



Ministère De l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université Échahid Cheikh Larbi Tebessi- Tébessa
Faculté Des Sciences Exactes Et Sciences de la
Nature et de la Vie
Département des Êtres vivants



MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Option : Écophysiologie animale

Thème

Effet d'un herbicide sulfonylurée "Oscar" chez deux
espèces de vers de terre dans deux types de sols

Présenté par :

Hana CHERGUI

Membres du jury :

Pr. MEKAHLIA Mohamed Nacer

Dr. BOUAZDIA Karim

Dr. HANNACHI Mohamed Salah

Professeur

MCA

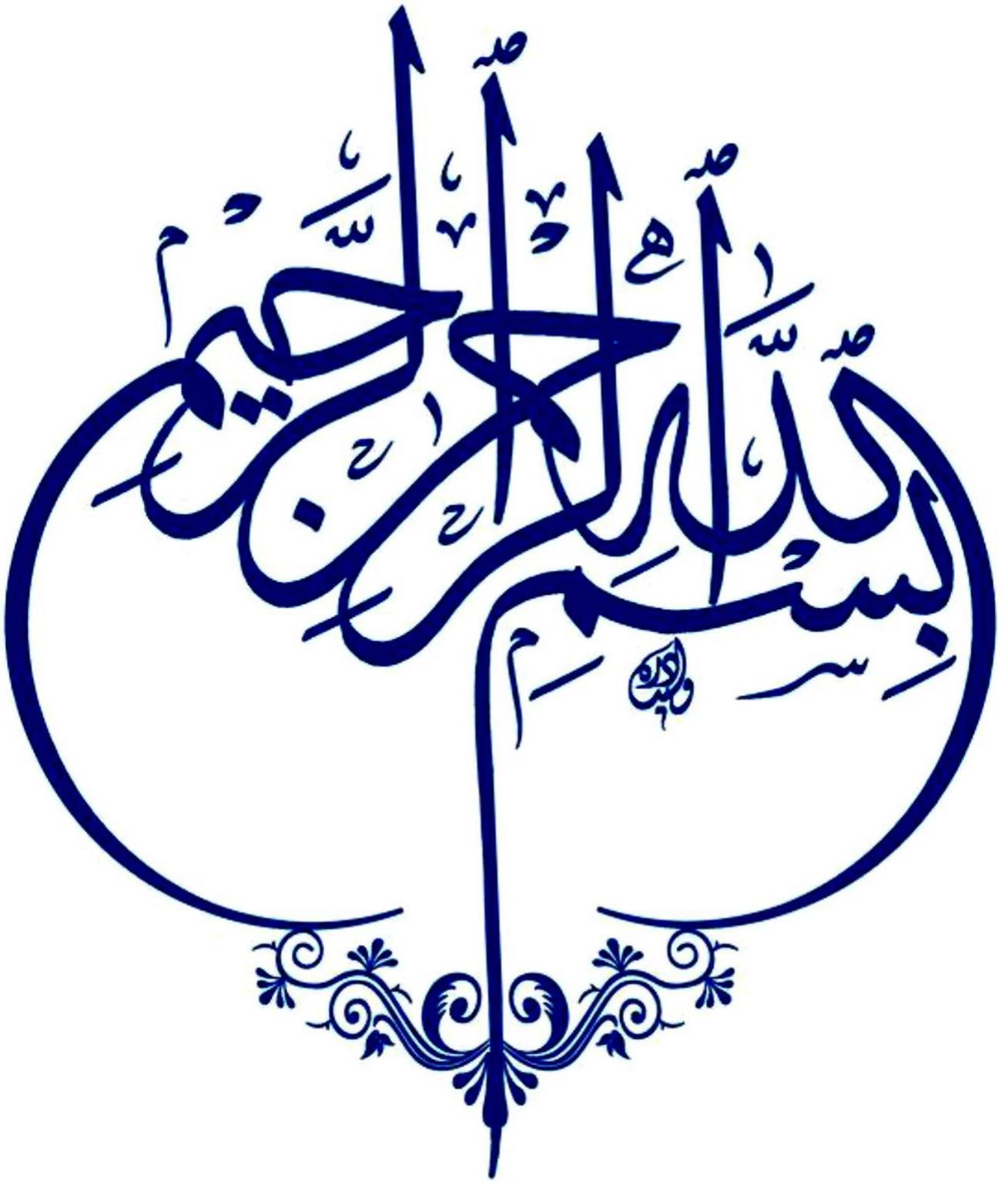
MCB

Président

Rapporteur

Examineur

Année Universitaire :2023/2024



Remerciements

Avant tout, j'exprime ma gratitude infinie à **Allah**, le Tout-Puissant, pour sa guidance et ses bénédictions tout au long de mon parcours académique. C'est grâce à sa sagesse et à sa miséricorde que j'ai pu surmonter les défis et les obstacles rencontrés durant ces années d'études. Je le remercie pour la force et la détermination qu'il m'a accordées, ainsi que pour la patience et le courage dont j'ai bénéficié afin de mener à bien ce travail. Sans sa bienveillance et son soutien divin, cet accomplissement n'aurait pas été possible.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury pour leur précieuse contribution à l'évaluation de ce travail. Je suis particulièrement reconnaissant à **M.Mbhammed Nacer MEKAHLIA**, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury.

Je remercie sincèrement mon directeur de recherche, **M. Karim BOUAZDIA**, pour son encadrement précieux, ses conseils avisés et son soutien indéfectible tout au long de ce travail. Ses encouragements et sa confiance ont été une source constante de motivation.

J'adresse également mes remerciements chaleureux à **M. Mohamed Salah HANNACHI**, examinateur de ce travail, pour ses remarques constructives qui ont permis d'enrichir cette étude.

Je souhaite remercier toutes les personnes qui ont apporté leur aide, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace

*Je dédie ce travail au peuple de **Gaza** et à ses résistants qui nous ont enseigné la liberté, ainsi qu'à tous les musulmans blessés partout dans le monde, en espérant que Dieu nous accordera la victoire.*

*À mes regrettés grands-pères **Houcine** et **Amor**, que Dieu ait leurs âmes, dont la joie aurait été incomparable à celle de quiconque à la vue de mes accomplissements.*

*À ma **mère** attentionnée et à mon cher **père**, vos droits sur moi demeurent inaliénables, indépendamment de mes paroles. Que Dieu vous protège et m'accorde vos bénédictions.*

À l'ensemble des membres de ma famille qui m'ont prodigué leur soutien et leur coopération de toutes sortes.

*À mon frère unique, mon précieux **Mohamed Ali***

À toutes mes chères amies et compagnons

À toutes et à tous, merci du fond du cœur.

Résumé

Résumé

Les vers de terre sont des ingénieurs du sol qui modifient les propriétés biophysiques du sol pour favoriser la croissance des plantes, tandis que les pesticides représentent une menace importante pour leur abondance et pour la santé du sol.

La présente étude a été menée afin d'étudier en premier temps l'effet de l'herbicide Oscar sur la croissance, la reproduction et le comportement des deux espèces, *E.fetida* et *A.caliginosa*, dans deux types de sols. Cet herbicide a provoqué une baisse du poids, du nombre de cocons pondus, de l'activité d'enfouissement, de la consommation de litière et de la production de turricules des deux espèces, dans les deux sols. Oscar a eu un effet répulsif pour l'espèce *A.caliginosa*, contrairement à *E.fetida* où son effet a été attractif.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés à une batterie de biomarqueurs tels que : l'activité GST, l'activité CAT, et la quantité de protéines, et leur évolution en présence de l'herbicide à la concentration recommandée (6,25 mg/kg sol sec) ainsi qu'à la concentration sub-létale (96,12 mg/kg sol sec). Nos résultats mettent en évidence une augmentation de la quantité de protéines des deux espèces au fil du temps. Après 7 jours d'exposition, l'activité de la GST a été stimulée, puis a diminué après 14 jours. En outre, l'activité de la CAT a augmenté en fonction de la concentration et du temps, sauf pour celle des vers *E.fetida* traités dans le sol artificiel, qui a été inhibée.

Nos résultats suggèrent que les herbicides peuvent affecter négativement les vers de terre et fournissent des informations précieuses vis-à-vis les réponses des « ingénieurs biologiques » du sol aux produits agrochimiques.

Mots clés : Oscar, vers de terre, croissance, reproduction, comportement, biomarqueurs.

Abstract

Earthworms are soil engineers that modify the biophysical properties of the soil to promote plant growth, while pesticides represent a significant threat to their abundance and soil health.

The present study was conducted firstly to investigate the effect of the herbicide Oscar on the growth, reproduction, and behavior of two species, *E. fetida* and *A. caliginosa*, in two types of soils. This herbicide caused a decrease in weight, number of cocoons laid, burrowing activity, litter consumption, and casting production in both species, in both soils. Oscar had a repellent effect on the species *A. caliginosa*, unlike *E. fetida* where its effect was attractive.

Secondly, we focused on a battery of biomarkers such as GST activity, CAT activity, and protein quantity, and their evolution in the presence of the herbicide at the recommended concentration (6.25 mg/kg dry soil) as well as at sub-lethal concentration (96.12 mg/kg dry soil). Our results show an increase in the quantity of proteins of both species over time. After 7 days of exposure, GST activity was stimulated, then decreased after 14 days. Additionally, CAT activity increased depending on the concentration and time, except for that of *E. fetida* treated in artificial soil, which was inhibited.

Our findings suggest that herbicides can negatively affect earthworms and provide valuable insights into the responses of soil "biological engineers" to agrochemicals.

Key words: Oscar, Earthworms, Growth, reproduction, Behavior, biomarkers

مخلص

تعتبر ديدان الأرض بمثابة مهندس للتربة، إذ تُعدّل خصائصها الفيزيائية والبيولوجية، بالتالي تعزز نمو النباتات، في حين أن المبيدات الحشرية تمثل تهديداً كبيراً لوفرة الديدان الأرضية وصحة التربة. تم إجراء هذه الدراسة لمعرفة تأثير مبيد الأعشاب أوسكار على نمو، تكاثر وسلوك النوعين *E.fetida* و *A.caliginosa*، في نوعين من التربة. سبّب هذا المبيد تراجعاً في الوزن، عدد البيض الموضوع، نشاط الحفر واستهلاك الأوراق وإنتاج الفضلات لدى كلا النوعين، في كل من الترتين. أوسكار كان له تأثيراً طارداً على نوع *A.caliginosa*، على عكس *E. fetida* حيث كان له تأثيراً جاذباً. ثانياً، ركزنا على مجموعة من المؤشرات الحيوية مثل نشاط GST، ونشاط CAT، وكمية البروتين، وتطورها في وجود المبيد بالتركيز الموصى به (6.25 ملغ/كغ تربة جافة) والتركيز فوق القاتل (96.12 ملغ/كغ تربة جافة). أظهرت نتائجنا زيادة في كمية البروتينات لكلا النوعين مع مرور الوقت. بعد 7 أيام من التعرض، تم تحفيز نشاط GST، ثم انخفض بعد 14 يوماً. بالإضافة إلى ذلك، زاد نشاط CAT بزيادة التركيز والوقت، باستثناء نشاط ديدان *E. fetida* المعالجة في التربة الصناعية، الذي تم تثبيطه. تقترح نتائجنا أن مبيدات الأعشاب يمكن أن تؤثر سلبيًا على ديدان الأرض، كما تقدم رؤى قيمة حول استجابة المهندسين البيولوجيين للتربة للمواد الكيميائية الزراعية.

الكلمات المفتاحية: أوسكار، دود الأرض، النمو، التكاثر، السلوك، علامات حيوية.

Table des matières

TABLE DES MATIERES	PAGE
Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Abstract	
	ملخص
Sommaires	
Introduction	01
Partie I : Synthèse Bibliographique	
1. Biologie et écologie des lombriciens	05
1.1. Taxonomie	05
1.2. Systématique	05
1.3. Morphologie	06
1.3.1. Prostomium	07
1.3.2. Soma	07
a) Zone antérieure (anté-clitellienne)	07
b) Clitellum	08
e) Zone post-clitellienne	08
1.3.3. Pygidium	08
1.3.4. Soies	08
1.3.5. Pores dorsaux	09
1.3.6. Pores males	09
1.3.7. Pores femelles	10
1.4. Cycle de vie	10
1.5. Ecologie des Lombriciens	14
1.5.1. Position de vers de terre dans le réseau trophique	14
1.5.2. Intérêt des Lombriciens	14
1.5.3. Catégories écologiques	14
a) Les épigés	14
b) Les endogés	15
c) Les anéciques	15

Table des matières

1.5.4. Régime alimentaire	15
2. Généralités sur les pesticides	16
2.1. Définition du pesticide	16
2.2. Classification des pesticides	16
2.2.1 Classification selon la toxicité	16
A. Toxicité aiguë	17
B. Toxicité chronique	17
2.2.2. Classification selon la composition chimique	17
2.2.3. Classification selon la nature de la cible	17
3. Les herbicides	19
3.1. Définition	19
3.2. Classification	19
4. Les sulfonylurées	21
4.1. Chimie des sulfonylurées	22
4.2. Propriétés physico-chimiques des sulfonylurées	22
4.3. Mode d'action	22
Partie II : Matériel et méthodes	
1. Présentation de la zone d'étude	25
1.1. Situation géographique	25
1.2. Sites d'échantillonnage	25
1.2.1. Premier site	25
1.2.2. Deuxième site	25
2. Matériel biologique	26
2.1. <i>A.caliginosa</i>	26
2.2. <i>E.fetida</i>	27
3. Présentation de l'herbicide	28
4. Travaux du terrain	29
4.1. Prélèvement d'échantillons	29
4.2. Matériel utilisé	29
5. Travaux de laboratoire	30
5.1. Matériel utilisé	30
5.2. Rinçage et tri des vers de terre	30

Table des matières

5.3. Identification des vers de terre	31
5.4. Préparation du sol naturel	31
5.5. Préparation du sol artificiel	32
5.6. Conditions expérimentales	32
5.7. Traitement	33
5.8. Effet sur la croissance pondérale	33
5.9. Effet sur la reproduction	34
5.10. Effet sur le comportement	34
5.10.1. Enfouissement, consommation de litière et production de turricules	34
5.10.2. Test d'évitement	34
5.11. Dosage enzymatique	35
5.11.1. Dosage des Protéines totales	35
5.11.2. Dosage de l'activité GST (glutathion S-transférase)	37
5.11.3. Dosage de l'activité de la (CAT) Catalase	37
6. Analyse statistique des résultats	38
Partie III : Résultats	
1. Sol artificiel	40
1.1 Croissance pondérale	40
1.2. Reproduction	41
1.3. Comportement	42
1.3.1. Test d'évitement	42
1.3.2. Enfouissement, consommation de litière et production de turricules	43
a) <i>A. caliginosa</i>	43
b) <i>E. fetida</i>	45
1.4. Dosage des biomarqueurs	46
1.4.1. Quantité de protéines	46
1.4.2. L'activité enzymatique de la Glutathion-S-transferase	47
1.4.3. L'activité enzymatique de la Catalase	49
2. Sol naturel	50
2.1. Croissance pondérale	50
2.2. Reproduction	51

Table des matières

2.3. Comportement	52
2.3.1. Test d'évitement	52
2.3.2 Enfouissement, consommation de litière et production de turricules	53
a) <i>A. caliginosa</i>	53
b) <i>E. fetida</i>	55
2.4. Dosage des biomarqueurs	56
2.4.1. Protéines	56
2.4.2. L'activité enzymatique de la Glutathion-S-transférase	57
2.4.3. L'activité enzymatique de la Catalase	58
Partie VI : Discussion	
1. Effet sur la croissance pondérale	61
2. Effet sur la reproduction	62
3. Effet sur le comportement	63
3.1 Test d'évitement	63
3.2. Enfouissement, consommation de litière et production de turricules	64
4. Effet sur les biomarqueurs	65
4.1 Quantité de protéines	66
4.2. Activité de la glutathion S-transférase	67
4.3. Activité de la catalase	68
Conclusion	71

LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
01	Prostomium et péristomium de vers de terre	07
02	Clitellum d'un ver de terre	08
03	Régions du corps d'un vers de terre	08
04	Soies de vers de terre	09
05	Pores males des vers de terre	09
06	Reproduction chez les vers de terre	11
07	Cocons de vers de terre	11
08	Stades de développement des vers de terre.	12
09	Tubercule pubère	13
10	Représentation schématique des relations fonctionnelles entre les vers de terre et leur environnement externe	15
11	Structure générale des sulfonylurées	22
12	Localisation géographique de la région et des sites d'étude	26
13	<i>Aporrectodea caliginosa</i>	26
14	<i>Eisenia fetida</i>	27
15	Herbicide Oscar	28
16	Étapes de prélèvement des vers de terre sur le terrain	29
17	Matériel utilisé sur le terrain.	29
18	Matériel utilisé au laboratoire.	30
19	Étapes d'identification des vers de terre au niveau de laboratoire	31
20	Tamisassions du sol naturel	31
21	Constituants du sol artificiel	32

Table des matières

22	Étapes du test	33
23	Extraction des vers de terre dans un bain marie	34
24	Test d'évitement des vers de terre.	35
25	Dosage des protéines	36
26	Variation du taux de croissance pondérale des vers de terre (<i>A.caliginosa</i> et <i>E.fetida</i>) dans le sol artificiel après 7 et 14 jours d'exposition à deux concentrations de l'herbicide Oscar.	41
27	Effet de l'herbicide Oscar sur le nombre de cocons produit par les deux espèces de vers <i>A.caliginosa</i> et <i>E.fetida</i> .	42
28	Taux de migration des vers de terre (<i>E.fetida</i> et <i>A.caliginosa</i>) dans le sol artificiel témoin et contaminé par deux concentrations croissantes de l'herbicide Oscar.	43
29	Effet de l'herbicide Oscar appliqué dans le sol artificiel aux concentrations RAD et CL10 sur le comportement : Activité d'enfouissement, production de turricules et quantité de nutriments consommée des vers <i>A. caliginosa</i> au cours de la période d'étude	44
30	Effet de l'herbicide Oscar appliqué dans le sol artificiel aux concentrations RAD et CL10 sur le comportement : Activité d'enfouissement, production de turricules et quantité de nutriments consommée des vers <i>E. fetida</i> au cours de la période d'étude.	45
31	Droite de régression exprimant l'absorbance en fonction de la quantité d'albumine (μg) (R^2 : coefficient de détermination).	46
32	Effet des concentrations RAD et CL ₁₀ de l'herbicide Oscar, appliqué dans le sol artificiel, sur la quantité de protéines totales après 7 et 14 jours d'exposition chez les deux espèces de vers <i>A.caliginosa</i> et <i>E.fetida</i> dans le sol artificiel.	47
33	Effet de concentrations croissantes de l'herbicide Oscar, appliqué dans le sol artificiel, sur l'activité spécifique de la GST chez deux espèces de vers de terre après 7 et 14 jours d'exposition.	48
34	Effet de concentrations croissantes de l'herbicide Oscar, appliqué dans le sol artificiel, sur l'activité spécifique de la catalase chez deux espèces de vers de terre après 7 et 14 jours d'exposition.	50

Table des matières

35	Variation du taux de croissance pondérale des vers de terre (<i>A.caliginosa</i> et <i>E.fetida</i>) dans le sol naturel après 7 et 14 jours d'exposition à deux concentrations de l'herbicide Oscar.	51
36	Effet de l'herbicide Oscar appliqué dans le sol naturel sur le nombre de cocons produit par les deux espèces de vers <i>A.caliginosa</i> et <i>E.fetida</i> .	52
37	Taux de migration des vers de terre (<i>E.fetida</i> et <i>A.caliginosa</i>) dans le sol naturel témoin et contaminé par deux concentrations croissantes de l'herbicide Oscar.	53
38	Effet de l'herbicide Oscar appliqué dans le sol naturel aux concentrations RAD et CL10 sur le comportement : Activité d'enfouissement, production de turricules et quantité de nutriments consommée des vers <i>A. caliginosa</i> au cours de la période d'étude.	54
39	Effet de l'herbicide Oscar appliqué dans le sol naturel aux concentrations RAD et CL10 sur le comportement : Activité d'enfouissement, production de turricules et quantité de nutriments consommée des vers <i>E. fetida</i> au cours de la période d'étude.	55
40	Effet des concentrations RAD et CL ₁₀ de l'herbicide Oscar sur la quantité de protéines totales après 7 et 14 jours d'exposition chez les deux espèces de vers <i>A.caliginosa</i> et <i>E.fetida</i> dans le sol naturel.	57
41	Effet de concentrations croissantes de l'herbicide Oscar, appliqué dans le sol naturel, sur l'activité spécifique de la GST chez deux espèces de vers de terre après 7 et 14 jours d'exposition.	58
42	Effet de concentrations croissantes de l'herbicide Oscar, appliqué dans le sol naturel, sur l'activité spécifique de la catalase chez deux espèces de vers de terre après 7 et 14 jours d'exposition.	59

LISTE DES TABLEAUX

<i>N°</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
01	Classification des pesticides selon la nature de la cible	18
02	Classification des herbicides selon le mode d'action	19
03	Constituants du sol artificiel	32
04	Dosage des protéines : réalisation de la gamme d'étalonnage.	36
05	Dosage de la catalase	37

Liste des abréviations

A.caliginosa : *Aporrectodea caliginosa*.

E.fetida : *Eisenia Fetida*.

E.andrei : *Eisenia Andrei*.

L.terrestris : *Lumbricus terrestris*.

GST : Glutathion-S-Transférase.

CAT : Catalase.

Mg : Milligramme.

Kg : Kilogramme.

PMD : Division de la gestion des pesticides.

A.L.S : Acétolactate synthétase.

Km : Kilomètre.

m : mètre.

µl : Microlitres.

OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques.

MNHN : Muséum national d'histoire naturelle.

RAD : Dose agricole recommandée.

CL : Concentration létale.

BBC : Bleu Brillant de Coomassie.

R² : Coefficient de détermination.

nm : Nano mètre.

ml : millilitre.

BSA : Albumine de sérum de bœuf.

µg : Microgramme.

CDNB : 1-chloro-2,4-dinitrobenzène.

GSH : Glutathion Réduit.

pH : Potentiel hydrogène.

ANOVA : Analyse de variance.

Vs : Volume de surnageant.

Vd : Volume total des solutions dans la déprotéinisation.

UV : Ultraviolet.

Introduction

Introduction

Les organismes du sol représentent environ un quart de la biodiversité mondiale (Bardgett & Van Der Putten, 2014) et jouent un rôle important dans de multiples services écosystémiques (Schuldt et al., 2018 ; Soliveres et al., 2016 ; Wagg et al., 2014). Toutefois, la réponse des communautés du sol aux changements environnementaux reste peu étudiée par rapport aux communautés terrestres (FAO, ITPS, GSBI, SCBD, et EC, 2020 ; Phillips et al., 2017). C'est particulièrement le cas des invertébrés du sol (comme les vers de terre) qui constituent non seulement une fraction importante de la biodiversité mondiale (Eisenhauer et al., 2019 ; FAO, ITPS, GSBI, SCBD, et EC, 2020) mais qui sont également une partie essentielle des réseaux alimentaires terrestres, avec de nombreux animaux au-dessus du sol, y compris les vertébrés (Barnes et al., 2023 ; Scherber et al., 2010 ; Wardle, 2002). Les Lumbricidae constituent la majorité de la biomasse faunistique du sol dans de nombreux écosystèmes agroalimentaires tempérés, avec jusqu'à 1 000 individus et 300 g de biomasse par mètre carré de terre (Edward & Bohlen, 1996 ; Curry, 1994).

Les vers de terre représentent un élément biologique important du sol et sont généralement définis comme des « ingénieurs des écosystèmes » (Latif et al. 2009). Les macropores créés par les vers de terre améliorent l'infiltration de l'eau, le drainage et l'échange de gaz entre le sol et l'atmosphère, et les galeries peuvent fournir des chemins de moindre résistance pour que les racines atteignent les couches plus profondes du sol (Bastardie et al., 2003). Les vers de terre produisent des déjections à la surface et à l'intérieur du sol, mélangeant ce dernier, Cela impacte positivement l'agrégation du sol, la disponibilité des nutriments (Scullion & Malik, 2000 ; Creamer et al., 2015) et la protection physique du carbone organique (Martin, 1991 ; Angst et al., 2019). La masse de sol transportée et mélangée par les vers de terre peut atteindre plusieurs tonnes par hectare et par an (Taylor et al., 2018).

Selon Pimentel (1995), 2,5 millions de tonnes de pesticides sont épandus sur les cultures de la planète chaque année. L'Algérie fait partie des pays qui utilisent de grandes quantités de pesticides, ce qui suscite l'alarme de l'Association Algérienne pour la Protection de l'Environnement. Selon Chiali et al. (2013), l'Algérie consomme annuellement 30 000 tonnes de pesticides. Cela soulève des inquiétudes quant à leur impact sur la biodiversité et continue d'augmenter à l'échelle mondiale (Sharma et al., 2019). De cette manière, une large gamme de substances est encore utilisée et de nouvelles substances sont continuellement mises sur le marché (Wang et al., 2020) destinées à répondre aux problèmes de protection des plantes et, plus généralement, aux problèmes causés par les organismes vivants nuisibles. La présence de

substances abondantes peut être un aspect captivant, mais elle requiert en revanche une multitude de recherches menées par des laboratoires publics et industriels.

Par ailleurs, la progression des produits et l'apparition de substances de plus en plus actives se traduisent par une réduction des quantités utilisées, comme dans le cas des herbicides. Jusque vers les années 1980, les doses pour les triazines étaient de 500 à 2000 g/ha. Ensuite, avec l'utilisation des sulfonilurées, les doses ont atteint une vingtaine de grammes (chlorsulfuron) et même moins que la dizaine de grammes pour le metsulfuron méthyl.

Cette évolution entraîne diverses conséquences. Tout d'abord, sur le plan technologique, car l'application uniforme d'aussi petites quantités requiert l'utilisation de préparations spécifiquement formulées et de matériel d'épandage extrêmement précis. Sur le plan environnemental, elle pose néanmoins deux problèmes. L'une est associée à l'activité biologique élevée des produits récents, ce qui, bien qu'il permette d'en utiliser peu, ne garantit pas l'absence d'effets néfastes sur des cibles non visées, malgré leur grande finesse. La seconde est liée à la difficulté de repérer et de mesurer les substances actives présentes dans le sol et les eaux à des concentrations très faibles, ce qui restreint considérablement la description de leur évolution (Calvet, 2005).

Parmi ces pesticides figure l'herbicide Oscar, qui est couramment employé en Algérie. Cet herbicide de type sulfonilurée est largement utilisé pour lutter contre les adventices dicotylédones présentes dans les champs de blé dur et de blé tendre. Les nicotinoides, les strobilurines, les triazols, les carbamates et les organophosphates sont parmi les pesticides sulfonilurées les plus dangereux pour les vers de terre (Pelosi et *al.*, 2013a). Bien que les données sur les sulfonilurées soient prometteuses, il est nécessaire de vérifier attentivement leurs propriétés écotoxicologiques (Bergman et Pugh, 2012).

Les problèmes de sols contaminés et de déchets solides ont augmenté au cours des deux dernières décennies dans tous les pays industrialisés, ce qui a nécessité l'élaboration de méthodes de caractérisation toxicologique plus efficaces. Les vers sont naturellement en contact avec les composants solides et liquides du sol, ingèrent de grandes quantités de sol et sont donc directement exposés aux contaminants (Schreck et *al.* 2009). En raison de leur facilité de collecte, d'identification et de reproduction, de leur importance écologique et de leur sensibilité à la pollution de l'environnement, ils ont été choisis comme organismes sentinelles appropriés pour les études écotoxicologiques des résidus de pesticides dans les écosystèmes terrestres (Owagboriaye et *al.*, 2020).

Plus de 6000 espèces de vers de terre ont été décrites à travers le monde (Csuzdi, 2012; Wetzel & Reynolds, 2023), bien que le nombre d'espèces valides est approximativement 5406 (Misirlioğlu, M et *al.*, 2023), dont l'espèce *Eisenia fetida* largement utilisée comme organisme d'essai standard pour l'évaluation des risques des pesticides. Des protocoles ont été largement appliqués pour évaluer leur sensibilité à la pollution chimique. Cependant, cette espèce est absente des sols agricoles et est souvent moins sensible aux pesticides que d'autres espèces de ver dans les sols minéraux. Pour procéder à une meilleure évaluation des effets des pesticides sur les organismes non-cibles, il est nécessaire d'effectuer des essais à posteriori à l'aide d'espèces pertinentes. L'espèce endogée *Aporrectodea caliginosa* (Savigny, 1826) est représentative des champs cultivés dans les régions tempérées et est suggérée comme espèce d'essai modèle pertinente (Pelosi et *al.*, 2013b ; Bart et *al.* 2018).

Donc, on s'est intéressé dans un premier temps, à étudier l'effet de l'herbicide Oscar sur la croissance, la reproduction et le comportement des deux espèces *E. fetida* et *A. caliginosa* dans deux sols différents. Le deuxième objectif était d'évaluer la quantité de protéines et les activités enzymatiques de la Glutathion-S-Transférase et de la Catalase chez les vers traités à des concentrations sub-létales.

*Synthèse
bibliographique*

1. Biologie et écologie des lombriciens

1.1. Taxonomie

Les vers de terre sont des invertébrés appartiennent au groupe des métazoaires coelomates triploblastiques protostomiens, ils appartiennent à l'embranchement des Annélides (vers segmentés, dont la principale caractéristique évolutive est un corps formé d'une série d'anneaux), à la sous-classe des Oligochètes (littéralement : qui ont peu de poils), à l'ordre des Haplotaxida et au sous-ordre des Lumbricina. La famille des Lumbricea est la plus importante des Oligochètes. Elle se compose essentiellement de vers terrestres (Edwards et Bohlen, 1996).

Les vers de terre représentent jusqu'à 70 % de la biomasse de sol (Zirbes et *al.*, 2011), cinq mille espèces ont déjà été décrites à travers le monde, mais de nombreuses restent à découvrir principalement dans les zones tropicales. (Brown et *al.*, 2013).

Néanmoins, l'inventaire systématique et la répartition des vers de terre en Algérie sont encore mal connus (Baha et *al.*, 2001 ; Omodeo et *al.*, 2003 ; Kherbouche et *al.*, 2012 ; Zeriri et *al.*, 2013).

1.2. Systématique

La classification des annélides oligochètes, la plus récente, est publiée dans la base de données de la faune d'Europe (Jong et *al.*, 2014) :

Règne	Animalia
Sous-règne	Eumetazoa
Phylum	Annelida
Classe	Oligochaeta
Sous-classe	Diplosterculata
Super-ordre	Megadrili
Ordre	Opisthopora
Sous-ordre	Lumbricina
Super-famille	Criodriloidea
Famille	Criodrilidae
Super-famille	Eudriloidea
Famille	Eudrilidae
Super-famille	Lumbricoidea
Famille	Ailoscolecidae

Famille	Glossoscolecidae
Famille	Hormogastridae
Sous-famille	Hormogastrinae
Sous-famille	Vignysinae
Sous-famille	Xaninae
Famille	Lumbricidae
Sous-famille	Diporodrilinae
Sous-famille	Lumbricinae
Sous-famille	Spermophorodrilinae
Super-famille	Megascolecoida
Famille	Acanthodrilidae
Famille	Megascolecidae
Famille	Ocnerodrilidae
Famille	Octochaetidae
Super-famille	Sparganophiloidea
Famille	Sparganophilidae
Sous-classe	Tubificata
Ordre	Tubificida
Sous-ordre	Enchytraeina
Super-famille	Enchytraeoida
Famille	Enchytraeidae
Famille	Propappidae

1.3. Morphologie

Les Oligochètes, une classe d'annélides, présentent une métamérisation typique et une symétrie bilatérale. Contrairement aux Polychètes, ils ont un nombre restreint de soies qui ne sont pas associées à des parapodes. Ces soies sont regroupées en quatre faisceaux par segment, comprenant deux latéraux dorsaux et deux latéraux ventraux. Leur vaste cœlome est divisé en sacs cœlomiques par des septas, des cloisons provenant de la paroi corporelle, un par segment (Lausanne, 1980). De plus, ils possèdent deux pores néphrétiques, conférant à leur apparence un aspect vermiforme caractéristique qui facilite leur progression dans le sol (Lavelle et Spain, 2001).

Les oligochètes ont une morphologie externe et une anatomie interne qui sont expliquées dans des ouvrages généraux comme Avel (1959). Quand les vers de terre ne sont pas colorés,

on les appelle albins (Bouché, 1972). Bien que leur couleur apparente puisse être assez variée, elle est en réalité influencée par la coloration interne des organes, le fluide coelomique, le tube digestif et son contenu. Leur corps est flexible, constamment humide grâce à un léger mucus. Leur mouvement se fait en contractant et en allongeant successivement leurs segments. Il convient de noter que les vers de terre dégagent une odeur distinctive, généralement assez subtile (Baha, 2008). Il y a trois régions successives dans le corps d'un ver de terre, le prostomium, le soma et le pygidium, avec des soies implantées dans la paroi du corps :

1.3.1. Prostomium

Le prostomium (Fig. 1) (dérivé du grec, "pro", signifiant "devant", et "stoma", signifiant "bouche") est un petit organe triangulaire, au-dessus de la bouche, fusionné avec le premier segment ou péristomium (du grec peri, autour), comme son nom l'indique, qui entoure la bouche, et qui a avec le segment adjacent des limites variables qui sont utilisées en systématique (Bouché, 1972).

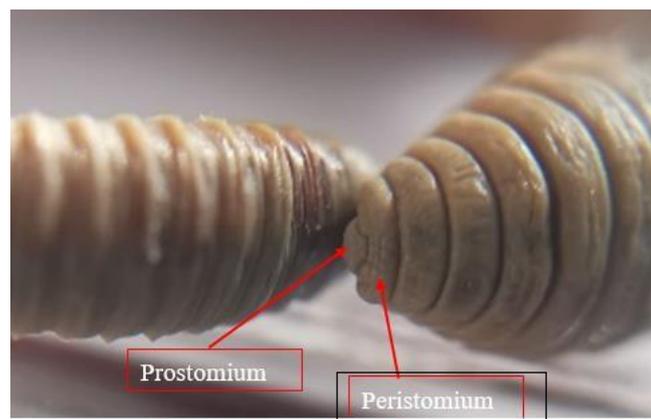


Figure 1. Prostomium et péristomium de vers de terre (photo personnelle, 2024).

1.3.2. Soma

Le soma forme la majeure partie du corps. Il est entièrement métamérisé, ce qui signifie que le corps est composé d'une série de nombreux anneaux successifs appelés métamères. Selon Sims et Gerard (1999) le soma peut être divisé extérieurement en trois zones par rapport au clitellum chez l'adulte :

- a) **Zone antérieure (anté-clitélienne)** Elle est riche en cellules sensorielles et abrite le cerveau. Le développement musculaire modifie sa morphologie, jouant un rôle mécanique essentiel dans la pénétration des vers de terre dans le sol.

b) **Clitellum** chez certaines familles, il se présente sous la forme d'un fer à cheval (Fig. 2) à annulaire, créant ainsi un cocon qui accueille les œufs et les spermatozoïdes pendant la période de reproduction.



Figure 2. Clitellum d'un ver de terre (photo personnelle, 2024).

c) **Zone post-clitélienne** se compose d'une série de segments similaires. Elle sert principalement à la mécanique et à la digestion, elle permet aux vers de terre de s'accrocher à l'orifice du terrier lorsqu'ils s'étendent sur la surface par terre.

1.3.3. Pygidium

Le pygidium, issu du grec "pygê" signifiant "fesse", représente le dernier segment de l'animal. Il est dépourvu de cavité cœlomique et entoure l'anus (Bernard *et al.*, 2012).

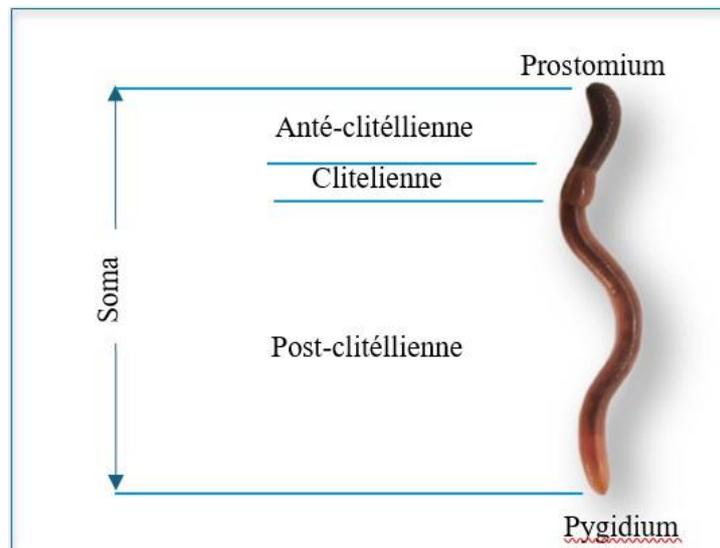


Figure 3. Régions du corps d'un ver de terre (photo personnelle, 2024).

1.3.4. Soies

D'après Bachelier (1978) le caractère des soies est l'un des principaux critères d'identification des vers de terre. Celles-ci sont à la fois protéiques, chitineuses et rigides. Dans chaque segment, les soies sont regroupées en faisceaux, à l'exception du prostomium, du péristomium et de quelques segments postérieurs. Toutes les soies sont insérées dans la paroi

du corps dans un sac et chaque segment est généralement composé de quatre faisceaux : deux latéraux-dorsaux et deux latéraux-ventraux (Fig. 4).

Deux types de soie sont présents : lombricienne (8 soies par segment, réparties en 4 paires) et perichaetienne (plus de 8 soies par segment, réparties autour de la circonférence du corps). (Bouché, 1972).



Figure 4. Soies de vers de terre (photo personnelle, 2024).

1.3.5. Pores dorsaux

Les pores dorsaux se présentent sous la forme de petites ouvertures sur les sillons inter segmentaux ou la ligne dorsale et ne se rencontrent que chez les oligochètes terricoles. Ces orifices établissent une communication avec la cavité centrale et le fluide cœlomique (Bachelier, 1978).

1.3.6. Pores males

Il s'agit des sorties des canaux déférents. Chez certaines familles, ils sont présents en deux paires, tandis que dans d'autres familles, ils se présentent en une seule paire. Habituellement, ces débouchés se situent entre les soies b et c, vers le milieu du quinzième segment chez la plupart des lombrics (Bouché, 1972) (Fig. 5).



Figure 5. Pores males des vers de terre (photo personnelle, 2024).

1.3.7. Pores femelles

Les pores femelles constituent le débouché des oviductes et sont situés directement dans le segment suivant le métamère ovarien. Il y a un pore femelle par ovaire. Les 2 pores femelles sont situés un peu au-dessus de la soie b du 14e segment chez la plupart des vers de terre. (Sekhara et Baha, 2008).

1.4. Cycle de vie

À l'origine, tous les vers de terre sont hermaphrodites, mais de nombreuses espèces sont parthénogénétiques. Certaines espèces sont nécessairement biparentales, comme *Lumbricus terrestris*, tandis que d'autres peuvent se reproduire sans accouplement, par autofertilisation ou parthénogénèse (Sims et Gerard, 1999 ; Fernandez et *al.*, 2012).

Lors de l'accouplement, qui survient généralement à la surface du sol lorsque les conditions sont favorables, il y a un échange de spermatozoïdes. Quelques jours après, le clitellum, une partie renflée formant une bague sur le corps d'un ver de terre adulte, se déplace le long de la partie antérieure du ver. À ce moment, un cocon contenant des gamètes mâles et femelles, également appelé œuf ou zygote, est sécrété dans le sol sous forme d'une capsule fermée aux deux extrémités (Pelosi, 2008).

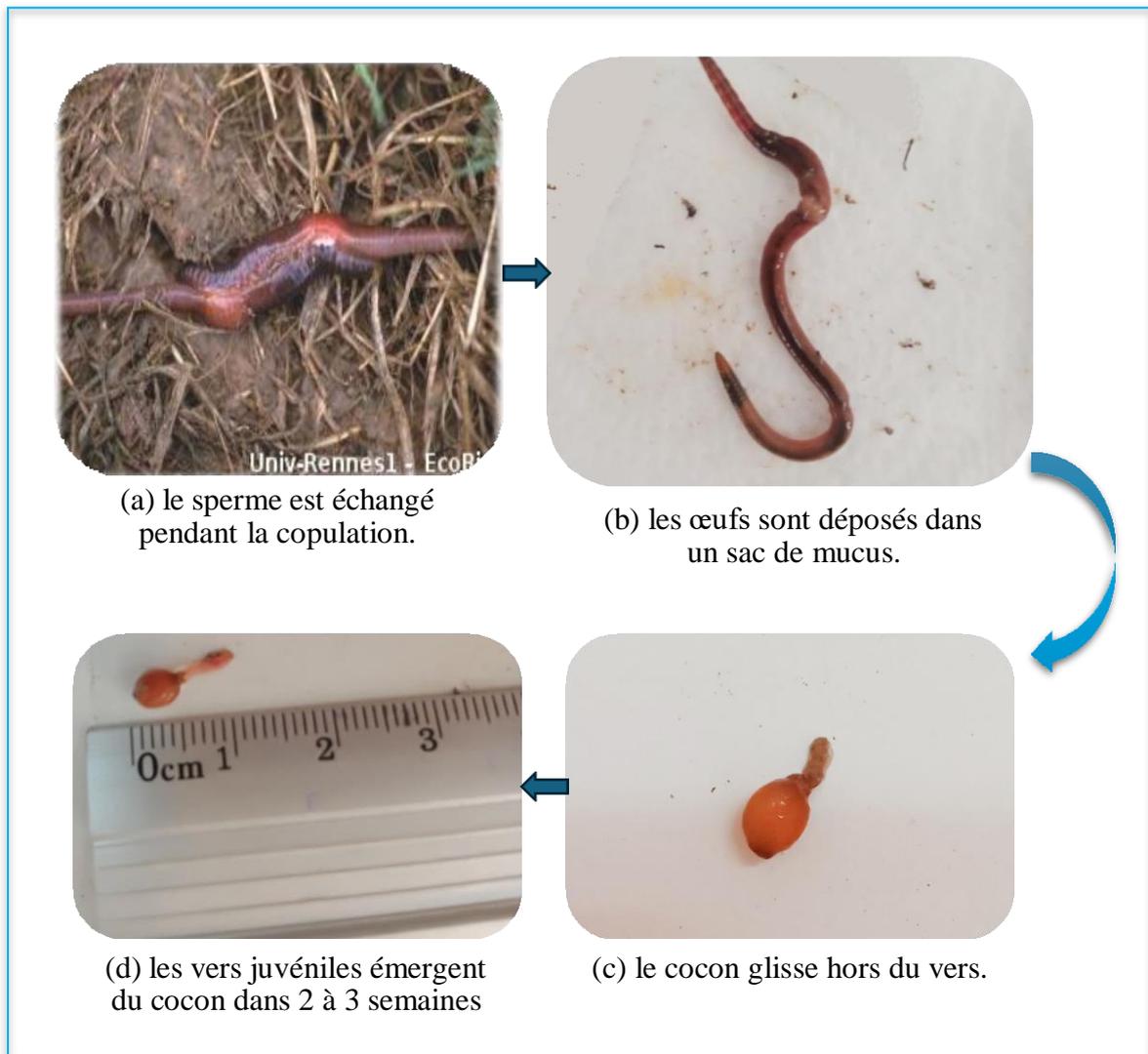


Figure 6. Reproduction chez les vers de terre (photos personnelles, 2024).

Les cocons (Fig. 7) sont capables de résister les conditions défavorables telles que la sécheresse ou une variation de la température. (Edwards et Bohlen, 1996). Le dessèchement du sol entraîne la déshydratation du cocon, ce qui peut entraver le développement embryonnaire. (Evans et Guild, 1948 ; Gerard, 1967).



Figure 7. Cocons de vers de terre (photo personnelle).

Les cocons des vers adultes sont multipliés par an, selon leur âge et les conditions dans lesquelles ils évoluent (Lee, 1985). L'analyse de diverses études par Satchell (1967) révèle que les espèces anéciques ou endogées *Aporrectodea caliginosa*, *Aporrectodea longa* et *Octolasion cyaneum* génèrent entre 3 et 13 cocons par an, tandis que les espèces épigées *Lumbricus rubellus*, *Lumbricus castaneus* et *Dendrobae narubidus* peuvent générer entre 42 et 106 cocons par an. Selon Butt (1993), la production annuelle de cocons de l'espèce *L. terrestris* varie de 10 à 25 cocons en fonction des conditions climatiques. Un ou plusieurs jeunes individus, dits juvéniles, éclosent quelques temps plus tard.

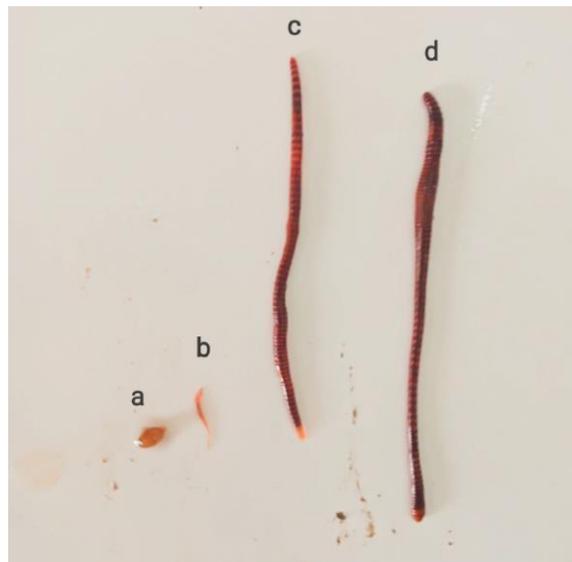


Figure 8. Stades de développement des vers de terre (photo personnelle, 2024). (a) cocon. (b) juvénile. (c) sub-adulte. (d) adulte.

Au fil du temps, le ver de terre juvénile développe progressivement des caractéristiques sexuelles secondaires externes liées à l'accouplement, telles que le puberculum tuberculeux ou les pores sexuels, ce qui le rendra sub-adulte. Par la suite, un clitellum, un organe associé à la ponte, va se développer et permettre au ver de terre de devenir sexuellement mature afin de pouvoir se reproduire à son tour. Il devient ainsi adulte. (Pelosi 2008).

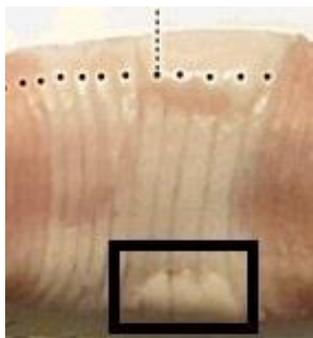


Figure 9. Tubercule pubère (photo personnelle, 2024).

Le délai de maturation diffère grandement entre les espèces et est influencé par les conditions environnementales (température, humidité, nourriture). Selon Boström et Lofs (1996), un juvénile *A.caliginosa* atteint sa maturité en 3 à 6 semaines. En plein air, *L.terrestris* atteint généralement la maturité sexuelle en 1 an (Lakhani et Satchell, 1970), tandis qu'en laboratoire, il ne lui faudra que quelques mois pour atteindre la maturité sexuelle (Daniel et *al.*, 1996 ; Lowe et Butt, 2002).

La durée de vie des vers de terre varie en fonction de l'espèce, de leur biotope et des conditions de vie. Par conséquent, l'espèce *L.terrestris* a la capacité de survivre pendant plusieurs années en laboratoire (Lakhani et Satchell, 1970), tandis qu'en milieu naturel et plus spécifiquement en système cultivé, elle est vulnérable à des risques qui réduisent son espérance de vie à quelques mois (Satchell, 1967).

Le biotope dans lequel les vers de terre vivent a un impact sur leur cycle de vie. Par conséquent, les valeurs de survie, de croissance et de reproduction, mesurées dans des conditions de laboratoire favorables, dépassent les valeurs observées en milieu naturel, où les conditions climatiques et l'approvisionnement en nourriture sont variables et parfois loin d'être optimales (Lofs-Holmin, 1982 ; Whalen et Parmelee, 1999). La température et l'humidité du sol jouent un rôle essentiel dans l'évolution, la survie, la fertilité et l'activité de *L. terrestris* (Satchell, 1967; Hartensein et Amico, 1983 ; Sims et Gerard, 1999).

Finalement, la qualité et la quantité de matière organique présente dans le sol (Curry, 1998) ainsi que le type de sol et le pH jouent un rôle essentiel dans la régulation de la présence des communautés lombriciennes dans les divers biotopes. Effectivement, s'il y a une espèce dans une parcelle, on peut penser qu'elle convient au type de sol et au pH du sol. Par ailleurs, Selon Edwards et Bohlen (1996), les sols à faible teneur en matière organique ne peuvent généralement pas supporter de fortes densités de vers de terre.

1.5. Ecologie des Lombriciens

1.5.1. Position de vers de terre dans le réseau trophique

Même si le lombric vit principalement dans le sol, il y a des prédateurs tels que des oiseaux, la taupe *Talpa europaea*, le hérisson *Atelerix algirus*, le sanglier *Sus scrofa*, ainsi que quelques insectes tels que le carabe doré *Carabus auratus*. L'apport protéinique de ces animaux laissés en liberté sur l'exploitation agricole est d'environ 20 g de vers de terre (poids vif) par jour et par volaille (Frédéric et al., 2003).

1.5.2. Intérêt des Lombriciens

Les vers de terre ont un impact écologique significatif en ce qui concerne l'aération et le micro-drainage du sol, car ils ont peu d'impact sur la diversité des espèces présentes et exercent une influence variable sur la productivité de certains types ou communautés de plantes (Lavelle et al., 1998).

Ainsi, les lombrics sont de bons indicateurs de l'état de vie d'un sol pour différentes raisons (Römbke et al., 2005) :

- Ils participent au fonctionnement de l'écosystème sol (décomposition et structure).
- Grâce à leur comportement et leur morphologie, ils sont en contact à la fois avec la phase solide du sol et avec la phase aqueuse (directement en lien avec le cheminement des pesticides).
- La plupart des espèces de lombriciens sont très sensibles à de faibles niveaux de pollution.
- Leurs réactions aux stress sont mesurables et reproductibles en champ mais surtout en laboratoire.
- A l'heure actuelle beaucoup de choses concernant leur biologie, leur écologie sont connues.

1.5.3. Catégories écologiques

D'après Bouché (1977), Edwards et Lofty (1977) et Lee (1985), on peut identifier trois grands groupes écologiques de lombriciens (il existe en réalité de nombreux intermédiaires entre ces extrêmes).

a) Les épigés

Les épigés ont des cycles de vie courts (1 à 2 ans) et sont soumis à une forte prédation. Ils sont typiques des sols de litière et de forêts, petits, grêles et rougeâtres. Ils se nourrissent de litière (en surface du sol) et de microflore mais ingèrent peu de sol.

b) Les endogés

Les endogés creusent dans le sol des galeries profondes et horizontales. Ils sont de taille variable, dépigmentés, pourvus d'une musculature développée. Ils restent en diapause pendant une période de vie moyenne en cas de sécheresse. Leur alimentation est principalement composée de feuilles en décomposition à la surface du sol et de sol.

c) Les anéciques

Les anéciques ont un mode de vie mixte, ils creusent des galeries verticales. Ils sont longs et de couleur foncée, à vie longue (jusqu'à 10 ans), protégés dans leurs galeries. Ils se nourrissent de microflore et de sol plus ou moins enrichi de matière organique. Grâce à ces mouvements verticaux, ils exercent une influence significative sur la composition du sol.

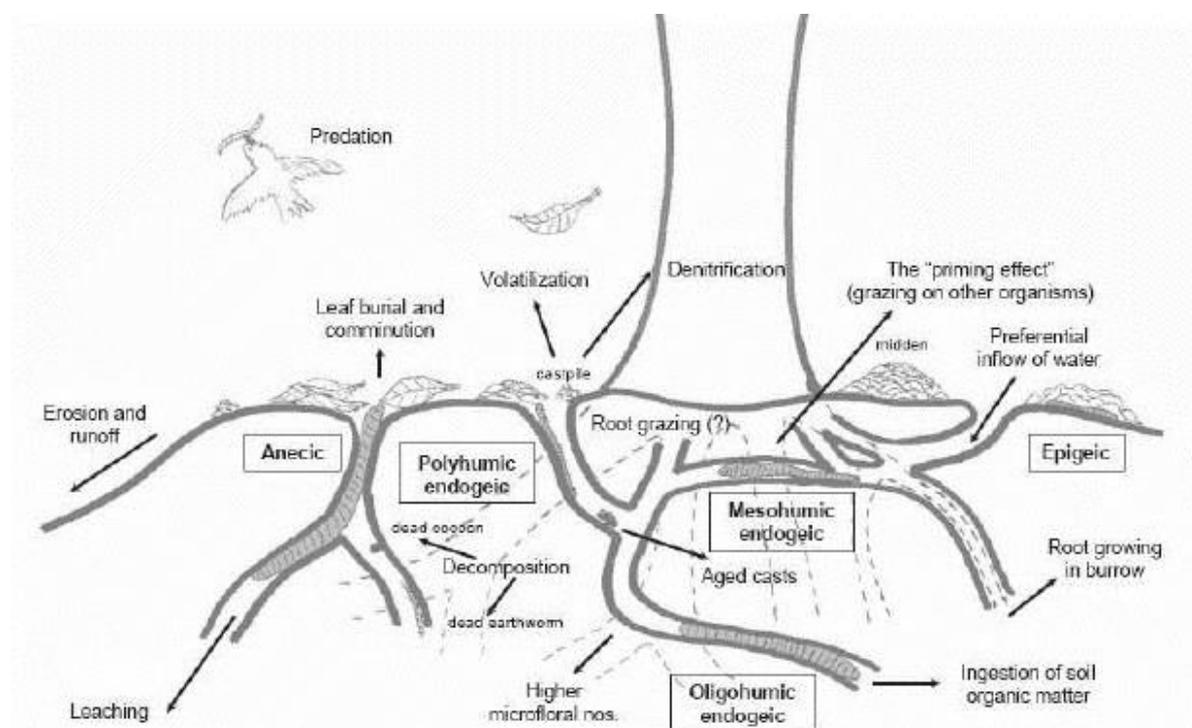


Figure 10. Représentation schématique des relations fonctionnelles entre les vers de terre et leur environnement externe (Doube et Brown, 1998).

1.5.4. Régime alimentaire

Au dire de Pfiffner et *al.* (2007) et Kneafsey et *al.* (2013), les vers de terre se nourrissent de végétaux morts. Les bactéries, les algues, les protozoaires et même les champignons mycélium peuvent être mangés par eux, ainsi que les feuilles et les résidus de culture (Pelosi, 2008). Les vers peuvent même consommer le sol avec les résidus de culture (Bachelier, 1978).

D'après Dallerac (2005) ; Dominguez et *al.* (2009) ; Martin et *al.* (2011) le régime alimentaire est en fonction du groupe écologique les vers épigés consomment la litière préalablement fragmentée (résidus de feuilles et autres parties végétales mortes), tandis que les vers endogés consomment la matière organique dispersée dans la partie minérale du sol. Les anéciques se nourrissent des déchets végétaux présents sur la surface.

2. Généralités sur les pesticides

2.1. Définition du pesticide

Le terme pesticide désigne de manière générique l'ensemble des produits destinés à lutter contre les parasites animaux ou végétaux. Cet anglicisme, issu du latin "pestis" signifiant "épidémie, fléau" et "coedere" signifiant "tuer", souligne l'intention de ces substances à lutter contre des nuisances biologiques. Cependant, les mêmes matières actives employées en agriculture peuvent être également utilisées dans d'autres secteurs professionnels ou être destinées à un usage domestique ou médical. La plupart des pesticides, qu'ils soient naturels ou de synthèse, sont des produits biologiquement actifs et donc intentionnellement toxiques pour certains organismes (Regnault-Roger et *al.*, 2005). Selon Pandey & Mohanty, (2015) la diffusion des pesticides dans l'environnement par contamination de l'air, le sol, l'eau et les produits alimentaires provoque l'exposition continue des organismes vivants d'une manière tant aigue que chronique à des risques de toxicité susceptible d'engendrer des diverses pathologies.

2.2. Classification des pesticides

Différents critères sont utilisés pour classer les pesticides, tels que leur toxicité (effets dangereux), leur impact sur les organismes nuisibles et leur fonction de pesticide, leur composition chimique, leur mode d'entrée, leur mode d'action, leur fonctionnement, leurs formulations et leurs sources d'origine (Akashe et *al.*, 2018).

2.2.1. Classification selon la toxicité

La toxicité du pesticide dépend principalement de deux facteurs : la dose et le temps. Par conséquent, la quantité de la substance impliquée (dose) et la fréquence de l'exposition (temps) entraînent deux types différents de toxicité- toxicités aiguës et chroniques (PMD, 2018).

A. Toxicité aiguë

La toxicité aiguë se réfère à la manière dont un pesticide est toxique pour un humain, un animal ou une plante après une seule exposition à court terme. Un pesticide ayant une toxicité aiguë élevée est mortel même lorsqu'une très petite quantité est absorbée. La toxicité aiguë peut être mesurée sous forme de toxicité orale aiguë, cutanée aiguë et inhalatrice aiguë.

B. Toxicité chronique

La toxicité chronique fait référence aux effets toxiques différés résultant d'une exposition prolongée ou répétée à un pesticide. La toxicité chronique des pesticides concerne le grand public ainsi que ceux qui travaillent directement avec ces produits en raison de l'exposition potentielle aux pesticides présents dans les aliments, l'eau et l'air (Akashe et *al.*, 2018).

2.2.2. Classification selon la composition chimique

La méthode la plus courante et la plus utile de classification des pesticides est basée sur leur composition chimique et la nature des ingrédients actifs. C'est un type de classification qui donne des indices sur l'efficacité, les propriétés physiques et chimiques des pesticides respectifs. Les informations sur les caractéristiques chimiques et physiques des pesticides sont très utiles pour déterminer le mode d'application, les précautions à prendre lors de l'utilisation et les taux d'utilisation. En fonction de la composition chimique, les pesticides sont classés en quatre groupes principaux, à savoir les organochlorés, les organophosphorés, les carbamates et la pyrèthrine et les pyréthroides (Buchel, 1983).

2.2.3. Classification selon la nature de la cible

Les pesticides sont classés en différentes catégories en fonction des organismes vivants visés, dont les principaux sont indiqués dans le tableau (1)

Tableau 1. Classification des pesticides selon la nature de la cible (Inserm, 2013).

Pesticides	Utilisation	Exemples
Insecticides	Contre les insectes	Dichlorodiphényl trichloroéthane deltaméthrine
Herbicides	Détruisent les plantes adventices des cultures de façon plus générale, toute végétation jugée indésirable	2-4D, glyphosate
Fongicides	Contre les champignons	Moncozébe, hexaconazol, chlorothalonil
Acaricides	Détruisent les acariens	Abamectine
Nématicides	Employés contre les nématodes phytoparasites	Bromomethane, chloropicrine
Molluscicides	Détruisent les gastéropodes	Methiocarbe, mercaptodiméthur
Rodenticides	Tuent les rongeurs comme les rats	Warfarine, phosphore de zinc

3. Les herbicides

3.1. Définition

Les herbicides constituent 40% des pesticides employés dans le domaine agricole, parfois désignés sous le nom de désherbants, en particulier dans le domaine de l'horticulture. Selon Coulibaly (2005), il s'agit de substances actives ou de produits formulés qui ont la capacité de détruire les végétaux. Chaque herbicide présente des caractéristiques distinctes en fonction de sa composition, de son mode d'absorption, de son impact sur la mauvaise herbe et de son élimination progressive (Edelahid, 2004). Dans le domaine agricole, les herbicides sont utilisés pour traiter diverses cultures, telles que les céréales, notamment le maïs et le sorgho, en utilisant des triazines (Bérard, 1994).

3.2. Classification

Les herbicides sont regroupés selon leurs classes chimiques et leurs modes d'action, dont les principaux sont présentés dans le tableau (2).

Tableau (2). Classification des herbicides selon le mode d'action (Prather et *al.*, 2000).

Classe chimique	Nom commun	Mode d'action
Aryloxy phénoxy propionate	Diclofop Fenoxaprop Fluazifop	Inhibition de la synthèse des lipides à l'acétyl CoA carboxylase (ACCCase)
Cyclohexanedion	Clethodim Sethoxydim	

Classe chimique	Nom commun	Mode d'action
Imidazolinones	Imazapyr Imazethapyr	Inhibition de la biosynthèse des acides aminés ramifiés. Inhibition de l'acétolactatesynthase (ALS), aussi appelée acétohydroxyacidesynthase (AHAS).
Sulfonylurées	Bensulfuron Sulfonylureas Chlorsulfuron Halosulfuron Nicosulfuron Rimsulfuron Sulfometuron Triflusulfuron	
Pyrimidynyl-oxybenzoates	Pyrithiobac	
Traizines	Atrazine, Cyanazine, Prometon, Prometryn, Simazine	
Traizinones	Hexazinone, Metribuzin	Inhibition de la photosynthèse au photosystème II.
Phenyl-carbamates	Desmedipham Phenmidipham	
Pyridazinones	Pyrazon, Pyridate	
Uracile	Bromacil	
Amide	Propanil	
Urée	Diuron, Linuron, Tebuthiuron	
Benzothiadiazole	Bentazon	
Nitriles	Bromoxynil	
Bipyriduliums	Diquat Praquat	
Éther diphénylique	Oxyfluorfen	
Oxadiazole	Oxadiazon	

Classe chimique	Nom commun	Mode d'action
Triazolopyridine	Azafenidn	Génération de radicaux libres ; inhibition de l'oxydase de protoporphrinogène (PPO).
Glycine	Glyphosate	Inhibition de l'acide aminé aromatique à la synthèse EPSP.
Acide phosphinique	Glufosinate	Inhibition de la synthèse de la glutamine.
Dinitroanilines	Benefin, Ethalfluralin, Oryzalin, Pendimethalin, Prodiamine, Trifluralin	Perturbations mitotiques ; inhibition de l'assemblage des microtubules.
Pyridazine	Dithiopyr, Thiazopyr	
Benzamide	Pronamide	
Chloracétamide	Alachlor, Metolach	Inhibition de la synthèse des lipides
Thiocarbamates	Butylate, Cycloate, EPTC, Molinate, Pebulate, Thiobencarb	; non ACCase.
Phosphorodithiates Acétamide	Bensulide, Metolachlor	

4. Les sulfonylurées

Les sulfonylurées représentent l'une des plus grandes classes d'herbicides avec 27 ingrédients actifs différents enregistrés actuellement dans le monde entier (Russell *et al.*, 2002). Les sulfonylurées sont des urées remplacées utilisées dans les zones d'émergence. Et en utilisant des quantités très limitées (5 à 35 g de matière active par hectare de blé, par rapport à 600 à 800 g de 2,4-D) (Fournier, 1988). Pour la première fois, les propriétés des sulfonylurées ont été mentionnées en 1966 par Koog (Junghans *et al.*, 2003) en utilisant un composé de propazine. Le chloresulfuron fut le premier herbicide sulfonylurée à être commercialisé en 1981. La famille des sulfonylurées est actuellement constituée d'une vingtaine d'herbicides principalement développés par Du Pont de Nemours (Fournier, 1988).

Les molécules de sulfonylurées sont caractérisées par une activité herbicide à doses très réduites (10 à 100 fois moins que les herbicides conventionnels), ce qui a permis leur introduction rapide sur le marché des herbicides (Junghans et *al.*, 2003). Avec des demi-vies dans le sol inférieures à deux mois et des DL50 supérieurs à 5000 mg/kg chez le rat, ces produits sont aussi très intéressants du point de vue de l'environnement.

4.1. Chimie des sulfonylurées

D'après Russell et *al.* (2002) le terme 'sulfonylurée' est dérivé de la partie centrale, ou pont, de la molécule, qui est composée d'un motif sulfonyle lié à un groupe urée (Fig. 11). La vaste gamme de substitutions possibles au sein des sulfonylurées, en particulier sur les deux systèmes cycliques, est clairement visible.

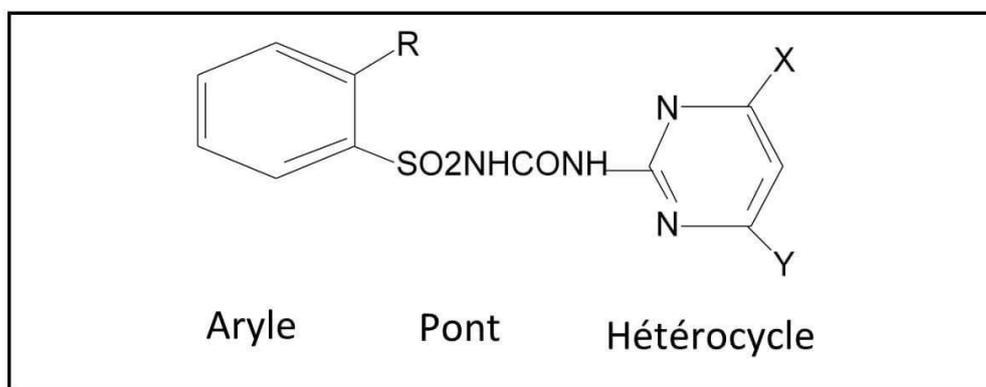


Figure 11. Structure générale des sulfonylurées (Beyer et *al.*, 1988).

4.2. Propriétés physico-chimiques des sulfonylurées

Les sulfonylurées sont des composés non volatils avec des pressions de vapeur inférieures à 10-10 mmHg. Ils ont tous un proton acide adjacent au groupement sulfonyle et se comportent ainsi comme des acides faibles avec des valeurs de pKa allant de 3 à 5 (Blair et Martin 1988).



Pour cette raison, leur solubilité dans l'eau à pH 7 est approximativement dix fois plus grande qu'à pH 5 (Beyer et *al.*, 1988).

4.3. Mode d'action

Selon Brown (1990) après absorption, l'herbicide migre dans les plantes sensibles, où il inhibe l'acétolactate synthétase (A.L.S), enzyme responsable de la biosynthèse d'acides aminés essentiels. L'A.L.S est présente uniquement chez les végétaux, ce qui explique, la forte Phytotoxicité du produit et sa faible toxicité pour le règne animal en général, et l'homme En particulier. L'inhibition de l'enzyme A.L.S. entraîne, très rapidement après application, un

blocage de la croissance des plantes sensibles et supprime donc toute compétition vis-à-vis de la culture. Des études ont montré que la transpiration et le métabolisme, chez les adventices, devenaient quasi nuls quelques heures après application de l'herbicide. On observe en effet, dans les jours qui suivent des symptômes de jaunissement (chlorose) ou de rougissement (anthocyanose) ; ces symptômes précèdent la disparition des adventices.

La sélectivité dans les cultures semble attribuable à un métabolisme différentiel entraînant une désactivation rapide chez les plantes tolérantes. Les temps de demi-vie sont de 1 à 5 heures chez les plantes qui tolèrent les sulfonilurées et de plus de 20 heures pour les mauvaises herbes vulnérables.

Les réactions de transformation qui expliquent la désactivation dans les plantes sont : l'hydroxylation aliphatique et arylique suivie de l'hydrolyse de la fonction sulfonilurée, la rupture de la liaison sulfonamide et la O-déméthylation.

*Matériel et
méthodes*

1. Présentation de la zone d'étude

1.1. Situation géographique

Tébessa (Fig. 12) est une wilaya des hautes plaines constantinoises. Elle se trouve au Nord-Est extrême de l'Algérie. Elle est limitée par la wilaya de Souk-Ahras au Nord, par la wilaya d'Oumel Bouaghi et Khenchela à l'Ouest, par la wilaya d'El Oued au Sud et par la Tunisie à l'Est, sur une distance de 300 km. La wilaya de Tébessa, qui couvre une superficie de 13788 km², est naturellement liée à l'immense région steppique du pays.

Tébessa est une wilaya de douze daïras (circonscriptions administratives), chacune avec plusieurs communes, pour un total de vingt-huit communes.

1.2. Sites d'échantillonnage :

1.2.1. Premier site

C'est un verger d'une maison située dans la cité EL BASSATINE (Fig. 12), dans la commune de Tébessa (35°24'36"N 8°08'03"E). Sa superficie est d'environ 40 m². Il contient un citronnier, deux vignes, deux poiriers et un néflier. Cette terre n'a été traitée avec aucun pesticide depuis plus de 30 ans.

1.2.2. Deuxième site

Une zone polluée de la commune de Tébessa (35°24'11"N 8°07'59"E) (Fig. 12), située entre la voie ferrée et une zone agricole, ce qui en fait un lieu propice aux vers d'*E. Fetida*.

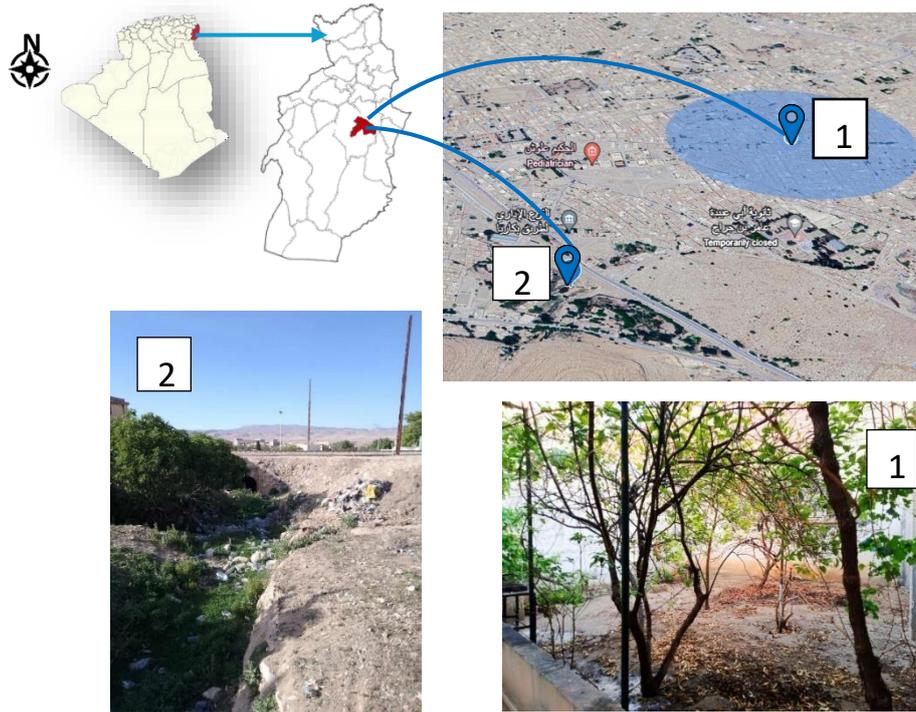


Figure 12. Localisation géographique de la région et des sites d'étude (photos personnelles, 2024).

2. Matériel biologique

2.1. *A.caliginosa*

La première espèce utilisée dans cette étude appartient à l'espèce dominante dans la région de Tébessa qui est *A.caliginosa* (Fig. 13). C'est un ver de terre qui fait partie des endogés (Savigny 1826). Ces vers sont prélevés d'un verger non pollué appartenant à une maison avec leur sol naturel où elles vivent, puis ils sont stockés dans des terrariums, au laboratoire, où ils sont nourris avec du terreau des arbres. Ils mesurent environ 15cm de long, environ 5mm de large et pèsent environ 1,84g.



Figure 13. *Aporrectodea caliginosa* (photo personnelle, 2024).

Selon le Muséum national d'Histoire naturelle de France (2006), l'espèce *A.caliginosa* est classée comme suit :

Règne : Animalia

Phylum : Annelida

Classe : Clitellata

Sous-Classe : Oligochaeta

Ordre : Crassiclitellata

Sous-Ordre : Lumbricina

Famille : Lumbricidae

Genre : Aporrectodea

Espèce : *Aporrectodea caliginosa* (Savigny, 1826).

2.2. *E.fetida*

E.fetida est une espèce de ver vivant à la surface de milieux riches en matières organiques. En milieu naturel, elle est corticole, et en milieu agricole ou dans le fumier, elle est épigée. Ce ver se caractérise par un tégument avec des bandes rouges foncées alternant avec des zones intersegmentaires jaunes moins pigmentées (Fig. 14). *E.fetida* mesure de 50 à 120 mm de long et de 3 à 5 mm de large, avec une masse adulte comprise entre 200 et 500 mg. Sa durée de vie est de 1 à 2 ans. Ce ver a un régime alimentaire détritivore, se nourrissant principalement de bouse de vache ou de crottin de cheval. Sa stratégie biodémographique est de type « r », caractérisée par une capacité de reproduction élevée, une croissance rapide qui compense sa faible longévité, une grande mobilité et une homochromie avec son environnement (Bouché, 1972).

Nous avons choisi l'*E.fetida* pour cette étude car elle est approuvée par l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) comme organisme modèle pour évaluer les polluants du sol (Khan et al., 2018).



Figure 14. *Eisenia fetida* (photo personnelle, 2024).

La position systématique d'*A.caliginosa* selon la dernière classification d'après la source d'inventaire national du patrimoine naturel de France (MNHN, 2006) est la suivante :

Règne : Animalia

Phylum : Annelida

Classe : Clitellata

Sous-Classe : Oligochaeta

Ordre : Crassicetillata

Sous-Ordre : Lumbricina

Suer-Famille : Lumbricoidae

Famille : Lumbricidae

Genre : Eisenia

Espèce : *Eisenia fetida*

3. Présentation de l'herbicide

L'herbicide Oscar (Fig. 15) contient la matière active Tribénuron-méthyle s'applique en post levée des céréales de printemps et d'hiver. Il est absorbé par les feuilles et les racines de mauvaises herbes en inhibant l'enzyme acétolactate synthétase conduisant à la synthèse des acides aminés ramifiés. Il est efficace sur de nombreuses dicotylédondr annuelles ou vivaces alchémille, anthémis, bleuet, céraiste, chardons, coquelicot, Crucifères, lamier, matricaires, Umbellifères, pensée sauvage, renouée des oiseaux, renouée liseron, rumex, stellaire et véronique de Perse.



Figure 15. Herbicide Oscar (photo personnelle, 2024).

4. Travaux du terrain

4.1. Prélèvement d'échantillons

Durant la saison d'activité des vers de terre en février et mars 2024, la collecte a été réalisée lors de plusieurs sorties, notamment pendant les jours pluvieux. Une méthode physique de Bouché (1972) a été employée pour extraire les vers de terre. Cette méthode consiste à :

- Désherber le sol.
- Remonter le sol, jusqu'à obtention d'une cavité d'une profondeur de 30 cm.
- Trier soigneusement le sol et collecter les vers de terre adultes qu'il contient.



Figure 16. Étapes de prélèvement des vers de terre sur le terrain (photos personnelles, 2024).

4.2. Matériel utilisé



Figure 17. Matériel utilisé sur le terrain (photo personnelle 2024) (1) une pioche, (2) une truelle, (3) un seau avec couvercle perforé (photos personnelles, 2024).

5. Travaux de laboratoire

5.1. Matériel utilisé

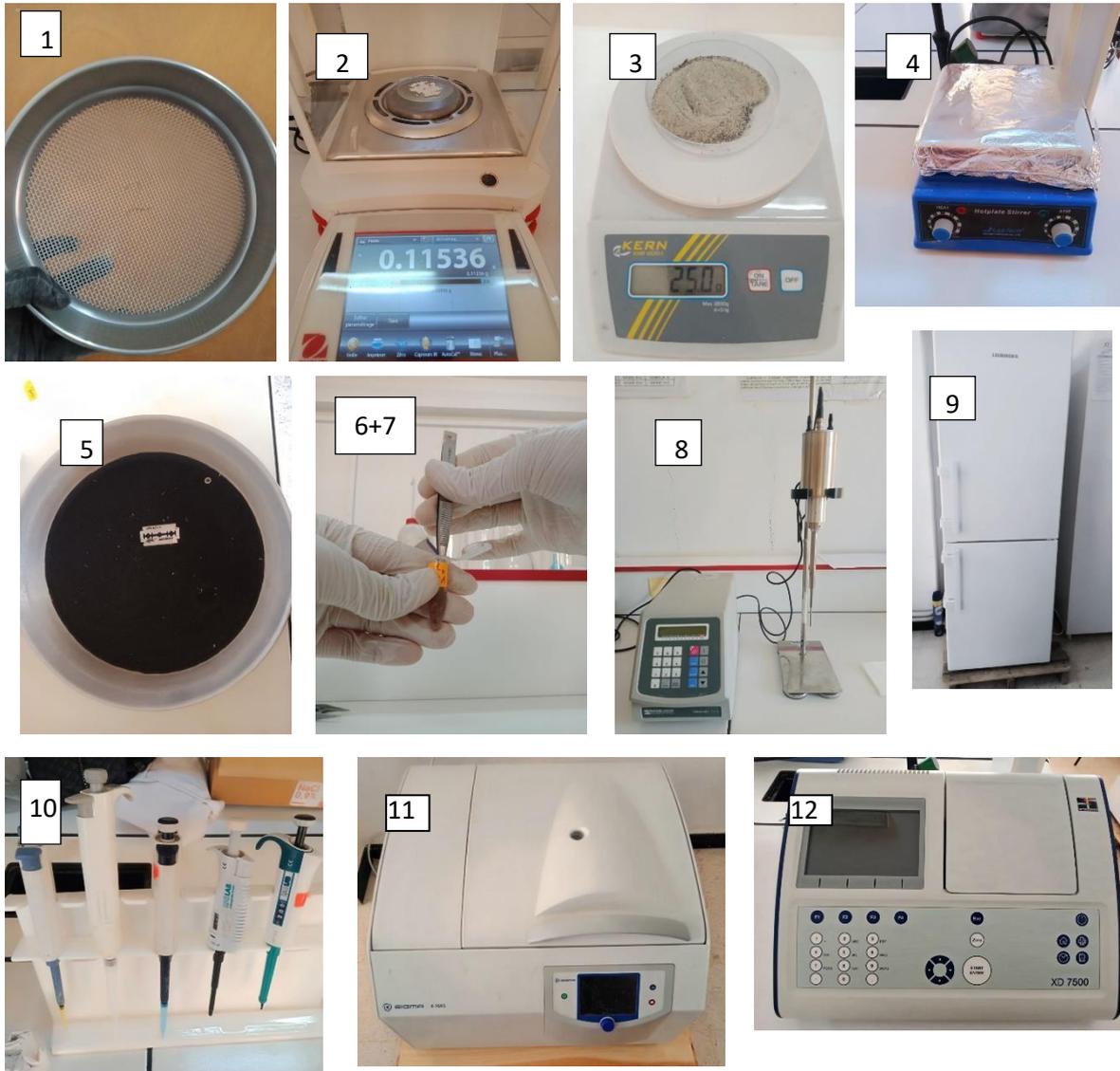


Figure 18. Matériel utilisé au laboratoire. (1) Tamis ; (2) Balance analytique ; (3) Balance électronique ; (4) agitateur ; (5) Planche de dissection ; (6) Micro-ciseaux ; (7) Tube Eppendorf ; (8) Processeur à ultrasons ; (9) Réfrigérateur ; (10) Micropipettes ; (11) centrifugeuse réfrigérée ; (12) Spectrophotomètre (photos personnelles, 2024).

5.2. Rinçage et tri des vers de terre

Récupérer les vers de terre et les déposer dans un récipient rempli d'eau afin de les rincer. Compter le nombre des vers adultes (ayant un clitellum ainsi que des tubercules pubères) présents.

5.3. Identification des vers de terre

Les adultes sont d'abord étudiés morphologiquement, à l'état vivant (avant conservation) en notant le poids, la longueur, le diamètre du corps (Fig. 19), la couleur du tégument, et le gradient de coloration (Baha, 2008).

Les vers de terre sont ensuite fixés dans de l'alcool à 70%, puis observés sous la loupe binoculaire en vue d'une identification basée sur des caractéristiques externes. La détermination des espèces s'est effectuée au laboratoire en se basant sur les clés de Sim et Gerard (1985) et Bouché (1972). Les principaux critères pris en considération sont :

- La répartition des soies
- Le type de prostomium
- La position des pores mâles
- Le nombre et la position des segments du clitellum
- Le nombre et la position des segments des tubercules pubères.

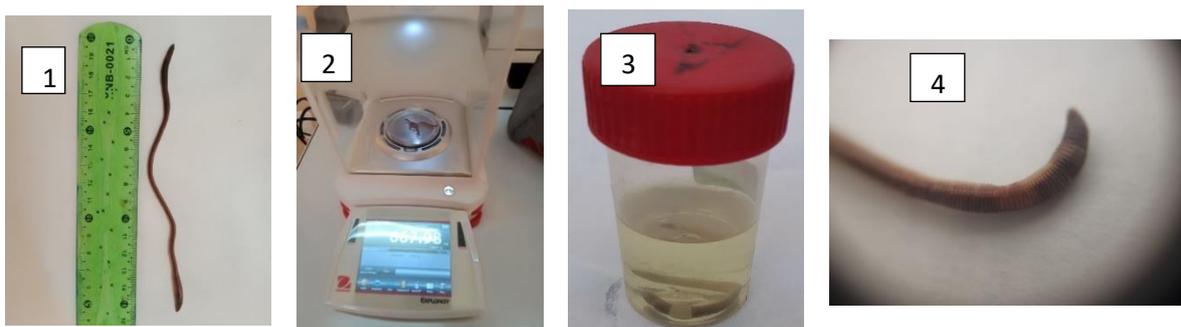


Figure 19. Étapes d'identification des vers de terre au niveau de laboratoire (1) Pris des mesures du ver de terre ; (2) Pris de poids du ver de terre (3) Conservation du ver de terre dans l'Alcool 70% ; (4) Observation du ver de terre sous la loupe binoculaire (photos personnelles, 2024).

5.4. Préparation du sol naturel

Le sol a été prélevé dans le verger en creusant la première couche à 10 cm de la surface. Ensuite, il a été séché à l'ombre, puis tamisé (Fig. 20).



Figure 20. Tamisassions du sol naturel (photo personnelle, 2024).

5.5. Préparation du sol artificiel

Le sol artificiel décrit par la Ligne directrice n° 207 de l'Organisation de Coopération Economique et de Développement (OCDE) (Tab 3 : et Fig. 21). Plusieurs espèces d'essai peuvent survivre, se développer et se reproduire dans ce sol (OCDE, 2010).

Tableau 3: Constituants du sol artificiel.

Composants	Proportion
Sable de quartz	70%
Argile	20%
Tourbe	10%
Carbonate de calcium	≤ 1 %



Figure 21. Constituants du sol artificiel : (1) sable (2) argile (3) tourbe (4) carbonate de calcium CaCO₃ (photos personnelles 2024).

5.6. Conditions expérimentales

Selon Heimbach (1984) l'élevage est réalisé un mois avant les expériences pour une meilleure adaptation dans les terrariums qui contiennent le sol de collecte. Tous les vers de terre ont préalablement été nettoyés avec de l'eau, séchés avec du papier absorbant. Ils ont ensuite été mis sur du papier filtre, dans des boîtes de Pétri pendant 24 heures. L'objectif est de vider leur estomac du sol ingéré. Les vers de terre utilisés dans cette étude étaient des adultes avec un clitellum bien développé. Chaque 2 jours on pèse les terrariums afin de remplacer l'humidité perdue en ajoutant de l'eau distillée.

Les conditions de l'expérimentation sont :

- ✓ Photopériode : 12h de lumière/ 12h d'obscurité.
- ✓ Température : 18°C.
- ✓ pH : ajusté à 6

- ✓ Capacité Maximale de rétention de l'eau (MHC):
 - Sol naturel : 60%
 - Sol artificiel : 65%
- ✓ Boites en plastique : de dimensions (16.5x10.5cm).

5.7. Traitement

Pour assurer un maximum d'exposition des organismes à l'herbicide, ce dernier a été incorporé au sol à deux concentrations : Recommended Agriculture Dose (RAD=6,25 mg/kg sol sec) et la concentration sub-létale 10 CL10-14jours = 96,12 mg/kg sol sec). Les boites témoins ne reçoivent que de l'eau distillée.

Les essais sont conduits avec 3 répétitions comportant chacune 3 individus.



Figure 22. Étapes du test : (1) Rinçage des vers (2) Séchage les vers (3) Incubation des vers sur papier filtre (4) pesage du sol (5) Dépôt de 3 vers dans chaque boîte (6) Pesage de la nourriture (7) Depot de la nourriture à la surface du sol (8) Fermeture des boites avec un couvercle aérée (photos personnelles, 2024).

5.8. Effet sur la croissance pondérale

Les vers ont été pesés au début du test, après 7 et 14 jours d'exposition.

On a utilisé la chaleur pour retirer les vers des boites, en les plaçant dans un bain-marie la température moyenne (Fig. 23).



Figure 23. Extraction des vers de terre dans un bain marie (photo personnelle, 2024).

5.9. Effet sur la reproduction

Les vers adultes sont retirés des terrariums après 14 jours. Ensuite, ces terrariums sont suivis pendant 20 jours supplémentaires. A la fin de la période de suivi, les cocons sont collectés et comptés (Garcia et *al.*, 2011).

5.10. Effet sur le comportement

5.10.1. Enfouissement, consommation de litière et production de turricules

Une autre fonction associée au comportement des vers de terre et qui fournit des mesures significatives en écotoxicologie, est liée à la consommation de litière (Pelosi et *al.*, 2014). Après l'incubation vers de terre dans des terrariums remplis de sol humide et contaminé par l'herbicide Oscar, le nombre de macropores, de turricules et la surface de litière sont vérifiés au cours de la période d'étude, en photographiant les surfaces des terrariums quotidiennement.

5.10.2. Test d'évitement

L'essai d'évitement (Fig. 24) a été établi dans des terrariums. Chaque terrarium a été divisé en deux sections égales à l'aide d'un séparateur vertical en plastique. Au total, chaque boîte reçoit 500 g de sol d'essai. La moitié de la boîte reçoit 250 g de sol témoin (section A) et l'autre moitié 250 g de sol contaminé (section B). Le sol de la section B est préparé selon la concentration choisie. Après avoir enlevé le séparateur, 6 vers de terre ont été placés dans la fente de séparation entre les deux sections.

Ensuite, la fente a été fermée en appuyant doucement sur le sol des deux bords de la fente. Pour empêcher les vers de s'échapper des terrariums, chaque boîte a été solidement fermée par un couvercle perforé pour assurer l'échange d'air. Les boîtes ont été conservées à une photopériode 12/12. Enfin d'essai (après 48h), le séparateur a été remis dans la fente entre les

deux sections, et le nombre de vers dans chaque section est compté. Les vers de terre qui ont été coupés en deux parties par la réinsertion du séparateur ont été comptés dans la section où leurs têtes sont dirigées (Loureiro et *al.*, 2005). Parmi les critères de validation de ce test figure

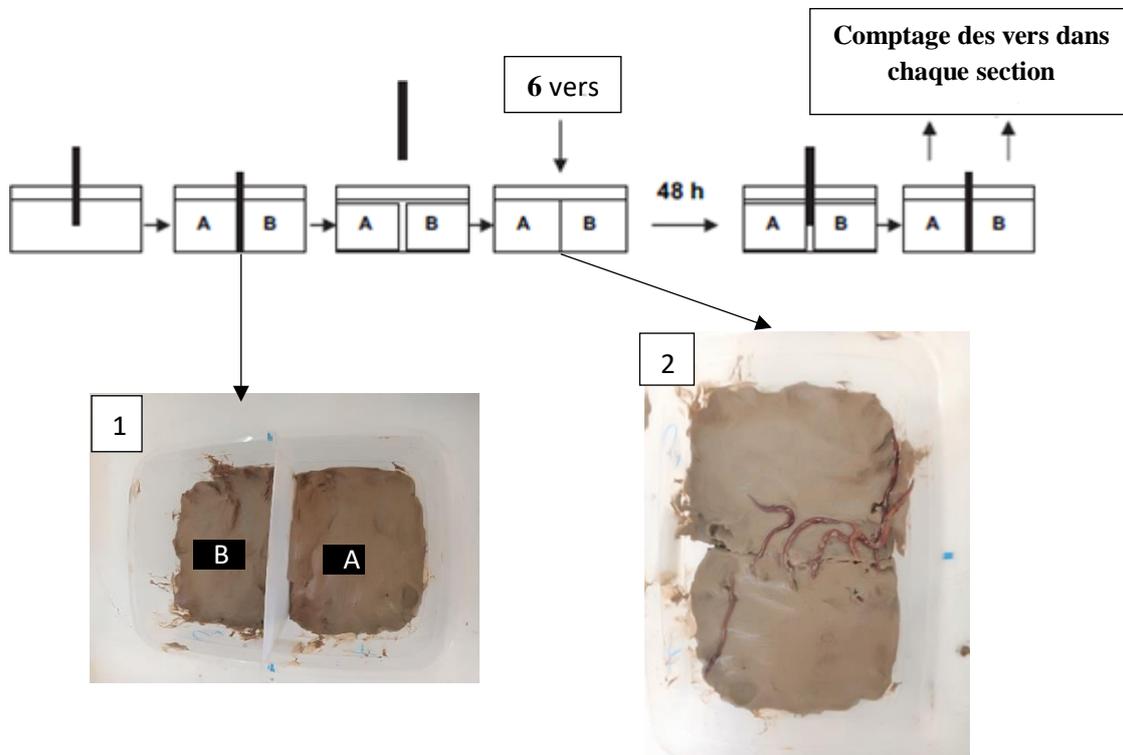


Figure 24. Test d'évitement des vers de terre (Loureiro et *al.*, 2005). 1 : (la boîte contenant le sol; (A): le sol témoin. (B) : le sol contaminé). 2 : (dépôt de 6 vers dans la boîte) (photo personnelle, 2024).

5.11. Dosage enzymatique

5.11.1. Dosage des Protéines totales

Le dosage des protéines (Fig. 24) a été effectué selon la méthode de Bradford (1976), qui consiste à additionner à une fraction aliquote de 100 μ l du surnageant avec le bleu brillant de coomassie (BBC) (G 250, Merck). La solution de BBC se prépare comme suit : dissoudre 100 mg de BBC dans 50 ml d'éthanol. Après une agitation de 2 heures, on ajoute 100 ml d'acide orthophosphorique et on complète à 1000 ml avec de l'eau distillée et d'albumine de sérum de bœuf (BSA, Sigma) comme standard. L'absorbance est lue au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 595 nm. La gamme d'étalonnage est réalisée à partir d'une solution d'albumine 1 mg/ml (Tab: 4).

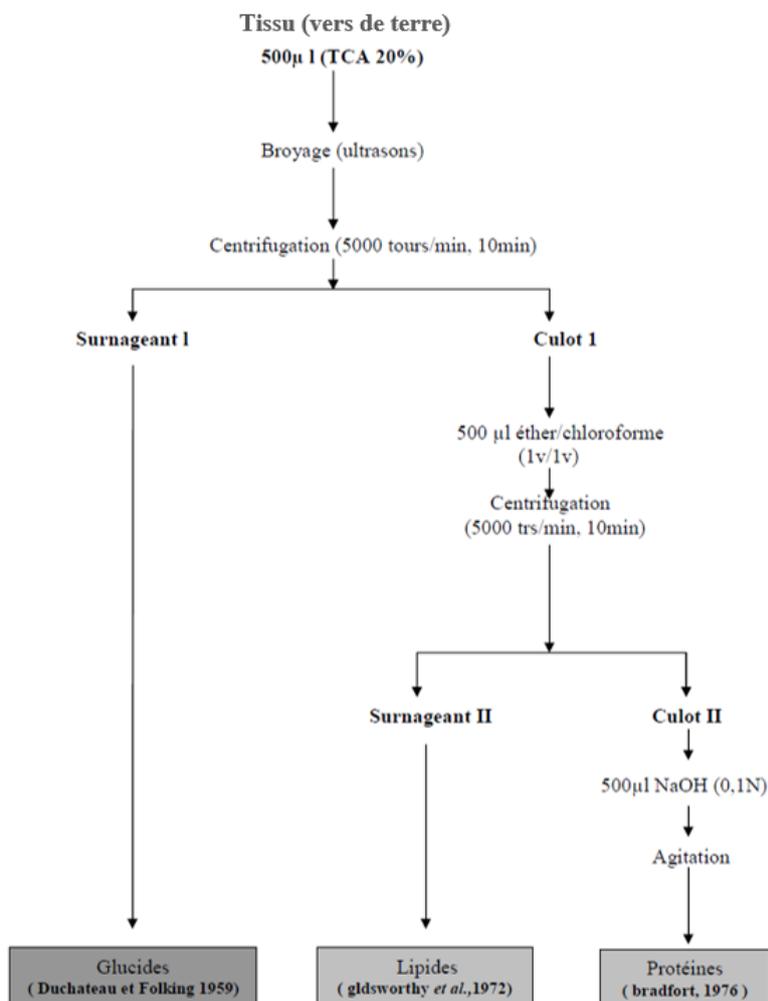


Figure 25. Dosage des protéines (Shibko, 1966).

Tableau 4: Dosage des protéines : réalisation de la gamme d'étalonnage.

Tubes	1	2	3	4	5	6
Quantité de BSA (µl)	0	20	40	60	80	100
Eau distillée (µl)	100	80	60	40	20	0
Réactif BBC (ml)	4	4	4	4	4	4
Quantité de BSA (µg)	0	20	40	60	80	100

5.11.2. Dosage de l'activité GST (glutathion S-transférase)

La mesure de l'activité glutathion S-transférase (GST) est déterminée selon la méthode de Habig et *al.* (1974). La lecture des absorbances est effectuée toutes les minutes pendant 5 minutes à une longueur d'onde de 340 nm dans un spectrophotomètre UV/visible contre un blanc contenant 0.2ml d'eau distillée à la place du surnageant.

L'activité est déterminée d'après la formule suivante :

$$X = \frac{\Delta Do/m}{9,6} \times \frac{Vt}{Vs} \text{ / mg de protéines}$$

X : micromole de substrat hydrolysé par minute et par mg de protéines ($\mu\text{M}/\text{mn}/\text{mg}$ de protéines).

ΔDo : pente de la droite de régression obtenue après hydrolyse du substrat en fonction du temps.

9,6 : coefficient d'extinction molaire du CDNB.

Vt : volume total dans la cuve : 1,4 ml [0,2 ml surnageant + 1,2 ml du mélange CDNB/GSH].

Vs : volume du surnageant dans la cuve : 0,2 ml.

mg de protéines : quantité de protéines exprimée en mg.

5.11.3. Dosage de l'activité de la (CAT) Catalase

L'activité de la catalase (CAT) est déterminée selon la méthode de Claiborne (1985). Elle est mesurée à 240 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV par la variation de la densité optique consécutive à la dismutation du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). Les segmentas de la partie clitéllienne des vers sont homogénéisés dans 1 ml de tampon phosphate (50 mM, pH 7). L'homogénat est centrifugé à 15000 tours pendant 10 mn et le surnageant récupéré servira comme source d'enzyme. Le dosage est réalisé selon le tableau suivant :

Tableau 5 : Dosage de la catalase

	Volume de surnageant (μl)	Volume du tampon phosphate (μl)	Solution H_2O_2 (μl)
Blanc	0	800	200
Echantillon	50	750	200

La lecture des absorbances est effectuée toutes les 5 secondes pendant 30 secondes à une longueur d'onde de 240 nm. L'activité spécifique est déterminée d'après la formule suivante :

$$\text{CAT } (\mu\text{M}/\text{min}/\text{mg de protéines}) = \frac{\Delta\text{DO}/\text{min}}{0,040} / \text{mg de protéines}$$

ΔDO : ΔDO /min (blanc) - ΔDO /mn (Echantillon)

0,040 : coefficient d'extinction molaire du peroxyde d'hydrogène

6. Analyse statistique des résultats

Dans notre étude, pour mieux visualiser les résultats obtenus, la représentation graphique choisie est celle des histogrammes. Les résultats obtenus ont fait l'objet d'une analyse statistique grâce au logiciel Minitab 21.4.2. Les données sont représentées par la moyenne plus ou moins l'écart-type ($m \pm s$). Une analyse de la variance à deux critères de classification (concentration, temps) a été effectuée en utilisant le test ANOVA. En cas de significativité de différence, le test de Tukey HSD est utilisé afin de déterminer les traitements différents. Le seuil de significativité est 0,05.

Résultats

1. Sol artificiel

1.1. Croissance pondérale

La figure (26) illustre comment le taux de croissance pondérale des vers de terre évolue au fil du temps, en présence de deux concentrations : concentration recommandée aux agriculteurs (C_1) et la concentration sub-létale 10 (C_2) de l'herbicide Oscar, chez les deux espèces (*A.caliginosa* et *E.fetida*) dans le sol artificiel.

On constate que le taux de croissance chez les vers *A.caliginosa* traités après 7 jours, augmente avec l'augmentation de la concentration. Cependant, la croissance tend à diminuer, après 14 jours, en prenant des valeurs négatives à la plus forte concentration. D'autre part, on observe une nette diminution du taux de croissance des vers traités avec les deux concentrations, après 14 jours d'exposition, par rapport à la croissance observés après 7 jours. Chez l'espèce *E.fetida* on remarque qu'il existe un écart évident du taux de croissance des séries traitées et témoins après 7 jours. Contrairement aux vers exposés à la plus faible concentration, les séries traitées à la concentration la plus élevée manifestent des valeurs négatives. Après 14 jours, le taux de croissance des vers exposés à C_1 est proche de celui du témoin. En revanche, les vers traités avec la concentration la plus élevée présentent des taux de croissance négatifs.

On remarque que le taux de croissance des vers témoins après 14 jours a légèrement diminué par rapport à leur taux de croissance après 7 jours, et le taux de croissance des vers traités avec la plus faible concentration a clairement diminué, alors que le taux de croissance des vers exposés à la plus forte concentration reste inchangé.

En comparant les taux de croissance pondérale des deux espèces, on note qu'après 7 jours d'exposition, le taux de croissance des vers témoins est comparable chez les deux espèces. Le taux de croissance des vers d'*E.fetida* traités avec la plus faible concentration dépasse celui d'*A.caliginosa*. Tandis que le taux de croissance des vers d'*A.caliginosa* exposés à la plus forte concentration est très élevé contrairement à celui d'*E.fetida* qui prend des valeurs négatives. Après 14 jours, un effet inhibiteur de la concentration C_2 est observé chez les deux espèces où le taux de croissance prend des valeurs négatives. Cet effet est plus accentué chez l'espèce *E.fetida*.

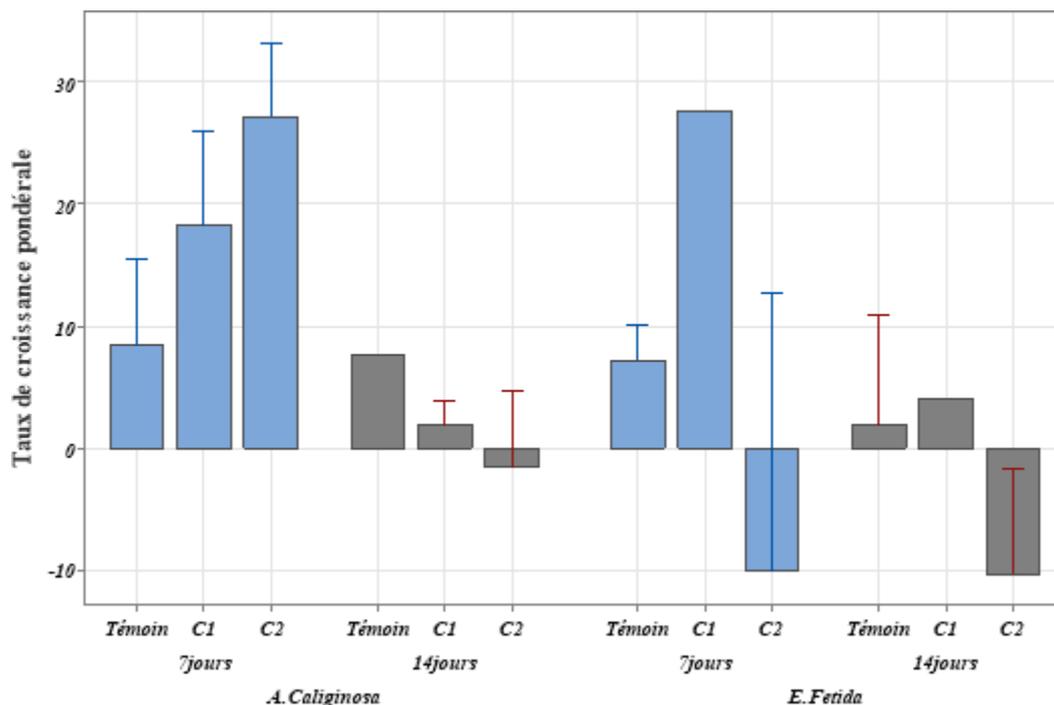


Figure 26. Variation du taux de croissance pondérale des vers de terre (*A.caliginosa* et *E.fetida*) dans le sol artificiel après 7 et 14 jours d'exposition à deux concentrations de l'herbicide Oscar ($m \pm s$, $n = 3$; 3 vers par réplication).

1.2. Reproduction

La figure (27) met en évidence le nombre de cocons pondus dans le sol artificiel par les vers des deux espèces pendant la période expérimentale. On remarque que chez l'*A.caliginosa* le nombre de cocons des vers exposés à la plus forte concentration est le même que celui des vers témoin. Tandis que le nombre de cocons des vers traités avec la plus faible concentration est réduit.

Chez l'*E.fetida*, on observe que le nombre de cocons des séries traitées diminue avec l'augmentation de la concentration.

Après avoir comparé le nombre de cocons des deux espèces, on constate que le nombre de cocons pondus par *E.fetida* est supérieur à celui d'*A.caliginosa*.

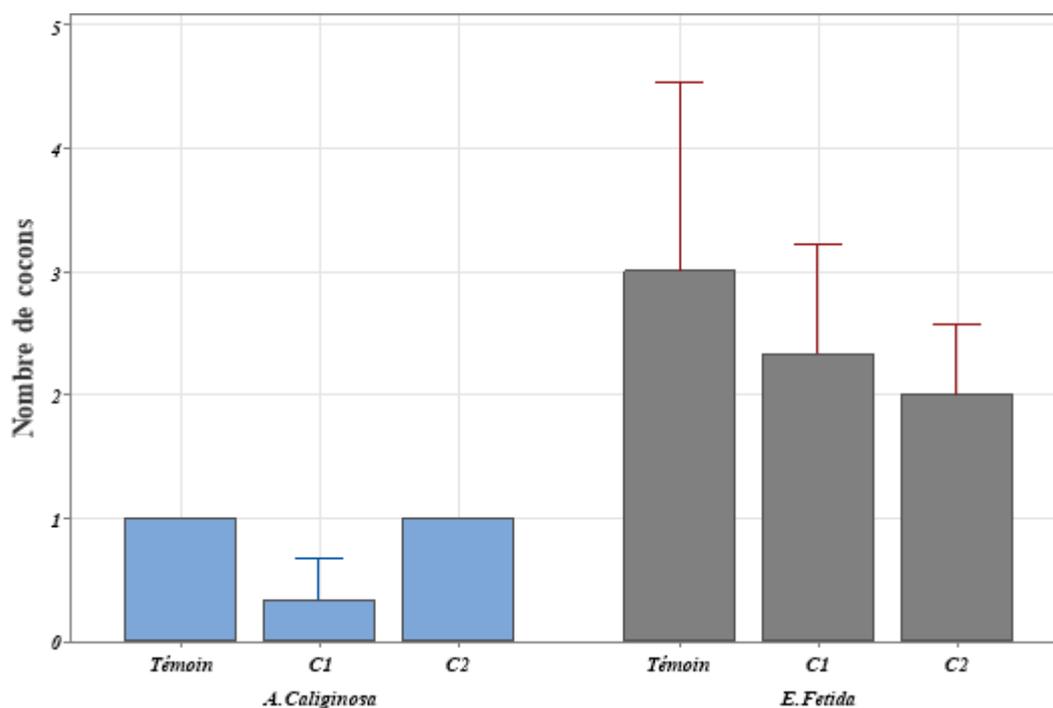


Figure 27. Effet de l'herbicide Oscar sur le nombre de cocons produit par les deux espèces de vers *A.caliginosa* et *E.fetida* (m±s, n= 3 ; 3 vers par réplication).

1.3. Comportement

1.3.1. Test d'évitement

La figure (28) représente les taux de migration des vers entre le sol artificiel traité et le sol témoin. On note que chez *E.fetida*, le taux de migration vers les deux côtés est égal dans les boîtes contenant du sol témoin. Cependant, les vers présentent un taux de migration élevé vers le sol traité par les deux concentrations.

Chez l'*A.caliginosa*, les vers ne présentent pas de préférences de migration dans les boîtes témoin ainsi que les boîtes traitées à C₂. Par contre, dans les boîtes contenant du sol traité avec la concentration la plus faible, le taux de migration est plus élevé vers le sol témoin.

En comparant le taux de migration des deux espèces, on constate que le taux de migration des vers d'*E.fetida* dans les boîtes traitées est plus élevé vers le sol traité, contrairement aux vers d'*A.caliginosa*.

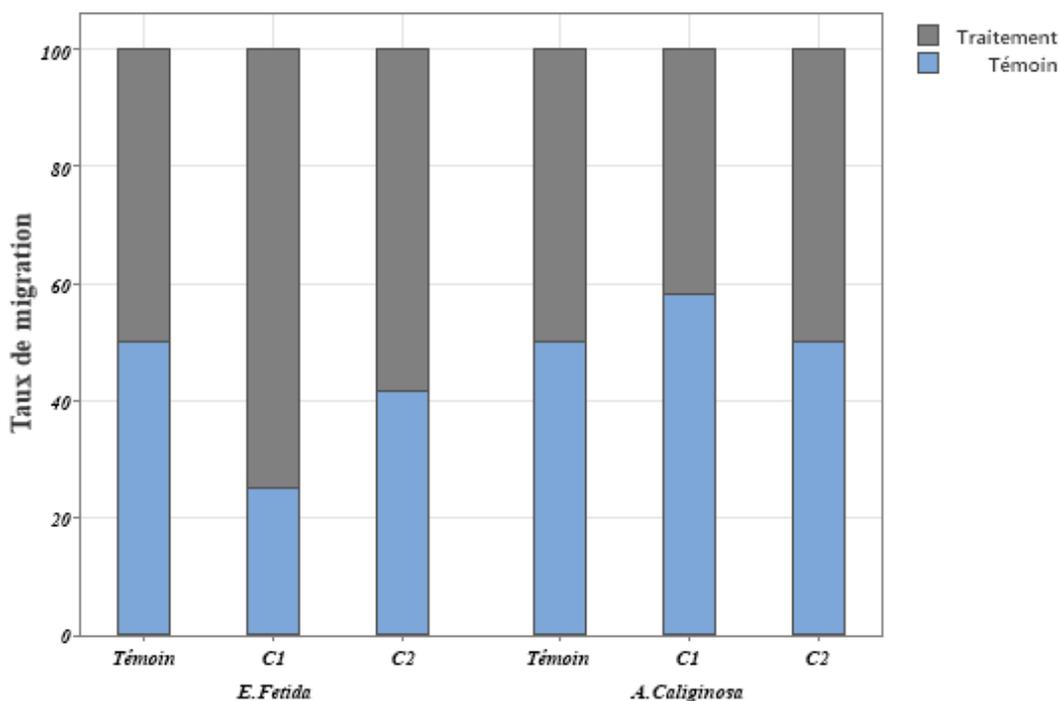


Figure 28. Taux de migration des vers de terre (*E.fetida* et *A.caliginosa*) dans le sol artificiel témoin et contaminé par deux concentrations croissantes de l’herbicide Oscar (n= 2 ; 6 vers par réplication).

1.3.2. Enfouissement, consommation de litière et production de turricules

a) *A. caliginosa*

L’effet de l’herbicide Oscar appliqué dans le sol artificiel aux concentrations RAD et CL10 sur le comportement des vers *A.caliginosa* au cours de la période d’étude, est reporté dans la figure (29). On remarque une augmentation du nombre de macropores et de turricules produits au fil du temps. Toutefois, ces niveaux baissent à mesure que la concentration augmente. Similairement, le niveau de nutriments consommé par les vers témoins est plus élevé que les vers traités. D’autre part, la quantité de turricules produits par les vers est réduit avec l’augmentation de la concentration.

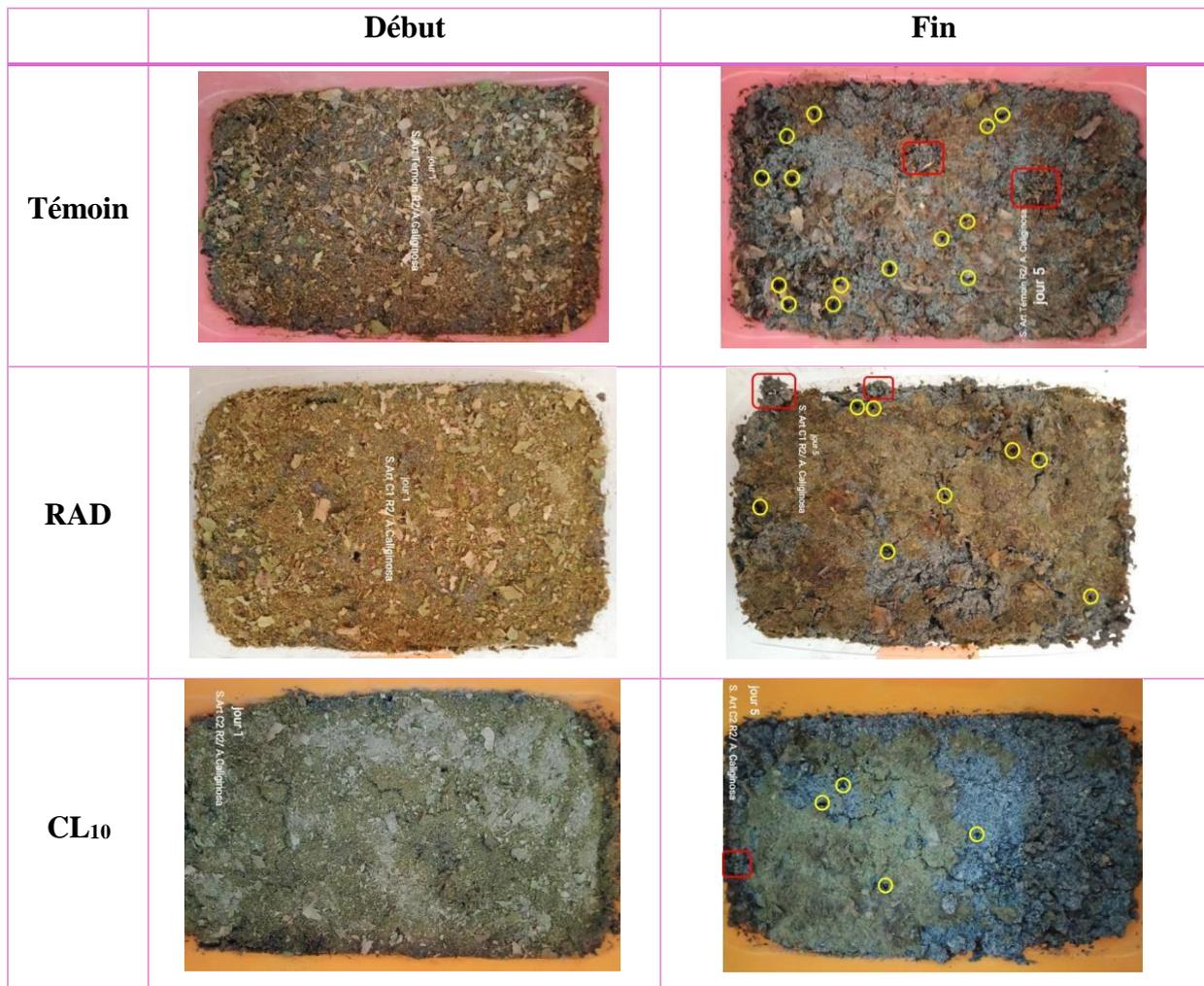


Figure 29. Effet de l'herbicide Oscar appliqué dans le sol artificiel aux concentrations RAD et CL10 sur le comportement : Activité d'enfouissement (cercles jaunes), production de turricules (encadré rouge) et quantité de nutriments consommée des vers *A. caliginosa* au cours de la période d'étude (n=3 ; 3 vers par réplication).

b) *E. fetida*

La figure (30) montre l'effet de l'herbicide Oscar appliqué dans le sol artificiel aux concentrations RAD et CL10 sur le comportement des vers *E. fetida* au cours de la période d'étude. Il est observé que le nombre de pores augmente au fil du temps. Cependant, cette activité diminue avec l'augmentation de la concentration. De la même façon, la quantité de nutriments consommée par les vers traités réduite par rapport aux séries témoins. D'autre part, on constate la présence de turricules dans les boîtes traitées par les deux concentrations.

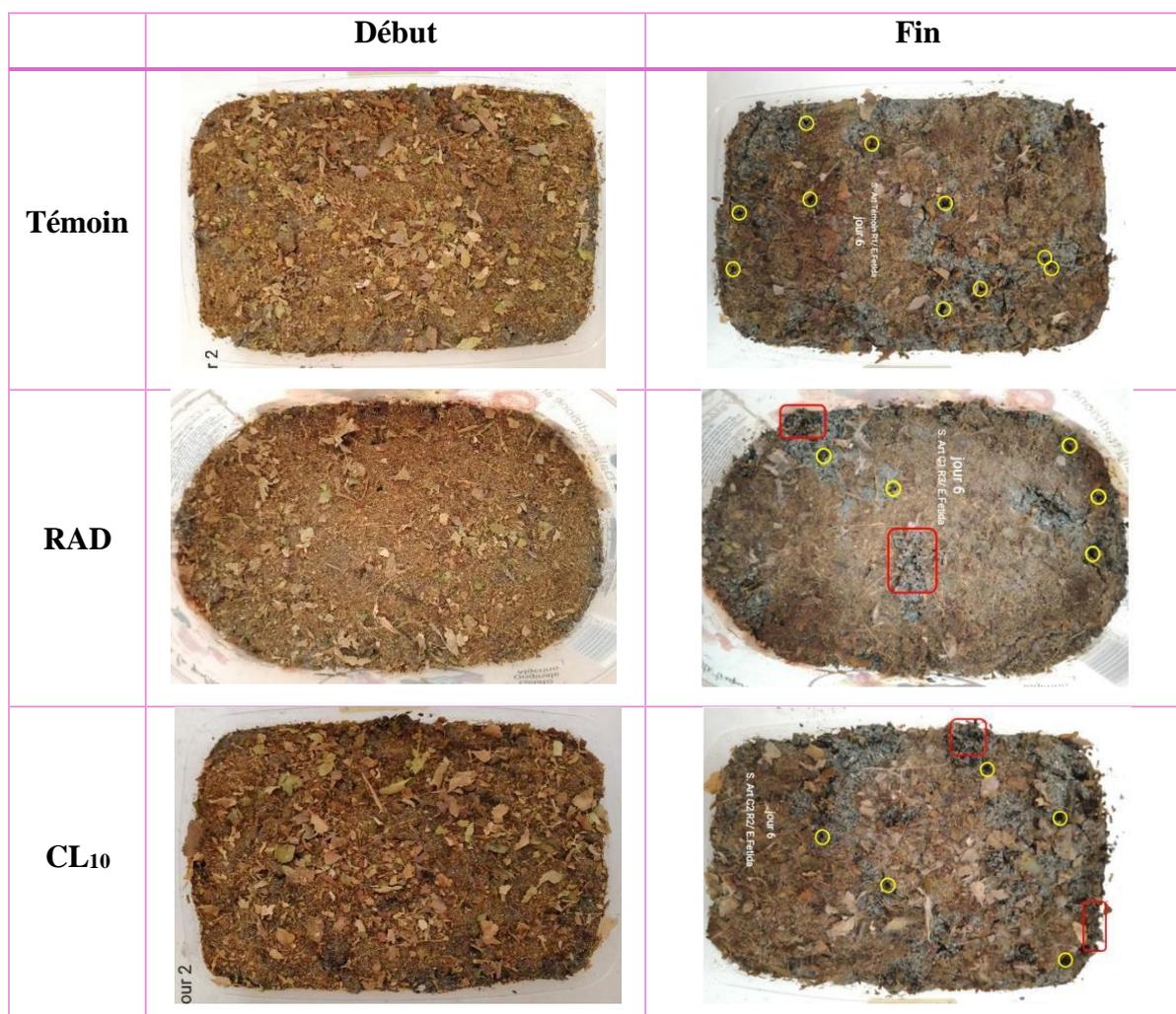


Figure 30. Effet de l'herbicide Oscar appliqué dans le sol artificiel aux concentrations RAD et CL10 sur le comportement : Activité d'enfouissement (cercles jaunes), production de turricules (encadré rouge) et quantité de nutriments consommée des vers *E. fetida* au cours de la période d'étude (n=3 ; 3 vers par réplication).

1.4. Dosage des biomarqueurs

Gamme d'étalonnage

La quantification des protéines a été réalisée en utilisant une courbe d'étalonnage qui représente l'absorbance en fonction de la quantité d'albumine standard. On a calculé la droite de régression de la manière suivante : $Y = ax + b$ avec R^2 comme coefficient de détermination.

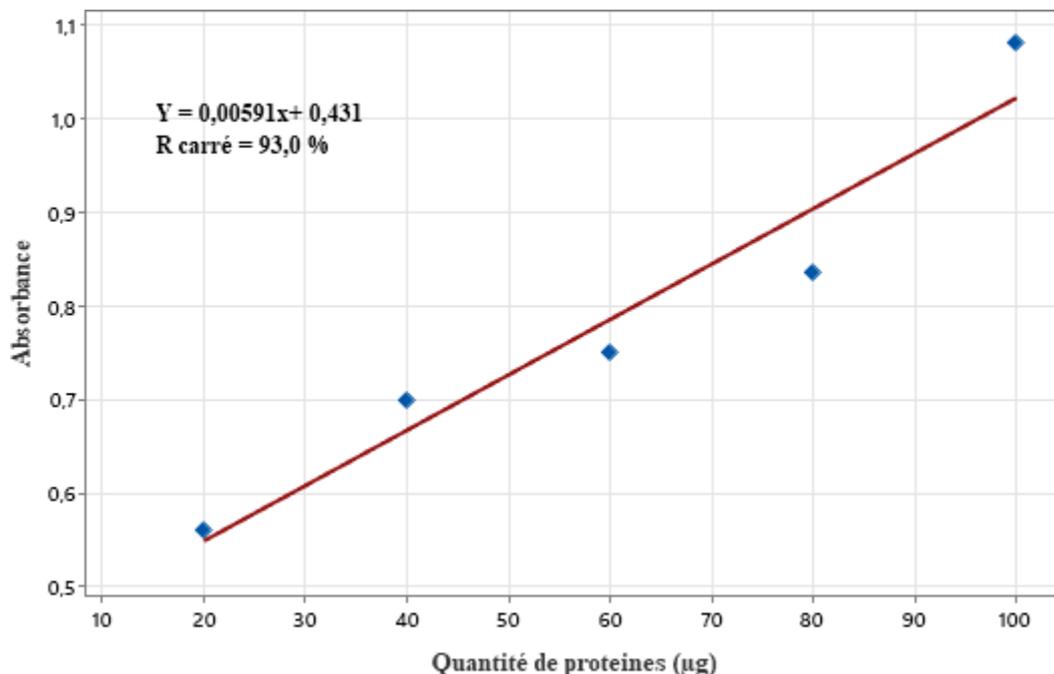


Figure 31. Droite de régression exprimant l'absorbance en fonction de la quantité d'albumine (µg) (R^2 : coefficient de détermination).

1.4.1. Quantité de protéines

La figure (32) montre les effets des deux concentrations utilisées de l'herbicide Oscar après 7 et 14 jours d'exposition dans le sol artificiel, sur le taux des protéines totales dans les segments postérieurs des deux espèces de vers de terre. On remarque que chez l'*A. caliginosa* les séries traitées présentent une baisse de la quantité totale de protéines après 7 jours statistiquement non significative ($p = 0.311$) par rapport au témoin. Contrairement à séries exposées au RAD pendant 14 jours, la quantité de protéines chez les vers traités avec la concentration sub-létale Cl_{10} a légèrement augmenté par rapport à celle des vers témoins.

Après 14 jours d'exposition, la quantité de protéines augmente significativement ($p=0.000$) par rapport à celle mesurée après 7 jours.

Chez l'*E.fetida*, on constate une augmentation non significative ($p = 0,611$) de la quantité totale de protéines chez les séries traitées aux deux concentrations après 7 jours. Après 14 jours et contrairement aux vers traités à CL10, les séries exposées au RAD manifestent une réduction non significative ($p=0.594$) de la quantité de protéines. La quantité totale de protéines de tous les vers après 14 jours du traitement est supérieure de manière significative ($p = 0.002$) par rapport à celle mesurée après 7 jours.

Après 7 jours, on constate que la quantité de protéines est proche pour les deux espèces, avec une légère augmentation chez les vers témoins d'*A.caliginosa*. Toutefois, après 14 jours, les niveaux de protéines chez les vers d'*E.fetida* sont plus faibles que ceux d'*A.caliginosa*, en particulier chez les vers traités avec la plus faible concentration.

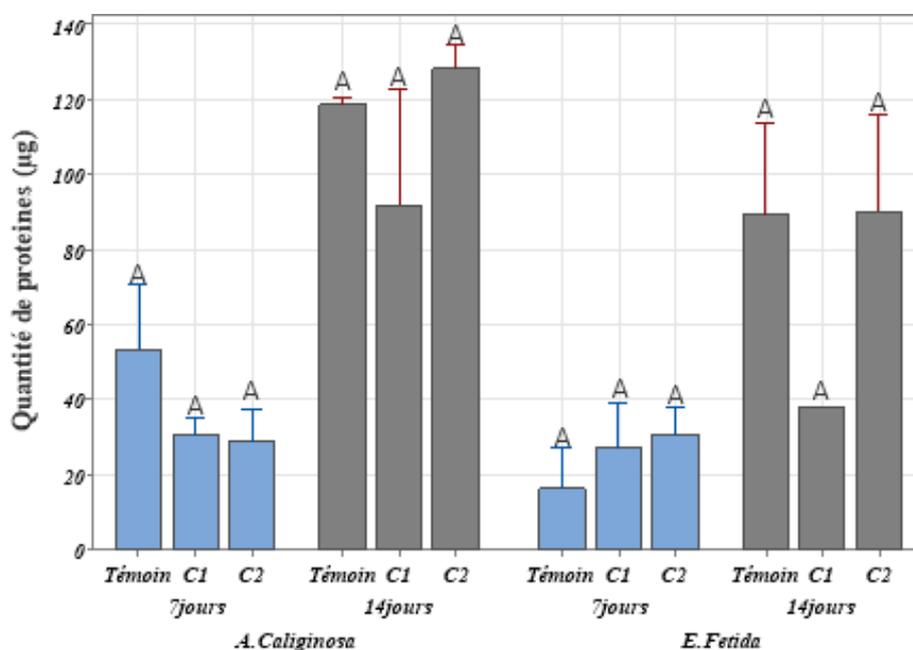


Figure 32. Effet des concentrations RAD et CL₁₀ de l'herbicide Oscar, appliqué dans le sol artificiel, sur la quantité de protéines totales après 7 et 14 jours d'exposition chez les deux espèces de vers *A.caliginosa* et *E.fetida* dans le sol artificiel ($m \pm s$, $n=3$; 3 vers par réplication) (Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (test de Tukey HSD)).

1.4.2. L'activité enzymatique de la Glutathion-S-transferase

La figure (33) met en évidence l'effet d'Oscar sur l'activité de GST au niveau de la partie antérieure des deux espèces, après 7 et 14 jours de traitement dans le sol artificiel. Après 7 jours, on observe une augmentation significative ($p=0.001$) de l'activité de la GST chez les séries traitées d'*A.caliginosa* par rapport au témoin. Toutefois, on note une diminution non significative ($p = 0.408$) du niveau de l'activité de la GST de tous les vers après 14 jours. Ainsi,

le niveau de l'activité de GST des vers diminue après 14 jours par rapport à celui mesuré après seulement 7 jours.

Contrairement aux séries d'*E.fetida* traitées avec la concentration sub-létale, dont l'activité de la GST après 7 jours augmente par rapport à celui des vers témoins, les séries exposées au RAD connaissent une diminution statistiquement non significative ($p = 0.434$) par rapport au témoin. À la différence des séries traitées avec la deuxième concentration, dont le niveau d'activité de la GST après 14 jours est similaire à celui des vers témoins, les séries exposées à la première concentration présentent une légère augmentation statistiquement non significative ($p = 0.140$). Après 14 jours, l'activité de la GST de tous les vers diminue par rapport à celle observée après seulement 7 jours.

Après comparaison de l'activité de la GST entre les deux espèces, on constate qu'elle est inférieure chez tous les vers d'*A.caliginosa* par rapport à celle d'*E.fetida*.

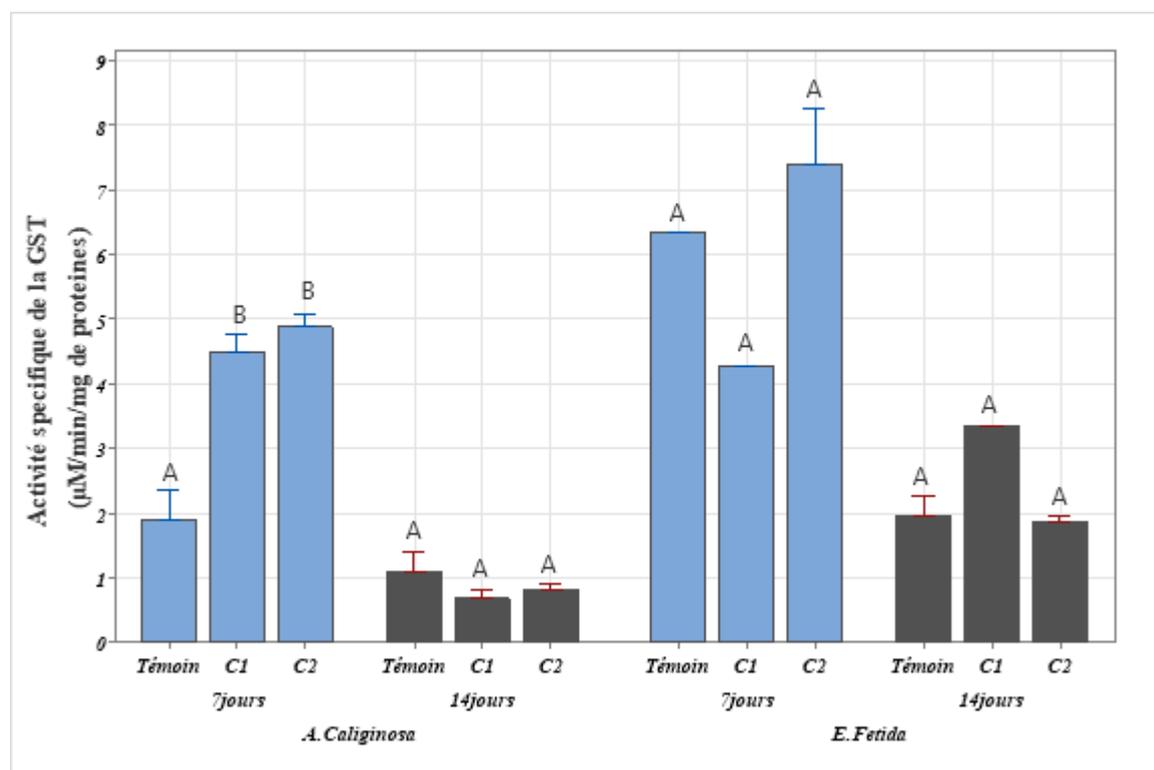


Figure 33. Effet de concentrations croissantes de l'herbicide Oscar, appliqué dans le sol artificiel, sur l'activité spécifique de la GST chez deux espèces de vers de terre après 7 et 14 jours d'exposition ($m \pm s$, $n = 3$; 3 vers par réplication) (Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (test de Tukey HSD)).

1.4.3. L'activité enzymatique de la Catalase

La figure (34) illustre l'impact de l'herbicide Oscar sur l'activité de la catalase dans la partie clitellienne des deux espèces, après une période de traitement de 7 et 14 jours dans le sol artificiel.

Chez l'espèce *A.caliginosa*, on remarque une augmentation significative ($p = 0.015$) de l'activité de la catalase des séries traitées après 7 jours. Contrairement aux vers traités avec la plus forte concentration, dont l'activité après 14 jours augmente significativement par rapport à celui des vers témoins, les séries exposées à la plus faible concentration connaissent une diminution significative ($p=0.041$). L'activité mesurée après 14 jours chez les vers témoins et ceux traités avec la concentration sub-létale augmente plus que celle mesurée après 7 jours.

Concernant l'activité de la catalase après 7 jours chez les vers *E.fetida*, elle manifeste une augmentation non significative ($p = 0.073$) chez les séries traitées par rapport aux vers témoins. De même après 14 jours ($p = 0.198$). Ainsi, on observe que l'activité mesurée après 7 jours chez tous les vers a diminué par rapport à celle mesurée après 14 jours.

En comparant l'activité de la catalase entre les deux espèces, on constate qu'elle est supérieure chez tous l'espèce *A.caliginosa* par rapport à celle de *E.fetida*.

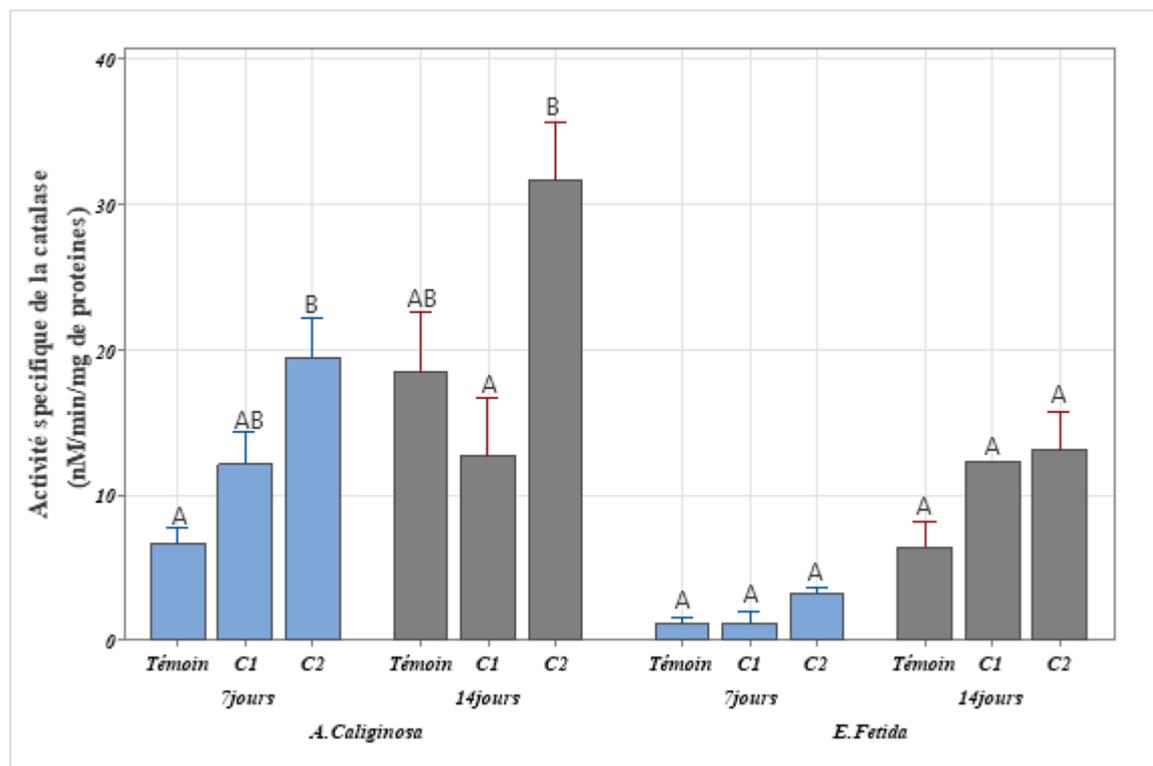


Figure 34. Effet de concentrations croissantes de l'herbicide Oscar, appliqué dans le sol artificiel, sur l'activité spécifique de la catalase chez deux espèces de vers de terre après 7 et 14 jours d'exposition ($m \pm s$, $n = 3$; 3 vers par réplication) (Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (test de Tukey HSD)).

2. Sol naturel

2.1. Croissance pondérale

La figure (35) met en évidence l'évolution du taux de croissance des vers de terre en fonction du temps, en présence de deux concentrations croissantes de l'herbicide Oscar, chez les deux espèces dans le sol naturel. On observe une diminution du taux de croissance pondérale chez les vers *A. caliginosa* traités après 7 jours, lorsque la concentration augmente. Toutefois, la croissance a tendance à diminuer après 14 jours, avec des valeurs négatives chez les séries traitées. Par ailleurs, le taux de croissance des vers traités avec les deux concentrations est nettement baissé après 14 jours d'exposition par rapport à leur taux de croissance après 7 jours.

Le taux de croissance, après 7 jours, des vers *E. fetida* traités avec la concentration sub-létale est comparable à celui des vers témoins, alors qu'il est diminué dans les séries exposées au RAD. Mais après 14 jours, le taux de croissance tend à baisser, avec des valeurs négatives à la concentration la plus élevée. On note qu'après 14 jours le taux de croissance des vers témoins et de ceux traités avec la première concentration est comparable aux taux mesurés

après 7 jours. Cependant, les séries exposées à la deuxième concentration diminuent jusqu'à une valeur négative.

En comparant le taux de croissance entre les deux espèces après 7 jours, on constate que chez les vers témoins d'*E.fetida* et ceux traités avec la concentration la plus faible, le taux de croissance est diminué par rapport aux vers *A.caliginosa*, tandis que le taux de croissance des vers exposés à la concentration la plus élevée est légèrement augmenté. Après 14 jours, le taux de croissance des vers *E.fetida* traités avec la concentration sub-létale a diminué à des valeurs négatives, comparé à celui des vers *A.caliginosa*. Alors que les autres taux de croissance sont comparables.

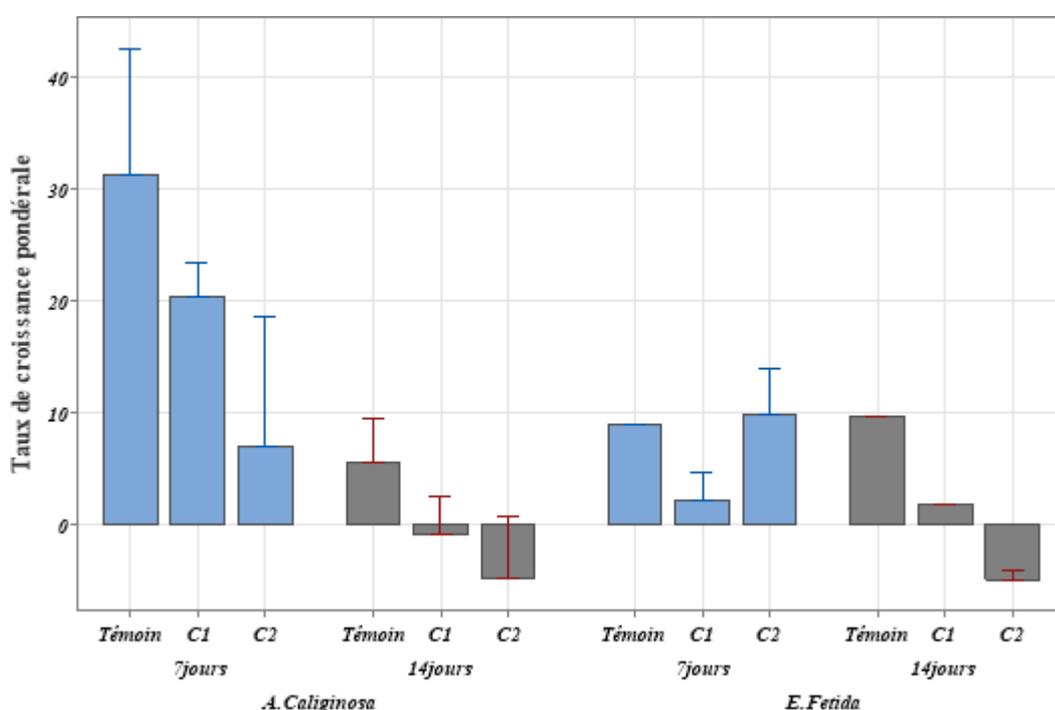


Figure 35. Variation du taux de croissance pondérale des vers de terre (*A.caliginosa* et *E.fetida*) dans le sol naturel après 7 et 14 jours d'exposition à deux concentrations de l'herbicide Oscar ($m \pm s$, $n = 3 ; 3$ vers par réplication).

2.2. Reproduction

La figure (36) représente le nombre de cocons pondus dans le sol naturel par les vers des deux espèces pendant la période expérimentale. On remarque que les vers *A.caliginosa* témoins et ceux et ceux traités avec RAD n'ont pas pondu, contrairement aux vers traités avec la concentration sub-létale. Chez les vers *E.fetida* le nombre de cocons des séries traitées avec la

première concentration est comparable à celui des vers témoins. En revanche, le nombre de cocons des vers exposés à la deuxième concentration est plus élevé.

Le nombre total de cocons des vers *E.fetida* est supérieure à celui des vers *A.caliginosa*.

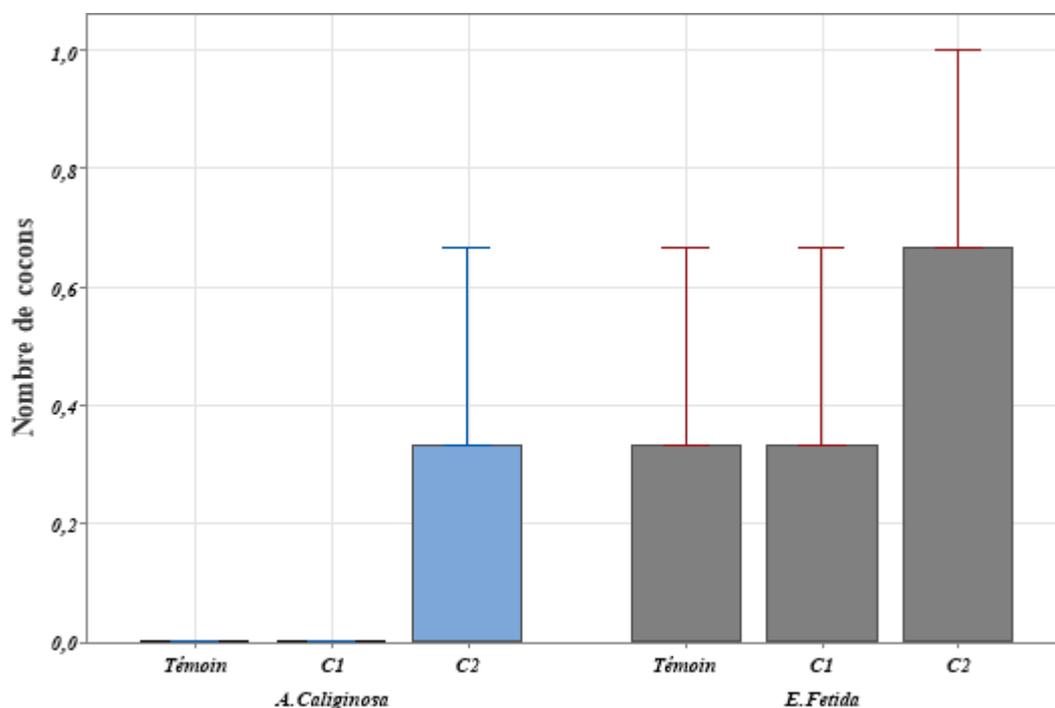


Figure 36. Effet de l'herbicide Oscar appliqué dans le sol naturel sur le nombre de cocons produit par les deux espèces de vers *A.caliginosa* et *E.fetida* ($m \pm s$, $n = 3$; 3 vers par réplication).

2.3. Comportement

2.3.1. Test d'évitement

La figure (37) montre les taux de migration des vers entre le sol naturel traité et le sol témoin. On constate que le taux de migration des vers *E.fetida* dans les boîtes témoins et celles contenant du sol traité avec la concentration sub-létale est plus élevé vers le côté traité, contrairement aux vers dans les boîtes contenant du sol traité avec RAD dont le taux de migration est légèrement augmenté dans le côté non traité.

Quant aux vers *A.caliginosa*, le taux de migration vers le sol témoin est plus élevé, et ce taux augmente davantage pour les vers des boîtes contenant du sol traité avec la première concentration pour ceux traités avec la deuxième.

En comparant le taux de migration des deux espèces, on observe que les vers d'*E.fetida* migrent plus vers le côté traité, alors que les vers d'*A.caliginosa* migrent plus vers le sol non traité.

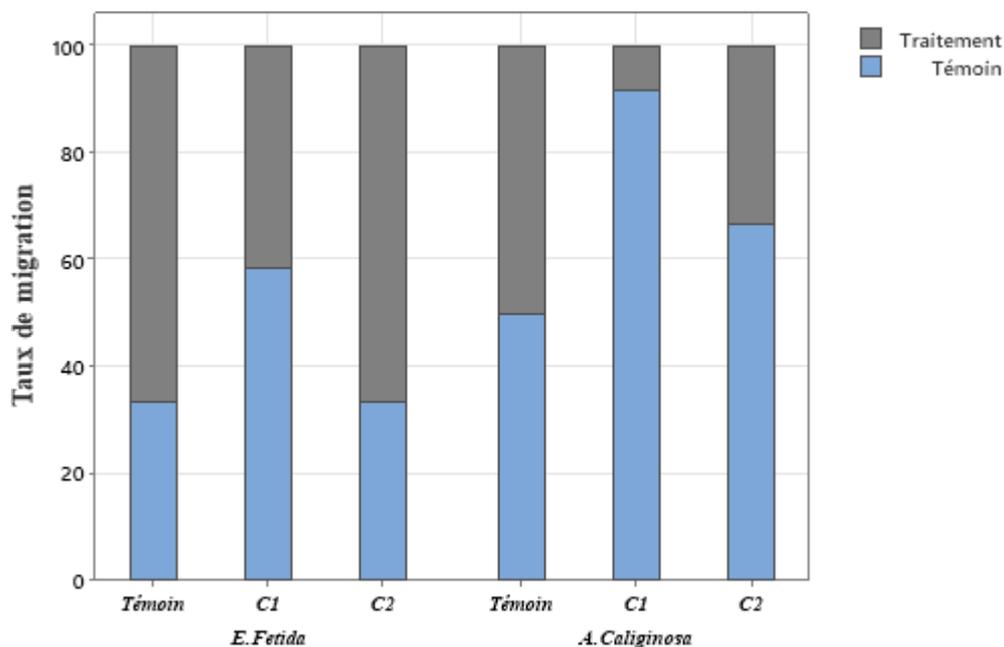


Figure 37. Taux de migration des vers de terre (*E.fetida* et *A.caliginosa*) dans le sol naturel témoin et contaminé par deux concentrations croissantes de l’herbicide Oscar (n= 2 ; 6 vers par réplication).

2.3.2. Enfouissement, consommation de litière et production de turricules

La création de pores est une conséquence évidente de l’activité des vers de terre dans le sol, ce qui influence les propriétés de transfert du sol. Le dépistage est donc une mesure intéressante pour les essais écotoxicologiques. Une autre fonction associée au comportement des vers de terre et qui fournit des mesures significatives en écotoxicologie, est liée à la consommation de litière (Pelosi et *al.*, 2014). D’autre part, les vers de terre se nourrissent et creusent dans le sol en ingérant les particules de sol. Après transfert intestinale, le sol est éjecté sous forme de turricules, qui jouent un rôle écologique important dans le sol (Lee and Foster 1991). A cause de sa simplicité, la production de turricules peut être utilisée comme un test d’étude de l’activité des vers (Capowiez et *al.* 2010).

a) *A. caliginosa*

La figure (38) illustre l’effet de l’herbicide Oscar appliqué dans le sol naturel aux concentrations RAD et CL10 sur le comportement (activité d’enfouissement, quantité de nutriments consommée et production de turricules) des vers *A.caliginosa* au cours de la période d’étude. On observe que le nombre de pores créés et la quantité de turricules produits chez tous les vers augmentent avec le temps. Cependant, ces valeurs diminuent avec l’augmentation de

la concentration. De plus, la quantité de nutriments consommée par les vers témoins est plus élevée par rapport aux vers traités. D'autre part, on constate l'absence de turricules chez les séries traitées aux plus forte concentration.

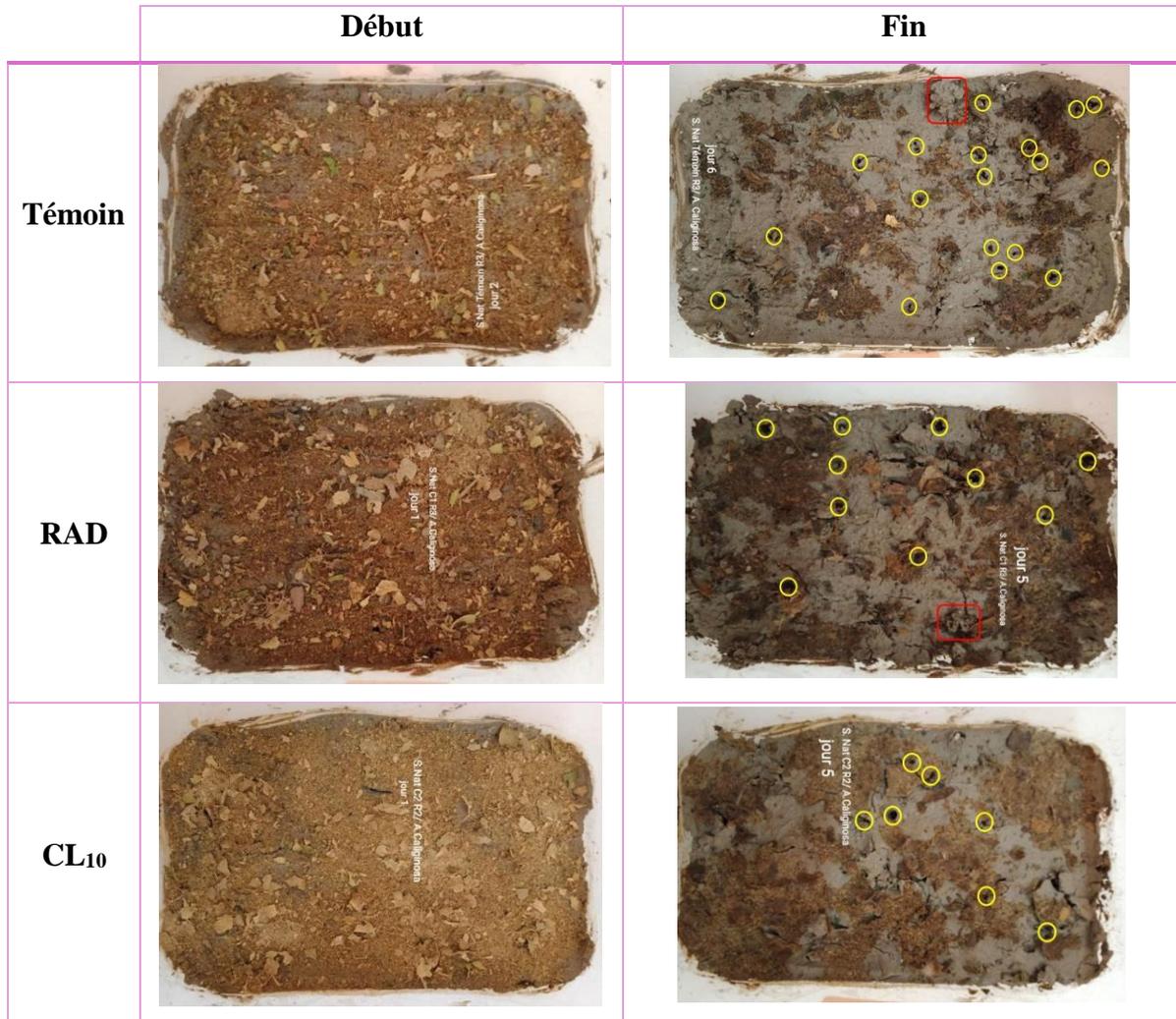


Figure 38. Effet de l'herbicide Oscar appliqué dans le sol naturel aux concentrations RAD et CL10 sur le comportement : Activité d'enfouissement (cercles jaunes), production de turricules (encadré rouge) et quantité de nutriments consommée des vers *A. caliginosa* au cours de la période d'étude (n=3 ; 3 vers par réplication).

b) *E. fetida*

La figure (39) met en évidence l'effet de l'herbicide Oscar appliqué dans le sol naturel aux concentrations RAD et CL10 sur le comportement des vers *E. fetida* au cours de la période d'étude. On note que le nombre de pores créés chez tous les vers augmente au cours du temps. Cette activité d'enfouissement est réduite chez les séries traitées par rapport à celle des vers témoins. En outre, la consommation de nutriments chez les vers témoins est plus élevée que les vers traités.

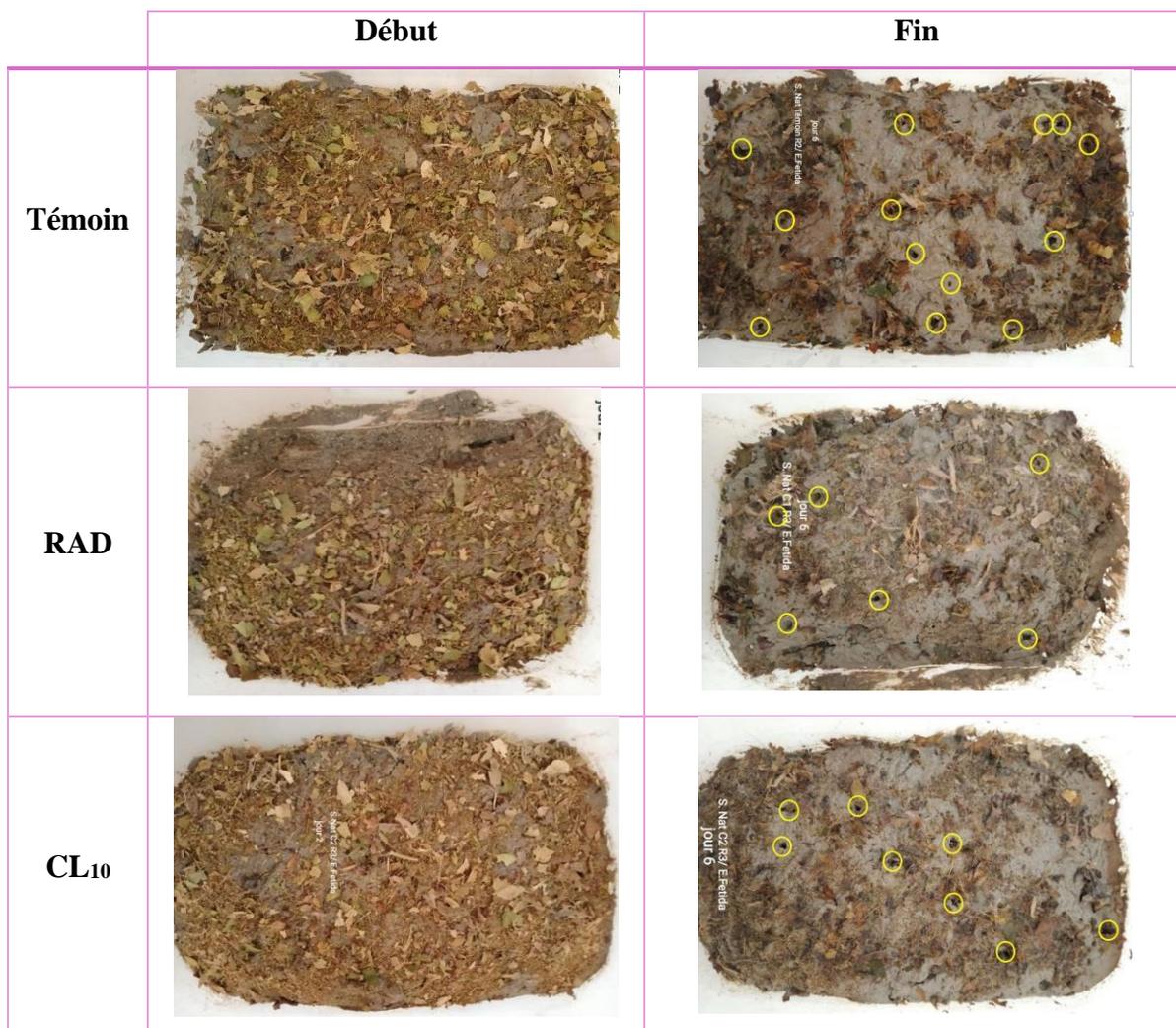


Figure 39. Effet de l'herbicide Oscar appliqué dans le sol naturel aux concentrations RAD et CL10 sur le comportement : Activité d'enfouissement (cercles jaunes), production de turricules (encadré rouge) et quantité de nutriments consommée des vers *E. fetida* au cours de la période d'étude (n=3 ; 3 vers par réplication).

2.4. Dosage des biomarqueurs

2.4.1. Protéines

La figure (40) illustre les effets des deux concentrations utilisées de l'herbicide Oscar après 7 et 14 jours d'exposition dans le sol naturel, sur le taux des protéines totales dans les parties postérieures des deux espèces de vers de terre. On remarque qu'après 7 jours, la quantité de protéines chez les vers *A.caliginosa* témoins et ceux traités avec la concentration sub-létale est comparable. Cependant elle est élevée chez les vers exposés au RAD, mais qui n'est pas statistiquement significative ($p = 0.585$) par rapport au témoin. Après 14 jours, la quantité de protéines des séries traitées augmente, ainsi qu'elle est plus élevée chez les vers traités avec la première concentration, cela reste non significative ($p = 0.325$) par rapport au témoin. La quantité de protéines mesurée après 14 jours est augmentée de manière significative ($p=0.023$) par rapport à celle mesurée après seulement 7 jours.

Contrairement aux séries d'*E.fetida* traitées avec CL10, dont la quantité de protéines après 7 jours augmente par rapport à celui des vers témoins, les séries exposées au RAD connaissent une diminution, mais qui reste statistiquement non significative ($p = 0.693$) par rapport au témoin. Alors qu'après 14 jours, la quantité de protéines des séries traitées manifeste une diminution non significative ($p = 0.456$) par rapport au témoin.

On observe une augmentation significative de la quantité de protéines mesurée après 14 jours ($p = 0.000$) par rapport à celle mesurée après seulement 7 jours.

Après comparaison de la quantité de protéines entre les deux espèces, on note que la quantité est comparable pour les deux espèces.

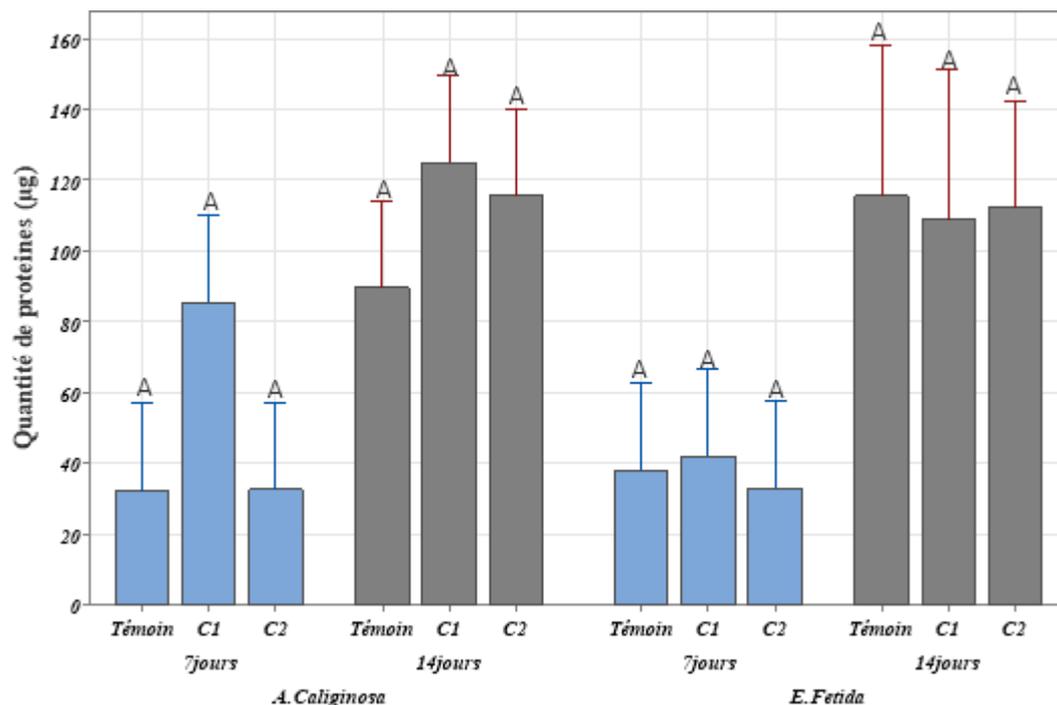


Figure 40. Effet des concentrations RAD et CL₁₀ de l'herbicide Oscar sur la quantité de protéines totales après 7 et 14 jours d'exposition chez les deux espèces de vers *A.caliginosa* et *E.fetida* dans le sol naturel ($m \pm s$, $n = 3$; 3 vers par réplication) (Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (test de Tukey HSD)).

2.4.2. L'activité enzymatique de la Glutathion-S-transferase

La figure (41) met en évidence l'impact d'Oscar sur l'activité de GST dans la partie antérieure des deux espèces, après une période de traitement de 7 et 14 jours dans le sol naturel. On constate qu'après 7 jours, l'activité de la GST des vers *A.caliginosa* traités est augmentée de manière significative ($p = 0.010$) par rapport au témoin. Tandis qu'après 14 jours l'activité des séries traitées est diminuée de manière significative ($p = 0.001$) par rapport au témoin.

L'activité de la GST des vers traités mesurée après 14 jours est diminuée par rapport à celle mesurée après 7 jours.

On observe une augmentation significative ($p = 0.023$) de l'activité de la GST après 7 jours chez les vers *E.fetida* traités par rapport au témoin. Cependant, après 14 jours, l'activité de tous les vers est comparable avec une légère différence non significative ($p = 0.357$).

L'activité de la GST mesurée après 14 jours est inférieure à celle mesurée après 7 jours.

En comparant l'activité de la GST entre les deux espèces, on note qu'elle est inférieure chez les vers *E.fetida* que celle d'*A.caliginosa*.

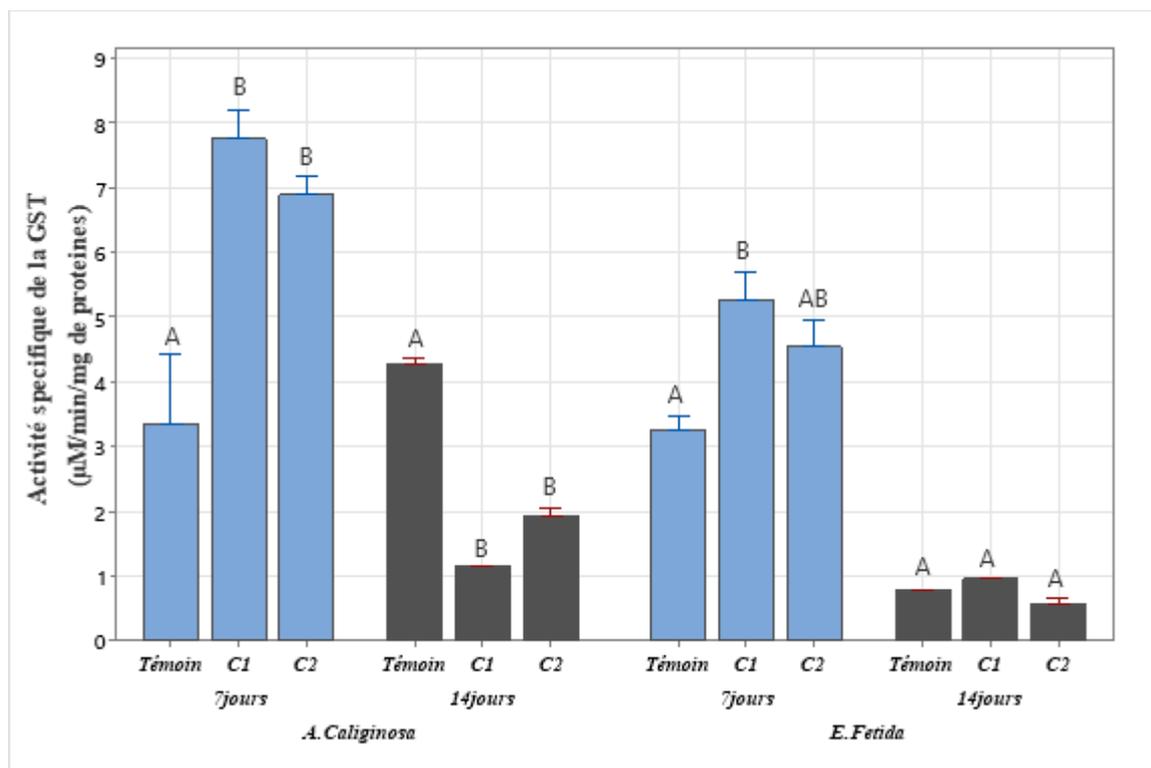


Figure 41. Effet de concentrations croissantes de l'herbicide Oscar, appliqué dans le sol naturel, sur l'activité spécifique de la GST chez deux espèces de vers de terre après 7 et 14 jours d'exposition ($m \pm s$, $n = 3$; 3 vers par réplique) (Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (test de Tukey HSD)).

2.4.3. L'activité enzymatique de la Catalase

La figure (42) montre l'effet d'Oscar sur l'activité de la catalase dans le clitellum des deux espèces, après 7 et 14 jours d'exposition dans le sol naturel. On observe qu'après 7 jours l'activité de la catalase chez les vers *A.caliginosa* augmente avec l'élévation des concentrations de manière non significative ($p = 0.169$), alors qu'elle est faible chez les vers témoins. Après 14 jours, l'activité de la catalase augmente de façon significative ($p = 0.001$) avec l'augmentation des concentrations.

Après 7 jours, l'activité de la catalase chez les vers *E.fetida* manifeste une élévation significative ($p = 0.001$) avec l'augmentation des concentrations, tandis qu'elle est faible chez les vers témoins. Après 14 jours, on remarque la même observation, mais c'est une augmentation non significative ($p = 0.225$).

L'activité mesurée après 14 jours est plus élevée que celle mesurée après 7 jours seulement, chez les deux espèces.

Après avoir comparé l'activité de la catalase entre les deux espèces, on note que l'activité de tous les vers *E.fetida* est supérieure à celle des vers *A.caliginosa*.

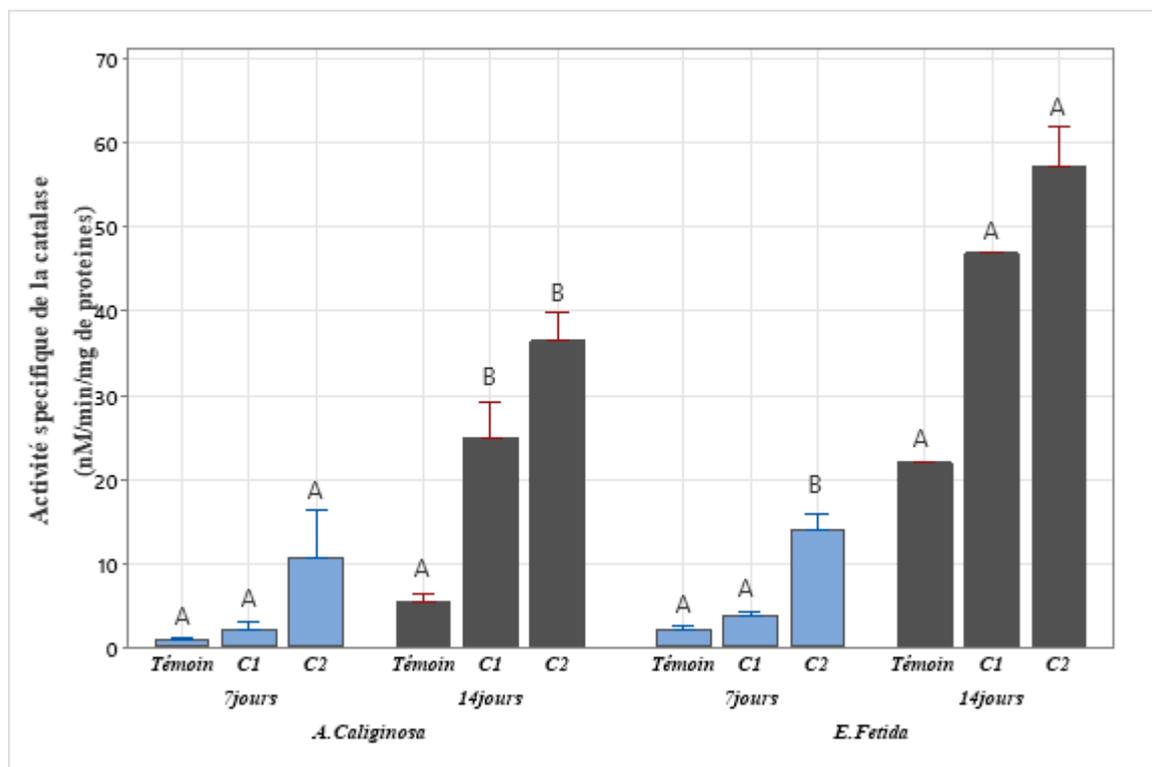


Figure 42. Effet de concentrations croissantes de l'herbicide Oscar, appliqué dans le sol naturel, sur l'activité spécifique de la catalase chez deux espèces de vers de terre après 7 et 14 jours d'exposition ($m \pm s$, $n = 3$; 3 vers par réplication) (Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (test de Tukey HSD)).

Discussion

1. Effet sur la croissance pondérale

Les résultats que nous avons obtenus indiquent que la contamination des vers *A.caliginosa* et *E.fetida* par les deux concentrations dans le sol artificiel entraîne une augmentation du taux de croissance après 7 jours puis une baisse après 14 jours d'exposition. Cependant, la croissance des vers traités dans le sol naturel diminue au cours du temps. Nos résultats sont comparables à ceux de Berrouk et al. (2023) qui ont constaté que les vers *L.terreteris*, traités avec les concentrations (2 à 6 mg/l) du même herbicide dans le sol naturel, manifestent un gain de poids et une baisse significative ($p < 0.05$) pour les vers traités avec 12,5 mg/L. Le travail de Bouazdia (2019) rapporte que le taux de croissance des vers *A.caliginosa* traités avec des différentes concentrations de l'herbicide Sekator OD, tend à augmenter après les trois premières périodes d'exposition. De la même façon, Lata (2017) constatait que les herbicides sulfuron et pinoxaden ont inhibé de manière significative la croissance des vers *E.fetida* après 15, 30, 45, et 60 jours d'exposition. Par ailleurs, Kamrin et Montgomery (2000) ont observé que les substances sulfonylurées ont entraîné une diminution du gain de poids à des doses élevées.

En fonction du temps, on a trouvé que la contamination des deux espèces *A.caliginosa* et *E.fetida* par les deux concentrations de l'herbicide Oscar dans le sol artificiel et naturel, cause une diminution de poids. Similairement, l'étude de Berrouk et al. (2023) sur le même herbicide, réalisé dans le sol naturel montre que le poids corporel a été considérablement réduit chez *L.terreteris* recevant un fongicide et/ou un herbicide avec une concentration supérieure à 12,5 mg/g de sol. De même, le travail de Halaimia et al. (2021) sur les juvéniles *A.caliginosa* exposés à l'engrais (NPK) par pulvérisation dans le sol naturel, révèle que cet engrais a un effet inhibiteur sur le gain de poids des juvéniles d'*A.caliginosa*. Similairement, Bouazdia (2019) a trouvé qu'après 28 jours de traitement avec l'herbicide Sekator OD des vers *A.caliginosa* dans le sol artificiel, le taux de croissance tend à diminuer significativement chez les séries traitées. Mosleh et al. (2003) ont étudié que la toxicité de l'aldicarb, de la cyperméthrine, du prophénophos, du chlorfluazurone, d'atrazine, de endosulfan et du métalaxyl dans les vers de terre *A.caliginosa* et *L.terrestris* entraînait une réduction du taux de croissance.

Selon Lata (2017) les herbicides sulfuron et pinoxaden causaient une inhibition significative de la croissance des vers *E. fetida* après 15, 30, 45 et 60 jours d'exposition. De plus, la perte de poids a également été signalée pour l'intoxication à des pesticides organochlorés et pour les effets des fongicides et des herbicides chez *E.fetida* et *L.terrestris* (Yasmine & D'souza, 2010). En outre, Yasmin et D'Souza (2007) ont étudié l'impact de trois

pesticides, le carbendazim, le glyphosate et le diméthate chez *E.fetida* et ont constaté une réduction significative de la croissance des vers de terre d'une manière dose-dépendante.

Cette réduction du taux de croissance pourrait être attribuée à la persistance élevée des pesticides dans le sol ou à la lente dégradation par les vers et à l'élimination ultérieure des métabolites. Il peut également indiquer l'inhibition de l'alimentation des vers en régulant la prise de pesticides pour réduire la consommation et donc probablement affecter la croissance. Cette dernière stratégie s'est montrée couramment utilisée pour éviter l'empoisonnement par les métaux lourds et les pesticides (Badawy et al., 2013). En diminuant la consommation d'aliments ou l'assimilation, il y aura une diminution de l'énergie et des protéines nécessaires à la croissance, ce qui entraînera une baisse du taux de croissance. Selon Frampton et al. (2006), la perte de poids paraît un bon indicateur du stress physiologique lié au niveau d'intoxication et au temps d'exposition.

En revanche, aucun effet du glyphosate sur la croissance d'*A.caliginosa* n'a été signalé dans le sol artificiel (Martin, 1982) ou dans le sol naturel en Nouvelle-Zélande (Doliner, 1991). Par conséquent, *E.fetida* traitée avec le glyphosate n'a pas montré de différence significative de taux de croissance par rapport aux vers témoins pendant 28 jours (Zhou et al., 2013). De plus, Kpan et al. (2018) n'ont montré aucun effet de cet herbicide sur la biomasse des vers. Ces différences entre les résultats sont principalement dues à la diversité, l'origine et l'histoire des espèces utilisées. Par ailleurs, Bouazdia (2020) a rapporté que le mélange d'insecticide (Décis) et d'herbicide (Glyphon) n'a pas eu d'effet sur le taux de croissance d'*A.caliginosa*.

2. Effet sur la reproduction

De nombreux paramètres de reproduction ont été étudiés chez les vers de terre exposés à divers xénobiotiques, dont la production de cocons, l'éclosion et la viabilité des vers produits (Van Gestel & Van Dis, 1988 ; Robidoux et al., 1999 ; Maboueta et al., 1999 ; De Silva et al., 2009). Selon les travaux d'Addison et Holmes (1995), Kokta (1992) et Neuhauser et Callahan (1990), la production de cocons peut être considérée comme un indicateur plus sensible au stress lié aux pesticides que la croissance des vers de terre.

Nos résultats révèlent que le nombre de cocons des vers d'*A.caliginosa* traités avec C2 dans le sol artificiel, est faible et comparable à celui des vers témoins. Dans le sol naturel, les vers témoins et ceux exposés à C1 n'ont pas pondu. Cependant, les vers traités avec C2 ont pondu.

Par contre, Alshawish et *al.* (2004), Booth et O'Halloran (2001) et Booth et *al.*, (2000b) ont trouvé que l'utilisation de chlorpyrifos à des taux agronomiques peut entraîner une diminution de la production de cocon d'*A.caliginosa*.

La diminution de la production de cocon chez les vers témoins, est probablement dû au surpeuplement des adultes dans les boîtes. Pour les expériences futures, Booth et *al.*, (2000a) suggèrent que les vers de terre seront maintenus dans 1 kg de sol plutôt que dans 500 g.

Chez l'*E.fetida*, le nombre de cocons des séries traitées dans le sol artificiel diminue avec l'augmentation de la concentration. Tandis que dans le sol naturel, le nombre de cocons des séries traitées avec la première concentration est comparable à celui des vers témoins. En revanche, le nombre de cocons des vers exposés à la deuxième concentration est plus élevé.

Selon Gobi et Gunasekaran (2010) la production de cocon a diminué avec une augmentation de la concentration de l'herbicide Butachlor appliquée sur les vers *E.fetida*. Parallèlement, Hudu et *al.*, (2021) ont constaté que les effets négatifs des herbicides étudiés sur la production de cocons des vers d'*E.fetida* ont augmenté avec l'augmentation des concentrations d'herbicide, dont Atrazine a eu l'effet le plus élevé, suivi par l'acide 2,4-Dichlorophenoxyacetic, tandis que le glyphosate a montré le moins d'effet. Ces résultats sont proches de ceux de Lata (2017) qui a constaté que le nombre de cocons produit par les vers *E.fetida* diminue avec l'augmentation de la concentration des herbicides sulfuron et pinoxaden. De plus, le nombre total des cocons des vers d'*E.fetida* est plus élevé que celui d'*A.caliginosa*. *E.fetida* est moins sensible aux pesticides que d'autres espèces de ver. (Ma & Bodt, 1993 ; Pelosi et *al.*, 2013).

3. Effet sur le comportement

3.1. Test d'évitement

La réaction d'évitement des vers de terre aux sols contaminés a été proposée comme le test le plus simple, sensible, valide et faisable pour évaluer la toxicité des sols (Lukkari et *al.*, 2004). Nos résultats montrent que les vers d'*A.caliginosa* dans les deux sols ont migré vers le sol non traité. Cependant, la migration des vers d'*E.fetida* a été vers le sol traité. Parallèlement, Bouazdia (2020) a constaté que le pourcentage de vers de terre migrant vers le sol témoin a augmenté avec l'augmentation de la concentration de Décis. De même, Erhunmwunse et *al.*, (2023) ont constaté qu'il y a eu une réponse d'évitement des vers *A.caliginosa* dans les concentrations d'essai de 1,0 et de 2,0 mg/Kg, le degré d'évitement était directement proportionnel à la concentration d'acétamipride. Selon De Batista et *al.*, (2024) la concentration la plus élevée d'herbicide à base de glyphosate (6.0 L/ha) a induit un

comportement d'évitement chez les vers de terre *E.andrei*. De plus, dans six essais de chambre, l'espèce *E.fetida* a été attirée par des concentrations moyennes et plus élevées de deltaméthrine. Ce résultat montre en partie que la deltaméthrine n'est pas dangereuse pour *E.fetida* (Gherhardt & Bolcu, 2011) qui est moins sensible aux pesticides qu'*A.caliginosa*. (Pelosi et al., 2013). D'après Datta et al., (2021) le nombre de vers de terre dans le sol traité était supérieur au sol témoin dans les doses plus faibles de l'atrazine et d'acétate.

Contrairement à l'insecticide, l'herbicide Glyphon n'a pas eu d'effet significatif sur le comportement d'évitement de *A. Caliginosa* (Bouazdia, 2020). Nos résultats contredisent les résultats de Pearce et Pearce (1979) qui ont trouvé que l'*E.fetida* était plus sensible qu'*A.caliginosa* dans le test d'évitement en utilisant le sable. La différence dans les substrats aurait pu être à l'origine des différences dans la réponse puisqu'il est bien connu que les propriétés du sol elles-mêmes peuvent affecter le comportement d'évitement des organismes du sol (Amorim et al., 2005, 2008).

Les vers de terre possèdent des récepteurs chimiques et des tubercules sensoriels qui leur confèrent une sensibilité élevée aux produits chimiques présents dans les sols (Reinecke et al., 2002). Cependant, certains produits peuvent ne pas être détectés par les vers de terre, qui peuvent mourir dans le sol sans tenter de s'échapper (Garcia et al., 2004).

3.2. Enfouissement, consommation de litière et production de turricules

La création de pores est une conséquence évidente de l'activité des vers de terre dans le sol, ce qui influence les propriétés de transfert du sol. Le dépistage est donc une mesure intéressante pour les essais écotoxicologiques. Une autre fonction associée au comportement des vers de terre et qui fournit des mesures significatives en écotoxicologie, est liée à la consommation de litière (Pelosi et al., 2014). D'autre part, les vers de terre se nourrissent et creusent dans le sol en ingérant les particules de sol. Après transfert intestinale, le sol est éjecté sous forme de turricules, qui jouent un rôle écologique important dans le sol (Lee and Foster, 1991). A cause de sa simplicité, la production de turricules peut être utilisée comme un test d'étude de l'activité des vers (Capowiez et al., 2010).

Les résultats qu'on a obtenus indiquent que le nombre de macropores créés et la quantité de turricules produits chez tous les vers des deux espèces dans les deux sols augmentent avec le temps. Cependant, ces valeurs diminuent avec l'augmentation de la concentration. De plus, la quantité de nutriments consommée à la fin est élevée par rapport au début. En revanche, les vers témoins ont consommé plus de nutriments que les vers traités. Similairement, Dittbrenner et al. (2011) ont montré une diminution du volume des galeries des vers *A.caliginosa* avec

l'augmentation des concentrations d'imidaclopride. De même, Olvera Velona et *al.* (2008) ont constaté que l'insecticide appliqué à la RAD réduisait la longueur des galeries et le nombre de branches dans un Calcosol. Dittbrenner et *al.* (2010) ont montré une diminution de la production de fonte de 45 à 97% due à l'imidaclopride à un taux d'application de 0,66 mg kg⁻¹. De plus, Stanley et *al.* (2016) ont constaté que l'aziphos-méthyl, qui peut être transporté par le vent (dérive de pulvérisation) vers des régions adjacentes dépourvues de couverture arborée, affecte l'activité d'enfouissement des vers de terre.

Le nombre élevé de macropores créés par les vers témoin peut être expliqué par la température enregistrée au cours de l'étude (18°C). Cette température est favorable à l'activité d'enfouissement et de production de turricules (Perreault, J. M., & Whalen, J. K., 2006). Certains pesticides provoquent une diminution de l'activité de la cholinestérase, ce qui entraîne une réduction de l'activité d'enfouissement. Cela peut entraîner des effets sublétaux sur l'alimentation et la reproduction, conduisant finalement à une diminution de la population (Reinecke and Reinecke 2007).

En revanche, Dummett et *al.*, (2023) ont rapporté qu'il n'y a pas eu de différence significative ($p > 0,05$) dans le volume d'enfouissement entre les vers précédemment exposés aux pellets de boue, mais une différence importante ($p < 0,05$) entre les vers témoins et ceux traités avec le phosphate ferreux-EDDS dans la profondeur d'exploration. Aussi, Lammertyn et *al.*, (2021) ont constaté que les activités d'enfouissement et de production de turricules sont remarquables pour toutes les concentrations de l'herbicide Atrazine appliqué sur les vers *E.fetida* pendant 28 jours.

Cette différence de résultats peut être due à la difficulté d'observations directes du comportement d'excavation des vers de terre (Pelosi et *al.*, 2014).

Le stress causé par la présence de contaminants dans le sol peut détourner de l'énergie de la croissance, la reproduction et/ou l'activité d'enfouissement. Cette énergie est utilisée pour assurer la survie des organismes (Gibbs et *al.* 1996 ; Odum 1982).

4. Effet sur les biomarqueurs

Les vers endogènes sont recommandés pour des études écotoxicologiques (Datta et *al.*, 2021) en raison de leur importance écologique dans le sol et du contact qu'ils ont avec divers contaminants grâce à leur activité d'enfouissement (Pelosi et *al.*, 2013).

Les biomarqueurs sont un élément essentiel de l'évaluation des risques écologiques de la pollution. Ils doivent être sensibles et refléter des effets écologiques pertinents de la toxicité. Ils sont régulièrement utilisés pour estimer le niveau d'exposition et les effets toxiques des

polluants (Mekahlia et al., 2016). Cependant, les informations disponibles sur les vers de terre sont limitées par rapport à celles concernant d'autres espèces telles que les poissons (Toshiyuki & Keiko, 2015).

4.1. Quantité de protéines

La quantité de protéines solubles est fréquemment employée pour détecter un niveau de stress chez un bioindicateur. La structure et la fonction des protéines peuvent être altérées par les espèces réactives de l'oxygène produites soit par le métabolisme cellulaire, soit par des oxydants exogènes (Djekoun, 2012).

Après avoir comparé la quantité de protéines des séries traitées des deux espèces dans les deux types de sols avec celle des vers témoins, nos résultats révèlent qu'il n'y a pas de différences significatives entre eux pendant toute la période d'étude. En revanche, une augmentation significative du taux de protéines a été observée au fil du temps. Les résultats de Mekahlia et al. (2016) sont conformes aux nôtres, lorsqu'ils ont appliqué l'herbicide Sekator et l'engrais phosphaté TSP sur les vers *L. terrestris*. L'étude de Otmani et al. (2018) a montré que le cadmium a augmenté le taux de protéines totales chez l'*Allolobophora caliginosa*. De même, La teneur en protéines totales chez les vers de terre traités par le Méthomyl a augmenté de manière dose-dépendante, comme le montre Zeriri (2014).

En revanche, Lammertyn et al. (2021) ont rapporté que la quantité de protéine d'*E. fetida* a diminué après 28 jours pour les deux concentrations testées d'atrazine (T1 : 2 mg/Kg ; T2 : 10 mg/Kg). De manière similaire, Bouazdia (2019) a observé une diminution de la quantité de protéines des vers *A. caliginosa* traités par l'herbicide Sekator OD après 4 et 14 et 45 jours d'exposition. Cependant, chez les séries traitées par l'insecticide Karaté Zeon, aucun changement significatif de la quantité de protéines n'a été observé pendant la période d'étude. Une réduction des taux de protéines en fonction de la dose et du temps a été observée par Lata et al. (2017) après une exposition d'*E. fetida* au Sulfuron et Pinoxaden.

L'augmentation des protéines totales chez les vers de terre pourrait indiquer une adaptabilité physiologique pour compenser le stress et le développement de défenses cellulaires induites par l'impact des pesticides (Mekahlia et al., 2016). De plus, l'accumulation de protéines pourrait être nécessaire pour restaurer les enzymes ou remplacer celles perdues lors de la nécrose des tissus induite par l'herbicide (Mosleh et al. 2006).

L'augmentation du renouvellement des protéines due à l'interférence du toxique peut contribuer à la diminution du taux de protéines. Il a également été établi précédemment que les protéines peuvent servir de source d'énergie alternative pendant les conditions de stress

prolongé, ce qui corrobore les résultats présents (Sturzenbaum et *al.*, 2001) Le stress peut également induire une détérioration structurale au niveau moléculaire due à la génotoxicité, ce qui peut affecter le taux total de protéines chez le ver de terre (Lata et *al.*, 2017).

4.2. Activité de la glutathion S-transférase

Le processus de métabolisation des xénobiotiques implique une activation des systèmes enzymatiques de la phase I ainsi que les enzymes de la phase II tels que les glutathion-S-transférases (GST). Les glutathions S-transférases (GST : E.C.2.5.1.18) sont des enzymes qui catalysent la conjugaison du glutathion (possède un groupement nucléophile -SH) à une grande variété de composés (porteurs de groupements électrophiles) et également impliquée dans le transport et l'élimination de composés réactifs qui effectuent d'autres fonctions antioxydantes (Sies, 1993 ; Livingstone, 2003). Ce sont des isoenzymes de la phase II du processus de détoxification cellulaire (Elia et *al.*, 2003). L'activité de la GST a également été largement utilisé comme un biomarqueur de stress (Fitzpatrick et *al.*, 1997 ; Shailaja & D'Silva, 2003 ; Cunha et *al.*, 2007).

Les résultats de notre étude montrent que l'exposition des vers *A.caliginosa* à Oscar dans le sol artificiel pendant 7 jours a significativement induit leur activité de la GST ($p = 0.001$). En revanche, nous observons une inhibition de cette activité après 14 jours. Cependant, dans le sol naturel, l'activité de la GST augmente de façon significative ($p = 0.010$) après 7 jours et ensuite diminue de manière significative après 14 jours d'exposition ($p = 0.001$). Parallèlement, l'étude de Bouazdia (2019) montre que l'activité de la GST a augmenté après exposition des vers de terre à la concentration sub-létale de lambda cyhalothrine. Des recherches similaires ont mis en évidence une stimulation de la GST chez les vers de terre comme *A.caliginosa nocturna* suite à une exposition à une combinaison d'insecticides et de fongicides (Schreck et *al.*, 2008), ainsi qu'*A.caliginosa* exposé aux insecticides organophosphorés chlorpyrifos et diazinon (Sanchez-Hernandez et *al.*, 2014 ; Booth et *al.*, 1998).

Par contre, dans l'étude de Sánchez-del Cid et *al.* (2024), une exposition de 14 jours aux pesticides n'a pas induit l'activité de la GST des vers *Balanteodrilus extremus*. Jouni et *al.* (2021) ont analysé l'effet du chlorpyrifos et de l'éthyl paraoxone sur *Aporrectodea chlorotica* et *A. caliginosa* et ont rapporté qu'après 7 jours d'exposition, l'activité de la GST n'a pas augmenté chez les deux espèces. L'application de flufenoxuron et pyriproxyfen sur les vers d'*A. caliginosa* pendant 4 semaines a inhibé l'activité de la GST (Nasr & Badawy, 2015).

L'augmentation de l'activité de la GST chez les vers exposés aux pesticides pourrait être une réponse adaptative au stress ou un mécanisme physiologique de défense contre la toxicité du sulfentrazone (Li et *al.*, 2018 ; Owagboriaye et *al.*, 2020).

L'activité de la GST des vers *E. fetida* traités avec RAD après 7 jours dans le sol naturel a été augmentée significativement ($p = 0.023$). Cependant les autres vers dans les deux sols n'ont pas été affectée par Oscar. De même, Jiang et *al.*, (2019) ont révélé que le glyphosate a réduit considérablement l'activité de l'enzyme GST chez *E. fetida*. De plus, à mesure que le temps d'exposition augmente, les niveaux de GST augmentent également chez les vers d'*E. fetida* exposés à l'alachlore (Gangadhar et *al.*, 2021 ; Zhang et *al.*, 2020). En revanche, Yao et *al.* (2020) ont rapporté que l'activité de la GST des vers *E. fetida* restait faible dans les groupes exposés à des niveaux élevés de Tifluzamide lors de l'exposition à court terme.

La réponse de l'activité de la GST dépend de plusieurs facteurs comme le type de xénobiotique, la concentration, le temps d'exposition et de l'espèce (Oruç & Üner, 2000).

En fonction du temps, l'activité de la GST des deux espèces dans les deux sols a été réduite. Similairement, Velki et Hackenberger, (2013) ont constaté une inhibition de la GST chez *E. andrei* et *L. rubellus* qui étaient contaminés par deltaméthrine et pirimiphos-méthyl. D'autres recherches ont également démontré une inhibition de la GST chez *E. fetida* qui a été exposé à l'imidaclopride et au thiaclopride (Zhang et *al.*, 2017 ; Feng et *al.*, 2015). De plus, selon Gao et *al.*, (2007), l'herbicide albendazole a démontré une inhibition de l'activité GST dans le corps entier d'*E. fetida*.

Cependant, une induction de la GST a été observée chez des vers de terre tels que *L. terrestris* après avoir été exposé à l'herbicide Sekator et à l'engrais triphosphate (Mekahlia et *al.*, 2015) et chez *E. fetida* à la suite d'une exposition à l'herbicide acétochlore (Schröder et *al.*, 2006) ainsi qu'aux herbicides fenoxaprop et metolachlor (Abdel Salam, 2008).

L'étude de la dégradation et du métabolisme de 23 herbicides de type sulfonilurée dans l'eau, le sol, les plantes et les animaux a révélé des voies multiples et complexes. Parmi celles-ci, la conjugaison avec le glutathion qui aboutit à des produits de dégradation inactifs (Terry et *al.*, 1998).

4.3. Activité de la catalase

La catalase (CAT : EC 1.11.1.6) est une enzyme antioxydante impliquée dans la défense de la cellule contre les effets toxiques du peroxyde d'hydrogène en catalysant sa décomposition en eau et oxygène, c'est un biomarqueur de stress oxydatif (Almeida et *al.*, 2007 ; Jebali et *al.*, 2007). Les catalases sont des hémoprotéines tétramériques ayant un atome de fer par sous-

unité, ont une masse d'environ 240 KDa. Elles sont sensibles à certains contaminants inducteurs de stress oxydatif, comme les HAP, PCB ou certains pesticides (Livingstone, 1993) et les métaux (Labrot et al., 1996).

Dans le présent travail, l'herbicide Oscar a stimulé l'activité de la CAT chez les vers *A. caliginosa* traités dans le sol artificiel après 7 jours et chez ceux exposés à la concentration sub-létale après 14 jours. Cependant, l'activité des vers traités avec RAD après 14 jours a diminué significativement. Par ailleurs, l'activité de la CAT chez les vers *E. fetida* a été inhibée pendant toute la période d'exposition. Dans l'étude de Sánchez-del Cid et al. (2024), une exposition de 14 jours aux pesticides n'a induit l'activité de la CAT des vers *B. extremus* qu'après 48 jours d'exposition. De même, l'activité des vers *E. fetida* traités par l'insecticide Sulfoxaflor n'a augmenté qu'après 7 jours de traitement (Zhang et al., 2020). Selon Jiang et al. (2019) l'activité de la CAT des vers *E. fetida* a d'abord diminué puis augmenté avec l'augmentation des concentrations de glyphosate et du temps d'exposition.

L'exposition des vers *A. caliginosa* ainsi que d'*E. fetida* à Oscar dans le sol naturel a produit une augmentation de l'activité de la CAT tout au long de la période d'exposition de manière dose-dépendante. De la même façon, le pesticide Acetamiprid a stimulé l'activité de la CAT chez les vers *A. longa* (Erhunmwunse et al., 2023). De plus, Oscar a induit l'activité de la CAT chez les vers des deux espèces dans les deux types de sols de manière dépendante du temps. Ainsi, Gangadhar et al. (2021) ont observé une augmentation des taux de la CAT chez *E. fetida* traités avec de l'alachlor de façon dépendante du temps. De plus, une augmentation de l'activité CAT a été observée chez *A. caliginosa* dans des sols contaminés par la concentration sub-létale de lambda cyhalothrine et par l'herbicide Sekator (Bouazdia, 2019), et chez *E. fetida* traités avec sulfentrazone (Li et al., 2020).

D'autre part, une inhibition d'activité de la CAT a été enregistrée après exposition à 6,6 µg/kg et 66 µg/kg de Tembotrione pendant 7 jours (Hackenberger et al., 2018). Les résultats d'Otmani et al. (2018) montrent une augmentation non significative de l'activité CAT d'*Allolobophora caliginosa* par rapport aux témoins, en présence du Cadmium.

La défense contre le stress oxydatif commence par l'induction de l'activité spécifique de la CAT en lien avec les superoxydes dismutases (Asagba et al., 2008). L'activité de la CAT chez les vers traités est plus élevée que chez les témoins, ce qui suggère que les H₂O₂ sont éliminés suite à l'exposition aux sulfonyles.

Conclusion

Conclusion :

Les organismes du sol sont exposés à une grande variété de polluants environnementaux, tels que les pesticides. Les vers de terre sont parmi les organismes les plus importants et jouent un rôle clé dans les processus biotiques des sols. Ils sont considérablement influencés par le stress environnemental et, en raison de leurs sensibilité métabolique et physiologique, différentes espèces de vers de terre ont servi de modèles pour évaluer la toxicité des sols contaminés par des pesticides.

Ce travail vise à mettre l'accent sur les effets de l'utilisation d'un herbicide déjà commercialisé et utilisé en Algérie sur un bioindicateur de la pollution des sols. Le choix se porte sur le lombric en tant que modèle biologique connu. Très peu d'études se sont penchées sur les effets de cette famille d'herbicides sur les vers de terre.

Le premier objectif était d'étudier l'impact de l'herbicide Oscar sur la croissance, la reproduction et le comportement des deux espèces, *E. fetida* et *A. caliginosa*, dans deux types de sols différents (sol naturel et sol artificiel). Cet herbicide a entraîné une diminution de poids, de la reproduction, de l'activité d'enfouissement, de la consommation de litière et de la production de turricules des deux espèces, dans les deux sols. L'espèce *E. fetida* a été attirée par l'herbicide Oscar, tandis qu'*A. caliginosa* a tenté de l'éviter.

Un deuxième objectif était d'évaluer la quantité de protéines ainsi que les activités enzymatiques de la Glutathion-S-Transférase et de la Catalase chez les vers exposés à des concentrations sub-létales de l'herbicide. La quantité de protéines chez les deux espèces a augmenté avec le temps. L'activité de la GST a été induite après 7 jours d'exposition, puis a diminué après 14 jours. De plus, l'activité de la CAT a augmenté de manière concentration et temps- dépendante, à l'exception de celle des vers *E. fetida* traités dans le sol artificiel, qui a été inhibée. Ceci révèle que l'herbicide Oscar induit un stress oxydatif par la stimulation du système de détoxification (CAT et GST) chez les deux espèces.

Cette étude soulève maintenant de nouvelles interrogations qui suggèrent de nouvelles perspectives de recherche.

- Etudier l'effet de sulfonyleurée sur les soies des vers de terre afin de mieux comprendre leur comportement.
- Développer des recherches par le dosage d'autres enzymes de détoxification comme l'acétylcholinestérase et le cytochrome P450 chez *A. caliginosa* afin d'obtenir des informations complémentaires sur l'action de cet herbicide.

Conclusion

- Déterminer l'impact de sulfonyleurée sur la reproduction, la survie et la croissance des juvéniles des vers de terre.
- Etudier l'impact de sulfonyleurée sur d'autres espèces biologiques présentes dans le sol agricole.
- Mener des recherches sur l'histopathologie de cette famille d'herbicides.

*Références
bibliographiques*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdel Salam Aly M, Schröder P. (2008). Effect of Herbicides on Glutathione-S-transferases in the Earthworm, *Eisenia fetida*. *Env Sci Pollut Res*, 15 (2) 143–149.
- Addison, J. A., & Holmes, S. B. (1995). Comparison of forest soil microcosm and acute toxicity studies for determining effects of fenitrothion on earthworms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 30(2), 127-133.
- Akashe, M. M., Pawade, U. V., & Nikam, A. V. www.ijrap.net.
- de Almeida, E. A., Bainy, A. C. D., de Melo Loureiro, A. P., Martinez, G. R., Miyamoto, S., Onuki, J., ... & Di Mascio, P. (2007). Oxidative stress in *Perna perna* and other bivalves as indicators of environmental stress in the Brazilian marine environment: antioxidants, lipid peroxidation and DNA damage. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 146(4), 588-600.
- Alshawish, S. A., Mohamed, A. I., & Nair, G. A. (2004). Prolonged toxicity of sub-lethal dosages of chemical pesticides on the body mass and cocoons of *Aporrectodea caliginosa* (Savigny 1826)(Oligochaeta: Lumbricidae) inhabiting Benghazi, Libya.
- Amorim, M.J.B., Novais, S., Rombke, J., Soares, A.M.V.M., 2008. Avoidance test with *Enchytraeus albidus* (Enchytraeidae): effects of different exposure time and soil properties. *Environ. Pollut.* 155, 112–116.
- Amorim, M.J.B., Rombke, J., Soares, A.M.V.M., 2005. Avoidance behaviour of *Enchytraeus albidus*: effects of benomyl, carbendazim, phenmedipham and different soil types. *Chemosphere* 59, 501–510.
- Angst, G., Mueller, C. W., Prater, I., Angst, Š., Frouz, J., Jílková, V., ... & Nierop, K. G. (2019). Earthworms act as biochemical reactors to convert labile plant compounds into stabilized soil microbial necromass. *Communications Biology*, 2(1), 441.
- Asagba, S. O., Eriyamremu, G. E., & Igberaese, M. E. (2008). Bioaccumulation of cadmium and its biochemical effect on selected tissues of the catfish (*Clarias gariepinus*). *Fish physiology and biochemistry*, 34, 61-69.
- Avel M (1959). Classe des Annélides Oligochètes. In: *Traité de Zoologie*, Vol. 5. Grasse PP, ed., pp. 224–470. Masson, Paris.
- Bachelier G. (1978). *La Faune des Sols : Son Ecologie et Son Action*, Orstom, Paris, pp 391.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Badawy, M. E., Kenawy, A., & El-Aswad, A. F. (2013). Toxicity assessment of buprofezin, lufenuron, and triflumuron to the earthworm *Aporrectodea caliginosa*. *International Journal of Zoology*, 2013(1), 174523.
- Baha M. (2008). Etude bioécologique des oligochètes du nord de l'Algérie. Thèse de doctorat d'état en sciences agronomiques. Institut National Agronomique (El-Harrach, Algeria).
- Baha, M., Berra, S., 2001. *Proselodrilus doumandjiin. sp*, a new lumbricid from Algeria. *Tropical Zoology*, 14, 87-93.
- Bardgett, R. D., & van der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, **515**, 505–511.
- Barnes, A. E., Robinson, R. A., & Pearce-Higgins, J. W. (2023). Collation of a century of soil invertebrate abundance data suggests long-term declines in earthworms but not tipulids. *PLoS ONE*, **18**, e0282069.
- Bart, S., Amossé, J., Lowe, C. N., Mougin, C., Péry, A. R., & Pelosi, C. (2018). *Aporrectodea caliginosa*, a relevant earthworm species for a posteriori pesticide risk assessment: current knowledge and recommendations for culture and experimental design. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 33867-33881.
- Bastardie, F., Capowiez, Y., De Dreuzy, J. R., & Cluzeau, D. (2003). X-ray tomographic and hydraulic characterization of burrowing by three earthworm species in repacked soil cores. *Applied Soil Ecology*, 24(1), 3-16.
- Bérard, L. (1994). *Les arbres et les forêts dans la vie paysanne : analyse de la gestion de l'espace forestier en Haute-Provence*. Paris : L'Harmattan.
- Bergman, L., & Pugh, D. M. (Eds.). (2012). *Environmental toxicology, economics and institutions: the atrazine case study (Vol. 8)*. Springer Science & Business Media.
- Bernard, L., Chapuis-Lardy, L., Razafimbelo, T., Razafindrakoto, M., Pablo, A. L., Legname, E., ... & Blanchart, E. (2012). Endogeic earthworms shape bacterial functional communities and affect organic matter mineralization in a tropical soil. *The ISME journal*, 6(1), 213-222.
- Berrouk, H., Necib, A., Meraiahia, A., Boumaza, N. E., & Hmaidia, K. (2023). Individual and combined effects of a fungicide (Valette) and an herbicide (Oscar) on the growth and mortality of earthworm *Lumbricus terresteris* (linnaeus, 1758). *Animal Research International*, 20(1), 4694-4704.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Beyer, J., et al. (1988). The role of renewable energy in meeting future energy needs. *Energy Policy*, 16(4), 346-354.
- Blair, J. M., & Martin, J. F. (1988). The role of renewable energy in rural development. *Renewable Energy*, 8(1), 1-6.
- Booth LH, Heppelthwaite VJ, O'Halloran K (2000a) Growth, development and fecundity of the earthworm *Aporrectodea caliginosa* after exposure to two organophosphates. *N Z Plant Prot* 53:221–225.
- Booth LH, Hodge S, O'Halloran K (2000b) Use of cholinesterase in *Aporrectodea caliginosa* (Oligochaeta; Lumbricidae) to detect organophosphate contamination: comparison of laboratory tests, mesocosms, and field studies. *Environ Toxicol Chem* 19(2):417– 422.
- Booth LH, O'Halloran K (2001) A comparison of biomarker responses in the earthworm *Aporrectodea caliginosa* to the organophosphorus insecticides diazinon and chlorpyrifos. *Environ Toxicol Chem* 20(11):2494–2502.
- Boström, U. et Lofs-Holmin, A. (1996). Annual population dynamics of earthworms and cocoon production by *Aporrectodea caliginosa* in a meadow fescue ley. *Pedobiol.* 40, 32-42.
- BOUAZDIA, K. (2019). Exploration des Oligochètes dans une zone semi-aride et évaluation de l'impact de xénobiotiques sur des espèces non visées : les lombriciens (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- Bouazdia, K. (2020). Combined effect of two agrochemicals on *Aporrectodea caliginosa* in a semi-arid land.
- Bouché M.B. (1972). *Lombriciens de France, Ecologie et systématique*. Inst. Nat.Rech. Agronomique, Paris, pp 671.
- Bradford, M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, 248–254.
- Bradham, K. D., Dayton, E. A., Basta, N. T., Schroder, J., Payton, M., & Lanno, R. P. (2006). Effect of soil properties on lead bioavailability and toxicity to earthworms. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 25(3), 769-775.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Brown, GG; Callaham, MA; Carla Niva, C; Feijoo, A; Sautter KD; Wooster James, S; Fragoso, C; Pasini, A; Schmelz, R., 2013. Terrestrialoligochaeteresearch in Latin America: the importance of the Latin American meetings on oligochaete ecology and taxonomy. *Appl. SoilEcol.*, 69, 2-12.
- Brown, L. R. (1990). The role of renewable energy in sustainable development. *Renewable Energy*, 1(1), 11-16.
- Buchel, K.H. (1983). *Chemistry of Pesticides*, John Wiley & Sons, Inc. New York, USA
- Butt. K. R. (1993). Reproduction and growth of three deep-burrowing earthworms (Lumbricidae) in laboratory culture in order to assess production for soil restoration. *Biol.Fertil. Soils* 16, 135-138.
- Calvet, R. (2005). *Les pesticides dans le sol: conséquences agronomiques et environnementales*. France agricole éditions.
- Capowiez, Y., Dittbrenner, N., Rault, M., Triebskorn, R., Hedde, M., & Mazzia, C. (2010). Earthworm cast production as a new behavioural biomarker for toxicity testing. *Environmental Pollution*, 158(2), 388-393.
- Céline Pelosi & Sébastien Barot & Yvan Capowiez & Mickaël Hedde & Franck Vandenbulcke. (2013a). Pesticides and earthworms. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 30 pages.
- Celine Pelosi, Joimel S, Makowski D. (2013b). Searching for a more sensitive earthworm species to be used in pesticide homologation tests — a meta-analysis. *Chemosphere*. 90: 895–900.
- Céline Pelosi. (2008). *Modélisation de la dynamique d'une population de vers de terre Lumbricus terrestris au champ. Contribution à l'étude de l'impact des systèmes de culture sur les communautés lombriciennes*. Sciences de la Terre. AgroParisTech, Français.
- Chapuis-Lardy, L., Brossard, M., Lavelle, P., & Schouller, E. (1998). Phosphorus transformations in a ferralsol through ingestion by *Pantoscolex corethrurus*, a geophagous earthworm. *European Journal of Soil Biology*, 34(2), 61-67.
- CHIALI F. Z. (2013)- *Effets métaboliques d'un régime à base de purée de pomme de terre contaminée par les pesticides chez le rat wistar*. Thèse doctorat Physiologie et Biochimie de la Nutrition. Tlemcen. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen. 205p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Coulibaly, M. (2005). La gestion de l'eau dans le Sahel : le cas du Niger. In Université Laval.
- Creamer, C. A., de Menezes, A. B., Krull, E. S., Sanderman, J., Newton-Walters, R., & Farrell, M. (2015). Microbial community structure mediates response of soil C decomposition to litter addition and warming. *Soil Biology and Biochemistry*, 80, 175-188.
- Csuzdi, C. (2012). Earthworm species, a searchable database. *Opuscula Zoologica Budapest*, 43(1), 97-99.
- Cunha I., Mangas-Ramirez E. & Guilhermino L. (2007). Effects of copper and cadmium on cholinesterase and glutathioneS-transferase activities of two marine gastropods (*Monodonta lineata* and *Nucella lapillus*). *Comp. Biochem. Physiol. C.*, 145: 648–657.
- Curry JP (1994) Grassland invertebrates. Ecology, influence on soil fertility and effects on plant growth. Springer Netherlands, Dordrecht, NL.
- Curry, J. P. (1998). Factors affecting earthworm abundance in soils. In: Edwards, C. A. (eds), *Earthworm Ecology*. Boca Raton, St. Lucie Press, pp. 389.
- Dallerac M., (2005). Influence de la fertilisation basique calcique et magnésienne sur la population lombricienne. N°16, Ed : Chambre Syndicale, Paris, p 4.
- Daniel, O., Kohli, L. et Bieri, M. (1996). Weight gain and weight loss of the earthworm *Lumbricus terrestris* L. at different temperatures and body weights. *Soil Biol. Biochem.* 28, 1235-1240.
- Datta, S., Singh, J., Singh, J., Singh, S., & Singh, S. (2021). Avoidance behavior of *Eisenia fetida* and *Metaphire posthuma* towards two different pesticides, acephate and atrazine. *Chemosphere*, 278, 130476.
- De Batista, D. G., Pinheiro, J. F., Ourique, I. S., Basso, B. B., de Bragas, M. E. T., Sulzbacher, L. M., ... & Heck, T. G. (2024). Exposure to a glyphosate-based herbicide induces avoidance behavior and impairs coelomocyte viability in *Eisenia andrei* earthworms. *Scientific Letters*, 1(Sup 1).
- De Jong, Y., Verbeek, M., Michelsen, V., de Place Bjørn, P., Los, W., Steeman, F., ... & Penev, L. (2014). Fauna Europaea—all European animal species on the web. *Biodiversity data journal*, (2).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- De Silva, P. M. C., Pathiratne, A., & van Gestel, C. A. (2009). Influence of temperature and soil type on the toxicity of three pesticides to *Eisenia andrei*. *Chemosphere*, 76(10), 1410-1415.
- Dittbrenner, N., Moser, I., Triebkorn, R., & Capowicz, Y. (2011). Assessment of short and long-term effects of imidacloprid on the burrowing behaviour of two earthworm species (*Aporrectodea caliginosa* and *Lumbricus terrestris*) by using 2D and 3D post-exposure techniques. *Chemosphere*, 84(10), 1349-1355.
- Dittbrenner, N., Triebkorn, R., Moser, I., & Capowicz, Y. (2010). Physiological and behavioural effects of imidacloprid on two ecologically relevant earthworm species (*Lumbricus terrestris* and *Aporrectodea caliginosa*). *Ecotoxicology*, 19, 1567-1573.
- Djekoun M., 2012. Évaluation de l'effet du stress oxydatif généré par le Cadmium à l'échelle cellulaire : Cas de *Saccharomyces cerevisiae*. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar, Annaba. 192p.
- Doliner, L.H. 1991. Discussion document: Preharvest use of glyphosate herbicide. Canada D91-01. Pesticide Directorate, Agriculture Canada, Ottawa.
- Domínguez, J., Aira, M., & Gómez-Brandón, M. (2009). El papel de las lombrices de tierra en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes. *Ecosistemas*, 18(2).
- Dummett, I., Sturrock, C. J., & Stroud, J. L. (2023). Monitoring the effects of pesticide pellets to address farmers' concerns on soil fauna, specifically earthworms. *Soil Use and Management*, 39(3), 1235-1244.
- Edelahid, A. (2004). La gestion de la qualité de l'eau dans les systèmes d'irrigation à la ferme. In Université Laval.
- Edwards CA et Lofty JR. (1977). *Biology of Earthworms* (2nd edition). Chapman and Hall, London.
- Edwards CA, Bohlen PJ (1996) *Biology and ecology of earthworms*, 3rd edn. Chapman & Hall, London.
- Eisenhauer, N., Bonn, A., & Guerra, C. A. (2019). Recognizing the quiet extinction of invertebrates. *Nature Communications*, **10**, 50.
- Erhunmwunse, N. O., Tongo, I., Endurance, E. E., Ogbeide, O. S., Oruma, B., Omniabios, C., & Ikeh, R. (2023). Responses of Earthworms to Acetamiprid.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Evans A.C. et Guild W. J. (1948). Studies on the Relationships Between Earthworms and Soil Fertility, *Annals of Applied Biology*. Vol. 35: 471–484.
- FAO, ITPS, GSBI, SCBD, and EC. (2020). State of knowledge of soil biodiversity—Status, challenges and potentialities. FAO.
- Feng, L., Zhang, L., Zhang, Y., Zhang, P., & Jiang, H. (2015). Inhibition and recovery of biomarkers of earthworm *Eisenia fetida* after exposure to thiacloprid. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 9475-9482.
- Fernández, R., Almodóvar, A., Novo, M., Simancas, B., Díaz Cosín, D.J. (2012). Adding complexity to the complex: new insights into the phylogeny, diversification and origin of parthenogenesis in the Aporetodea caliginosa species complex (Oligochaeta, Lumbricidae). *Molecular Phylogenetics and Evolution* 64, 368-379.
- Fitzpatrick P.J., O'Halloran J., Sheehan D. & Walsh A.R. (1997). Assessment of a glutathione S-transferase and related proteins in the gill and digestive gland of *Mytilus edulis*(L.) as potential organic pollution biomarkers. *Biomarkers*, 2: 51–56.
- Fournier, F. (1988). *Les forêts pluviales d'Amérique du Sud : gestion et conservation*. Paris : L'Harmattan.
- Frampton, G. K., Jänsch, S., Scott-Fordsmand, J. J., Römbke, J., & Van den Brink, P. J. (2006). Effects of pesticides on soil invertebrates in laboratory studies: a review and analysis using species sensitivity distributions. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 25(9), 2480-2489.
- Gangadhar, D., Babu, P. V., Pamanji, R., & Srikanth, K. (2021). The pursuit of alachlor herbicide toxicity on *Eisenia fetida* and its biochemical responses. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 1-10.
- Garcia, M. (2004). *Effects of pesticides on soil fauna: development of ecotoxicological test methods for tropical regions* (Vol. 19). Cuvillier Verlag.
- Garcia, M., Scheffczyk, A., Garcia, T. and Rombke, J. (2011). The effects of the insecticide lambda-cyhalothrin on the earthworm *Eisenia fetida* under experimental conditions of tropical and temperate regions. *Environ. Pollut.* 159: 398-400.
- Gerard B. M. (1967). Factors affecting earthworms in pastures. *J. Anim. Ecol.* 36: 235-252.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Gherhardt, T., & Bolcu, C. (2011). Avoidance Behavior of *Eisenia Fetida* to Acetone, Deltamethrin and Glyphosate. *New Frontiers in Chemistry*, 20(2), 1.
- Gibbs, M. H., Wicker, L. F., & Stewart, A. J. (1996). A method for assessing sublethal effects of contaminants in soils to the earthworm, *Eisenia foetida*. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 15(3), 360-368.
- Gobi, M., & Gunasekaran, P. (2010). Effect of butachlor herbicide on earthworm *Eisenia fetida*—its histological perspicuity. *Applied and Environmental Soil Science*, 2010(1), 850758.
- Habig WH, Pabst MJ, Jakoby WB. (1974). Glutathione-S-transferase: the first enzymatic step in mercapturic acid formation. *Journal of Biological Chemistry* 249, 7130-7139.
- Hackenberger, D. K., Stjepanović, N., Lončarić, Ž., & Hackenberger, B. K. (2018). Acute and subchronic effects of three herbicides on biomarkers and reproduction in earthworm *Dendrobaena veneta*. *Chemosphere*, 208, 722-730.
- Halaimia, S., Tine, S., Tine-Djebbar, F., & Soltani, N. (2021). Potential side-effects of a fertilizer on growth, biochemical composition and biomarker responses of the grey worm (*Aporrectodea caliginosa* Savigny, 1826). *Applied Ecology and Environmental Research*, 19(2), 1247-1266.
- Hartenstein, R. et Amico, L. (1983). Production and carrying capacity for the earthworm *Lumbricus terrestris* in culture. *Soil Biol. Biochem.* 15, 51-54.
- Hudu, M., Issifu, A., & Zarouk, I. A. (2021). An assessment of the effects of herbicides on the population density of earthworms (*Lumbricus terrestris*) in soil. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 13(3), 1314-1326.
- Inserm (Institut National de la Santé Et de la Recherche Médicale)., (2013). Expertise collective. Pesticides, effets sur la santé, 2013. <http://editions.inserm.fr/zh5/109743>.
- Jebali J., Banni M., De Almeida E.A., Boussetta H., (2007). Oxidative DNA damage levels and catalase activity in the clam *Ruditapes decussatus* as pollution biomarkers of Tunisian marine environment. *Environ.Monit.Assess.*, 124: 195–200.
- Jiang, L., Yang, Y., Zhang, Y., Liu, Y., Pan, B., Wang, B., & Lin, Y. (2019). Accumulation and toxicological effects of nonylphenol in tomato (*Solanum lycopersicum* L) plants. *Scientific reports*, 9(1), 7022.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Jouni, F., Brouchoud, C., Capowiez, Y., Sanchez-Hernandez, J. C., & Rault, M. (2021). Elucidating pesticide sensitivity of two endogeic earthworm species through the interplay between esterases and glutathione S-transferases. *Chemosphere*, 262, 127724.
- Junghans, T. G., et al. (2003). The role of renewable energy in sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(6), 437-471.
- Kamrin MA, Montgomery JH (2000). Agrochemical and pesticide desk reference. CD-ROM. Chapman and Hall CRC net BASE. Int. Ed.
- Khan, M. A. I., Biswas, B., Smith, E., Naidu, R., & Megharaj, M. (2018). Toxicity assessment of fresh and weathered petroleum hydrocarbons in contaminated soil-a review. *Chemosphere*, 212, 755-767.
- Kherbouche, D., Bernhard-Reversat, F., Moali, A., & Lavelle, P. (2012). The effect of crops and farming practices on earthworm communities in Soummam valley, Algeria. *European Journal of Soil Biology*, 48, 17-23.
- Kneafsey, M., Venn, L., Schmutz, U., Balázs, B., Trenchard, L., Eyden-Wood, T., ... & Blackett, M. (2013). Short food supply chains and local food systems in the EU. A state of play of their socio-economic characteristics. JRC scientific and policy reports, 123, 129.
- Kokta C (1992). Measuring effects of chemicals in the laboratory—effect criteria and endpoints. In: Greig-Smith PW, Becker H, Edwards PJ, Heimbach F (eds) *Ecotoxicology of earthworms*. Intercept, London, pp 55–62.
- Kpan, G. K. K., Ehouman, M. N. G., Toure, M., Brou, L. Y., Tiho, S., Traore, S. K., & Dembele, A. (2018). Toxicité d'un Herbicide à base de Glyphosate sur le ver de Terre *Eudrilus Eugeniae* KINBERG, 1867 (Oligochaeta, Eudrilidae).
- L.H. Booth, V. Heppelthwaite and C.T. Eason. (1998). Cholinesterase And Glutathione S- Transferase In The Earthworm *Apporectodea Caliginosa* As Biomarkers Of Organophosphate Exposure. *Proc. 51st N.Z. Plant Protection Conf.* 138-142.
- Labrot, F., Ribera, D., Tisnerat, G., Cabridenc, R., & Narbonne, J. F. (1996). Le plomb dans l'environnement: sources, mecanismes de transfert et effets biologiques. *Méthodes d'analyse du plomb dans l'environnement*. Lavoisier éditeur, Paris, 3-15.
- Lakhani, K. H. et Satchell, J. E., (1970). Production by *Lumbricus terrestris* (L.). *J. Anim. Ecol.* 39, 473-492.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Lammertyn, S., Masín, C. E., Zalazar, C. S., & Fernandez, M. E. (2021). Biomarkers response and population biological parameters in the earthworm *Eisenia fetida* after short term exposure to atrazine herbicide. *Ecological Indicators*, 121, 107173.
- Lata, H. (2017). Impact of herbicides on biomolecular constituents of *Eisenia fetida*. *J Entomol Sci Zool Stud*, 5(2), 1375-1378.
- Latif, M., Iqbal, J., & Ahmad, R. (2009). Impact of land use on earthworm population and diversity in Lahore, Pakistan. *Pakistan Journal of Zoology*, 41(6), 471-476.
- Lavelle, P., & Spain, A. V. (2001). *Soil Ecology* Kluwer Scientific Publications.
- Lee KE. (1985). *Earthworms: Their ecology and relationships with soil and land use*. Academic Press, London.
- Lee, K. E., & Foster, R. C. (1991). Soil fauna and soil structure. *Soil Research*, 29(6), 745-775.
- Li, M., Ma, X., Saleem, M., Wang, X., Sun, L., Yang, Y., & Zhang, Q. (2020). Biochemical response, histopathological change and DNA damage in earthworm (*Eisenia fetida*) exposed to sulfentrazone herbicide. *Ecological indicators*, 115, 106465.
- Li, X., Zhu, L., Du, Z., Li, B., Wang, J., Wang, J., & Zhu, Y. (2018). Mesotrione-induced oxidative stress and DNA damage in earthworms (*Eisenia fetida*). *Ecological indicators*, 95, 436-443.
- Livingstone D.R. (2003). Oxidative stress in aquatic organisms in relation to pollution and aquaculture. *Rev Med Vet.*, 154: 427–430.
- Livingstone D.R., Lemaire P., Matthews A., Peters L., Bucke D. & Amlap W.R., (1993). Pro- oxidant, anti-oxidant and 7-Ethoxyresorufin-O-deethylase (EROD) activity responses in liver of Dab (*Limanda limanda*) exposed to sediment contaminated with hydrocarbons and other chemicals. *Mar. Pollut. Bull.*, 26: 602-606.
- Lofs-Holmin, A. (1982). Reproduction and growth of common arable land and pasture species of earthworms (Lumbricidae) in laboratory cultures. *Swed. J. Agr. Res.* 13, 31-37.
- Loureiro, S., Soares, A. M., & Nogueira, A. J. (2005). Terrestrial avoidance behaviour tests as screening tool to assess soil contamination. *Environmental pollution*, 138(1), 121-131.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Lowe, C. N. et Butt, K. R. (2002). Growth of hatchling earthworms in the presence of adults: interactions in laboratory culture. *Biol. Fertil. Soils* 35, 204-209.
- Lukkari, T., Taavitsainen, M., Väisänen, A., & Haimi, J. (2004). Effects of heavy metals on earthworms along contamination gradients in organic rich soils. *Ecotoxicology and environmental safety*, 59(3), 340-348.
- Maboeta, M. S., Reinecke, A. J., & Reinecke, S. A. (1999). Effects of low levels of lead on growth and reproduction of the Asian earthworm *Perionyx excavatus* (Oligochaeta). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 44(3), 236-240.
- Ma, W. C., & Bodt, J. (1993). Differences in toxicity of the insecticide chlorpyrifos to six species of earthworms (Oligochaeta, Lumbricidae) in standardized soil tests.
- Martin, A. (1991). Short-and long-term effects of the endogeic earthworm *Millsonia anomala* (Omodeo) (Megascolecidae, Oligochaeta) of tropical savannas, on soil organic matter. *Biology and Fertility of Soils*, 11, 234-238.
- Martin C., Naim P., Carion J F et Dholland F. (2011). Les lombriciens : outils de gestion des agro-systèmes. 14 et 15 décembre 2011, ACCES et NANTES, Versailles – Lyon. P 27.
- Martin, N. A. (1982). The effect of herbicides used on asparagus on the growth rate of the earthworm *Allolobophora caliginosa*. *New Zealand Plant Protection*, 35, 328-331.
- Mekahlia, M. N., Tine, S., Menasria, T., Amieur, H., & Salhi, H. (2016). In vitro biomarker responses of earthworm *Lumbricus terrestris* exposed to herbicide sekator and phosphate fertilizer. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227, 1-8.
- Misirlioğlu, M., Reynolds, J., Stojanović, M., Trakić, T., Sekulić, J., James, S., ... & Brown, G. (2023). Earthworms (Clitellata, Megadrili) of the world: an updated checklist of valid species and families, with notes on their distribution. *Zootaxa*.
- Mosleh, Y. Y., Ismail, S. M., Ahmed, M. T., & Ahmed, Y. M. (2003). Comparative toxicity and biochemical responses of certain pesticides to the mature earthworm *Aporrectodea caliginosa* under laboratory conditions. *Environmental Toxicology: An International Journal*, 18(5), 338-346.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Mosleh, Y. Y., Paris-Palacios, S., & Biagiante-Risbourg, S. (2006). Metallothioneins induction and antioxidative response in aquatic worms *Tubifex tubifex* (Oligochaeta, Tubificidae) exposed to copper. *Chemosphere*, 64, 121–128.
- MNHN & OFB [Ed]. 2003-2024. Inventaire national du patrimoine naturel (INPN), Site web : <https://inpn.mnhn.fr> Le 27 mai 2024.
- Nasr, H. M., & Badawy, M. E. (2015). Biomarker response and biomass toxicity of earthworms *Aporrectodea caliginosa* exposed to IGRs pesticides. *J Environ Anal Toxicol*, 5(332), 2161-0525.
- Neuhauser EF, Callahan CA (1990). Growth and reproduction of the earthworm *Eisenia fetida* exposed to sublethal concentrations of organic chemicals. *Soil Biol Biochem* 2.
- Odum HT (1982) Pulsing, power, and hierarchy. In: Mitsch WJ, Ragade RK, Bosserman RW, Dillon JJA (eds) *Energetics and systems*. Ann Arbor Science Publishing, Ann Arbor, pp 33–60.
- Olvera-Velona, A., Capowiez, Y., Mascle, O., Ortiz-Hernandez, L., & Benoit, P. (2008). Assessment of the toxicity of ethyl-parathion to earthworms (*Aporrectodea caliginosa*) using behavioural, physiological and biochemical markers. *Applied Soil Ecology*, 40(3), 476-483.
- Omodeo, P., Rota, E., & Baha, M. (2003). The megadrile fauna (Annelida: Oligochaeta) of Maghreb: a biogeographical and ecological characterization: The 7th international symposium on earthworm ecology· Cardiff· Wales· 2002. *Pedobiologia*, 47(5-6), 458-465.
- Oruç, E. Ö., & Üner, N. (2000). Combined effects of 2, 4-D and azinphosmethyl on antioxidant enzymes and lipid peroxidation in liver of *Oreochromis niloticus*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Pharmacology, Toxicology and Endocrinology*, 127(3), 291-296.
- Otmani, H., Tadjine, A., Moumeni, O., Zeriri, I., Amamra, R., Samira, D. B., ... & Berrebbah, H. (2018). Biochemical responses of the earthworm *Allolobophora caliginosa* exposed to cadmium contaminated soil in the Northeast of Algeria. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Owagboriaye, F., Dedeke, G., Bamidele, J., Aladesida, A., Isibor, P., Feyisola, R., & Adeleke, M. (2020). Biochemical response and vermiremediation assessment of three earthworm species (*Alma millsoni*, *Eudrilus eugeniae* and *Libyodrilus violaceus*) in soil contaminated with a glyphosate-based herbicide. *Ecological indicators*, 108, 105678.
- Robidoux, P. Y., Hawari, J., Thiboutot, S., Ampleman, G., & Sunahara, G. I. (1999). Acute toxicity of 2, 4, 6-trinitrotoluene in earthworm (*Eisenia andrei*). *Ecotoxicology and environmental safety*, 44(3), 311-321.
- Pandey, S. P., & Mohanty, B. (2015). The neonicotinoid pesticide imidacloprid and the dithiocarbamate fungicide mancozeb disrupt the pituitary–thyroid axis of a wildlife bird. *Chemosphere*, 122, 227-234.
- Pelosi, C., Joimel, S., & Makowski, D. (2013). Searching for a more sensitive earthworm species to be used in pesticide homologation tests—a meta-analysis. *Chemosphere*, 90(3), 895-900.
- Pelosi, C., Barot, S., Capowiez, Y., Hedde, M., & Vandebulcke, F. (2014). Pesticides and earthworms. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 199-228.
- Perreault, J. M., & Whalen, J. K. (2006). Earthworm burrowing in laboratory microcosms as influenced by soil temperature and moisture. *Pedobiologia*, 50(5), 397-403.
- Pesticide Management division, NIPHM; Pesticide classification on use, chemical nature, formulation toxicity and action, etc, Hyderabad p.1-17 [Cité le 5 Mai 2018] disponible sur : <http://www.niphm.gov.in>
- Pfiffner, L. (2013). Regenwürmer-Baumeister fruchtbarer Böden.
- Phillips, H. R. P., Cameron, E. K., Ferlian, O., Türke, M., Winter, M., & Eisenhauer, N. (2017). Red list of a black box. *Nature Ecology and Evolution*, 1, 103.
- Pearce, T. G., & Pearce, B. (1979). Responses of Lumbricidae to saline inundation. *Journal of Applied Ecology*, 461-473.
- Pimentel D. (1995). Amounts of pesticides reaching target pests: environmental impacts and ethics. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 8, 17-29.
- Prather, T., Ditomaso, J., & Holt, J. (2000). Herbicide resistance: Definition and management strategies. UCANR Publications.
- Regnault-Roger, C., Philogène, B. J., & Vincent, C. (2005). *Biopesticides of Plant Origin*. Lavoisier Publishing.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Reinecke, A. J., Maboeta, M. S., Vermeulen, L. A., & Reinecke, S. A. (2002). Assessment of lead nitrate and mancozeb toxicity in earthworms using the avoidance response. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 68(6), 779-786.
- Reinecke, S. A., & Reinecke, A. J. (2007). The impact of organophosphate pesticides in orchards on earthworms in the Western Cape, South Africa. *Ecotoxicology and environmental safety*, 66(2), 244-251.
- Römbke, J., S. Jänsch & W. Didden. (2005). The use of earthworms in ecological soil classification and assessment concepts. – *Ecotoxicology and Environmental Safety* 62: 249-265.
- Russell, M. H., Saladini, J. L., & Lichtner, F. (2002). Sulfonylurea herbicides. *Pesticide Outlook*, 13(4), 166-173.
- Sánchez-del Cid, E. L., Osten, J. R. V., Dzul-Caamal, R., González-Chávez, M. D. C. Á., Torres-Dosal, A., & Huerta-Lwanga, E. (2024). Biochemical Response of the Endogeic Earthworm (*Balanteodrilus extremus*) Exposed to Tropical Soils. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 112(2), 35.
- Sanchez-Hernandez, J. C., Narvaez, C., Sabat, P., & Mocillo, S. M. (2014). Integrated biomarker analysis of chlorpyrifos metabolism and toxicity in the earthworm *Aporrectodea caliginosa*. *Science of the Total Environment*, 490, 445-455.
- Satchell, J. E. (1967). Lumbricidae. In: Burges, A. et Raw, F. (eds), *Soil Biology*. Academic Press, London, pp. 259-322.
- Savigny, J.C (1826) : Analyse d'un Mémoire sur les Lombrics par Cuvier. *Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut de France*.
- Scherber, C., Eisenhauer, N., Weisser, W. W., Schmid, B., Voigt, W., Fischer, M., Schulze, E.-D., Roscher, C., Weigelt, A., Allan, E., Beßler, H., Bonkowski, M., Buchmann, N., Buscot, F., Clement, L. W., Ebeling, A., Engels, C., Halle, S., Kertscher, I., ... Tschardtke, T. (2010). Bottom-up effects of plant diversity on multitrophic interactions in a biodiversity experiment. *Nature*, 468, 553–556.
- Schreck, E., Geret, F., Gontier, L., & Treilhou, M. (2009). ChE, GST and CAT: evaluation of the efficiency of a combined buffer for protein extraction. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72, 1609–1613.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Schuldt, A., Assmann, T., Brezzi, M., Buscot, F., Eichenberg, D., Gutknecht, J., Härdtle, W., He, J.-S., Klein, A.-M., Kühn, P., Liu, X., Ma, K., Niklaus, P. A., Pietsch, K. A., Purahong, W., Scherer-Lorenzen, M., Schmid, B., Scholten, T., Staab, M., ... Bruelheide, H. (2018). Biodiversity across trophic levels drives multifunctionality in highly diverse forests. *Nature Communications*, **9**, 2989.
- Scullion, J., & Malik, A. (2000). Earthworm activity affecting organic matter, aggregation and microbial activity in soils restored after opencast mining for coal. *Soil Biology and Biochemistry*, *32*(1), 119-126
- SEKHARA-BAHA, M. (2008). Etude bioécologique des oligochètes du nord de l'Algérie (Doctoral dissertation, INA).
- Shailaja M.S. & D'Silva C. (2003). Evaluation of impact of PAH on a tropical fish, *Oreochromis mossambicus* using multiple biomarkers. *Chemosphere*, *53*: 835–841.
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Tanveer, M., Sidhu, G. P. S., Handa, N., Kohli, S. K., Yadav, P., Bali, A. S., Parihar, R. D., Dar, O. I., Singh, K., Jasrotia, S., Bakshi, P., Ramakrishnan, M., Kumar, S., Bhardwaj, R., & Thukral, A. K. (2019). Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. *SN Applied Sciences*, **1**, 1446.
- Sies H. (1993). Strategies of antioxidant defenses. *Eur J Bio-chem.*, *215*: 213–219.
- Sims, R. W. & Gerard, B. M. (1999). Earthworms. In: Barnes, R. S. K. & Crothers, J. H. (Eds.), *Synopses of the British Fauna (New Series) No. 31 (Revised)*, London: E. J., 167 pp.
- Soliveres, S., van der Plas, F., Manning, P., Prati, D., Gossner, M. M., Renner, S. C., Alt, F., Arndt, H., Baumgartner, V., Binkenstein, J., Birkhofer, K., Blaser, S., Blüthgen, N., Boch, S., Böhm, S., Börschig, C., Buscot, F., Diekötter, T., Heinze, J., ... Allan, E. (2016). Biodiversity at multiple trophic levels is needed for ecosystem multifunctionality. *Nature*, **536**, 456–459.
- Stanley, J., Preetha, G., Stanley, J., & Preetha, G. (2016). Pesticide toxicity to earthworms: exposure, toxicity and risk assessment methodologies. *Pesticide Toxicity to Non-target Organisms: Exposure, Toxicity and Risk Assessment Methodologies*, 277-350.
- Sturzenbaum, S. R., Winters, C., Galay, M., Morgan, A. J., & Kille, P. (2001). Metal ion trafficking in earthworms. *Journal of Biological Chemistry*, *276*(36), 34013-34018.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Taylor, A. R., Lenoir, L., Vegerfors, B., & Persson, T. (2019). Ant and earthworm bioturbation in cold-temperate ecosystems. *Ecosystems*, 22, 981-994.
- Terry, R. Roberts, David H. Hutson, Philip W. Lee, Peter H. Nicholls et Jack R. Plimmer. (1998). *Metabolic pathways of agrochemicals*. Royal society of chemistry. UK.
- Toshiyuki Katagi and Keiko Ose. (2015). Toxicity, bioaccumulation and metabolism of pesticides in the earthworm. *J. Pestic. Sci.* 40(3), 69–81.
- Van Gestel, C. A. M., & Van Dis, W. A. (1988). The influence of soil characteristics on the toxicity of four chemicals to the earthworm *Eisenia fetida andrei* (Oligochaeta). *Biology and Fertility of Soils*, 6, 262-265.
- Velki, M., & Hackenberger, B. K. (2013). Biomarker responses in earthworm *Eisenia andrei* exposed to pirimiphos-methyl and deltamethrin using different toxicity tests. *Chemosphere*, 90(3), 1216-1226.
- Wagg, C., Bender, S. F., Widmer, F., & Heijden, M. G. A. v. d. (2014). Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **111**, 5266–5270.
- Wang, Z., Walker, G. W., Muir, D. C. G., & Nagatani-Yoshida, K. (2020). Toward a global understanding of chemical pollution: A first comprehensive analysis of national and regional chemical inventories. *Environmental Science & Technology*, **54**, 2575–2584.
- Wardle, D. A. (2002). *Communities and ecosystems: Linking the aboveground and belowground components* (MPB-34). Princeton University Press.
- Whalen, J. K. et Parmelee, R. W. (1999). Growth of *Aporrectodea tuberculata* (Eisen) and *Lumbricus terrestris* L. under laboratory and field conditions. *Pedobiol.* 43, 1-10.
- WETZEL, M. J., & REYNOLDS, J. W. (2023). *Nomenclatura Oligochaetologica—A catalogue of names, descriptions, and type specimens of the Oligochaeta*. Editio Secunda. *Zoosymposia*, 23, 98-100.
- Yao, X., Zhang, F., Qiao, Z., Yu, H., Sun, S., Li, X., ... & Jiang, X. (2020). Toxicity of thifluzamide in earthworm (*Eisenia fetida*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 188, 109880.
- Yasmin, S., & D'Souza, D. (2007). Effect of pesticides on the reproductive output of *Eisenia fetida*. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 79, 529-532.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Yasmin, S., & D' Souza, D. (2010). Effects of pesticides on the growth and reproduction of earthworm: a review. *Applied and Environmental soil science*, 2010(1), 678360.
- ZERIRI, I. (2014). Toxicité potentielle d'un insecticide sur un invertébré de la famille des coelomates (Doctoral dissertation, Université de Annaba-Badji Mokhtar).
- Zeriri, I., Tadjine, A., Belhaouchet, N., Berrebbah, H., Djebbar, M. R., & Baha, M. (2013). Contribution to the identification of Oligochaeta: Lumbricidae in the region of Annaba in eastern Algeria. *European Journal of Experimental Biology*, 3(6), 229-232.
- Zhang, X., Wang, X., Liu, Y., Fang, K., & Liu, T. (2020). The toxic effects of sulfoxaflor induced in earthworms (*Eisenia fetida*) under effective concentrations. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5), 1740.
- Zhang, Y., Zhang, L., Feng, L., Mao, L., & Jiang, H. (2017). Oxidative stress of imidaclothiz on earthworm *Eisenia fetida*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 191, 1-6.
- Zhou, C. F., Wang, Y. J., Li, C. C., Sun, R. J., Yu, Y. C., & Zhou, D. M. (2013). Subacute toxicity of copper and glyphosate and their interaction to earthworm (*Eisenia fetida*). *Environmental pollution*, 180, 71-77.
- Zirbes, L., Mescher, M., Vrancken, V., Wathelet, J. P., Verheggen, F. J., Thonart, P., & Haubruge, E. (2011). Earthworms use odor cues to locate and feed on microorganisms in soil. *PLoS One*, 6(7), e21927.