

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة – الحراش – الجزائر

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE AGRONOMIQUE EL-HARRACH – ALGER

## Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD en sciences agronomiques

Option : Agro-écosystèmes et stress biologique

THÈME

Étude des relations : *Globodera rostochiensis*  
Wollenweber – pomme de terre et Recherche  
de méthodes alternatives à l'égard de ce bioagresseur

Présentée par : BERRAHIA Safia

Soutenue le : 17/10/2024

Devant le Jury composé de :

Présidente	: Mme. BOUREGHDA. H,	Professeure à ENSA – EL Harrach (Alger)
Directrice de thèse	: Mme. SELLAMI. S,	Professeure à ENSA – EL Harrach (Alger)
Examineurs	: Mme. BEHIDJ. N,	Professeure à Univ. M'hamed Bougara – (Boumerdes)
	: Mme. HOCEINI. F,	MCA - Univ. Mohamed Boudiaf – (M'sila)

Année universitaire : 2023-2024

## Dédicace



La mémoire de mon père qui nous a quittés trop tôt, qui a été pour moi, un exemple du père respectueux et honnête, je voudrais le remercier pour son amour, sa générosité, sa compréhension et son soutien sans faille. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi, mon cher papa. Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation et ma formation. Je t'aime papa et j'implore Dieu le tout Puissant et Miséricordieux de t'accorder Sa Sainte Miséricorde et t'accueillir en son vaste paradis.

Ma mère, qui est toujours présente et continue de l'être pour faire mon bonheur;

L'unique sœur, que j'ai au monde, qui été toujours à mes côtés, et Mon Mari ;

Mes frères Smad, Aïchem et Foucef pour leur soutien;

Mes belles sœurs et Mes nièces ;

Mes beaux-parents pour avoir m'accueillie dans leur maison à bras grands ouverts en me considérant comme leur fille ;

Mes beaux-frères Mahdi, Souleymane et Fouad pour leur soutien et leur humour ;

Mon cher Mari et Ma chère fille Shahd-Lina ;

Mon oncle Djamel et Ma tante Zakia pour leurs soutiens et leurs encouragements..

Tous les Membres de ma Grande Famille ;

Toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de cette thèse.

Je dédie ce travail.

Safia

## Remerciements

Après avoir passé une grande période de labeur constant et marqué à jamais par le souvenir des agréables moments que j'ai savourés à l'École Nationale Supérieure Agronomique – El-Harrach – Alger, pour s'y forger une expérience mémorable et y'acquérir le savoir tant recherché et surtout en compagnie d'une élite de sommités intellectuelles qui s'est dépensée sans compter pour m'inculquer l'aliment spirituel dont j'avais tant besoin, je ne vous quitterais pas sans vous faire part de la gratitude et de la reconnaissance éternelle à laquelle vous avez droit sur ma modeste personne en vous remerciant de tout cœur :

J'entends évoquer ici **Madame SELLAMI. S.**, professeure à l'École Nationale Supérieure Agronomique – El-Harrach – Alger (ENSA), et ma directrice de thèse pour avoir dirigé et suivi ce travail avec beaucoup d'intérêt. Je serais toujours reconnaissante envers elle pour sa confiance, ses claires voyantes orientations et également pour m'avoir appris la rigueur et la volonté de faire toujours mieux. Son écoute et ses conseils avisés, qui m'ont, à multiples reprises, redonnées le bon cheminement. Je la remercie pour son encadrement et son soutien où grâce à elle, les moments de découragement connus furent éphémères. Qu'elle soit vivement remerciée. Mes mots ne seraient jamais à la hauteur de la remerciée assez pour son investissement dans ce long travail de thèse.

J'entends évoquer **Madame BOURAGHDA. H.**, professeure à l'École Nationale Supérieure Agronomique – El-Harrach – Alger (ENSA), pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider le jury de soutenance. Qu'elle me permette d'exprimer mes remerciements les plus sincères.

J'entends évoquer **Madame BEHIDJ. N.**, professeure à l'université de M'hamed Bougara – Boumerdes – (UMBB) de nous avoir honoré de sa présence et d'avoir accepté d'examiner ce travail.

J'entends évoquer **Madame HOCEINI F.**, Maître de conférences classe « A » à l'université de Mohamed Boudiaf – M'sila – de nous avoir honoré de sa présence et d'avoir accepté d'examiner ce travail.

J'entends évoquer **Madame Cartea, M. E.**, Directrice du centre de la Mission Biologique de Galice « MBG » et **Monsieur Pablo, V.**, Docteur en Biologie au niveau du même centre, membres du Conseil Supérieur de la Recherche Scientifique d'Espagne (CSIC), ainsi que toute leur équipe pour l'accueil chaleureux et les facilités qu'ils m'ont accordés afin de pouvoir réaliser les travaux dont j'avais besoin.

J'entends évoquer **Madame BENHOUBOU. S.**, professeure et chef de département (**Botanique**) à l'École Nationale Supérieure Agronomique - El-Harrach - Alger (ENSA), et **Monsieur ABDELKRIM. H.**, professeur et chef de la formation doctorale pour leurs gentillesse et leurs conseils et orientations.

J'entends évoquer **Monsieur SELLAMI. M.**, professeur au département zoologie agricole à l'école nationale supérieure agronomique - El-Harrach - Alger, pour ses précieux conseils, ses orientations, son encouragement, sa disponibilité, sa motivation et son humour.

J'entends évoquer **Monsieur SELLAM. F.**, professeur au département de Génie rural (ENSA), et **Monsieur LATATI, M.**, professeur au département de Phytotechnie (ENSA) pour leur disponibilité, leur encouragement et surtout pour leur aide précieuse afin d'analyser et interpréter les données statistiques.

J'entends évoquer tous les professeurs de l'ENSA, plus particulièrement, **Mesdames : DJEBBARI. B., BENSLIMANE. H., BOUGHRAROU. F.**, et notre regrettée **LOUANCHI. M.**, et **Messieurs : BOUZNAD. Z., KEDAD. A., TRAIKIA. A.** et **TAOUTAOU. M.**, pour leurs formations, conseils et orientations avisés.

J'entends évoquer **Monsieur BOUNAR. R.**, professeur et chef de département (**SNV**) à l'université de Mohammed Boudiaf (M'sila) pour son soutien moral et ses conseils précieux, et **Monsieur Mimeche. F.**, professeur au département de sciences agronomiques à l'université de Mohammed Boudiaf (M'sila) de m'avoir aidé et orienter pour les analyses statistiques.

J'entends évoquer les ingénieurs de laboratoire ainsi que tous les techniciens de l'ENSA qui m'ont aidé durant mes expérimentations, plus particulièrement, **Fatima, Nesrine et Mohamed** du département de Botanique, et **Mohamed** du département Pédologie.

Enfin, j'entends évoquer; tous les enseignants et le personnel du département de Botanique, pour leurs générosités.

Que tous ceux et toutes celles que je viens d'évoquer trouvent ici, outre l'expression de mes remerciements sincères, le témoignage de ma gratitude et de ma reconnaissance.

**SERRAHIA Safia.**

## Liste des figures

<b>Figure 01:</b>	Distribution mondiale de <i>Globodera rostochiensis</i> .....	9
<b>Figure 02:</b>	Distribution mondiale de <i>Globodera pallida</i> .....	9
<b>Figure 03:</b>	Distribution géographique des nématodes à kystes de la pomme de terre <i>G. rostochiensis</i> et <i>G. pallida</i> en Algérie .....	10
<b>Figure 04:</b>	Cycle de développement des nématodes à kystes <i>G. rostochiensis</i> .....	11
<b>Figure 05:</b>	Symptômes d'attaques de <i>Globodera</i> .....	14
<b>Figure 06:</b>	Principaux produits de la dégradation des glucosinolates .....	19
<b>Figure 07:</b>	Schéma du Dispositif expérimental .....	36
<b>Figure 08:</b>	Effet des densités de population initiale ( $P_i$ ) de <i>G. rostochiensis</i> sur le rendement de la pomme de terre ( $r = -0,5930$ ; $p = 0,00002$ ).....	39
<b>Figure 09:</b>	Effet des densités de population initiale ( $P_i$ ) de <i>G. rostochiensis</i> sur la croissance de la pomme de terre ( $r = -0,5949$ ; $p = 0,00002$ ) .....	39
<b>Figure 10:</b>	Rapport fonctionnel entre la croissance (cm) et le rendement (g/pot) des plants de pomme de terre ( $r = 0,9962$ ; $p = 0,0000$ ) .....	40
<b>Figure 11:</b>	Effet des densités de population initiale ( $P_i$ ) de <i>G. rostochiensis</i> sur la densité de population finale ( $P_f$ ) ( $r = 0,9961$ ; $p = 0,0000$ ) .....	40
<b>Figure 12:</b>	Effet des densités de population initiale ( $P_i$ ) de <i>G. rostochiensis</i> sur le facteur de reproduction ( $R_f$ ) ( $r = -0,1956$ ; $p = 0,5644$ ) .....	41
<b>Figure 13:</b>	Températures moyennes et précipitations enregistrées durant l'année 2016-2017 .....	49
<b>Figure 14:</b>	Températures moyennes et précipitations enregistrées durant l'année 2017-2018 .....	49
<b>Figure 15 :</b>	Températures du sol à 10 cm de profondeur enregistrées en 2016-2017 et 2017-2018 .....	50
<b>Figure 16 :</b>	Différents stades de développement de <i>G. rostochiensis</i> observés sous loupe binoculaire .....	53
<b>Figure 17 :</b>	Schéma du Dispositif expérimental .....	62
<b>Figure 18 :</b>	Système de chromatographie liquide à ultra-haute performance (UHPLC) (Thermo Dionex Ultimate 3000 LC) (A) connecté à un détecteur des molécules	

d'intérêt (B) .....	65
<b>Figure 19 :</b> Droites de régression de probits à différentes concentrations utilisées dans les extraits aqueux de <i>Raphanus sativus</i> sur la mortalité des larves (J2) de <i>G. rostochiensis</i> . .....	68
<b>Figure 20 :</b> Droites de régression de probits à différentes concentrations utilisées dans l'extrait aqueux de racines de <i>R. sativus</i> sur la mortalité des larves (J2) de <i>G. rostochiensis</i> . .....	69
<b>Figure 21 :</b> Droites de régression de probits à différentes concentrations utilisées dans l'extrait aqueux de feuilles de <i>Nasturtium officinale</i> sur la mortalité des larves (J2) de <i>G. rostochiensis</i> . .....	69
<b>Figure 22 :</b> Droites de régression de probits à différentes concentrations utilisées dans l'extrait aqueux de racine de <i>N. officinale</i> sur la mortalité des larves (J2) de <i>G. rostochiensis</i> . .....	70
<b>Figure 23 :</b> Activité nématocide de l'extrait aqueux de feuilles de <i>R. sativus</i> sur l'éclosion de <i>G. rostochiensis</i> . .....	73
<b>Figure 24 :</b> Activité nématocide de l'extrait aqueux de racines de <i>R. sativus</i> sur l'éclosion de <i>G. rostochiensis</i> . .....	74
<b>Figure 25 :</b> Activité nématocide de l'extrait aqueux de feuilles de <i>N. officinale</i> sur l'éclosion de <i>G. rostochiensis</i> . .....	74
<b>Figure 26 :</b> Activité nématocide de l'extrait aqueux de racines de <i>N. officinale</i> sur l'éclosion de <i>G. rostochiensis</i> . .....	75
<b>Figure 27 :</b> Pourcentages (%) d'augmentation de la croissance moyenne des plants de pomme de terre. ....	79
<b>Figure 28 :</b> Pourcentages (%) d'augmentation du poids moyen de tubercules de pomme de terre .....	79
<b>Figure 29 :</b> Schéma du Dispositif expérimental de l'effet des composts sur le développement de <i>G. rotochiensis</i> .....	92
<b>Figure 30 :</b> Pourcentages (%) d'augmentation de la croissance moyenne des plants de pomme de terre. ....	100
<b>Figure 31 :</b> Pourcentages (%) d'augmentation du poids moyen de tubercules de pomme de terre. ....	100

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1 :</b>	Effet de la biofumigation par des amendements végétaux de diverses espèces de <i>Brassicacées</i> vis-à-vis de <i>Globodera</i> .....	33
<b>Tableau 2 :</b>	Rendement de la pomme de terre et hauteur de plants liés à l'augmentation de la densité de population initiale (Pi) de <i>G.rostochiensis</i> . .....	38
<b>Tableau 3 :</b>	Différents stades de développement de <i>G. rostochiensis</i> sur les deux variétés de pomme de terre Spunta et Kondor pendant les deux saisons de plantation. ....	51
<b>Tableau 4 :</b>	Relation entre les différents stades de développement de <i>G. rostochiensis</i> et le Degré Jour sur les deux variétés de pomme de terre (cv. Spunta et Kondor) .....	52
<b>Tableau 5 :</b>	Les caractéristiques du nématicide Vydate <sup>®</sup> .....	59
<b>Tableau 6 :</b>	Effet des extraits aqueux de plantes sur la mortalité des larves (J2) de <i>G. rostochiensis</i> . .....	67
<b>Tableau 7 :</b>	Les DL50 pour la mortalité des larves (J2) de <i>G. rostochiensis</i> après les trois périodes d'exposition. ....	71
<b>Tableau 8 :</b>	Effet des extraits aqueux de plantes sur l'inhibition de l'éclosion des œufs de <i>G. rostochiensis</i> . ....	72
<b>Tableau 9 :</b>	Effet de l'engrais vert de <i>Raphanus sativus</i> et de <i>Nasturtium officinale</i> sur la multiplication de <i>G. rostochiensis</i> . ....	76
<b>Tableau 10 :</b>	Effet de différentes doses de l'engrais vert de <i>R. sativus</i> et de <i>N. officinale</i> sur l'augmentation de la croissance et du poids moyen de tubercules de pomme de terre .....	78
<b>Tableau 11 :</b>	Profil de Glucosinolates ( $\mu\text{mol.g}^{-1}$ ) identifiées à partir de feuilles et de racines de <i>Raphanus sativus</i> et de <i>Nasturtium officinale</i> . ....	80
<b>Tableau 12 :</b>	Analyse physico-chimique des différents composts utilisés .....	93
<b>Tableau 13 :</b>	Quantité en éléments fertilisants apportée pour chaque pot selon les différentes doses des composts. ....	95
<b>Tableau 14 :</b>	Effet des différents composts sur la multiplication de <i>G. rostochiensis</i> . ....	96
<b>Tableau 15 :</b>	Effet de différentes doses des trois composts sur l'augmentation de la croissance et du poids moyen de tubercules de pomme de terre .....	99

## Liste des abréviations

<b>NKPT</b>	Nématodes à Kyste de la pomme de terre.
<b>%</b>	Pour cent.
<b>°</b>	Degré.
<b>°C</b>	Degré Celsius.
<b>C</b>	Compost.
<b>CNCC</b>	Centre National de Control et de Certification des semences et des plants
<b>DJ<sub>6.2</sub></b>	Degré jours accumulé
<b>DPVCT</b>	Direction de la Protection des Végétaux et du Contrôle Technique
<b>ENSA</b>	École nationale supérieure Agronomique.
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization
<b>G.</b>	<i>Globodera</i>
<b>GSL</b>	Glucosinolates
<b>ha</b>	hectare.
<b>HCDS</b>	Haut-commissariat du développement de la steppe.
<b>INPV</b>	Institut National de le Protection des Végétaux
<b>ISR</b>	Résistance systémique induite
<b>J</b>	Stade juvénile
<b>JAP</b>	Jour après plantation
<b>MADR</b>	Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural
<b>MITC</b>	l'isothiocyanate de méthyle
<b>OEPP</b>	Organisation Européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes
<b>ONU</b>	Organisation des Nations Unies
<b>PGPR</b>	Plant growth promoting Rhizobacteria
<b>qx</b>	Quintaux.
<b>UMA</b>	Union du Maghreb Arabe (Algérie, Libye, Maroc, Mauritanie et Tunisie)
<b>PVY</b>	Potato Virus Y
<b>PVX</b>	Potato Virus X
<b>PVA</b>	Potato Virus A
<b>PLRV</b>	Potato leaf Roll virus

# SOMMAIRE

---

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## 1<sup>ère</sup> PARTIE : Analyse bibliographique

### Chapitre 1 : Généralités sur les nématodes à kyste du genre *Globodera*

1.1. Historique et origine des nématodes du genre <i>Globodera</i> .....	7
1.2. Répartition géographique des <i>Globodera</i> .....	8
1.3. Biologie et cycle de développement de <i>Globodera</i> spp .....	10
1.4. Symptôme, dégâts et seuil de nuisibilité.....	13

### Chapitre 2 : Gestion des nématodes à Kystes de la pomme de terre (*Globodera* spp)

2.1. Mesures préventives .....	15
2.2. Méthodes culturales .....	15
2.2.1. Rotation des cultures .....	16
2.2.2. Jachère .....	16
2.2.3. Plantes pièges .....	16
2.2.4. Amendements organiques .....	17
2.3. Méthodes physiques .....	23
2.4. Lutte chimique .....	24
2.5. Lutte génétique .....	25
2.6. Lutte biologique .....	27
2.6.1. Champignons nématophages .....	27
2.6.2. Bactéries antagonistes des nématodes .....	29
2.6.3. Substances naturelles ou extraits végétaux .....	30
2.7. Lutte intégrée .....	32

## 2<sup>ème</sup> PARTIE : Partie expérimentale

### Chapitre 3 : Effet des densités initiales de population

#### de *Globodera rostochiensis* sur le rendement et la croissance de la pomme de terre

Objectif de l'étude.....	34
3.1. Matériels et méthodes.....	34
3.1.1. Matériel biologique .....	34
3.1.2. Matériel végétal .....	34
3.1.3. Plantation et inoculation .....	35

3.1.4. Dispositif expérimental .....	35
3.1.5. Analyses statistiques .....	36
3.2. Résultats .....	37
3.2.1. Effet de <i>G. rostochiensis</i> sur la croissance et le rendement des plants de pomme de terre .....	37
3.2.2. Effet de <i>G. rostochiensis</i> sur le développement de la population et le taux de multiplication .....	38
3.3. Discussion .....	41

#### **Chapitre 4 : Contribution à l'étude biologique du nématode à kystes *G. rostochiensis*.**

Objectif de l'étude.....	45
4.1. Matériels et méthodes.....	45
4.1.1. Caractéristiques de la parcelle expérimentale .....	45
4.1.2. Température et précipitations .....	45
4.1.3. Matériel végétal .....	45
4.1.4. Plantation .....	47
4.1.5. Coloration des nématodes à la fuchsine .....	47
4.2. Résultats .....	48
4.3. Discussion .....	54

#### **Chapitre 5 : Evaluation de l'activité nématocide de deux espèces appartenant à la famille des *Brassicacées* à l'égard de *Globodera rostochiensis*.**

Objectif de l'étude .....	58
5.1. Matériels et méthodes.....	58
5.1.1. Matériel biologique .....	58
5.1.2. Matériel végétal .....	58
5.1.3. Nématocide utilisé .....	58
5.1.4. Préparation des extraits aqueux .....	59
5.1.5. Préparation des exsudats racinaires .....	60
5.1.6. Test <i>in vitro</i> : activité nématocide des extraits aqueux de feuilles et de racines des plantes de brassicacées (le Radis et le Cresson) vis-à-vis de <i>G. rostochiensis</i> .....	60
5.1.7. Test <i>in vivo</i> : Effet de <i>Raphanus sativus</i> et <i>Nasturtium officinale</i> sur le développement de <i>G. rostochiensis</i> .....	61
5.1.8. Identification des métabolites secondaires du radis ( <i>R. sativus</i> ) et de cresson ( <i>N. officinale</i> ) .....	63

5.1.9. Analyses statistiques .....	64
5.2. Résultats .....	66
5.2.1. Test <i>in vitro</i> : activité nématocide des extraits aqueux de feuilles et de racines des plantes de brassicacées (le radis et le cresson) vis-à-vis de <i>G. rostochiensis</i> .....	66
5.2.2. Test <i>in vivo</i> : activité nématocide de l'engrais vert de <i>R. sativus</i> et de <i>N. officinale</i> à l'égard de <i>G. rostochiensis</i> .....	75
5.2.3. Identification des métabolites secondaires à partir des plantes testées .....	80
5.3. Discussion .....	82

## **Chapitre 6 : Effet de trois types de compost sur le développement des populations de *G. rostochiensis*.**

Objectif de l'étude .....	89
6.1. Matériels et méthodes.....	89
6.1.1. Matériel biologique .....	89
6.1.2. Matériel végétal .....	89
6.1.3. Nématocide utilisé .....	89
6.1.4. Composts utilisé .....	89
6.1.5. Analyses physico-chimiques des composts utilisés .....	90
6.1.6. Test <i>in vivo</i> : Effet des composts sur le développement de <i>G. rostochiensis</i> .....	91
6.1.7. Analyses statistiques .....	91
6.2. Résultats .....	93
6.2.1. Analyses physico-chimiques des composts .....	93
6.2.2. Effet des composts sur le développement de <i>G. rostochiensis</i> .....	95
6.2.3. Effet des composts sur la croissance et les rendements de pomme de terre .....	97
6.3. Discussion .....	101
<b>Conclusion et perspectives</b> .....	<b>106</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>110</b>

**Annexes.**

**Résumés.**

# **Introduction**

## Introduction

La croissance démographique galopante, qui devrait atteindre 8.5 milliards d'individus en 2030 et dépasser les 11 milliards d'habitants d'ici 2100 (ONU, 2022), nous impose le défi d'assurer l'approvisionnement en nourriture et en ressources énergétiques, sans compromettre la santé humaine et l'environnement.

Devant cette situation, il est évident que nous avons besoin de systèmes agricoles plus sains et plus durables, permettant une augmentation significative des rendements, tout en réduisant l'impact des effets négatifs générés par les facteurs environnementaux défavorables, et les maladies causées par des agents pathogènes sur les cultures (Guzmán-Guzmán, 2019). Pour ce faire, les chercheurs, de toutes les disciplines, essayeront de proposer de nouvelles méthodes et/ou moyens, répondant aux satisfactions environnementales et socio-économiques (FAO, 2011).

En agriculture, le maraîchage occupe une place importante pour l'alimentation humaine, et constitue l'un des systèmes agricoles les plus productifs d'Afrique, et des pays du Maghreb Arabe (UMA) (Yarou et *al.*, 2017 ; Jourdan et *al.*, 2022). En Algérie, les cultures maraîchères sont l'une des principales composantes de l'économie du pays et ont connu une évolution considérable ces dernières années. En effet, la production est passée de 124.7 millions de quintaux à 146,7 millions de quintaux durant la période 2015-2019, soit un taux d'accroissement de 15 % en production (MADR, 2021).

Faisant partie des cultures maraîchères, la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) figure parmi les cinq premières cultures en importance dans le monde, et la troisième culture alimentaire consommée régulièrement par des milliards de personnes. Elle est cultivée sur plus de 23,5 millions d'hectares dans 160 pays, pour une production mondiale totale de 470,41 millions de tonnes en 2022 (FAOSTAT, 2024). En améliorant les rendements et en utilisant pleinement les zones historiques de culture de la pomme de terre, la production mondiale pourra dépasser le seuil de 500 millions de tonnes en 2025 et 750 millions de tonnes en 2030 (Qu, 2022).

En Algérie, la pomme de terre occupe une place prépondérante dans l'agriculture, elle est cultivée sur une superficie de 130 396 ha, avec une production de 4 299 816 tonnes, et un rendement de 329,75 qx/ha pour l'année 2022, ce qui permis à l'Algérie d'être classée au premier rang de la production de la pomme de terre en Afrique (FAOSTAT, 2024).

Cependant, cette production est instable d'une année sur l'autre et d'une saison à une autre (annexe 1). Cela est dû à plusieurs contraintes liées à des facteurs abiotiques et biotiques parmi lesquels nous citons les maladies causées par les champignons, les virus, les bactéries et les nématodes phytoparasites. Parmi ces derniers, les nématodes à kystes du genre *Globodera* qui sont l'un des ravageurs les plus difficiles à gérer dans le monde (Mhatre et al., 2022) et responsables des dégâts qualitatifs et quantitatifs considérables (Sysoeva et al., 2012 ; Were et al., 2013).

Ainsi, l'infestation par les nématodes du genre *Globodera*, par les deux espèces : *Globodera rostochiensis* (Wollenweber, 1923) et *Globodera pallida* (Stone, 1972) peut causer des pertes de rendement évaluées à plus de 9 % de la production mondiale de pomme de terre (Sabeh, 2019), et pouvant atteindre 80 % selon le cultivar, la saison et la densité du sol (Turner et Evans, 1998 ; Kerlan et al., 2012 ; Singh et al., 2013).

La gestion de ces bioagresseurs reste difficile compte tenu de leur extrême résistance aux conditions climatiques et de leur grande variabilité physiologique ; ils ont la capacité de rester dans le sol pendant plusieurs décennies (Duceppe et al., 2017), et ont un grand pouvoir d'adaptations biologiques et écologiques (Evans et Stone, 1977). Néanmoins, diverses stratégies sont utilisées pour lutter contre les nématodes telles que la rotation des cultures, l'utilisation des plantes pièges, l'application des amendements organiques, la solarisation du sol, l'utilisation des nématicides, l'emploi des variétés résistantes et la lutte biologique. Cependant, certaines de ces stratégies ont montré des résultats plus ou moins efficaces, et chacune d'entre elle est sujette à diverses limitations (Ochola et al., 2021).

En effet, l'emploi des nématicides a été interdite ou restreinte dans plusieurs pays en raison de leur toxicité pour la santé humaine et de leur impact néfaste sur l'environnement (Kawanobe et al., 2019). De même, les méthodes de lutttes culturales basées sur la rotation des cultures et les plantes pièges permettent de limiter les populations de *Globodera* spp., mais elles doivent être surveillées de près, car elles sont rarement efficaces à 100 % ; dépendent des conditions climatiques, lentes et peuvent être coûteuses (Price et al., 2021). Ainsi, le processus de la solarisation est moins utilisé, il dépend du climat local (Chauvin et al., 2008), son application est possible uniquement sur des petites surfaces en raison du coût élevé (Eoche-Bosy et al., 2017).

Aussi, l'utilisation des variétés résistantes représente une méthode clé et efficace de lutte contre les nématodes à kyste de pomme de terre, or que la production d'un cultivar résistant nécessite des efforts concertés pendant de nombreuses années avant d'atteindre l'obstacle de l'acceptation commerciale (Gartner et *al.*, 2021). Les populations avirulentes peuvent parfois s'adapter aux gènes de résistance et devenir virulentes en contournant la résistance (Dandurand et *al.*, 2019).

En Algérie, les nématicides de synthèse organophosphorés (Vydate<sup>®</sup>, Mocap<sup>®</sup>) et les fumigants sont les plus utilisés par rapport aux autres stratégies de lutte connues contre les nématodes (Sellami et *al.*, 2010 ; Bettiche, 2017), car ils sont efficaces et agissent rapidement (Odeyemi, 2013), ce qui a augmenté les risques et les menaces vis-à-vis de l'environnement et de la santé humaine ; 8 % des nématicides utilisés sont neurotoxiques, inhibiteurs de la cholinestérase et peuvent être cancérigènes et mutagènes (Bettiche et *al.*, 2021).

En outre, les travaux liés à ces bioagresseurs ce sont limités à détecter leur présence et de les identifier dans les parcelles de pomme de terre infestées, sur plusieurs régions du pays (Kacem, 1992 ; Galfout, 2014 ; Tirchi et *al.*, 2016 ; Mezrek et *al.*, 2018 ; Djebroune et *al.*, 2021). Les taux d'infestation des parcelles de pomme de terre varient selon les régions. En effet, il est respectivement de 28.57 et de 75% dans les wilayas de Relizane et de Mostaganeme. Ce taux peut atteindre jusqu'à 87 à 100% dans la wilaya d'El Oued (Benramdane et Bouciouf, 2013 ; Galfout, 2014 ; Mezerket, 2018). En revanche, les densités moyennes de population des nématodes à kyste de la pomme de terre et les zones de production de pommes de terre touchées par les NKPT étaient plus élevée dans le sud par rapport au nord du pays (Mezrek et *al.*, 2018 ; Djebroune et *al.*, 2021). En effet, des études complémentaires s'avèrent nécessaires pour réduire l'incidence de ces nématodes en se basant plus sur la recherche de méthodes de contrôle alternatives, efficaces et respectueuses de l'environnement.

Actuellement, l'accent a été mis sur le développement de biopesticides, soit par l'application des micro-organismes antagonistes, tels que les champignons et les bactéries ou de leurs produits (enzymes, antibiotiques et toxines) (Dandurand et Knudsun, 2016 ; Hajji et *al.*, 2016 ; Contina et *al.*, 2017 ; Sellami et *al.*, 2017 ; Benttoui et *al.*, 2020), soit par l'utilisation d'extraits végétaux et de formulations phytochimiques (Sellami et Zemmouri, 2001 ; Sellami et Mezerket, 2006 ; Sellami et *al.*, 2013 ; Dandurand et *al.*, 2017, Nebih Hadj-

Sadok et Charif, 2019), ou bien par l'emploi d'amendements organiques (composts, biofumigation, etc) à partir de certaines plantes appartenant à plusieurs familles botaniques, telles que les *Brassicacées*. Ces dernières ont été utilisées avec succès pour la gestion des nématodes phytoparasites et ont montré leur efficacité comme engrais verts dans les assolements ou sous forme de broyats, comme amendements incorporés au sol ou bien comme extraits (aqueux et organiques) et comme huiles essentielles (Sellami et Mezerket, 2010 ; Sellami et *al.*, 2013 ; Ngala et *al.*, 2015 ; Renco et *al.*, 2015 ; Ebrahimi et *al.*, 2016 ; Fatemy et Sepideh, 2016 ; Dandurand et *al.*, 2017 ; Mokrini et *al.*, 2018 ; Istifadah et *al.*, 2019).

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude, dont l'objectif consiste en une contribution à la lutte biologique contre *G. rostochiensis* par l'utilisation de certains extraits végétaux et des amendements organiques (engrais vert et compost). Ainsi que l'étude de la biologie de ce bioagresseur et l'effet des densités initiales sur la croissance et le rendement de la pomme de terre.

De ce fait, notre travail est organisé en deux parties. La première est consacrée à une analyse bibliographique retraçant, dans le premier chapitre, l'état des connaissances actuelles sur les nématodes à kystes, ensuite les différentes méthodes de gestion contre ces bioagresseurs dans le deuxième chapitre.

La deuxième partie rapporte la méthodologie utilisée au cours des expérimentations menées ainsi que les résultats obtenus et comporte quatre chapitres :

Le premier aborde l'effet des densités de population de *G. rostochiensis* sur la croissance et le rendement de la pomme de terre. Le deuxième consiste à déterminer la durée du cycle et estimer le nombre de générations du nématode à kystes *G. rostochiensis* dans les conditions naturelles pendant deux saisons.

Le troisième chapitre évoque l'évaluation *in vitro* et *in vivo* de l'activité nématocide de deux espèces végétales de la famille des *Brassicacées* (*Raphanus sativus* et *Nasturtium officinale*) à l'égard de *G. rostochiensis*. *In vitro*, sur la mortalité des larves du deuxième stade (J2) et l'éclosion des œufs de ce nématode, et *in vivo* sur le développement de ce bioagresseur et sur la croissance des plants de pomme de terre. Le quatrième et dernier chapitre s'est concentré sur l'effet de trois types de composts : fumier de vache, fumier de volaille et fumier

des résidus végétaux à différentes doses sur le développement des populations de *G. rostochiensis*.

À la fin de ce travail, une conclusion générale sera dédiée aux apports de cette thèse dans la recherche scientifique ainsi les perspectives et les mesures à entreprendre pour une gestion appropriée et durable contre ce bioagresseur.

# **1<sup>ère</sup> Partie : Analyse bibliographique**

## Chapitre 1 : Généralités sur les nématodes à kyste du genre *Globodera*

Les nématodes à kystes du genre *Globodera* sont des endoparasites sédentaires qui sont responsables des dégâts considérables à l'échelle mondiale sur une gamme d'hôtes quasiment restreinte aux Solanacées. Deux espèces attaquent la pomme de terre : *Globodera rostochiensis* (Wollenweber, 1923) et *Globodera pallida* (Stone, 1972).

Ces deux espèces de nématode sont définies comme des organismes de quarantaine, et sont classées dans la liste A2 de l'OEPP (OEPP/EPPO, 1978 ; 1981). Une fois installées dans une nouvelle région, elles sont très difficiles à éradiquer en raison de leur capacité à survivre pendant de longues périodes sans plantes hôtes (Turner, 1996 ; Duceppe et *al.*, 2017).

Les nématodes à kystes de la pomme de terre (NKPT) sont les bioagresseurs les plus redoutables sur cette culture. Les pertes occasionnées par les NKPT peuvent être de deux ordres : quantitatifs et qualitatifs. Ainsi, la baisse de rendement est proportionnelle au niveau initial de la population de nématode dans le sol, et elle peut atteindre 70 à 80 % (Kerlan et *al.*, 2012 ; Singh et *al.*, 2013).

En Bulgarie, le nématode doré de la pomme de terre *G. rostochiensis* est le principal ravageur de la pomme de terre causant jusqu'à 80 % de perte de rendement (Trifonova, 1995; 2000).

En Europe, une perte de rendement annuel moyenne de 9 % a été estimée (Evans, 1993 ; Evans et Rowe, 1998 ; Haydock et Evans, 1998), ce qui correspond à environ 300 millions d'Euros (Deliopoulos et *al.*, 2007).

Au Royaume-Uni, les nématodes du genre *Globodera* sont considérés comme le deuxième parasite ou maladie économiquement importante de la pomme de terre après le mildiou, avec une chute de rendement estimée à 26 millions d'euros par an, et un coût de dix (10) millions d'Euros par an pour les nématicides utilisés pour lutter contre ces nématodes (Lord et *al.*, 2011). Ainsi, selon Jones et *al.*, (2017), les nématodes à kystes *G. pallida* et *G. rostochiensis*, sont des agents phytopathogènes importants sur le plan économique, entraînant des pertes de récoltes de pommes de terre estimées à 50 millions euros par an.

Enfin, les deux espèces de *Globodera* provoquent, à la surface des tubercules, des micro piqûres qui déprécient la qualité et qui, les rendent impropres à la commercialisation (Kerlan et al., 2012).

### 1.1. Historique et origine des nématodes du genre *Globodera*

Les nématodes à kystes de la pomme de terre *G. rostochiensis* et *G. pallida* sont originaires de la Cordillère des Andes en Amérique du Sud (Evans et Stone 1977).

Kühn (1881) a été le premier à signaler des nématodes formant des kystes sur pomme de terre, il a attribué l'attaque à *Heterodera schachtii* nématode à kyste de la betterave (Dossey, 2010 ; Kaczmarek, 2014). En 1923, Wollenweber a proposé une nouvelle espèce *Heterodera rostochiensis*. C'est en 1940, Franklin a mis en évidence les différences morphologiques qui existent entre les nématodes à kystes de la pomme de terre et les autres nématodes à kystes. La deuxième espèce de nématode à kystes de la pomme de terre *Heterodera pallida*, a été décrite par Stone (1972). En 1959, Skarbilovich a établi le sous-genre *Globodera*, qui fut ensuite élevé au statut générique par Behrens (1975) et Mulvey et Stone (1976).

Les deux espèces de nématodes ont été introduites en Europe vers les années 1850, lors de l'importation de variétés de pommes de terre sauvages et cultivées d'Amérique du Sud dans le but de rechercher une nouvelle source de résistance à *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, (1876) agent responsable du mildiou de la pomme de terre (Mai, 1977 ; Boucher, 2013). Plusieurs hypothèses ont été émises que l'Europe est devenue une source de distribution secondaire des nématodes à kystes de la pomme de terre, et c'est à partir de celui que ces nématodes se seraient propagés dans le monde (Evans et Stone, 1977 ; Hafez et al., 2007 ; Mahran et al., 2010).

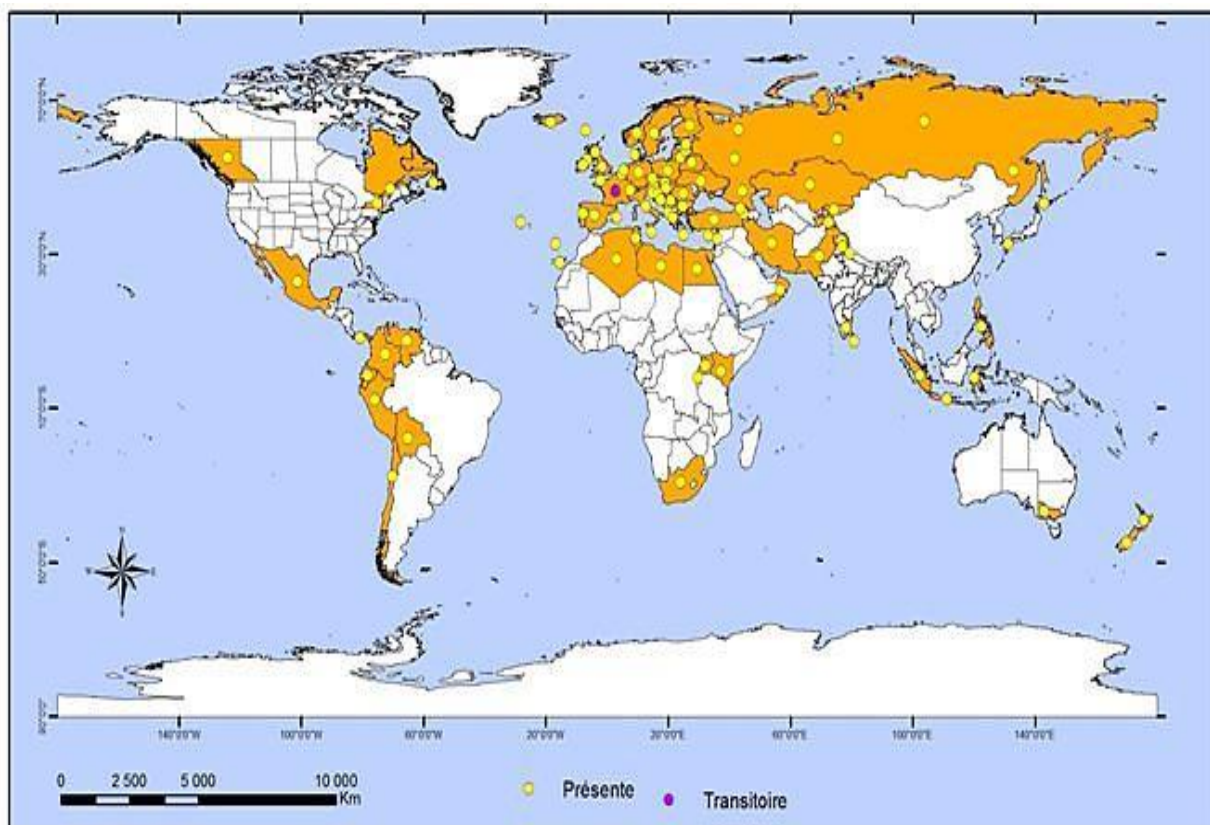
En Algérie, les nématodes du genre *Globodera* ont été signalés pour la première fois en 1953 suite à l'introduction de semences de pomme de terre d'origine britannique à la fin de la deuxième Guerre mondiale (Frezal, 1954). Ensuite, sa présence s'est propagée dans le littoral algérois. En 1961, la zone infestée a très rapidement augmenté en touchant 33 communes autour d'Alger (Scotto La Massese, 1961). Par la suite, il a été disséminé dans plusieurs régions productrices de pommes de terre, dont les plus importantes sont Ain Defla, Tipaza, Chlef, Mascara et Sétif (INPV, 2009 ; Tirchi et al., 2016). Récemment, Mezerkat et al., 2018 ont révélé la distribution des NKPT dans le sud de l'Algérie.

## 1.2. Répartition géographique des *Globodera*

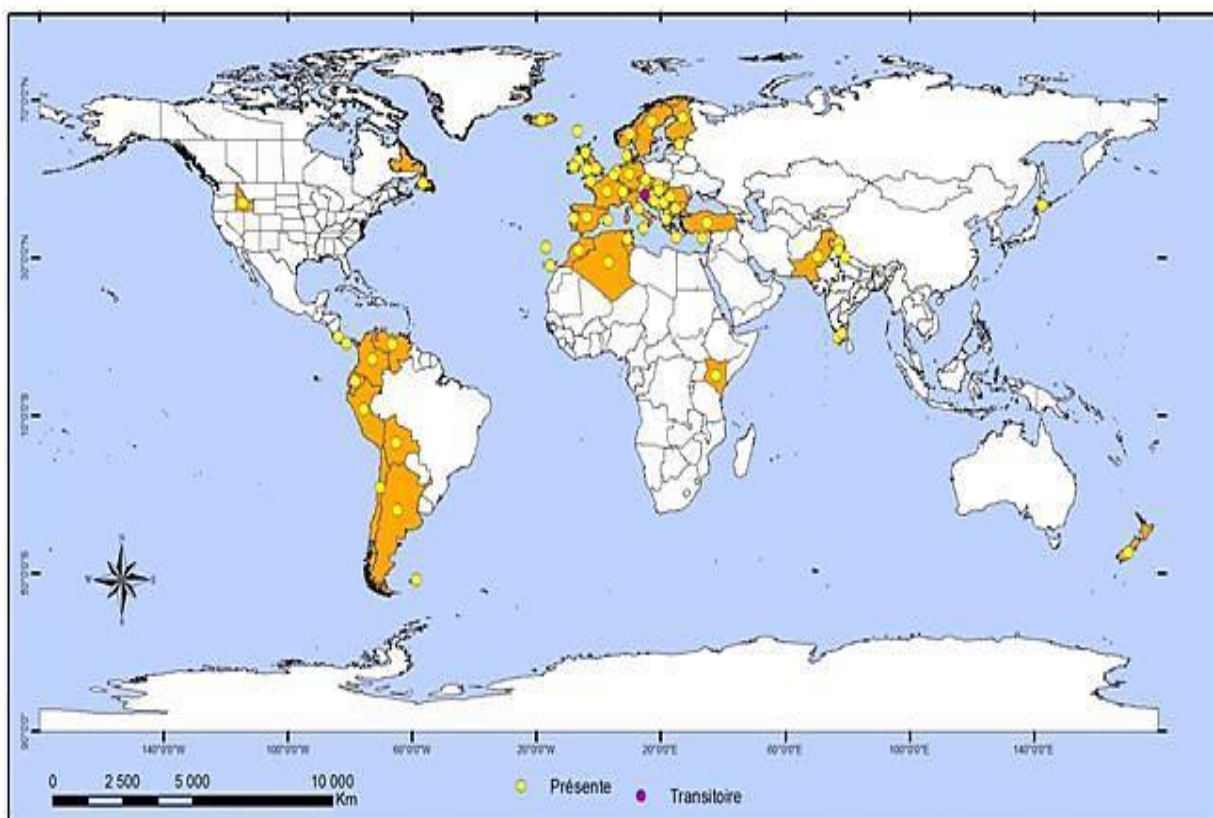
Les nématodes à kystes du genre *Globodera* ont été enregistrés dans presque tous les pays producteurs de pommes de terre (OEPP, 2022). La répartition actuelle couvre les zones tempérées jusqu'au niveau de la mer et dans les tropiques à des altitudes plus élevées (figure 1 et 2).

Au niveau international, le nématode doré *G. rostochiensis* est le plus répandu, il est recensé dans 85 pays (figure 1), tandis que *G. pallida* est seulement détecté dans 64 pays (figure 2) (OEPP, 2022). Cependant, l'utilisation de cultivars de pommes de terre résistants à *G. rostochiensis*, a entraîné un changement dans les proportions des deux espèces dans certains pays (Boucher, 2013 ; Kaczmarek, 2014). Par exemple au Royaume-Uni, *G. pallida* est devenue l'espèce dominante (Turner et Evans, 1998 ; Minnis et al., 2002 ; Turner et al., 2009).

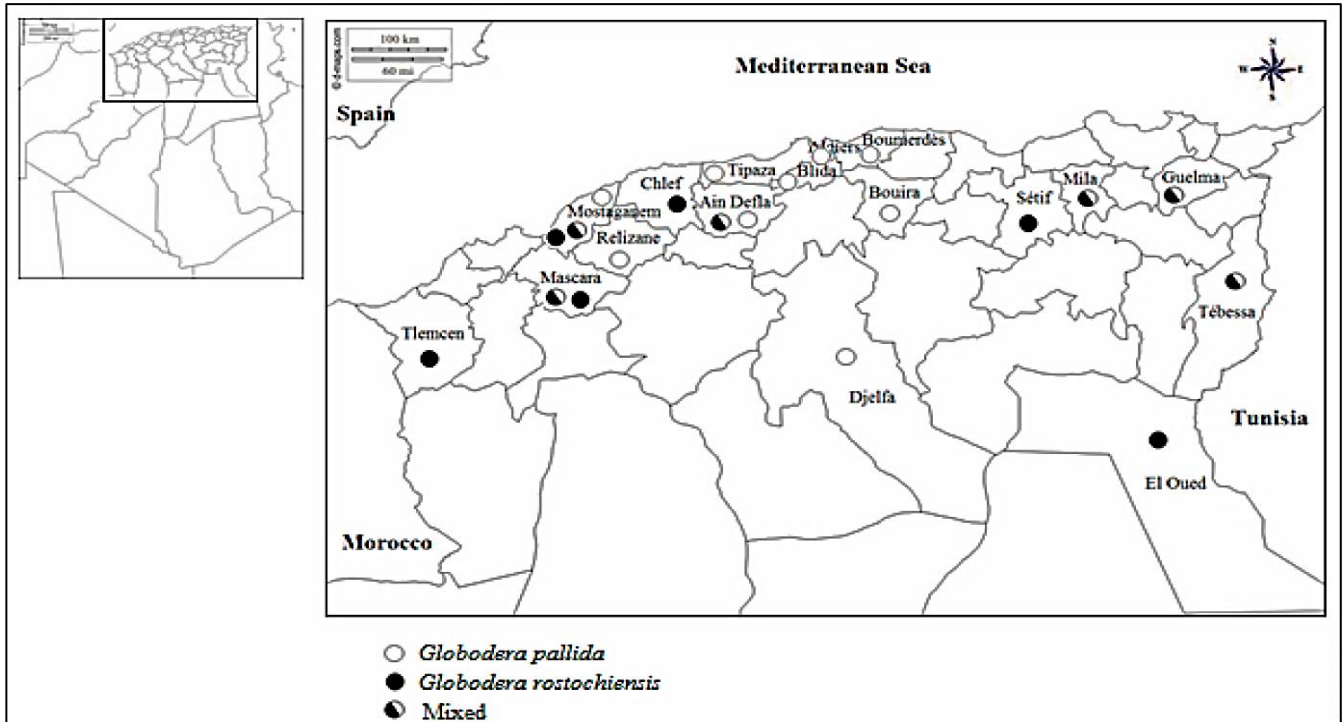
En Algérie ces nématodes ont été signalés dans la plupart des régions productrices de pomme de terre comme : Alger, Tipaza, Boumerdès, Bouira, Sétif, Ain Defla, Chlef, Mascara, Mostaganem, Relizane et El Oued (figure 3). Selon Mezerket et al., (2018), les zones de production de pommes de terre du sud sont plus infestées par les NKPT que celles du nord. *G. pallida* était surtout présent dans le nord de l'Algérie, tandis que *G. rostochiensis* est dominant dans les régions du sud. Djebroune et al., (2021) ont confirmé la présence de *G. pallida* dans les régions centrales du pays et la dominance des populations de *G. rostochiensis* dans le sud. Les populations mixtes sont les plus représentatives dans les régions de l'Est. Enfin, l'Ouest du pays est marqué par la présence d'un mélange des deux espèces ou de *G. rostochiensis* seule.



**Figure 1:** Distribution mondiale de *Globodera rostochiensis* (modifiée à partir de l’OEPP, 2022)



**Figure 2:** Distribution mondiale de *Globodera pallida* (modifiée à partir de l’OEPP, 2022)

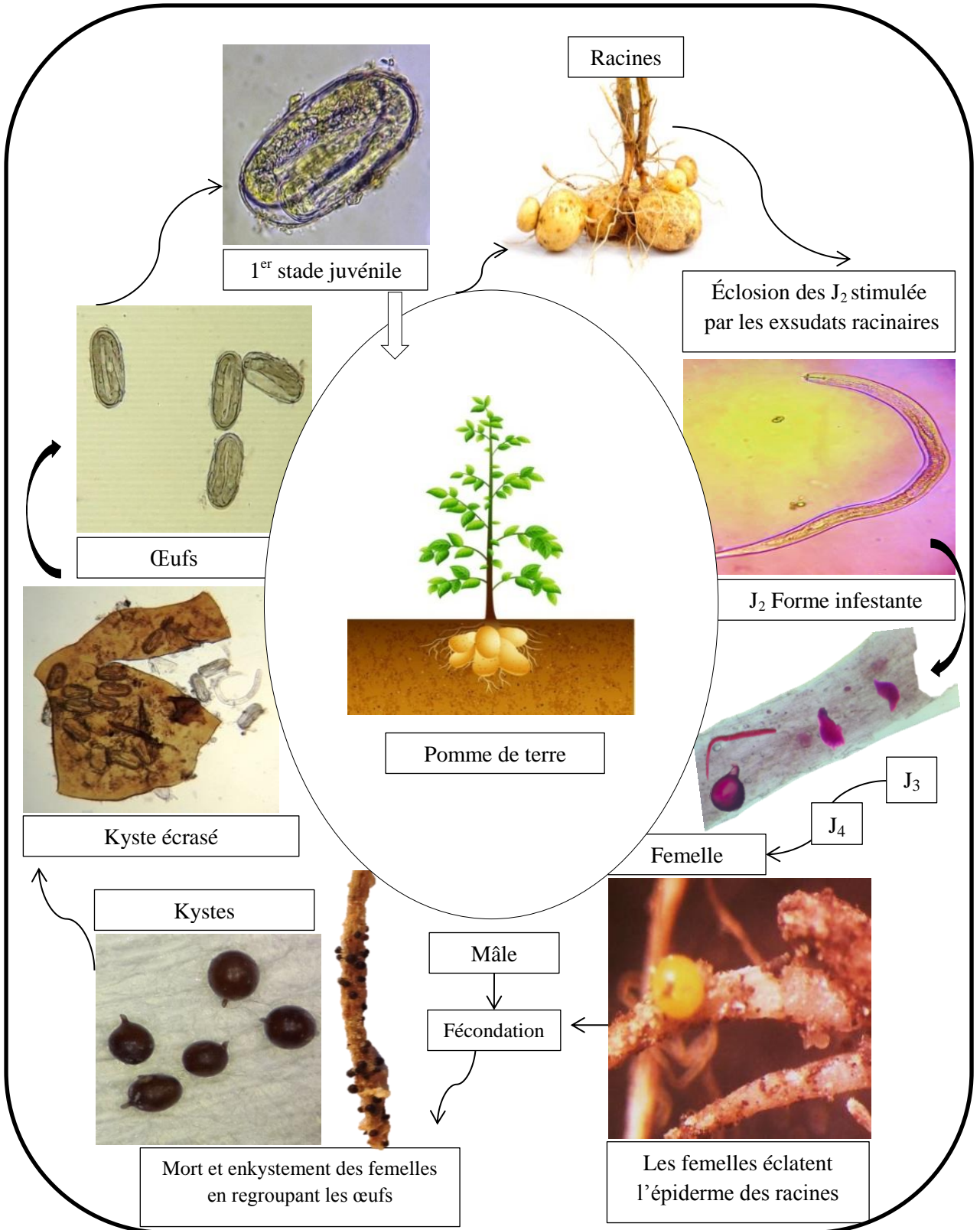


**Figure 3 :** Distribution géographique des nématodes à kystes de la pomme de terre *G. rostochiensis* et *G. pallida* en Algérie (Djebroune et al., 2021).

### 1.3. Biologie et cycle de développement de *Globodera* spp.

La connaissance de la biologie de ces nématodes est essentielle afin d'identifier les étapes clés du parasitisme et de définir les phases auxquelles il faut agir pour lutter de façon efficace contre ces parasites (Blanchard, 2006).

Comme la plupart des nématodes, les NKPT passent par quatre (04) stades juvéniles et un stade adulte (figure 4). En présence d'exsudat racinaire de l'hôte, certaines larves au stade J2, qui sont contenues dans les œufs des kystes éclosent (Boucher, 2013). Une fois dans le sol, les larves du deuxième stade (J2) infectent la plante hôte et pénètrent au niveau de la zone d'élongation en perçant mécaniquement les cellules épidermiques et corticales de la racine à l'aide de leur stylet (Castro-Quezada, 2013), et s'installent habituellement dans la zone du cortex (Fudali et Golinowski, 2007), où elles injectent ses protéines salivaires de la glande œsophagienne, et causent un élargissement de celle-ci en incorporant de nouvelles cellules par la dissolution des parois cellulaires (Wyss et Grundler, 1992 ; Turner et Evans, 1998 ; Fudali et Golinowski, 2007 ; Vieira et al., 2011). Cette interaction complexe entre le nématode et la plante hôte induit alors la formation de sites nourriciers connus sous le nom de syncytium (Evans et Stone, 1977).



**Figure 4** : Cycle de développement du nématode à kystes *G. rostochiensis*. observé à travers le microscope / loupe binoculaire (Tous les stades ne sont pas à la même échelle). (Original).

Dans les racines, les juvéniles vont subir trois mues successives pour passer au stade adulte sexué. Le sexe des NKPT est déterminé par les conditions environnementales et nutritionnelles des juvéniles (J2). Lorsque les nutriments sont réduits, les mâles prédominent, car ils sont capables de se développer dans des conditions de stress nutritif et nécessitent beaucoup moins de nourriture que les femelles (Kaczmarek, 2014). Les mâles quittent les racines et migrent activement dans le sol, alors que les femelles sédentaires continuent à se nourrir du syncytium par la tête et le cou qui restent attachés à la racine (Franco, 1986), et grossissent jusqu'à l'éclatement de l'épiderme de la racine et la libération du corps féminin.

Les nématodes à kystes ont une reproduction amphimictique (reproduction sexuée obligatoire) (Blanchard, 2006 ; Castro-Quezada, 2013). Les mâles sont alors attirés chimiquement par ses jeunes femelles pour la fertilisation (Whitehead, 1997). La femelle fécondée produit des œufs puis meurt et se transforme alors en kyste protecteur pouvant contenir de 200 à 500 œufs (Evans et Stone, 1977 ; Turner et Evans, 1998). Une première mue aura lieu dans l'œuf et les juvéniles (J2) entrent en diapause, qui ne sera levée que sous l'action des exsudats racinaires de la pomme de terre (Raski, 1950 ; Wyss, 1992 ; Thiery et *al.* ; 1996). Il n'y a habituellement qu'une seule génération par an en conditions naturelles chez les NKPT (Whitehead, 1997 ; Turner et Evans, 1998). Cependant dans les sols chauds, une deuxième génération partielle peut apparaître, mais l'activité diminue fortement et peut s'arrêter à des températures supérieures à 25° C (Alonso et *al.*, 2011).

En présence de plante hôte, Jones (1970) a signalé un pourcentage d'éclosion qui peut atteindre jusqu'à 80 %. Par ailleurs, en absence de plante hôte, Ryan et Devine (2005) ont enregistré 37 % d'éclosion spontanée des larves (J2). Comme stratégie de survie, il n'y a jamais d'éclosion totale chez les deux espèces de NKPT (Boucher, 2013).

De nombreux travaux ont été menés pour caractériser les produits des exsudats racinaires provoquant l'éclosion des nématodes. Ces produits possèdent tous une structure moléculaire similaire et qui sont nommés facteurs d'éclosion (Perry, 1989). Devine et Jones (2000) ont décrits neuf de ces produits. Entre les deux espèces de nématodes à kystes, il y a des facteurs d'éclosion qui ont le même effet, et d'autres encore qui stimulent davantage l'éclosion de l'une des deux espèces (Byrne et *al.*, 2001). Selon Byrne et *al.*, (1998), ils existent deux autres catégories de produits impliqués dans l'éclosion, soit les stimulants de facteurs d'éclosion, qui augmentent l'effet des facteurs d'éclosion, ou les inhibiteurs

d'éclosion. De nombreuses études ont montré que la qualité de l'exsudat racinaire est liée à la phase végétative de la plante hôte. Rawsthorne et Brodie (1986) rapportent un maximum d'éclosion pour *G. rostochiensis* trois semaines après l'émergence de la tige. Byrne et *al.*, (2001), suggèrent qu'il est à 38 jours après la plantation des tubercules chez la même espèce de nématode cependant chez *G. pallida*, l'éclosion maximale se ferait chez des plants plus jeunes.

Ryan et Jones (2004) montrent que certaines bactéries libres du sol provenant de la rhizosphère de plantes hôtes et non hôtes de nématode peuvent avoir un effet sur l'éclosion de ces derniers. Ainsi, les mycorhizes tels que *Glomus* spp. augmentent l'éclosion du nématode à kyste pâle, mais pas celui du nématode doré (Ryan et Jones, 2004 ; Ryan et *al.*, 2000). L'éclosion spontanée des NKPT peut être donc due à la présence des bactéries et des mycorhizes du sol, qui possèdent la capacité de produire des facteurs d'éclosion (Boucher, 2013).

#### **1.4. Symptômes, dégâts et seuil de nuisibilité**

Les nématodes à kystes de la pomme de terre colonisent les racines, induisent une réduction du système racinaire et limitent ainsi l'absorption de l'eau et des minéraux. Ces symptômes se confondent à ceux induits en cas de stress hydrique, de carence minérale ou d'excès de désherbant sur la culture de pomme de terre (Mhatre et *al.*, 2022).

Les attaques des deux espèces de *Globodera* se traduisent en plein champ par de larges plages ou zones rondes dites foyers (figure 5A) où la croissance des plants de pomme de terre est ralentie (Buisson et *al.*, 2011).

Les symptômes sur la partie aérienne de la plante ne sont pas spécifiques. Ils résultent d'un mauvais fonctionnement du système racinaire et se traduisent par un ralentissement de croissance, un jaunissement, un flétrissement et un dessèchement des plants attaqués (Buisson et *al.*, 2011). Ainsi, une réduction de floraison et de fructification puis chute des rendements.

Les symptômes des NPKT se manifestent par une réduction du système racinaire (Castro-Quezada, 2013), une diminution de la taille des tubercules et apparition de micro piqûres à la surface (Kerlan et *al.*, 2012). Enfin le symptôme le plus typique sur la partie souterraine de la plante est la présence de femelles de couleur blanchâtre ou jaunâtre attachées aux racines

(figure 5B), ainsi que des kystes de couleur brunâtre sur racines des plants infestés (figure 5C).

L'incidence des nématodes sur le rendement des cultures dépend de plusieurs facteurs tels que les densités initiales des populations, les conditions climatiques, les régions et les variétés cultivées (Whitehead et *al.*, 1984 ; Greco et *al.*, 1988 ; Maneva et Trifonova, 2015).

En Italie, Greco et *al.*, (1982) ont estimé la limite de tolérance de la pomme de terre aux deux espèces *G. pallida* et *G. rostochiensis* à 1.7 et 1.2-2.1 œufs /g de sol respectivement. Pour *G. rotochiensis* elle est estimée à 1.5 œufs/g de sol en Hollande (Brodie et *al.*, 1993) et à 1-3 œufs /g de sol en Norvège (Moxnes et Hausken, 2007). Enfin, une densité de population initiale aussi faible que 0,1 J2/cm<sup>3</sup> de sol de *G. rostochiensis* peut réduire considérablement les rendements en pommes de terre en Bulgarie (Maneva et Trifonova, 2015).



**Figure 5** : Symptômes d'attaques de *Globodera*. **A** : En plein champ (original).

**B et C** : Sur les racines (original).

## **Chapitre 2 : Gestion des nématodes à kystes de la pomme de terre (*Globodera ssp.*)**

Les nématodes à kyste de la pomme de terre sont très difficiles à éradiquer en raison de leur capacité à survivre pendant de longues périodes sans plante hôte (Turner, 1996).

Selon Viaene et *al.* (2013), les méthodes de lutte consistent à réduire ou à maintenir les densités des nématodes à un niveau inférieur au seuil de nuisibilité, en utilisant plusieurs stratégies qui permettent une production agricole durable. La mise au point d'un programme de lutte contre ces nématodes doit mettre en œuvre un ensemble de mesures préventives et curatives afin de mieux protéger la culture de pomme de terre.

### **2.1. Mesures préventives**

Ces mesures consistent à éviter la dissémination des nématodes et à maintenir les parcelles indemnes et propres, en éliminant les sources de contamination par :

- L'utilisation de matériel végétal sain et certifié.
- Le contrôle des végétaux aux frontières pour éviter l'introduction de nouvelles populations sur un territoire.
- Le nettoyage des machines et du matériel agricole pour éviter les contaminations inter parcelles.
- La surveillance de la qualité des eaux d'irrigation, et l'élimination des débris végétaux qui constituent une source de contamination.
- L'utilisation de variétés précoces de pomme de terre.

### **2.2. Méthodes culturales**

Parmi les pratiques culturales les plus utilisées, le travail du sol et les labours profonds pendant les périodes sèches, qui influent sur le développement des nématodes et permettent la diminution des populations par dessiccation, le désherbage aussi permet de détruire les adventices qui peuvent constituer un foyer aux nématodes.

Ils existent d'autres méthodes culturales, parmi lesquelles nous citons :

### 2.2.1. Rotation des cultures

L'utilisation de la rotation des cultures avec des plantes non hôtes contre ces nématodes est un procédé efficace du fait que la gamme d'hôte est restreinte (Mugniéry et Oger, 1982 ; Blanchard, 2006). Elle permet d'exploiter le déclin naturel des populations des *Globodera* spp. par l'éclosion spontanée en absence de plantes hôtes (Den Ouden, 1960).

Ryan et Devine (2005) et Duvauchelle (2013) ont enregistré un pourcentage d'éclosion spontanée de 30 à 45 % chaque année, d'où l'importance d'alterner avec des plantes non hôtes. Mugniéry et Phillips (2007) rapportent une diminution des densités de populations avec une rotation de sept (07) ans entre deux cultures de pomme de terre. Ainsi, une rotation culturale, au minimum de quatre (04) ans, permet de réduire la population de nématodes à condition de bien contrôler les repousses de pomme de terre (Chauvin et *al.*, 2008). Enfin, Trudgill et *al.*, (2014) ont enregistré un taux de déclin naturel aussi élevé que 33,5% pour *G. pallida*, et ils recommandent huit (08) ans sans plantes hôtes pour maintenir la densité de population à une limite non dommageable (inférieure à 10 œufs/g de sol).

### 2.2.2. Jachère

Cette méthode semble être un procédé très efficace pour réduire les populations des nématodes phytoparasites dans le sol. Elle consiste à laisser les champs sans plantation pendant quelques années. Szilvasi (2013), préconise une jachère d'au moins deux ans afin de réduire les populations des nématodes à kystes.

### 2.2.3. Plantes pièges

La technique de cultures pièges consiste à réaliser une plantation d'une culture hôte du nématode comme une pomme de terre sensible et de la détruire avant que le nématode n'ait pu compléter son cycle de développement. La destruction de la culture cinq semaines après la plantation a permis de diminuer d'environ 70 à 80% les populations initiales du nématode, ce qui correspond aux pourcentages d'éclosion des kystes sous l'influence des exsudats racinaires observés pendant une culture de pomme de terre (Chauvin et *al.*, 2008 ; Bélair, 2013). Ainsi, une diminution des effectifs de *Globodera* de plus de 80 % a été enregistrée après une période de culture de pomme de terre de 40 à 50 jours (Duvauchelle, 2013).

Une autre plante piège nommée la morelle de Balbis (*Solanum sisymbriifolium* Lamarck, 1974) stimule l'éclosion des nématodes à kystes de la pomme de terre via ses exsudats racinaires mais elle présente également une résistance complète. Des essais menés aux Pays-Bas et en Grande-Bretagne par l'utilisation de la morelle de Balbis ont montré des baisses des populations de *Globodera* de l'ordre de 50 à 80 % (Duvauchelle, 2013). En revanche, cette plante ne constitue pas une alternative efficace pour la gestion du nématode doré au Québec à cause de sa longue période de germination et de la difficulté qu'elle présente pour s'établir dans les sols frais et humides de la région (Bélaïr, 2013).

Dandurand et Knudsen, 2016 ont rapporté une réduction significative de l'ordre de 99% de *G. pallida* en utilisant la même plante piège *S. sisymbriifolium*.

En Portugal Dias et *al.*, (2017) ont montré que les exsudats racinaires de différents cultivars de *S. sisymbriifolium* (Melody, Pion, Sharp, Sis 4004 et Sis 6001) ont favorisé l'éclosion des larves du deuxième stade (J2) de *G. pallida* et *G. rostochiensis in vitro*. Ainsi, les cultivars testés ont montré une résistance aux deux espèces de *Globodera* dans des essais aux champs.

#### **2.2.4. Amendements organiques**

L'application des amendements organiques est une méthode de lutte traditionnelle contre les nématodes phytoparasites et en particulier les nématodes à kystes de la pomme de terre. Selon Oka (2010) et Ebrahimi et *al.*, (2016), les amendements organiques agissent sur les nématodes par différents mécanismes tels que :

- L'amélioration des propriétés physiques et chimiques du sol, qui peut avoir une influence sur l'éclosion, la mobilité et la survie des nématodes.
- La libération des substances nématocides à partir du matériel organique (les acides organiques, les composés phénoliques et l'ammonium)
- L'amélioration de la croissance et de la résistance des plantes.
- L'accroissement de l'activité biologique du sol en favorisant le développement des antagonistes des nématodes.
- La production des substances allélochimiques (les antibiotiques ou les chitinases) par la microflore du sol.

Deux types d'amendement organique sont utilisés contre les NKPT, il s'agit des engrais verts et des composts.

#### 2.2.4.1. Biofumigation ou engrais verts

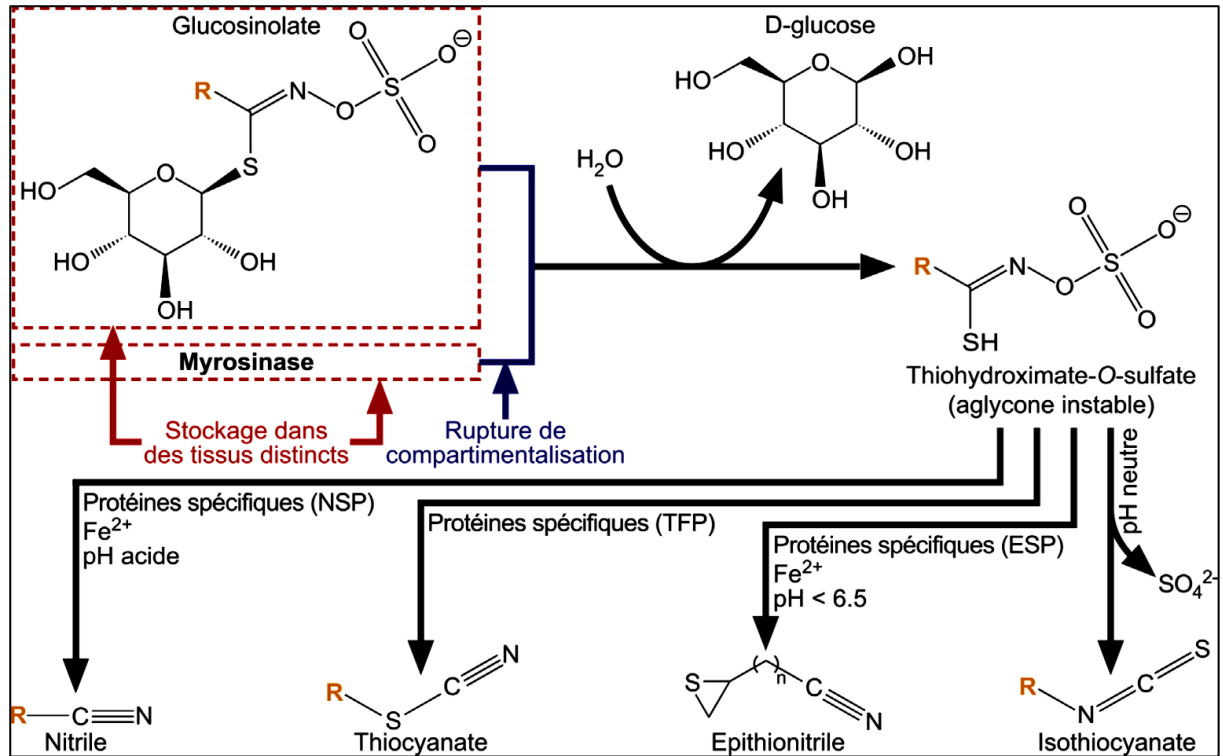
L'utilisation des engrais verts ou la biofumigation comme moyen de lutte alternatif aux nématicides retirés a fait l'objet de nombreux travaux. La biofumigation consiste à la suppression des ravageurs et des agents pathogènes telluriques par des composés biocides libérés après broyage et incorporation d'engrais verts à partir des plantes de la famille des *Brassicacées* dans le sol (Lord et *al.*, 2011). Les plantes de la famille des Brassicacées les plus étudiées appartiennent au genre *Brassica*, qui comprend les cultures de choux (*Brassica oleracea*), le groupe des moutardes (*B. juncea*, *B. campestris*, *B. nigra*, *B. carinata*, *Sinapis alba*), le colza (*B. napus*), le navet (*B. rapa*), le radis (*Raphanus sativus*) et la roquette (*Eruca sativa*) (Zasada et Ferris 2004 ; Fourie et *al.*, 2016 ; Daneel et *al.*, 2018).

L'effet supprimeur des plantes de *Brassicacées* est attribué à la présence des composés appartient à une classe de thioglucoside appelées glucosinolates (Fahey et *al.*, 2001), qui libèrent après une hydrolyse enzymatique par la myrosinase des produits biologiquement actifs tels que les isothiocyanates toxiques et hautement volatils, les cyanures organiques moins toxiques, les nitriles, les thiocyanates et les oxazolidinediones (Bones et Rossiter, 2006) (figure 6).

L'activité du système glucosinolate- myrosinase est beaucoup plus forte dans les tissus jeunes des brassicacées que dans les plus âgés, elle est aussi faible dans la tige par rapport aux feuilles. Cette activité dépend aussi du substrat, du pH et de la température (Reau et *al.*, 2005b ; Martin et Müller, 2007).

Dans 350 espèces de Brassicacées, plus de 200 glucosinolates sont présentes (Clarkson et *al.*, 2014). Ces glucosinolates diffèrent quantitativement et qualitativement d'une espèce à une autre et au sein de la même espèce (Kirkegaard et Sarwar, 1998 ; Padilla et *al.*, 2007). Les glucosinolates peuvent être isolés à partir des racines, des feuilles, des graines et des tiges des plantes dont le contenu et le profil varient entre les espèces, les individus, les différentes parties de la plante (Zasada et Ferris, 2003), ainsi que le stade de développement de chaque espèce (Santos et *al.*, 2021). Des niveaux plus élevés des glucosinolates sont observés généralement pendant la croissance végétative avec des niveaux décroissants observés après la floraison (Kirkegaard, 2009). Dans la plupart des cas, la phase préfloraison est la plus

appropriée pour la coupe et l'incorporation (Donald et *al.*, 2010 ; Karavina et Mandumbu, 2012 ; Dutta et *al.*, 2019 ; Campanella et *al.*, 2020).



**Figure 6** : Principaux produits de la dégradation des glucosinolates (Ouassou et *al.*, (2019).

Ces produits biologiquement actifs (les glucosinolates) sont toxiques pour une grande variété d'organismes, y compris les bactéries (Tierens et *al.*, 2001 ; Kirkegaard, 2009 ; Bandyopadhyay et Khalko, 2016 ; Pontes et *al.*, 2019), les champignons (Tsrer et *al.*, 2007 ; Iriarte et *al.*, 2011 ; Ojaghian et *al.*, 2012 ; Motisi et *al.*, 2013 ; Neubauer et *al.*, 2014 ; Perniola et *al.*, 2014 ; Warmington et Clarkson, 2016 ; Wei et *al.*, 2016 ; Pan et *al.*, 2017 ; Rubayet et *al.*, 2018 ; Jin et *al.*, 2019 ; Campanella et *al.*, 2020), les insectes (Matthiessen et Shackleton, 2005 ; Shaaya et Kostyukovsky, 2010 ; Furlan et *al.*, 2010), les plantes adventices (Perniola et *al.*, 2016 ; Cauwer et *al.*, 2019 ; Perniola et *al.*, 2019) et les nématodes (Lazzeri et *al.*, 1993, 2004a ; Buskov et *al.*, 2002 ; Serra et *al.*, 2002 ; Zasada et Ferris, 2003, 2004 ; Wang et *al.*, 2006 ; Henderson et *al.*, 2009 ; Zasada et *al.*, 2009 ; Lord et *al.*, 2011 ; Nicola et *al.*, 2013 ; Barros et *al.*, 2014 ; Ngala et *al.*, 2015 ; Ros et *al.*, 2016 ; Aydinli et Mennan, 2018 ; Daneel et *al.*, 2018 ; Roncato et *al.*, 2018).

### ➤ Utilisation des plantes de *Brassicacées* dans la gestion des nématodes phytoparasites

L'efficacité de différentes espèces de *Brassicacée* contre les nématodes phytoparasites et en particulier les nématodes à kystes de la pomme de terre ont été démontrés dans le monde

entier (tableau 1). Les amendements organiques à base d'engrais verts, de farine de graines et de plantes de couverture ont entraîné des niveaux variables de réduction des nématodes et une augmentation correspondante des paramètres de croissance des plantes dans la plupart des cas étudiés (Dutta et al., 2019). L'activité nématocide varie selon les espèces de *Brassicacées* utilisées (Lord et al., 2011). Fatemy et Sepideh, 2016 ont rapporté l'effet de la biofumigation à 2% d'engrais vert de quelques espèces de *Brassicacées* telles que : le chou-fleur, le brocoli, le chou rouge, le navet, la moutarde blanche et le radis comestible sur *G. rostochiensis*. Le nombre de kystes nouvellement formé a été réduit de 60 % et de 33 % pour le sol traité au radis et au chou-fleur, respectivement. Les populations finales d'œufs et de J2/ g de sol, ont été réduites de 73% (moutarde blanche) à 92% (radis comestible). De plus l'efficacité nématocide de l'engrais vert de *Lepidium sativum* sur la survie des nématodes a été testée sur un cultivar de pomme de terre sensible dans des microparcelles (Fatemy, 2018). Une augmentation du poids des plantes biofumigées a été enregistrée. Les propriétés anti-éclosion du *L. sativum* appliqué comme biofumigant ont réduit l'éclosion de 56% en moyenne. Les taux de reproduction ont été abaissés à moins de un, et les populations finales de kystes et leur contenu en œufs ont été réduits de près de 60 % dans le sol traité. La biofumigation à un taux d'amendement de 1 % a suffi pour obtenir ces résultats, qui étaient comparables à ceux obtenus avec des taux de 2 % et 3 %.

#### 2.2.4.2. Composts

Plusieurs produits à base de déchets des animaux et plusieurs genres d'extraits de compost et de plantes ont été étudiés pour leurs potentialités nématocides. L'addition du compost ou du matériel organique peut agir directement en réduisant les populations de nématodes dans le sol (Arancon et al., 2003), ou indirectement en améliorant la résistance des plantes aux nématodes en stimulant le développement des racines et la croissance de plantes (Renco et al., 2007).

L'effet de cinq composts d'origine différente (plantes : grignons d'olive frais, la paille, résidus de laitue, la sciure de bois, les herbes, résidus vert, feuilles et branches d'arbres ; animaux : fumier de volaille et de vache ; champignons : sous-produit de la production de pénicilline (mycélium) ; urbaines ou industrielles : les boues d'épuration) sur *G. rostochiensis* sur pomme de terre a été rapporté par Renco et al., (2007).

Tous les composts testés ont montré une diminution des œufs et des larves (J2), et le compost de grignons d'olive mélangé avec de l'urée a entraîné la plus forte diminution.

Renco et *al.*, (2009) ont étudié l'effet suppressif de deux composts (C1 : un compost vert municipal qui est composé d'herbe (60 %), de feuilles (25 %), de branches d'arbres (5 %) et du sol (10 %) et C2 : un compost produit commercialement qui un sous-produit de la production de pénicilline, de mycélium (90 %), de paille (5 %) et de sciure de bois (5 %)) appliqués à cinq doses (0%, 1%, 2,5%, 5% et 10% p/p) sur l'orge de printemps pour contrôler différents genres de nématodes phytoparasites. Une diminution significative des populations de nématodes phytoparasites a été notée pour les genres de nématodes *Bitylenchus*, *Helicotylenchus*, *Heterodera*, *Paratylenchus* et *Rotylenchulus* par le compost C1 et pour les genres de nématodes *Bitylenchus*, *Geocenamus*, *Helicotylenchus* et *Rotylenchulus* par le compost C2.

De plus, Renco et *al.*, (2011) ont montré une réduction significative du nombre de kystes, d'œufs et de juvéniles/kystes et d'œufs et de juvéniles/g de sol dans les sols traités avec du compost par rapport au sol non traité. L'effet suppressif a augmenté en fonction de la teneur du compost  $\text{NH}_4^+$  et du taux de compost. Ainsi, Renco et Kovacik, (2015) ont évalué les effets du vermicompost seul et des solutions aqueuses de vermicompost seules ou en mélange avec de l'urée, sur le développement et la survie de deux nématodes à kystes *G. rostochiensis* (pathotype Ro1) et *G. pallida* (pathotype Pa2) et sur la croissance des plantes de la pomme de terre. Tous les traitements ont significativement diminué le nombre de kystes, d'œufs et de juvéniles dans le sol, et le nombre d'œufs et de juvéniles par kyste des deux espèces. Cette étude a montré que l'effet supprimeur augmente avec la dose du traitement. Ainsi, les solutions aqueuses de vermicompost seules ou en combinaison avec l'urée étaient plus efficaces que le vermicompost solide utilisé seul, pour contrôler les deux espèces. Enfin *G. rostochiensis* était plus sensible à tous les traitements testés que *G. pallida*.

Dans les sols amendés avec des pelures de pommes de terre fraîches ou cuites à la vapeur, du sulfate de calcium, des pelures de pommes de terre cuites à la vapeur mélangées avec du sulfate de calcium, ou des feuilles de poireau la survie des nématodes *G. rostochiensis* ou *G. pallida* a été réduite jusqu'à 99,9 % après 4 semaines dans les sols amendés et inondés avec de l'eau. En revanche, il fallait huit (08) semaines d'inondation des sols non amendés pour réduire la survie des nématodes de 72 %. Après une semaine, moins de juvéniles de deuxième stade (J2) ont éclos et infecté les racines dans un sol amendé inondé que dans un

sol non amendé inondé. La capacité des J2 survivants à trouver un hôte n'a pas été affectée (Ebrahimi et al., 2016).

Selon ce même auteur, différents types de compost comme le lisier de porc, le lisier de bovin, l'engrais azoté minéral (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>), le compost de carapace de crabe et le compost de copeaux de bois à 170 kg N ha<sup>-1</sup> ont réduit le nombre d'œufs viables dans les kystes des deux espèces de *Globodera* en l'absence de pomme de terre. Par conséquent, moins de juvéniles de deuxième stade (J2) ont éclos de ces kystes et ont pénétré dans les racines des pommes de terre par rapport aux kystes des sols non amendés.

La réduction la plus importante de la reproduction a été obtenue dans les sols amendés avec du lisier de porc (87 %) et du compost de copeaux de bois (82 %). Cependant, l'ajout de " biochar " (à 0,3 et 1%) n'a montré aucun effet sur la survie ou la reproduction des espèces de nématode ; de plus, il a inhibé l'effet supprimeur du compost de copeaux de bois et du lisier de porc sur la reproduction des nématodes lorsqu'il a été ajouté à ces amendements.

Istifadah et al., 2019 ont étudié l'efficacité du compost de fumier de vache et/ou du lombricompost, leur combinaison avec ou sans ajout des espèces antagonistes (*Paecilomyces sp.* et *Pseudomonas pseudoalcaligense*), le compost stérile et/ou le lombricompost mélangé avec les agents antagonistes pour supprimer *G. rostochiensis*. Ils ont montré que l'application du compost seul a réduit le nombre de juvéniles de deuxième stade, de kystes et de femelles de *G. rostochiensis* de 96,2%, 81,0% et 70,2% respectivement. Ainsi, un pourcentage de suppression de 80,8 à 99,1 % a été enregistré dans les mélanges du compost stérile et/ou du lombricompost avec *Paecilomyces sp.* et *P. pseudoalcaligense*. Le lombricompost a été efficace pour réduire le nombre de nématodes du deuxième stade (J2), mais il n'a pas été efficace pour supprimer les kystes et les femelles. Cependant, l'ajout des antagonistes ou le mélange de lombricompost et du compost (1:1, v:v) a amélioré l'efficacité du lombricompost dans la suppression du nombre de kystes de *G. rostochiensis*.

De plus, Debode, et al., 2020 ont rapporté l'effet de trois amendements organiques, notamment le biochar (fabriqué à partir de bois de chêne vert par pyrolyse lente à 650 °C), le compost (produit final du compostage d'un mélange de déchets verts et de la fraction organique des déchets solides municipaux dans un rapport de poids frais de 50:50) et le compost BB (produit final du mélange de biochar au début du processus de compostage dans le mélange de matières premières pour le compost dans un rapport de poids sec de 90:10

matières premières/biochar). Le compost a montré des résultats prometteurs avec des réductions significatives de la viabilité, de la reproduction, de l'éclosion et de l'infection par les J2 des deux espèces *G. rostochiensis* et *G. pallida* sur pomme de terre. Un pourcentage de réduction de la reproduction de plus de 50% a été enregistré. Moins de kystes des deux espèces ont été formés dans le sol amendé avec du compost que dans le sol non amendé. Par conséquent, le nombre de nouveaux œufs/cm<sup>3</sup> de sol était le plus faible dans le sol amendé au compost. Le pourcentage d'éclosion des larves du deuxième stade (J2) des deux espèces après dix (10) semaines dans l'exsudat racinaire de pomme de terre collecté à partir des sols amendés avec du compost était significativement réduit soit 70% et 74% pour *G. rostochiensis* et *G. pallida*, respectivement par rapport à l'exsudat provenant de sols non amendés. Cependant, le biochar n'a eu aucun effet sur la reproduction du NKPT.

De même, les deux amendements (compost avec ou sans biochar) ont augmenté de manière significative le poids frais des tubercules de pomme de terre tandis que le biochar seul n'a pas influencé le rendement.

### 2.3. Méthodes physiques

Parmi les méthodes de lutte physique les plus utilisées contre les nématodes à kystes du genre *Globodera*, nous citons la solarisation du sol, elle est basée sur la sensibilité de ces nématodes à la chaleur.

➤ **La solarisation du sol :** C'est un processus hydrothermal qui consiste à chauffer le sol humide sous des films plastiques transparents pendant les périodes de fortes radiations solaires (Wesemael et al., 2011). Elle présente une alternative intéressante pour lutter contre les nématodes. Un pourcentage de réduction de la population de *G. rostochiensis* a été enregistré après traitement solaire de 62 jours par l'utilisation du polyéthylène noir (Mani et al., 1993).

Selon Greco et al., (2000), la solarisation du sol dans le sud de l'Italie a fortement inhibé la viabilité et la reproduction de *G. rostochiensis*, dans le sol ou et sur les racines de la pomme de terre. Ainsi, la solarisation peut diminuer les populations de 80 % dans certains cas (Duvauchelle, 2013). Cependant, l'efficacité de la solarisation dépend fortement des conditions climatiques ; très efficace dans les régions Sud de la France (Chauvin et al., 2008).

## 2.4. Lutte chimique

L'utilisation des nématicides est actuellement la méthode la plus utilisée pour lutter contre les nématodes dans le monde et en Algérie (Annexe 2). Selon leur mode d'application, on distingue deux types : les fumigants et les systémiques (non fumigants).

➤ **Les fumigants** sont dangereux, phytotoxiques et doivent être appliqués avant la plantation. Ils agissent par asphyxie contre les nématodes en saturant l'atmosphère et en remplissant les pores du sol. Ils sont très efficaces et peuvent tuer tous les stades de développement des nématodes dans le sol traité, y compris les œufs dormants dans les kystes (Kaczmarek, 2014). Leur emploi reste difficile et nécessite certaines conditions et un appareillage assez complexe.

➤ **Les non-fumigants** comprennent les organophosphorés et les carbamates, ils agissent par ingestion en inhibant la sécrétion de l'acétylcholinestérase et par conséquent la pénétration des nématodes dans les plantes hôtes. Ces produits sont facilement applicables grâce à leurs formulations granulaires ou liquides. Ils sont également très dangereux et très efficaces, induisant 80 à 90% de mortalité des nématodes (Blanchard, 2006). L'efficacité des nématicides dépend de plusieurs facteurs tels que la température, la structure du sol ainsi que les microorganismes présents dans le sol (Haydock et al., 2013).

Whitehead et Turner, 1998 ont rapporté aussi l'efficacité de trois nématicides comme le bromure de méthyle, le 1,3-dichloropropène (1,3-D) et l'isothiocyanate de méthyle (MITC) contre *Globodera ssp.* Ainsi une application de bromure de méthyle (448-1464 kg/ha) a montré un contrôle total de *G. pallida* sur tomate et sur pomme de terre. Tobin et al., (2008) ont rapporté une réduction significative des populations des deux nématodes *G. pallida* et *G. rostochiensis* par l'emploi du nématode fosthiazate seul ou combiné avec le champignon *Pochonia chlamydosporia* (Goddard) Zare & W. Gams 2001.

En Algérie l'application du Vydate<sup>®</sup> et du Mocap<sup>®</sup> réduit le nombre des kystes de *G. pallida* et augmente le rendement de la pomme de terre (Galfout, 2014). Ainsi, Norshie et al., (2016) ont montré une réduction de l'infection racinaire et de la multiplication de *G. pallida* après traitement du sol par le nématicide non-fumigant « fluensulfon » (Nimitz 15G<sup>®</sup>) à cinq doses (1,95, 3,00, 4,05, 5,05 et 6,00 kg AI ha<sup>-1</sup>) et le Nimitz 480EC<sup>®</sup> à une seule dose (4,05 kg AI ha<sup>-1</sup>).

Enfin, d'après Hajji-Hedfi et *al.*, (2017), l'application de l'ethoprophos (50 Kg/ha) et de l'oxamyl (20 Kg/ha) a réduit les populations de nématodes à kystes *G. rostochiensis* et augmente de manière significative la croissance et le rendement de la pomme de terre en Tunisie.

En raison de l'efficacité limitée de ces nématicides, de leur toxicité pour les autres organismes du sol ainsi que leur toxicité pour l'environnement et pour la santé humaine, il est nécessaire de développer des méthodes de lutte alternatives.

## 2.5. Lutte génétique

Actuellement, les méthodes de lutte les plus prometteuses reposent sur l'utilisation de variétés résistantes suffisamment efficaces et qui peuvent assurer un contrôle durable des populations de nématodes. L'utilisation de la résistance chez la plante hôte est la méthode la plus efficace et respectueuse de l'environnement pour la gestion de ces parasites (Milczarek, 2012).

Selon Mugniéry et *al.*, (2001), il existe deux modes de résistance contre ces nématodes en fonction du délai d'action après l'attaque. La réaction d'hypersensibilité pendant l'induction du site nourricier provoquée par les gènes H1 (efficace contre Ro1 et 4), H2 (contre Pa1), Gpa2 (contre Pa2 et 3), Gro1-4 (contre Ro1) et GroVI (contre Ro1). C'est la réaction la plus précoce qui se traduit par la mort rapide des cellules au site de l'infection accompagnée d'une accumulation de lignine autour du syncytium, ce qui empêche le développement du nématode (Finkers-Tomczak et *al.*, 2009). Kooliyottil et *al.*, 2016 ont observé une mort cellulaire localisée dans les racines de *S. sisymbriifolium* après une infection par les larves J2 de *G. pallida*. Cette réponse hypersensible a contribué à l'incapacité du nématode à établir avec succès le site d'alimentation nécessaire à leur développement et par la suite entraîné sa mort.

Le deuxième type de réaction est la masculinisation des nématodes adultes causée essentiellement par le gène *Hero A* qui provoque une atrophie ou un développement anormal du site nourricier provoquant la formation des mâles (Blanchard, 2006).

Aucune résistance aux nématodes n'a été observée au sein de l'espèce *S. tuberosum ssp. tuberosum*. En revanche, des facteurs génétiques de résistance aux nématodes à kyste provenant des deux espèces *S. tuberosum ssp. andigena* et *S. vernei* ont été introduits depuis

plusieurs décennies dans les programmes de sélection (Ross 1986, Rousselle-Bourgeois et Mugniéry 1995) et sont actuellement présents dans des variétés commerciales de pomme de terre. C'est le cas notamment du gène de résistance *HI* originaire de l'espèce *S. tuberosum ssp. andigena* qui ne permet de contrôler que les pathotypes *Ro1* et *Ro4* de *G. rostochiensis* (Boucher, 2013) ou du gène *Gpa2* qui ne contrôle que deux populations hollandaises (Blanchard, 2006).

La multiplication des pathotypes de *G. pallida* contre lesquels *HI* n'est pas efficace est favorisée par la grande diffusion de variétés résistantes à *G. rostochiensis*. C'est le cas notamment de l'utilisation intensive durant dix années consécutives du gène *HI* aux Pays-Bas, qui a permis de réduire le niveau d'infestation par *G. rostochiensis*, par contre, les populations de *G. pallida* initialement présentes en faible proportion dans le sol, se sont développées (Blanchard, 2006). De plus, des cas de contournement de gènes de résistance utilisés contre *G. rostochiensis* (*HI*) ont été recensés. En revanche, les contournements des résistances favorisent la sélection de populations de nématodes de plus en plus virulentes. Une utilisation raisonnée de ces résistances est donc nécessaire afin d'en assurer la durabilité (Fournet et al., 2011). Ainsi, des populations avirulentes peuvent parfois s'adapter aux gènes de résistance et peuvent devenir virulentes, comme c'est le cas des populations de *G. pallida* face au QTL (Quantitative Trait Loci ou Locus de caractères quantitatifs de résistance *GpaV<sub>vm</sub>* (Eoche-Bosy et al., 2017).

L'identification des gènes de résistance aux maladies et des marqueurs moléculaires de l'infestation par les nématodes à kyste de la pomme de terre nécessite des études plus approfondies (Mhatre et al., 2022), afin de les utiliser efficacement dans les programmes d'amélioration des cultures contre les NKPT, qui sont économiquement durables et écologiquement sûrs (Chandrasekar et al., 2022).

Récemment, Kooliyottil et al., 2019 ont effectués une analyse du transcriptome des juvéniles de *G. pallida* prélevés sur *S. tuberosum* ou *S. sisymbriifolium* après 24 h de l'infestation afin de fournir des informations sur le processus parasitaire de ce nématode. L'analyse fonctionnelle des gènes différentiellement exprimés chez *G. pallida* lors du parasitisme de *S. sisymbriifolium* a montré une surexpression de plusieurs gènes liés au stress tels que Clp-1, cathepsine S, protéines de choc thermique, gènes codant pour les protéines liées au sexe Hsd2, Srp-8, protéines épidermiques cornifn A, et actine liée au cytosquelette, ce qui a été attribué aux diverses réponses de défense présentées par le *S.*

*sisymbriifolium*. La régulation différentielle des gènes effecteurs qui protègent les nématodes des défenses des plantes, appelés immunomodulateurs, a également été signalée lors d'une analyse fonctionnelle.

De plus, une étude utilisant le séquençage de l'ARN (RNA-Seq) à haut débit pour étudier les mécanismes de résistance induits lors d'une infestation par les NKPT dans le cultivar résistant Kufri Swarna et le cultivar sensible Kufri Jyoti a été réalisée par Chandrasekar et *al.* (2022). Plusieurs gènes sont exprimés de manière différentielle dont 791 gènes dans le cultivar résistant et 2225 gènes dans le cultivar sensible. Ainsi, dans le cultivar résistant Kufri Swarna plusieurs gènes de résistance aux maladies (KIN) et des facteurs de transcription (WRKY, HMG et MYB) ont été identifiés.

## 2.6. Lutte biologique

Ces dernières années, il existe un intérêt accru pour le développement de méthodes alternatives, respectueuses de l'environnement et efficaces pour lutter contre les nématodes et remplacer les nématicides chimiques interdits par les restrictions de l'Union Européenne (UE) (Lord et *al.*, 2011) ; la lutte biologique constitue l'une de ces méthodes. Elle est basée sur l'utilisation des microorganismes vivants tels que les champignons nématophages et les bactéries nématoparasites, ainsi que les plantes nématicides.

### 2.6.1. Champignons nématophages

Ces champignons ont fait l'objet de nombreuses études, ils jouent un rôle important comme antagonistes des nématodes parasites des plantes, et ont la capacité de capturer, de parasiter ou de paralyser les nématodes à tous les stades de leur cycle de vie.

Parmi ces champignons nous avons *Pochonia chlamydosporia* (Goddard Zare & W. Gams 2001) qui est largement utilisée comme traitement biologique contre les nématodes phytoparasites. Tobin et *al.*, (2008) ont rapporté l'efficacité de *P. chlamydosporia* contre *G. pallida* et *G. rostochiensis* sur pomme de terre dans les conditions naturelles avec des réductions des taux de multiplication de l'ordre de 48% et 51% pendant deux années successives. Les potentialités de ce champignon dans une stratégie de lutte intégrée vis-à-vis du genre *Globodera* ont été également montrées (Vieira Dos Santos et *al.*, 2013).

Hajji et *al.*, (2016) ont montré l'efficacité des suspensions de spores de *Verticillium leptobactrum* (W. Gams 1971) et du produit biologique Bio-Nematon basé sur

une formulation en poudre de *Purpureocillium lilacinum* (Thom) Luangsa-ard, Houbraken, Hywel-Jones & Samson 2011) contre *Meloidogyne javanica* (Treub, 1885 ; Chitwood, 1949) et *G. pallida* sur pomme de terre. Les deux traitements ont montré une augmentation de la croissance de la plante et une baisse des populations dans le sol de l'ordre de 76 % et 55 % pour *P. lilacinum* et *V. leptobactrum* respectivement.

Les genres *Trichoderma* et *Fusarium* présentent également des propriétés antagonistes à l'égard de nombreux agents pathogènes et particulièrement les champignons et les nématodes. La multiplication de *G. rostochiensis* a été diminuée de 36.0 % et de 44.4 % suite à l'application de *Fusarium* spp. et de *Trichoderma* spp. respectivement ainsi la croissance et les rendements des plants de pomme de terre ont été augmentés (Trifonova, 2010).

Selon Dandurand et Knudsun (2016), le traitement du sol avec *Trichoderma harzianum* (Rifai 1969) a réduit de manière significative le taux de reproduction de *G. pallida* de 42 % à 47% sur pomme de terre. Ainsi l'application de *Plectosphaerella cucumerina* (Lindfors ; W. Gams 1972) a entraîné une diminution de 88% du facteur de reproduction dans le même système précédent, et une diminution du taux de reproduction de l'ordre de 64% dans le système pomme de terre après jachère.

Enfin, la souche *T. harzianum* ThzID1-M3 a été transformée pour exprimer la protéine fluorescente verte (GFP) qui a été utilisée comme biomarqueur pour étudier les processus du parasitisme et évaluer l'effet de cette souche sur l'infection et la reproduction de *G. pallida*. Le nombre de kystes de *G. pallida* récupéré à partir du sol traité par *T. harzianum* ThzID1-M3 et le taux de reproduction de *G. pallida* ont été considérablement réduits de 49% et 60% respectivement (Contina et al., 2017).

En Algérie, Sellami et al., 2017 ont rapporté l'efficacité des filtrats de culture de *T. atroviride* et *T. harzianum* sur la mortalité des larves et l'inhibition de l'éclosion des œufs de *Meloidogyne incognita* (Kofoid and White) Chitwood. De même, Benttoui et al., 2020 ont signalé l'activité nématicide de *Trichoderma* spp. et de *Fusarium oxysporum* vis-à-vis du nématode à kystes *G. rostochiensis* *in vitro* et *in vivo*.

### 2.6.2. Bactéries antagonistes des nématodes

Les bactéries sont aussi utilisées dans la lutte biologique contre les nématodes phytoparasites et notamment contre le genre *Globodera*. Les rhizobactéries (PGPR) ont fait l'objet de nombreux travaux. Certaines espèces de rhizobactéries nématoparasites comme *Bacillus subtilis* (Ehrenberg, 1835) et *Pseudomonas fluorescense* (Migula, 1895) produisent des enzymes hydrolytiques telles que la protéase, la lipase et la cellulase qui peuvent réduire l'éclosion des œufs (Siddiqui et al., 2005). Elles sont aussi capables d'induire une éclosion de *G. pallida* en l'absence de la plante hôte (Lettice & Jones, 2015). Ainsi, deux modes d'action sont responsables de la réduction de l'infection par les nématodes des racines soit par la production de métabolites qui réduisent l'attraction et l'éclosion, soit par la dégradation des exsudats racinaires spécifiques qui stimulent l'action des nématodes (Dihingia et al., 2017). Enfin Les rhizobactéries favorisant également la croissance des plantes et peuvent provoquer la résistance systémique induite (ISR) au moyen de l'épaississement de la paroi cellulaire, du dépôt de callose nouvellement formé et de l'accumulation de composés phénoliques ce qui renforce la résistance physique et mécanique de la paroi (Dihingia et al., 2017).

Ainsi, Trifonova, (2010) a montré une réduction du taux de multiplication de *G. rostochiensis* suite à l'application au sol des préparations bactériennes à base de trois bactéries : *B. thuringiensis* (Berliner, 1915) var. *berliner*, var. *kurstaki* et *Saccharopolyspora spinosa* (Mertz et Yao, 1990). De même Trifonova et al., 2014 ont rapporté une diminution des populations de *G. rostochiensis* de l'ordre de 40,7% - 42,2% par l'emploi des deux souches bactériennes *Pseudomonas putida* 3 (2) (Trevisan, 1889) et *P. aurantiacea* 13 (2) (Nachimovskaya, 1948) comme traitement biologique en pot.

Aussi, l'efficacité d'*Agrobacterium radiobacter* (Smith et Townsend 1907) et *Bacillus sphaericus* (Meyer and Neide 1904) vis-à-vis de *G. Pallida* a été rapporté (Rack et Sikora, 1992 ; Haskhy-gunther et al., 1998).

Istifadah et al., 2018 ont montré l'effet des bactéries endophytes isolées à partir des racines et des tubercules de pommes de terre sur la mortalité et l'éclosion de *G. rostochiensis*. Le test *in vitro* des filtrats de culture isolés a révélé que sept (07) parmi 88 isolats ont provoqué une mortalité des larves de *G. rostochiensis* de 67,5% à 97,7%. Dans

un essai en serre, les isolats de bactéries endophytes ont montré une diminution du nombre de kystes et de larves (J2) de *G. rostochiensis* de 51,7-65,4 et 48,6-76,4 % respectivement.

### 2.6.3. Substances naturelles ou extraits végétaux

De nombreux travaux ont montré l'efficacité des substances naturelles et des extraits de plusieurs plantes appartenant à plusieurs familles botaniques vis-à-vis des nématodes phytophages et particulièrement des *Globodera* spp.

Les plantes de la famille des *Brassicacées* suscitent un intérêt primordial comme méthode alternative grâce aux essences soufrées qu'elles produisent et qui portent des propriétés nématicides. Elles sont utilisées comme engrais verts dans les assolements ou sous forme de broyats, d'amendements incorporés au sol ou bien comme extraits (aqueux et organiques) et comme huile essentielle. En effet, Aires et *al.*, (2009) ont montré l'efficacité des extraits de quelques plantes telles que : le chou-fleur, le brocoli, les feuilles de navet vert, un cultivar de cresson et deux autres plantes à l'égard de *G. rostochiensis* dans un essai en pot. Ainsi, des extraits de *Nicotiana tabacum* à 0.5% et *Veratrum album* à 1% ainsi que des formulations commerciales du Neem ont entraîné une réduction de la multiplication de *G. rostochiensis* (Trifonova et Atanasov, 2011).

De même, la toxicité de l'isothiocyanate 2-propényle sur les kystes de *G. pallida* a été testée *in vitro* (Brolsma et *al.*, 2014). Une baisse de 50% d'éclosions a été relevée après deux heures d'exposition à l'isothiocyanate 2-propényle à 0,002%. Ngala et *al.*, (2015) ont étudié l'effet *in vitro* des extraits de feuilles et de racines de *Brassica juncea* et de *Raphanus sativus* sur l'éclosion des œufs de *G. pallida*. Pour les extraits de *B. juncea*, une valeur de CL<sub>50</sub> de 0,027 mg ml<sup>-1</sup> a été déterminée, tandis que pour les extraits de racines de *R. sativus* la CL<sub>50</sub> était de 0,032 mg ml<sup>-1</sup>, mais pour les extraits de feuilles, ils ne sont efficaces qu'à des concentrations plus élevées (0,50 mg ml<sup>-1</sup>). Une analyse par HPLC des glucosinolates (GSL) présentes dans les tissus lyophilisés a révélé que le tissu foliaire et le tissu racinaire de *B. juncea* étaient riches en 2-propényl GSL. Cependant, les extraits de feuilles présentent une concentration plus élevée comparativement à l'extrait de racine ; *R. sativus*, contient deux fois plus de GSL dans les racines principalement le 2-phényléthyl GSL comparé au tissu de la feuille qui était dominé par le 4-méthylsulfinylbutyl GSL.

L'efficacité *in vitro* des extraits aqueux issus de différentes plantes comme : le chou de Savoie, le chou-fleur, le brocoli, le chou rouge, le navet, la moutarde blanche, le radis

comestible et le colza sur la mortalité des larves et l'éclosion des œufs a été rapportée par Fatemy et Sepideh, (2016). Ces derniers rapportent que plus de 99 % des larves (J2) ont été paralysées après 96 h d'exposition aux différents extraits. Ainsi, un nombre très réduit (<1%) de J2 a éclos des kystes mis en suspension dans tous les extraits végétaux de *Brassica sp.* pendant une durée d'exposition de six (06) semaines. Wood et al., 2017 ont étudié l'effet *in vitro* de plusieurs isothiocyanates sur la mortalité et l'éclosion des œufs de *G. pallida*. La plupart des isothiocyanates testés se sont montrés probantes, mais le plus efficace étant l'isothiocyanate d'allyle, qui a causé un pourcentage de mortalité de 100% pour les doses de 50 et 25 ppm après 24 et 72 h d'exposition, respectivement. De plus, l'isothiocyanate d'allyle était capable d'inhiber l'éclosion des œufs et d'augmenter la mortalité des œufs à l'intérieur des kystes.

L'effet de plusieurs extraits de plantes de *Brassicacées* (*Raphanus sativus*, *Sinapis alba* et *Lepidium sativum*) et de l'exsudat racinaire (obtenus à partir de *Solanum lycopersicum* et *S. tuberosum*, ainsi que l'exsudat provenant de pots sans plantes et d'eau du robinet) sur l'éclosion des œufs de *G. rostochiensis* a été testé en laboratoire (Franke et al., 2019). Les exsudats racinaires de plantes hôtes ont stimulé la plus grande éclosion (plus de 95 %). Parmi les plantes non-hôtes étudiées, la plus forte stimulation de l'éclosion a été obtenue avec l'exsudat racinaire de *L. sativum* (53,3 %). Une grande variation dans l'éclosion a été notée pour les cultivars de *R. sativus* (20,8% et 33,6%). Dans l'expérience en pot, l'objectif était de déterminer l'effet inhibiteur des extraits de matière sèche de six plantes (Deux cultivars de *R. sativus*, deux cultivars de *S. alba*, *L. sativum* et *Nasturtium officinale*), ajoutés au sol, sur le développement de la population de *G. rostochiensis* dans la culture d'un cultivar de pomme de terre sensible 'Desiree'. Le nématicide Vydate® (10G) a été utilisé comme témoin. Parmi les extraits étudiés, l'extrait de *L. sativum* était le plus efficace et le plus proche du traitement chimique avec un pourcentage de 75% de réduction du développement de la population de nématodes (Franke et al., 2019).

L'efficacité de ces extraits a été attribuée au système glucosinolates-myrosinase et à sa capacité à produire un certain nombre de composés biologiquement actifs contre les nématodes.

## 2.7. Lutte intégrée

Afin de maintenir les populations de nématode à un niveau bas et pour que les dégâts occasionnés soient économiquement tolérables, les recherches s'orientent davantage vers une lutte intégrée contre ces bioagresseurs. Elle repose essentiellement sur l'association de plusieurs méthodes qui permettent d'assurer une réduction plus durable et plus efficace des populations des nématodes et contribuent à réduire les risques associés à l'emploi exclusif des pesticides.

Plusieurs options de lutte intégrée sont possibles. Ainsi, l'efficacité de l'utilisation d'une culture de plantes pièges avec l'Ethoprophos appliqué au sol a été rapporté contre *G. pallida* avec un taux de réduction de 98,5% (Mugniéry et Balandras, 1984).

Tobin et *al.*, (2008), ont relevé une réduction des effectifs de population des espèces de *Globodera* en utilisant le champignon *P. chlamydosporia* dans le cadre d'une stratégie de lutte intégrée avec le nématicide fosthiazate. Deliopoulos et *al.*, (2010) ont rapporté une réduction plus importante des taux de multiplication de *G. pallida* en combinant le traitement nématicide aldicarbe avec des inoculums commerciaux de champignons mycorhiziens arbusculaires (AMF), et ont obtenu de meilleurs rendements. Une réduction efficace des nématodes à kystes de la pomme de terre *Globodera spp.* (47% en 2 ans) par la rotation de variétés sensibles et résistantes aux deux espèces (*G. pallida* et *G. rostochiensis*) avec l'application du nématicide carbofuran (2,0 kg AI/ha) a été enregistrée par Manorama et *al.*, (2016).

Aarti et *al.*, (2017) ont montré une diminution de la population de NKPT suite à une solarisation du sol (4 semaines) suivie de l'application du tourteaux de margousier (5 t/ha) en combinaison avec *Trichoderma viride* (5 kg/ha).

**Tableau 1 :** Effet de la biofumigation par des amendements végétaux de diverses espèces de *Brassicacées* vis à vis de *Globodera*.

Espèces de <i>Brassicacées</i>	Espèces de nématode	GSLs/GHPs utilisés	Types d'amendement	Effets sur le nématode	Références
<i>Brassica juncea</i>	<i>G. pallida</i>	2-propenyl GSL	Engrais vert	> 95% mortalité des œufs	Lord et al., 2011
<i>B. rapa</i>	<i>G. pallida</i>	3-Butenyl GSL	Engrais vert	>90% mortalité des œufs	Lord et al., 2011
<i>Raphanus sativus</i>	<i>G. pallida</i>	4-Methylthio-3-butenyl	<i>In vitro</i> (extraits de feuilles)	97% mortalité des J2	Lord et al., 2011
<i>Nasturtium officinal</i>	<i>G. pallida</i>	2-Phenylethyl GSL	<i>In vitro</i> (extraits de feuilles)	93% mortalité des J2	Lord et al., 2011
<i>B. juncea</i>	<i>G. pallida</i>	Sinigrin	Extraits de feuilles et de racines	85 à 100% de mortalité des œufs	Ngala et al., 2015
<i>R. sativus</i>	<i>G. pallida</i>	Glucoraphanin	Extrait de feuilles	60% de mortalité des œufs	Ngala et al., 2015
<i>R. sativus</i>	<i>G. pallida</i>	Glucoraphanin	Extraits de racines	85 à 100% de mortalité des œufs	Ngala et al., 2015
<i>B. juncea</i> , <i>R. sativus</i> <i>Eruca sativa</i>	<i>G. pallida</i>	Sinigrin Glucoraphanin Glucobrassicinapin	Incorporation d'engrais vert au champ et dans la serre	Augmentation significative de la mortalité des œufs enkystés sauf pour <i>E. sativa</i>	Ngala et al., 2014 ; 2015
<i>B. juncea</i>	<i>G. pallida</i>	Non identifié	Farine de graines	Réduction des taux de reproduction, 99-100% de réduction de l'éclosion.	Dandurand et al., 2017
Produit commercial	<i>G. pallida</i>	Allyl ITC	<i>In vitro</i>	87-100% (selon la dose)	Wood et al., 2017
<i>B. rapa</i> <i>B. oleracea</i> var. <i>botrytis</i> <i>N. officinalis</i>	<i>G. rostochiensis</i>	2-Phenethyl GSL 2-Propenyl GSL	Serre (essai en pot)	Réduction du nombre de kystes (87, 88 et 93%)	Aires et al., 2009
<i>B. oleracea</i> var. <i>botrytis</i> <i>S. alba</i> <i>R. sativus</i>	<i>G. rostochiensis</i>	Non identifiés	<i>In vitro</i> (extraits aqueux)	100% mortalité des J2 et inhibition de l'éclosion des œufs.	Fatemy et Sepideh, 2016
			Engrais vert	Réduction significative du nombre de kystes nouvellement formés	
<i>Lepidium sativum</i>	<i>G. rostochiensis</i>	Non identifiés	<i>In vitro</i>	86-100% (3 h–48 h) mortalité des J2	Fatemy, 2018
			Engrais vert (essai en pot dans la serre)	Réduction de l'éclosion de des œufs 56% Réduction du nombre de kystes et leur contenu en œufs 60%	
<i>R. sativus</i> <i>S. alba</i> <i>L. sativum</i> <i>N. officinale</i>	<i>G. rostochiensis</i>	Non identifiés	Extraits de matière sèche (en pot)	32 – 75%	Franke et al., 2019

## **2<sup>ème</sup> Partie : Partie expérimentale**

## **Chapitre 3 : Effet des densités initiales de population de *Globodera rostochiensis* sur le rendement et la croissance de la pomme de terre.**

### **Objectif de l'étude**

L'objectif de cette étude consiste à étudier l'effet des différentes densités de population de *G. rostochiensis* sur la croissance et le rendement des plants de pomme de terre.

### **3.1. Matériel et méthodes**

#### **3.1.1. Matériel biologique**

Le Matériel biologique que nous avons utilisé au cours de notre expérimentation est l'espèce de *G. rostochiensis* provenant des parcelles de pomme de terre infestées de la région d'El-Oued. Pour cela on a passé par une étape très importante qui est l'échantillonnage. La méthode adoptée pendant nos prélèvements est l'échantillonnage aléatoire, les échantillons de sol sont prélevés entre 20 et 30 cm de profondeur à l'aide d'une tarière. Environ 50 sous-échantillons sont mélangés pour constituer l'échantillon global de 1 à 2 kg. Ces derniers sont mis dans des sacs en papier kraft et conservés au réfrigérateur.

Avant de faire l'extraction, une homogénéisation manuelle de l'échantillon global du sol doit être effectuée. Pour avoir du matériel biologique disponible, une grande quantité du sol a été prélevée et séchée à l'air libre. La méthode utilisée pour l'extraction des kystes à partir du sol est celle préconisée par Fenwick (1940), dont le principe est basé sur la densité du kyste par rapport à celle de l'eau. Ensuite, les kystes ont été récupérés et comptés à l'aide d'une loupe binoculaire.

#### **3.1.2. Matériel végétal**

Le matériel végétal utilisé dans cet essai est la pomme de terre *Solanum tuberosum* L. variété Spunta, provenant du Centre National de Control et de Certification des semences et des plants (CNCC, Alger), vu sa sensibilité au nématode à kyste *G. rostochiensis* et sa large utilisation par les agriculteurs.

#### **❖ Caractéristiques de la variété Spunta (CNCC, 2018) :**

- Calibre : moyen à gros
- Mildiou de feuillage : assez sensible
- Mildiou du tubercule : assez sensible

- PVY : peu sensible
- PVX : moyennement sensible

### 3.1.3. Plantation et inoculation

La plantation a été réalisée dans des pots en plastique de 30 cm de diamètre et d'une capacité de 8 kg remplis par un mélange stérilisé constitué de 2/3 de sol et 1/3 de terreau. Les pots sont troués et contiennent un lit de drainage. Celui-ci est constitué de simples graviers pour assurer le drainage d'eau d'irrigation.

La plantation de la pomme de terre a été effectuée le 14/ 02 /2017, à raison d'un tubercule (de taille uniforme) par pot. L'inoculation est faite par des kystes de *G. rostochiensis* placés dans des tulles à différentes densités ( $P_i = 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256$  et  $512$  œufs/g de sol). Des pots de pomme de terre non inoculés sont utilisés comme témoins. L'arrosage des pots est effectué régulièrement.

La fertilisation a été faite après 15 jours de plantation à raison de 7g d'engrais (15% N, 15%  $P_2O_5$ , 15%  $K_2O$ ) pour chaque traitement. Les pratiques culturales standards (binage, sarclage, désherbage...) ont été appliquées pendant la saison de croissance. Enfin, la croissance des plants de pomme de terre a été déterminée en mesurant la hauteur des tiges.

### 3.1.4. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est un bloc aléatoire complet (figure 7) avec quatre répétitions pour chaque densité ainsi que pour les témoins. Pendant la récolte (après environ 100 jours) les plants ont été prélevés et le rendement de la pomme de terre a été déterminé en pesant le poids des tubercules de chaque pot (g / pot). Le sol de chaque pot a été séché à l'air libre, puis mélangé avant de prélever un sous-échantillon de 500 g pour effectuer l'extraction des kystes.

Les kystes ont été dénombrés puis écrasés et leur teneur en oeufs a été estimée. Les densités finales de *G. rostochiensis* ont été déterminées après comptage du nombre total de kystes de chaque pot. Le facteur de reproduction (Rf) a été calculé comme le rapport entre la densité finale et la densité initiale de population des nématodes ( $R_f = P_f/P_i$ ).

### 3.1.5. Analyses statistiques

Les données ont été traitées par une analyse de la variance ANOVA en utilisant le logiciel STATISTICA. Les différences entre les traitements pour les paramètres étudiés sont comparées par le biais du test HSD de Tukey ( $P= 0,05$ ). Les données ont également été soumises à une analyse de régression logarithmique.

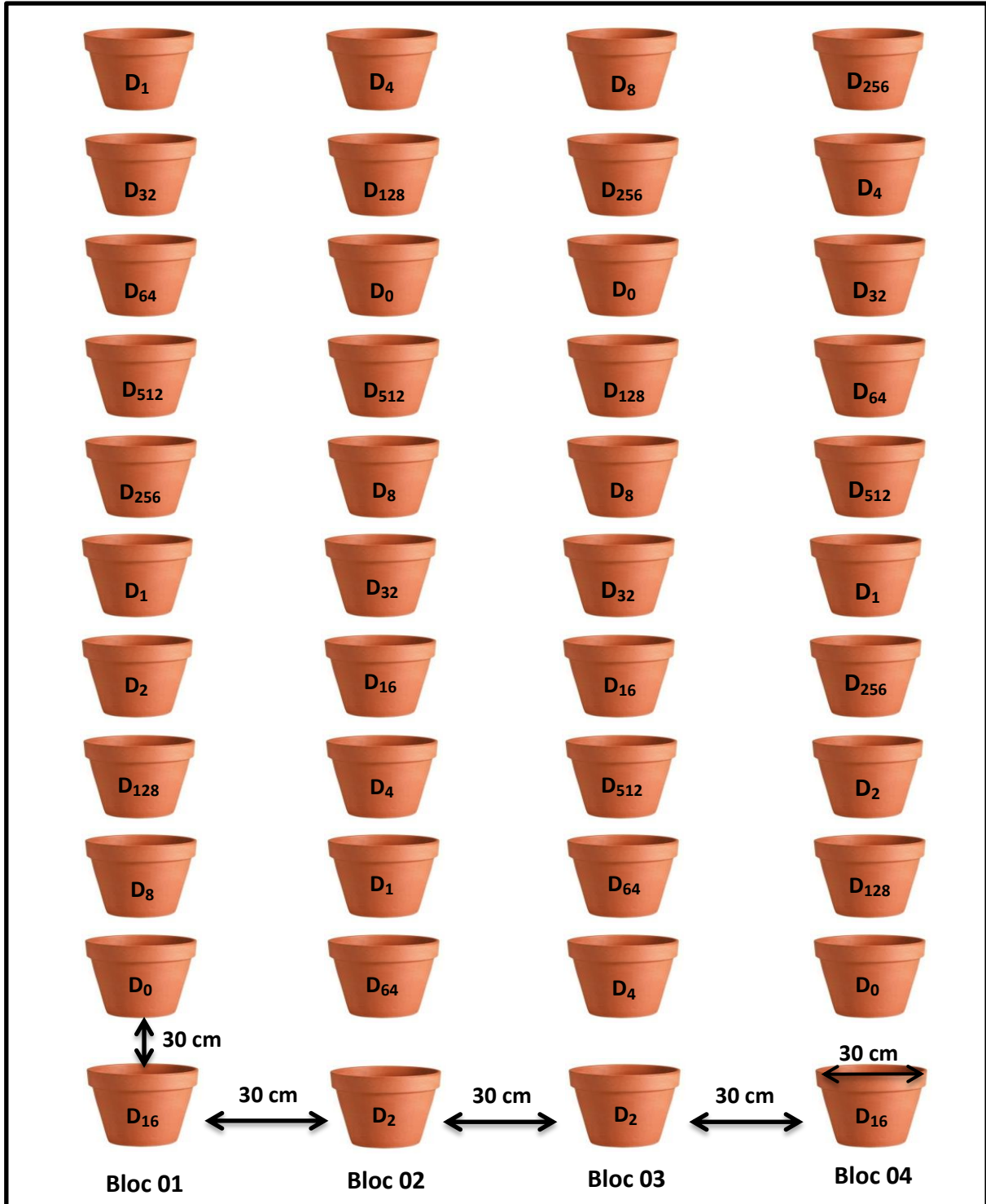


Figure 7 : Schéma du Dispositif expérimental

## 3.2. Résultats

### 3.2.1. Effet de *G. rostochiensis* sur la croissance et le rendement des plants de pomme de terre.

Il est à noter que l'émergence des plants de pomme de terre n'a pas été influencée par les différentes densités. Cependant, les symptômes d'attaque (jaunissement et rabougrissement) ont été observés dans les pots inoculés avec des densités de population de nématodes élevées. L'effet des différentes densités initiales ( $P_i$ ) de *G. rostochiensis* sur la croissance et le rendement de la pomme de terre était très hautement significatif ( $P < 0.001$ ). Chacun des  $P_i$  étudiés a déterminé une augmentation des taux de réduction de rendement et de croissance des plants, par rapport au témoin non inoculé ( $P_i = 0$ ), par l'augmentation des valeurs de  $P_i$  (Tableau 2), révélant que l'impact du  $P_i$  était remarquablement fort. De plus, une légère augmentation de  $P_i$  a provoqué une diminution significative du rendement et de la croissance de la pomme de terre, démontrant une grande sensibilité de la culture à l'attaque de *G. rostochiensis*.

L'analyse des données par une régression logarithmique (figure 8) a montré des relations significativement négatives entre le rendement de la pomme de terre et le  $P_i$  à la fin du cycle de la plante. Les taux de réduction de rendement maximum et minimum de 85,2 % et 16,1 % ont été observés aux  $P_i$  le plus élevé (512 œufs et J2 g<sup>-1</sup> de sol) et le plus faible (1 œuf et J2 g<sup>-1</sup> de sol), respectivement (Tableau 2).

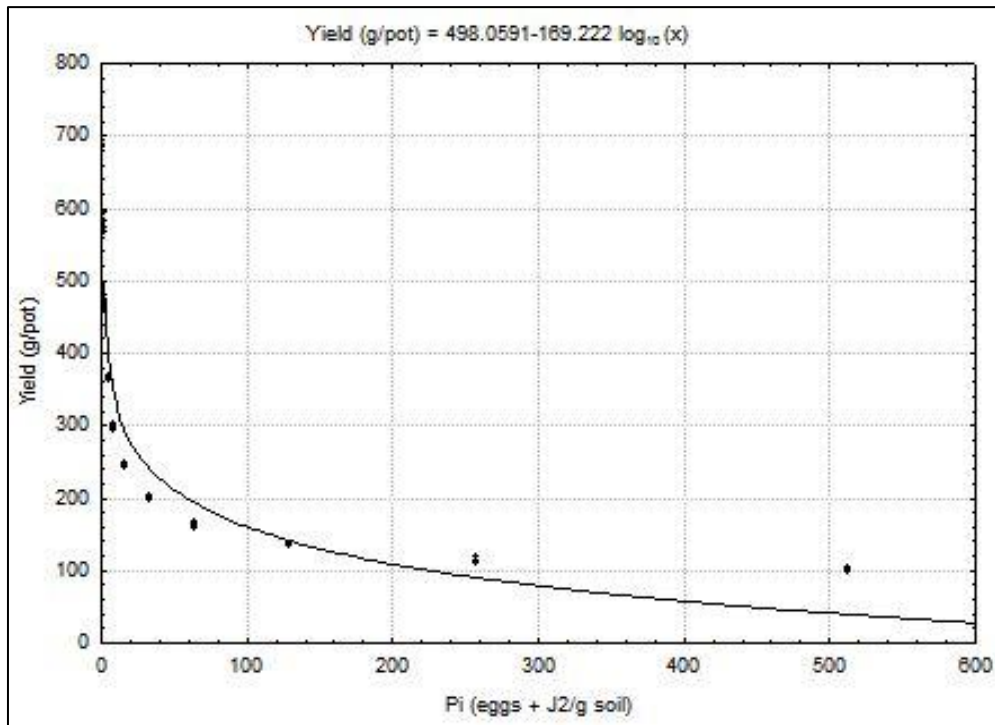
L'augmentation de la population initiale de *G. rostochiensis* dans le sol a montré un effet direct sur la diminution de la croissance des plants. Le pourcentage de réduction de la hauteur des plantes, par rapport au témoin, variait entre 17,9 % et 75,0 % pour une augmentation de  $P_i$  de 1 à 512 œufs et J2 g<sup>-1</sup> sol (tableau 2). Ainsi, les  $P_i = 4$  œufs et J2/g de sol ont provoqué une réduction de 45,68% de la hauteur de la plante. L'analyse des données par régression logarithmique (figure 9) a montré une relation significativement négative entre la croissance de la pomme de terre et les densités initiales de population ( $P_i$ ). Le rendement de la pomme de terre était positivement corrélé avec la hauteur des plants (figure 10).

**Tableau 2 :** Rendement de la pomme de terre et hauteur de plants liés à l'augmentation de la densité de population initiale (Pi) de *Globodera rostochiensis*.

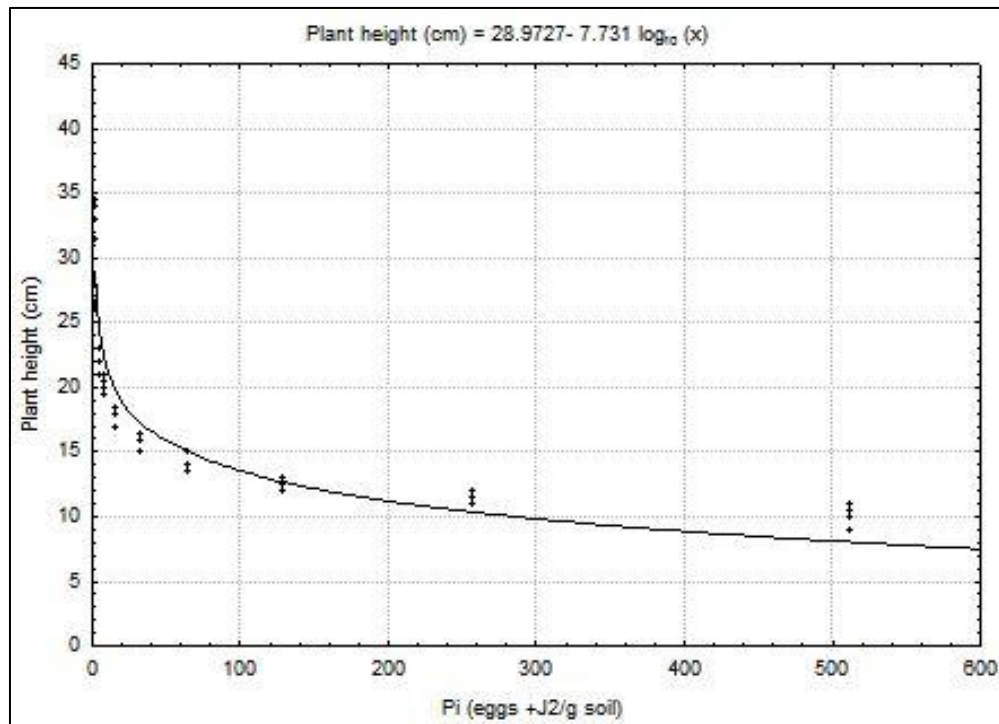
Pi (oeufs +J2/g sol)	Réduction du rendement/pot (%)*	Réduction de la croissance/pot (%)*
0	0.00 ± 1.51a	0.00 ± 0,48a
1	16.07 ± 1.51b	17,92 ± 0,48b
2	29.07 ± 1.51c	33,03 ± 0,48c
4	44.63 ± 1.51d	45,68 ± 0,48d
8	54.96 ± 1.51e	49,99 ± 0,48e
16	62.80 ± 1.51f	55,56 ± 0,48f
32	69.61 ± 1.51g	60,81 ± 0,48g
64	75.26 ± 1.51h	65,13 ± 0,48h
128	79.30 ± 1.51i	68,82 ± 0,48i
256	82.75 ± 1.51g	71,29 ± 0,48g
512	84.52 ± 1.51k	75,01 ± 0,48k
Valeur de p	0.00	0.00

### 3.2.2. Effet de *G. rostochiensis* sur le développement de la population et le taux de multiplication

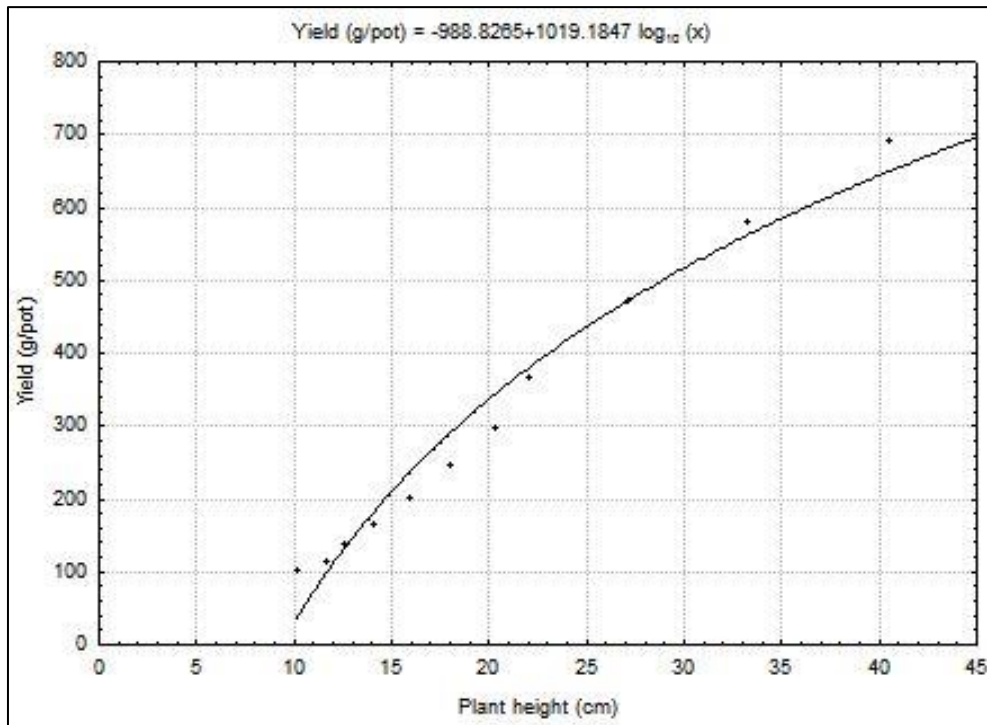
La densité de population finale (Pf), à la fin du cycle de la culture de pomme de terre, croît avec l'augmentation du Pi. L'analyse des données par une régression linéaire (figure 11) a montré des relations très hautement significatives ( $R=0.99$ ) entre les densités de population initiales (Pi) et finales (Pf). Le facteur de reproduction (Rf) a montré des résultats très hautement significatifs ( $P < 0.001$ ). Le facteur de reproduction (Rf) le plus élevé a été déterminé avec une densité initiale  $P_i = 4$  œufs et J2/g de sol. Ainsi, le Rf s'élève avec l'augmentation de Pi (figure 12) jusqu'à la densité  $P_i = 4$  œufs et J2/g de sol. Pour les densités les plus élevées ( $P_i > 4$  œufs/ g de sol), le Rf diminue et cela est peut être due à une compétition intra spécifique.



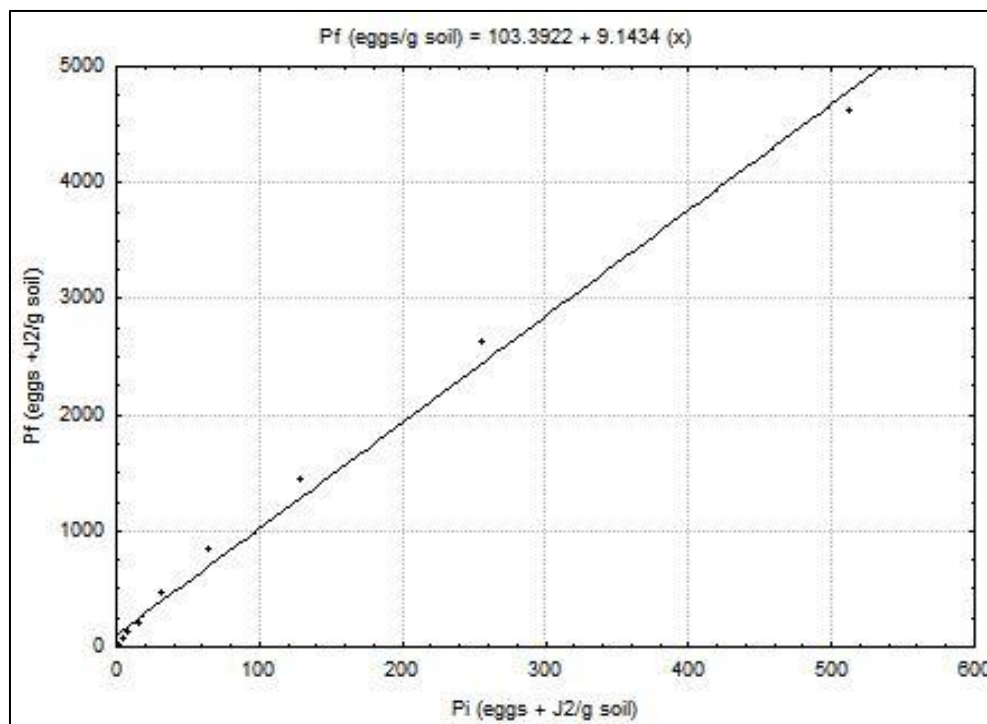
**Figure 8 :** Effet des densités de population initiale (Pi) de *G. rostochiensis* sur le rendement de la pomme de terre ( $r = -0,5930$ ;  $p = 0,00002$ ).



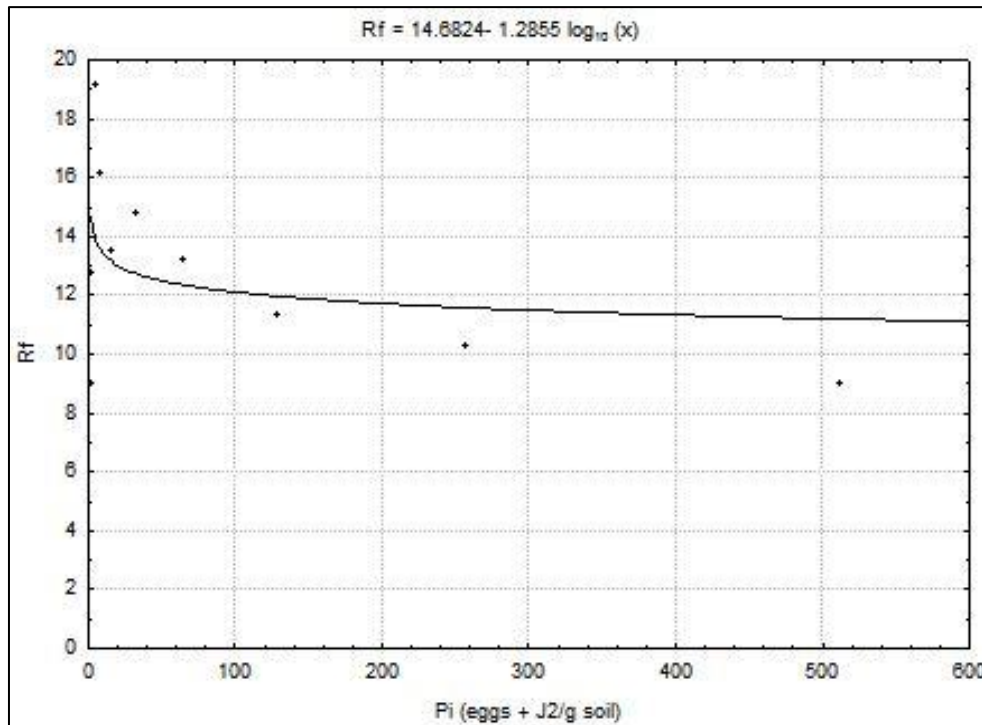
**Figure 9 :** Effet des densités de population initiale (Pi) de *G. rostochiensis* sur la croissance de la pomme de terre ( $r = -0,5949$ ;  $p = 0,00002$ ).



**Figure 10 :** Rapport fonctionnel entre la croissance (cm) et le rendement (g/pot) des plants de pomme de terre ( $r = 0,9962$ ;  $p = 0,0000$ ).



**Figure 11 :** Effet des densités de population initiale ( $P_i$ ) de *G. rostochiensis* sur la densité de population finale ( $P_f$ ) ( $r = 0,9961$ ;  $p = 0,0000$ ).



**Figure 12 :** Effet des densités de population initiale (Pi) de *G. rostochiensis* sur le facteur de reproduction (Rf) ( $r = -0,1956$ ;  $p = 0,5644$ )

### 3.3. Discussion

L'effet des différentes densités de population initiales de différentes espèces de *Globodera* dans la culture de la pomme de terre a été étudié par plusieurs auteurs (Greco *et al.*, 1982 ; Greco et Moreno, 1992 ; Jiménez *et al.*, 2000 ; Hajihassani *et al.*, 2013 ; Maneva et Trifonova, 2015). Les résultats de ces études confirment que les réductions de la croissance et des rendements de la pomme de terre sont directement liées à la densité initiale des nématodes dans le sol.

Notre étude a montré que la population algérienne de *G. rostochiensis* peut entraîner une diminution significative de la croissance et du rendement des tubercules de pomme de terre de la variété Spunta, et ses dégâts croissent avec l'augmentation des densités initiales du nématode. De même, les résultats ont montré que l'augmentation de la population finale (Pf) du nématode est liée avec celle de la population initiale (Pi), tandis que le taux de multiplication (Rf) a diminué avec l'augmentation de la population initiale. Ces résultats confirment les résultats obtenus par les études précédentes.

Selon Seinhorst (1982) et Trudgill et *al.*, (1996), les pertes de rendement des tubercules associées à l'attaque des nématodes à kystes du genre *Globodera* sont dues non seulement à la densité de la population de nématodes au moment du semis, mais surtout à la pénétration et au développement des juvéniles dans le système racinaire de la culture de pommes de terre. Des études antérieures (Greco et *al.*, 1982 ; Trudgill, 1985 ; Greco et Moreno, 1992 ; Jiménez et *al.*, 2000) ont été réalisées sur l'effet de différentes densités initiales de population de *Globodera* sur le rendement et la croissance de la pomme de terre, et les résultats ont été traités en utilisant la formule de Seinhorst (1965). Les résultats de ces recherches ont montré un effet similaire de la densité initiale sur le rendement et la croissance. Les seuils de tolérance de 1,7 œufs/g de sol de *G. pallida*, et de 1,4 et 2,1 œufs/g de sol de *G. rostochiensis* ont été rapportés par Greco et *al.*, (1982). De plus, la production dans les microparcelles inoculées avec une densité  $\geq 64$  œufs/g de sol est négligeable. Le taux de multiplication le plus élevé a été enregistré chez *G. pallida* (128 fois) par rapport à *G. rostochiensis* qui a montré des taux de multiplication plus faibles (58 et 65 fois selon la région).

Les résultats de notre étude sont en accord avec ceux obtenus par Greco et Moreno, (1992) et Jiménez et *al.*, (2000) qui ont montré des taux de réduction du rendement de la pomme de terre de 70 et 73% pour un Pi égale à 128 et 256 œufs et J2/g de sol de *G. rostochiensis* respectivement. De même, la réduction de la croissance des plants de pomme de terre n'a été évidente qu'à la densité initiale de 64 œufs/g de sol de sur les jeunes pommes de terre cultivées en été, mais elle s'est produite à 32 œufs/g de sol sur les pommes de terre de printemps au Chili (Greco et Moreno, 1992). Ainsi, les seuils de tolérance pour le poids de tubercules et le feuillage de pommes de terre d'été étaient de 1,3 et 1,56 œufs/g de sol tandis qu'il était de 1,56 œufs/g de sol pour les deux paramètres concernant la pomme de terre semée au printemps. Des taux de reproduction de 8, 8, 9 et 0,39 ont été enregistrés pour les pommes de terre d'arrière-saison, de primeur et de saison respectivement. Par conséquent, la reproduction de ce nématode et les pertes de rendements étaient plus importantes sur les pommes de terre cultivées au printemps par rapport aux pommes de terre d'été et d'hiver (Greco et Moreno, 1992). Jiménez et *al.*, (2000) ont rapporté un seuil de tolérance de la pomme de terre variété Andinita de 1.5 œufs/cm<sup>3</sup>. Cependant, le taux de reproduction (20 fois) était moins élevé que ceux rapportés par Greco et *al.*, (1982), mais plus élevé par rapport à ceux de Greco et Moreno, (1992).

Hajihassani et *al.*, (2013) ont signalé des pertes de rendement des tubercules > 50% à des  $P_i$  de 32 et 64 œufs et  $J_2 \text{ g}^{-1}$  sol pour les deux variétés de pomme de terre Spunta et Marfona. La population finale ( $P_f$ ) de *G. rostochiensis* a augmenté avec l'augmentation du  $P_i$ , tandis que le taux de multiplication ( $P_f/P_i$ ) a diminué avec l'augmentation du  $P_i$ . Le taux de multiplication du nématode était le plus élevé au  $P_i$  le plus faible (68 kystes par pot ou 2 œufs par g de sol) et le plus faible au  $P_i$  le plus élevé.

Par ailleurs, nos résultats sont similaires à ceux obtenus par Maneva et Trifonova, (2015) qui ont signalé un pourcentage de réduction de 47,8 et 73% de la croissance des plants pour un  $P_i$  égal à 4 et 128  $J_2/ \text{cm}^3$  sol, respectivement. Ainsi, ces mêmes auteurs ont signalé une réduction du rendement qui s'est élevée respectivement à 46,2 et 87,6% pour les mêmes valeurs de  $P_i$  (4 et 128  $J_2/\text{cm}^3$  de sol). Même si l'augmentation de  $P_i$  provoque un  $P_f$  élevé,  $R_i$  augmente jusqu'à  $P_i < 4.0 J_2/ \text{cm}^3$  de sol puis pour  $P_i \geq 4.0$  il y a une diminution du facteur de reproduction ( $R_i$ ).

De plus, Djebroune et *al.*, 2020 ont rapporté l'effet de *Globodera spp.* sur trois variétés de pomme de terre, Kondor, Spunta et Désirée dans les conditions naturelles de l'Algérie. Des taux de multiplication moyens à élevés (2,5 et 4,04) pour les variétés Spunta et Désirée respectivement ont été enregistrés. Cependant, le facteur de reproduction des nématodes était très faible pour la variété Kondor (0,05). La variété Kondor a montré le meilleur rendement par rapport aux variétés Spunta et Desiree.

La réduction significative de la croissance des plants, relevée dans notre expérimentation, est probablement due à un développement accru des larves du deuxième stade ( $J_2$ ) de *Globodera* dans les systèmes racinaires des pommes de terre, ce qui a conduit, par les modifications histologiques à une diminution de l'absorption de l'eau et des nutriments dans les plants (Hajihassani et *al.*, 2013).

L'augmentation de  $P_i$  a entraîné une augmentation de  $P_f$ , cependant le facteur de reproduction ( $R_f$ ) augmente jusqu'à  $P_i < 4$  œufs/g de sol où il atteint la valeur la plus élevée et diminue pour  $P_i \geq 4$ . Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Maneva et Trifonova, (2015). Cette diminution du facteur de reproduction ( $R_f$ ) pour  $P_i \geq 4$  peut être expliquée par la compétition pour la nourriture et l'espace dans les densités d'inoculum les plus élevées. Le système racinaire reste relativement plus petit et plus fin, ce qui signifie

qu'il ne peut pas fournir suffisamment de surface racinaire pour l'alimentation des larves. (Phillis, 1991).

La différence dans les conditions environnementales, les variétés de pomme de terre utilisées, la durée du cycle de la culture, les espèces de nématode ainsi que les pathotypes peuvent expliquer les différences des taux de multiplication du nématode.

Étant donné que les symptômes de *Globodera* ne sont pas spécifiques et ne sont pas visibles que pour un niveau élevé d'inoculum, les agriculteurs ignorent probablement certaines pertes de rendement survenant dans les parcelles infestées. Par conséquent, en connaissant la population de nématodes au moment du semis, les résultats de ces expériences peuvent être utilisés pour estimer les pertes de rendement et pour organiser des stratégies de contrôle appropriées au problème. En Algérie, la variété Kondor a montré les meilleurs résultats en termes de résistance et de rendement. Il est important d'utiliser cette variété pour contrôler ces bioagresseurs (Djebroune et *al.*, 2020).

## **Chapitre 4 : Contribution à l'étude biologique du nématode à kystes *G. rostochiensis*.**

### **Objectif de l'étude**

Cette étude vise à déterminer la durée du cycle et d'estimer le nombre de génération du nématode à kystes *G. rostochiensis* dans les conditions naturelles pendant deux saisons différentes.

### **4.1. Matériel et méthodes**

#### **4.1.1. Caractéristiques de la parcelle expérimentale**

L'essai s'est déroulé dans une parcelle située dans les champs de l'Ecole Nationale supérieure Agronomique (ENSA) qui se situe sur le plateau de Hassan Badi, commune d'Oued Smar, daïra d'El-Harrach, wilaya d'Alger. Les coordonnées géographiques de la région sont :

- Longitude : 3° 9' 2.85'' E.
- Latitude : 36° 43' 9.45'' N.
- Altitude : 48 m.

La microparcelle utilisée dans cette essai était de 2 m<sup>2</sup> avec une texture limoneux-sableux, un pH neutre, riche en matière organique et pauvre en azote (argile : 35,23 %, limon fin : 23,25 %, limon grossier : 25,24 %, sable fin : 10,20 %, sable grossier : 5,78 %, N : 0,026 %, MO : 4,89 % et pH : 7,04).

#### **4.1.2. Températures et précipitations**

Pendant la période de l'expérimentation, les températures de l'air et les températures du sol à une profondeur de 10 cm ont été enregistrées quotidiennement par le service météorologique de l'ENSA. Les données des précipitations nous ont été fournies par la station météorologique de Dar El Beida.

#### **4.1.3. Matériel végétal**

Le matériel végétal utilisé dans notre expérimentation est la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.), variété Spunta qui est très sensible aux nématodes à kyste du genre *Globodera*

et variété Kondor qui est connue par sa résistance à ce genre de nématode. Ces variétés provenant du CNCC d'Alger sont les plus cultivées en Algérie.

❖ **Propriété de la variété Spunta :**

- \* Couleur de la peau : jaune
- \* Précocité : demi précoce
- \* Calibre : moyen à gros
- \* Mildiou de feuillage : assez sensible
- \* Mildiou du tubercule : assez sensible
- \* PVY : peu sensible
- \* PVX : moyennement sensible.
- \* PVA : moyennement sensible
- \* PLRV : peu sensible
- \* Alternaria : peu sensible

❖ **Propriété de la variété Kondor :**

- \* Couleur de la peau : rouge
- \* Précocité : moyenne
- \* Calibre : gros
- \* Mildiou de feuillage : assez sensible
- \* Mildiou du tubercule : peu sensible
- \* PVY : assez sensible
- \* PVX : peu sensible
- \* PVA : peu sensible
- \* PLRV : peu sensible
- \* Alternaria : peu sensible
- \* Nématode doré Ro 1/4 : - / -
- \* Nématode doré Ro 2/3 : - / -
- \* Nématode blanc Pa 2 : - / -
- \* Nématode blanc Pa 3 : - / -

#### 4.1.4. Plantation

La parcelle expérimentale a été divisée en deux micro-parcelles élémentaires de 1 m<sup>2</sup> de superficie pour chaque variété.

La première plantation (culture de saison) a été effectuée le 12/02/2017. Elle est réalisée à raison de huit tubercules par rang, avec un écartement de 25 cm entre tubercules, et deux rangs par micro-parcelle, soit un total de 16 tubercules dans la micro-parcelle élémentaire. L'inoculation par les nématodes a été effectuée avec la plantation à raison de 25 kystes par tubercules placés dans des tulles.

La deuxième plantation (culture de primeur) a été effectuée le 30/10/2017 dans la même parcelle et les mêmes conditions.

Les racines de pomme de terre sont prélevées après 7 à 10 jours de plantation, sur des plants que nous avons repérés, puis tous les 7 jours, et ceci jusqu'à la récolte de la pomme de terre, qui a eu lieu le 28/05/2017 et le 07/02/2018 pour la première et la deuxième plantation respectivement.

Les températures sont exprimées en Degré Jour Effectif (DJE) en utilisant une température de base pour *G. rostochiensis* de 6,2°C (Mugniéry, 1978). Le DJE est calculé selon la formule suivante :

$$\text{DJE} = (\text{Tmoy} - \text{Tb}) \times \text{J}$$

Où :

**Tmoy** : Température moyenne ; **Tb** : Température de base (6.2 °C pour *G. rostochiensis*) ;

**J** : Nombre de jour depuis le semis jusqu'à l'apparition du stade de développement.

#### 4.1.5. Coloration des nématodes à la fuchsine

Les échantillons de racines prélevés ont été soigneusement lavés, puis ces derniers on les fait bouillir dans une solution de lactophénol (28,5% de phénol dans l'acide lactique) et de la fuchsine acide (0,05% dans le lacto-phénol) pendant 3 min (Hooper, 1986). Après rinçage dans de l'eau, les racines sont transférées dans une solution de glycérine et d'eau distillée avec quelques gouttes d'acide lactique. Enfin les racines sont montées entre lames et lamelles et les différents stades du nématode sont observés sous une loupe binoculaire.

## 4.2. Résultats

Les valeurs moyennes des variables météorologiques, lors des essais en micro parcelles en 2016 - 2017 et 2017 - 2018, sont représentées dans les figures 13 et 14, respectivement.

La première saison de croissance est caractérisée par une température moyenne de 16.64 °C, alors que la deuxième saison a été plus fraîche, avec une température moyenne égale à 13.16 °C. Ainsi, la deuxième saison a reçu le plus de précipitations, avec environ 360 mm par rapport à la première saison qui a reçu une faible quantité de précipitations avec environ 130 mm.

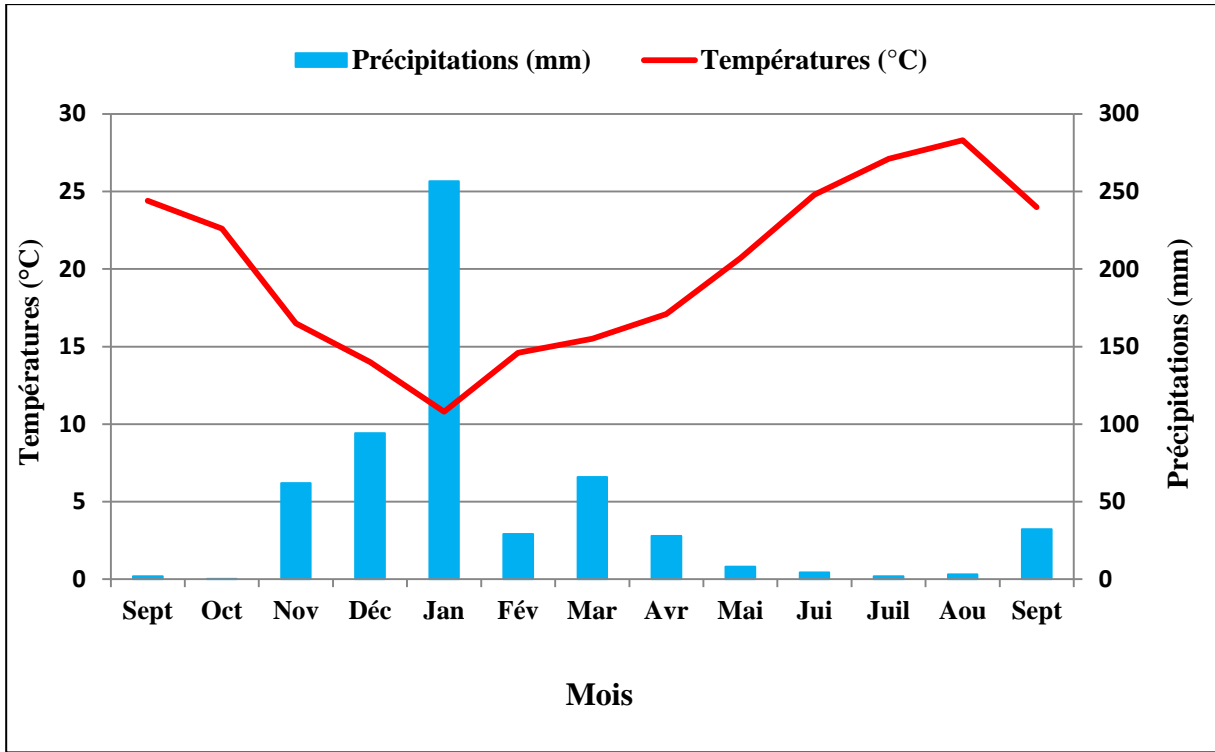
Les températures moyennes quotidiennes du sol à une profondeur de 10 cm sont indiquées dans la figure 15. Dans l'ensemble, la température du sol variait de 13 à 17 °C et de 10 à 13 °C, respectivement pour les deux saisons étudiées.

Les données des différents stades de développement de *G. rostochiensis* sur la culture de pomme de terre durant les deux saisons de plantation sont représentées dans les tableaux (3 et 4).

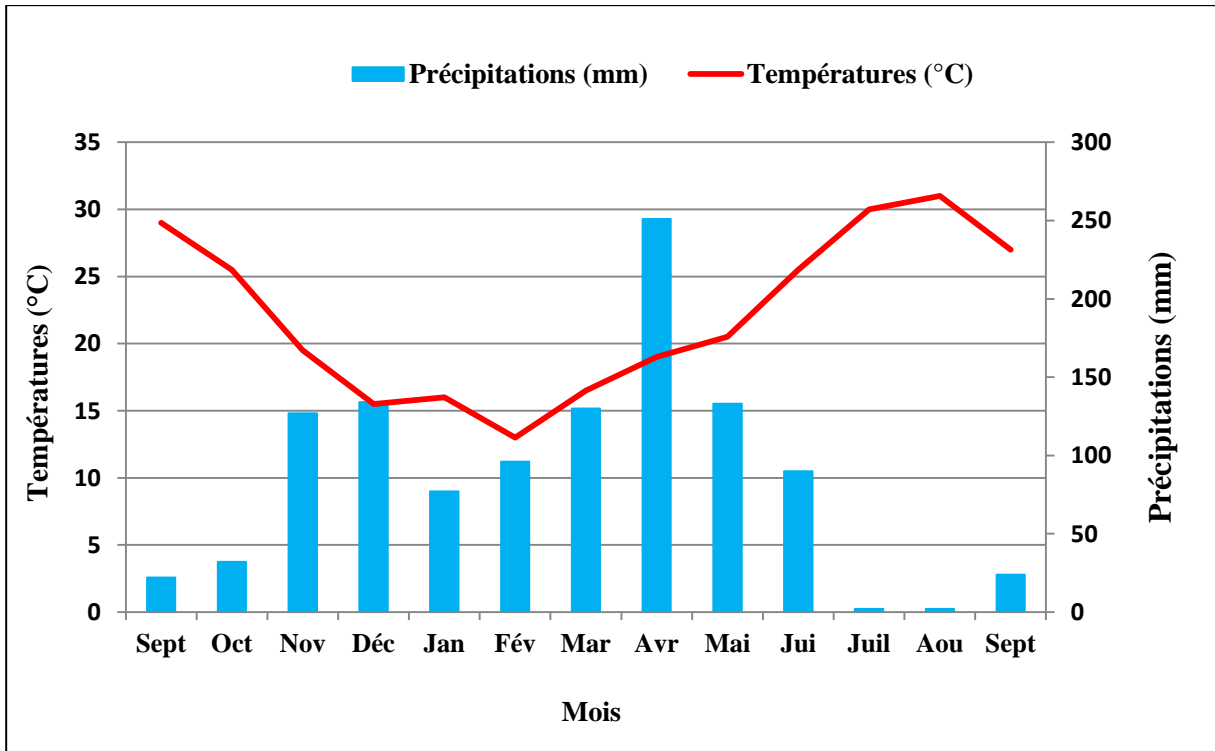
Au cours de la première culture de saison, les premières larves du deuxième stade (J2) de *G. rostochiensis* ont été détectés dix (10) et dix-sept (17) jours après plantation (JAP) (figure 16A et 16B), avec un degré jour accumulé  $DJ_{6,2}$  de 83 et 142 (tableau 4) pour les deux variétés Spunta et Kondor respectivement. Les juvéniles du troisième (figure 16C) et quatrième stade (J3+J4) ont été notés à 17 JAP avec un degré jour accumulé  $DJ_{6,2}$  de 142 pour la variété spunta et 24 JAP avec un DJ égal à 208 pour la variété kondor.

Les premières femelles sont apparues à 24 et 31 JAP pour les deux variétés spunta et kondor (figure 16 D). Le degré jours accumulé  $DJ_{6,2}$  était de 208 et 279 respectivement. Cependant, les femelles sur la surfaces des racines ont été détectées après 59 et 66 jours de semis (figure 16E), avec un degré jour accumulé de 533 et 620 pour les variétés spunta et kondor, respectivement.

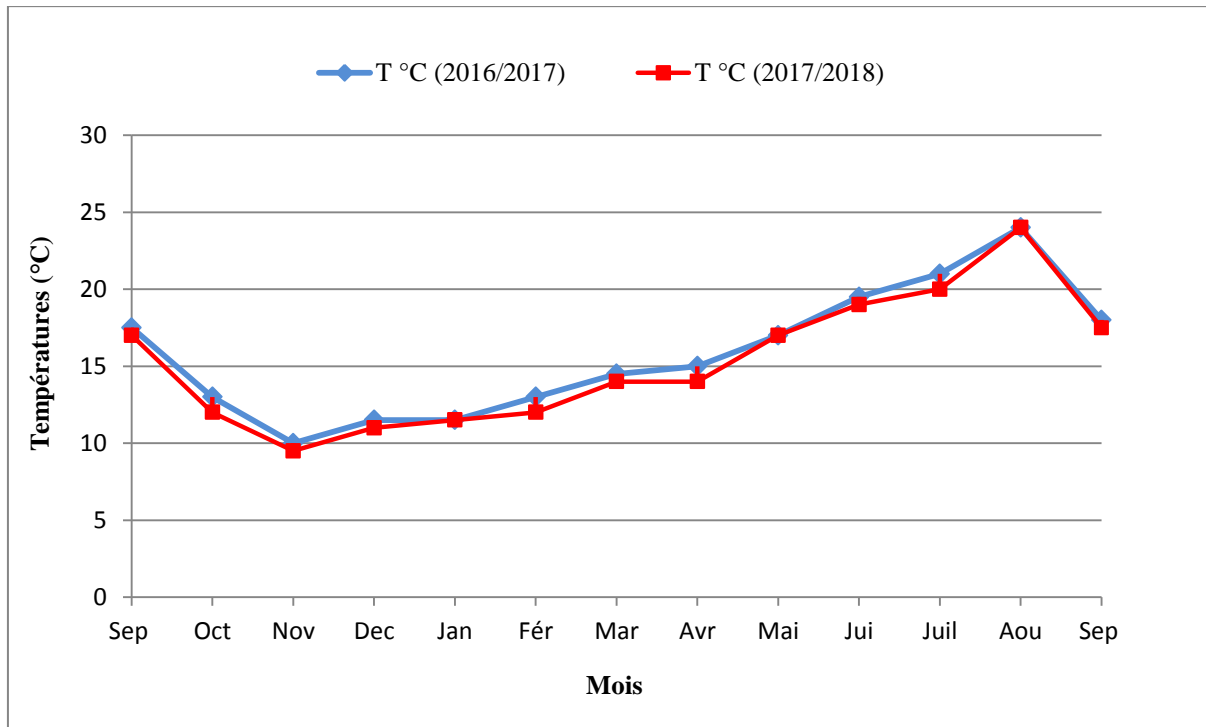
Enfin, les premiers kystes (figure 16F) de *G. rostochiensis* ont été relevés sur les racines à 620  $DJ_{6,2}$  et 66 JAP pour la variété spunta et à 699  $DJ_{6,2}$  et 73 JAP pour la variété kondor.



**Figure 13** : Températures moyennes de l'air et précipitations enregistrées durant l'année 2016 - 2017.



**Figure 14** : Températures moyennes de l'air et précipitations enregistrées durant l'année 2017 - 2018.



**Figure 15 :** Températures du sol à 10 cm de profondeur enregistrées en 2016-2017 et 2017-2018

Au cours de la deuxième saison ou la culture de primeur, les premières larves du deuxième stade (J2) de *G. rostochiensis* ont été enregistrées sept (07) et quinze (15) JAP pour les deux variétés Spunta et Kondor ; avec un degré jour accumulé de 82 et 147 DJ<sub>6,2</sub> (tableau 4). Les larves du troisième et quatrième stade (J3+J4) ont été détectées après 15 jours de plantation avec un degré jour accumulé DJ<sub>6,2</sub> de 147 pour la variété spunta et 23 JAP avec 199 DJ<sub>6,2</sub> pour la variété kondor.

Les premières femelles sont apparues à 23 et 30 JAP où le degré jours accumulé DJ<sub>6,2</sub> était de 199 et 251 pour les deux variétés spunta et kondor respectivement. Ainsi, les femelles sur les racines ont été observées après 52 jours de plantation avec un degré jour accumulé de 361 DJ<sub>6,2</sub> pour la variété spunta et 59 JAP avec 402 DJ<sub>6,2</sub> pour la variété kondor.

Cependant, les premiers kystes de *G. rostochiensis* ont été détectés sur les racines des deux variétés spunta et kondor à 402 DJ<sub>6,2</sub> et 59 JAP et à 459 DJ<sub>6,2</sub> et 66 JAP, respectivement.

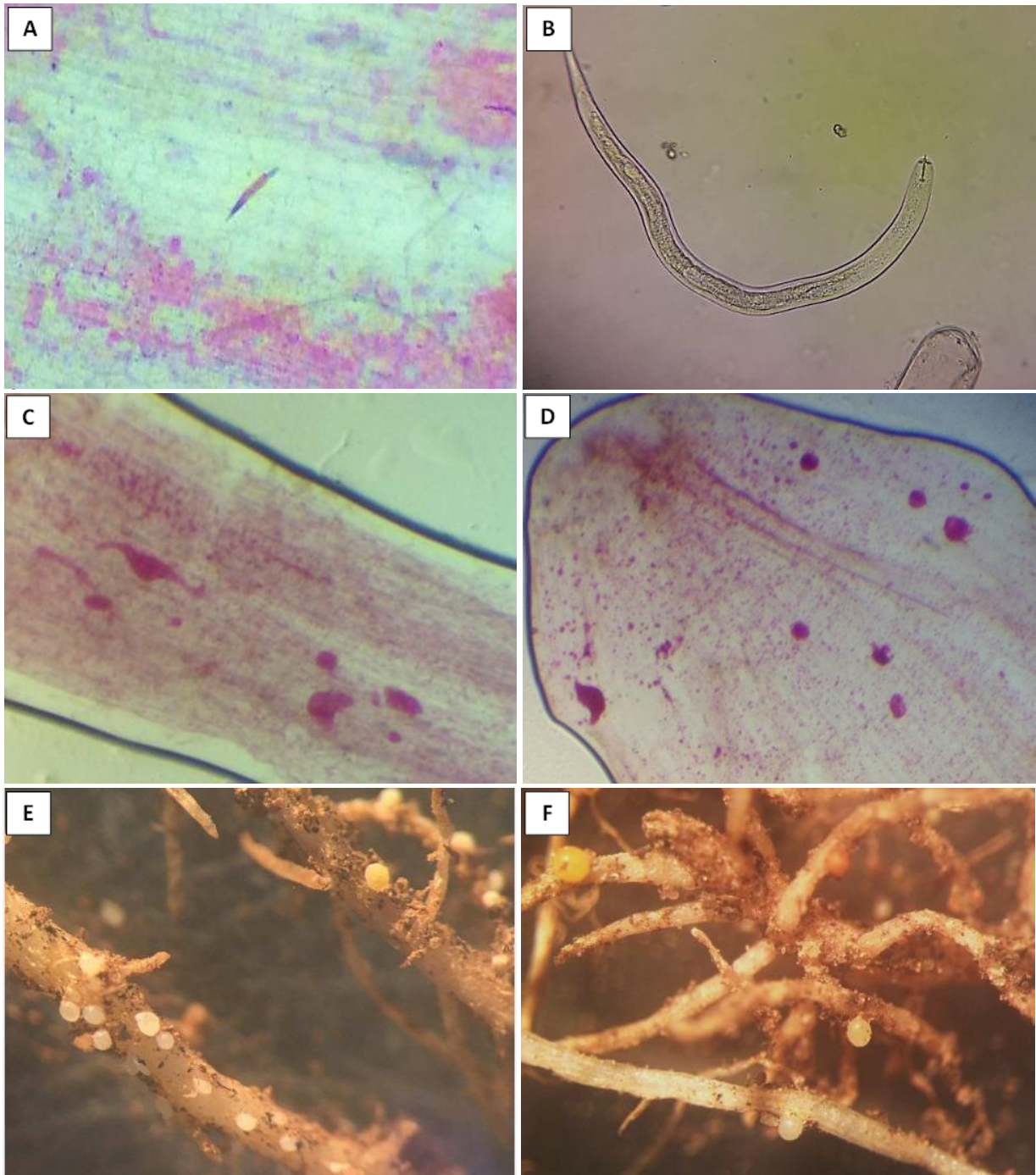
**Tableau 3** : Différents stades de développement de *G. rostochiensis* sur les deux variétés de pomme de terre Spunta et Kondor pendant les deux saisons de plantation.

Date de prélèvement	Variétés de pomme de terre									
	Spunta					Kondor				
	J2	J3+J4	Femelles	Femelles sur la surface	Kystes	J2	J3+J4	Femelles	Femelles sur la surface	Kystes
<b>21-02-17</b>	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>28-02-17</b>	17	29	-	-	-	12	-	-	-	-
<b>07-03-17</b>	4	9	15	-	-	3	23	-	-	-
<b>14-03-17</b>	2	8	22	-	-	1	12	11	-	-
<b>21-03-17</b>	1	10	16	-	-	1	9	12	-	-
<b>28-03-17</b>	-	6	6	-	-	-	7	14	-	-
<b>04-04-17</b>	-	3	6	-	-	-	3	6	-	-
<b>11-04-17</b>	-	2	4	2	-	-	2	5	-	-
<b>18-04-17</b>	-	1	3	1	1	-	1	4	3	-
<b>25-04-17</b>	-	1	4	1	2	-	1	2	2	2
<b>02-05-17</b>	-	2	3	2	1	-	-	2	2	1
<b>09-05-17</b>	-	-	2	2	3	-	-	1	1	1
<b>16-05-17</b>	-	-	1	1	1	-	-	-	1	-
<b>05-11-17</b>	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>13-11-17</b>	12	21	-	-	-	6	-	-	-	-
<b>21-11-17</b>	20	14	16	-	-	10	18	-	-	-
<b>28-11-17</b>	15	15	18	-	-	16	11	13	-	-
<b>06-12-17</b>	10	9	17	-	-	8	13	10	-	-
<b>13-12-17</b>	8	7	11	-	-	5	10	14	-	-
<b>20-12-17</b>	-	6	6	3	-	-	8	9	-	-
<b>27-12-17</b>	2	4	5	4	1	3	5	6	2	-
<b>03-01-18</b>	-	3	3	5	6	2	3	5	3	1
<b>10-01-18</b>	-	1	4	3	8	-	1	4	2	6
<b>17-01-18</b>	-	2	2	2	5	-	1	3	2	3
<b>24-01-18</b>	-	1	1	1	3	-	-	1	1	2
<b>31-01-18</b>	-	-	-	-	2	-	-	-	-	1
<b>07-02-18</b>	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1

Le nombre de différents stades de *G. rostochiensis* était plus élevé chez la variété spunta par rapport à la variété kondor (tableau 3). Ainsi, le cycle biologique du nématode à kystes de pomme de terre *G. rostochiensis*, depuis l'émergence des J2 jusqu'au développement de nouveaux kystes, durait 66 et 73 jours pour les deux variétés spunta et kondor, respectivement pour la culture de saison. Cependant, pour la culture de primeur la durée du cycle de ce nématode était de 59 jours pour la variété spunta et 66 jours pour la variété kondor.

**Tableau 4:** Relation entre les différents stades de développement de *G. rostochiensis* et le Degré Jour sur les deux variétés de pomme de terre (cv. Spunta et Kondor).

Stades de développement	Variétés de pomme de terre							
	Spunta				Kondor			
	Culture de saison		Culture de primeur		Culture de saison		Culture de primeur	
	JAP	DJ <sub>6.2</sub>	JAP	DJ <sub>6.2</sub>	JAP	DJ <sub>6.2</sub>	JAP	DJ <sub>6.2</sub>
<b>J2</b>	10	83	7	82	17	142	15	147
<b>J3+J4</b>	17	142	15	147	24	208	23	199
<b>Femelles</b>	24	208	23	199	31	279	30	251
<b>Femelles sur la surface des racines</b>	59	533	52	361	66	620	59	402
<b>Kystes</b>	66	620	59	402	73	699	66	459



**Figure 16:** Différents stades de développement de *G. rostochiensis* observés sous loupe binoculaire ; **A :** Larve du deuxième stade (J2), **B :** Larve du deuxième stade (J2) observée sous microscope optique (G\*80), **C :** Larve du 3<sup>ème</sup> stade, **D :** Femelles, **E :** Femelles blanches, **F :** Femelles jaunes + kyste

### 4.3. Discussion

Le cycle de vie de différentes espèces de *Globodera* sur différentes variétés de pomme de terre a été étudié par plusieurs auteurs (Greco et al., 1988 ; Renčo, 2007 ; Alonso et al., 2011 ; Bacic et al., 2011 ; Ebrahimi et al., 2014 ; Mimee et al., 2015).

Les résultats de notre étude confirment qu'une génération complète de *G. rostochiensis* par saison de croissance a été enregistrée. Cependant, à des situations géographiques et à une température moyenne favorable à la culture de pomme de terre, ce bioagresseur peut initier une génération partielle sans pouvoir achever son cycle en raison probablement de l'absence de radicelles nécessaires pour l'alimentation, ou encore il peut effectuer deux générations (Greco et al., 1988 ; Chauvin et al., 2008 ; Galfout, 2014 ; Fatemy et Ghasemi, 2018). En effet, ce bioagresseur peut s'adapter à une gamme de température assez large et se développe aussi bien à 20 qu'à 27°C. En revanche, les deux espèces de *Globodera* se reproduisent à 20°C mais *G. pallida* semble mieux adaptée aux basses températures que *G. rostochiensis* (Greco et al., 1988). Enfin, la température du sol a un impact significatif sur l'éclosion de PCN où l'éclosion optimale de *G. rostochiensis* a eu lieu entre 15 et 27 °C, mais elle peut être retardée à des températures supérieures à 25 °C (Kaczmarek et al., 2014).

Notre étude a montré que le cycle biologique depuis l'émergence de J2 jusqu'au développement de nouveaux kystes dans le sol durait 66 et 73 jours pour les deux variétés spunta et kondor, respectivement à la culture de saison. Cependant, la durée du cycle de ce nématode était de 59 jours pour la variété spunta et 66 jours pour la variété kondor à la culture de primeur.

A l'île de Chypre, *G. rostochiensis* a terminé son cycle biologique sur les cultures d'automne et de printemps à 56 et 63 jours après le semis, respectivement, lorsque les degrés jours accumulés étaient de 416 et 529 (Philis, 1980). Les différences observées étaient dues aux différentes températures pendant la saison de croissance, aux cultivars de pomme de terre et au pathotype de *G. rostochiensis*. En Italie, pour atteindre les stades femelle et kyste, respectivement, 126 et 168 DJ<sub>6,2</sub> sont nécessaires pour *G. rostochiensis* dans les régions de Catania et Bari à climat subtropicales et 275 et 450 DJ<sub>6,2</sub> dans la région d'Avezzano à climat tempéré (Greco et al., 1988).

Les résultats de notre étude ont montré que les premières femelles sont apparues lorsque la chaleur accumulée était de 208 et 199 DJ<sub>6,2</sub> pour la variété spunta et de 279 et 251 DJ<sub>6,2</sub>

pour la variété kondor, aux cultures de saison et de primeur respectivement. De plus, les premiers kystes de *G. rostochiensis* ont été observés sur les racines à 620 DJ<sub>6,2</sub> et 66 JAP pour spunta et 699 DJ<sub>6,2</sub> et 73 JAP pour kondor à la culture de saison. Cependant, à la culture de primeur les premiers kystes ont été détectés sur les racines à 402 DJ<sub>6,2</sub> et 59 JAP et à 459 DJ<sub>6,2</sub> et 66 JAS pour la variété spunta et kondor, respectivement.

Ces derniers résultats sont en accord avec ceux de Renco et *al.*, (2007) qui ont montré que la durée du cycle de *G. rostochiensis* pathotype Ro1 entre l'éclosion de J2 dans le sol et l'apparition de nouveaux kystes bruns était de 68 jours pendant la première année (2003) et de 60 jours la deuxième année (2004) en Slovaquie. Les premières éclosions de larves J2 de *G. rostochiensis* ont été enregistrées deux semaines (12 mai, 2003) et trois semaines (16 mai, 2004) après la plantation de pommes de terre, lorsque la température du sol variait de 13°C à 18°C et de 10°C à 14°C, respectivement. Les températures durant la période de l'essai en 2003 étaient plus élevées qu'en 2004 et les pommes de terre ont émergé plus tôt en 2003 qu'en 2004. Ainsi, les larves J2 dans le sol, J2, J3, J4, les jeunes femelles et les jeunes mâles ont été observées dans les racines plus tôt en 2003, cependant de nouvelles femelles blanches ont été enregistrées 61 jours après la plantation en 2003 et 49 (groupe A) et 55 jours (groupe B) après la plantation en 2004.

Nos résultats ont révélé que le cycle de vie de *G. rostochiensis* était plus long dans la culture de saison où les températures sont plus élevées de 13 à 17 °C par rapport à la culture de primeur avec des températures plus basses de 10 à 13 °C. Ces données concordent avec ceux de Bačić et *al.*, 2011 qui ont rapporté un effet négatif des températures élevées du sol supérieures à 25 °C en 2003, influençant le développement du nématode et prolongeant le cycle de vie de *G. rostochiensis* de deux mois par rapport au 2002 où le cycle de vie a duré 29 jours après la pénétration des larves du deuxième stade dans les racines. De plus, une génération par an a été effectuée par le nématode doré de la pomme de terre dans le climat tempéré de Belgrade.

Les données relatives au nombre réduit des différents stades de *G. rostochiensis* sur les racines de pomme de terre sur la variété Kondor s'expliquent par la pénétration des larves qui, lors de leur migration se trouvent bloquées ou peuvent agir encore plus tardivement, lors du développement larvaire et de la différenciation sexuelle. En effet, les résistances peuvent aussi agir à des étapes plus tardives lors de l'induction du site nourricier. Cette réaction est notamment observée avec les résistances monogéniques et se traduit par une réaction rapide

de nécrose qui devient défavorable à la formation des femelles (Mugniéry et Balandras, 1984 ; Rice et *al.*, 1985).

Par ailleurs, Jiménez-Pérez et *al.*, (2009) ont suggéré l'absence de diapause des populations de *G. rostochiensis* à Venezuela où une partie des œufs de la première génération ont développé une deuxième génération. En outre, la durée du cycle de *G. rostochiensis* était de 42 jours à une température du sol de 18 °C à 10 cm de profondeur et une température moyenne de l'air de 19,5 °C. Les larves du deuxième, troisième et quatrième stade ont été observées dans les racines après 14, 21 et 28 jours l'inoculation, respectivement. Tandis que les femelles et les mâles ont été observés après 35 jours.

De plus, Alonso et *al.*, (2011) ont comparé le développement de *G. pallida* sur deux variétés de pomme de terre ; une variété précoce Maris Peer et Marfona qui est une culture principale. La plantation a été effectuée en 2001 (Novembre-Mai) et 2002 (Janvier-Mai) pour la variété précoce et en 2001 et 2003 pendant la même saison (Janvier-Mai) pour la culture principale. Les résultats ont montré que les femelles ont été observées sur les racines de Maris Peer après 77 jours avec un DD<sub>4</sub> d'environ 540 pour les deux saisons de plantation. Cependant, pour la variété Marfona, les femelles sont apparues après 59 jours avec 415 DD<sub>4</sub> en 2001 et après 73 jours avec 400 DD<sub>4</sub> en 2003. L'éclosion des larves du deuxième stade (J2) et la pénétration dans les racines a eu lieu 29-35 et 57-56 jours après plantation en 2001-2002 pour la variété précoce. Par ailleurs, la culture principale a montré que l'éclosion des larves (J2) s'est produite après 18-31 jours et la pénétration dans les racines a été enregistrée 45-52 jours en 2001-2003 respectivement dans les îles espagnoles de Majorque.

Ebrahimi et *al.*, (2014) ont signalé une durée de cycle de *G. pallida* de 70 jours avec 463 DJ<sub>4</sub> sur les deux variétés Sinora et Lady Christl dans un essai aux champs naturellement infestés. Par ailleurs, *G. pallida* a complété son cycle de développement dans 65 jours avec 463 DJ<sub>4</sub> sur la variété Première dans des microparcelles nouvellement infestées. Cependant, le cycle de vie de *G. rostochiensis* était plus long (trois jours) que celui de *G. pallida* avec 401 DD<sub>6</sub> sur la variété Eersteling dans dans les conditions précédentes. Ces dernières valeurs de degré jour (régions tempérées) sont proches de celles requises par *G. rostochiensis* dans notre expérience en microparcelle réalisée comme culture primeur (199 - 496 DJ<sub>6.2</sub>).

Dans les conditions climatiques de la région du sud-ouest de Québec, des essais ont été réalisés dans deux champs infestés par *G. rostochiensis* sur la variété de pomme de terre

sensible "Snowden" pour une période de quatre ans allant de 2009 jusqu'à 2012 (Mimee et al., 2015). *G. rostochiensis* a complété son cycle avec un minimum de 579 DJ<sub>5,98</sub> et les premiers kystes matures ont été observés après 42 à 63 jours de plantation.

Les valeurs de degré jour accumulé rapportées par les auteurs varient selon les lieux et les dates de semis. Il faut également noter que les différentes estimations des degrés jour accumulés rapportées pour les différentes espèces de NKPT pourraient être partiellement attribuées aux méthodes utilisées pour le calcul. Par conséquent, il est préférable que les auteurs décrivent la méthode de calcul des valeurs des degrés jour pour que les résultats peuvent être interprétés et comparés entre eux (Ebrahimi et al., 2014).

Enfin, la connaissance de la biologie de ce nématode dans les différentes conditions environnementales, la durée du cycle de développement sur différents cultivars peuvent constituer une meilleure base pour la gestion de ce bioagresseur.

## **Chapitre 5 : Evaluation de l'activité nématocide de deux espèces appartenant à la famille des *Brassicacées* à l'égard de *Globodera rostochiensis*.**

### **Objectif de l'étude**

L'objectif de cette étude consiste à étudier l'effet nématocide des extraits aqueux de feuilles et de racines de deux espèces de Brassicacées : *Raphanus sativus* et *Nasturtium officinale* sur la mortalité des larves du deuxième stade (J<sub>2</sub>) et l'éclosion des œufs de *G. rostochiensis in vitro* et sur le développement de ce bioagresseur et la croissance des plants de pomme de terre *in vivo*.

### **5.1. Matériel et méthodes**

#### **5.1.1. Matériel biologique**

L'espèce de nématode utilisée au cours de notre expérimentation est l'espèce *G. rostochiensis* en provenance des parcelles de pomme de terre infestées de la région d'El-Oued.

#### **5.1.2. Matériel végétal**

Le matériel végétal utilisé au cours de notre expérimentation est la pomme de terre *Solanum tuberosum* L. variété Spunta, provenant du Centre National de Control et de Certification des semences et des plans (CNCC, Alger). Cette variété est utilisée pour la préparation des exsudats racinaires pour le test *in vitro* et au cours de l'essai *in vivo*.

Les deux plantes testées dans les essais appartiennent à la famille des *Brassicacées*. Le Cresson (*N. officinale*) qui a été collecté à l'état spontané pendant le printemps dans la commune d'Ain Taya (Wilaya d'Alger) et le Radis (*R. sativus*) variété «Radis National», qui a été cultivée à l'École Nationale Supérieure d'Agronomie (ENSA) et récoltait au stade floraison pour une utilisation ultérieure.

#### **5.1.3. Nématocide utilisé**

Le nématocide utilisé au cours de notre expérimentation est le Vydate<sup>®</sup>, c'est un carbamate dont la matière active est l'Oxamyl. Les doses préconisées pour les tests

*in vitro* ont été préparées en rapportant les doses optimales recommandées (tableau 5) à la surface des boîtes de Petri et des pots utilisés.

**Tableau 5** : Les caractéristiques du nématocide Vydate<sup>®</sup> (Anonyme, 2017).

Nom commercial	Vydate <sup>®</sup>
<b>Matière active</b>	Oxamyl
<b>Origine</b>	DuPont <sup>™</sup>
<b>Fabricant</b>	DuPont <sup>™</sup>
<b>Formule brute</b>	C <sub>7</sub> H <sub>13</sub> N <sub>3</sub> O <sub>3</sub> S
<b>Famille chimique</b>	Carbamates
<b>Solubilité</b>	Dans l'eau 280 g/l à 25 °C
<b>Concentration de la matière active</b>	240 g/l
<b>Forme</b>	Liquide vert
<b>Utilisation et doses d'emploi</b>	30 kg/ha
<b>Mode d'action</b>	Systémique et contact
<b>Toxicité</b>	Très toxique

#### 5.1.4. Préparation des extraits aqueux

La technique utilisée pour la préparation des extraits aqueux est celle préconisée par Sasanelli et Di Vito (1991) avec quelques modifications. Elle consiste à broyer dans de l'eau distillée, après séchage à l'air libre, des parties des deux plantes (feuilles, racines) utilisées dans notre expérimentation. Pour chaque extrait 25 g de poudre de plante a été ajouté à 250 ml d'eau distillée. Les solutions obtenues sont centrifugées à 3000 tours pendant quelques minutes, puis filtrées à travers le papier filtre de Wattman (0,22µm) pour obtenir une solution claire dans laquelle les kystes et les larves sont visibles. Les filtrats constituent les solutions mères, standards (S=100 mg/ml) ou solutions biologiques. C'est à partir de la solution standard que sont préparées les dilutions (S/2=50 mg/ml) et (S/4=25 mg/ml). Les extraits obtenus ont été conservés au réfrigérateur à une température de 4 °C jusqu'à leur utilisation dans les essais.

### 5.1.5. Préparation des exsudats racinaires

Afin d'obtenir les exsudats racinaires, des plants de pomme de terre Var. Spunta sont cultivés dans des pots en plastique sous conditions naturelles. Après 4 à 6 semaines, chaque pot était saturé d'eau distillée, puis 50 ml d'eau ont été rajoutés et la solution s'écoulant a été récupérée et passée dans le pot deux fois de plus. La solution obtenue a été collectée, filtrée pour éliminer les débris et stockée à 4° C jusqu'à leur utilisation ultérieure (Turner et *al.*, 2009).

### 5.1.6. Test *in vitro* : Activité nématocide des extraits aqueux de feuilles et de racines des plantes le Radis et le Cresson vis-à-vis de *G. rostochiensis*

#### 5.1.6.1. Effet des extraits aqueux sur la mortalité des larves du deuxième stade (J2)

Afin de stimuler l'éclosion, les kystes de *G. rostochiensis* sont prétrempés dans de l'eau distillée pendant 48 h, puis incubés à 20 °C dans l'exsudat racinaire de la pomme de terre. Les larves du deuxième stade (J2) sont collectées et 50 larves sont placées dans des boîtes quadrillées contenant 4 ml de chaque extrait testé aux trois doses retenues : S (100 %), S/2 (50 %) et S/4 (25 %). L'eau distillée et le traitement chimique (Vydate®) sont utilisés comme témoins. Quatre répétitions ont été réalisées pour chaque traitement ainsi que pour les témoins.

Les boîtes de pétri des différents traitements ont été conservés à la température ambiante et le nombre de larves mortes a été dénombré sous loupe binoculaire après 24, 48, 72 heures. Les résultats sont exprimés en pourcentage de mortalité selon la formule suivante :

$$\text{Pourcentage de mortalité \%} = \frac{\text{Nombre de nématodes morts}}{\text{Nombre total de nématodes}} \times 100$$

Sachant que le nombre d'individus morts dénombrés dans une population traité par un toxique n'est pas le nombre réel d'individus tués par ce produit, il existe une mortalité naturelle qui vient s'ajouter à la mortalité provoquée par ce toxique. De ce fait, les résultats sont exprimés en taux de mortalité corrigée calculé selon la formule d'Abbott (1925) :

$$\text{Pourcentage de mortalité corrigée MC \%} = \frac{M2 - M1}{100 - M1} \times 100$$

Où :

**M1** : pourcentage de mortalité observée dans le témoin ;

**M2** : pourcentage de mortalité observée dans la population traitée.

Les résultats obtenus sont transformés en probits afin de pouvoir tracer les droites de régression en fonction des logarithmes décimaux des doses utilisées.

#### **5.1.6.2. Effet des extraits aqueux sur l'éclosion des œufs**

Les kystes de *G. rostochiensis* ont été désinfectés dans une solution d'hypochlorite de sodium (NaOCl) 0.5% pendant 1 min puis ont été rincés. Les kystes ont été trempés dans de l'eau distillée pendant 48 heures. Dix (10) kystes ont été exposés à un mélange de 4 ml de chacun des extraits aux trois doses étudiées (100%, 50% et 25%) et de 4 ml de l'exsudat racinaire de pomme de terre, dans différentes boîtes. L'exsudat racinaire de la pomme de terre et le traitement chimique (Vydate<sup>®</sup>) sont utilisés comme témoins. Quatre répétitions ont été réalisées pour chaque traitement et les boîtes ont été conservées à l'obscurité à 22°C pendant six (06) semaines. Le nombre de larves écloses a été estimé chaque semaine sous loupe binoculaire et les kystes ont été transférés dans un nouveau mélange d'exsudat et de l'extrait. Après six (06) semaines, tous les kystes ont été écrasés, le nombre d'œufs non éclos à l'intérieur des kystes a été compté et le pourcentage d'éclosion a été calculé. Les résultats sont exprimés en pourcentage d'inhibition de l'éclosion des œufs.

#### **5.1.7. Test *in vivo* : Effet de *R. sativus* et de *N. officinale* sur le développement de *G. rostochiensis* et sur la croissance des plants de pomme de terre**

Cet essai a été effectué dans des pots en plastique de 20 cm de diamètre, contenant un mélange stérilisé constitué de 2/3 de sol et 1/3 de terreau. Les feuilles de chaque plante ont été coupées en petits morceaux (environ 1,5 cm) et ont été mélangées avec le sol à raison de 5, 10 et 20 g de feuilles /900 g de sol. Chaque pot a été rempli avec le mélange (sol + feuilles coupées) jusqu'à le tiers (1/3), l'inoculation a été réalisée à raison de 40 kystes (environ 8000 œufs) par pot placés dans des tuelles qui ont été déposés à la surface du sol et le reste du mélange de sol a été ajouté et a été recouvert d'une autre couche de sol non traité bien réparti pour minimiser la perte des substances volatiles contenues dans la matière végétale. Les pots ont été couverts avec du plastique et laissés pendant 20 jour dans une serre (26 ± 1°C) et la plantation de la pomme de terre s'est faite à raison d'un tubercule (de taille

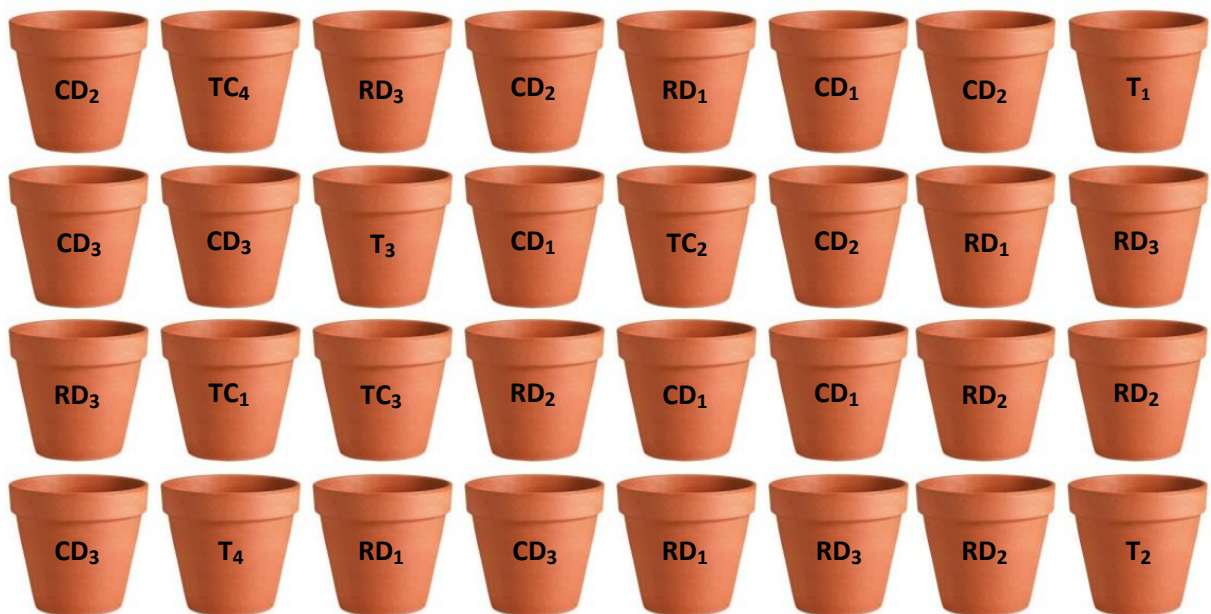
uniforme) par pot. Les témoins sont représentés par des plants non traités (T) et des plants traités avec le nématocide (TC).

Après le semis, les pots ont été placés dans des conditions naturelles et irrigués régulièrement et organisés selon un dispositif complètement randomisé à bloc aléatoire complet avec quatre (04) répétitions pour chaque traitement (figure 17).

Enfin, les kystes sont extraits à la fin de culture (après environ 100 jours), après homogénéisation du sol, un échantillon de 500 g de sol par pot a été analysé selon la méthode de Fenwick.

Les paramètres retenus pour l'évaluation de l'efficacité de ces traitements sont:

- ❖ Le nombre de nouveaux kystes et œufs comptés sous loupe binoculaire ;
- ❖ Le facteur de reproduction :  $Rf = Pf/Pi$  où, **Pf** : population finale de nématode dans le sol ; **Pi** : population initiale de nématode ;
- ❖ La croissance des plants de pomme de terre est déterminée en mesurant la hauteur des plants
- ❖ Le poids des tubercules de pomme de terre.



**Légende :** **C** : Le cresson (*R. sativus*); **R** : Le Radis (*N. officinale*); **TC** : Traitement chimique; **T** : Témoin sans traitement ; **D**<sub>1</sub> = 5 g de feuilles / 900 g de sol ; **D**<sub>2</sub> = 10 g de feuilles / 900 g de sol ; **D**<sub>3</sub> = 20 g de feuilles / 900 g de sol ;

**Figure 17 :** Schéma du dispositif expérimental

### **5.1.8. Identification des métabolites secondaires du radis (*R. sativus*) et du cresson (*N. officinale*).**

Les métabolites secondaires des plantes de la famille des *Brassicacées* apparaissent comme une approche alternative très prometteuse dans la gestion des nématodes du genre *Globodera*. De ce fait, l'objectif de cette étude est de faire une identification et une quantification des glucosinolates et de composés phénoliques présents dans le radis et le cresson par une chromatographie liquide à haute performance (HPLC) couplée à la spectrométrie de masse (LC-MS).

#### **5.1.8.1. Extraction et purification des métabolites secondaires**

Le matériel végétal utilisé a été récolté au stade floraison. Les échantillons de feuilles et de racines ont été conservés dans l'azote liquide et conservés à -80 °C 'jusqu'à leur utilisation. Les échantillons congelés ont été lyophilisés et broyés en une poudre fine à l'aide d'un moulin électrique. Pour chaque échantillon, l'extraction a été réalisée en utilisant 50 mg de poudre avec 500 µl de méthanol aqueux à 80%. Les échantillons ont été passés par une agitation (à travers un vortex) pendant 15 secondes. Puis, ils sont passés par une étape d'extraction par sonication pendant 15 min et une autre étape de centrifugation pendant 10 min, afin d'éliminer les débris végétaux (13000 tr/min, à température ambiante). Les solutions obtenues ont été filtrées à travers des filtres PTFE microporeux de 0,20 µm et placées dans des flacons pour des analyses ultérieures.

#### **5.1.8.2. Analyse par chromatographie liquide à temps de vol quadripolaire (LC-QTOF)**

Cinq microlitres de chaque échantillon ont été injectés dans un système de chromatographie liquide à ultra-haute performance (UHPLC) (Thermo Dionex Ultimate 3000 LC) connectée à un détecteur QTOF (Bruker Compact™) avec une source d'ionisation électrospray (ESI) chauffée (figure 18).

La séparation chromatographique a été réalisée dans une colonne Bruker UHPLC Intensity Solo 2 C18 2,1 × 100 mm de 1,7 µm de taille des pores en utilisant un mode de solvant à gradient binaire constitué d'acide formique à 0,1 % dans l'eau (solvant A) et d'acétonitrile (solvant B). Le gradient suivant a été utilisé : 3 % B (0-3 min), de 3 % à 25 % B (3-10 min), de 25 % à 80 % B (10-18 min), de 80 % à 100 % B (18-22 min), et maintenu

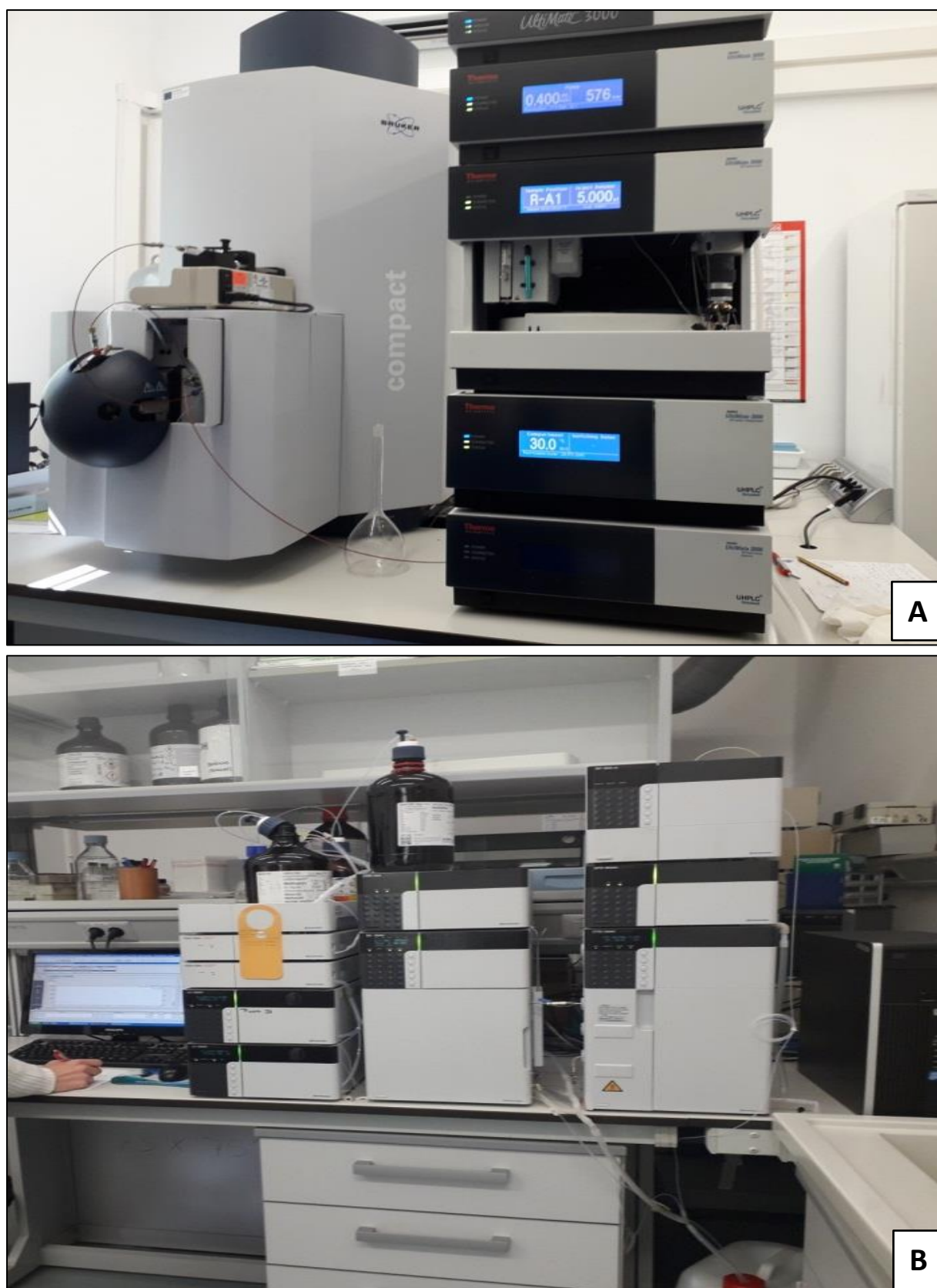
à 100 % B jusqu'à 24 min. Le débit a été établi à 0,4 mL/min et la température de la colonne a été contrôlée à 30 °C.

Les données MS ont été acquises en utilisant un taux d'acquisition de 2 Hz sur la gamme de masse de 50 - 1200 m/z. Les deux polarités ( $\pm$ ) du mode ESI ont été utilisées dans les conditions spécifiques suivantes : débit de gaz 8 L min<sup>-1</sup> ; pression du nébuliseur 38 psi ; gaz sec 7 L min<sup>-1</sup> ; température sèche 220 °C. Les décalages du capillaire et de la plaque terminale ont été réglés à 4500 et 500 V, respectivement. Pour contrôler les performances de l'acquisition des données, la séquence d'exécution a été lancée avec trois blancs (méthanol, le solvant utilisé pour l'extraction des échantillons) et un composé standard, le phosphate de triphényle (TP). L'analyse MS/MS a été effectuée dans une plage d'acquisition de spectre de 50 à 1200 m/z et une résolution de masse de 23 000 (largeur totale à mi-hauteur). Les ions ont été ciblés sur la base de la masse précise et du temps de rétention (RT) déterminés au préalable et fragmentés en utilisant différentes rampes d'énergie de collision pour couvrir une de 15 à 50 eV (Tortosa et *al.*, 2018).

La caractérisation des constituants a été faite sur la base des caractéristiques moléculaires, qui prend en compte le temps de rétention, le schéma isotopique du rapport masse/charge (m/z) et l'état de charge des composés putatifs. Les bases de données : PubChem, MassBank, , Metlin et Chempider ont été utilisées.

#### **5.1.9. Analyses statistiques**

Les données ont été traitées par une analyse de la variance ANOVA en utilisant le logiciel STATISTICA. Les différences entre les traitements pour les paramètres étudiés sont comparées par le biais du test HSD de Tukey (P= 0,05).



**Figure 18 :** Système de chromatographie liquide à ultra-haute performance (UHPLC) (Thermo Dionex Ultimate 3000 LC) (A) connecté à un détecteur des molécules d'intérêt (B).

## 5.2. Résultats

### 5.2.1. Test *in vitro* : activité nématocide des extraits aqueux de feuilles et de racines des plantes de brassicacées (le radis et le cresson) vis-à-vis de *G. rostochiensis*.

#### 5.2.1.1. Effet des extraits aqueux sur la mortalité des larves du deuxième stade (J2).

Les résultats de l'évaluation de la toxicité des extraits aqueux de différentes parties des plantes (radis et cresson) à l'égard de *G. rostochiensis*, à différentes concentrations, exprimés en pourcentages de mortalité corrigée, sont représentés dans le tableau 6 et illustrés dans les figures 19, 20, 21 et 22. La lecture des données révèle que tous les extraits testés ont montré une activité nématocide vis-à-vis des larves de *G. rostochiensis*. Cette activité augmente avec l'élévation de la concentration et de la période d'exposition, et varie selon l'espèce et l'organe utilisé.

En effet, à une dose plus élevée ( $S=100$  mg/ml) et après 72 heures d'exposition, les pourcentages de mortalité corrigée sont de l'ordre de 63.10 % pour l'extrait aqueux de feuilles de *R. sativus* et atteint 90.37 % pour celui des racines de la même espèce. Les extraits de *N. officinale* ont enregistré des pourcentages plus faibles allant de 48.13 % pour les extraits racinaires à 58.82 % pour les extraits foliaires.

A la dose moyenne ( $S/2=50$  mg/ml) et après 72 h d'exposition, les taux de mortalité étaient de 55.61 et 78.07% et de 53.48 et 43.85% pour les extraits de feuilles et de racines de *R. sativus* et de *N. officinale* respectivement.

Avec une concentration plus faible ( $S=25$  mg/ml), *R. sativus* et *N. officinale* ont enregistré des pourcentages de mortalité des juvéniles de l'ordre de 49.73 % et 66.31 % et de 45.99 % et 37.43 % pour les extraits de feuilles et de racines respectivement.

Il est à signaler que toutes les doses ont montré une mortalité nettement supérieure à celle du témoin. De ce fait, toutes les doses des extraits aqueux des deux espèces ont eu un effet nématocide. Cependant, les extraits de *R. sativus* étaient les plus efficaces en manifestant des taux de mortalité des larves supérieurs à 50% pour les trois concentrations et les trois périodes d'exposition. De plus, les extraits de racines ont montré un effet plus élevé chez le radis contrairement au Cresson où les taux les plus élevés sont enregistrés dans les extraits de feuilles.

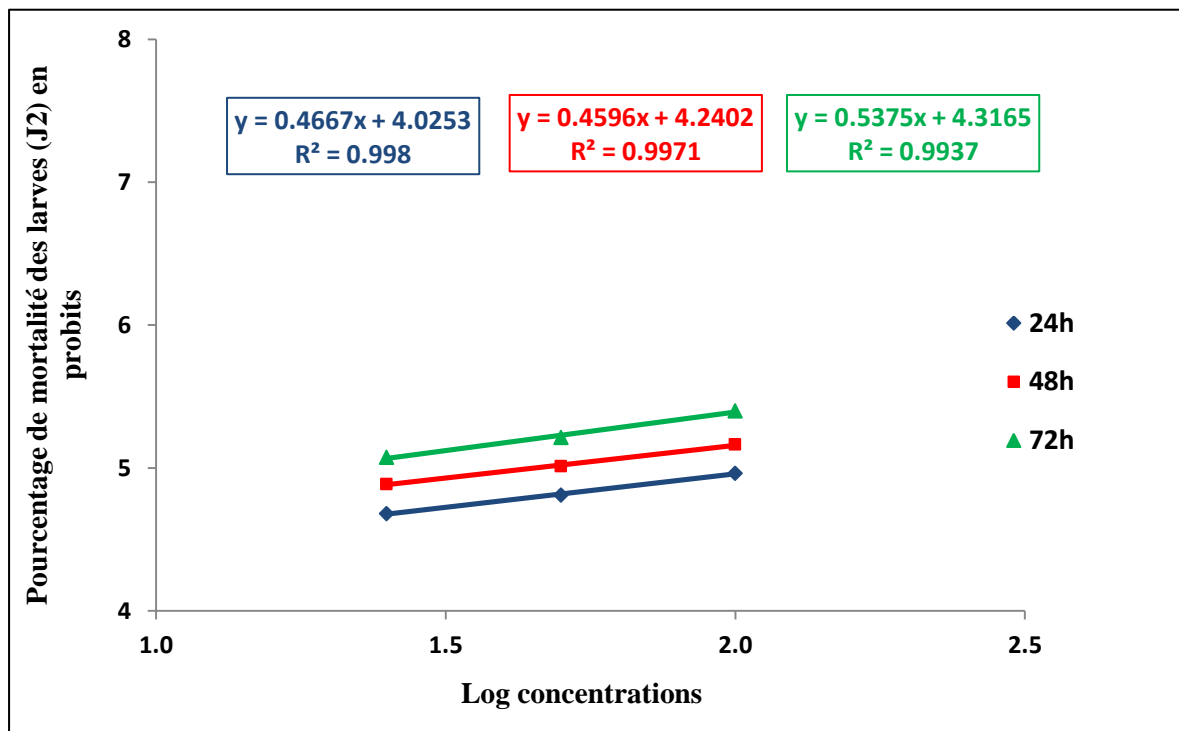
Concernant le témoin (eau distillée), le pourcentage de mortalité des larves est très faible. Il varie de 1 à 7.5 % après 24 et 72 h d'exposition. Le traitement chimique à l'Oxamyl a enregistré un taux de mortalité de 81,82 % après 72 h d'exposition.

**Tableau 6 :** Effet des extraits aqueux de plantes sur la mortalité des larves (J2) de *G. rostochiensis*.

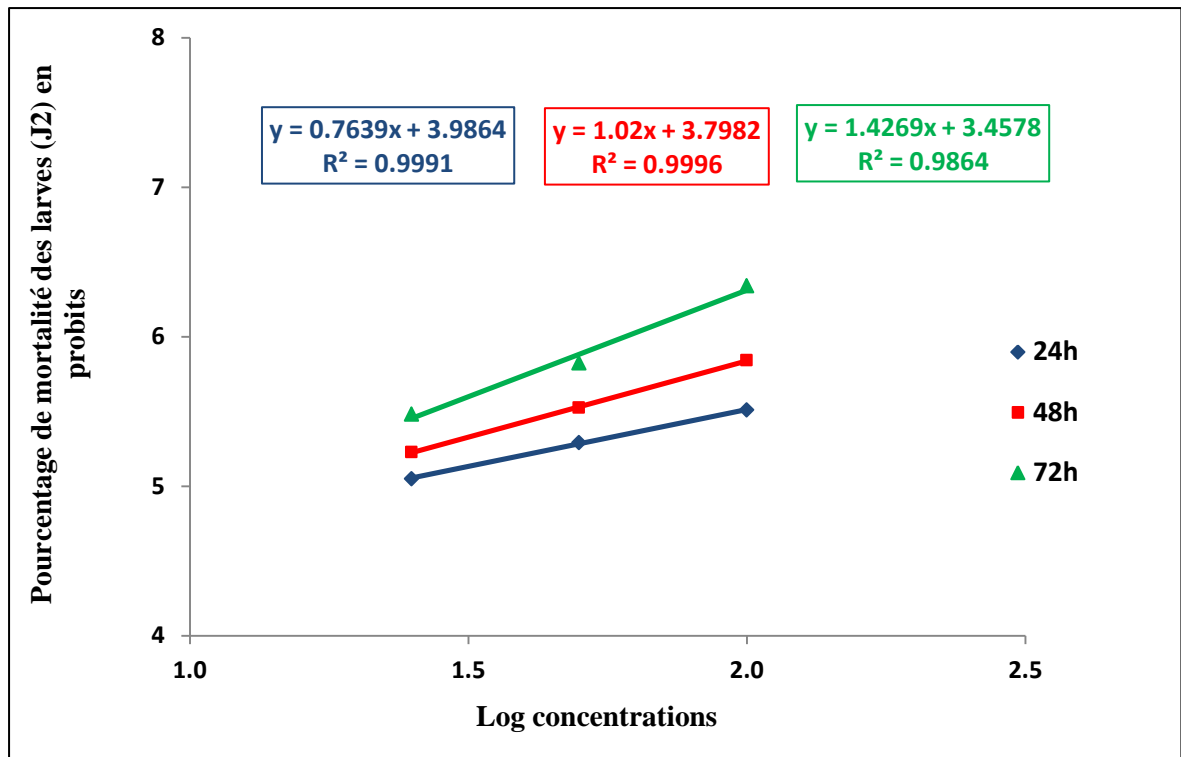
Plantes testées et temps d'exposition			Pourcentage de mortalité naturelle des larves (%) à différentes concentrations			Pourcentage de mortalité corrigée des larves (%) à différentes concentrations		
			S	S/2	S/4	S	S/2	S/4
<i>Raphanus sativus</i>	Feuilles	24h	48,5	42,5	37,5	47,98	41,92	36,87
		48h	56,5	50,5	45,5	54,92	48,70	43,52
		72h	65,5	58,5	53	63,10	55,61	49,73
	Racines	24h	69,50	61,50	52	69,19	61,11	51,52
		48h	80	70	59	79,27	68,91	57,51
		72h	91	79,50	68,50	90,37	78,07	66,31
<i>Nasturtium officinale</i>	Feuilles	24h	45,50	38,50	33,50	44,95	37,88	32,83
		48h	53	45,50	41,50	51,30	43,52	39,38
		72h	61,50	56,50	49,50	58,82	53,48	45,99
	Racines	24h	36,50	30,50	25,50	35,86	29,80	24,75
		48h	44,50	39,50	33	42,49	37,31	30,57
		72h	51,50	47,50	41,50	48,13	43,85	37,43
Témoin chimique (Vydate)	24h	54,00	/	/	53,54	/	/	
	48h	65,50	/	/	64,25	/	/	
	72h	83	/	/	81,82	/	/	
Témoin (eau distillée)	24h	1	/	/	/	/	/	
	48h	3,50	/	/	/	/	/	
	72h	7,50	/	/	/	/	/	

L'analyse de la variance de l'effet des différents traitements sur la mortalité des larves de *G. rostochiensis* a montré une différence très hautement significative ( $p < 0.001$ ) entre les différents traitements et les différentes doses testées après 72 h d'exposition. Cependant, le test HSD de Tukey ( $P = 0,05$ ) a montré qu'il n'y a pas de différence significative entre le traitement chimique et la dose (S) de l'extrait de racines de *R. sativus*. De même, il n'y a pas de différence significative entre les extraits de feuilles des deux espèces pour la dose (S/2). Pour *N. officinale*, il n'y a pas de différence significative entre la dose (S/4) de l'extrait de feuilles et la dose (S) de l'extrait de racines (Annexe 3).

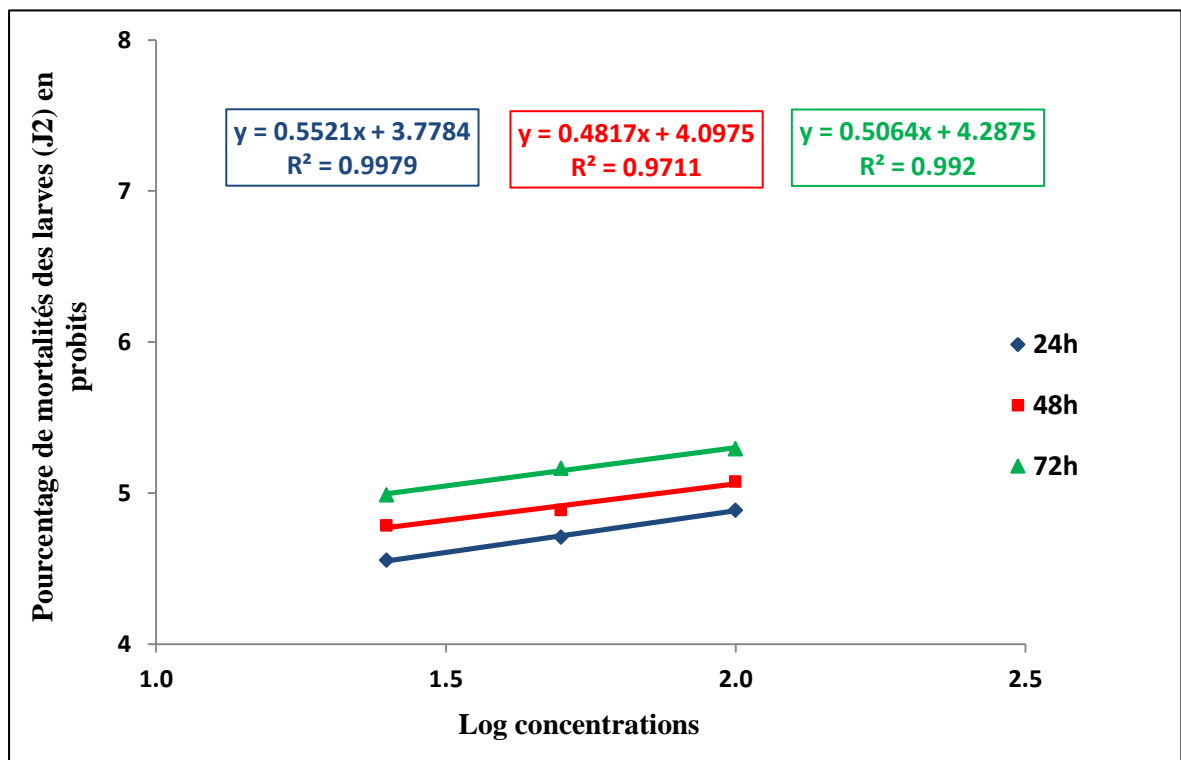
L'analyse des données des droites de régression représentées dans les figures 19, 20, 21 et 22 a montré des coefficients de corrélation significatifs ( $R^2 = 0.9$ ).



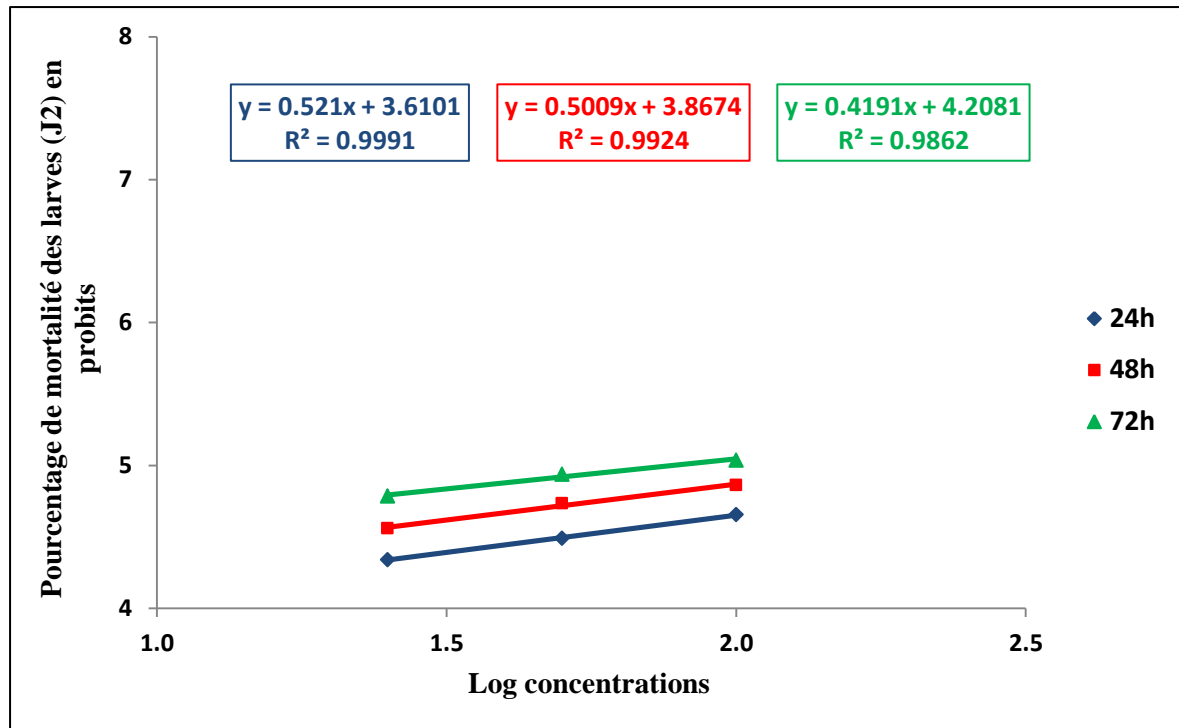
**Figure 19 :** Droites de régression de probits à différentes concentrations utilisées dans l'extrait aqueux de feuilles de *Raphanus sativus* sur la mortalité des larves (J2) de *G. rostochiensis*.



**Figure 20 :** Droites de régression de probits à différentes concentrations utilisées dans l'extrait aqueux de racines de *R. sativus* sur la mortalité des larves (J2) de *G. rostochiensis*.



**Figure 21 :** Droites de régression de probits à différentes concentrations utilisées dans l'extrait aqueux de feuilles de *Nasturtium officinale* sur la mortalité des larves (J2) de *G. rostochiensis*.



**Figure 22 :** Droites de régression de probits à différentes concentrations utilisées dans l'extrait aqueux de racine de *N. officinale* sur la mortalité des larves (J2) de *G. rostochiensis*.

L'efficacité des extraits aqueux testés sur la mortalité des larves de *G. rostochiensis* a été également évaluée par la détermination des  $DL_{50}$  à partir des données du tableau 6 et des droites de régression représentées dans les figures 19, 20, 21 et 22. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 7.

Les valeurs de la  $DL_{50}$  sont inversement proportionnelles au temps d'exposition pour tous les extrais testés. En effet, après 72 h les doses nécessaires pour provoquer une mortalité de 50 % des larves sont plus faibles que celles enregistrées après de 24 h et 48 h.

Les  $DL_{50}$  obtenues révèlent que l'extrait de racines de *R. sativus* est le plus toxique sur les larves de *G. rostochiensis* avec des  $DL_{50}$  égales à 21.23, 15.07 et 12.04 mg/ml après 24, 48 et 72 h d'exposition. Cependant, les valeurs des  $DL_{50}$  les plus faibles sont enregistrées chez l'extrait de racines de *N. officinale* avec 465.32, 182.44, et 77.54 mg/ml respectivement pour les mêmes périodes d'exposition. Enfin, les extraits de feuilles de *R. sativus* et de *N. officinale* montrent une efficacité moyenne avec des  $DL_{50}$  égales à 122.6, 45 et 18.69 mg/ml et 163.17, 74.74 et 25.53 mg/ml après 24, 48 et 72 h respectivement.

**Tableau 7 :** Les DL50 pour la mortalité des larves (J2) de *G. rostochiensis* après les trois périodes d'exposition.

Extraits testés		DL <sub>50</sub> (mg/ml)		
		24h	48h	72h
<i>Raphanus sativus</i>	Feuilles	122,6	45	18,69
	Racines	21,23	15,07	12,04
<i>Nasturtium officinal</i>	Feuilles	163,17	74,74	25,53
	Racines	465,32	182,44	77,54

### 5.2.1.2. Effet des extraits aqueux sur l'éclosion des œufs

Le suivi de l'évolution de l'éclosion des œufs à partir des kystes de *G. rostochiensis* incubés dans les différents extraits de plantes ainsi que dans les témoins, nous a permis d'établir le total d'éclosion au bout de six (06) semaines sous forme de courbes cumulatives (figures 23, 24, 25 et 26). De plus, les résultats de l'efficacité des extraits aqueux testés ont été exprimés en pourcentages de l'inhibition de l'éclosion des œufs à partir des kystes de *G. rostochiensis* et sont représentés dans le tableau 8.

Les résultats représentant les pourcentages d'inhibition de l'éclosion des larves (L2) de *G. rostochiensis* après les six (06) semaines d'incubation dans les différents traitements testés ont révélés que les taux d'inhibition de l'éclosion augmentent en fonction des doses testées (tableau 8).

Avec la concentration la plus élevée (S=100 %), l'extrait aqueux de racines de *R. sativus* s'est avéré le plus efficace avec un taux d'inhibition de l'éclosion des œufs de 65.55 %, suivi de l'extrait de feuilles de la même espèce qui a enregistré un pourcentage de 53.28 %. A la même concentration (S), les pourcentages d'inhibition de l'éclosion étaient de 50.47 et 41.75 % pour les extraits de feuilles et de racines de *N. officinale* respectivement.

A la dose moyenne (S=50 %), les pourcentages d'inhibition de l'éclosion des œufs pour les extraits de racines et de feuilles de *R. sativus* étaient de 59.82 et 47.12%. Des taux d'inhibition plus faibles ont été enregistrés pour l'extrait de racines et l'extrait de feuilles de *N. officinale* avec 44.62 % et 35.88 % respectivement.

Aux faibles concentrations (S=25 %), l'extrait de racines de *R. sativus* a montré un pourcentage d'inhibition supérieur à 50% contrairement aux autres extraits qui ont enregistré des taux d'inhibition plus faibles.

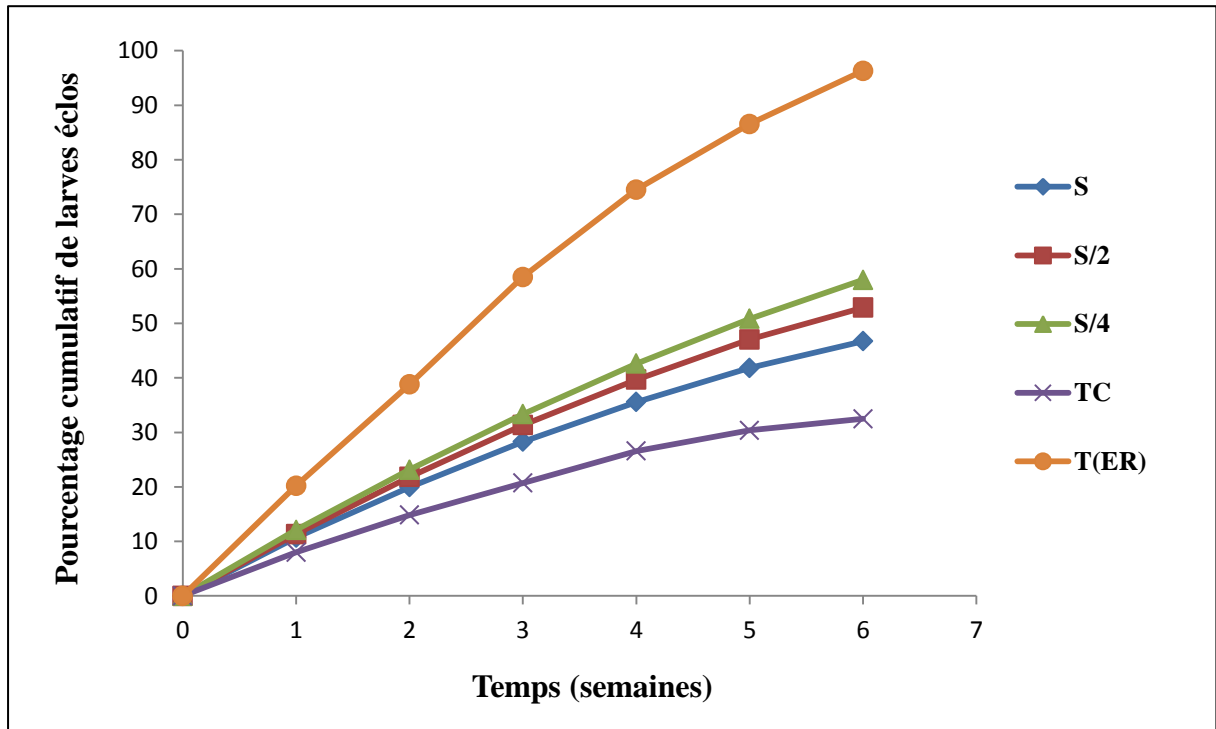
Le témoin chimique (Vydate) a montré le pourcentage d'inhibition le plus élevé avec 67,51% et un nombre de larve éclos égal à 642 après six semaines d'incubation. Cependant, l'exsudat racinaire de pomme de terre a enregistré un nombre de larves très élevé avec 1921 larves.

**Tableau 8** : Effet des extraits aqueux de plantes sur l'inhibition de l'éclosion des œufs de *G. rostochiensis*.

Plantes testées et temps d'exposition	Nombre de larves éclos après six (06) semaines d'incubation			Pourcentage d'inhibition de l'éclosion (%)		
	S	S/2	S/4	S	S/2	S/4
<i>Raphanus sativus</i>						
- Feuilles	851,75±11,68 gh	964±11,68 ef	1059,5±11,68 d	53,28	47,12	42,02
- Racines	683,75±11,68 i	797,5±11,68 h	915±11,68 fg	65,55	59,82	54,09
<i>Nasturtium officinale</i>						
- Feuilles	884,25±11,68 g	994±11,68 e	1092±11,68 d	50,74	44,62	39,16
- Racines	1097,5±11,68 d	1208±11,68 c	1321,75±11,68 b	41,75	35,88	29,84
Témoin chimique (Vydate)	642±11,68 i	/	/	67,51	/	/
Témoin (exsudat racinaire)	1921,5±11,68 a	/	/	/	/	/

L'analyse des courbes des différents extraits aqueux, a permis de mettre en évidence que le total d'éclosion est inversement proportionnel à la concentration. De plus, la courbe cumulative des exsudats racinaires de la pomme de terre est différente de ceux des extraits de plantes, et du traitement chimique. Ces données ont été confirmées par la comparaison des moyennes du nombre de larves écloses des différents traitements en utilisant le test HSD de Tukey (tableau 8).

Tous les extraits testés ont montré une différence très hautement significative par rapport au témoin exsudats racinaires. Cependant, le test HSD de Tukey ne montre aucune différence significative entre le traitement chimique et l'extrait racinaire de *R. sativus*. De même, aucune différence significative n'a été enregistrée entre les extraits de feuilles des deux espèces à la dose (S/4) et l'extrait de racines de *N. officinale* à la dose (S).



**Figure 23 :** Activité nématocide de l'extrait aqueux de feuilles de *R. sativus* sur l'éclosion de *G. rostochiensis*.

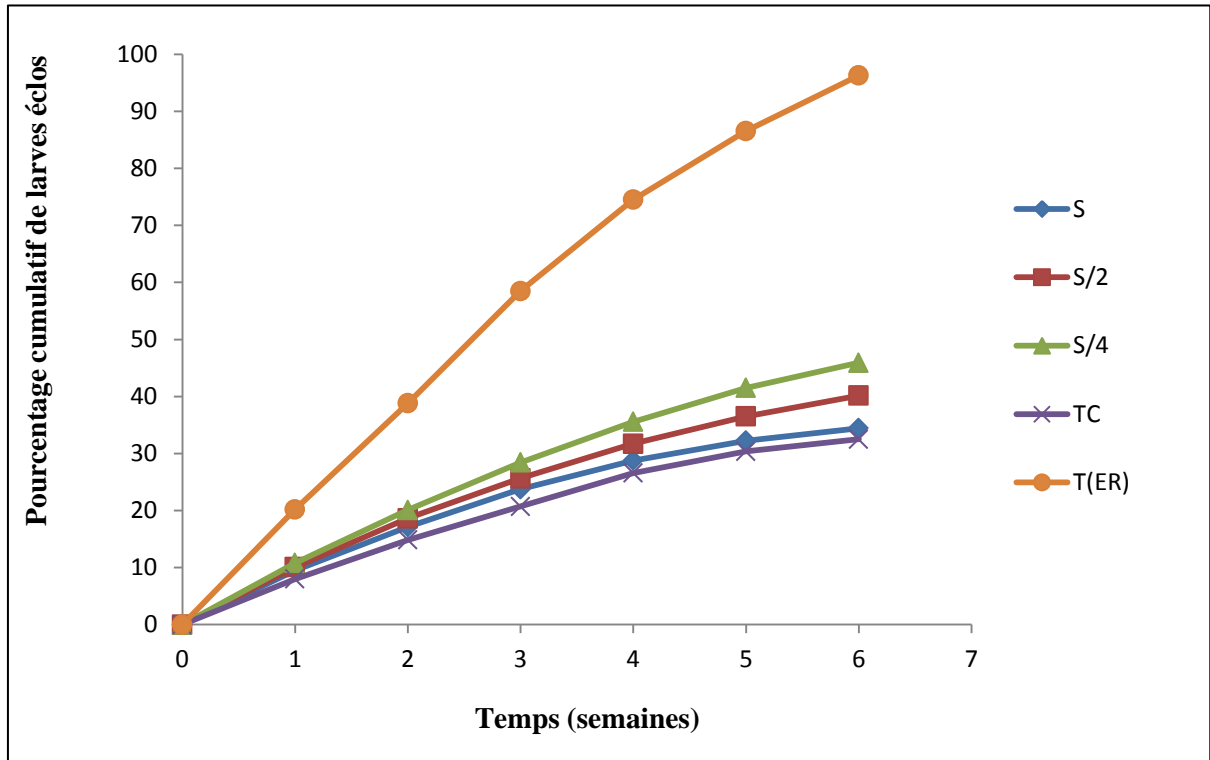


Figure 24 : Activité nématicide de l'extrait aqueux de racines de *R. sativus* sur l'éclosion de *G. rostochiensis*.

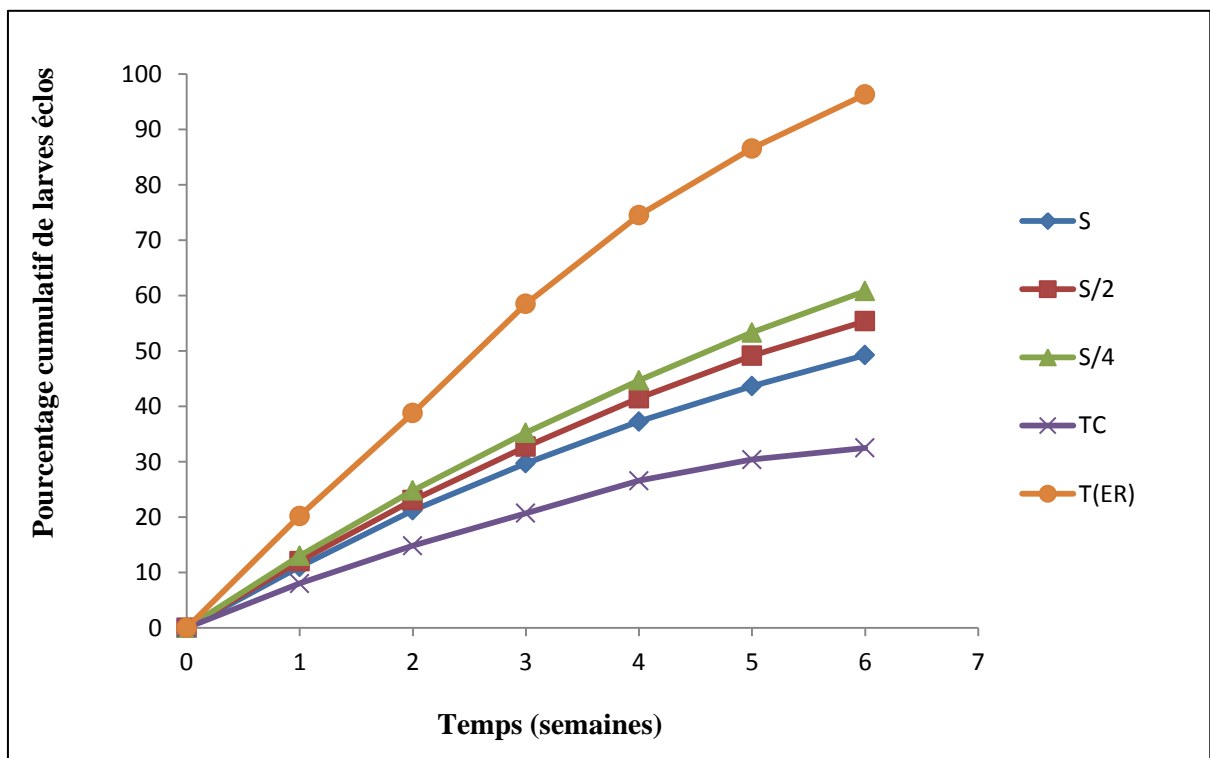
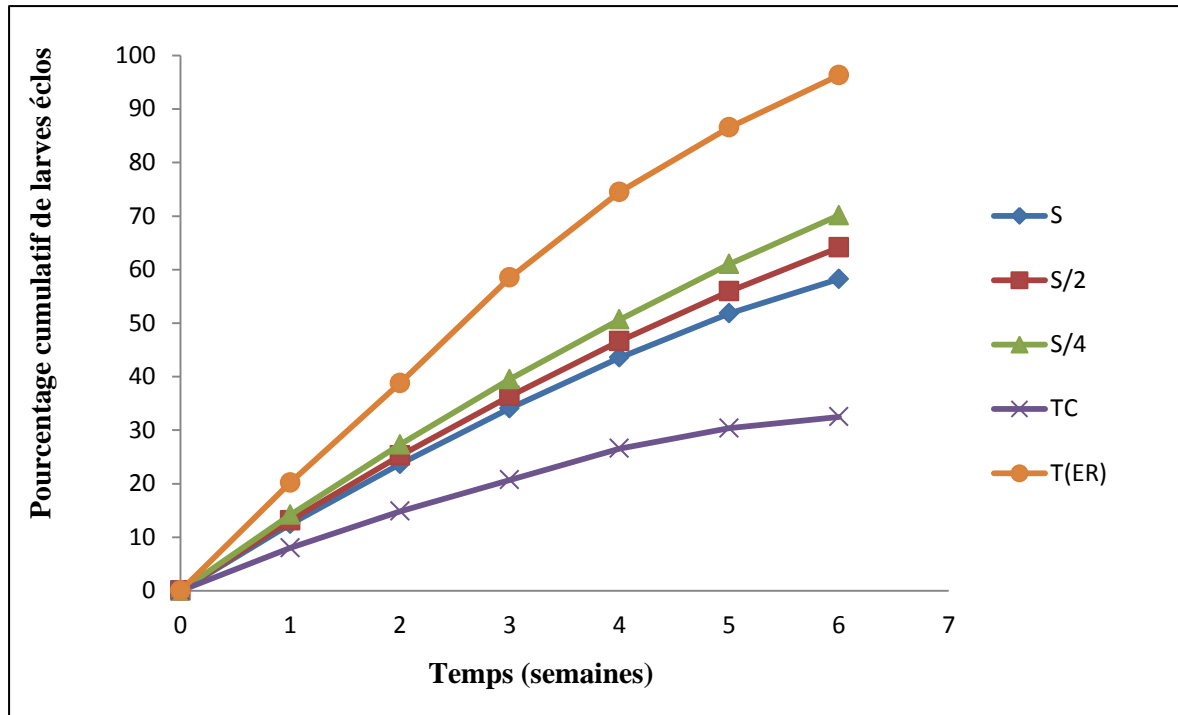


Figure 25 : Activité nématicide de l'extrait aqueux de feuilles de *N. officinale* sur l'éclosion de *G. rostochiensis*.



**Figure 26 :** Activité nématocide de l'extrait aqueux de racines de *N. officinale* sur l'éclosion de *G. rostochiensis*.

## 5.2.2. Test *in vivo* : Activité nématocide de l'engrais vert de *R. sativus* et de *N. officinale* à l'égard de *G. rostochiensis*

### 5.2.2.1. Effet des engrais verts sur le développement de *G. rostochiensis*

Les résultats concernant l'effet de l'application de l'engrais vert des deux espèces de brassicacées *R. sativus* et *N. officinale* à différentes concentrations sur la multiplication de *G. rostochiensis* sur pomme de terre sont représentés dans le tableau 9.

Les deux traitements utilisés ont réduit de manière significative la population finale du nématode à kystes *G. rostochiensis* dans le sol par rapport au témoin non traité, même au taux d'amendement le plus faible. L'analyse de la variance a montré une différence très hautement significative entre les différents traitements et le témoin non traité ( $P < 0.001$ ).

L'engrais vert de *R. sativus* s'est avéré le plus efficace avec un nombre moyen de kystes de 39.25, 28.75 et 20.50 kystes/ 500g de sol pour les doses D1, D2 et D3 respectivement. Cependant, l'engrais vert de *N. officinale* a enregistré des nombres moyens de kystes plus élevés avec 59.75, 54.75 et 49 kystes/ 500g de sol pour les mêmes doses précédentes.

Le test HSD de Tukey ( $P= 0,05$ ) ne montre aucune différence significative entre la dose D3 de l'engrais vert du radis et le traitement chimique à l'Oxamyl. Ainsi, les résultats ont montré un effet hautement significatif entre les différentes doses des deux traitements. En effet, le nombre de kystes diminue avec l'augmentation de la dose du traitement.

Les pourcentages de réduction des populations enregistrés étaient de 41.80, 57.19 et 69.64 % et de 11.49, 18.94 et 27.43 % pour les traitements avec *R. sativus* et *N. officinale* pour les trois doses D1, D2 et D3 respectivement. Le traitement à l'Oxamyl a permis une réduction des effectifs de *G. rostochiensis* de 71 % avec un nombre moyen de 19.5 kystes/ 500g de sol. De plus, un effet similaire a été enregistré entre le traitement chimique à l'Oxamyl et le traitement avec *R. sativus* à la dose la plus élevée (D3).

Le test HSD de Tukey ( $P= 0,05$ ) a montré une différence hautement significative entre les différentes doses. Cependant, aucune différence significative n'a été enregistrée entre la dose D3 de l'engrais vert du radis et le traitement chimique.

**Tableau 9** : Effet de l'engrais vert de *Raphanus sativus* et de *Nasturtium officinale* sur la multiplication de *G. rostochiensis*.

Traitement	Doses	Nombre de kystes /500g	Pourcentage de réduction des populations (%)	Rf=Pf/Pi
<i>R. sativus</i>	D1	39,25±1,4 d	41,80±1,85 c	7,85
	D2	28,75±1,4 e	57,19±1,85 b	5,75
	D3	20,50±1,4 f	69,64±1,85 a	4,10
<i>N. officinale</i>	D1	59,75±1,4 b	11,49±1,85 e	11,95
	D2	54,75±1,4 bc	18,94±1,85 de	10,95
	D3	49±1,4 c	27,43±1,85 d	9,80
Témoin chimique	Do	19,5±1,4 f	71,01±1,85 a	3,90
Témoin (sans traitement)	/	67,5±1,4 a	/	13,5

Les données sur le facteur de reproduction (Rf) ont montré que ce facteur est inversement proportionnel avec les doses testées. Le Rf diminue avec l'augmentation de la dose du traitement et les valeurs les plus faibles 3.9 et 4.1 ont été enregistrées pour le traitement chimique et la dose la plus élevée (D3) de l'engrais vert de *R. sativus*.

### 5.2.2.2. Effet des engrais verts sur la croissance et le poids des tubercules de pomme de terre

Les résultats de l'effet des engrais verts des deux plantes de la famille des *Brassicacées* à différentes concentrations sur la croissance de la pomme de terre et sur le poids des tubercules sont représentés dans le tableau 10 et les figures 27 et 28.

Les données sur la croissance ont révélées une augmentation importante de l'ordre de 55.24 % et 56.19 % pour l'engrais vert de *R. sativus* à la dose la plus élevée (D3) et pour le traitement chimique à l'Oxamyl respectivement (figure 27). L'engrais vert de *N. officinale* a enregistré un pourcentage d'augmentation plus faible 20.95% à la dose (D3). Le test HSD de Tukey ne montre aucune différence significative entre ces deux traitements. Cependant, une différence hautement significative a été montrée entre les différents traitements et le témoin non traité (tableau 10).

Pour les doses les plus faibles (D2) et (D1) les pourcentages d'augmentation de la croissance pour les engrais verts de *R. sativus* et de *N. officinale* étaient de 41.9 % et 24.76 % et de 9.52 % et 0.95 % respectivement (figure 27).

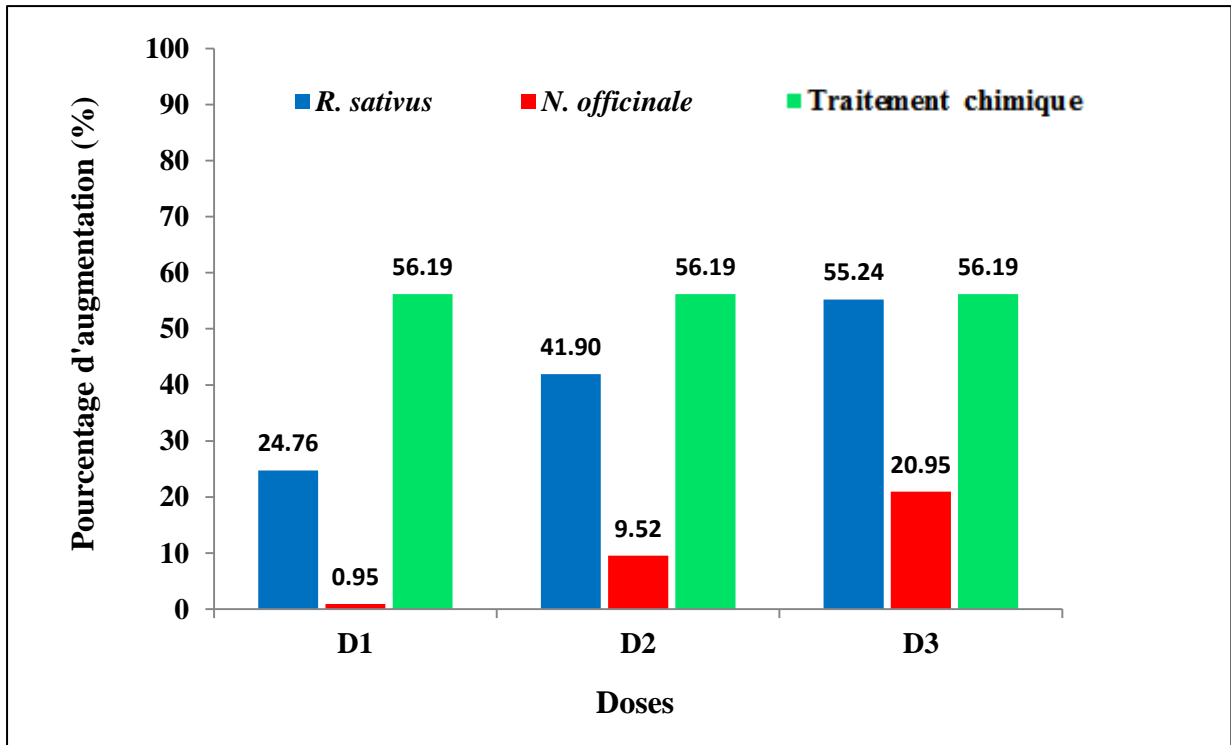
Le pourcentage d'augmentation du poids moyen des tubercules le plus élevé a été enregistré dans le traitement chimique à l'Oxamyl avec 62.5%, suivi de l'engrais vert de *R. sativus* à la dose (D3) avec 44.02% (figure 28). Avec la même dose (D3), l'engrais vert de *N. officinale* a montré un pourcentage plus faible égal à 13.04%.

Les pourcentages d'augmentation du poids moyen des tubercules étaient faibles aux doses (D2) et (D1) avec 23.91 et 15.22% pour l'engrais vert du radis et avec 4.89 % et 0.54 % pour l'engrais vert du cresson.

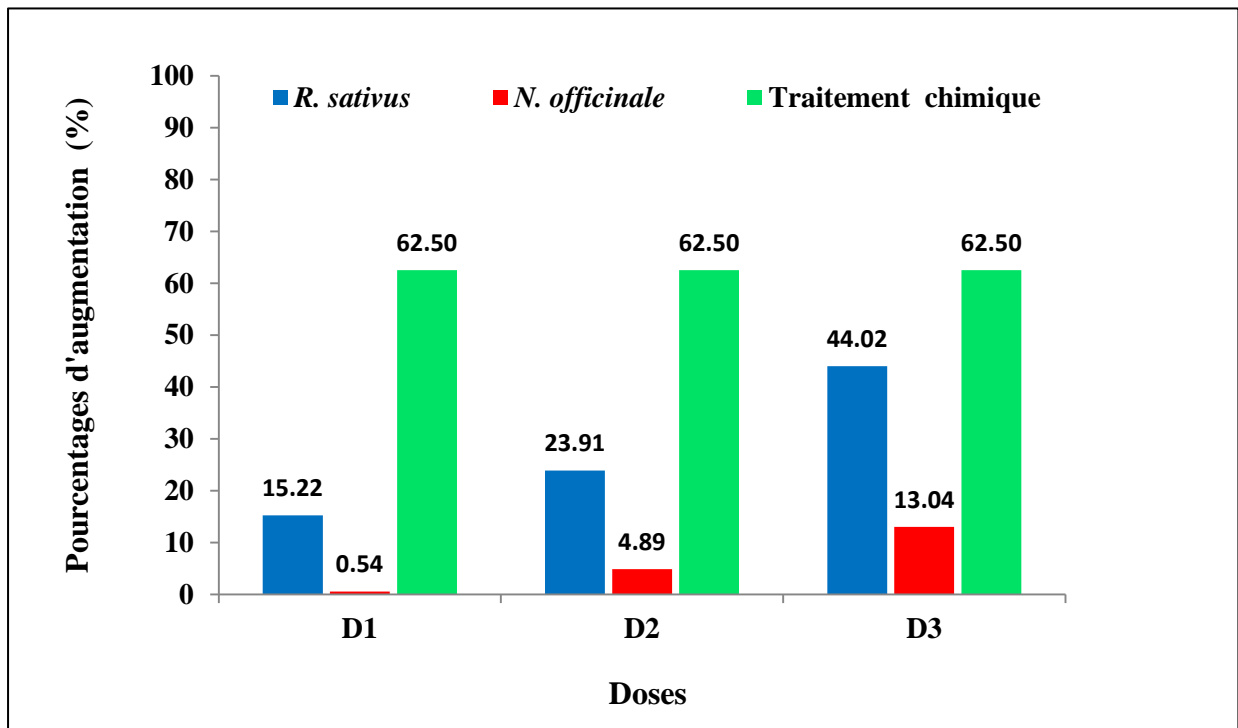
Le test HSD de Tukey a montré une différence hautement significative entre le traitement chimique, les différentes doses de l'engrais vert du radis, la dose (D3) de l'engrais vert du cresson et le témoin non traité. Cependant, aucune différence significative n'a été enregistrée entre les doses (D2) et (D1) de l'engrais vert de *N. officinale* et le témoin non traité.

**Tableau 10:** Effet de différentes doses de l'engrais vert de *R. sativus* et de *N. officinale* sur l'augmentation de la croissance et du poids moyen des tubercules de la pomme de terre.

Traitements	Doses	Croissance moyenne (cm)	Poids moyen de tubercules (g)
<i>R. sativus</i>	D1	32,75±1,08 bc	52,25±1,69 cd
	D2	37,25±1,08 ab	56,25±1,69 c
	D3	40,75±1,08 a	65,5±1,69 b
<i>N. officinale</i>	D1	26,5±1,08 de	45,5±1,69 d
	D2	28,75±1,08 cde	47,5±1,69 d
	D3	31,75±1,08 cd	51,25±1,69 cd
Traitement chimique	Do	41±1,08 a	74±1,69 a
Témoin (sans traitement)	/	26,25±1,08 e	45,25±1,69 d



**Figure 27 :** Pourcentages (%) d'augmentation de la croissance moyenne des plants de pomme de terre.



**Figure 28 :** Pourcentages (%) d'augmentation du poids moyen de tubercules de pomme de terre.

### 5.2.3. Identification des métabolites secondaires à partir des plantes testées.

#### 5.2.3.1. Identification des glucosinolates.

Les résultats de l'analyse par chromatographie liquide à ultra-haute performance (UHPLC) connectée à un détecteur QTOF de la composition chimique des métabolites secondaires des extraits de feuilles et de racines de *R. sativus* et de *N. officinale*, sont représentés dans le tableau 11.

La concentration totale des glucosinolates (GLS) est plus élevée chez le radis, principalement dans les racines où elle atteint  $207.32 \mu\text{mol.g}^{-1}$ , dans les feuilles un total de  $19.87 \mu\text{mol.g}^{-1}$  a été enregistré. Le cresson a montré des concentrations moyennes pour les feuilles avec un total de  $12.38 \mu\text{mol.g}^{-1}$  et une concentration très faible pour les racines où le total est égal à  $1.77 \mu\text{mol.g}^{-1}$ .

Les données du tableau ont indiqué que glucoraphasatin est la glucosinolate la plus abondante dans les racines de *R. sativus*, suivi de la MeO-glucobrassicin qui présente une quantité élevée. Cependant, les feuilles de *R. sativus* sont plus riches en glucobrassicin. De plus, *N. officinale* présente une abondance de la MeO-glucobrassicin dans les feuilles.

**Tableau 11:** Profil de Glucosinolates ( $\mu\text{mol.g}^{-1}$ ) identifiées à partir de feuilles et de racines de *Raphanus sativus* et de *Nasturtium officinale*.

Glucosinolates	Formules chimiques	Mw (m/z)	<i>R. sativus</i>		<i>N. officinale</i>	
			Feuilles	Racines	Feuilles	Racines
<b>Glucoraphasatin</b>	$\text{C}_{12}\text{H}_{20}\text{KNO}_9\text{S}_3$	435,477	3,29	123,91	-	-
<b>Glucoerucin</b>	$\text{C}_{12}\text{H}_{23}\text{NO}_9\text{S}_3$	420,456	1,32	11,46	-	-
<b>MeO-Glucobrassicin</b>	$\text{C}_{17}\text{H}_{22}\text{N}_2\text{O}_{10}\text{S}_2$	478,5	2,30	67,69	11,52	1,57
<b>OH-Glucobrassicin</b>	$\text{C}_{16}\text{H}_{20}\text{N}_2\text{O}_{10}\text{S}_2$	464,5	1,33	1,88	-	-
<b>Glucobrassicinapin</b>	$\text{C}_{12}\text{H}_{21}\text{NO}_9\text{S}_2$	386,0577	-	-	0,43	-
<b>Glucobrassicin</b>	$\text{C}_{16}\text{H}_{20}\text{N}_2\text{O}_9\text{S}_2$	447,0512	11,63	-	0,43	0,20
<b>Neoglucobrassicin</b>	$\text{C}_{17}\text{H}_{22}\text{N}_2\text{O}_{10}\text{S}_2$	477,0628	-	0,96	-	-
<b>Glucoraphanin</b>	$\text{C}_{12}\text{H}_{23}\text{NO}_{10}\text{S}_3$	436,0397	-	1,42	-	-
<b>Total</b>	-	-	<b>19.87</b>	<b>207.32</b>	<b>12.38</b>	<b>1.77</b>

### 5.2.3.2. Identification des composés phénoliques

Les résultats relatifs à l'identification des polyphénols présents dans les différentes parties des plantes testées sont rapportés dans l'Annexe 4. Au total, 124 composés phénoliques ont été obtenus dont 74 composés sont identifiés et 50 non identifiés.

Pour *Raphanus sativus*, parmi 28 composés phénoliques, 18 ont été identifiés dans les feuilles, il s'agit principalement des acides féruliques, caféiques, sinapiques et des kaempférols. Cependant, les racines ont révélé un nombre faible de composés phénoliques (un total de six (06) composés avec deux non identifiés) avec la dominance des kaempférols.

Le Cresson *N. officinale* a montré une richesse en composés phénoliques par rapport au radis. Dans les feuilles, 29 composés ont été obtenus avec 25 qui sont identifiés dont les quercétines, les kaempférols et les isorhamnétines sont les plus dominants. Pour les racines, un total de 61 composés phénoliques a été obtenu avec seulement 27 composés qui sont identifiés. Ces derniers sont représentés principalement par les dérivés des acides benzoïques, des acides paracoumariques, et des quercétines.

### 5.3. Discussion

L'analyse des données relatives à l'évaluation de l'activité nématocide des plantes de la famille des Brassicacées à l'égard de *G. rostochiensis* a permis de mettre en évidence l'efficacité des extraits aqueux *in vitro* et de l'engrais vert *in vivo*. Cependant, cette activité dépend de l'espèce, de l'organe utilisé, de la concentration et du temps d'exposition.

Les résultats des tests *in vitro* ont montré une efficacité très élevée (qui dépasse 50 %) sur la mortalité des larves (J2) et sur l'inhibition de l'éclosion des œufs de *G. rostochiensis* pour l'extrait aqueux des racines de *R. sativus* utilisé avec les différentes concentrations. De plus, les extraits de feuilles des deux espèces *R. sativus* et *N. officinale* ont manifesté des taux de mortalité des larves (J2) et de l'inhibition de l'éclosion des œufs plus ou moins élevés selon la dose utilisée. Cependant l'extrait des racines de *N. officinale* s'est avéré le moins efficace avec des pourcentages de mortalité et de l'inhibition de l'éclosion plus faibles.

D'autre part, l'activité nématocide a été testée *in vivo* en évaluant l'effet de l'engrais vert des deux espèces sur le développement des populations de *G. rostochiensis*. Les résultats obtenus ont révélé une diminution significative du nombre de kystes dans le sol et une amélioration de la croissance des plants de pomme de terre et du poids de tubercules par rapport au témoin non traité.

Cette activité nématocide peut être attribuée aux métabolites secondaires présents dans les plantes testées et varie selon la quantité et le type de métabolites présents dans les tissus végétaux. En effet, les deux espèces testées *R. sativus* et *N. officinale* qui appartiennent à la famille des Brassicacées possèdent un potentiel élevé de gestion des nématodes à kystes de la pomme de terre. Cet effet suppresseur des plantes de Brassicacées est attribué à une classe de métabolites secondaires appelées glucosinolates (Fahey et *al.*, 2001), qui libèrent des produits biologiquement actifs tels que les isothiocyanates toxiques et hautement volatils.

De même, ces deux plantes figurent parmi les espèces les plus efficaces dans le biocontrôle des nématodes notamment le genre *Globodera* par la libération des métabolites secondaires toxiques (Lord et *al.*, 2011 ; Ngala et *al.*, 2014 ; Ngala et *al.*, 2015 ; Fatemy et Spideh, 2016 ; Dandurand et *al.*, 2017 ; Fatemy, 2018 ; Franke et *al.*, 2019).

Cela a été confirmé dans notre étude où l'identification des métabolites secondaires dans les différentes parties des deux plantes a montré la présence en grandes quantités des glucosinolates, principalement la glucoraphasatin dans les racines de *R. sativus* qui était le plus efficace. Ainsi, des quantités plus ou moins importantes de glucosinolates ont été enregistrées dans les feuilles de *R. sativus* et de *N. officinale* dont les principales sont la glucobrassicin et la MeO-glucobrassicin respectivement. Enfin, les racines de *N. officinale* qui ont montré la moindre activité nématocide présentent des quantités très faibles de glucosinolates.

Par ailleurs, l'identification des métabolites secondaires a révélé la présence de composés phénoliques dans les différentes parties des plantes testées. Ces composés appartiennent principalement aux classes des flavonoïdes (les quercétines, les kaempférols et les isorhamnétines) et des acides phénoliques (benzoïques, paracoumariques, féruliques, caféiques et sinapiques).

Les composés phénoliques particulièrement les flavonoïdes jouent un rôle à la fois dans le développement des racines et dans les réponses de défense des plantes contre certains micro-organismes notamment les nématodes phytoparasites. Les flavonoïdes présentent plusieurs modes d'action tel que l'inhibition de l'éclosion des œufs, l'induction d'une quiescence des larves (ralentir leurs mouvements, ce qui entraîne des périodes d'inactivité réversibles) ; la modification de leur migration vers les racines en les repoussant ou en les tuant (Chin et *al.*, 2018). Cependant, les informations sur l'effet de ces polyphénols sur les nématodes à kystes de pomme de terre sont très rares.

Gonzalez et Estevez-Braun, 1998 ont montré une activité nématocide très élevée ( $DL_{50} = 33 \mu\text{M}$ ,  $DL_{100} < 50 \mu\text{M}$ ) du flavonoïde (E)-chalcone (trans-1,3-diphénylpropénone) sur *G. pallida* et *G. rostochiensis*. De même le (E)-chalcone était capable d'inhiber l'éclosion des œufs de ces nématodes.

D'autre part, un autre type de composé phénolique a été testé par Renčo et *al.*, (2012) dans des essais *in vitro* et en pot sur le nématode à kystes de la pomme de terre *G. rostochiensis*. *In vitro*, toutes les solutions aqueuses de tanin de châtaignier à différentes concentrations (dans une échelle géométrique de 0,32 à 20,48 g/l) ont permis de réduire la viabilité des œufs de 56 à 87%, par rapport au témoin non traité. Dans l'essai en pot, les tannins de châtaignier ont été appliqués au sol sous forme de solutions aqueuses à des taux

de 100, 250 et 450 g/m<sup>2</sup>, à deux moments différents ; au moment du semis seulement et au moment du semis et deux semaines plus tard. Toutes les doses testées ont permis de réduire le nombre de kystes/100 g de sol, d'œufs et de juvéniles/g de sol et le taux de reproduction par rapport au témoin non traité. Cependant, le nombre d'œufs et de juvéniles/kyste n'a pas été influencé par les différentes doses de tannins appliquées.

Selon Aires et *al.*, (2009), l'activité nématocide des extraits de plantes varie en fonction du type et de la concentration des glucosinolates. Cela a été confirmé en évaluant l'effet de deux concentrations (0,2 et 0,05 μmol /100 g poids sec) de glucosinolates de six extraits de plantes (brocoli, chou-fleur, choux de *Brassica rapa*, choux frisés, chou portugais et cresson) sur le développement de *G. rostochiensis*. Les résultats ont montré un effet hautement significatif des extraits de plantes testées. Le nombre le plus faible de kystes a été enregistré sur les racines de pomme de terre traitées par des extraits de cresson, de chou-fleur et de *B. rapa*. La réduction des kystes semble être associée à des niveaux élevés de glucosinolates de type : 2-Phenthyl et de 2-propényl.

Dans notre étude, *R. sativus* et *N. officinale* ont enregistré des taux de mortalité des larves (J2) de l'ordre de 91 et 65.5% et de 51.5 et 61.5 % pour les extraits de racines et de feuilles respectivement. Ainsi, une réduction du nombre de kystes de 69.64% pour le radis et 27.43 % pour le cresson a été rapportée. Ces résultats ne sont pas en accord avec ceux de Lord et *al.*, (2011) qui ont montré une efficacité très élevée des extraits de feuilles de *R. sativus*, de *N. officinale* et de *B. juncea* avec des taux de mortalité de larves de *G. pallida* de 97, 93 et 89 % respectivement.

Cependant, l'engrais vert de trois cultivars de *B. juncea* incorporés dans le sol a eu le plus grand effet, causant une mortalité supérieure à 95% des œufs de *G. pallida* et présentent des taux élevés de la glucosinolate 2-propényle. *B. rapa*, qui contenait de grandes quantités de la glucosinolate 3-butényle, a entraîné une mortalité supérieure à 90%. De plus, *R. sativus* et *E. sativa* qui contiennent des glucosinolates avec des concentrations représentants environ la moitié de celles des espèces de *Brassica* les plus efficaces ont causés plus de 75% de mortalité des œufs. Enfin, *N. officinale* a entraîné une mortalité de 70% dans un sol couvert avec la prédominance de la glucosinolate 2-phényléthyl (Lord et *al.*, 2011).

En outre, nos résultats rejoignent ceux de Ngala et *al.*, (2015) qui ont montré une meilleure efficacité des extraits de feuilles et de racines de *B. juncea* et des extraits

de racines de *R. sativus* avec 85 à 100 % de mortalité de oeufs enkystés par rapport aux extraits de feuilles de *R. sativus*, avec un pourcentage de 60%. Une analyse par HPLC des glucosinolates (GSL) présents dans les tissus des deux plantes a révélé que le tissu foliaire et le tissu racinaire de *B. juncea* était riche en 2-propényl. Cependant, les extraits de feuilles présentent une concentration plus élevée comparativement à l'extrait des racines ; *R. sativus* contient deux fois plus de GSL dans les racines principalement le 2-phényléthyl (gluconasturtiin) comparé au tissu des feuilles qui était dominé par le 4-méthylsulfinylbutyl (glucoraphanin). Enfin, les DL<sub>50</sub> pour les différents extraits ont été identifiées : une valeur de DL<sub>50</sub> de 0,027 mg.ml<sup>-1</sup> pour les extraits de *B. juncea* a été déterminée, tandis que pour les extraits de racines de *R. sativus* la DL<sub>50</sub> était de 0,032 mg.ml<sup>-1</sup>, mais pour les extraits de feuilles, ils ne sont efficaces qu'à des concentrations plus élevées (0,50 mg.ml<sup>-1</sup>).

Dans une autre étude, Ngala et al., (2015) ont révélé que les plantes de la famille des Brassicacées utilisées pour la biofumigation peuvent affecter les ravageurs et les pathogènes du sol après l'incorporation des résidus de culture et aussi pendant la croissance active de ces plantes. Cela a été confirmé en mesurant l'activité microbienne du sol et la dégradation des glucosinolates en introduisant la sinigrine dans les échantillons du sol avant la plantation, avant et après l'incorporation de *B. juncea* et de *R. sativus*. La sinigrine a été dégradée de manière significative avant et après l'incorporation des espèces de brassicacées cultivés dans un sol non stérilisé. L'activité microbienne totale a été augmentée avant et après l'incorporation des plantes par rapport aux témoins en jachère. Les sols non stérilisés plantés avec le radis ont enregistré 30-35% de mortalité des œufs de *G. pallida*. Il existe une corrélation positive entre l'activité microbienne du sol et la mortalité de *G. pallida*, tandis qu'elle inversement proportionnelle avec la dégradation de la sinigrine.

Selon Fatemy et Sepideh, (2016), un taux de mortalité des larves (J2) et de l'inhibition de l'éclosion des œufs de *G. rostochiensis* d'environ 100 % a été révélé par les extraits aqueux (1g/ml) de feuilles des quelques plantes de la familles des brassicacées à savoir, le chou de Savoie, le chou-fleur, le brocoli, le chou rouge, le navet, la moutarde blanche, le radis comestible et le colza. Les pourcentages de réduction du nombre de kystes de *G. rostochiensis* étaient de 60 et 33 % dans un sol traité avec l'engrais vert (à 2 %) du radis et de chou-fleur, respectivement. Les populations finales d'œufs et de J2/g de sol, ont été réduites de 73 % pour la moutarde blanche et de 92 % pour le radis comestible.

Par ailleurs, l'effet des isothiocyanates sur la mortalité des larves et l'éclosion des œufs de *G. pallida* a été étudié par Wood et al., (2016). La plupart des isothiocyanates testés se sont montrés efficaces, mais l'isothiocyanate d'allyle était le plus efficace causant une mortalité de 100% à une dose de 25µl/L après 72h d'exposition. De plus, l'isothiocyanate d'allyle a réduit l'éclosion après sept (07) jours d'exposition *in vitro*. Enfin, dans un essai en serre, une concentration de 100µl/L d'isothiocyanate d'allyle a enregistré un pourcentage de réduction de l'éclosion de 61 % par rapport au témoin.

En outre, les résultats de l'étude précédente ont été confirmés dans une autre approche (Wood et al., 2017) où l'efficacité des isothiocyanates a été estimée *in vitro*. L'isothiocyanate d'allyle s'est avéré le plus efficace avec un pourcentage de mortalité des larves de *G. pallida* de 100 % aux doses 25 et 50 ppm après 72 et 24 h d'exposition respectivement. Ainsi, l'isothiocyanate d'allyle était capable d'inhiber l'éclosion des œufs, et d'augmenter la mortalité des œufs à l'intérieur des kystes. Des concentrations supérieures à 50 ppm ont montré un effet significatif sur la mortalité et l'inhibition de l'éclosion des œufs de *G. pallida*. Wood et al., (2017) suggèrent que l'isothiocyanate d'allyle peut être un bon candidat pour la gestion des nématodes à kyste de la pomme de terre dans un programme de biofumigation.

Selon Dandurand et al., (2017), des taux supérieurs à 2,2 t/ha et 4,5 t/ha de farine de graines de *B. juncea* ont été nécessaires *in vitro* pour la suppression de l'éclosion des œufs de *G. pallida* et *G. ellingtonae* respectivement. Une réduction significative de la reproduction de *G. pallida* sur pomme de terre après exposition à un taux de 2,2 t/ha de la farine de graines de *B. juncea* a également été enregistrée. De même, 8,9 t/ha de la farine de graines de *B. juncea* ont presque éliminé l'éclosion des œufs de *G. ellingtonae* au champ. Des quantités plus faibles de l'extrait de farine de graines de *B. juncea* étaient nécessaires à la suppression des espèces de *Globodera*. En comparant les deux produits, la moitié de la quantité d'extrait de farine de graines de *B. juncea*, soit 1,1 t/ha, a montré une réduction de l'éclosion des œufs de *G. ellingtonae* dans la même mesure que la farine de graines. Une réduction de 90 % de l'éclosion des œufs a été enregistrée par l'exposition de *G. pallida* à un extrait de farine de graines de *B. juncea* à 4,5 t/ha par rapport à un témoin non amendé (Dandurand et al., 2017).

Les tests *in vitro* des extraits aqueux de *Lepidium sativum* ont montré un pourcentage de mortalité d'environ 100% des larves et une réduction de l'éclosion des œufs moins de 1%

(Fatemy, 2018). L'effet de l'engrais vert de *L. sativum* sur la survie du nématode à kystes *G. rostochiensis* a été rapporté en microparcelles sur un cultivar de pomme de terre sensible. Les résultats ont montré un pourcentage de réduction de l'éclosion de l'ordre de 56 %. De plus, les taux de reproduction ont été limités à moins 1%, et les populations finales (Pf) de kystes et leurs contenus en œufs ont été réduits d'environ 60 % dans le sol traité. Une augmentation du poids des plantes biofumigées a été aussi enregistrée. La biofumigation à un taux d'amendement de 1% (p/p) de *L. sativum* était suffisante pour obtenir ces résultats, qui étaient comparables à ceux obtenus avec des taux de 2 et 3 % (p/p) (Fatemy, 2018).

L'effet de plusieurs extraits de plantes de Brassicacées (*Raphanus sativus*, *Sinapis alba* et *Lepidium sativum*) et de l'exsudat racinaire obtenus à partir de *Solanum lycopersicum* et *S. tuberosum* sur l'éclosion des œufs de *G. rostochiensis* a été estimé au laboratoire par Franke *et al.*, (2019). Les exsudats racinaires de plantes hôtes ont stimulé la plus grande éclosion (plus de 95 %). Parmi les plantes non hôtes étudiées, *L. sativum* a montré la plus forte stimulation de l'éclosion (53,3 %). Pour *R. sativus*, une grande variation dans l'éclosion a été trouvée selon les cultivars testés (20,8% et 33,6%). Par ailleurs, l'effet inhibiteur des extraits de matière sèche de six plantes (Deux cultivars de *R. sativus*, deux cultivars de *S. alba*, *L. sativum* et *N. officinale*) ajoutés au sol, sur le développement de la population de *G. rostochiensis* la variété sensible de pomme de terre (Desiree) a été déterminé dans un essai en pot Franke *et al.*, (2019). Le nématocide Vydate® (10G) a été utilisé comme témoin positif. Parmi les extraits étudiés, l'extrait de *L. sativum* était le plus efficace et le plus proche du traitement chimique avec un pourcentage de 75% de réduction de la population de nématodes.

Enfin, l'utilisation de *R. sativus* et de *N. officinale* ont montré une augmentation significative de la croissance des plants de pomme de terre et du poids des tubercules en plus de l'efficacité nématocide remarquable sur la mortalité, l'inhibition de l'éclosion et le développement des populations de *Globodera* dans le sol. Néanmoins, les résultats obtenus dans notre étude et les résultats rapportés par les auteurs ne montrent pas les mêmes pourcentages. Cela est peut-être expliquer par la différenciation dans les variétés des espèces utilisées, dans les doses utilisées au cours des essais *in vitro* ainsi que dans les essais en pots ou en microparcelles.

De ce fait, les futures investigations doivent utiliser ces plantes et ces métabolites secondaires sous différentes formes (solutions aqueuses, huiles essentielles, engrais vert...etc.) pour évaluer leurs efficacités *in vivo* et déterminer les périodes ainsi que les doses d'application. De même, il est nécessaire de tester l'efficacité de ces plantes sur d'autres espèces de nématodes phytoparasites, agents pathogènes et insectes afin d'exploiter les potentialités de ces biopesticides comme alternatifs aux traitements chimiques, et comme agent de gestion écologique et durable des nématodes.

## **Chapitre 6 : Effet de trois types de compost sur le développement des populations de *G. rostochiensis***

### **Objectif de l'étude**

L'objectif de cette étude consiste à évaluer l'effet de trois composts de nature différente, à savoir le fumier de vache, le fumier de volaille et le fumier provenant des résidus végétaux, sur le développement des populations de *G. rostochiensis* sur la culture pomme de terre dans un essai en pot.

### **6.1. Matériel et méthodes**

#### **6.1.1. Matériel biologique**

Le matériel biologique utilisé au cours de notre expérimentation est l'espèce *G. rostochiensis* en provenance des parcelles de pomme de terre infestées de la région d'El-Oued.

#### **6.1.2. Matériel végétal**

Le matériel végétal utilisé au cours de notre expérimentation est la pomme de terre *Solanum tuberosum* L. variété Spunta, provenant du Centre National de Control et de Certification des semences et des plans (CNCC, Alger).

#### **6.1.3. Nématicide utilisé**

Le nématicide utilisé au cours de notre expérimentation est le Vydate<sup>®</sup>, c'est un carbamate dont la matière active est l'Oxamyl. Les doses préconisées pour les tests *in vitro* ont été préparées en rapportant les doses optimales recommandées (tableau 5) à la surface des boîtes de Petri et des pots utilisés.

#### **6.1.4. Composts utilisés**

Trois types de composts différents provenant d'une station de compostage de la wilaya de Béjaia (C1 : 100% de fumier de déchets végétaux ; C2 : 100 % de fumier de bovins ; C3 : 100 % de fumier de volaille) ont été utilisés dans notre expérimentation. L'analyse physico-chimique des composts testés a été effectuée dans le département des sciences du sol à l'ENSA.

### 6.1.5. Analyses physico-chimiques des composts utilisés

L'analyse physico-chimique des composts testés a été effectuée dans le département des sciences du sol à l'ENSA.

- **Mesure du pH :**

Il est mesuré à l'aide d'un pH mètre selon la méthode électrométrique à l'électrode de verre.

- **Dosage de la matière organique :**

La méthode utilisée pour le dosage de la matière organique est celle de Wackley-Black (Lambert, 1975). Elle consiste à une oxydation du carbone au moyen d'une solution de bichromate de potassium ( $K_2Cr_2O_7$ ). La teneur en matière organique (MO) dans le sol est évaluée à partir du taux de carbone organique (C) en utilisant l'équation suivante :

$$MO = 1.72 \times C.$$

- **Le rapport C/N :**

Le rapport carbone organique sur azote total (C/N) est utilisé comme indicateur de l'évolution de la matière organique et de l'activité biologique dans le sol.

- **Dosage de l'azote total :**

Le dosage de l'azote a été déterminé par la méthode de Kjeldahl (Lambert, 1975) qui consiste à attaquer les formes d'azote dans le sol pour les transformer en ammoniacque.

- **Dosage de l'azote minéral ( $NH_4^+$  et  $NO_3^-$ ) :**

L'azote ammoniacal ( $NH_4^+$ ) et les nitrates ( $NO_3^-$ ) ont été déterminés par un spectrophotomètre d'absorption moléculaire.

- **Dosage du phosphore ( $P_2O_5$ ) :**

La méthode utilisée est celle de Joret-Hebert, elle permet l'extraction de l'acide phosphorique grâce à l'oxalate d'ammonium.

- **Dosage du potassium  $k^+$  :**

Le principe utilisé est la spectrophotométrie de flamme.

#### **6.1.6. Test *in vivo* : Effet des composts sur le développement de *G. rostochiensis*.**

L'essai a été réalisé dans des pots en plastique de 20 cm de diamètre et d'une capacité de 4 kg de sol. Les composts ont été ajoutés et mélangés avec des sols préalablement stérilisés à quatre doses (1, 2,5, 5 et 10 g de compost pour 100 g de sol). Ensuite, chaque mélange a été utilisé pour remplir les pots. Des pots avec un sol non traité et d'autres avec un traitement chimique (Vydate<sup>®</sup>) ont été utilisés comme témoins.

Après trois à quatre semaines, l'inoculation a été faite à raison de 45 kystes de *G. rostochiensis* pour chaque pot et un tubercule de pomme de terre (variété Spunta) a été semé en même temps. Les pots ont été placés dans des conditions naturelles, irrigués régulièrement et organisés selon un dispositif complètement randomisé à bloc aléatoire avec quatre répétitions pour chaque traitement ainsi que pour les témoins (figure 29).

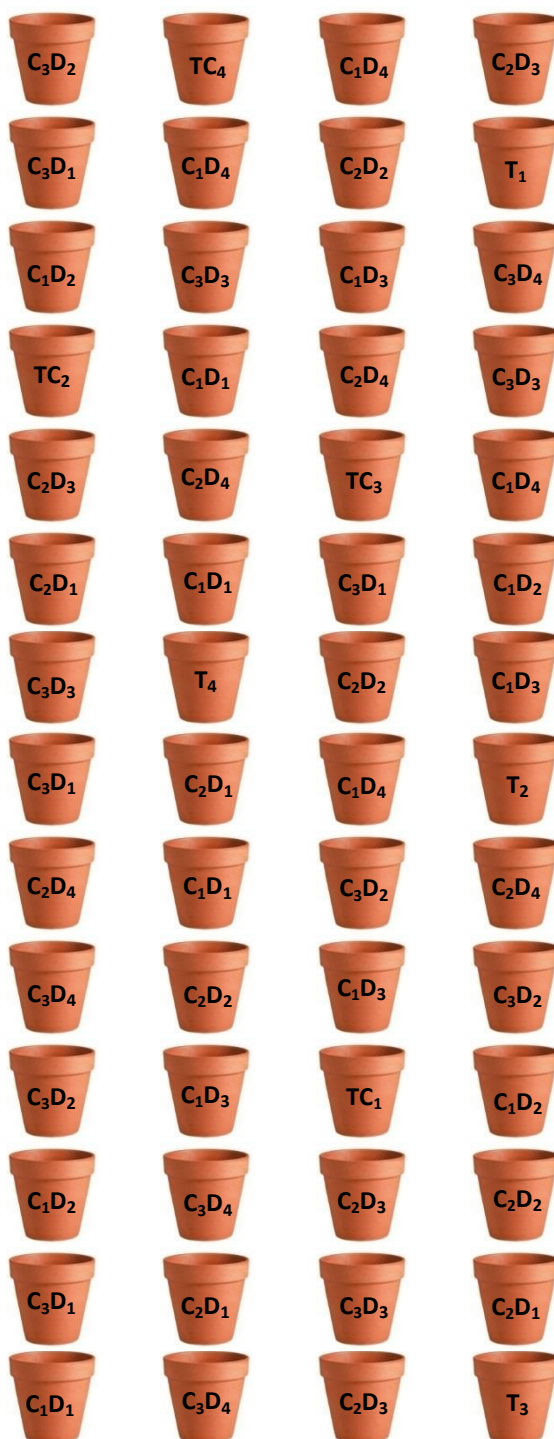
Trois mois après la mise en place de l'essai, le sol de chaque pot a été séché à l'air et bien mélangé avant de prélever un sous-échantillon de 500 g qui a été analysé selon la méthode de Fenwick pour extraire les kystes.

Les paramètres retenus pour l'évaluation de l'efficacité de ces traitements sont:

- ❖ Le nombre de nouveaux kystes et œufs comptés sous loupe binoculaire ;
- ❖ Le facteur de reproduction :  $Rf = Pf/Pi$  où, **Pf** : population finale de nématode dans le sol ; **Pi** : population initiale de nématode ;
- ❖ La croissance des plants de pomme de terre, déterminée en mesurant la hauteur des plants ;
- ❖ Le poids des tubercules de pomme de terre.

#### **6.1.7. Analyses statistiques**

Les données ont été traitées par une analyse de la variance ANOVA en utilisant le logiciel STATISTICA. Les différences entre les traitements pour les paramètres étudiés sont comparées par le biais du test HSD de Tukey ( $P = 0,05$ ).



**Légende :**

C<sub>1</sub> : Fumier provenant de déchets végétaux ; C<sub>2</sub> : Fumier de bovins ; C<sub>3</sub> : Fumier de volaille ;  
TC = Témoin chimique ; T : Témoin sans traitement ; D<sub>1</sub> = 1% ; D<sub>2</sub> = 2.5% ; D<sub>3</sub> = 5% ; D<sub>4</sub> = 10%.

**Figure 29** : Schéma du dispositif expérimental de l'effet des différents composts sur le développement de *G. rostochiensis*.

## 6.2. Résultats

### 6.2.1. Analyses physico-chimiques des composts

#### 6.2.1.1. Interprétation selon les normes AFNOR

Les résultats de l'analyse physico-chimique des trois composts sont représentés dans le tableau 12. Ces résultats montrent que le compost (C3) de fumier de volaille est plus riche en matière organique et en éléments fertilisants dont l'azote total ( $N_t$ ), l'azote minérale ( $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ ), le phosphore (P) et le potassium (K) par rapport au compost de fumier provenant de déchets végétaux (C1) et celui de fumier de bovins (C2). Cependant, le rapport C/N est plus faible dans le compost de fumier de volaille par rapport aux deux autres fumiers.

**Tableau 12 :** Analyse physico-chimique des différents composts utilisés

Type de composts et normes	MS (%)	MO (%)	$N_t$ (%)	$NH_4^+$ (%)	$NO_3^-$ (%)	P (%)	K (%)	pH	C/N
<b>C1</b> (fumier de déchets végétaux)	78.67	20.73	0.62	0.24	0.27	0.32	0.56	6.50	20
<b>C2</b> (fumier de bovin)	30.15	20.63	0.71	0.32	0.30	0.42	1.18	7.15	15
<b>C3</b> (fumier de volaille)	48.75	61.20	2.29	1.05	1.03	2.67	2.18	7.89	14
<b>Norme NF U 44051</b>	$\geq 30$	$\geq 20$	$< 3$	/	/	$< 3$	$< 3$	/	15-20
<b>Norme AFNOR</b>	/	$> 5$	$> 0.25$	/	/	/	$> 1$	/	$< 20$

MS : Matière sèche, MO : Matière organique,  $N_t$  : Azote total,  $NH_4^+$  : Ions d'Ammonium,  $NO_3^-$  : Nitrates,  $P_2O_5$  : Pentoxyde de phosphore,  $K_2O$  : L'oxyde de potassium.

Les données de l'analyse physico-chimique sont comparés aux valeurs normatives de références AFNOR. Les rapports C/N des trois composts sont en accord avec les valeurs normatives indiquées dans le tableau. Comparativement à la norme AFNOR, les composts ont des teneurs relativement élevées en matière organique (MO), en azote ( $N_t$ ) et en potassium (K). Cependant, en se référant à la norme NF U 44051 des amendements organiques, la teneur en matière organique (MO) est très élevée dans le fumier de volaille cependant elle est acceptable dans les deux autres composts.

De plus, les valeurs de matière sèche (MS) dans les composts C2 (de fumier de bovin) et C3 (fumier de volaille) sont proches à la valeur normative NF U 44051, tandis qu'elle est très élevée dans le compost C1 (fumier de déchets végétaux).

Les teneurs en éléments fertilisants N, P, K sont conformes aux normes NF U 44051 avec une richesse du compost C3 de fumier de volaille par rapport aux deux autres composts C2 et C1. Les valeurs du pH montrent un pH faiblement alcalin pour le compost de fumier de volaille, un pH neutre pour le fumier de bovin et un pH faiblement acide pour le fumier de déchets végétaux.

Enfin, les valeurs de l'azote minéral ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) montrent que le compost C3 est plus riche en Ions d'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) et en nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) par rapport aux deux autres composts C1 et C2 qui sont approximativement proche. Le rapport  $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^-$  des trois composts montre que le compost C3 et C2 sont les plus équilibrés par rapport au compost C1.

#### **6.2.1.2. Interprétation du tableau par rapport aux besoins de la pomme de terre en éléments fertilisants.**

Le tableau 13 montre les quantités en éléments fertilisants apportées par chaque dose de chaque compost. En comparant nos données par rapport aux besoins de la pomme de terre (selon les données de l'ITCMI), la teneur en azote (Nt) est faible seulement pour la dose D1 du compost de déchets végétaux (C1), tandis qu'elle est dans les normes ou plus élevée pour les autres doses des trois composts. Les teneurs en phosphore (P) sont relativement faibles pour la dose (D1) du compost de déchets végétaux (C1) et du compost de fumier de bovin (C2). En revanche, elles sont élevées pour les autres doses et pour toutes les doses du fumier de volaille.

Concernant le potassium (K), le tableau montre des quantités faibles pour les doses D1 et D2 du fumier de déchets végétaux et pour la dose D1 du fumier de bovin. Les autres doses ont monté des valeurs élevées pour les composts C1 et C2 et des valeurs très élevées pour le compost C3.

**Tableau 13 :** Quantité en éléments fertilisants apportée pour chaque pot selon les différentes doses des composts.

Composts	Doses	Nt (g/pot)	P (g/pot)	K (g/pot)
<b>C1 (fumier de déchets végétaux)</b>	<b>D1</b>	0,248	0,128	0,224
	<b>D2</b>	0,62	0,32	0,56
	<b>D3</b>	1,24	0,64	1,12
	<b>D4</b>	2,48	1,28	2,24
<b>C2 (fumier de bovin)</b>	<b>D1</b>	0,284	0,168	0,472
	<b>D2</b>	0,71	0,42	1,18
	<b>D3</b>	1,42	0,84	2,36
	<b>D4</b>	2,84	1,68	4,72
<b>C3 (fumier de volaille)</b>	<b>D1</b>	0,916	1,068	0,872
	<b>D2</b>	2,29	2,67	2,18
	<b>D3</b>	4,58	5,34	4,36
	<b>D4</b>	9,16	10,68	8,72
<b>Besoins selon l'ITCMI</b>	/	0,25-0,31	0,31-0,38	0,63-0,75

### 6.2.2. Effet des différents composts sur le développement de *G. rostochiensis*.

Les résultats concernant l'effet de l'application des différents types de composts, à différentes concentrations, sur la multiplication de *G. rostochiensis* sur pomme de terre sont représentés dans le tableau 14.

Ce dernier montre que le compost de fumier de volaille (C3) s'est avéré le plus efficace avec le plus faible nombre moyen de kystes de 25.5, 29.75, 34.5 et 41 dans le sol pour les quatre doses utilisées 10, 5, 2.5 et 1% respectivement, suivi du compost de fumier de bovins (C2) avec un nombre moyen de kystes de 38.25, 43, 51.75 et 57.25 pour les mêmes doses précédentes. Le compost de fumier de déchets végétaux (C1) était le moins efficace avec un nombre moyen de 44, 50.25, 55.25 et 60.5 kystes/500g de sol pour les doses D4, D3, D2 et D1 respectivement.

Ainsi, les résultats ont montré un effet hautement significatif de la dose sur la population finale du nématode. Le nombre de kystes diminue avec l'augmentation de la dose du traitement.

Le test HSD de Tukey ( $P= 0,05$ ) a montré une différence hautement significatives entre les différents traitements et le témoin non traité. Ainsi, une différence hautement significative a été enregistrée entre les différentes doses testées. En revanche, aucune différence significative n'a été enregistrée entre la dose D4 de fumier de bovin et la dose D1 de fumier de volaille. L'analyse de la variance a montré une différence très hautement significative entre les différents composts et le témoin non traité ( $P < 0.001$ ).

**Tableau 14 :** Effet des différents composts sur la multiplication de *G. rostochiensis*.

Traitements	Doses	Nombre de kystes/500g sol	Pourcentage (%) de réduction des populations	Rf=Pf/Pi
<b>C1</b> (fumier de déchets végétaux)	<b>D1</b>	60,5±1,28 b	10,37±1,68 h	10,76
	<b>D2</b>	55,25±1,28 bcd	18,18±1,68 fgh	9,82
	<b>D3</b>	50,25±1,28 de	25,54±1,68 f	8,93
	<b>D4</b>	44±1,28 ef	34,86±1,68 e	7,82
<b>C2</b> (fumier de bovin)	<b>D1</b>	57,25±1,28 bc	15,23±1,68 gh	10,18
	<b>D2</b>	51,75±1,28 cd	23,35±1,68 fg	9,20
	<b>D3</b>	43±1,28 f	36,28±1,68 e	7,64
	<b>D4</b>	38,25±1,28 fg	43,39±1,68 de	6,80
<b>C3</b> (fumier de volaille)	<b>D1</b>	41±1,28 fg	39,33±1,68 e	7,29
	<b>D2</b>	34,5±1,28 gh	48,84±1,68 cd	6,13
	<b>D3</b>	29,75±1,28 hi	55,82±1,68 bc	5,29
	<b>D4</b>	25,5±1,28 ij	62,3±1,68 ab	4,53
<b>Traitement chimique</b>	<b>Do</b>	20,25±1,28 j	69,94±1,68 a	3,60
<b>Témoin (sans traitement)</b>	/	67,5±1,28 a	/	12,00

Les pourcentages de réduction des effectifs ont dépassé les 50% dans le compost de fumier de volaille pour les doses les plus élevées D4 et D3 avec 62.3 et 55.82%. Pour les mêmes doses précédentes, le compost de fumier de bovin (C2) et celui provenant de déchets végétaux (C1) ont enregistré des taux de réduction des populations de 43.39 et 36.28% et de 34.86 et 25.54% respectivement.

Pour les doses les plus faibles D2 et D1, les pourcentages de réduction des populations étaient de 48.84 et 39.33%, de 23.35 et 15.23%, et de 18.18 et 10.37% pour les composts de fumier de volaille, de fumier de bovin et de fumier provenant de déchets végétaux respectivement.

Toutefois, Le traitement chimique à l'Oxamyl a permis une réduction des effectifs de *G. rostochiensis* de 69,94% avec un nombre moyen de 20.25 kystes/500g de sol.

Le test HSD de Tukey ( $P= 0,05$ ) a montré une différence hautement significative entre les différentes doses du même traitement. Cependant aucune différence significative n'a été enregistrée entre la dose D4 de fumier provenant de déchets végétaux (C1), la dose D3 de fumier de bovin (C2) et la dose D1 de fumier de volaille.

Les valeurs du facteur de reproduction (Rf) diminuent avec l'augmentation de la dose du traitement et les valeurs les plus faibles 3.6 et 4.53 ont été enregistrées pour le traitement chimique et pour la dose la plus élevée D4 du compost de fumier de volaille respectivement (tableau 14).

### **6.2.3. Effet des composts sur la croissance et le poids de tubercules de pomme de terre**

Les résultats de l'effet des différentes doses des trois composts sur la croissance des plants de pomme de terre et le poids de tubercules sont exprimés dans le tableau 15 et les figures 30 et 31.

Les données sur la croissance moyenne de la pomme de terre (figure 30) ont montré que les traitements avec les différents types de compost enregistrent une augmentation de la croissance des plants de pomme de terre de 58.34 et 47.25%, de 27.47 et 21.98% et de 25.27 et 18.68% pour les composts de fumier de volaille, de fumier de bovin et celui provenant de déchets végétaux respectivement aux plus fortes doses D4 et D3.

Cependant, pour les doses les plus faibles D2 et D1, les pourcentages d'augmentation de la croissance étaient de 38.46 et 30.77%, de 14.29 et 6.59% et de 10.29 et 2.20% pour les composts de fumier de volaille, de fumier de bovin et le compost provenant de déchets végétaux respectivement.

De plus, le test HSD de Tukey ( $P= 0,05$ ) a montré une différence hautement significative entre les différents traitements et le témoin non traité, sauf pour la dose D1 du compost provenant de déchets végétaux (tableau 15). En revanche, aucune différence significative n'a été enregistrée entre le traitement chimique et la dose D4 du compost de fumier de volaille, ainsi qu'entre le compost de fumier de bovin et le compost provenant de déchets végétaux aux doses D2 et D3 et aux doses D3 et D4 respectivement.

Les pourcentages d'augmentation du poids moyen de tubercules (figure 31) les plus élevés ont été enregistrés dans le traitement avec le compost de fumier de volaille avec 56.69, 45.86, 36.94 et 28.03% pour les quatre doses utilisées D4, D3, D2 et D1 respectivement.

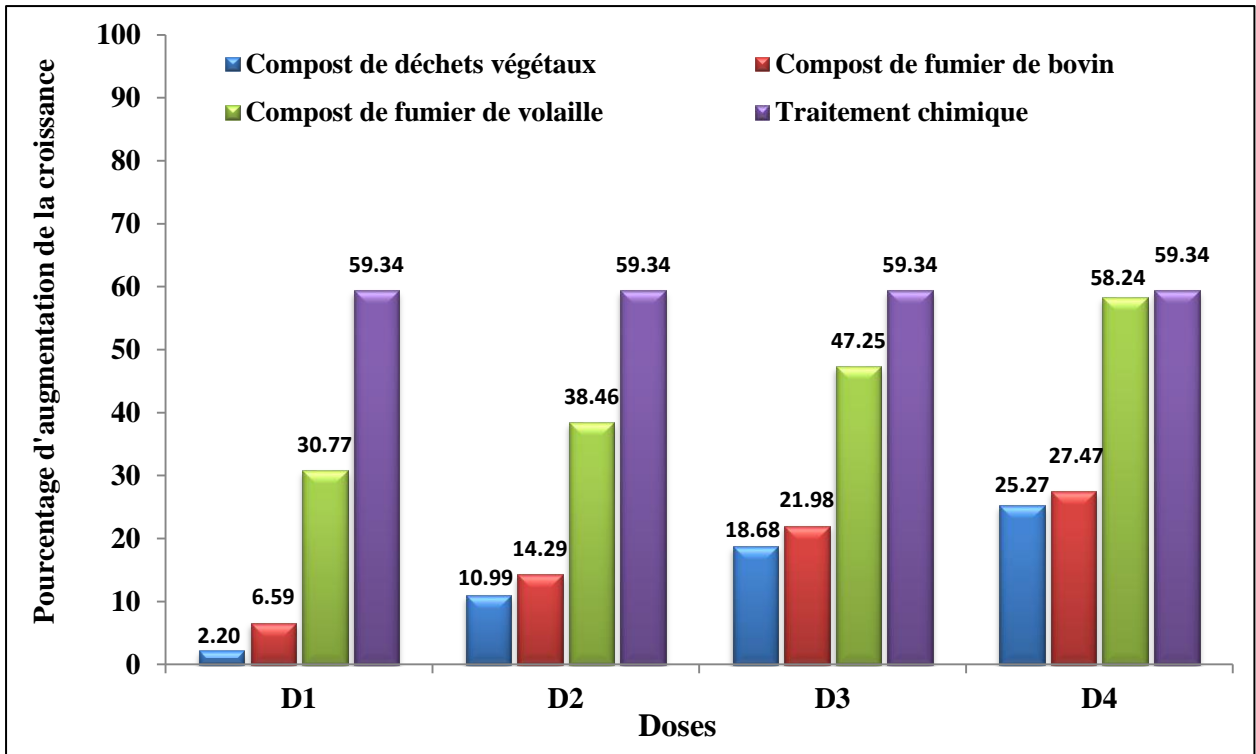
Toutefois, pour les mêmes doses précédentes le poids moyen des tubercules de pomme de terre a montré une augmentation plus faible de 29.94, 20.38, 12.74 et 5.10% pour le compost de fumier de bovin et de 24.84, 16.56, 8.28 et 1.91% pour le compost provenant de déchets végétaux.

Le traitement chimique à l'Oxamyl a montré les pourcentages d'augmentation les plus élevés de la croissance des plants et du poids moyen de tubercules avec 59.34 et 61.78% respectivement (figure 30 et 31).

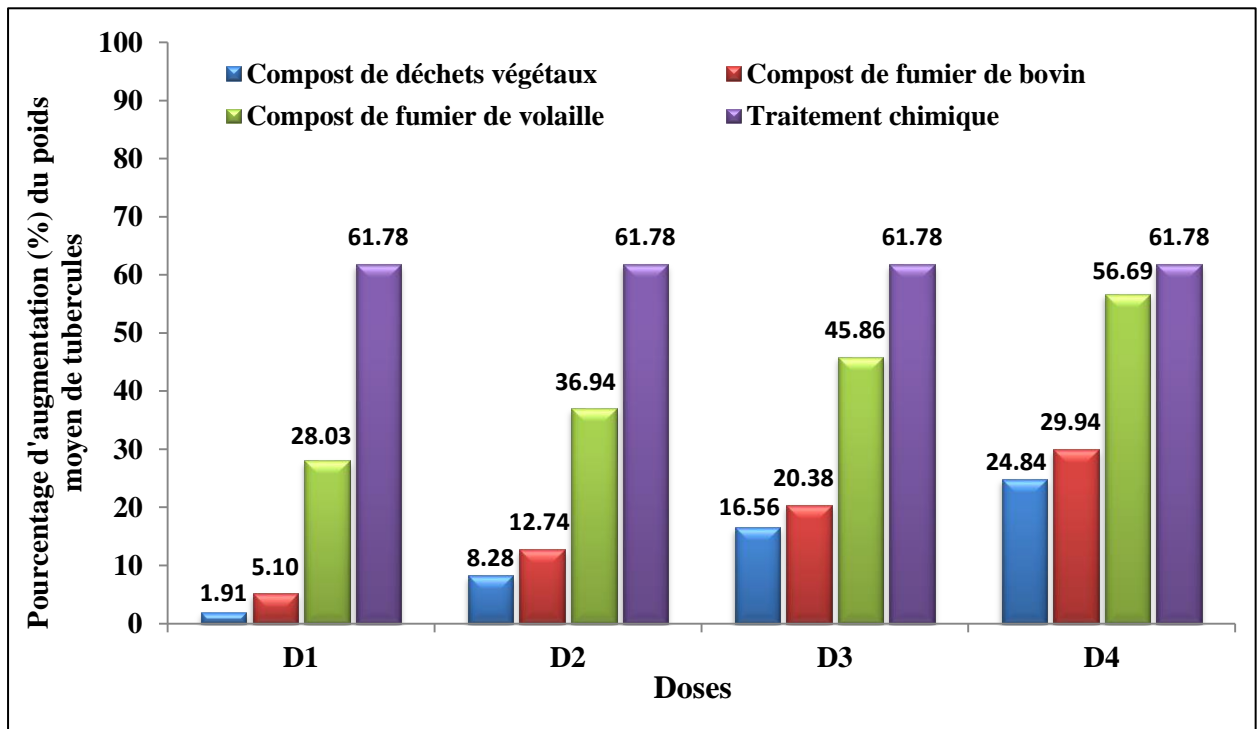
En outre, les résultats ont montré une différence hautement significative entre les différents traitements à différentes doses et le témoin non traité (tableau 15). Cependant, aucune différence significative n'a été enregistrée entre le traitement chimique à l'Oxamyl et la dose D4 de fumier de volaille. Ainsi, aucune différence significative n'a été révélée entre le compost de fumier de bovin et le compost de fumier de déchets végétaux à la dose D1 et entre le fumier de volaille à la dose D1 et le compost de fumier de déchets végétaux à la dose D4.

**Tableau 15** : Effet de différentes doses des trois composts sur l'augmentation de la croissance et le poids des tubercules de la pomme de terre.

Traitements	Doses	Hauteur moyenne des plants (cm)	Poids moyen de tubercules (g)
<b>C1</b> (fumier de déchets végétaux)	<b>D1</b>	23,25±0,83 g	40±1,14 hi
	<b>D2</b>	25,25±0,83 efg	42,5±1,14 ghi
	<b>D3</b>	27±0,83 defg	45,75±1,14 efgh
	<b>D4</b>	28,5±0,83 cdef	49±1,14 def
<b>C2</b> (fumier de bovin)	<b>D1</b>	24,25±0,83 fg	41,25±1,14 hi
	<b>D2</b>	26±0,83 defg	44,25±1,14 fghi
	<b>D3</b>	27,75±0,83 cdef	48,5±1,14 defg
	<b>D4</b>	29±0,83 cde	51±1,14 de
<b>C3</b> (fumier de volaille)	<b>D1</b>	29,75±0,83 bcd	50,25±1,14 def
	<b>D2</b>	31,5±0,83 bc	53,75±1,14 cd
	<b>D3</b>	33,5±0,83 ab	57,25±1,14 bc
	<b>D4</b>	36±0,83 a	61,5±1,14 ab
<b>Traitement chimique</b>	<b>Do</b>	36,25±0,83 a	63,5±1,14 a
<b>Témoin (sans traitement)</b>	/	22,75±0,83 g	39,25±1,14 i



**Figure 30:** Pourcentages (%) d'augmentation de la croissance moyenne des plants de pomme de terre.



**Figure 31:** Pourcentages (%) d'augmentation du poids moyen de tubercules de pomme de terre.

### 6.3. Discussion

L'effet nématocide de trois composts d'origine différente, appliqués au sol à quatre doses différentes sur la survie et la reproduction du nématode à kyste de la pomme de terre *G. rostochiensis* a été comparé et analysé. Les composts testés ont montré une diminution significative du nombre de kystes dans le sol et une amélioration de la croissance des plants de pomme de terre et du poids de tubercules par rapport aux témoins non traités. L'efficacité des amendements organiques à diminuer les populations de nématodes dépend de type d'amendements organiques et également des doses utilisées pendant le traitement.

Tous les composts testés ont montré une diminution du nombre de kystes *G. rostochiensis* dans le sol. Le compost C3 de fumier de volaille a entraîné la plus forte diminution suivi du compost C2 de fumier de bovins et du compost C1 de fumier de déchets végétaux qui a montré la plus faible réduction des effectifs de *G. rostochiensis*.

Il est signalé que l'ajout du compost biologique a un effet positif sur la qualité des sols, par l'augmentation de la matière organique, l'amélioration de la fertilité du sol, l'augmentation de la capacité de rétention d'eau, la réduction du compactage, et par conséquent, l'amélioration de la tolérance des plantes aux dommages et aux infections par les nématodes (McSorley et Gallagher, 1995 ; Everts et al., 2006 ; Renčo et al., 2007). Ainsi, lors de sa décomposition, le fumier animal libère des produits phénoliques, de l'azote ammoniacal et des ions hydrogènes, substances nématotoxiques très actives contre les nématodes phytoparasites (Lazarovits et al., 2001 ; Nwangouma & Fawole, 2004 ; Siddiqui, 2004 ; Kerkeni et al., 2007).

De plus, la réduction des populations finales de *G. rostochiensis* par la matière organique incorporée au sol est attribuée à l'amélioration de la communauté microbienne et à l'augmentation des niveaux des populations de microorganismes antagonistes des nématodes (bactéries, champignons...etc.), il en résulte une libération éventuelle de composés toxiques ou un parasitisme direct qui entraînent une diminution des populations de nématodes phytoparasites (Timm et al., 2001 ; Farahat et al., 2010 ; Ebrahimi et al., 2016).

Les résultats de notre étude ont montré que tous les amendements appliqués ont enregistré une augmentation de la croissance des plants de pomme de terre et du poids moyen de tubercules. Ces résultats sont en accord avec ceux des études précédentes (Renčo et Kováčik, 2015 ; Istifadah et al., 2019 ; Debode et al., 2020).

En effet, l'incorporation de la matière organique améliore les propriétés physicochimiques du sol amendé favorisant la croissance et le développement de la culture de pomme de terre. De plus, ces composts représentent une source d'azote sous différentes formes ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) qui sont considérés comme des leviers majeurs pour optimiser le rendement de la pomme de terre et la qualité des tubercules. Ainsi, dans les résidus ou les déchets dont le rapport C/N est inférieur à 20, l'azote peut être minéralisé en  $\text{NH}_4^+$  ou  $\text{NO}_3^-$  pour être absorbé par les systèmes racinaires des plantes (Renčo et al., 2011). En outre, les amendements organiques au cours de leur décomposition remobilisent les phosphates et augmentent la disponibilité du potassium non échangeable, augmentant ainsi le cycle des nutriments dans le sol, ce qui a une influence positive sur la croissance des plantes (Hwang et al., 2015).

Le compost de fumier de volaille a montré le pourcentage de réduction des populations de *G. rostochiensis* le plus élevé avec 62.3% par rapport aux composts de fumier de bovin et de fumier de déchets végétaux qui ont enregistré des taux de réduction de 43.39 et 34.86% à la dose D4.

Ces résultats concordent avec ceux de Renčo et al., (2007) qui ont indiqué que le compost de grignon d'olive et de fumier de poulet avec l'ajout d'azote et d'urée avait le meilleur effet sur la réduction de la reproduction des femelles de *G. rostochiensis* par rapport aux autres composts testés (compost de grignons d'olive frais, fumier de vache, résidus de laitue, paille et sciure ; compost de boues d'épuration et résidus verts municipaux ; compost constitué d'herbe, de feuilles, de branches d'arbre et de terre et le compost composé d'un sous-produit de la production de pénicilline (mycélium), de paille et de sciure).

Ainsi, Renčo et al., (2011) ont signalé une forte réduction du nombre de kyste, d'œufs et de juvéniles par kyste et par g de sol de *G. rostochiensis* (Ro1) et de *G. pallida* (Pa2) par les composts C1 : 70 % de fumier de cheval + 15 % de marc de betterave à sucre + 5 % de fumier de volaille + 10 % de marc de raisin, C2 : 100 % de fumier de porc décomposé par les larves des mouches domestiques *Musca domestica* et C4 : 100 % de lombricompost de fumier de bovins, même à la plus faible dose d'amendement (1 %). Cependant, le pathotype (Pa3) de *G. pallida* a enregistré une réduction significative du nombre de kystes, d'œufs et de juvéniles/g de sol avec toutes les doses du compost C3 : lombricompost provenant de déchets végétaux. En revanche, le nombre d'œufs et de juvéniles/ kyste n'a pas été réduit par l'amendement du sol avec le compost C3, excepté à la dose la plus élevée (5%).

Ce contrôle non efficace est peut être attribué à la teneur la plus faible en  $\text{NH}_4^+$  enregistrées dans l'analyse chimique du compost C3.

Nos résultats ont montré que le pourcentage de réduction des populations de *G. rostochiensis* a augmenté avec l'augmentation de la teneur en  $\text{NH}_4^+$ . Par ailleurs, l'efficacité des composts est inversement proportionnel avec le rapport C/N, confirmant les conclusions des recherches effectuées par plusieurs auteurs (Renčo et al., 2007 ; Renčo et al., 2011 ; Renčo et Kováčik, 2015 ; Renčo et al., 2016). En effet, les amendements organiques modifient également la structure des peuplements de nématodes par l'augmentation de la température du sol lors de la minéralisation de la matière organique et par l'émission de composés toxiques. Les matières organiques à rapport C/N inférieur à 15, dégageant de fortes quantités d'ammoniac et de produits dérivés qui sont les plus intéressants vu que ce gaz affecte sérieusement la survie de certains nématodes (en particulier le genre *Globodera*). Toutefois, ces matières organiques riches en carbone peuvent aussi avoir un effet suppressif sur certains nématodes grâce aux composés phénoliques et aux tannins qu'elles contiennent (Kokalis-Burelle et Rodríguez-Kabana, 1994).

Dans une autre étude, Renčo et Kováčik, (2015) ont comparé l'effet du lombricompost solide dérivé de déchets verts municipaux (30 % de feuilles, 70 % d'herbe) les solutions aqueuses obtenues à partir du même lombricompost appliqués au sol à différentes doses et à différents moments. Les résultats obtenus ont montré que les extraits aqueux de lombricompost étaient plus efficaces que le lombricompost solide dans la suppression de *G. rostochiensis* (pathotype Ro1) et *G. pallida* (pathotype Pa2). Toutefois, *G. rostochiensis* était plus sensible à tous les amendements testés que *G. pallida*. De plus, l'efficacité de la suppression a été augmentée avec l'ajout de l'urée aux extraits aqueux de lombricompost. Ainsi, la double application (au semis et un mois plus tard) a augmenté la réduction des populations du nématode par rapport aux mêmes doses appliquées uniquement au semis.

De plus, Ebrahimi et al., (2016) ont rapporté l'efficacité de l'inondation des sols amendés pour la réduction de la survie des nématodes *G. rostochiensis* et *G. pallida*. Un pourcentage de réduction de 99,9 % après quatre (04) semaines dans les sols amendés et inondés a été enregistré. Dans une autre approche, Ebrahimi et al., (2016) ont montré une plus grande réduction de la reproduction des deux espèces de *Globodera* dans les sols amendés avec du lisier de porc (87 %) et du compost de copeaux de bois (82 %). Cependant, l'ajout de biochar (à 0,3 et 1%) n'a montré aucun effet sur la survie ou la reproduction des espèces

de nématodes. De plus, ce compost a inhibé l'effet suppresseur du compost de copeaux de bois et du lisier de porc sur la reproduction des nématodes lorsqu'il a été ajouté à ces amendements. L'effet inhibiteur des deux composts (du lisier de porc et de copeaux de bois) est associé à l'amélioration de la communauté microbienne du sol et à la libération éventuelle de composés toxiques produits par les microorganismes du sol.

Les résultats de Renčo et *al.*, 2016 ont montré une réduction significative de la multiplication de *G. rostochiensis* à différentes densités initiales (2, 4 et 8 œufs et J2/ g de sol) après traitement des pots avec différents types de compost : le compost granulé à base de neem (*Azadirachta indica*), le lombricompost de déchets de plantes médicinales et le lombricompost de fumier de bovins par rapport au témoin non traité. Les taux de réduction augmentent avec l'augmentation de la dose du traitement quelle que soit la densité initiale d'inoculum. Ainsi, la meilleure réduction de la multiplication du nématode a été notée avec le compost granulé de neem ayant une double ou triple quantité totale d'azote par rapport aux autres lombricomposts, une teneur élevée en  $\text{NH}_4^+$  et un rapport C/N le plus faible.

L'effet nématicide du compost de fumier de vache a été rapporté par Istifadah et *al.*, (2019). Ces auteurs ont testé l'efficacité du compost et du vermicompost de fumier de vache seuls ou combinés, avec ou sans l'ajout des agents antagonistes *Paecilomyces* sp. et *Pseudomonas pseudoalcaligense*. L'application du compost seul a montré une réduction plus élevée du nombre des larves (J2), de kystes et de femelles de *G. rostochiensis* de 96.2, 78.2, et 70.2% respectivement par rapport au vermicompost. Ce dernier a permis de réduire le nombre de larves du deuxième stade (85.7%), tandis qu'il n'a pas permis de diminuer le nombre de kystes (34.5%) et les femelles (43.9%). Cependant, les pourcentages de réduction des populations de *G. rostochiensis* ont été augmentés quand le compost et le vermicompost ont été mélangés et associés avec les agents antagonistes. L'association des agents antagonistes aux amendements organiques non stériles ne montre pas toujours une amélioration de l'effet des amendements organiques dans la suppression des agents pathogènes des plantes. De ce fait, l'ajout des agents antagonistes peut ne pas être nécessaire si l'efficacité des amendements organiques est déjà élevée.

Debode et *al.*, (2020) ont montré que le compost (produit final du compostage d'un mélange de déchets verts et de la fraction organique des déchets solides municipaux dans un rapport de poids frais de 50:50) a affecté différents stades de vie des nématodes à kystes

de la pomme de terre, soit directement en tuant les œufs et les J2, soit indirectement en réduisant l'éclosion et la pénétration des J2 ainsi que la fécondation des femelles. Cependant, le biochar n'a eu aucun effet sur la reproduction du NKPT. De plus, l'ajout de biochar au début du processus de compostage (compost BB) a réduit l'effet supprimeur du compost.

Les résultats globaux ont montré qu'en plus de leur rôle de fertilisant organique, les composts peuvent être utilisés pour contrôler les nématodes phytoparasites. Ainsi, l'utilisation du compost comme amendement du sol offre divers avantages pour la santé et la qualité du sol, favorisant une production végétale écologique et durable (Istifadah et *al.*, 2019). Ces amendements sont donc prometteurs pour la lutte contre les nématodes phytoparasites dans les systèmes agricoles durables. En effet, la formulation des composts pourrait être sur la base des déchets disponibles localement, afin de fournir des composts à faible coût sans réduire leur validité technique, notamment en ce qui concerne l'efficacité nématicide (Renčo et *al.*, 2007 ; Renčo et *al.*, 2011).

## **Conclusion et Perspectives**

## Conclusion et perspectives

Les nématodes à kyste du genre *Globodera* sont les principaux ravageurs de la culture de pomme de terre en Algérie et dans le monde, et se retrouvent dans la plupart des régions productrices de cette culture. Ils causent des dégâts et des pertes économiquement lourdes. Compte tenu de leur extrême résistance, de leur grande variabilité physiologique et du fait qu'ils sont des parasites telluriques, il est très difficile de les combattre.

En Algérie, les modes de lutte conventionnels sont basés principalement sur les nématicides. En effet, ces derniers ont un impact néfaste sur l'environnement, la santé humaine et la sécurité alimentaire. En revanche, actuellement ces préoccupations se sont traduites par des actions politiques à travers des restrictions et limitations de leur utilisation. De ce fait, le développement de bionématicides à base de microorganismes ou de plantes, la maîtrise de la biologie et la perception des effets des densités initiales de *Globodera* spp. sur la croissance et le rendement sont nécessaires afin de limiter les dommages et améliorer la production de la pomme de terre.

Cette étude se propose de fournir les premières informations sur l'effet des différentes densités initiales de *G. rostochiensis* sur le rendement et la croissance de la pomme de terre, sur la durée de cycle de ce nématode dans les conditions naturelles en Algérie, ainsi que sur l'efficacité de certains extraits végétaux et des amendements organiques dans la gestion de ce bioagresseur.

L'analyse des données a révélé que la diminution des rendements de la pomme de terre varie selon la densité initiale ( $P_i$ ) de *G. rostochiensis* dans le sol. L'augmentation de la population initiale de *G. rostochiensis* a montré un effet direct sur la diminution du rendement et de la croissance des plants. De plus, une augmentation de  $P_i$  a provoqué une diminution significative du rendement et de la croissance de la pomme de terre, démontrant une grande sensibilité de la culture à l'attaque de *G. rostochiensis*. Le taux de réduction de rendement a atteint un pourcentage d'environ 85 % au ( $P_i$ ) le plus élevé (512 œufs et  $J2\ g^{-1}$  de sol) et un pourcentage de 16 % pour le ( $P_i$ ) le plus faible (1 œuf et  $J2\ g^{-1}$  de sol). Le pourcentage de réduction de la hauteur des plants variait entre 17,9 et 75,0 % pour les populations initiales ( $P_i$ ) de 1 et 512 œufs et  $J2\ g^{-1}$  sol.

L'effet de la population initiale sur la densité finale a été confirmé et l'augmentation du  $P_i$  a entraîné une augmentation du  $P_f$ , cependant le facteur de reproduction ( $R_f$ ) augmente à partir de  $P_i < 4$  œufs/g de sol où il atteint la valeur la plus élevée, et diminue pour  $P_i \geq 4$ . Cette diminution du facteur de reproduction ( $R_f$ ) peut être expliquée par la compétition pour la nourriture et l'espace dans les densités d'inoculum les plus élevées.

L'étude de la biologie de *G. rostochiensis* a permis de définir la durée de cycle de ce nématode sur deux variétés de pomme de terre pendant deux saisons. Le cycle biologique depuis l'émergence des J2 jusqu'au développement de nouveaux kystes durait 66 et 73 jours avec 620  $DJ_{6,2}$  et 699  $DJ_{6,2}$  pour les deux variétés spunta et kondor, respectivement à la culture de saison. Cependant, la durée du cycle de ce nématode était de 59 jours à 402  $DJ_{6,2}$  pour la variété spunta et 66 jours à 459  $DJ_{6,2}$  pour la variété kondor à la culture de primeur.

L'évaluation de l'activité nématocide des extraits aqueux de *Raphanus sativus* et de *Nasturtium officinale* à l'égard de *G. rostochiensis* nous a permis de mettre en évidence l'effet de différents extraits sur la mortalité des larves et l'inhibition de l'éclosion des œufs. Cette activité augmente avec l'élévation de la concentration et de la période d'exposition et varie selon l'espèce et l'organe utilisé.

En effet, les extraits de *R. sativus* sont avérés les plus efficaces avec des pourcentages de mortalité corrigée de 63.10% pour l'extrait aqueux de feuilles, et atteint 90.37% pour les extraits de racines après 72 h d'exposition à la dose la plus élevée. Des taux de mortalité plus faibles ont été enregistrés pour les extraits de *N. officinale* de l'ordre de 58.82% pour les feuilles et 48.13% pour les racines. Ainsi, les taux d'inhibition de l'éclosion les plus élevés ont été relevés avec l'extrait aqueux de racines de *R. sativus* avec 65.55 %, suivi de l'extrait de feuilles de la même espèce qui a enregistré un pourcentage de 53.28 %. Les pourcentages d'inhibition de l'éclosion étaient de 50.47 et 41.75 % pour les extraits de racines et de feuilles de *N. officinale*.

L'efficacité des extraits aqueux testés sur la mortalité des larves (J2) de *G. rostochiensis* a été déterminée également par le calcul des  $DL_{50}$  dont les valeurs sont inversement proportionnelles au temps d'exposition et sont égales à 18.69, 12.04, 25.53 et 77.54 mg/ml pour les extraits de feuilles et de racines de *R. sativus* et de *N. officinale* respectivement.

Les données relatives à l'effet de ces deux espèces comme engrais vert *in vivo* ont montré une réduction significative de la population finale du nématode à kystes *G. rostochiensis* dans le sol, par rapport au témoin non traité. Une diminution du nombre de kystes de l'ordre de 41.80, 57.19 et 69.64 % et de 11.49, 18.94 et 27.43 % a été signalée pour les traitements avec *R. sativus* et *N. officinale* pour les trois doses utilisées (D1, D2 et D3) respectivement. Ainsi, une amélioration de la croissance des plants de pomme de terre et du poids de tubercules a été enregistrée avec des pourcentages d'augmentation de l'ordre de 55.24 et 20.95% et de 44.02 et 13.04 % pour l'engrais vert du radis et du cresson à la dose D3 respectivement.

En effet, les deux espèces testées *R. sativus* et *N. officinale* qui appartiennent à la famille des Brassicacées possèdent un potentiel élevé de biocontrôle à l'égard des nématodes à kystes de la pomme de terre. Cette efficacité est due aux métabolites secondaires appelés glucosinolates qui libèrent des produits biologiquement actifs tels que les isothiocyanates toxiques et hautement volatils.

L'identification des métabolites secondaires a révélé que *R. sativus* est très riche en glucosinolate par rapport à *N. officinale*, avec la présence en grandes quantités de glucoraphasatin dans les racines. Ainsi, une quantité élevée de la MeO-glucobrassicin dans les racines de *R. sativus* a été enregistrée. Les feuilles de *R. sativus* sont plus riches en glucobrassicin. En revanche, *N. officinale* présente des quantités plus ou moins importantes de glucosinolate avec l'abondance de la MeO-glucobrassicin dans les feuilles et les racines.

De plus, la présence de composés phénoliques dans les différentes parties des plantes testées a été révélée. Ces composés appartiennent principalement aux classes des flavonoïdes et des acides phénoliques.

Par ailleurs, *R. sativus* est caractérisé par sa richesse en glucosinolate et en composés phénoliques. De ce fait il serait souhaitable de tester ces fractions *in vitro* afin d'évaluer de façon précise les molécules impliqués dans la toxicité et déterminer les périodes et les doses d'application ainsi que le mécanisme d'action. En effet ces composés peuvent être opportuns en vue de leur utilisation comme bionématicide.

Les résultats relatifs à l'évaluation de l'effet des composts ont confirmé l'efficacité du compost de fumier de volaille dans la réduction des populations de *G. rostochiensis*, avec

un pourcentage de 62.3 % par rapport aux composts de fumier de vache et de fumier provenant de débris végétaux qui rapportent des taux de réduction de l'ordre de 43.39 et 34.86%.

A partir de ces résultats il est possible d'approfondir les travaux, en effet on pourra accentuer les essais sur l'utilisation du fumier de volaille qui s'est révélé plus efficace que les autres fumiers.

En plus de l'efficacité nématocide, tous les amendements organiques étudiés (engrais verts et composts) ont montrés une augmentation significative de la croissance des plants de pomme de terre et du poids de tubercules.

Notre travail présente une approche prometteuse de gestion et de bio-contrôle des nématodes à kystes de la pomme de terre. Cependant, des recherches concernant d'autres moyens alternatifs à l'égard de ces boiagrésseurs s'avèrent nécessaires comme par exemple :

- l'organisation des journées de vulgarisation afin de sensibiliser les agriculteurs sur les dangers réels des nématodes dorés de la pomme de terre et de prévoir les risques des dégâts occasionnés pour limiter sa propagation dans les parcelles saines.
- le développement de nouvelles variétés résistantes et d'identification des rotations les plus efficaces.
- la recherche d'antagonistes comme les champignons nématophages et les bactéries nématoparasites.

Enfin, le développement d'une stratégie de lutte intégrée associant plusieurs méthodes de lutte représente un but majeur pour un contrôle durable des populations de nématodes à kystes afin de réduire leur impact économique pour une meilleure protection des plantes cultivées tout en respectant l'environnement.

# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

---

- Aarti, B., Venkatasalam, E.P., Umamaheswari, R., Sudha, R., & Singh, B. P., (2017).** Effect of cultural practices on potato cyst nematode population dynamics and potato tuber yield. *Indian Journal of Horticulture*, 74(1):91–96.
- Aires, A., Carvalho, R., Da Conceição Barbosa, M., & Rosa, E. (2009).** Suppressing potato cyst Nematode, *Globodera rostochiensis*, with Extracts of Brassicacea plants. *American Journal of Potato Research*, 86(4), 327-333.
- Alonso, R., Alemany, A., & Andres, M. F. (2011).** Population dynamics of *Globodera pallida* (Nematoda : Heteroderidae) on two potato cultivars in natural field conditions in Balearic Islands, Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(2), 589-596.
- Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Bierman, P., Metzger, J. D., Lee, S., & Welch, C. (2003).** Effects of vermicomposts on growth and marketable fruits of field-grown tomatoes, peppers and strawberries. *Pedobiologia*, 47(5-6), 731-735.
- Aydinli, G., & Mennan, S. (2018).** Biofumigation studies by using *Raphanus sativus* and *Eruca sativa* as a winter cycle crops to control root-knot nematodes. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 61, e18180249.
- Bacic, J., Barsi, L., & Strbac, P. (2011).** Life cycle of the potato golden cyst nematode (*Globodera rostochiensis*) grown under climatic conditions in Belgrade. *Archives of Biological Sciences*, 63 (4), 1069-1075.
- Bandyopadhyay, S., & Khalko, S. (2016).** Biofumigation - An eco-friendly approach for managing bacterial wilt and soft rot disease of ginger. *Indian Phytopathology*, 69 (1), 53-56.
- Barros, A.F., Campos, V.P., Da-Silva, J.C.P., López, L.E., Da-Silva, A.P., Pozza, E. A. & Pedroso, L.A. (2014).** Exposure time of second stage juveniles to volatiles emitted by neem and mustard macerates and biofumigation against *Meloidogyne incognita*. *Nematropica*, 44 (2), 190-199.

- Behrens, W. (1975).** Mediterranean macrothrombocytopenia. *Blood*, 46(2), 199-208.
- Bélaïr, G. (2013).** Bilan de la recherche sur le nématode à kyste de la pomme de terre. *Colloque sur la pomme de terre*, Québec, Canada, 69.
- Benramdane, N., & Bouciouf, D. (2013).** Contribution à l'étude du nématode du genre *Globodera* dans les zones de production de pomme de terre à l'Ouest et au Sud du pays. Mémoire de Master, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, El-Harrach, 74 p.
- Benttoui, N., Colagiero, M., Sellami, S., Boureghda, H., Keddad, A., & Ciancio, A. (2020).** Diversity of Nematode Microbial Antagonists from Algeria Shows Occurrence of Nematotoxic *Trichoderma* spp. *Plants*, 9(8), 941.
- Berliner, E. (1915).** Über die Schlafsucht der Mehlmotenraupe (*Ephestia kühniella* Zell.) und ihren Erreger Bacillus. *Journal of Applied Entomology*, 29-56.
- Bettiche, F., (2017).** Usages des produits phytosanitaires dans les cultures sous serres des Ziban (Algérie) et évaluation des conséquences environnementales possibles. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 327 p.
- Bettiche, F., Chaib, W., Halfadji, A., Mancer, H., Bengouga, K., & Grunberger, O. (2021).** The human health problems of authorized agricultural pesticides : The Algerian case. *Microbial Biosystems*, 5(2), 69-82.
- Blanchard, A. (2006).** Identification, polymorphisme et évolution moléculaire de gènes du pouvoir pathogène chez le nématode à kyste de la pomme de terre *Globodera pallida*. Thèse de doctorat, Université de renne, France, 265 p.
- Bones, A., & Rossiter, J. (2006).** The enzymic and chemically induced decomposition of glucosinolates. *Phytochemistry*, 67(11), 1053-1067.
- Boucher, A. C. (2013).** Caractérisation de la structure génétique des populations Québécoises du nématode doré (*Globodera rostochiensis*) et développement d'exsudats racinaires de pomme de terre. Mémoire de maîtrise en sciences. Faculté des sciences (Bibliothèque et Archives Canada). Sherbrook, Quebec, Canada, 72 p.
- Brodie, B. B., Evans, K., & Franco, J. (1993).** Nematode parasites of potatoes. In : Plant parasitic nematodes in temperate agriculture. **Evans, K., Trudgill, D. L., & Webster, J.**

- M. (Éds.). *Plant parasitic nematodes in temperate agriculture* (p. 88-96). CAB International, United Kingdom.
- Brolsma, K. M., van der Salm, R. J., Hoffland, E., & de Goede, R. G. M. (2014).** Hatching of *Globodera pallida* is inhibited by 2-propenyl isothiocyanate *in vitro* but not by incorporation of *Brassica juncea* tissue in soil. *Applied Soil Ecology*, 84, 6-11
- Buisson, A., Chabert, A., Champeil, A., Foumet, S., Mugnière, D., Rivoal, R. et Taupin, P. (2011).** Nématodes des grandes cultures (Paris: ACTA- Le réseau des instituts des filières animales et végétales).
- Buskov, S., Serra, B., Rosa, E., Sørensen, H., & Sørensen, J. C. (2002).** Effects of Intact Glucosinolates and Products Produced from Glucosinolates in Myrosinase-Catalyzed Hydrolysis on the Potato Cyst Nematode (*Globodera rostochiensis* Cv. Woll). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(4), 690-695.
- Byrne, J., Twomey, U., Maher, N., Devine, K. J., & Jones, P. W. (1998).** Detection of hatching inhibitors and hatching factor stimulants for golden potato cyst nematode, *Globodera rostochiensis*, in potato root leachate. *Annals of Applied Biology*, 132(3), 463-472.
- Byrne, J. T., Maher, N. J., & Jones, P. W. (2001).** Comparative Responses of *Globodera rostochiensis* and *G. pallida* to Hatching Chemicals. *Journal of Nematology*, 33(4), 195-202.
- Campanella, V., Mandalà, C., Angileri, V., & Miceli, C. (2020).** Management of common root rot and Fusarium foot rot of wheat using *Brassica carinata* break crop green manure. *Crop Protection*, 130, 105073.
- Cannon, O. S. (1941).** *Heterodera schachtii* found in a Long Island potato field. *Plant Disease Reporter*, 25 (15), 408.
- Castro-Quezada, P. S. (2013).** Analyse fonctionnelle et étude de la régulation de gènes candidats sous-jacents au QTL GpaVspl impliqué dans la résistance au nématode à kyste *Globodera pallida* chez la pomme de terre. Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon-Montfavet-France, 166 p.

- Cauwer, B., Vanbesien, J., De Ryck, S. & Reheul, D. (2019).** Impact of *Brassica juncea* biofumigation on viability of propagules of pernicious weed species. *Weed Research*, 59(3), 209-221.
- Chandrasekar, S., Natarajan, P., Mhatre, P. H., Mahajan, M., Nivitha, S., Palanisamy, V. E., Reddy, U. K., & Sundararaj, P. (2022).** RNA-Seq of Cyst Nematode Infestation of Potato (*Solanum tuberosum* L.): A Comparative Transcriptome Analysis of Resistant and Susceptible Cultivars. *Plants*, 11(8), 1008.
- Chauvin, L., Caromel, B., Kerlan, M.-C., Rulliat, E., Fournet, S., Chauvin, J.-É., Grenier, E., Ellissèche, D., & Mugniéry, D. (2008).** La lutte contre les nématodes à kyste de la pomme de terre *Globodera rostochiensis* et *Globodera pallida*. *Cahiers Agricultures*, 17(4), 368-374.
- Chidwood, B. G. (1949).** A revision of the genus *Meloidogyne* Goeldi, 1887. *Proceedings of the Helminthological Society of Washington*, 16, 90-104.
- Chin, S., Carolyn, A., Behm, C.A., & Mathesius, U. (2018).** Functions of Flavonoids in Plant–Nematode Interactions. *Plants*, 7(4): 85.
- Clarkson, J., Michel, V., & Neilson, R. (2014).** Mini-paper - Biofumigation for the control of soil-borne diseases. *Agriculture & Innovation (EIP-AGRI)*, p.7.
- Contina, J. B., Dandurand, L. M., & Knudsen, G. R. (2017).** Use of GFP-tagged *Trichoderma harzianum* as a tool to study the biological control of the potato cyst nematode *Globodera pallida*. *Applied Soil Ecology*, 115, 31-37.
- Dandurand, L.-M., & Knudsen, G. R. (2016).** Effect of the trap crop *Solanum sisymbriifolium* and two biocontrol fungi on reproduction of the potato cyst nematode, *Globodera pallida* : Trap crop and biocontrol agent effects on *Globodera pallida*. *Annals of Applied Biology*, 169(2), 180-189.
- Dandurand, L.-M., Morra, M. J., Zasada, I. A., Phillips, W. S., Popova, I., & Harder, C. (2017).** Control of *Globodera* spp. Using *Brassica juncea* seed meal and seed meal extract. *Journal of Nematology*, 49(4), 437-445.

- Dandurand, L. M., Zasada, I. A., Wang, X., Mimee, B., De Jong, W., Novy, R., Whitworth, J., & Kuhl, J. C. (2019).** Current Status of Potato Cyst Nematodes in North America. *Annual Review of Phytopathology*, 57(1), 117-133.
- Daneel, M., Engelbrecht, E., Fourie, H., & Ahuja, P. (2018).** The host status of Brassicaceae to Meloidogyne and their effects as cover and biofumigant crops on root-knot nematode populations associated with potato and tomato under South African field conditions. *Crop Protection*, 110, 198-206.
- De Bary, A. (1876).** Researches into the nature of the potato fungus, *Phytophthora infestans*. *Journal of the Royal Agricultural Society of England*, 12, 239-269.
- Debode, J., Ebrahimi, N., D'Hose, T., Cremelie, P., Viaene, N., & Vandecasteele, B. (2020).** Has compost with biochar added during the process added value over biochar or compost to increase disease suppression? *Applied Soil Ecology*, 153, 103571.
- Deliopoulos, T., Devine, K.J., Haydock, P.P.J. & Jones, P.W. (2007).** Studies on the effect of mycorrhization of potato roots on the hatching activity of potato root leachate towards the potato cyst nematodes, *Globodera pallida* and *G. Rostochiensis*. *Nematology*, 9(5), 719-729.
- Deliopoulos, T., Minnis, S. T., Jones, P. W., & Haydock, P. P. J. (2010).** Enhancement of the efficacy of a carbamate nematicide against the potato cyst nematode, *Globodera pallida*, through mycorrhization in commercial potato fields. *Journal of Nematology*, 42(1), 22-32.
- Den Ouden, H. (1960).** A Note On Parthenogenesis and Sex determination in *Heterodera rostochiensis* Woll. *Nematologica*, 5, 215-216.
- Devine, K., & Jones, P. (2000).** Purification and partial characterisation of hatching factors for the potato cyst nematode *Globodera rostochiensis* from potato root leachate. *Nematology*, 2(2), 231-236.
- Dias, M. C., Perpétuo, L. S., Cabral, A. T., Guilherme, R., da Cunha, M. J. M., Melo, F., Machado, Ó. C., & Conceição, I. L. (2017).** Effects of *Solanum sisymbriifolium* on potato cyst nematode populations in Portugal. *Plant and Soil*, 421(1-2), 439-452.

- Dihingia, S., Das, D., & Bora, S. (2017).** Effect of microbial secretion on inhibitory effect of Phytonematode. *International Journal of Information Research and Review*, 04(7), 4275-4280.
- Djebroune, A., Mokabli, A., Hammache, M. & Chakali, G. (2020).** Effects of Potato Cyst Nematodes on Three Potato Varieties in Algeria. *Pakistan Journal of Zoology*, 52(4), 1341-1346.
- Djebroune, A., Chakali, G., de Andrade, E., Camacho, M. J., Rusinque, L. & Inácio, M. L. (2021).** Integrative morphometric and molecular approach to update the impact and distribution of Potato Cyst Nematodes *Globodera rostochiensis* and *Globodera pallida* (Tylenchida : Heteroderidae) in Algeria. *Pathogens*, 10(2), 216.
- Donald, E.C., Villalta, O.N., Scoble, C. A., Wite, D., Riches, D., Mattner, S., Chandolu, V., Jones, R. B., Imsic, M. & Allen, D. (2010).** The potential of biofumigant and green manure crops as a tool to manage soilborne diseases in vegetable production. 6<sup>th</sup> *Australasian Soilborne Diseases Symposium, Twin Waters, Queensland*, 9-11 Aout 2010. P43.
- Dossey, Z. (2010).** Potential of green manure biofumigants and seed exudates in the control of *Globodera pallida*, the white potato cyst nematode. Master of science in plant pathology. *Washington State University*, 74 p.
- Duceppe, M.-O., Lafond-Lapalme, J., Palomares-Rius, J. E., Sabeih, M., Blok, V., Moffett, P., & Mimee, B. (2017).** Analysis of survival and hatching transcriptomes from potato cyst nematodes, *Globodera rostochiensis* and *G. pallida*. *Scientific Reports*, 7(1), 3882.
- Dutta, T. K., Khan, M. R., & Phani, V. (2019).** Plant-parasitic nematode management via biofumigation using brassica and non-brassica plants: Current status and future prospects. *Current Plant Biology*, 17, 17-32
- Duvauchelle, S. (2013).** Nématodes des pommes de terre, tour d’horizon à ras du sol. *Phytoma*. 660, 16.

- Ebrahimi, N., Viaene, N., Demeulemeester, K., & Moens, M. (2014).** Observations on the life cycle of potato cyst nematodes, *Globodera rostochiensis* and *G. pallida*, on early potato cultivars. *Nematology*, *16*(8), 937-952.
- Ebrahimi, N., Viaene, N., Vandecasteele, B., D'Hose, T., Debode, J., Cremelie, P., De Tender, C., & Moens, M. (2016).** Traditional and new soil amendments reduce survival and reproduction of potato cyst nematodes, except for biochar. *Applied Soil Ecology*, *107*, 191-204.
- Edwards C., Arancon N.Q., Sherman R. (2011).** Vermiculture Technology. *CRC Press*, USA, 623 pp.
- Ehrenberg, C.G. (1835).** Das Leuchten des Meeres. Neue Beobachtungen nebst Übersicht der Hauptmomente der geschichtlichen Entwicklung dieses merkwürdigen Phänomens. *Berlin, Königlichen Akademie der Wissenschaften*, p.167, tables I-III, plates I-II. [En ligne] <http://dx.doi.org/10.5962/bhl.title.82190>.
- EOCHE-BOSY, D., GAUTIER, M., ESQUIBET, M., LEGEAI, F., BRETAUDEAU, A., BOUCHEZ, O., FOURNET, S., GRENIER, E., & MONTARRY, J. (2017).** Genome scans on experimentally evolved populations reveal candidate regions for adaptation to plant resistance in the potato cyst nematode *Globodera pallida*. *Molecular Ecology*, *26*(18), 4700-4711.
- Evans, K., & Stone, A. R. (1977).** A Review of the Distribution and Biology of the Potato Cyst-Nematodes *Globodera rostochiensis* and *G. pallida*. *Pans*, *23*(2), 178-189.
- Evans, P. B. (1993).** 13. Building an Integrative Approach to International and Domestic Politics : Reflections and Projections. In : **Evans P. B., Jacobson, H. K. & Putnam R. D.** (Éds.), *Double-Edged Diplomacy* (p. 397-430). University of California Press.
- Evans, K., & Rowe, J. A. (1998).** Distribution and economic importance. In : **Sharma, S. B.** (Éd.), *The Cyst Nematodes* (p.1-30). Springer Netherlands.
- Everts, K. L., Sardanelli, S., Kratochvil, R. J., Armentrout, D. K., & Gallagher, L. E. (2006).** Root-Knot and Root-Lesion Nematode Suppression by Cover Crops, Poultry Litter, and Poultry Litter Compost. *Plant Disease*, *90*(4), 487-492.

- Fahey, J. W., Zalcmann, A. T., & Talalay, P. (2001).** The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants. *Phytochemistry*, 56(1), 5-51.
- FAO (2011).** Produire plus avec moins : Guide à l'intention des décideurs sur l'intensification durable de l'agriculture paysane. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (Éd.). Rome. 116 p.
- FAOSTAT (2024).** Food and agriculture data. *FAO's corporate database*. [En ligne] <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
- Farahat, A.A., Al-Sayed, A. A., & Mahfoud, N. A. (2010).** Compost and other organic and inorganic fertilizers in the scope of the root-knot nematode reproduction and control of *Meloidogyne incognita* infecting to tomato. *Egyptian Journal of Agronematology*, 9: 18-29.
- Fatemy, S. & Sepideh, A. (2016).** Adverse effects of brassica green manures on encysted eggs, infective second-stage juveniles and the reproduction of *Globodera rostochiensis*. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 123(5), 225-233.
- Fatemy, S. & Ghasemi, H. (2018).** Comparison of development of *Globodera rostochiensis* in four potato cultivars. *Pakistan Journal of Nematology*, 36(2), 151-161.
- Fatemy, S. (2018).** Nematicidal effect of *Lepidium sativum* on activity and reproduction of potato cyst nematode *Globodera rostochiensis* in soil. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 51(9-10), 560-574.
- Finkers-Tomczak, A., Danan, S., van Dijk, T., Beyene, A., Bouwman, L., Overmars, H., van Eck, H., Goverse, A., Bakker, J., & Bakker, E. (2009).** A high-resolution map of the Grp1 locus on chromosome V of potato harbouring broad-spectrum resistance to the cyst nematode species *Globodera pallida* and *Globodera rostochiensis*. *Theoretical and Applied Genetics*, 119(1), 165-173.
- Fourie, H., Ahuja, P., Lammers, J., & Daneel, M. (2016).** Brassicacea-based management strategies as an alternative to combat nematode pests : A synopsis. *Crop Protection*, 80, 21-41.

- Fournet, S., Renault, L., Rouaux, C., Le Cointe, R., Dantec, J.P., Bozec, M., & Kerlan, M.C. (2011).** Efficacité, durabilité, productivité : la recherche du compromis - Cas du couple pomme de terre-nématode à kyste *Globodera pallida*. *Innovations Agronomiques* 15 (2011), 79-88.
- Franco, J. (1986).** Nematodos del quiste de la papa; *Globodera* spp. *Boletín de Información Técnica* 9. Centro Internacional de la Papa, Lima, Perú.
- Franke, K., Gryń, G., Nowakowski, M. M., Mirosław Nowakowski, & Skibowska, B. (2019).** Effect of some root leachates and dry extracts of Brassicaceae plants on potato cyst nematode populations. *Russian Journal of Nematology*, 27 (2), 123 – 130
- Franklin, M. T. (1940).** On the Specific Status of the so-called Biological Strains of *Heterodera schachtii* Schmidt. *Journal of Helminthology*, 18(4), 193-207.
- Frezal, P. (1954).** Importance et répercussions de la contamination de l'Algérie par le nématode doré (*Heterodera rostochiensis* Wooll. [Woll.]). *Journal Comptes Rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France*, 40, 71–74.
- Fudali, S., & Golinowski, W. (2007).** The reorganization of root anatomy and ultrastructure of syncytial cells in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) infected with potato cyst nematode (*Globodera rostochiensis* Woll.). *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 76(3), 181-191.
- Furlan, L., Bonetto, C., Costa, B., Finotto, A., Lazzeri, L., Malaguti, L., Patalano, G., Parker, W. (2010).** The efficacy of biofumigant meals and plants to control wireworm populations. *Ind Crop Prod*, 31, 245–254.
- Furlan, L., Bonetto, C., Finotto, A., Lazzeri, L., Malaguti, L., Patalano, G. & Parker, W. (2010).** The efficacy of biofumigant meals and plants to control wireworm populations. *Industrial Crops and Products*, 31(2), 245-254.
- Galfout, A. (2014).** Contribution à l'étude des nématodes du genre *Globodera* (Skarbilovich, 1959) sur pomme de terre et Gestion intégrée contre ce bio-agresseur. Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, El-Harrach, 100 p.

- Gams, W. (1971).** Tolypocladium, eine Hyphomycetengattung mit geschwollenen Phialiden. *Persoonia - Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi*, 6(2), 185–191.
- Gartner, U., Hein, I., Brown, L. H., Chen, X., Mantelin, S., Sharma, S. K., Dandurand, L. M., Kuhl, J. C., Jones, J. T., Bryan, G. J., & Blok, V. C. (2021).** Resisting potato cyst nematodes with resistance. *Frontiers in Plant Science*, 12, 661194.
- Gonzalez, J.A., & Estevez-Braun, A. (1998).** Effect of (E)-chalcone on potato cyst nematodes (*Globodera pallida* and *G. rostochiensis*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46: 1163-1165.
- Greco, N., Di Vito, M., De Marinis, G., Giordano, I., & Brandonisio, A. (1982).** The Effect of *Globodera Pallida* and *G. Rostochiensis* On Potato Yield. *Nematologica*, 28(4), 379-386.
- Greco, N., Inserra, R. N., Brandonisio, A., Tirro, A., & De Martinis, G. (1988).** Life-cycle of *Globodera rostochiensis* on potato in Italy. *Nematologia Mediterranea*, 16, 69-73.
- Greco, N. & I. Moreno, L. (1992).** Development of *Globodera rostochiensis* During Three Different Growing Seasons in Chile. *Nemtropica*, 22(2), 175-181.
- Greco, N. & I. Moreno, L. (1992).** Influence of *Globodera rostochiensis* on Yield of Summer, Winter and Spring Sown Potato in Chile. *Nemtropica*, 22(2), 165-173.
- Greco, N., Brandonisio, A., Dangelico, A. (2000).** Control of the potato cyst Nematode, *Globodera rostochiensis*, with soil solarization and nematicides. *Nematologia Mediterranea*, 28, 93-99.
- Guzmán-Guzmán, P., Porras-Troncoso, M. D., Olmedo-Monfil, V., & Herrera-Estrella, A. (2019).** Trichoderma Species : Versatile Plant Symbionts. *Phytopathology®*, 109(1), 6-16.
- Hafez, S. L., Sundararaj, P., Handoo, Z. A., Skantar, A. M., Carta, L. K., & Chitwood, D. J. (2007).** First Report of the Pale Cyst Nematode, *Globodera pallida*, in the United States. *Plant Disease*, 91(3), 325-325.
- Hajihassani, A., Ebrahimian, E., & Hajihassani, M. (2013).** Estimation of Yield Damage in Potato Caused by Iranian Population of *Globodera rostochiensis* with and without

Aldicarb under Greenhouse Conditions. *International Journal Of Agriculture And Biology*, 15(2), 6.

**Hajji, L., Hlaoua, W., Regaieg, H., & Horrigue-Raouani, N. (2016).** Biocontrol Potential of *Verticillium leptobactrum* and *Purpureocillium lilacinum* Against *Meloidogyne javanica* and *Globodera pallida* on Potato (*Solanum tuberosum*). *American Journal of Potato Research*, 94(2), 178-183.

**Hajji-Hedfi, L., Hloua, W., Gamoun, W., Chihani, N., Regaieg, H., Horrigue-Raouani, N. (2017).** Management of Potato Cyst Nematode (*Globodera rostochiensis*) with Oxamyl. *Journal of New Sciences*, 1, 2591-2596.

**Haskhy-Gunther, K., Hoffmann-Hergarten, S., Sikora, R. A. (1998).** Resistance against the potato cyst nematode *Globodera pallida* systemically induced by the rhizobacteria *Agrobacterium radiobacter* (G12) and *Bacillus sphaericus* (B43). *Fundamental and Applied Nematology*, 21(5), 511-517.

**Haydock P. P. J, & Evans K. (1998).** Management of Potato Cyst Nematodes in the UK: An Integrated Approach? *Outlook on Agriculture*, 27(4), 253-260.

**Haydock, P. P. J., Woods, S. R., Grove, I. G., & Hare, M. C. (2013).** Chemical control of nematodes. In : **Perry, R. N. & Moens, M.** (Éd.), *Plant nematology* (2<sup>e</sup> éd., p. 459-479). CABI. Wallingford, UK.

**Henderson, D. R., Riga, E., Ramirez, R. A., Wilson, J., & Snyder, W. E. (2009).** Mustard biofumigation disrupts biological control by *Steinernema* spp. Nematodes in the soil. *Biological Control*, 48(3), 316-322.

**Hooper, D.J. (1986).** Preserving and staining nematodes in plant tissues. In: **Southey, J.F.** (Éd.). *Laboratory Methods for Work with Plant and Soil Nematodes*, 6th edn, (p. 81–85). Her Majesty's Stationery Office, London.

**Hwang, H.Y, Kim, G.W, Lee, Y. B., Kim, P. J., & Kim, S. Y. (2015).** Improvement of the value of green manure via mixed hairy vetch and barley cultivation in temperate paddy soil. *Field Crops Research*, 183: 138-146

- INPV (2009).** Nématodes à kystes de la pomme de terre : *Globodera rostochiensis* et *G. pallida*. (Ed) INPV. 4p.
- Iriarte, L.E., Sosa, M.C. & Reybet, G.E. (2011).** Efecto de la biofumigación con repollo sobre el control de *Fusarium oxysporum* en suelo RIA. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 37(3), 231-237.
- Istifadah, N., Pratama, N., Taqwim, S. & Sunarto, T. (2018).** Effects of bacterial endophytes from potato roots and tubers on potato cyst nematode (*Globodera rostochiensis*). *BIODIVERSITAS*, 19 (1), 47-51.
- Istifadah, N., Nurfitri, M., Sunarto, T. (2019).** The efficacy of compost, vermicompost and their combination with antagonistic microbes to reduce potato cyst nematode (*Globodera rostochiensis*). *International Journal Of Biosciences (IJB)*, 14(2), 233-241.
- Jiménez, N., Crozzoli, R. & Greco, N. (2000).** Effect of *Globodera rostochiensis* on the yield of potato in Venezuela. *Nematologia Mediterranea*, 28, 295-299.
- Jiménez, N., Crozzoli, R. & Greco, N. (2009).** Ciclo biológico de *globodera rostochiensis* en el cultivo de la papa en Venezuela. *Nematologia Mediterranea*, 37, 155-160.
- Jin, X., Wang, J., Li, D., Wu, F., & Zhou, X. (2019).** Rotations with Indian Mustard and Wild Rocket Suppressed Cucumber Fusarium Wilt Disease and Changed Rhizosphere Bacterial Communities. *Microorganisms*, 7(2), 57.
- Jones, F. G. W. (1970).** The control of the potato cyst-nematode. *Journal of the Royal Society of Arts*, 118, 179-199.
- Jones, L. M., Koehler, A.-K., Trnka, M., Balek, J., Challinor, A. J., Atkinson, H. J., & Urwin, P. E. (2017).** Climate change is predicted to alter the current pest status of *Globodera pallida* and *G. rostochiensis* in the United Kingdom. *Global Change Biology*, 23(11), 4497-4507.
- Jourdan, R., Bais, I., Balaghi, R., Huilmi, M. Maki, A. & Cherif, I. (2022).** L'agriculture pluviale face aux changements climatiques en Afrique du Nord – Impact et perspective avec l'agroécologie. *FAO*, Tunisi, 85 p.

- Kacem, N. (1992).** Répartition des nematodes à kystes de la pomme de terre dans la wilaya de Boumerdes. Thèse de Magistère. Institut National Agronomique El-Harrach, Alger. 72p.
- Kaczmarek, A. M. (2014).** Population dynamics of potato cyst nematodes in relation to temperature. Thèse de doctorat en sciences, Université de Dundee, Nethergate, Royaume-Uni, 237 p.
- Kaczmarek, A., Mackenzie, K., Kettle, H. & Blok, V.C. (2014).** Influence of soil temperature on *Globodera rostochiensis* and *Globodera pallida*. *Phytopathologia Mediterranea*, 53(3), 396–405.
- Karavina, C., & Mandumbu, R. (2012).** Biofumigation for crop protection: potential for adoption in zimbabwe. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 14(3), 1996-2005.
- Kawanobe, M., Toyota, K., Fujita, T., & Hatta, D. (2019).** Evaluation of Nematicidal Activity of Fluensulfone against Non-Target Free-Living Nematodes under Field Conditions. *Agronomy*, 9(12), 853.
- Kerkeni, A., Horrigue-Raouani, N., & Khedher, M. B. (2007).** Effet suppressif de cinq extraits de compost vis-à-vis du nématode à galles *Meloidogyne incognita*. *Nematologia Mediterranea*, 35: 15-21.
- Kerlan, M.-C., Montarry, J., Dantec, J.-P., Renault, L., Rouaux, C., Cointe, R. L., & Fournet, S. (2012).** Durabilite et strategie de selection pour la resistance aux Nematodes à kyste chez la pomme de terre. *Le sélectionneur français*, 63, 63-72.
- Kirkegaard, J. (2009).** Biofumigation for plant disease control– from the fundamentals to the farming system. In : **Walters, D.** (Éd.), *Disease Control in Crops : Biological and Environmentally Friendly Approaches* (p.172-195). Wiley-Blackwell. USA.
- Kokalis-Burelle, N. & Rodríguez-Kábana, R. (1994).** Changes in populations of soil microorganisms, nematodes, enzyme activity associated with application of powdered pine bark. *Plant and Soil*, 162 (2), 169-175.
- Kooliyottil, R., Dandurand, L.-M., Govindan, B. N., & R. Knudsen, G. (2016).** Microscopy method to compare Cyst nematode infection of different plant species. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 07(6), 311-318.

- Kooliyottil, R., Dandurand, L.-M., Kuhl, J. C., Caplan, A., Xiao, F., Mimee, B., & Lafond-Lapalme, J. (2019).** Transcriptome analysis of *Globodera pallida* from the susceptible host *Solanum tuberosum* or the resistant plant *Solanum sisymbriifolium*. *Scientific Reports*, 9(1), 13256.
- Kühn, J. (1881).** Das Luzernälehen (Tylevchus Havensternii). *Deutsche landw Press*, 8, p.32.  
[En ligne],  
[https://books.google.dz/books?hl=fr&lr=&id=KfpGAQAAMAAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=K%C3%BChn+\(1881&ots=V-DyC8gzdI&sig=WwLPm\\_PyLIfYid\\_b2zRaEF4y6cs&redir\\_esc=y#v=onepage&q=K%C3%BChn%20\(1881&f=false](https://books.google.dz/books?hl=fr&lr=&id=KfpGAQAAMAAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=K%C3%BChn+(1881&ots=V-DyC8gzdI&sig=WwLPm_PyLIfYid_b2zRaEF4y6cs&redir_esc=y#v=onepage&q=K%C3%BChn%20(1881&f=false)
- Lazarovits, G., Tenuta, M., & Conn, K. L. (2001).** Organic amendments as a disease control strategy for soil borne diseases of high-value agricultural crops. *Australasian Plant Pathology*, 30: 111-117.
- Lazzeri, L., Tacconi, R., & Palmieri, S. (1993).** *In vitro* activity of some glucosinolates and their reaction products toward a population of the nematode *Heterodera schachtii*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 41(5), 825-829.
- Lazzeri, L., Leoni, O., & Manici, L. M. (2004a).** Biocidal plant dried pellets for biofumigation. *Industrial Crops and Products*, 20(1), 59-65.
- Lettice, E. P., & Jones, P. W. (2015).** Evaluation of rhizobacterial colonisation and the ability to induce *Globodera pallida* hatch. *Nematology*, 17(2), 203-212.
- Lord, J. S., Lazzeri, L., Atkinson, H. J., & Urwin, P. E. (2011).** Biofumigation for Control of Pale Potato Cyst Nematodes : Activity of Brassica Leaf Extracts and Green Manures on *Globodera pallida* *in vitro* and in Soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(14), 7882-7890.
- Luangsa-ard, J., Houbraken, J., van Doorn, T., Hong, S.-B., Borman, A. M., Hywel-Jones, N. L., & Samson, R. A. (2011).** *Purpureocillium*, a new genus for the medically important *Paecilomyces lilacinus* : *Purpureocillium*, a new fungal genus for *P. lilacinus*. *FEMS Microbiology Letters*, 321(2), 141-149.

- M.A.D.R., 2021** – statistiques agricoles : superficies et productions (serie B-2019). *MADR* (éd). Alger, 87 p.
- Mahran, A., Turner, S., Martin, T., Yu, Q., Miller, S., & Sun, F. (2010).** The Golden Potato Cyst Nematode *Globodera rostochiensis* Pathotype Ro1 in the Saint-Amable Regulated Area in Quebec, Canada. *Plant Disease*, 94(12), 1510-1510.
- Mai, W. F. (1977).** Worldwide Distribution of Potato-Cyst Nematodes and Their Importance in Crop Production. *Journal of Nematology*, 9 (1), 5.
- Maneva, S., & Trifonova, Z. (2015).** *Globodera rostochiensis* population density effect on potato growth and yield. Regression models estimation. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 21 (4), 815-821.
- Maneva, S., & Trifonova, Z. (2015).** *Globodera rostochiensis* population density effect on potato growth and yield. Regression models estimation. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 21 (4), 815-821.
- Mani, A., Prakash, K. S. & Zidgali, T. A. (1993).** Comparative effects of soil solarization and nematicides of three nematode species infecting potato. *Current Nematology*, 4 (1), 65-70.
- Manorama, K., Somasekhar, N., & Umamaheswari, R. (2016).** Integrated potato cyst nematode (*Globodera sp*) management strategies for south Indian hills. *Indian Journal of Plant Protection*, 44 (1), 132-140.
- Martin, N., & Müller, C. (2007).** Induction of plant responses by a sequestering insect : Relationship of glucosinolate concentration and myrosinase activity. *Basic and Applied Ecology*, 8(1), 13-25.
- Matthiessen, J. N., & Shackleton, M. A. (2005).** Biofumigation : Environmental impacts on the biological activity of diverse pure and plant-derived isothiocyanates. *Pest Management Science*, 61(11), 1043-1051.
- McSorley, R. & Gallaher, R.N. (1995).** Effect of yard waste compost on plant parasitic nematode densities in vegetable crops. *Journal of Nematology*. 27(4S), 545-549.

- Mertz, F. P., & Yao, R. C. (1990).** *Saccharopolyspora spinosa* sp. Nov. Isolated from Soil Collected in a Sugar Mill Rum Still. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 40(1), 34-39.
- Meyer, A., et Neide, E. (1904).** Description botanique de quelques bactéries sporulantes. In : **Neide, E.** Description botanique de quelques bactéries sporulantes. *Bulletin central*, 12 (p. 337-352) Bactériol. Cd. sur les parasites. Crises infectueuses. Hyg. Abt. II.
- Mezerket, A. (2018).** Bioécologie des nématodes dorés de la pomme de terre du genre *Globodera* dans quelques régions de l'Algérie. Essais de mise au point de luttés alternatives à la lutte chimique. Thèse de doctorat en sciences agronomiques, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, El-Harrach, 211 p.
- Mezerket, A., Hammache, M., Cantalapiedra-Navarrete, C., Castillo, P., & Palomares-Rius, J. E. (2018).** Prevalence, identification, and molecular variability of potato cyst nematodes in Algeria. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 20, 1293-1305.
- Mhatre, P. H., Divya, K.L., Venkatasalam, E.P., Santosh, W., Aarti, B. & Jagadeesh, P. (2022).** Management of potato cyst nematodes with special focus on biological control and trap cropping strategies. *Pest Management Science*, 78(9), 3746- 3759.
- Migula, W. (1895).** Schizomycetes (Bacteria, Bacterien). In: Engler, A. and Prantl, K., *Die Natürlichen Pflanzenfamilien*. Teil 1, Abt. Ia. 44.
- Milczarek, D. (2012).** A Multiplex PCR Method of Detecting Markers Linked to Genes Conferring Resistance to *Globodera rostochiensis*. *American Journal of Potato Research*, 89, 169–171.
- Mimee, B., Dauphinais, N. & Bélair, G. (2015).** Life Cycle of the Golden Cyst Nematode, *Globodera rostochiensis*, in Quebec, Canada. *Journal of Nematology* 47(4):290–295.
- Minnis, S. T., Haydock, P. P. J., Ibrahim, S. K., Grove, I. G., Evans, K., & Russell, M. D. (2002).** Potato cyst nematodes in England and Wales—Occurrence and distribution. *Annals of Applied Biology*, 140(2), 187-195.
- Mokrini, F., Janati, S., Houari, A., Essarioui, A., Bouharroud, R., & Mimouni, A. (2018).** Management of plant parasitic nematodes by means of organic amendment. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 6 (3), 337-344.

- Motisi, N., Poggi, S., Filipe, J. A. N., Lucas, P., Doré, T., Montfort, F., Gilligan, C. A., & Bailey, D. J. (2013).** Epidemiological analysis of the effects of biofumigation for biological control of root rot in sugar beet: Effects of biofumigation using epidemiological modelling. *Plant Pathology*, 62(1), 69-78.
- Moxnes, J. F., & Hausken, K. (2007).** The population dynamics of potato cyst nematodes. *Ecological Modelling*, 207(2-4), 339-348.
- Mugniéry, D. (1978).** Vitesse de développement en fonction de la température de *Globodera rostochiensis* et *G. pallida* (Nematoda: Heteroderidae). *Revue de Nématologie*, 1(1), 3-12.
- Mugniéry, D., & Oger, M. (1982).** Diversités régionales d'application de lutte intégrée en culture de pomme de terre en fonction de la variabilité des populations de nématodes à kystes. *Agronomie*, 2(7), 629-640.
- Mugniery, D., & Balandras, C. (1984).** Examen des populations d'éradication du nématode à kystes *Globodera pallida* Stone. *Agronomie*, 4(8), 733 – 778.
- Mugniéry, D., Fouville, D., Dantec, J.-P., Pellé, R., Rousselle-Bourgeois, F., Ellissèche, D. (2001).** Résistance à *Globodera pallida* Pa2/3 chez *Solanum sparsipilum*. *Nematology*, 3(7), 619-626.
- Mugniéry, D., & Phillips, M. S. (2007).** The Nematode Parasites of Potato. In : Elsevier (Éds.), *Potato Biology and Biotechnology*, 569-594.
- Mulvey, R. H., & Stone, A. R. (1976).** Description of *Punctodera matadorensis* n.gen., n.sp. (Nematoda: Heteroderidae) from Saskatchewan with lists of species and generic diagnoses of *Globodera* (n.rank), *Heterodera*, and *Sarisodera*. *Canadian Journal of Zoology*, 54(5), 772-785.
- Nebih Hadj-Sadok, D. & Charif, F. (2019).** Toxicité des extraits de plantes sur les larves (L2) du nématode à kystes de la pomme terre *Globodera spp.* (Nematoda heteroderidae). *Revue Agrobiologia*, 9(1), 1234 -1241.
- Neubauer, C., Heitmann, B., & Müller, C. (2014).** Biofumigation potential of Brassicaceae cultivars to *Verticillium dahliae*. *European Journal of Plant Pathology*, 140(2), 341-352.

- Ngala, B. M., Haydock, P. P., Woods, S., & Back, M. A. (2014).** Biofumigation with *Brassica juncea*, *Raphanus sativus* and *Eruca sativa* for the management of field populations of the potato cyst nematode *Globodera pallida*. *Pest Management Science*, 71(5), 759-769.
- Ngala, B. M., Woods, S. R., & Back, M. A. (2015a).** *In vitro* assessment of the effects of *Brassica juncea* and *Raphanus sativus* leaf and root extracts on the viability of *Globodera pallida* encysted eggs. *Nematology*, 17(5), 543-556.
- Ngala, B. M., Woods, S. R., & Back, M. A. (2015b).** Sinigrin degradation and *G. pallida* suppression in soil cultivated with brassicas under controlled environmental conditions. *Applied Soil Ecology*, 95, 9-14.
- Nicola, De. G. R., D'Avino, L., Curto, G., Malaguti, L., Ugolini, L., Cinti, S., Patalano, G., & Lazzeri, L. (2013).** A new biobased liquid formulation with biofumigant and fertilising properties for drip irrigation distribution. *Industrial Crops and Products*, 42, 113-118.
- Norshie, P. M., Grove, I. G., & Back, M. A. (2016).** Field evaluation of the nematicide fluensulfone for control of the potato cyst nematode *Globodera pallida*. *Pest Management Science*, 72(10), 2001-2007.
- Nwanguama, E. I., & Fawole, B. (2004).** Efficacy of organic soil amendment on the populations of *Meloidogyne incognita* on okra in South-Western Nigeria. *Nigerian Journal of Horticultural Science*, 9: 89-95.
- Ochola, J., Coyne, D., Cortada, L., Haukeland, S., Ng'ang'a, M., Hassanali, A., Opperman, C., & Torto, B. (2021).** Cyst nematode bio-communication with plants: Implications for novel management approaches. *Pest Management Science*, 77(3), 1150-1159.
- Odeyemi, I.S., Afolami, S.O., Adigun, J.A., (2013).** Plant parasitic nematode relative abundance and population suppression under *Chromolaena odorata* (Asteraceae) fallow. *International Journal of Pest Management*. 59, 79–88.
- OEPP/EPPO. (1978).** Data sheets on quarantine organisms No. 124, *Globodera pallida*. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin, 8(2), 128–132.

- OEPP/EPPO. (1981).** Data sheets on quarantine organisms No. 125, *Globodera rostochiensis*. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin, 11(1), 212–215.
- OEPP/EPPO. (2022).** Distribution de *Globodera pallida* et *Globodera rostochiensis* dans le monde, [En ligne]. OEPP/EPPO. URL: <https://gd.eppo.int/taxon/HETDPA/distribution>
- Ojaghian, M. R., Jiang, H., Xie, G.-L., Cui, Z.-Q., Zhang, J., & Li, B. (2012).** *In vitro* Biofumigation of Brassica Tissues Against Potato Stem Rot Caused by *Sclerotinia sclerotiorum*. *The Plant Pathology Journal*, 28(2), 185-190.
- Oka, Y. (2010).** Mechanisms of nematode suppression by organic soil amendments - A review. *Applied Soil Ecology*, 44(2), 101-115.
- Olsenand, O.A. & Mulvey, R.H. (1962).** The discovery of golden nematode in Newfoundland. *Canadian Plant Disease Survey*. 42-253.
- ONU (2022).** Population: Un élan démographique. Prévisions et statistiques démographiques des Nations Unies. [En ligne] <https://www.un.org/fr/global-issues/population>.
- Orchard, W. R. (1965).** Occurrence of the golden nematode on Vancouver Island, British Columbia. *Canadian Plant Disease Survey*. 45 - 89.
- Ouassou, M., Mukhaimar, M., El Amrani, A., Kroymann, J., & Chauveau, O. (2019).** Biosynthèse des glucosinolates indoliques et rôle écologique de leurs modifications secondaires. *Comptes Rendus Biologies*, 342(3-4), 58-80.
- Padilla, G., Cartea, M. E., Velasco, P., de Haro, A., & Ordás, A. (2007).** Variation of glucosinolates in vegetable crops of *Brassica rapa*. *Phytochemistry*, 68(4), 536-545.
- Pan, X., Earlywine, D. T., Smeda, R. J., Teuton, T. C., English, J. T., Sams, C. E., & Xiong, X. (2017).** Effect of Oriental Mustard (*Brassica juncea*) Seed Meal for Control of Dollar Spot on Creeping Bentgrass (*Agrostis stolonifera*) Turf. *The International Turfgrass Society Research Journal (ITSRJ)*, 13(1), 166.
- Perniola, O. S., Staltari, S., Chorzempa, S. E., & Gassó, M. M. A. (2014).** Biological control of *Fusarium graminearum*: use of *Trichoderma* spp. And biofumigation with

- aerial part of *Brassica juncea*. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 46(2), 45-56.
- Periola, O. S., Chorzempa, S. E., Staltari, S., & Molina, C. (2016).** Biofumigación *in vitro* con *Brassica juncea* y *Sinapis alba*. Inhibición de la germinación y del crecimiento de plántulas de malezas. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 115 (1), 91-98.
- Perniola, O. S., Chorzempa, S. E., Staltari, S., & Molina, M. del C. (2019).** Biofumigation with *Brassica juncea*: effect on weeds. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 118(1), 25-35.
- Perry, R. N. (1989).** Dormancy and hatching of nematode eggs. *Parasitology Today*, 5(12), 377-383.
- Philis, J. (1980).** Life history of the potato cyst-nematode *Globodera rostochiensis* in Cyprus. *Nematologica*, 26, 295-301.
- Pontes, N. C., Yamada, J. K., Fujinawa, M. F., Dhingra, O. D., & de Oliveira, J. R. (2019).** Soil fumigation with mustard essential oil to control bacterial wilt in tomato. *European Journal of Plant Pathology*, 155(2), 435-444.
- Price, J. A., Coyne, D., Blok, V. C., & Jones, J. T. (2021).** Potato cyst nematodes *Globodera rostochiensis* and *G. Pallida*. *Molecular Plant Pathology*, 22(5), 495-507.
- Qu, D. (2022).** Doubling global potato production in 10 years is possible : FAO Director-General keynote speech. 11<sup>th</sup> World Potato Congress, Dublin, Irland, 30 May – 2 June 2022.[En ligne] <https://www.fao.org/newsroom/detail/doubling-global-potato-production-in-10-years-is-possible/en>.
- Racke, J., & Sikora, R. A. (1992).** Isolation, formulation and antagonistic activity of rhizobacteria toward the potato cyst nematode *Globodera pallida*. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(6), 521-526.
- Raski, D. J. (1950).** The life history and morphology of the sugar-beet nematode, *Heterodera schachtii* Schmidt. *Phytopathology*, 40 (2), 135-152.

- Rawsthorne, D., & Brodie, B. B. (1986).** Relationship between Root Growth of Potato, Root Diffusate Production, and Hatching of *Globodera rostochiensis*. *Journal of Nematology*, 18(3), 379-384.
- Reau, R., Bodet, J.-M., Bordes, J.-P., Dore, T., Ennaifar, S., Moussart, A., Nicolardot, B., Pellerin, S., Plenchette, C., Quinsac, A., Sausse, C., Seguin, B., & Tivoli, B. (2005b.).** Effets allélopathiques des Brassicacées via leurs actions sur les agents pathogènes telluriques et les mycorhizes : Analyse bibliographique. Partie II. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 12(4), 314-319.
- Renčo, M. (2007).** Comparison of the life cycle of potato cyst nematode (*Globodera rostochiensis*) pathotype Ro1 on selected potato cultivars. *Biologia*, 62(2), 195-200.
- Renčo, M., D'Addabbo, T., Sasanelli, N., & Papajová, I. (2007).** The effect of five composts of different origin on the survival and reproduction of *Globodera rostochiensis*. *Nematology*, 9(4), 537-543.
- Renčo, M., Sasanelli, N., & Šalamún, P. (2009).** The effect of two compost soil mendments, based on municipal green and penicillin production wastes, on plant parasitic nematodes. *Helminthologia*, 46(3), 190-197.
- Renčo, M., Sasanelli, N., & Kováčik, P. (2011).** The effect of soil compost treatments on potato cyst nematodes *Globodera rostochiensis* and *Globodera pallida*. *Helminthologia*, 48(3), 184-194.
- Renčo, M., Sasanelli, N., Papajová, I., & Maistrello, L. (2012).** Nematicidal effect of chestnut tannin solutions on the potato cyst nematode *Globodera rostochiensis* (Woll.) Barhens. *Helminthologia*, 49(2): 108-114.
- Renčo, M., & Kováčik, P. (2015).** Assessment of the nematicidal potential of vermicompost, vermicompost tea, and urea application on the potato-cyst nematodes *Globodera rostochiensis* and *Globodera pallida*. *Journal of Plant Protection Research*, 55(2), 187-192.
- Renčo, M., Čerevková, A., Homolová, Z., & Gömöryová, E. (2015).** Long-term effects on soil nematode community structure in spruce forests of removing or not removing fallen trees after a windstorm. *Forest Ecology and Management*, 356, 243-252.

- Renčo, M., Kováčik, P. & Atungwu, J.J. (2016).** Reduction of a Potato Cyst Nematode by Organic Soil Amendments at Different Initial Nematode Density. *Journal of Organic Agriculture and Environment*, 4(1), 98 – 109.
- Rice, S. L., Leadbeater, B. S. C. & Stone, A. R. (1985).** Changes in cell structure in roots of resistant potatoes parasitized by potato cyst-nematodes. I. Potatoes with resistance gene *H<sub>1</sub>* derived from *Solanum tuberosum* ssp. *andigena*. *Physiological Plant Pathology*, 27(2), 219-234.
- Roncato, S. C., Stangarlin, J. R., Kuhn, O. J., Gonçalves Júnior, A. C., Dilley, O. D. F., Gonçalves, E. D. V., Rissato, B. B., Broetto, L., & Faria, V. de O. (2018).** Control of *Meloidogyne incognita* in tomato by crambe extract using different application forms. *Summa Phytopathologica*, 44(3), 261-266.
- Ros, C., Sánchez, F., Martínez, V., Lacasa, C.M., Hernández, A., Torres, J., Guerrero, M.M., Lacasa, A. (2016).** Brassica crops for biosolarisation reduces the populations of *Meloidogyne incognita* in pepper greenhouses in Southeast of Spain. *Informacion Tecnica Economica Agraria*, 112(2), 109-126.
- Ross, R. (1986).** The Pathogenesis of Atherosclerosis—An Update. *New England Journal of Medicine*, 314(8), 488-500.
- Rousselle-Bourgeois, F. & Mugniéry, D. (1995).** Screening tuber-bearing *Solanum* spp. for resistance to *Globodera rostochiensis* Ro1. Woll. And *G. pallida* Pa2/3 stone. *Potato Research*, 38, 241–249.
- Rubayet, M. T., Bhuiyan, M. K. A., Jannat, R., Masum, M. M. I., & Hossain, M. M. (2018).** Effect of biofumigation and soil solarization on stem canker and black scurf diseases of potato (*Solanum tuberosum* L.) caused by *Rhizoctonia solani* isolate PR2. *Advances in Agricultural Science*, 6 (3), 33-48.
- Ryan, A., & Jones, P. (2004).** The effect of mycorrhization of potato roots on the hatching chemicals active towards the potato cyst nematodes, *Globodera pallida* and *G. rostochiensis*. *Nematology*, 6(3), 335-342.

- Ryan, A. & Devine, K. J. (2005).** Comparison of the in-soil hatching responses of *Globodera rostochiensis* and *G. pallida* in the presence and absence of the host potato crop cv. British Queen. *Nematology*, 1-11.
- Ryan, N. A., Duffy, E. M., Cassells, A. C., & Jones, P. W. (2000).** The effect of mycorrhizal fungi on the hatch of potato cyst nematodes. *Applied Soil Ecology*, 15(2), 233-240.
- Sabeh, M. (2019).** Étude des déterminants génétiques de la pathogénicité chez les nématodes du genre *Globodera*. Thèse de doctorat, université de Montréal, Canada, 157 p.
- Santos, C. A. dos, Abboud, A. C. de S., & Carmo, M. G. F. do. (2021).** Biofumigation with species of the Brassicaceae family : A review. *Ciência Rural*, 51(1), e20200440.
- Sarwar, M. & Kirkegaard, J.A. (1998).** Biofumigation potential of brassicas: II. Effect of environment and ontogeny on glucosinolate production and implications for screening. *Plant and Soil*, 201(1), 91-101.
- Sasanelli, N., et Di Vito, M. (1991).** The effect of *Tagetes spp.* extracts on the hatching of Italian populations of *Globodera rostochiensis*. *Nematol. Med.*, 19, 135-137.
- Scotto La Massèse, C. (1961).** Aperçu sur les problèmes posés par les nématodes phytoparasites en Algérie. pp. 83-109. In: Les Nématodes, Collection Phytosanitaire. *Journées d'Etudes et d'Information*. C.N.R.A., Versailles (France), 10-17 nov.
- Seinhorst, J. W. (1965).** The relation between nematode density and damage to plants. *Nematologica*, 11(1), 137-154.
- Seinhorst, J. W. (1982).** The Distribution of Cysts of *Globodera Rostochiensis* in Small Plots and the Resulting Sampling Errors. *Nematologica*, 28, 285-297.
- Seinhorst, J. W. (1982).** The Relationship in Field Experiments Between Population Density of *Globodera Rostochiensis* Before Planting Potatoes and Yield of Potato Tubers. *Nematologica*, 28, 277-284.
- Sellami, S., & Zemmouri, H. (2001).** Effect of *Tagetes erecta* on the mortality, hatching and development of *Meloidogyne incognita* (Kofoid and White) Chitwood. *Acta Phytopathologica and Entomologica Hungarica*, 36 (3/4), 383-387.

- Sellami, S., & Mezerket, A. (2006).** Nematicidal activity of some plant leaf extracts against *Meloidogyne incognita*. *Abstract of 9th Arab Congress of plant protection*, Damascus Syrie, 19-23 Nov.
- Sellami, S., Abu-Gharbieh, W.I., Abu-Laid, H.Z. & Al-Yahya, F.A. (2010).** Development of Phytonematology in the Arab Countries. In: Abu-Gharbieh, W.I., Al Hazmi, A.S., Stephan, Z.A., Dawabah, A.A., *Eds, Plant Nematology in the Arab Countries, Ed 1. Dar Wael for Publishing, Amman, Jordan, 1*, 141–188.
- Sellami, S., Mezerket, A., & Dahmne, T. (2010).** Activité nematicide de quelques huiles essentielles contre *Meloidogyne incognita*. *Nematologia Mediterranea*, 38, 195-201.
- Sellami, S., Reguieg, L. & Dahmane, T. (2013).** Effectiveness of essential oils of *Mentha spicata* (Lamiaceae) and *Foeniculum vulgare* (Apiaceae) against *Meloidogyne incognita* (Nematoda: Meloidogynidae). *Bulletin de la Société zoologique de France*, 138 (1/4): 139-149.
- Sellami, S., Benttoui, N., Berrahia, S., & Boureghda, H. (2017).** Evaluation of antagonistic activity of *Trichoderma* spp. Against *Meloidogyne incognita*. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica*, 52(2), 177-184.
- Serra, B., Rosa, E., Iori, R., Barillari, J., Cardoso, A., Abreu, C., & Rollin, P. (2002).** *In vitro* activity of 2-phenylethyl glucosinolate, and its hydrolysis derivatives on the root-knot nematode *Globodera rostochiensis* (Woll.). *Scientia Horticulturae*, 92(1), 75-81.
- Shaaya, E., & Kostyukovsky, M. (2009).** The Potential of Biofumigants as Alternatives to Methyl Bromide for the Control of Pest Infestation in Grain and Dry Food Products. In : **Kirakosyan, A. & Kaufman, P. B. (Éd.)**, *Recent Advances in Plant Biotechnology* (p. 389-403). Springer US,
- Siddiqui, S., Siddiqui, Z. A., & Ahmad, I. (2005).** Evaluation of fluorescent Pseudomonads and Bacillus isolates for the biocontrol of a wilt disease complex of pigeonpea. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 21(5), 729-732.
- Siddiqui, Z. A. (2004).** Effect of plant growth promoting bacteria and composted organic fertilizers on the reproduction of *Meloidogyne incognita* and tomato growth. *Bioresource Technology*, 95: 223-227.

- Singh, S. K., Hodda, M., & Ash, G. J. (2013).** Plant-parasitic nematodes of potential phytosanitary importance, their main hosts and reported yield losses. *EPPO Bulletin*, 43(2), 334-374.
- Smith, E. F., & Townsend, C. O. (1907).** A Plant-Tumor of Bacterial Origin. *Science*, 25(643), 671-673.
- Stone, A. R. (1972).** *Heterodera pallida* N. sp. (Nematoda: Heteroderidae), a second species of potato cyst nematode. *Nematologica*, 18, 591-606.
- Stone, A. R., Thompson, P. R., Hopper, B. E. (1977).** *Globodera pallida* present in Newfoundland. *Plant disease reporter*, 61. 590-591.
- Sysoeva, M. I., Matveeva, E. M., Lavrova, V. V. & Sherudilo, E. G. (2012).** Potato plant responses to temperature drop and phytonematode infestation under continuous lighting. *Acta Horticulturae*, 956, 621-625.
- Thiéry, M., Mugniéry, D., Fouville, D., & Schots, A. (1996).** Hybridations naturelles entre *Globodera rostochiensis* et *G. pallida*. *Fundamental and Applied Nematology*, 19 (5), 437-442.
- Tierens, K. F. M.-J., Thomma, B. P. H. J., Brouwer, M., Schmidt, J., Kistner, K., Porzel, A., Mauch-Mani, B., Cammue, B. P. A., & Broekaert, W. F. (2001).** Study of the Role of Antimicrobial Glucosinolate-Derived Isothiocyanates in Resistance of Arabidopsis to Microbial Pathogens. *Plant Physiology*, 125(4), 1688-1699.
- Tim, L., Pearson, D., & Jaffee, B. (2001).** Nematode trapping fungi in conventionally and organically managed corn-tomato rotations. *Mycologia*, 93: 25-29.
- Tirchi, N., Troccoli, A., Fanelli, E., Mokabli, A., Mouhouche, F., & De Luca, F. (2016).** Morphological and molecular identification of potato and cereal cyst nematode isolates from Algeria and their phylogenetic relationships with other populations from distant theirgeographical areas. *European Journal of Plant Pathology*, 146(4), 861-880.
- Tirchi, N., Troccoli, A., Fanelli, E., Mokabli, A., Mouhouche, F., & De Luca, F. (2016).** Morphological and molecular identification of potato and cereal cyst nematode isolates

from Algeria and their phylogenetic relationships with other populations from distant theirgeographical areas. *European Journal of Plant Pathology*, 146(4), 861-880.

**Tobin, J. D., Haydock, P. P. J., Hare, M. C., Woods, S. R., & Crump, D. H. (2008).** Effect of the fungus *Pochonia chlamydosporia* and *fosthiazate* on the multiplication rate of potato cyst nematodes (*Globodera pallida* and *G. rostochiensis*) in potato crops grown under UK field conditions. *Biological Control*, 46(2), 194-201.

**Tortosa M., Cartea M. E., Rodríguez M. V., & Velasco P., (2018).** Unraveling the metabolic response of *Brassica oleracea* exposed to *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. *J Sci Food Agric*. 98(10):3675-3683

**Treub, M. (1885).** Onderzoekingen over sereh-ziek suikerriet gedaan in's Lands Plantentuin te Buitenzorg. *Meded. Pltuin. Batavia*, 2, 1-39.

**Trevisan, V. (1889).** I generi e le specie delle Batteriacee. *Zanaboni Gabuzzi Milan*, 1–35.

**Trifonova, Z. (1995).** Use of some systemic nematicides for controlling potato cyst nematode *Globodera rostochiensis*. *Journal of Agricultural Sciences, Belgrade*, 1, 433-438.

**Trifonova, Z. (2000).** Distribution of *Globodera rostochiensis* Woll. 1923 in Bulgaria. *Macedonian Agricultural Review*, 47 (1/2), 63-64.

**Trifonova, Z. (2010).** Studies on the efficacy of some bacteria and fungi for control of *Globodera restochiensis*. *Journal of Agricultural Sciences, Belgrade*, 55(1), 37-44.

**Trifonova, Z., & Atanasov, A. (2011).** Control of potato cyst nematode *Globodera rostochiensis* with some plant extracts and neem products. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 17 (5), 623-627.

**Trifonova, Z., Tsvetkov, I., Bogatzevska, N., & Batchvarova, R. (2014).** Efficiency of *Pseudomonas* spp. For BioControl of the Potato Cyst Nematode *Globodera rostochiensis* (Woll.). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 20 (3) 2014, 666-669.

**Trudgill, D. L. (1985).** Potato cyst nematodes: a critical review of the current pathotyping scheme. *EPPO Bulletin*, 15(3), 273–279.

- Trudgill, D. L., Phillips, M. S., Hackett, C. A. (1996).** The Basis of Predictive Modelling for Estimating Yield Loss and Planning Potato Cyst Nematode Management. *Pesticide Science*, 47(1), 89 – 94.
- Trudgill, D. L., Phillips, M. S., & Elliott, M. J. (2014).** Dynamics and management of the white potato cyst nematode *Globodera pallida* in commercial potato crops : Dynamics and management of the white potato cyst nematode. *Annals of Applied Biology*, 164(1), 18-34.
- Tsrur (Lahkim), L., Lebiush, S., Meshulam, M., Erlich, O., Hazanovsky, M., Aharon, M., Matan, E., Tregerman, M., & Gamliel, A. (2007).** Biofumigation for the control of soilborne diseases. *Acta Horticulturae*, 747, 389-394.
- Turner, S. J. (1996).** Population decline of potato cyst nematodes (*Globodera rostochiensis*, *G. pallida*) in field soils in Northern Ireland. *Annals of Applied Biology*, 129(2), 315-322.
- Turner, S. J., and Evans, K. (1998).** The origins, global distribution and biology of potato cyst nematodes (*Globodera rostochiensis* (Woll.) and *Globodera pallida* Stone In : **Marks R.J. and Brodie B.B.** (Éd.). *Potato Cyst Nematodes : Biology, distribution and control* (p. 7-26). CAB International, Wallingford, UK.
- Turner, S. J., Fleming, C. C., Moreland, B. P., & Martin, T. J. G. (2009).** Variation in hatch among pathotypes of the potato cyst nematodes, *Globodera rostochiensis* and *G. pallida*, in response to potato root diffusate from *Solanum* spp. I. Preliminary assessments to establish optimal testing conditions. *Nematology*, 11(5), 749-756.
- Viaene, N., Coyne, D. L., & Davies, K. G. (2013).** Biological and cultural management. In : **Perry R. N. & Moens M.** (Éd.), *Plant nematology* (383-410). CABI, Wallingford, UK.
- Vieira dos Santos, M. C., Curtis, R. H. C., & Abrantes, I. (2013).** Effect of plant elicitors on the reproduction of the root-knot nematode *Meloidogyne chitwoodi* on susceptible hosts. *European Journal of Plant Pathology*, 136(1), 193-202.
- Vieira, P., Danchin, E.G.J., Neveu, C., Crozat, C., Jaubert, S., Hussey, R.S., Engler, G., Abad, P., de Almeida Engler, J., Castagnone-Sereno, P. & Rosso, M.-N. (2011).** The plant apoplasm is an important recipient compartment for nematode secreted proteins. *Journal of Experimental Botany*, 62, 1241–1253.

- Wang, K.-H., McSorley, R., & Kokalis-Burelle, N. (2006).** Effects of Cover Cropping, Solarization, and Soil Fumigation on Nematode Communities. *Plant and Soil*, 286(1-2), 229-243.
- Warmington, R., & Clarkson, J. P. (2016).** Volatiles from biofumigant plants have a direct effect on carpogenic germination of sclerotia and mycelial growth of *Sclerotinia sclerotiorum*. *Plant and Soil*, 401(1-2), 213-229.
- Wei, F., Passey, T., & Xu, X. (2016).** Effects of individual and combined use of biofumigation-derived products on the viability of *Verticillium dahliae* microsclerotia in soil. *Crop Protection*, 79, 170-176.
- Were, H. K., Kabira, J. N., Kinyua, Z. M., Olubayo, F. M., Karinga, J. K., Aura, J., Lees, A. K., Cowan, G. H., & Torrance, L. (2013).** Occurrence and Distribution of Potato Pests and Diseases in Kenya. *Potato Research*, 56(4), 325-342.
- Wesemael, W., Viaene, N., & Moens, M. (2011).** Root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) in Europe. *Nematology*, 13(1), 3-16.
- Whitehead, A. G. (1997).** Plant nematode control. *CAB International*. Wallingford, UK, 384 p.
- Whitehead, A. G. & Turner, S.J. (1998).** Management and regulatory control strategies for potato cyst nematodes (*Globodera rostochiensis* and *Globodera pallida*). In : **Marks R.J. and Brodie B.B.** (Éd.). *Potato Cyst Nematodes : Biology, distribution and control* (p. 135-152). CAB International, Wallingford, UK.
- Whitehead, D., Edwards, W. R. N., & Jarvis, P. G. (1984).** Conducting sapwood area, foliage area, and permeability in mature trees of *Picea sitchensis* and *Pinus contorta*. *Canadian Journal of Forest Research*, 14(6), 940-947.
- Wollenweber, H. W. (1923).** Krankheiten und Beschädigungen der kartoffel. Arb. d. Forschungsinst f. *Kartoffelbau*, 7, 1- 56.
- Wood, C., Kenyon, D. M., & Cooper, J. M. (2016).** Investigating the effect of isothiocyanates on *Globodera pallida* hatch under *in vitro* and *in vivo* conditions.

In: **Heilbronn, T. D.** (Éd.), *The Dundee Conference: Crop Protection in Northern Britain* (239-244). Dundee, UK.

**Wood, C., Kenyon, D. M., & Cooper, J. M. (2017).** Allyl isothiocyanate shows promise as a naturally produced suppressant of the potato cyst nematode, *Globodera pallida*, in biofumigation systems. *Nematology*, *19*(4), 389-402.

**Wyss, U. (1992).** Observations on the parasitic behavior of *Heterodera schachtii* throughout its development inside roots. *Fundamental and Applied Nematology*, *15*, 75–89.

**Wyss, U., & Grundler, F. M. W. (1992).** Feeding behavior of sedentary plant parasitic nematodes. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, *98*(S2), 165-173.

**Yarou, B. B., Silvie, P., Komlan, F. A., Mensah, A., Alabi, T., Verheggen, F., & Francis, F. (2017).** Plantes pesticides et protection des cultures maraichères en Afrique de l'Ouest (synthèse bibliographique). *BASE*, 288-304.

**Zare, R. & W. Gams (2001).** A revision of *Verticillium* section *Prostrata*. IV. The genera *Lecanicillium* and *Simplicillium* gen. Nov. *Nova Hedwigia*, *73*, 1-50.

**Zasada, I. A., & Ferris, H. (2003).** Sensitivity of *meloidogyne javanica* and *Tylenchulus semipenetrans* to isothiocyanates in laboratory assays. *Phytopathology*, *93*(6), 747-750.

**Zasada, I. A., & Ferris, H. (2004).** Nematode suppression with brassicaceous amendments : Application based upon glucosinolate profiles. *Soil Biology and Biochemistry*, *36*(7), 1017-1024.

**Zasada, I. A., Meyer, S. L. F., & Morra, M. J. (2009).** Brassicaceous Seed Meals as Soil Amendments to Suppress the Plant-parasitic Nematodes *Pratylenchus penetrans* and *Meloidogyne incognita*. *Journal of Nematology*, *41*(3), 221-227.

# **Annexes**

**Annexe 1** : Evolution de la production de pomme de terre et des superficies consacrées à sa culture en Algérie durant la période 2018 - 2022 (FAOSTAT, 2024).

<b>Année</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>
<b>Superficie (Ha)</b>	149 665	157 864	149 465	136 855	130 396
<b>Rendement (qx/ha)</b>	310,92	318,01	311,74	318,65	329,75
<b>Production (tonnes)</b>	4 653 322	5 020 249	4 659 482	4 360 880	4 299 816

**Annexe 2:** Liste des nématicides homologués en Algérie (extrait de l'index des produits phytosanitaires à usage agricole, Edition 2017)

NEMATICIDES											
Nom commercial	Matière Active	Concentration	Formulation	Déprédateur	Culture	Dose d'utilisation	D.A.R	Observation	N° d'homologation	Firme	Représentant
AGROALLIUM TERRA	EXTRAIT NATUREL D'AIL+ GLYCÉRINE VEGETALE+ COADJUVANTS TECHNOLOGIQUES	28 % + 69,9 % +2,1 %	EC	Nématodes	Concombre	En près plantation 15-30 L/HA	1	Respecter un délai de 3 jours entre le traitement et la transplantation au moment de l'application de la dose maximum, Garder l'emballage dans un endroit frais (T=6°C)	12E052E036	BIODURCAL SL	BUREAU D'ETUDE ET CONSULTING ET ASSISTANCE
						Immédiatement avant plantation ou lors de la transplantation postérieure 10-15 L/ha					
BASAMID	DAZOMET	98%	MG	Nématodes/champignon du sol	Cultures maraîchères/arboriculture fruitière /pomme de terre	500 kg/Ha			R 07 45 165	KANESHO SOIL TREATMENT	SOFAPRO
DACRON	DAZOMET	98%	GR	Nématodes	Toutes cultures	30 - 40 g/m²			16 56 134	VAPCO	SARL BPI-ENH DOUDAH
D-D 92	DICHLOROPROPENE + DICHLOROPROPANE	1113 G/L + 48 G/L	SC	Nématodes /ectoparasite /endoparasite du sol	Toutes cultures	150 - 550 L/Ha			R 07 45 168	KANESHO SOIL TREATMENT	SOFAPRO
FENOMEN	PHENAMIPHOS	240 G/L	EC	Nématodes du sol	Cultures maraîchères/ Arboriculture fruitière/ Pomme de terre	0,5 -1,2 L/Ha	30-45		08 46 143	AGRICHEM AUSTRALIA	ARD ALGERIE
NIMAPHOS 10G	ETHOPROPHOS	10%	GB	Nématodes du sol	Arbres Fruitiers/ vigne	30-50 kg/ha				RIVALE	ACI
					Cultures Légumières						
					Agrumes						
NEMATEX® 24 SL	OXAMYL	240 G/L	SL	Nématodes	Cultures maraîchères /Arbres fruitiers	0,25- 0,75 L/hl			16 56 135	MEDMAC JORDANIE	MEDMAC ALGERIE

NEMATICIDES											
Nom commercial	Matière Active	Concentration	Formulation	Déprédateur	Culture	Dose d'utilisation	D.A.R	Observation	N° d'homologation	Firme	Représentant
NOVIBIOTEC	Bacillus cereus (souche B99) + Bacillus sphaericus (souche C100B)	200x106 CFU/ml	Liquide	Nématodes	Tomate	50 à 100 L/ha		Poison pour le sang hémolytique	14 54 159	NBTA PRODUCTION SA-TUNISIE	ACI ALGERIE
OXAMATE 24 L	OXAMYL	240 G/L	EC	Nématodes du sol	Cultures maraichères/ Pomme de terre	750 ml/Ha			08 46 146	MOBIDCO	SARL GOLDENFIELD
RUGBY 10 G	CADUSAFOS	10%	GR	Nématodes	Cultures sous serres/ Pomme de terre	60 Kg/Ha	15		R 08 46 164	FMC	ALLIANCE CHIMIE ALGERIE SPA
SINCOGIN	ACIDES GRAS PALMIQUE, OLEIQUE, LINOLEIQUE, NUCLEIQUE, ADN, ARN + OE	0,56% + 99,44%	SL	Nématodes/agents pathogènes associés au sol	cultures maraichères (tomate, concombre, ail, courgette, poivron, piment, laitue, haricot, aubergine, oignon)/pomme de terre/ cultures sous serre/vigne/ Arbres fruitiers/ pépinières arboricoles/ pépinières maraichères/ palmier dattier	2 L/Ha			R 09 49 003	INC, AGRICULTURE SCIENCE	AGRICOM INTERNATIONAL
TELONE EC	1,3-DICHLORO-PROPEN	1132 G/L	EC	Nématodes	Cultures maraichères / Cucurbitacées	150 L/Ha			08 46 066	DOW AGROSCIENCE	ALLIANCE CHIMIE ALGERIE SPA
VETACUR	PHENAMIPHOS	10%	GR	Nématodes	Cultures maraichères	100 Kg /Ha					
					Pomme de terre	90- 100 Kg/Ha					
					Arboriculture fruitière	100 -200 Kg /Ha					

(DPVCT, 2017)

Extrait de la liste additive des nématicides de l'index des produits phytosanitaires à usage agricole, Edition 2021

Nom commercial	Matière Active	Concentration	Formulation	Déprédateurs	Cultures	Doses d'utilisation	D.A.R	Obs,	N° d'homologation
<b>NEMAZATE</b>	FOSTHIAZATE	10%	Micro granulé	Taupins	POMME DE TERRE	20 kg/ha		Mentionné sur l'étiquette : Toxique pour les organismes aquatiques, ne pas appliquer sur sol drainé	<b>20 59 258</b>
				Nématodes		30 kg/ha			
<b>OXAMATE 24 L</b>	OXAMYL	24%	EC	Nématodes du sol	Cultures maraîchères/ Pomme de terre	750 ml/Ha			<b>19 58 44</b>
<b>SINCOCIN</b>	ACIDES GRAS PALMIQUE, OLEIQUE, LINOLEIQUE, NUCLEIQUE, ADN, ARN + OE	0,56% + 99,44%	SL	Nématodes/agents pathogènes associés au sol	Cultures maraîchères (tomate, concombre, ail, courgette, poivron, piment, laitue, haricot, aubergine, oignon)/pomme de terre/cultures sous serre/vigne/Arbres fruitiers/pépinières arboricoles/pépinières maraîchères/ palmier dattier	2 L/Ha			<b>20 59 29</b>
<b>TELONE EC</b>	1,3-DICHLOROPROPEN	1132 G/L	EC	Nématodes	Cultures maraîchères /Cucurbitacées	150 L/Ha			<b>19 58 196</b>
<b>TELONE EC</b>	1,3-DICHLOROPROPEN	1132 G/L	EC	Nématodes	Cultures maraîchères /Cucurbitacées	150 L/Ha			
<b>VELUM® PRIME</b>	FLUOPYRAM	400 G/L	SC	Nématodes	Tomate / Pomme de terre	1,25 L/Ha	3		<b>17 56 116</b>

(DPVCT, 2021)



#### Annexe 4

**Tableau 1** : Phénols identifiés dans les feuilles du radis.

<b>Rt (min)</b>	<b>[M+H]<sup>+</sup> Mw (m/z)</b>	<b>Composés phénoliques</b>
<b>11,03</b>	355,0671	Caffeic acid / <b>Ferulic acid hexoside</b>
	385,0771	acid (Ferulic or Sinapic)
	274,1185	NI
<b>11,28</b>	355,0671	<b>Ferulic acid hexoside</b>
	385,077	Sinapic acid glucoside
<b>13,22</b>	591,1	Proanthocynidin / Caffeoyl
	295,0446	Caffeoylmalik acid
	133,0143	Malic acid
	179,378	Caffeic acid
<b>13,28</b>	591,0973	Proanthocynidin / Caffeoyl
<b>14,98</b>	593,1508	<b>Kaempferol-3 (ou 7)-O-rutinoside / k-3-Glucoside-7-Rhamnoside/ pelargonidin-3-sophoroside</b>
	603,1068	NI
<b>15,1</b>	279,0511	NI
	163,0396	p-coumaric acid
<b>15,39</b>	593,1	Kaempferol-3 (ou 7)-O-rutinoside / k-3-Glucoside-7-Rhamnoside
<b>15,58</b>	563,1405	kaempferol-3-rhamnosyl-(1->)-xyloside / Kaempferol-
<b>15,88</b>	309,0615	NI
	619,1303	NI
	193,05	Ferulic acid
	917,2342	Kaempferol-3-O-p-coumaroyl (coumaroyl)-sophoroside-7-O-glucoside / Isorhamnetin-O-hydroxyferuloyhexoside-O-malonylhexoside
<b>16,44</b>	887,2247	Isorhamnetin-O-sophoroside-O-malonylhexoside
	443,1094	NI

<b>16,62</b>	866,2376	NI
	577,1557	Kaemferol-3-7-glucoside / Proanthocynidin B1/Apigenin-7-O-rutinoside
	623,1614	NI
	1155,3121	NI
<b>17,09</b>	901,2385	Kaemferol-3-(caffeic)-7-glucoside/ Kae-O-hydroxyferuloylglucuronide-O-malonylhexoside
	450,1165	NI

**Tableau 2** : Phénols identifiés à partir des racines du radis.

Rt (min)	[M+H] <sup>+</sup> Mw (m/z)	Composés phénoliques
<b>14,34</b>	163,04	p-coumaric acid
<b>17,46</b>	450,12	NI
	901,24	Kaempferol-3-Caffeoyl-7-glucose
<b>18,02</b>	457,12	NI
	915,26	Kaempferol-3-Ferulylglucose
<b>18,82</b>	431,1	<b>Roseoside / Kaempferol-(3 ou 7)-O-rhamnoside</b> Vitexin, Genistin, Apigenin-7-O-glucoside

**Tableau 3** : Phénols identifiés à partir des feuilles de cresson.

Rt (min)	[M+H] <sup>+</sup> Mw (m/z)	Composés phénoliques
<b>11,64</b>	477,0654	Quercetine-3-glucuronide (301) / Isorhamnetin-3-O-hexoside (315)
<b>12,16</b>	625,1429	Quercetin-3-Diglucoside / Quercetin-3-O- sophoroside/ <b>Quer-3,7-di-O-glucoside / quercetin dihexoside</b>
<b>12,75</b>	711,1432	Quercetin-3-O-(6-malonyl ( <b>manoly</b> )-glucoside)7-O-glucoside
<b>13,24</b>	591,0999	Caffeoyl malic acid
	295,047	Caffeoyl malik acid
	133,0144	Malic acid
	179,0354	Caffeate/ Caffeic acid
<b>13,78</b>	385,1148	Sinapoyl / Roseoside / Quercetine derivative

	695,1467	Kaempferol-3-(6 malonylglucoside)-7-glucoside (hexoside)/ <b>Kaem-3-O-manolyhexoside-7-O-hexoside</b>
<b>14,36</b>	163,0401	p-coumaric acid
<b>14,89</b>	933,2309	Quercetin-3-O-Caffeoyl Sopheroside 7 / Quercetin-3-O-p-coumaroyl-sophoroside-7-O-glucoside/ Kaempferol-3-O-caffeoyl-sophoroside-7-O-glucoside
<b>15,11</b>	279,0513	NI
	163,0398	p-coumaric acid
	599,1104	NI
<b>15,88</b>	449,0771	Benzoic acid derivative/ Cyanidin-3-O-glucoside
	309,0625	Ferulic acid
	193,0507	Ferulic acid derivative
<b>16,15</b>	428,1065	NI
<b>16,37</b>	415,198	NI
	787,1739	Quercetin-3-diglucoside (acid)-7-glucose / Quercetin-O-coumaroyl sophoroside
	463,0892	Quercetin 3-O-glucoside
<b>16,82</b>	873,1766	Quercetin-o-sophoroside-o-malonyl hexoside / Quercetin-O-dihexosyl-O-malonylhexoside
<b>17,06</b>	593,1529	Kaempferol-3 (ou 7)-o-rutinoside / <b>pelargonidin-3-sophoroside</b>
	549,0903	Quercetin-3-o-malonyl hexoside
<b>17,26</b>	395,0094	Isorhamnetine-glucose
	623,164	Isorhamnetine-3-o-rutinoside
<b>17,51</b>	947,2488	<b>Kaempferol-3-O-feruloyl-sophoroside-7-O-glucoside/ Isorhamnetin-3-O-p-coumaroyl-sophorotrioside-7-O-glucoside</b>
<b>17,78</b>	801,1908	Isorhamnetin-o-sophoroside-o-hexoside
<b>18,04</b>	857,1815	Cyanidin or Quercitine
<b>18,19</b>	887,192	Isorhamnetin-o-sophoroside-o-malonyl hexoside
<b>18,8</b>	887,1924	Isorhamnetin-o-sophoroside-o-malonyl hexoside
<b>19,77</b>	409,024	Quercetine

**Tableau 4** : Phénols identifiés à partir des racines de cresson.

<b>Rt (min)</b>	<b>[M+H]<sup>+</sup> Mw (m/z)</b>	<b>Composés phénoliques</b>
<b>10,97</b>	153,0189	Dihydroxy/hydroxy benzoic acid derivative
<b>11,82</b>	250,0713	Benzoic acid derivative
	273,006	Benzoic acid derivative
	441,1038	Benzoic acid derivative
	158,0825	Benzoic acid derivative
<b>12,39</b>	181,0137	Benzoic acid derivative
	165,0295	Benzoic acid derivative
<b>13,24</b>	252,0021	NI
	293,1063	NI
	223,0207	Sinapic acid
<b>13,85</b>	385,1135	Sinapoyl glucose / O-sinapoylglucose
	205,0816	NI
	771,2342	Quercetin 3-rutinoside-7-glucoside ( <b>O-glucoside</b> )/ <b>Quercetin-3-O-glucosyl-rhamnosyl-galactoside</b>
14,36	163,0396	p-coumaric acid
<b>15,1</b>	163,0396	p-coumaric acid
	279,0507	p-coumaric acid derivative
	559,1086	p-coumaric acid derivative
	119,0498	p-coumaric acid derivative
<b>15,54</b>	317,1594	NI
	535,1823	NI
	581,187	NI
<b>15,9</b>	449,0752	Benzoic acid / DihydroKaempferol 7-Glucoside/ Cyanidin-3-O-glucoside
	309,0611	NI
	193,0411	Ferulic acid

<b>16,12</b>	439,1065	NI
	144,0451	NI
	160,0389	NI
	505,1358	Syringetin-3-galactoside NI Quercetin acetyl hexoside
<b>16,36</b>	425,0539	NI
	535,181	NI
	263,0955	NI
	505,1292	Quercetin acetyl hexoside
	615,1922	NI
<b>16,63</b>	577,156	Proanthocynidin B1/ <b>Apigenin-7-O-rutinoside</b>
	493,0989	Laricitrin-3-glucoside
	623,1615	Isorhamnetin derivative
	261,1333	NI
	331,1695	6-O-Galloylglucose
<b>16,78</b>	220,0978	NI
	273,1244	NI
	138,0195	NI
	395,0427	NI
	529,1827	NI
<b>17,8</b>	279,0906	NI
	173,1182	NI
	801,1881	Quercetin derivative/ Isorhamnetin-o-sophoroside-o-hexoside
<b>18,21</b>	343,2111	NI
	887,1899	Quercetin ou Cyanidin / Isorhamnetin-o-sophoroside-o-malonyl hexoside
<b>18,7</b>	174,0565	Indocetic acid
	343,2127	NI
	287,1401	Benzoic acid

<b>19,31</b>	487,1264	NI
	343,2134	NI
	617,1162	NI
	263,1295	NI
<b>19,54</b>	201,1119	NI
	358,0756	NI
	457,1157	NI
<b>22,27</b>	307,1909	NI
	329,226	1-O-vanilloyl-beta-D-glucose (Pub-chem) / $\beta$ -Vanillic acid glucose (article)
<b>22,97</b>	293,1752	NI
	327,2138	NI

\* NI : non identifié.

## **Publications**

# Life Cycle of Potato Cyst Nematode, *Globodera rostochiensis* and Effect of Population Densities on Potato Growth and Yield in Algeria

S. Berrahia<sup>1\*</sup>, and S. Sellami<sup>1</sup>

## ABSTRACT

The present work was aimed to investigate the life cycle and the effect of different initial population densities of *Globodera rostochiensis* on potato yield and growth on the susceptible potato cultivar, Spunta, in Algerian environmental conditions. The length of the life cycle of *G. rostochiensis* differed among growing seasons and was 72 days or 699 DD<sub>6.2</sub> for potatoes planted in mid-February and 66 days or 459 DD<sub>2</sub> for potatoes planted in early November. A significant reduction in growth and potato yields was observed. The increase of initial Population densities (Pi) of *G. rostochiensis* were associated with a significant reduction in plant growth and potato yields. The maximum yield and plant height reductions were 85 and 75%, respectively, at the highest Pi of 512 eggs g<sup>-1</sup> soil. The final nematode Population density (Pf) increased with the increase of the initial population densities. The Reproductive factor (Rf) initially increased with the increase of Pi up to 4 eggs g<sup>-1</sup> soil and then decreased for Pi ≥ 4, suggesting an intraspecies competition. Results contribute to the knowledge of *G. rostochiensis* thermal time requirements in Algerian environmental conditions and can be a valuable tool to develop appropriate potato cyst nematode control strategies considering that the nematode can also cause severe damage and yield losses at very low Pi densities.

**Keywords:** Nematode reproduction, Potato cultivar Spunta, Potato pest, Yield losses.

## INTRODUCTION

The Potato Cyst Nematodes (PCN) *Globodera pallida* and *G. rostochiensis* are economically important pests for potato crops, which exist globally in most of the potato cultivated areas (Ngala *et al.*, 2015). Both *Globodera* spp. are responsible for yield losses of around 50% in France (Chauvin *et al.*, 2008) and up to 80% in Australia (Kooliyottil *et al.*, 2017). They are considered as the second most economically important pest of potato in the United Kingdom after *Phytophthora infestans* (late blight) causing yield losses for 26 million euro/year and an additional cost of 10 million euro/year for

nematicides (Lord *et al.*, 2011). In Bulgaria, the golden potato cyst nematode, *G. rostochiensis* is the main pest causing 80% yield loss (Trifonova, 1995, 2000). In Algeria, PCN were reported for the first time in 1953 (Frezal, 1954). Then, in 1961, the infested areas quickly increased by affecting 33 communes around Algiers (Scotto La Massese, 1961). Subsequently, new populations were discovered in previously uninfected regions, including Ain Defla, Tipaza, Chlef, Mascara and Sétif (National Institute of Plant Protection, 2009; Tirchi *et al.*, 2016). Recently, Mezerket *et al.* (2018) revealed the distribution of the PCN in southern Algeria with Informations on the life cycle, population densities and yield losses of *G. pallida* and *G. rostochiensis* under different

<sup>1</sup> Laboratory of Phytopathology and Molecular Biology, Department of Botany, National High School of Agronomy, El-Harrach, Algeria.

\* Corresponding author; e-mail: safia.berrahia@gmail.com



environmental conditions are extremely rare in Algeria. Life cycle of the PCN is well described and generally influenced by temperature. Different numbers of generations were reported from potato grown in different geographical regions according to the temperatures (Greco *et al.*, 1988; Renčo, 2007; Bačić *et al.*, 2011; Ebrahimi *et al.*, 2014). Thus, the temperature sum measured in Degrees-Days (DD) (Trudgill and Perry, 1994; Halford *et al.*, 1999) is an important parameter for predicting PCN development and reproduction.

Several authors used mathematical models to describe the relationship between initial population densities of *Globodera* and potato growth and yield losses (Greco *et al.*, 1982; Greco and Moreno, 1992; Hajihassani *et al.*, 2013; Maneva and Trifonova, 2015). Understanding the PCN population dynamics in specific agroecosystems and knowing the initial nematode densities at planting will allow predicting any expected yield reductions (Sasanelli *et al.*, 2018). According to this information, appropriate control strategies can be selected and implemented to limit nematode damage and improve potato yield (Alonso *et al.*, 2011; Hajihassani *et al.*, 2013).

The present study was carried out to study the life cycle of *G. rostochiensis* under field in Algerian environmental conditions and to evaluate the effect of different initial population densities of *G. rostochiensis* on plant growth, potato yield and nematode reproduction.

## MATERIALS AND METHODS

### Plant Material

Potato tubers of the cultivar Spunta, pre-germinated in dark conditions, were used in all the experiments in this study. This cultivar was selected because it was widely used by farmers in Algeria and did not show any level of resistance to potato cyst nematodes, *Globodera* spp.

### Nematode Inoculum

The Algerian population of *G. rostochiensis* used in both experiments was obtained from an infested potato field in the El-Oued Region. To obtain nematode inoculum, cysts were extracted from air-dried soil by the Fenwick's technique (1940). Cysts were then collected and counted under a binocular stereoscope at 40x magnification. The cysts were crushed as described by Seinhorst and Den Ouden (1966) and the number of eggs inside of the cysts was determined.

### Microplot Experiment

The experiment on duration of the different life stages of *G. rostochiensis* was carried out in a microplot of 4 m<sup>2</sup>, placed in the experimental fields of the National High School of Agronomy (35.23% clay, 23.25% fine silt, 25.24% coarse silt, 10.20% fine sand, 5.78% coarse sand, 0.026% N, 4.89% OM, and pH 7.04). Tubers were sown in Spring (mid-February) and in winter (early November) 2017, at a depth of 12 cm, in two rows spaced 75 cm and 15 cm along the row with a total of 32 tubers. The inoculum for each tuber consisted of 25 *G. rostochiensis* cysts, placed in nylon bags that were added to the soil at the sowing time. During the growing season, the air and soil temperatures (at 10 cm depth), and rainfall were daily recorded (Figures 1, 2, and 3).

### Data Collection

The nematode life stages were determined by counting the specimens in 1 g of roots. Root samples were collected at 7-day intervals by harvesting 2 plants at random from the plot at each recording time. The root samples were washed thoroughly and stained with lacto-phenol (28.5% phenol in lactic acid) and acid fuchsin (0.05% in lacto-phenol) to determine developmental stages (Hooper, 1986). The females were counted

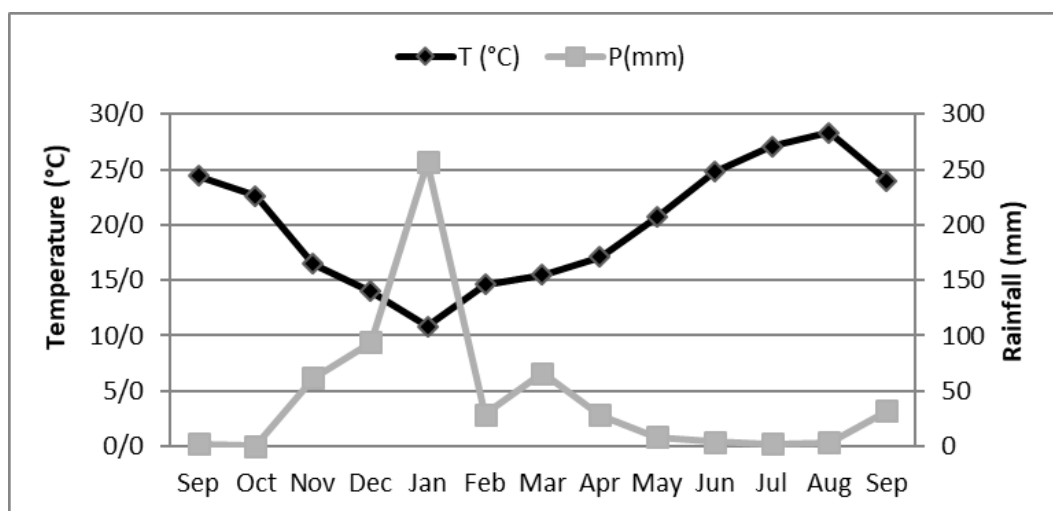


Figure 1. Average values of meteorological variables during the microplot experiments in 2016-2017.

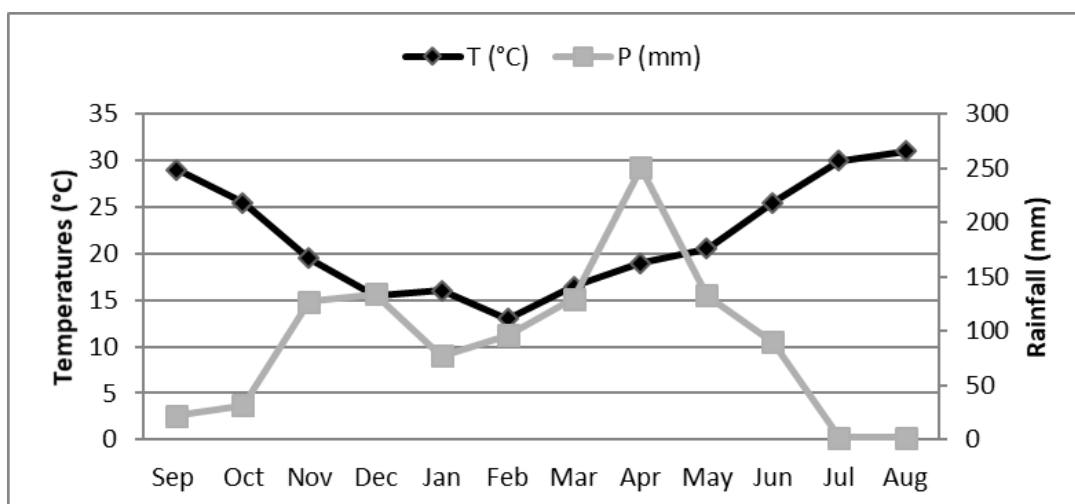


Figure 2. Average values of meteorological variables during the microplot experiments in 2017-2018.

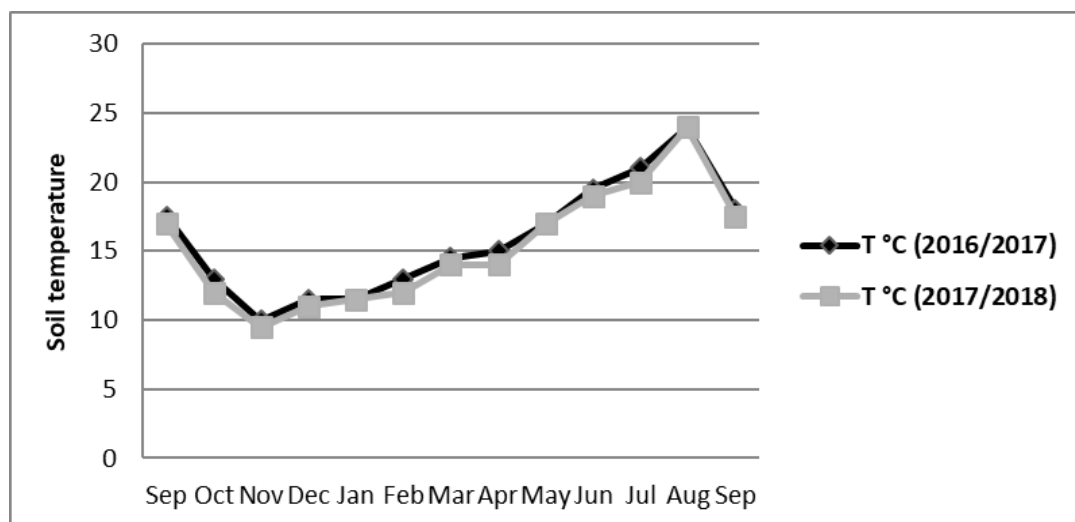


Figure 3. Soil temperature at 10 cm-deep in the microplot experiments in 2016-2017 and 2017-2018.



on the root surface before staining the root. Heat availability was calculated in accumulated Day Degrees (DD) using a basal temperature of 6.2°C for *G. rostochiensis* (Mugniery, 1978).

### Pot Experiment

The second experiment on initial population densities was performed in plastic pots (30 cm diameter and 50 cm deep). Each pot, perforated at the bottom for a better drainage, was filled with 8 kg sterilized soil at 80°C for 24 hours (a mixture of 2/3 soil previously indicated and 1/3 breeding soil). Plants were sown in mid-February 2017, with one tuber of uniform size per pot. An appropriate amount of *G. rostochiensis* cysts was placed in tules and introduced into the soil of each pot to obtain different initial densities from 1 to 512 eggs g<sup>-1</sup> soil according to a geometric scale ( $P_i = 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256$  and 512 eggs g<sup>-1</sup> soil). All pots were arranged in a completely randomized block design with four replications for each population density. Four control pots were not infested. Fertilization was done 15 days after sowing at the rate of 7 g of fertilizer (15% N, 15% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 15% K<sub>2</sub>O), for each pot. Standard cropping practices were applied during the growing season (hoeing, weeding, irrigation and pesticide treatments).

### Data Collection

For the second experiment, potato plants heights were recorded every three weeks. At harvest (about 100 days later) plants were destroyed and yield determined by weighing potato tubers of each pot (g pot<sup>-1</sup>). Soil of each pot was air-dried at room temperature and mixed before collecting a 500 g sub-sample to extract the cysts. Cysts were extracted by the Fenwick can (1940). Cysts were then counted and crushed to estimate their egg content and calculate the final nematode population density for each  $P_i$ . The Reproduction factor (Rf) was calculated as ratio between the final and initial nematode Population densities (Pf/Pi).

### Statistical Analysis

Data from the experiments were subjected to analysis of variance ANOVA using the STATISTICA software. Means of treatments were compared by HSD test of Tukey (P= 0.05). Data were also subjected to logarithmic regression analysis.

## RESULTS

### Microplot Experiment

Different stages of *G. rostochiensis* on potato plants are reported in Table 1 and the average values of meteorological variables during the microplot experiments in 2016-2017 and 2017-2018 are represented in Figures 1 and 2, respectively. During both growing seasons, potato shoots emerged one week after sowing. At that time, second-stage Juveniles (J2) already entered in the root. The first J2 of *G. rostochiensis* were detected in Spring and Winter at 10 and 7 Days After Sowing (DAS), respectively; with an accumulated heat of 83 and 82 DD<sub>6.2</sub> (Table 1). The soil temperature ranged from 13 to 17°C and from 10 to 13°C, for the two considered growing seasons, respectively (Figure 3). In both seasons, third and fourth-stage juveniles (J3+J4) and females were found in roots at 16 and 23 DAS, respectively. When the first females appeared, in Spring and Winter, the accumulated heat were 208 and 199 DD<sub>6</sub>, respectively. The first cysts of *G. rostochiensis* were found on the roots at 699 DD<sub>6</sub> and 73 DAS in Spring and at 459 DD and 67 DAS, respectively (Table 2). Only one generation was completed per growing season under climatic conditions of Algiers.

### Pot Experiment

#### Effect of *G. rostochiensis* on Growth and Yield of Potato Plants

Emergence of the potato plants was not influenced by the different nematode population densities; although symptoms

**Table 1.** Number of different stages of *Globodera rostochiensis* recovered from 1 g of roots of potato (cv. Spunta) in the growing seasons (Spring and Winter) 2017/2018.

Date	J2	J3+J4	Female	White female	Cyst
21/02/17	9	-	-	-	-
28/02/17	17	29	-	-	-
07/03/17	3	9	15	-	-
14/03/17	-	8	22	-	-
21/03/17	1	10	16	-	-
28/03/17	-	6	6	-	-
04/04/17	-	3	6	-	-
11/04/17	-	2	4	2	-
18/04/17	-	1	3	1	-
25/04/17	-	1	4	1	1
02/05/17	-	2	3	2	2
09/05/17	-	-	2	2	1
16/05/17	-	-	1	1	3
05/11/17	9	-	-	-	-
13/11/17	12	21	16	-	-
21/11/17	20	14	11	-	-
28/11/17	15	15	18	-	-
06/12/17	10	9	17	-	-
13/12/17	8	7	11	-	-
20/12/17	-	6	6	-	-
27/12/17	2	4	5	3	-
03/01/18	-	3	3	4	-
10/01/18	-	1	4	5	1
17/01/18	-	2	4	3	8
24/01/18	-	1	2	2	5
31/01/18	-	-	1	-	3
07/02/18	-	-	-	-	2

**Table 2.** Occurrence of *Globodera rostochiensis* developmental stages and degree day accumulations on potato (cv. Spunta).

Developmental stages	Spring		Winter	
	DAS	DD <sub>6</sub>	DAS	DD <sub>6</sub>
J2	10	83	7	82
J3+J4	17	142	15	147
Female	24	208	23	199
White female	59	533	59	402
Cyst	73	699	66	459



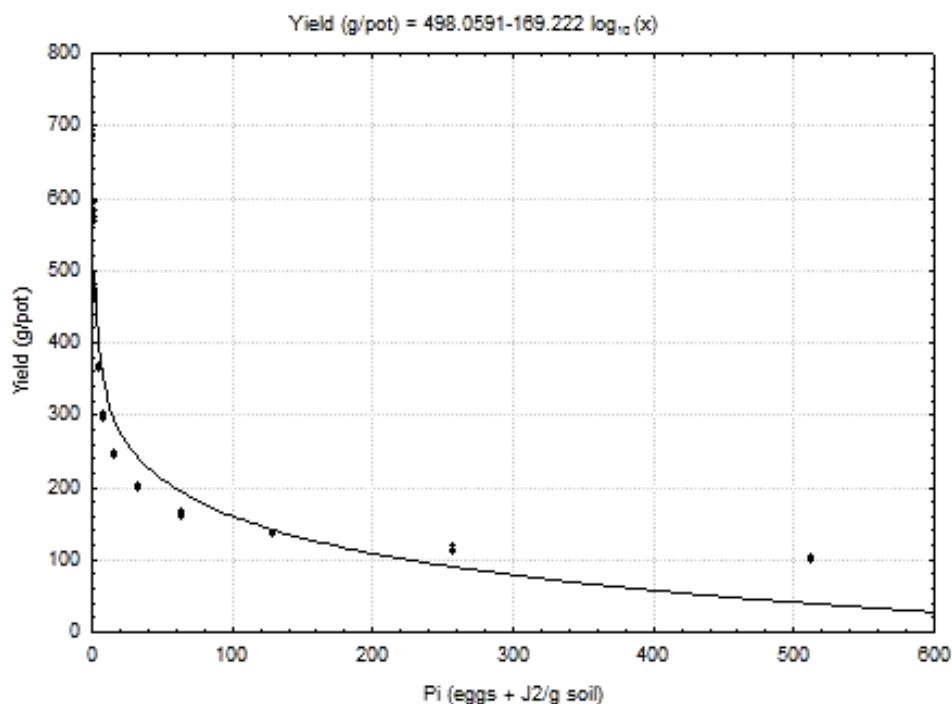
(yellowing and stunting) were observed on plants emerged in inoculated pots with high nematode population densities. The effect of different initial densities ( $P_i$ ) of *G. rostochiensis* on potato growth and yield was highly significant. Each of the  $P_i$  studied determined an increase of yield and plant growth losses percentages, compared to the uninoculated control ( $P_i=0$ ), by the increase of  $P_i$  values (Table 3), revealing that the impact of  $P_i$  was remarkably strong. Moreover, a slight increase in  $P_i$  caused a significant decrease in the yield and growth of potato demonstrating a high susceptibility of the crop to *G. rostochiensis* attack. Data analysis by logarithmic regression (Figure 4) showed significant negative relationships between potato yield and  $P_i$  at the end of the plant cycle. The maximum and minimum yield percentage reduction of 85.2 and 16.1% were observed at the highest (512 eggs and  $J2\ g^{-1}$  of soil) and minimum (1 egg and  $J2\ g^{-1}$  soil)  $P_i$ , respectively (Table 3). Percent plant height reduction, compared to the control, ranged between 17.9 and

75.0% for  $P_i$  increase from 1 to 512 eggs and  $J2\ g^{-1}$  soil (Table 3).

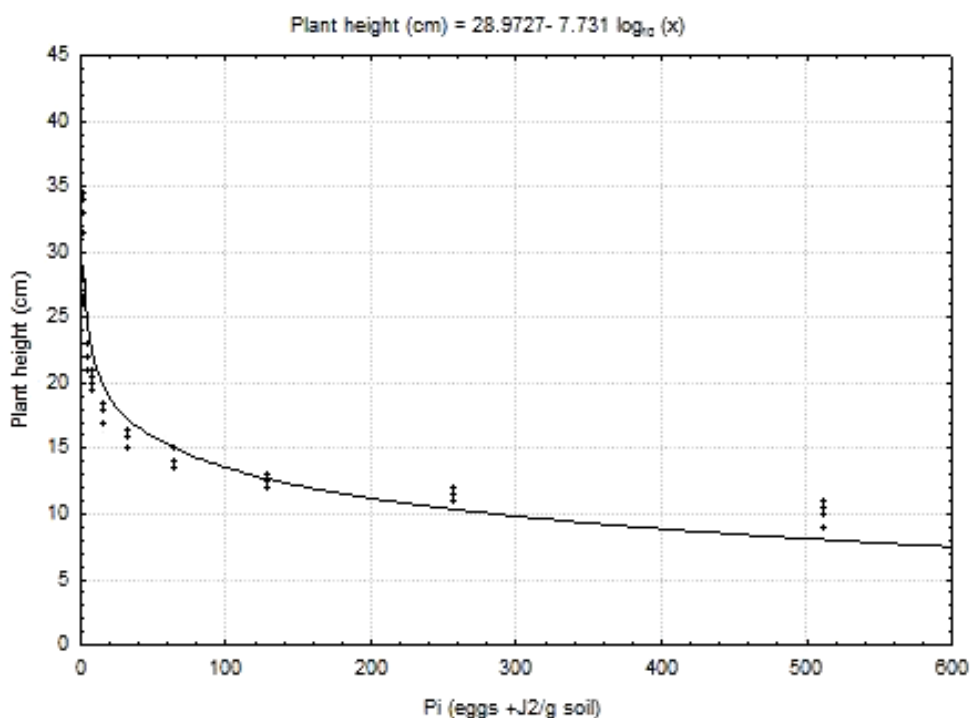
Data analysis by logarithmic regression (Figure 5) showed a significant negative relationship between potato yield and initial Population densities ( $P_i$ ).

#### Effect of Initial *G. rostochiensis* Population Densities on Population Development and Multiplication Rate

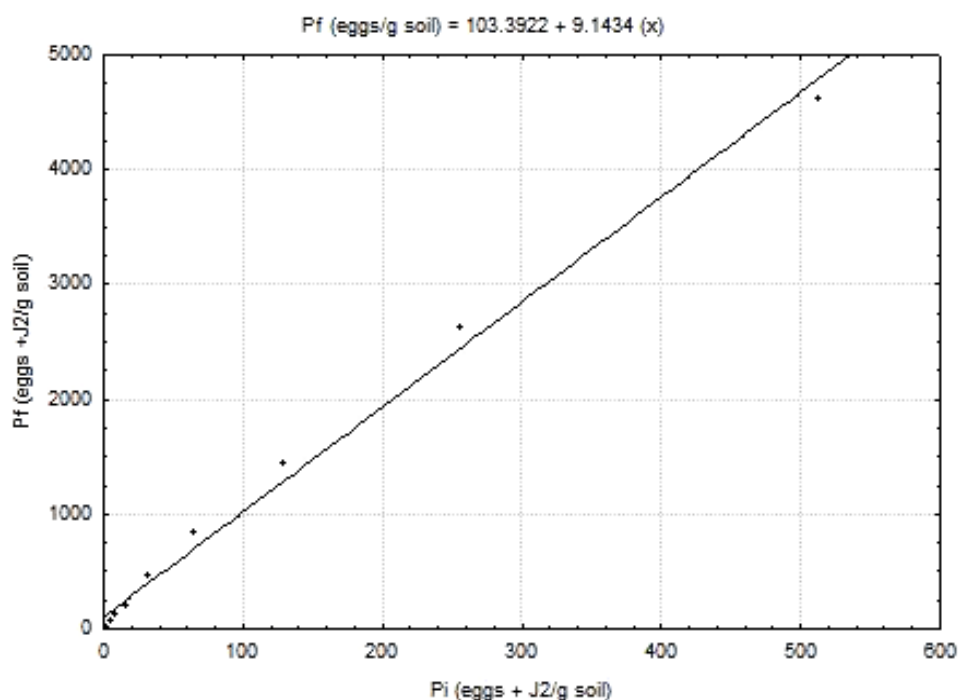
The final Population density ( $P_f$ ) at the end of the potato crop cycle increased with the increase in  $P_i$ . Data analysis by linear regression (Figure 6) showed highly significant relationships ( $R=0.99$ ) between the initial ( $P_i$ ) and the final Population densities ( $P_f$ ). The Reproduction factor ( $R_f$ ) showed clearly significant results ( $P<0.001$ ). The highest  $R_f$  was determined with an initial population density  $P_i=4.0$  eggs and  $J2\ g^{-1}$  soil. The Reproduction factor ( $R_f$ ) increased with the increase of  $P_i$  (Figure 7)



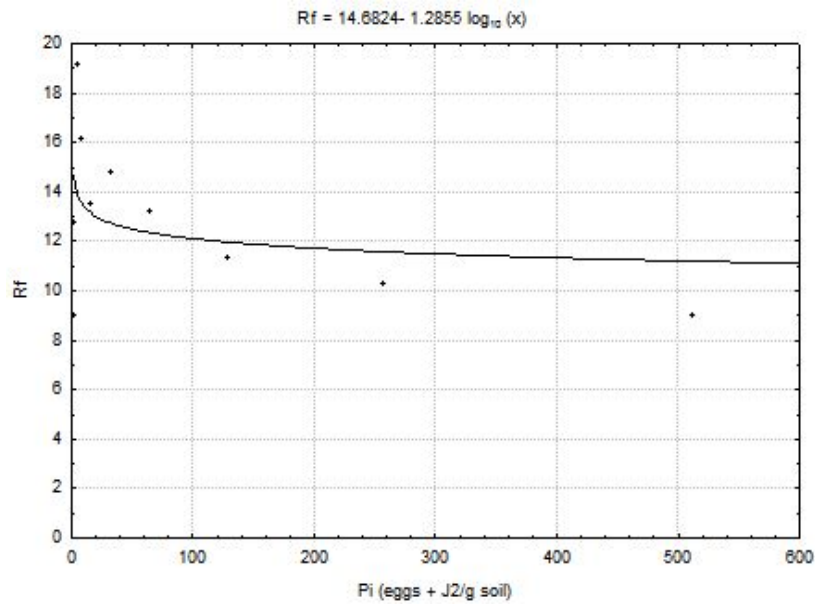
**Figure 4.** Relationship between potato yield ( $g\ pot^{-1}$ ) and initial Population density at sowing ( $P_i$ ) of *Globodera rostochiensis* ( $r=-0,5930$ ;  $P=0,00002$ ).



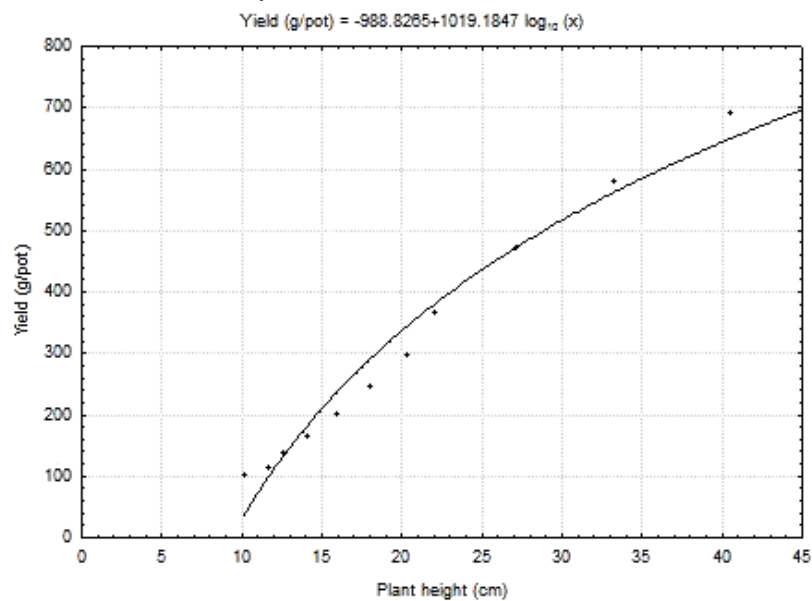
**Figure 5.** Functional dependence of potato plant height (cm) on the initial density (Pi) of *Globodera rostochiensis* ( $r = -0,5949$ ;  $P = 0,00002$ ).



**Figure 6.** Relationship between final (Pf) and initial (Pi) *Globodera rostochiensis* population density ( $r = 0,9961$ ;  $P = 0,0000$ ).



**Figure 7.** Relationship between Reproduction factor ( $Rf = Pf/Pi$ ) and the initial *Globodera rostochiensis* Population density ( $Pi$ ) ( $r = -0,1956$ ;  $P = 0,5644$ ).



**Figure 8.** Functional dependence of potato yield ( $g\ pot^{-1}$ ) on the plant height (cm) ( $r = 0,9962$ ;  $P = 0,0000$ ).

until to  $Pi = 4$  eggs and  $J2\ g^{-1}$  of soil. For  $Pi$  higher than 4 eggs and  $J2\ g^{-1}$  soil),  $Rf$  decreased due to intraspecies competition. Potato yield was positively correlated with plant height (Figure 8).

## DISCUSSION

The life cycle of different *Globodera* species on potato cultivars has been studied

by several authors (Greco *et al.*, 1988; Renčo, 2007; Alonso *et al.*, 2011; Bacic *et al.*, 2011; Ebrahimi *et al.*, 2014; Mimee *et al.*, 2015). Results of our study confirm that one full generation of *G. rostochiensis* per growing season was recorded.

Our study has shown that the biological cycle from the J2 emergence to the development of new brown cysts in the soil lasted 72 days in Spring and 66 days in Winter. In Cyprus, *G. rostochiensis*

completed its life cycle on Autumn and Spring crops at 56 and 63 days after sowing, respectively, when the accumulated DD were 416 and 529 (Philis, 1980). The differences observed were due to the different temperatures during growing season, potato cultivars, and the *G. rostochiensis* pathotype.

In Spring and Winter, first females appeared when the accumulated heat was 208 and 199 DD<sub>6</sub>, respectively. Furthermore, the first cysts of *G. rostochiensis* were found on the roots at 699 DD<sub>6</sub> and 73 DAS in Spring. In Winter, the first cysts were found on the roots at 459 DD and 67 DAS. In Italy, to reach the female and cyst stages, respectively, 126 and 168 DD are required in subtropical areas and 275 and 450 DD in temperate regions (Greco *et al.*, 1988). Ebrahimi *et al.* (2014) reported 463 DD<sub>4</sub> and 401 DD<sub>6</sub> for *G. pallida* and *G. rostochiensis*, respectively, in microplot and field conditions. The latter values (temperate regions) are close to the accumulated DD required by *G. rostochiensis* in our microplot experiment carried out in Winter (199-459 DD).

The DD values reported by the authors vary with locations and dates of sowing. It should also be noted that different accumulated DD estimates and reported for PCN species might be partially attributed to the methods used to calculate the accumulated DD. Therefore, it is preferable that the authors describe the method for calculating DD values. In this manner, results can be interpreted and compared with each other (Ebrahimi *et al.*, 2014).

The effect of different densities of initial populations of different *Globodera* species in potato cultivation has been studied by several authors (Greco *et al.*, 1982; Greco and Moreno, 1992; Jiménez *et al.*, 2000; Hajihassani *et al.*, 2013; Maneva and Trifonova, 2015). Results of these studies confirm that reductions in potato growth and yields are directly related to the initial nematode density in the soil.

Our study has shown that the Algerian *G. rostochiensis* population can lead to a significant decrease in the growth and yield of tubers of cv. Spunta, and the damage

increases with the increase of the initial densities of the nematode. According to Seinhorst (1982) and Trudgill *et al.* (1996), losses of tuber yield associated with *Globodera* cyst nematodes attack is due not only to the nematode population density at sowing, but mainly to the penetration and development of juveniles in the root system of the potato crop.

Previous studies (Greco *et al.*, 1982; Trudgill, 1985; Greco and Moreno, 1992; Jiménez *et al.*, 2000) were carried out on the effect of different initial population densities of *Globodera* on the yield and growth of potato, and the results were processed using the Seinhorst Formula (1965). Results of our research agree with those found in the previously indicated studies. Reduction in potato yield of 20, 50, and 70% at the initial levels of 12, 32 and 128 eggs and J2 g<sup>-1</sup> soil, respectively, has been observed.

Moreover, results of our study are consistent with those of Hajihassani *et al.* (2013) who reported tuber yield losses at  $P_i = 2$  and 64 eggs and J2 g<sup>-1</sup> soil equal to 8.5 and 56% and 9 and 58% for Spunta and Marfona varieties, respectively. Similarly, Maneva and Trifonova (2015) reported a reduction percentage of 47.8 and 73% of plant growth for  $P_i$  equal to 4 and 128 eggs and J2 g<sup>-1</sup> soil, respectively. The significant decrease in plant growth was due to an increased development of *Globodera* J2 in potato root systems, which led, by the histological modifications, to a decrease in water and nutrient uptake in plants (Hajihassani *et al.*, 2013). The effect of the initial population on the final density has been confirmed. However, in our study at  $P_i = 2$  eggs and J2 g<sup>-1</sup> soil, a yield loss of 31.9% (in comparison to the uninfested soil) was found, which don't agree with results from Greco *et al.* (1982) who calculated a tolerance limit to *G. rostochiensis* of 1.90 eggs and juveniles/g soil for potato crop. The decrease of  $R_f$  for  $P_i \geq 4$  can be explained by competition for food and space in the high inoculum densities. To know nematode population at sowing time is important to predict yield losses and to organize appropriate control strategies to the problem.



## CONCLUSION

In conclusion, the present study establishes relationships between *G. rostochiensis* populations and cumulative temperatures. Knowledge of the day's degree required by the nematodes to develop their life-cycle stages could be used to plan an appropriate harvest time preceding cyst development and minimizing nematode reproduction. Furthermore, results from this study demonstrate that *G. rostochiensis* causes severe yield losses in potato and has the potential to severely impair growth even at very low densities of 1 egg and J2 J2 g<sup>-1</sup> soil. Continuous testing and monitoring of infested fields to prevent the spread of the potato cyst nematodes is necessary by farmers. Control measures need to be implemented in order to guarantee the lucrative production of potato. A combination of control options such as resistant cultivars, nematicide applications, crop rotations involving PCN resistant cultivars with non-host crops and biological control methods can provide a successful integrated management program against potato cyst nematodes.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank ENSA-El Harrach (High National School of Agronomy) for providing financial assistance. Special thanks to Dr. Mourad Latati (ENSA) for help with the statistical analysis and to Dr. Negin Ebrahimi (Department of Crop Protection, Institute for Agricultural and Fisheries Research, Merelbeke, Belgium) for manuscript review.

## REFERENCES

1. Alonso, R., Alemany, A. and Andres, M.F. 2011. Population Dynamics of *Globodera pallida* (Nematoda: Heteroderidae) on Two Potato Cultivars in Natural Field Conditions in Balearic Islands, Spain. *Span. J. Agric. Res.*, **9**: 589-596.
2. Bačić, J., Barsi, L. and Štrbac, P. 2011. Life Cycle of the Potato Golden Cyst Nematode (*Globodera rostochiensis*) Grown under Climatic Conditions in Belgrade. *Arch. Biol. Sci.*, **63**: 1069-1075.
3. Chauvin, L., Carome, B., Kerlan, M. C., Rulliat, E. and Fournet, S. 2008. La Lutte Contre les Nématodes à Kyste de la Pomme de Terre *Globodera rostochiensis* et *G. pallida*. *Cah Agric.*, **14**: 368-374.
4. Ebrahimi, N., Viaene, N., Demeulemeester, K. and Moens, M. 2014. Observations on the Life Cycle of Potato Cyst Nematodes, *Globodera rostochiensis* and *G. pallida*, on Early Potato Cultivars. *Nematology*, **16**: 937-952.
5. Fenwick, D.W. 1940. Methods for the Recovery and Counting of Cysts of *Heterodera Schachtii* from Soil. *J. Helminthol.*, **18**: 155-172.
6. Frezal, P. 1954. Importance et Répercussions de la Contamination de l'Algérie par le Nématode Doré (*Heterodera rostochiensis* Wooll. [Woll.]. *Journal Comptes Rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France*, **40**: 71-74.
7. Greco, N., Inserra, R.N., Brandonisio, A., Tirro, A. and De Marinis, G. 1988. Life Cycle of *Globodera rostochiensis* on Potato in Italy. *Nematologia Mediterranea*, **16**: 69-73.
8. Greco, N. and Moreno, I. 1992. Influence of *Globodera rostochiensis* on Yield of Summer, Winter and Spring Sown Potato in Chile. *Nematropica*, **22**: 165-173.
9. Greco, N., Di Vito, M., Brandonisio, A., Giordano, I. and De Marinis, G. 1982. The Effect of *Globodera pallida* and *G. rostochiensis* on Potato Yield. *Nematologica*, **28**: 379-386.
10. Grubišić, D., Oštrec, Lj., Gotlin Čuljak, T., Ivezić, M. and Novak, B. 2008. Biologija i Ekologija Karantenske Vrste *Globodera rostochiensis* (Wollenweber, 1923) Behrens, 1975 (Nematoda: Heteroderidae) u Međimurskoj Županiji. *Entomol Croat.*, **12**(1): 19-36.
11. Hajihassani, A., Ebrahimi, N. and Hajihassani, M. 2013. Estimation of Yield Damage in Potato Caused by Iranian Population of *Globodera rostochiensis* with and without Aldicarb under Greenhouse Conditions. *Int. J. Agric. Biol.*, **15**: 352-356.

12. Halford, P. D., Russell, M. D. and Evans, K. 1999. Use of resistant and susceptible potato cultivars in the trap cropping of potato cyst nematodes, *Globodera pallida* and *G. rostochiensis*. *Ann. Appl. Biol.*, **134**: 321-327
13. Hooper, D. J. 1986. Preserving and Staining Nematodes in Plant Tissues. In: "Laboratory Methods for Work with Plant and Soil Nematodes", (Ed.): Southey, J. F. 6th Edition, Her Majesty's Stationery Office, London, PP. 81-85
14. Jimenez, N., Crozzoli, R. and Greco, N. 2000. Effect of *Globodera rostochiensis* on the Yield of Potato in Venezuela. *Nematol. Mediterr.*, **28**: 295-299.
15. Kooliyottil, R., Dandurand, L. M. and Knudsen, G. R. 2017. Prospecting Fungal Parasites of the Potato Cyst Nematode *Globodera pallida* Using a Rapid Screening Technique. *J. Basic Microbiol.*, **57**: 386-392.
16. Lord, J. S., Lazzeri, L., Atkinson, H. J. and Urwin, P. E. 2011. Biofumigation for Control of Pale Potato Cyst Nematodes: Activity of Brassica Leaf Extracts and Green Manures on *Globodera pallida* in Vitro and in Soil. *J. Agric. Food Chem.*, **59**: 7882-7890.
17. Maneva, S. and Trifonova, Z. L. 2015. *Globodera Rostochiensis* Population Density Effect on Potato Growth and Yield. Regression Models Estimation. *Bulg. J. Agric. Sci.*, **21**: 815-821.
18. Mezerket, A., Hammache, M., Cantalapedra-Navarrete, C., Castillo, P. and Palomares-Rius, J. E. 2018. Prevalence, Identification, and Molecular Variability of Potato Cyst Nematodes in Algeria. *J. Agr. Sci. Tech.*, **20**: 1293-1305.
19. Mimee, B., Dauphinais, N. and Bélair, G. 2015. Life Cycle of the Golden Cyst Nematode, *Globodera rostochiensis*, in Quebec, Canada. *J. Nematol.*, **47(4)**: 290-295.
20. National Institute of Plant Protection. 2009. Nematode à Kystes de la Pomme de Terre *Globodera rostochiensis* et *G. pallida*. Algeria, 4 PP.
21. Mugniéry, D. 1978. Vitesse de Développement en Fonction de la Temperature de *Globodera rostochiensis* et *G. pallida* (Nematoda: Heteroderidae). *Revue de Nematologie*, **1**: 3-12.
22. Ngala, B. M., Haydock, P. P. J., Woods, S. and Back, M. A. 2015. Biofumigation with *Brassica juncea*, *Raphanus sativus* and *Eruca sativa* for the management of field populations of the potato cyst nematode *Globodera pallida*. *Pest Manag. Sci.*, **71**: 759-769. doi:10.1002/ps.3849.
23. Philis, J. 1980. Life History of the Potato-Cyst Nematode *Globodera rostochiensis* in Cyprus. *Nematologica*, **26**: 295-301.
24. Renčo M. 2007 Comparison of the Life Cycle of Potato Cyst Nematode (*Globodera rostochiensis*) Pathotype Ro1 on Selected Potato Cultivars. *Biologia*, **62**: 195-200.
25. Scotto La Massese, C. 1961. Aperçu sur les Problèmes Posés par les Nématodes Phytoparasites en Algérie. *Journée d'Etude et d'Information. Association de Coordination Technique Agricole*, FNGPC, Paris, PP. 1-27.
26. Sasanelli, N., Toderas, I., Ircu-Straistaru, E., Rusu, S., Migunova, V. and Konrat, A. 2018. Yield Losses Caused by Plant Parasitic Nematodes Graphical Estimation. *International Symposium "Functional Ecology of Animals"*, Chisinau 21 September, PP. 319-329.
27. Seinhorst, J. W. 1965. The Relationship between Nematode Density and Damage to Plants. *Nematologica*, **11**: 137-154.
28. Seinhorst, J. W. and Den Ouden, H. 1966. An Improvement of the Bijloo's Method for Determining the Egg Content of *Heterodera cysts*. *Nematologica*, **12**: 170-171.
29. Seinhorst, J. W. 1982. The Relationship in Field Experiments between Population Density of *Globodera rostochiensis* before Planting Potatoes and Yield of Potato Tubers. *Nematologica*, **28**: 277-284.
30. Sigaereva, D. D., Pilipenko, L. A. and Sosenko, E. B. 1999. *The Problem of Cyst Nematodes in Ukraine* [Internet]. [Cited 27.04.2011.].
31. Singh, S.K., Hodda, M. and Ash, G. J. 2013. Plant-Parasitic Nematodes of Potential Phytosanitary Importance, Their Main Hosts and Reported Yield Losses. *EPPO Bull.*, **43**: 334-374.
32. Tirchi, N., Troccoli, A., Fanelli, E., Mokabli, A., Mouhouche, F. and De Luca, F. 2016. Morphological and Molecular Identification of Potato and Cereal Cyst Nematode Isolates from Algeria and Their Phylogenetic Relationships with Other Populations from Distant Their



- Geographical Areas. *Eur. J. Plant. Pathol.*, **146**: 861-880. 016-0965-z
33. Trifonova, Z. T. 1995. Use of Some Systemic Nematocides for Controlling Potato Cyst Nematode *Globodera rostochiensis*. *Bulg. J. Agric. Sci.*, **1**: 433-438.
34. Trifonova, Z. T. 2000. Distribution of *Globodera rostochiensis* (Woll.) in Bulgaria. *Macedonian Agricultural Review*, **1**: 63-65.
35. Trudgill, L. 1986. Yield Losses Caused by Potato Cyst Nematodes: A Review of the Current Position in Britain and Prospects for Improvements. *Ann. Appl. Biol.*, **108**: 181-198.
36. Trudgill, D. L. and Perry, J. N. 1994. Thermal Time and Ecological Strategies: A Unifying Hypothesis. *Ann. Appl. Biol.*, **125**: 521-532.
37. Trudgill, D. L., Phillips, M. S. and Hackett, C. A. 1996. The Basis of Predictive Modeling for Estimating Yield Loss and Planning Potato Cyst Nematode Management. *Pestic. Sci.*, **47**: 89-94.

### چرخه زندگی نماتد کیست سیب زمینی، *Globodera rostochiensis* و تأثیر تراکم جمعیت آن بر رشد و عملکرد سیب زمینی در الجزایر

س. براهیا، و س. سلامی

#### چکیده

هدف این پژوهش بررسی چرخه زندگی و تأثیر تراکم‌های مختلف جمعیت اولیه *Globodera rostochiensis* بر عملکرد و رشد کولتیوار حساس سیب زمینی به نام Spunta در شرایط محیطی الجزایر بود. طول چرخه زندگی *G. rostochiensis* در بین فصول رشد متفاوت بود و 72 روز یا 699 DD6.2 برای سیب زمینی‌های کاشته شده در اواسط فوریه و 66 روز یا 496 DD6.2 برای سیب زمینی‌های کاشته شده در اوایل نوامبر بود. نتایج کاهش قابل توجهی در رشد و عملکرد سیب زمینی نشان داد. افزایش تراکم جمعیت اولیه (*G. rostochiensis*) با کاهش قابل توجهی در رشد گیاه و عملکرد سیب زمینی همراه بود. بیشترین کاهش عملکرد و ارتفاع بوته به ترتیب 85٪ و 75٪ در بالاترین عدد Pi با 512 تخم در گرم خاک بود. تراکم جمعیت نهایی نماتد (Pf) با افزایش تراکم جمعیت اولیه افزایش یافت. فاکتور تولیدمثل (Rf) در ابتدا با افزایش Pi تا 4 تخم در گرم خاک افزایش یافت و سپس برای  $Pi \geq 4$  کاهش یافت که نشان‌دهنده رقابت درون گونه‌ای است. این نتایج به آگاهی از نیازهای زمان حرارتی *G. rostochiensis* در شرایط محیطی الجزایر کمک می‌کند و با توجه به اینکه نماتد می‌تواند با تراکم Pi بسیار کم باعث آسیب شدید و تلفات محصول شود، نتایج مزبور می‌تواند ابزاری ارزشمند برای تهیه راهبردهای مناسب کنترل نماتد کیست سیب زمینی باشد.

# Résumés

**Titre : « Etude des relations : *Globodera rostochiensis* Wollenweber – Pomme de terre et Recherche de méthodes alternatives à l'égard de ce bioagresseur ».**

**Résumé :** Les nématodes à kystes du genre *Globodera* représente une menace très sévère sur pomme de terre en Algérie et dans le monde, notamment par son classement d'organisme de quarantaine. La présente étude vise à déterminer la durée du cycle biologique de *G. rostochiensis* dans les conditions naturelles pendant deux saisons agricoles et à étudier l'effet de différentes densités de population initiales du nématode sur la croissance et le rendement de la pomme de terre. Ce travail a été complété par la recherche des méthodes alternatives par l'évaluation de l'activité nématocide des extraits aqueux de deux Brassicacées ; *Nasturtium officinale* et *Raphanus sativus* ; sur la mortalité des larves (J<sub>2</sub>) et l'éclosion des œufs de *G. rostochiensis*, et d'autre part par la détermination de l'effet nématocide des engrais verts de ces deux plantes *in vivo*. Enfin, l'effet de trois types de composts sur le développement des populations de ce nématode a été étudié.

L'analyse des résultats a révélé que le cycle biologique de *G. rostochiensis* durait 66 et 73 jours avec 620 DJ<sub>6,2</sub> et 699 DJ<sub>6,2</sub> pour les deux variétés spunta et kondor, respectivement au printemps. Cependant, la durée du cycle de ce nématode était de 59 jours à 402 DJ<sub>6,2</sub> pour la variété spunta et 66 jours à 459 DJ<sub>6,2</sub> pour la variété kondor en hiver. De plus, l'effet de différentes densités a montré que la perte de rendement de la pomme de terre varie selon la densité initiale (Pi) de *G. rostochiensis* dans le sol. Le taux de réduction des rendements a atteint 85 % à la densité initiale la plus élevée (Pi = 512 œufs et J<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> de sol) et 16 % pour le Pi le plus faible (1 œuf et J<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> de sol).

Les résultats relatifs à l'évaluation de l'activité nématocide des plantes de Brassicacées ont montré que tous les extraits testés contre *G. rostochiensis* provoquent une mortalité des larves (J<sub>2</sub>) et inhibent l'éclosion des œufs de ce nématode. Cet effet biocide des extraits aqueux est proportionnel aux doses appliquées et au temps d'exposition. Les taux de mortalité les plus élevés sont enregistrés pour les extraits aqueux de *R. sativus* avec 63.10% pour l'extrait des feuilles et 90.37% pour celui des racines. Les extraits de *N. officinale* ont enregistré des pourcentages plus faibles de 48.13 et 58.82% pour les racines et feuilles respectivement. De plus, les taux d'inhibition de l'éclosion des œufs étaient de 53.28 et 65.55% pour les extraits aqueux de feuilles et de racines de *R. sativus* et de 50.47 et 41.75 % pour les mêmes extraits de *N. officinale*. Enfin, l'utilisation de *R. sativus* comme engrais vert *in vivo* a montré une efficacité élevée avec une réduction des effectifs de 69.64% par rapport à *N. officinale* (27.43%), et une amélioration de la croissance des plants de pomme de terre et du poids de tubercules de l'ordre de 55.24 et 20.95% et de 44.02 et 13.04 % pour l'engrais vert du *R. sativus* et du *N. officinale* à la dose D3 respectivement.

Par ailleurs, le screening chimique réalisé par l'UHPLC a mis en évidence les principaux métabolites secondaires des feuilles et des racines des deux plantes testées. *R. sativus* est caractérisé par sa richesse en glucosinolates par rapport à *N. officinale*, avec la présence en grandes quantités de glucoraphasatin dans les racines. De plus, la présence de composés phénoliques dans les différentes parties des deux plantes dont principalement les flavonoïdes et les acides phénoliques ont été révélée.

Les données relatives à l'évaluation de l'effet des composts ont révélé l'efficacité du compost de fumier de volaille dans la réduction des populations de *G. rostochiensis* avec un pourcentage de 62.3%, par rapport aux composts de fumier de vache (43.39%) et de débris végétaux (34.86%). Toutefois, les amendements organiques ont montré une augmentation de la croissance des plants de pomme de terre et du poids de tubercules. De ce fait, des études complémentaires et plus approfondies sont nécessaires pour la gestion de ce redoutable bioagresseur.

**Mots clés :** *Globodera rostochiensis*., pomme de terre, cycle de vie, population initiale (Pi), Brassicacées, extraits aqueux, engrais vert, composts.

**Title: "study of relationships: *Globodera rostochiensis* Wollenweber - potato and search for alternative methods against this pest "**

**Summary:** Cyst nematodes of the *Globodera* genus represent a very serious threat to potatoes in Algeria and throughout the world, particularly due to their classification as a quarantine pest. The aim of the present study was to determine the life cycle duration of *G. rostochiensis* under natural conditions over two agricultural seasons, and to investigate the effect of different initial nematode population densities on potato growth and yield. This work was complemented by a search for alternative methods to evaluate the nematicidal activity of aqueous extracts from two *Brassicaceae* plants, *Nasturtium officinale* and *Raphanus sativus*, on larval mortality (J2) and egg hatching of *G. rostochiensis*, and by determining the nematicidal effect of green manures from these two plants *in vivo*. Finally, the effect of three types of compost on the development of nematode populations was studied.

The results revealed that the life cycle of *G. rostochiensis* lasted 66 and 73 days at 620 DJ<sub>6.2</sub> and 699 DJ<sub>6.2</sub> for the two varieties spunta and kondor, respectively, in spring. However, the cycle length of this nematode was 59 days at 402 DJ<sub>6.2</sub> for the spunta variety and 66 days at 459 DJ<sub>6.2</sub> for the kondor variety in winter. In addition, the effect of different densities showed that the loss of potato yield varied according to the initial density (Pi) of *G. rostochiensis* in the soil. The rate of yield reduction was 85% at the highest initial density (Pi =512 eggs and J2 g<sup>-1</sup> of soil) and 16% at the lowest Pi (1 egg and J2 g<sup>-1</sup> of soil).

Results on the evaluation of the nematicidal activity of brassicaceous plants showed that all aqueous extracts tested caused *G. rostochiensis* juvenile mortality and inhibited the eggs hatching of this nematode. The biocidal effect aqueous extracts increases with increasing concentration and exposure time. The high mortality of 63.10 and 90.37% was recorded for *R. sativus* leaf and root extracts. *N. officinale* revealed lower percentages of 48.13 and 58.82% for roots and leaves extracts respectively. In addition, egg hatch inhibition rates were 53.28, 65.5, 50.47 and 41.75% for *R. sativus* and *N. officinale* leaves and roots extracts respectively. Finally, the use of *R. sativus* green manure *in vivo* showed high efficacy (69.64%) in reducing nematode populations compared to *N. officinale* (27.43%). and an improvement in potato plant growth and tuber weight in the order of 55.24 and 20.95% and 44.02 and 13.04% for the green manure of *R. sativus* and *N. officinale* at dose D3 respectively.

In addition, chemical screening by UHPLC showed the main secondary metabolites in the leaves and roots of the two plants tested. *R. sativus* is richer in glucosinolates than *N. officinale*, with large quantities of glucoraphasatin in the roots. Thus, the presence of phenolic compounds in the different parts of both plants, mainly flavonoids and phenolic acids, was recorded.

Data on the evaluation of the effect of composts revealed that poultry manure compost is more effective in reducing *G. rostochiensis* populations of 62.3%, compared to cow manure (43.39%) and plants waste (34.86%) composts. However, organic amendments showed an increase in potato plant growth and tuber weight. As a result, further and more in-depth studies are needed for the management of this formidable pest.

**Keywords:** *Globodera rostochiensis*, potato, life cycle, initial population (Pi), Brassicas, aqueous extracts, green manure and composts.

العنوان: " دراسة العلاقات: *Globodera rostochiensis* Wollenweber - البطاطا و البحث عن طرق معالجة بديلة ضد هذه الآفة".

ملخص:

تشكل الديدان الخيطية من جنس *Globodera* خطرا كبيرا على محاصيل البطاطا في الجزائر و في العالم، لاسيما من خلال تصنيفها ضمن كائنات الحجر الصحي. تهدف هذه الدراسة إلى تحديد مدة الدورة البيولوجية لنوع *G. rostochiensis* في ظل الظروف الطبيعية، خلال موسمين زراعيين، و دراسة تأثير الزيادة في الكثافة العددية لهذه الديدان على نمو وإنتاجية البطاطا. استكملت هذه الدراسة بالبحث عن طرق بديلة من خلال تقييم فعالية بعض المستخلصات المائية، المنتمية إلى عائلة الكرنب الصغير (*Brassicacées*) "*Nasturtium officinale* و *Raphanus sativus* على يرقات الطور الثاني (J2) لـ *G. rostochiensis* ومعرفة مدى تأثيرها على تثبيط تقفيس البيض. من جهة أخرى، عن طريق تحديد تأثير الاسمدة الخضراء لهذين النباتين في الظروف الطبيعية (أصص زراعة). أخيراً، تمت دراسة تأثير فعالية ثلاثة أنواع من السماد (روث البقر، روث الدواجن، روث النباتات) على تطور عشائر هذه الديدان الخيطية.

أظهرت النتائج أن دورة حياة *G. rostochiensis* استمرت 66 و 73 يوماً مع  $DJ_{6,2}$  620 و  $DJ_{6,2}$  699 للصفين *spunta kondor* و *kondor* على التوالي في الربيع. لكن هذه الدورة دامت 59 يوماً عند  $DJ_{6,2}$  402 لمجموعة *spunta* و 66 يوماً عند  $DJ_{6,2}$  459 لصف *kondor* في الشتاء. بالإضافة إلى ذلك، أظهر تأثير اختلاف الكثافات أن خسارة محصول البطاطا يختلف باختلاف الكثافة الأولية (Pi) لـ *G. rostochiensis* في التربة، حيث بلغ معدل انخفاض الانتاج 85 % عند أعلى كثافة أولية (Pi = 512 بيضة و  $J2\ g^{-1}$  في التربة) و 16 % في Pi الأدنى (1 بيضة و  $J2\ g^{-1}$  في التربة).

أظهرت النتائج المتعلقة بتقييم النشاط المبيد للديدان الخيطية أن جميع المستخلصات المختبرة ضد *G. rostochiensis* سبب وفاة اليرقات (J2) و منعت فقس البيض. يتناسب طرداً تأثير المبيدات الحيوية للمستخلصات المائية مع الجرعات المطبقة و مدة التعرض. حيث سجل أعلى معدل وفيات لليرقات للمستخلص المائي *R. sativus* بتأثير وصل إلى 63.10 % بالنسبة للأوراق و وصل إلى 90.37 % بالنسبة للجذور. فيما سجلت مستخلصات *N. officinale* نسباً أقل بلغت 48.13 % و 58.82 % بالنسبة لمستخلصات الجذور و الأوراق على التوالي. إضافة إلى ذلك، كانت نسب تثبيط تقفيس البيض 53.28 % و 58.82 % بالنسبة للمستخلصات المائية لأوراق و جذور *R. sativus*، 50.47 % و 41.75 % لنفس المستخلصات الخاصة بـ *N. officinale*. أخيراً، أظهر استخدام *R. sativus* كسماد أخضر في اصص الزراعة فعالية كبيرة في تقليل أعداد الديدان الخيطية و وصلت إلى 64.69 % مقارنة بـ *N. officinale* التي كانت 27.43 %، و تحسن في نمو نبات البطاطا ووزن الدرناات بحوالي 55.24 و 20.95 %، و 44.02 و 13.04 % للسماد الأخضر لـ *R. sativus* و *N. officinale* عند الجرعة D3 على الترتيب.

علاوة على ذلك، كشف الفحص الكيميائي الذي أجري عن طريق تقنية UHPLC عن أهم العناصر الثانوية المتواجدة في أوراق و جذور النباتات المدروسة. يتميز *R. sativus* باحتوائه على كميات كبيرة من الجليكوزينولات مقارنة مع *N. officinale*. أهمها الجلوكورافاساتين الموجودة بوفرة في الجذور. أيضاً، تم الكشف عن مركبات فينولية في مختلف أجزاء النباتين و خاصة الفلافونويد و الاحماض الفينولية.

أكدت النتائج المتعلقة بتقييم تأثير السماد العضوي عن فعالية سماد الدواجن في تقليل أعداد *G. rostochiensis* بنسبة (62.3 %) مقارنة مع سماد الأبقار (43.39 %) و بقايا النباتات (34.86 %). في الأخير، أظهرت النتائج أن جميع الإضافات العضوية مكنت من زيادة معتبرة في نمو نباتات البطاطا و وزن الدرناات. ولذلك، من الضروري إجراء دراسات إضافية و متعمقة لإدارة هذه الآفة الهائلة.

الكلمات المفتاحية: *Globodera rostochiensis*، البطاطا، دورة الحياة، الكثافة الأولية Pi، الكرنب الصغير، مستخلص مائي، سماد أخضر، سماد عضوي.

**Titre : « Etude des relations : *Globodera rostochiensis* Wollenweber – Pomme de terre et Recherche de méthodes alternatives à l'égard de ce bioagresseur ».**

**Résumé :** Les nématodes à kystes du genre *Globodera* représente une menace très sévère sur pomme de terre en Algérie et dans le monde, notamment par son classement d'organisme de quarantaine. La présente étude vise à déterminer la durée du cycle biologique de *G. rostochiensis* dans les conditions naturelles pendant deux saisons agricoles et à étudier l'effet de différentes densités de population initiales du nématode sur la croissance et le rendement de la pomme de terre. Ce travail a été complété par la recherche des méthodes alternatives par l'évaluation de l'activité nématocide des extraits aqueux de deux Brassicacées ; *Nasturtium officinale* et *Raphanus sativus* ; sur la mortalité des larves (J<sub>2</sub>) et l'éclosion des œufs de *G. rostochiensis*, et d'autre part par la détermination de l'effet nématocide des engrais verts de ces deux plantes *in vivo*. Enfin, l'effet de trois types de composts sur le développement des populations de ce nématode a été étudié.

L'analyse des résultats a révélé que le cycle biologique de *G. rostochiensis* durait 66 et 73 jours avec 620 DJ<sub>6,2</sub> et 699 DJ<sub>6,2</sub> pour les deux variétés spunta et kondor, respectivement au printemps. Cependant, la durée du cycle de ce nématode était de 59 jours à 402 DJ<sub>6,2</sub> pour la variété spunta et 66 jours à 459 DJ<sub>6,2</sub> pour la variété kondor en hiver. De plus, l'effet de différentes densités a montré que la perte de rendement de la pomme de terre varie selon la densité initiale (Pi) de *G. rostochiensis* dans le sol. Le taux de réduction des rendements a atteint 85 % à la densité initiale la plus élevée (Pi = 512 œufs et J<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> de sol) et 16 % pour le Pi le plus faible (1 œuf et J<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> de sol).

Les résultats relatifs à l'évaluation de l'activité nématocide des plantes de Brassicacées ont montré que tous les extraits testés contre *G. rostochiensis* provoquent une mortalité des larves (J<sub>2</sub>) et inhibent l'éclosion des œufs de ce nématode. Cet effet biocide des extraits aqueux est proportionnel aux doses appliquées et au temps d'exposition. Les taux de mortalité les plus élevés sont enregistrés pour les extraits aqueux de *R. sativus* avec 63.10% pour l'extrait des feuilles et 90.37% pour celui des racines. Les extraits de *N. officinale* ont enregistré des pourcentages plus faibles de 48.13 et 58.82% pour les racines et feuilles respectivement. De plus, les taux d'inhibition de l'éclosion des œufs étaient de 53.28 et 65.55% pour les extraits aqueux de feuilles et de racines de *R. sativus* et de 50.47 et 41.75 % pour les mêmes extraits de *N. officinale*. Enfin, l'utilisation de *R. sativus* comme engrais vert *in vivo* a montré une efficacité élevée avec une réduction des effectifs de 69.64% par rapport à *N. officinale* (27.43%), et une amélioration de la croissance des plants de pomme de terre et du poids de tubercules de l'ordre de 55.24 et 20.95% et de 44.02 et 13.04 % pour l'engrais vert du *R. sativus* et du *N. officinale* à la dose D3 respectivement.

Par ailleurs, le screening chimique réalisé par l'UHPLC a mis en évidence les principaux métabolites secondaires des feuilles et des racines des deux plantes testées. *R. sativus* est caractérisé par sa richesse en glucosinolates par rapport à *N. officinale*, avec la présence en grandes quantités de glucoraphasatin dans les racines. De plus, la présence de composés phénoliques dans les différentes parties des deux plantes dont principalement les flavonoïdes et les acides phénoliques ont été révélée.

Les données relatives à l'évaluation de l'effet des composts ont révélé l'efficacité du compost de fumier de volaille dans la réduction des populations de *G. rostochiensis* avec un pourcentage de 62.3%, par rapport aux composts de fumier de vache (43.39%) et de débris végétaux (34.86%). Toutefois, les amendements organiques ont montré une augmentation de la croissance des plants de pomme de terre et du poids de tubercules. De ce fait, des études complémentaires et plus approfondies sont nécessaires pour la gestion de ce redoutable bioagresseur.

**Mots clés :** *Globodera rostochiensis*., pomme de terre, cycle de vie, population initiale (Pi), Brassicacées, extraits aqueux, engrais vert, composts.