1976 - Etude du compostage commun de boues résiduaires fraîches et d'ordures ménagères. T.S.M., L'eau, 425-433.

PARLE J.N., 1963a - Micro-organisms in the intestines of earthworms. J. gen. microbiol. 31, 1-11.

PARLE J.N., 1963b - A microbiological study of earthworm casts. J. gen. microbiol. 31, 13-22.

PETRUCCI D., 1951 - Ricerche sul metabolismo anossigenico di Eisenia foetida. Boll. Soc. Ital. Biol. Sperim. 27, 1521-1523 (cité par AVEL,1959).

PIEARCE T.G., 1972 - The calcium relations of selected Lumbricidae. J. anim. ecol. 41, 167-188.

PINCINCE A.B. et DONOVAN J.F., 1980 - Vermicomposting municipal sludge : an economical stabilization alternative. Sludge, 3, 5, 26-30.

POCHON J. et TARDIEUX P., 1962 - Techniques d'analyses en microbiologie du sol. Ed. de la Tourelle, St Mandé, France, 1-108.

POMMEL B.,1979 - La valorisation agricole des déchets. 2. Les boues résiduaires urbaines. INRA, Min. agricult., 1-70.

...

REINECKE A.J. et KRIEL J.R., 1981 - Influence of temperature on the reproduction of the earthworm *Eisenia foetida* (*Oligochaeta*). S.-Afr. J. Zool., 16,2, 96-100.

ROUELLE J., 1977 - Ecologie du cycle de l'azote : dénombrement des peuplements microbiens des structures du sol (turricules et galeries) résultant de l'activité des vers de terre d'une prairie permanente. Thèse 3ème cycle, Univ. Lyon, 1-64.

ROUELLE J. et PUSSARD M., 1981 - Certains microorganismes sont-ils indispensables à l'alimentation des vers en élevage industriel ? In "5è réunion des microbiologistes de l'I.N.R.A. : microorganismes d'intérêt industriel". Dourdan, 31.3-1,2.4-1981. INRA ed., Versailles, 189-192.

SATCHELL J.E., 1955 - Aspects of earthworms ecology. In Soil zoology, Ed. Butterworths, London, 180-199.

SATCHELL J.E., 1967 - Lumbricidae. In "Soil biology". Ed. Burges and Raw, Academic Press, London, 259-322.

SATCHELL J.E., 1969 - I. Studies on methodical and taxonomical questions. Methods of sampling earthworm populations. Pedobiologia 9,20, 21-25.

SATCHELL J.E., LOWE D.G., 1967 - Selection of leaf litter by *Lumbricus terrestris*. In Progress in soil biology. Eds O.GRAFF and J.E. SATCHELL. North Hollande Publishing Co., Amsterdam, 102-119.

SCHULZ E. et GRAFF O., 1977 - Zur Bewertung von Regenwurmmehl aus Eisenia foetida (Savigny, 1826) als Eiweissfuttermittel. Landbauforsch. Völkenrode, 3, 216-218.

STILLE B., 1980 - Genetic structure of populations of the earthworm *Aporrectodea tuberculata*. Oikos 34, 195-201.

STOCKLI,A., 1928 - Studien über den Einfluss des Regenwurmes auf Beschaffenheit des Bodens. Land-. Jb. Schweiz 42, 1-121.

TEOTIA S.P., DULEY F.L. et McCALLA T.M., 1950 - Effect of stubble mulching on number and activity of earthworms. Nebr. Agric. Exp. St. Res. Bull. 165,20.

THIBAUDAT C., 1977 - Compostage conjoint des ordures ménagères et des boues d'épuration. Collection "recherche et environnement, 11(sol et déchets solides), Orléans, mars 1977, 379-386.

TOMLIN A.D. et MILLER J.J., 1979 - Developpment and fecundity of the manure worm *Eisenia foetida* (*Annelida : Lumbricidae*) under laboratory conditions. C.R. VII e coll. int. zool. Sol, Syracuse, 673-678.

TSUKAMOTO J. et WATANABE H., 1977 - Influence of temperature on hatching and growth of *Eisenia foetida* (Oligochaeta, Lumbricidae). Pedobiologia 17, 338-342.

VAIL V.A., 1974 - Observations on the hatchings of *Eisenia foetida* and *Bimastos tumidus* (*Oligochaeta : Lumbricidae*). Bull. Tall Timbers Res. sta. 16, 1-8.

WATANABE H. et TSUKAMOTO J., 1976 - Seasonal change in size class and stage structure of Lumbricid *Eisenia foetida* population in a field compost and its practical application as the decomposer of organic waste matter. Rev. ecol. biol. sol 13, 1, 141-146.

WEAST R.D., 1964 - Handbook of Chemistry and Physics. Chemical Rubber Co., Cleveland, Ohio.

WILCKE D.E., 1952 - Zur "Domestikation" des "Soilution-earthworm". Anzeigf. Schadlinskunde 25,7, 107-109.

WOLF A.V., 1940 - Paths of water exchange in the earthworm . Phys. zool. 13, 294-308.

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

YOSHINARI T. THYRES R. et KNOWLES R., 1977 - Acetylene inhibition of nitrous oxide reduction and measurement of denitrification and nitrogen fixation in soil. Soil biol. biochem. 9, 177-183.

ZAJONC I., 1967 - Contribution à l'étude de la dynamique saisonnière et de la biologie de l'activité soliforme des lombrics dans les bois de hêtres des Carpates. Acta fytotechnica, Univ. agric. Nitra, Tchécosl. 15, 141-153.

ZICSI A., 1962 - Determinations of numbers and size of sampling unit for estimating Lumbricid populations of arable soils. In "Murphy P.W. (ed.) : soil biology. Butterworths, London, 68-71