

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث 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

Département : Zoologie Agricole et Forestière.

Option : *Biologie et écologie en zoologie agro-sylvo pastorale*

Thème

**Répartition spatio-temporelle des nématodes à kyste des
céréales en Algérie. Effet du nématode sur les paramètres du
rendement de blé dur.**

Présenté par : **M. DJETTI Tayeb**

Devant le jury :

Président : **M. DOUMANDJI S.E.** Professeur (E.N.S.A. El Harrach)

Directeur de thèse : **M. HAMMACHE M.** Professeur (E.N.S.A. El Harrach)

Examineurs :

M. MOKABLI A. Professeur (Univ. D. Bounaama Khemis Miliana)

Mme. DAOUDI-HACINI S. Professeur (E.N.S.A. El Harrach)

Mme. MOUHOUCHE F. Professeur (E.N.S.A. El Harrach)

Mme. MARNICHE F. M.C.A (E.N.S.V. El Harrach)

Soutenu le : 04/05/2019

Remercîments

En premier lieu, je remercie Dieu le Tout Puissant de m'avoir donné la force et la volonté de réaliser ce modeste travail.

Tous mes remerciements vont ensuite à mes parents, sans qui, ce travail n'aurait pu aboutir ; vos sacrifices, vos encouragements et vos prières m'ont permis de vivre ce jour. Rien ne saurait exprimer la fierté, la reconnaissance et l'amour que je vous porte. Qu'Allah vous procure, santé et longue vie.

Je voudrais remercier vivement mon directeur de thèse Mr. Hammache M, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique, de m'avoir confié ce sujet de thèse et d'avoir accepté de diriger ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance et mon profond respect pour ses précieux conseils, son aide et sa disponibilité.

Je tiens à remercier vivement Mr DOUMANDJI S.E. Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique, pour ses encouragements, ses conseils très positifs et pour l'honneur qui me fait de présider le jury.

Mes sincères remerciements vont à M. MOKABLI A. Professeur à l'université D. Bounaama Khemis Miliana, à Mme. MOUHOUCHE F. et Mme DAOUDI-HACINI Professeurs à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique et Mme. MARNICHE F. Maitre de conférence à l'Ecole Nationale Supérieure vétérinaire, d'avoir accepté d'examiner ma thèse malgré leur charge de travail.

J'adresse mes remerciements à l'équipe de l'OHU (Université de Omar Halisdimir)/ Ayhan Sahenk Faculty of Agricultural Sciences and Technologies, Department of Plant Production and Technologies, Nigde. Turquie, particulièrement au Dr. Halil Toktay pour l'identification et toute l'aide

technique et personnelle qu'il m'a apporté durant mon séjour. Je remercie aussi F. Mokrini, I. Laraba, G. Kaci, H. Chreier, K. Mehelaine et D. Babaali pour leurs collaborations.

Mes sincères remerciements vont à tous les enseignants, ingénieurs de laboratoires et doctorants du Département de Zoologie Agricole et Forestière pour leurs conseils et leur soutien moral. Plus particulièrement à Mme Doumandji-Mitiche B., Ghezali D., Que dieu l'accueille en son vaste paradis, Menzer N., Aillem O., Boulaouad B.A., Belkacem M., Sadaissous S., Kheroubi M., Lekhal M.A., Zaidat S. et l'équipe du laboratoire de nématologie de l'ENSA., Mme Souraya, et les ingénieurs de laboratoire. Annane F., Azimi H., et Quadiri R.

Merci infiniment à ma Famille de m'avoir soutenu, aidé et supporté. A toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent l'expression de ma haute considération.

Liste des abréviations

NKC. : Nématode à kyste des céréales

NKB. : Le nématode à kyste de la betterave

MADRP : Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche

FAO: Food and agriculture organisation

H.: Heterodera

ADN : Acide Désoxyribo Nucléique

ADNr : Acide Désoxyribo Nucléique ribosomique

ITS : The internal transcribed spacer =Espaceur Transcrit Interne (ITS)).

PCR : Réaction de chaîne de polymérase

RFLP : Polymorphisme de longueur des fragments de restriction

ANOVA : Analyse de la variance

J₂ : Juvéniles du deuxième stade larvaire

NCBI : Centre national d'information sur les biotechnologies

Liste des tableaux

Tableau 1. Classement des pays producteurs du blé dans le monde en 2016 (FAO, 2018)	10
Tableau 2. Superficies, productions et rendements de blé dur en Algérie en 2015 (MADRP, 2016).....	11
Tableau 3. Les nématodes à kyste et leur majeure importance économique (Subbotin <i>et al.</i> , 2010 citer par Perry et Moens, 2013).	17
Tableau 4. Principales sources de gènes utilisés dans le blé (<i>Triticum aestivum</i>) pour la résistance au nématode à kyste des céréales <i>H.avenae</i> (Smiley et Nicol, 2009).	33
Tableau 5. Superficie, production et rendement de blé dur dans les régions d'étude durant l'année 2015 (MADRP, 2016).	36
Tableau 6. Localisation géographique des régions d'étude.	47
Tableau 7. Températures moyennes mensuelles, maxima et minima des régions d'étude.	50
Tableau 8. Précipitation mensuelles exprimées en mm des régions d'étude.	52
Tableau 9. Caractéristique de la méthode d'extraction (Van Bezooijen., 2006).....	62
Tableau 10. Codes et origine des populations de nématodes à kyste des céréales utilisées dans cette étude.	65
Tableau 11. Séquences des amorces utilisées pour l'amplification des régions de l'ADN (Subbotin <i>et al.</i> , 2001).	68
Tableau 12. Programme PCR utilisé pour l'amplification d'ADN.	68
Tableau 13. Les principaux caractéristiques des variétés étudiées (Boufenar-Zaghouan et Zaghouan, 2006 ; CNCCSP., 2009 ; El Fakhri <i>et al.</i> , 2010 ; Ladjal <i>et al.</i> , 2014 ; Benmounah et Brinis, 2018).....	71
Tableau 14. Récapitulatif de la fertilisation azotique et phosphorique.....	76
Tableau 15. Traitements phytosanitaires appliqués.	78
Tableau 16. Date de semis et la récolte pour les campagnes 2015/16 et 2016/17.....	78
Tableau 17. Variation de température journalière et d'humidité de la serre durant la campagne 2015/16.	80
Tableau 18. Le degré d'infestation des nématodes à kystes des céréales <i>Heterodera</i> spp. dans les régions d'étude, au cours de la campagne 2015-2016.	86

Tableau 19. Code, origine des espèces et numéro d'accèsion sur la base des données NCBI.....	98
Tableau 20. Numéros d'accèsion pour plusieurs ITS, rADN d'espèces du complexe <i>H.avenae</i>	99
Tableau 21. Espèce et origine de nématode (<i>H. hordecalis</i>) utilisée pour l'analyse phylogénétique.....	105
Tableau 22. Espèces des nématodes (<i>Heterodera</i> spp.) et populations téléchargées du NCBI utilisées dans l'analyse phylogénétique.....	109
Tableau 23. Espèce et origine de nématode de groupe <i>schachtii</i> utilisée pour l'analyse phylogénétique.....	113
Tableau 24. Différentes paramètres de rendements mesurés des différentes variétés infestées et leurs témoins.....	118
Tableau 25. Résultats globaux de la moyenne des paramètres de rendement entre les variétés témoins et les infestées.....	120
Tableau 26. L'analyse de la variance de l'effet de l'année, inoculum et les variétés en fonction de nombre des tiges.....	121
Tableau 27. L'analyse de la variance de l'effet de l'année/inoculum/variétés en fonction de longueur des tiges.....	122
Tableau 28. L'analyse de la variance de l'effet d'inoculum et variétés en fonction de longueur des épis.....	123
Tableau 29. L'analyse de la variance de l'effet d'inoculum et variétés sur la largeur des épis.....	124
Tableau 30. L'analyse de la variance de l'effet d'inoculum et variétés sur le nombre des grains par épi.....	125
Tableau 31. Densité de population finale (Pf) et facteur de reproduction (Fr) d' <i>H.avenae</i> sur quatre variété cultivé de blé dur.....	127

Liste des figures

- Figure 1.** Carte de la diffusion de la culture du blé (*Triticum* sp.) (Bonjean., sd). 7
- Figure 2.** Les relations évolutives et génomiques entre le blé sauvage et le blé dur et les herbes diploïdes sauvages apparentées, montrant des exemples d'épis et de grains. (AA.BB.DD.) Génome (Shewry., 2009)..... 8
- Figure 3.** Échelle de Zadock décrivant le cycle de développement du blé (Zadoks *et al.*, 1974). Chaque étape clé du développement est désignée par un nombre allant de 10 à 92. 12
- Figure 4.** Exemples de la diversité des formes de stylet et de queue de juvénile de deuxième stade (J₂) des nématodes de type A à G, stylets (à gauche latérale et à droite dorsale). A: *Heterodera mani*; B: *H. glycines*; C: *H. trifolii*; D: *H. zaeae*; E: *Globodera rostochiensis*; F: *G. pallida*; G: *G. tabacum*; H-O: Queues (vue latérale). H: *H. goettingiana*; I: *H. schachtii*; J: *H. trifolii*; K: *H. spinicauda*; L: *H. avenae*; M: *H. hordecalis*; N: *H. ustinoi*; O: *H. bifenestra*. A-D après les Wouts et Baldwin (1998), E-F d'après Baldwin et Mundo-Ocampo (1991), H-O d'après Wouts et Weischer (1977), Sharma (1998) in Subbotin *et al.*, 2010a..... 19
- Figure 5.** Stade larvaire d'*H.avenae*. (A) Forme vermiforme du stade juvénile infectieux qui émerge d'un kyste (0,5 mm de long) ; (B) femelle blanche élargie incrustée dans une racine ; (C) brun en forme de citron kyste (0,5 × 0,7 mm) contenant des centaines d'œufs ; (D) œufs (50 × 130 µm) contenant de faibles contours du stade juvénile infestant en développement ; (E) kystes extraits d'un sol sec; (F) les œufs et les juvéniles infectieux libérés lorsqu'un kyste sec a été broyé (Smiley et Yan., 2010) 23
- Figure 6.** Un dessin illustré du cycle de vie d'un nématode à kyste des céréales; kyste rempli d'œufs hivernants dans le sol (A), œufs contenant du deuxième stade du juvénile (J₂) (B), J₂ libre dans le sol (C), racines de la plante hôte infesté (D), attaque de jeunes racines par J₂ et se développant à divers stades (E), mâle libre dans le sol (F), femelle mature et formation de syncytium (G), femelle mature et kyste toujours attaché à la racine (H).(Smiley *et al.*, 2017). 24
- Figure 7.** La croissance hétérogène du blé d'hiver causée par *H.avenae*. Le champ n'a pas été irrigué, et la surface était d'un niveau uniforme on Oregon (Etats-Unis) (Smiley et Yan., 2010 ; Smiley *et al.*, 2017). 25

Figure 8. Racines de blé de légèrement infesté (à gauche, A) et fortement infesté (à droite, B) par <i>H.avenae</i> (Smiley et Yan., 2010 ; Smiley <i>et al.</i> , 2017).	26
Figure 9. Répartition des trois principales espèces de nématodes à kystes des céréales (Toumi., 2017).	30
Figure 10. Carte de l'Algérie montrant les zones d'échantillonnage pour les nématodes à kystes des céréales (<i>Heterodera</i> spp.) (Originale).	37
Figure 11. Situation géographique des stations d'étude dans la région de Tissemsilt (Originale).	39
Figure 12. Situation géographique des stations d'étude dans la région de Blida (Originale).	40
Figure 13. Situation géographique des stations d'étude dans la région de Bouira (Originale).	41
Figure 14. Situation géographique des stations d'étude dans la région de Médéa (Originale).	42
Figure 15. Situation géographique des stations d'étude dans la région d'Ain Defla. (Originale).	43
Figure 16. Localisation de la zone d'étude dans la wilaya de Mostaganem (Originale).	45
Figure 17. La situation géographique de la région d'Adrar (Originale).	46
Figure 18. Situation géographique des stations d'étude dans la région de Bordj Bou Arreridj (Originale).	47
Figure 19. Diagramme ombrothermique des régions d'étude.	56
Figure 20. La place des régions d'étude dans le Climagramme d'Emberger.	58
Figure 21. La méthode Fenwick. Extraction des kystes du sol sec (Bezooijen., 2006)...	61
Figure 22. Loupe binoculaire (Leica) branché à un ordinateur (Originale).	63
Figure 23. Structure des gènes d'ADNr et position des amorces universelles (Subbotin <i>et al.</i> , 2001) (The internal transcribed spacer =Espaceur Transcrit Interne (ITS)).	64
Figure 24. Incubateur Thermo Shaker (Euro lone) (Originale).	67
Figure 25. (a) Thermocycleur Thermal Cycler ; (b) Electrophorèse d'ADN sur gel d'agarose ; (c) coloration du gel avec du bromure d'Ethidium (0,1 µg ml ⁻¹) (Originale).	69
Figure 26. Inoculation des kystes d' <i>H.avenae</i> après deux jours de semis (Originale). ...	74

Figure 27. Dispositif expérimental de la campagne 2015/16 (Condition sous serre) à l'ENSA. (Originale).....	75
Figure 28. Dispositif expérimental de la campagne 2016/17 (Condition naturel) à l'ENSA. (Originale).....	76
Figure 29. Application de la fertilisation des plants (Originale).....	77
Figure 30. Attaques des champignons et des insectes sur le blé (Originale).	79
Figure 31. Les caractères morphologiques mesurés (Variété ; Bousselem).	81
Figure 32. Morphologie des nématodes à kystes (A) kyste de couleur marron d' <i>H. schachtii</i> ; (B) des œufs d' <i>H.avenae</i> ; (C et D) une larve J _{2s} d' <i>H. cruciferae</i> et <i>H.avenae</i> . (Originale).....	84
Figure 33. Analyse de la variance de nombre des kystes par 500 g de sol dans les localités étudiées	90
Figure 34. Analyse de la variance de nombre des œufs +J _{2s} / kyste dans chaque parcelle infestée.	91
Figure 35. Nombre moyen des œufs et des larves J _{2s} par 100 g de sol.	92
Figure 36. Carte de répartition des nématodes à kystes des céréales <i>Heterodera</i> spp., en Algérie dans les zones d'étude au cours de la campagne 2015/16 (Djetti <i>et al.</i> , 2018). ..	94
Figure 37. Les résultats de l'amplification par PCR de l'ADN d' <i>Heterodera</i> spp.	97
Figure 38. Arbre phylogénétique (maximum de vraisemblance) des séquences Espace Transcrit Interne (ITS) des nématodes.....	104
Figure 39. Arbre phylogénétique pour les 3 populations de nématodes à kystes caractérisées dans cette étude et 23 populations précédemment signalées. L'arbre a été construit sur la base des séquences rDNA-ITS en utilisant la méthode de Neighbor-joining N.J. (MEGA 7.0).....	107
Figure 40. La topologie de l'arbre de vraisemblance pour toutes les populations étudiées avec l'ajout de populations de goettingiana groupe obtenues de GenBank sur la base de l'alignement de séquence de l'ADNr.....	110
Figure 41. Analyse phylogénétique moléculaire (maximum de vraisemblance) construite par l'alignement des séquences ITS pour 29 nématodes à kyste de groupe <i>H. schachtii sensu stricto</i>	114

Figure 42. Carte de distribution des espèces des nématodes à kystes (NKC ; *Heterodera* spp.) en Algérie..... 117

Sommaire

Liste des abréviations.....	i
Liste des tableaux.....	ii
Liste des figures	iv
Sommaire	1
<i>Introduction</i>	1
<i>Chapitre I - Données bibliographiques</i>	6
I.1. Origines et historiques des blés	7
I.2. Importance de culture de blé	9
I.2.1. Dans le monde	9
I.2.2. En Algérie.....	10
I.3. Classification botanique	11
I.4. Cycle de développement.....	12
1.4.1. La période végétative	13
1.4.1.1. La phase germination – levée	13
1.4.1.2. La phase levée – tallage	13
1.4.2. Période reproductrice	13
1.4.2.1. Phase montaison- gonflement.....	14
1.4.2.2. Phase épiaison-floraison	14
1.4.3. Période de formation et de maturation du grain.....	14
1.5. Contraintes de la production des céréales	15
I.6. L'importance, la biologie et les stratégies de gestion des nématodes à kystes des céréales (<i>Heterodera spp.</i>).....	15
I.6.1. Position taxonomique des nématodes à kystes	16
I.6.2. Identification des espèces d' <i>Heterodera</i>	18

I.6.2.1. Kyste.....	18
I.6.2.2. Juvéniles de deuxième stade.....	18
I.6.3. Identification moléculaire.....	20
I.6.4. Pathotypes.....	20
I.6.5. Biologie des nématodes à kyste des céréales (NKC)	21
I.6.6. Symptômes.....	25
I.6.7. Distribution et importance	26
I.6.7.1. <i>Heterodera avenae</i> Wollenweber, 1924 (Nématode à kystes des céréales).....	27
I.6.7.2. <i>Heterodera latipons</i> Franklin, 1968 (Méditerranéen Nématode à kystes des céréales)	27
I.6.7.3. <i>Heterodera filipjevi</i> (Madzhidov) Steler, 1984.	28
I.6.8. Stratégies de gestion du nématode à kyste des céréales	31
I.6.8.1. Rotation des cultures	31
I.6.8.2. Résistance et Tolérance	32
I.6.8.3. Nématicides	34
Chapitre II. Matériels et Méthodes.....	35
II.1. Présentation des régions d'études	36
II.1.1. Zones d'échantillonnage	36
II.1.1.1. Situation géographique de la région de Tissemsilt.....	38
II.1.1.2. Situation géographique de la région de Blida	39
II.1.1.3. Situation géographique de la région de Bouira	40
II.1.1.4. Situation géographique de la région de Médéa	41
II.1.1.5. Situation géographique de la région d'Ain Defla.....	43
II.1.1.6. Situation géographique de la région de Mostaganem	44
II.1.1.7. Situation géographique de la région d'Adrar	45

II.1.1.8. Situation géographique de la région de Bordj Bou Arreridj	46
II.1.2. Facteurs climatiques	48
II.1.2.1. Température	48
II.1.2.2. Pluviométrie.	52
II.1.3. Synthèse climatique.....	53
II.1.3.1. Diagramme ombrothermique	53
II.1.3.2. Place des régions d'études dans le climagramme d'Emberger	57
II.2. Etude de l'état d'infestation des régions d'étude par les nématodes à kystes inféodés aux céréales	59
II.2.1. Échantillonnage du sol	59
II.2.2. Extraction des nématodes.....	60
II.2.2.1. Fenwick can.....	60
II.2.2.1.1. Principe et méthode.....	60
II.2.2.1.2. Procédure.....	60
II.2.2.1.3. Avantages et inconvénients.....	62
II.2.3. Récupération des kystes	62
II.2.4. Estimation et comptage du contenu du kyste	63
II.3. Identification moléculaire des espèces de nématodes à kystes (<i>Heterodera</i> spp.) en Algérie et une phylogénie basée sur des séquences ITS-ADNr.	64
II.3.1. Nématodes populations	65
II.3.2. Réaction de chaîne de polymérase (PCR)	66
II.3.3. Caractérisation moléculaire.....	66
II.3.3.1. Extraction d'ADN.....	66
II.3.3.2. Amplification de la PCR	67
II.3.3.3. Séquençage d'ADN.....	70
II.3.3.4. Analyse phylogénétique	70

II.4. Capacité d'hôte de quatre variétés de blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.) à l'égard d'une population d' <i>H.avenae</i> .	71
II.4.1. Variétés testées du blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.)	71
II.4.2. Inoculum	73
II.4.3. Dispositif expérimental	73
II.4.4. Entretien de la culture	76
II.4.4.1. Fertilisation	76
II.4.4.2. Traitements phytosanitaires	77
II.4.5. La récolte	78
II.4.6. Evaluation de la résistance	80
II.4.6.1. Etude des caractères morphologiques	80
II.4.6.1.1. Nombre et hauteur des tiges	80
II.4.6.1.2. Longueur et largeur de l'épi	80
II.4.6.2. Etude des caractères de production	81
II.4.6.2.1. Nombre de grains par épi	81
II.4.6.2.2. Le poids des grains	81
II.4.6.2.3. Le rendement en grain estimé	81
II.4.7. Analyse statistique	82
II.4.8. Test d'évaluation de sensibilité de blé dur vis-à-vis d' <i>H.avenae</i>	82
Chapitre III. Résultats et discussions	83
III.1. Description du nématode à kystes des céréales (NKC)	84
III.2. Etude de l'état d'infestation de quelques parcelles par les nématodes à kystes inféodés aux céréales.	85
III.2.1. L'analyse de la variance (ANOVA)	89
III.2.1.1. Nombre de kystes par 500 g de sol	89

III.2.1.2. Le nombre d'œufs et de juvéniles (J ₂ s) par kyste	90
III.2.1.3. Nombre des œufs et des J ₂ s par 100g de sol	91
III.3. Caractérisations moléculaires des nématodes à kystes du genre <i>Heterodera</i> (<i>Tylenchida</i> : <i>Heteroderidae</i>) en Algérie, sur la base d'analyse d'ADN-ITS.	95
III.3.1. Identification moléculaire.	96
III.3.1.1. Amplification d'ADN.	96
III.3.1.2. Analyse des séquences.	96
III.3.2. Analyse phylogénétique des espèces des nématodes à kyste <i>Heterodera</i> spp.	98
III.3.2.1. Le nématode à kystes des céréales (NKC) <i>H.avenae</i> Wollenweber, 1924.	98
III.3.2.2. Le nématode à kyste de l'orge <i>Heterodera hordecalis</i> Andersson, 1975.	105
III.3.2.3. Le nématode à kyste du chou <i>H. cruciferae</i> Franklin, 1945.	108
III.3.2.4. Le nématode à kyste de la betterave <i>H. schachtii</i> Schmidt, 1871. (NKB).	112
III.4. Cartographie de distribution des nématodes à kyste en Algérie.	116
III.5. Capacité d'hôte de quatre variétés de blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.) à l'égard d'une population d' <i>H.avenae</i>	118
III.5.1. Comparaison entre les variétés de blé dur en tenant compte les différents paramètres.	118
III.5.1.1. Paramètres morphologiques.	119
III.5.1.1.1. Nombre des tiges.	119
III.5.1.1.2. Longueur des tiges (cm).	121
III.5.1.1.3. Nombre d'épis.	122
III.5.1.1.4. Longueur des épis (cm).	123
III.5.1.1.5. Largeur des épis (cm).	123
III.5.1.2. Les composantes du rendement	124
III.5.1.2.1. Nombre des grains/épi	124
III.5.1.2.2. Poids de 1000 grains (PMG)	125

III.5.1.2.3. Effet des nématodes sur le rendement.	125
III.5.1.2.4. Perte de rendement.....	126
III.5.2. Test d'évaluation de sensibilité de blé dur vis-à-vis d' <i>H.avenae</i>	127
Conclusion générale.....	130
Références bibliographiques.....	135
Annexes	163
Résumés	165

Introduction

Introduction

La céréaliculture est la plus importante et la plus stratégique dans le monde. Parmi les céréales, le blé représente une spéculation de premier ordre dans la sécurité alimentaire mondiale. En 2016, la production mondiale de blé a atteint 759,7 millions de tonnes (Mt) (FAO, 2018). En Algérie, 2 millions d'hectares sont emblavés en céréales pendant la campagne agricole 2015-2016, avec une production estimée à 3,3 Mt (FAO, 2017). Cette production ne répond pas aux besoins des algériens. En 2016/2017, l'Algérie a importé 8 Mt de blé (FAO, 2017). Parmi les facteurs biotiques, l'obstacle à la production céréalière est les dégâts causés par les nématodes phytoparasites. Les nématodes à kystes des céréales (NKC : *Heterodera* spp.) ont un impact majeur sur la diminution du rendement des céréales dans le monde (Handoo, 2002 ; Namouchi-Kachouri et B'Chir, 2005 ; Akar *et al.*, 2009 ; Toumi *et al.*, 2013 ; Ahmadi et Tanha Maaf, 2014). Les pertes de rendement dues au NKC sur le blé sont supérieures à 50% en Iran (Hajihassani *et al.*, 2010), 26-96% en Tunisie (Namouchi-Kachouri *et al.*, 2009), 24 % en Syrie (Singh *et al.*, 2009), 40-50% au Maroc (Rammah, 1994 in Mokrini *et al.*(2018) et entre 23-50% en Australie (Nicol *et al.*, 2002). Il a été estimé que la perte annuelle de rendement est de 72 millions de dollars australiens en Australie (Brown, 1981 in Mokrini *et al.*, 2018). On estime qu'au moins 3,4 millions de dollars US en production de blé sont perdus annuellement en raison des NKC dans les États américains de l'Idaho, de l'Oregon et de Washington (Turner et Subbotin, 2013). Douze des 80 espèces d'*Heterodera* endommagent les racines des céréales et des graminées (poacées) (Akar *et al.*, 2009 ; Subbotin *et al.*, 2010 ; Ahmadi et Tanha Maaf, 2014). Parmi celles-ci, *H.avenae* Wollenweber, 1924, *H. flipjevi* Madzhidov, 1981 et *H. latipons* Franklin, 1969 sont les principales espèces causant les dommages les plus graves au blé (Nicol, 2002 ; Toktay *et al.*, 2015 ; Tirchi *et al.*, 2016).

Des études antérieures ont montré que les NKC sont potentiellement un facteur limitant dans la production de blé en Algérie. Le premier signalement d'une espèce du groupe *Avenae* sur blé en Algérie a été fait par Scotto La Massese (1962). Depuis, les *Heterodera* spp. sont devenues de plus en plus nombreuses, dominantes dans le nord de l'Algérie dans les régions productrices de céréales, Tissemsilt (Djetty *et al.*, 2014), Aïn Defla (Tirchi *et al.*, 2016), Alger (Haddadi *et al.*, 2013), Tiaret (Mokabli *et al.*, 2002 ; Haddadi et Mokabli, 2015). Mascara (Smaha *et al.*, 2018a). Cependant, on sait peu de choses sur l'occurrence et la distribution des NKC sur le blé en Algérie. Les objectifs de la présente étude sont :

Introduction

1. D'étudier l'infestation et la répartition des NKC (*Heterodera* spp.) prélevées dans le nord et le sud du pays.
2. D'évaluer les niveaux d'infestation et comparer les données obtenues avec celles des enquêtes précédentes menées en Algérie.

Le nématode endoparasite sédentaire du genre *Heterodera* Schmidt, 1871 divisé en plusieurs groupes taxonomiques et espèces : Avenae (*H. filipjevi*, *H. hordecalis*, *H. latipons*) ; Goettingiana (*H. goettingiana*, *H. carotae*, *H. urticae* et *H. cruciferae*) ; Humuli (*H. humuli*, *H. ripae*) et Schachtii (*H. ciceri*, *H. fici* et *H. schachtii*) (Madani et al, 2004 ; Subbotin et al, 2001b ; Subbotin et al, 2010 ; Turner et Subbotin, 2013). Il a été démontré que certaines de ces espèces sont hautement pathogènes pour les légumineuses (Greco *et al.*, 1991), le blé (Imren et Elekcioglu, 2014), la betterave sucrière (Sekimoto *et al.*, 2017), la carotte (Escobar-Avila *et al.*, 2018) et les plants d'oliviers (Castillo et Vovlas, 2007). Au sein de chaque groupe *Heterodera*, seules des différences morphologiques et morphométriques mineures peuvent distinguer toutes ces espèces les unes des autres. L'identification basée sur la morphologie et la morphométrie des kystes et des juvéniles de deuxième stade prend beaucoup de temps et exige beaucoup de compétences. Cependant, l'identification moléculaire est devenue essentielle, plus populaire et plus rapide permettant l'identification précise des espèces et sous-espèces de nématodes à kystes (Baklawa *et al.*, 2015 ; Pridannikov *et al.*, 2015 ; Smiley et Yan., 2015 ; Subbotin *et al.*, 2001a ; Toumi *et al.*, 2013). Des approches moléculaires utilisant la région d'espaceur transcrit interne (ITS) de séquences de gènes d'ARNr ont été appliquées avec succès pour l'identification des espèces et la caractérisation des relations phylogénétiques dans le genre *Heterodera*. La région ITS de l'unité de répétition de l'ADN ribosomal est un bon choix pour les études taxonomiques et phylogénétiques moléculaires. Les gènes ribosomiaux flanquant cette région sont hautement conservés, ce qui permet la construction d'amorces permettant l'amplification en chaîne polymérase (PCR) de la région ITS, qui peut être utilisée à des buts taxonomique. Ces dernières années, les diagnostics PCR-ITS-rDNA sont un outil fiable pour une identification précise et rapide des nématodes à kystes. (Subbotin *et al.*, 2003, 2018 ; Maafi *et al.*, 2003 ; Sasanelli *et al.*, 2013 ; Cui *et al.*, 2016 ; Madani *et al.*, 2017 ; Mwamula *et al.*, 2018). En Algérie, Peu de travaux ont été réalisés sur l'identification des nématodes à kystes du genre *Heterodera*. Citons les travaux de : Bekal

Introduction

et al., 1997, ; Rivoal *et al.*, 2003 ; Tirchi *et al.*, 2016, Smaha *et al.*, 2018a et b. Les objectifs de cette étude sont :

3. D'identifier les nématodes à kyste du genre *Heterodera* en séquençant la région ITS.
4. D'effectuer une analyse phylogénétique comparant les populations algériennes avec les autres séquences disponibles dans la banque des gènes.
5. Cette étude visait aussi à étudier les relations phylogénétiques de certaines espèces sur la base d'analyses de la parcimonie maximale et de l'évolution minimale de l'alignement des séquences de l'ITS.
6. Dresser une carte indiquant la répartition des espèces des nématodes à kystes dans le pays.

H.avenae a été signalé comme étant le nématode le plus répandu et le plus nuisible pour le blé et l'orge dans différentes parties du monde (Handoo, 2002 ; Hassan *et al.*, 2010). Ces nématodes ont une importance économique reconnue pour le blé dans les endroits où la sécheresse et la monoculture des céréales sont prédominantes (Nicol et Rivoal 2009).

La relation entre la densité de population initiale du NKC et la croissance et le rendement du blé est très étroite (Hassan *et al.*, 2010 ; Hajihassani *et al.*, 2010) et, par conséquent, il s'agit d'une information de base pour toute tactique de lutte contre le nématode. Les informations sont manquantes pour l'effet d'*H.avenae* sur blé en Algérie. Les travaux publiés sur l'impact des nématodes à kystes des céréales sur le blé sont presque insignifiants. Par conséquent, l'objectif de ce travail est :

7. Estimer l'impact d'*H.avenae* sur les composantes de rendement des quatre variétés de blé dur (Chen's, Vitron, Bousselam et Oued Zenati) et avec le potentiel de reproduction des nématodes.

Ce travail consiste dans un premier chapitre à faire une analyse bibliographique sur les céréales en rappelant en plus de leur importance agroéconomique, Il est nécessaire également de passer en revue sur les contraintes de production et de développement de cette culture. Pour bien introduire le sujet, une présentation de l'importance des nématodes à kystes des céréales, leur biologie et les stratégies de gestion s'avère indispensable.

Le deuxième chapitre, les matériels et les méthodes, qui servent à la connaissance de la bio écologie des nématodes à kystes du genre *Heterodera* sont données pour l'évaluation

Introduction

de l'état d'infestation des parcelles étudiées se situant au nord et au sud d'Algérie. Ajouter à cela les matériels ayant permis l'identification des espèces des nématodes par la technique de PCR dans le but de confirmer cette diversité biologique existante en Algérie. Avec les modèles d'inoculation des nématodes dans des conditions contrôlées, l'étude de l'effet d'une population d'*Heterodera avenae* originaire de la région d'Ain Defla sur les paramètres du rendement de quatre variétés de blé est réalisée.

Le troisième chapitre, présente les résultats obtenus, leurs analyses et discussions en comparaison avec les travaux réalisés dans le monde.

Une conclusion générale termine ce travail suivie par des perspectives qui permettra de tracer des grandes lignes de nouvelles possibilités de recherche en matière de protection des végétaux.

Chapitre I - Données bibliographiques

I.1. Origines et historiques des blés

La première culture de blé a eu lieu il y a environ 10 000 ans. Ces premières formes cultivées étaient des blés diploïdes (génome AA) (einkorn) et tétraploïdes (génome AABB) (emmer) et leurs relations génétiques indiquent qu'ils provenaient de la partie sud-est de la Turquie (Heun *et al.*, 1997; Nesbitt, 1998 ; Dubcovsky et Dvorak, 2007). La culture s'est répandue au Proche-Orient il y a environ 9 000 ans lorsque le blé panifiable hexaploïde a fait sa première apparition (Feldman, 2001).

La culture des blés s'est propagée vers l'Europe et l'Asie simultanément au fil des migrations et des échanges commerciaux (Balfourier *et al.*, 2007). Elle apparaît en Afrique vers 6 000 av. J-C, atteint l'Angleterre et la Scandinavie vers 3 000 av. J-C et enfin la Chine vers 2 000 av. J-C. La culture du blé sur le continent américain est introduite par les Espagnols au cours du XVII^e siècle (Fig. 1).

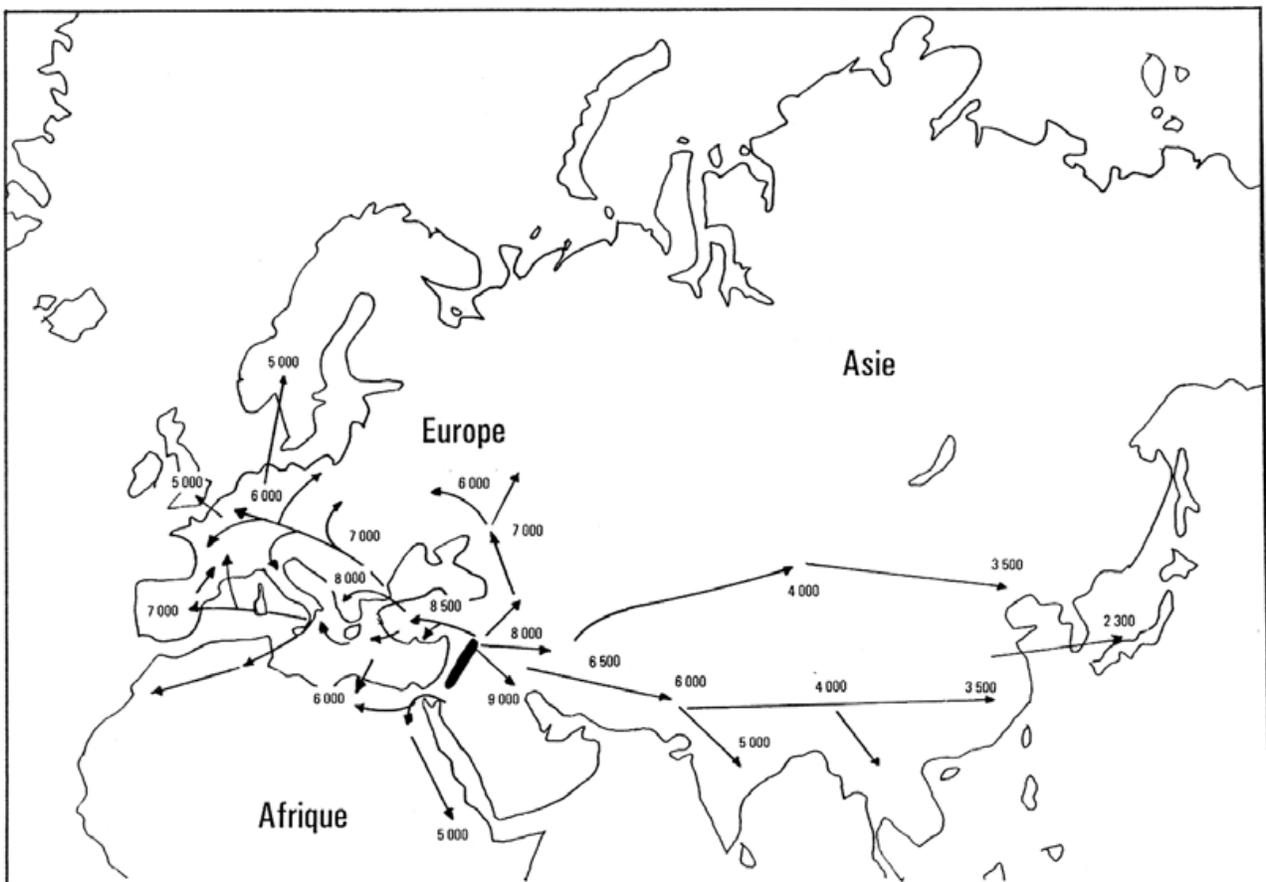


Figure 1. Carte de la diffusion de la culture du blé (*Triticum* sp.) (Bonjean., sd).

D'après Feillet, (2000), le croisement naturel de *Triticum monococcum* (porteur du génome A) × *Aegilops speltaoides* (porteur du génome B) a permis l'apparition d'un blé dur sauvage de type AABB (*Triticum turgidum* ssp. *dicoccoides*) qui a ensuite progressivement évolué vers *Triticum turgidum* ssp. *dicoccum* puis vers *Triticum durum* (blé dur cultivé) (Fig. 2). Le blé dur (*Triticum durum*) possède $2n=4x=28$ chromosomes. Le croisement entre *Triticum turgidum* et *Triticum tauschii* a conduit à la formation du blé tendre, *Triticum aestivum*. Ce dernier présente un génome hexaploïde constitué de la somme des trois génomes diploïdes des espèces ancêtres (AA, BB, DD) (Shewry, 2009).

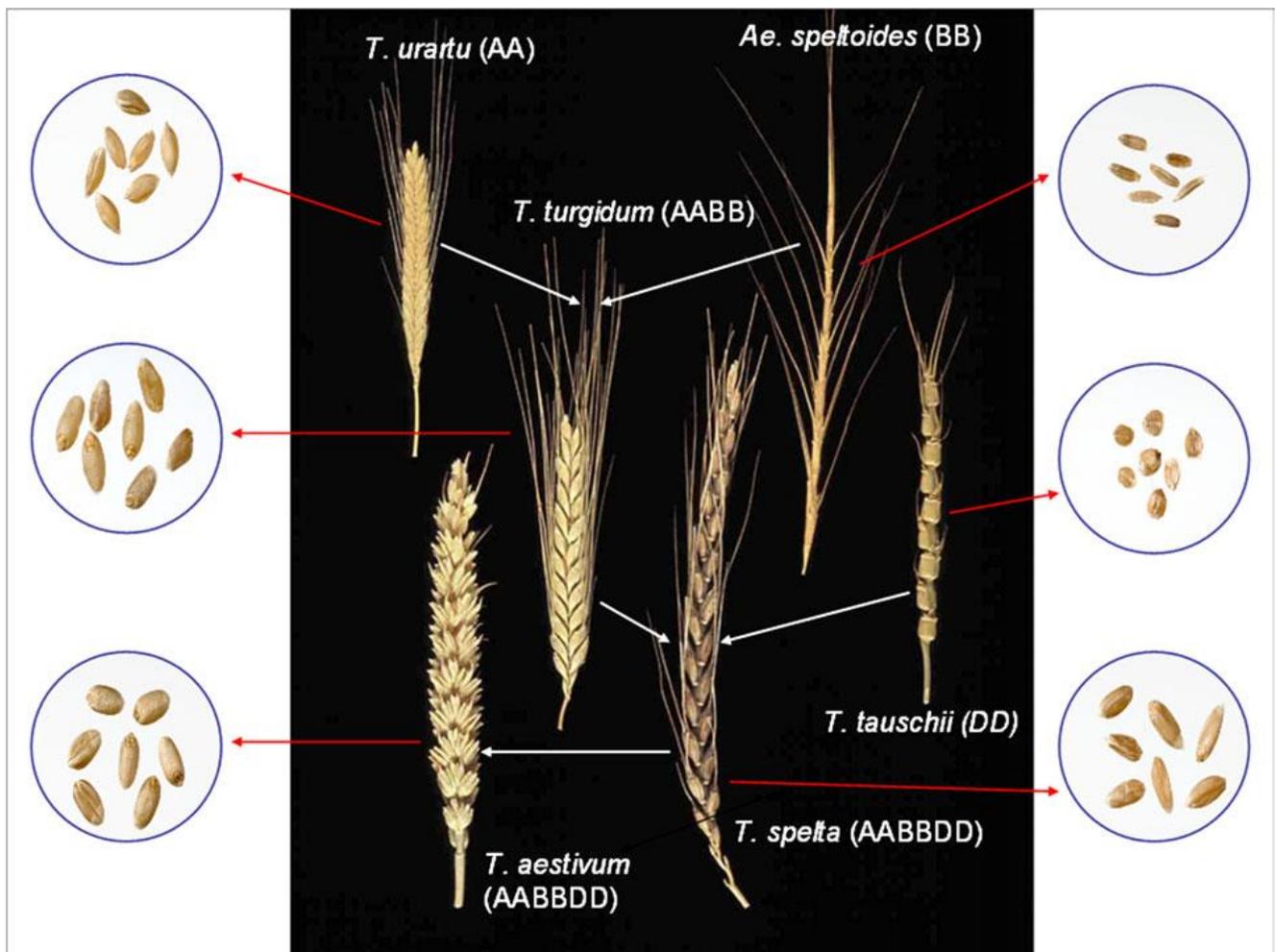


Figure 2. Les relations évolutives et génomiques entre le blé sauvage et le blé dur et les herbes diploïdes sauvages apparentées, montrant des exemples d'épis et de grains. (AA.BB.DD.) Génome (Shewry., 2009).

De nos jours, les principales espèces cultivées du genre *Triticum* sont *Triticum aestivum* L. (blé tendre) et *Triticum durum* (blé dur). Feillet (2000) et Henry et De Buyser (2001). Elles diffèrent principalement par l'aspect et la composition du grain ainsi que par leur aire de répartition agroécologique. Le blé dur étant cultivé en zones méditerranéennes tandis que le blé tendre est cultivé en zones plus tempérées.

Les espèces cultivées les plus proches des Triticées sont le maïs (*Zea mays*), le sorgho (*Sorghum bicolor*) et le riz (*Oryza sp.*). Les blés sont couramment regroupés parmi les céréales, un groupe polyphylétique comprenant des Poacées (blé, orge, avoine, maïs...) mais aussi une Polygonacée (le sarrasin), une Chénopodiacée (le quinoa) et une Pédaliacée (le sésame).

I.2. Importance de culture de blé

I.2.1. Dans le monde

Les céréales à petits grains comprennent le blé, l'orge, l'avoine, le seigle, le triticale, le riz et d'autres espèces qui constituent la source alimentaire la plus importante au monde. Ce sont des composantes essentielles des économies locales dans les pays développés et en développement. Ces cultures fournissent 20% de calories et représentent plus de la moitié de toutes les superficies récoltées dans le monde. Environ 70% des terres consacrées à la production de cultures vivrières sont plantés en céréales (Alexandratos et Bruinsma., 2012 ; Dababat *et al.*, 2015 ; Smiley et Marshal 2016. D'ici 2030, la population mondiale atteindra environ 8 milliards d'habitants et la consommation de céréales augmentera (Fischer *et al.*, 2009). Le blé est la culture céréalière la plus importante et stratégique au monde, se classant au deuxième rang de la production totale en tant que culture céréalière derrière le riz (Nicol *et al.*, 2003).

En 2016, la production céréalière mondiale a atteint environ 2 526 millions de tonnes (Mt). Cette récolte « est en passe de devenir probablement la deuxième plus grande récolte mondiale de l'histoire », selon les chiffres publiés par la FAO en 2016.

Ces chiffres plus élevés qui s'expliquent principalement par de meilleures productions de blé (FAO, 2017). Le blé est cultivé principalement dans les pays du bassin méditerranéen à climat arides et semi-arides là où l'agriculture est dans la plus mauvaise passe (Abeledo *et al.*, 2008). Parmi les pays producteurs de blé dans le monde, la Chine,

les Etats Unis, la France, l'Inde, la Turquie ; une production de 21 millions de tonnes et son rendement moyen en grains est environ 2,3 t/ha, le Canada avec 4,6 millions de tonnes métriques par année et l'Ukraine (Akar *et al.*, 2009) (Tab. 1). Aujourd'hui, seules les variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) ou de blé dur (*T. turgidum* (L.) *Thell. spp. durum* L.) ont une importance commerciale internationale.

Tableau 1. Classement des pays producteurs du blé dans le monde en 2016 (FAO, 2018)

Classement	Pays	Production en tonnes
1	Chine	131696392
2	Inde	93500000
3	Fédération de Russie	73294568
4	Etats unis d'Amérique	62859050
5	Canada	30486700
6	France	29504454
7	Ukraine	26098830
8	Pakistan	26005213
9	Allemagne	24463800
10	Australie	22274514
38	Algérie	2440097
Monde		749460077

I.2.2. En Algérie

En Algérie, les céréales et plus particulièrement le blé occupent une place privilégiée dans le système alimentaire et dans l'économie nationale. Cette caractéristique est perçue d'une manière claire à travers toutes les phases de la filière (Djermoun., 2009). Les principales cultures céréalières sont le blé (*Triticum* sp.) et l'orge (*Hordeum*. sp.). Le blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) est de loin la céréale la plus cultivée en Algérie (Benbelkacem et Kellou., 2002). A l'échelle mondiale, l'Algérie est classée la 38ème en ce qui concerne la production céréalière comme c'est représenté dans le tableau 1. La consommation des produits céréaliers se situe à un niveau d'environ 205 kg /personne/an (Chehat, 2007). La production céréalière en Algérie est fortement dépendante des conditions climatiques. Cela se traduit d'une année à l'autre par des variations importantes

Chapitre I – Données bibliographiques

de la SAU, de la production et du rendement (Tab. 2). Ainsi, le manque de précipitations, mais aussi la répartition des pluies pendant l'année expliquent en grande partie la forte variation de la production céréalière (Djekoun *et al.*, 2002 ; Djermoun, 2009).

On note trois grandes zones :

- Plaines littorales, vallées du Centre et de l'Est (400 000 ha), pluviométrie supérieure à 500 mm
- Plaines (Mléta, Mekerra, Ghriss) et vallées (Mina, Rhiou, Chélif) intérieures, massif de Médéa et plateau de Dahra (1,5 millions d'ha, 400 mm < pluviométrie < 500 mm)
- Hauts plateaux de l'Ouest et de l'Est (4,5 millions ha, pluviométrie < 350 mm)

Les Hauts Plateaux Sétifiens ont été, sont, et sans doute resteront encore longtemps une zone privilégiée pour la production des céréales.

Tableau 2. Superficies, productions et rendements de blé dur en Algérie en 2015 (MADRP, 2016).

Superficie				
Emblavée (ha)	Récoltée (ha)	Taux de Récolte%	Production (qx)	Rendement (qx/ha)
1503698	1314014	87,4	20199390	15,4

I.3. Classification botanique

Les céréales appartiennent à la famille des graminées (Poaceae) et appartiennent à trois grandes sous-familles, à savoir les Panicoideae (sorgho, maïs), les Ehrhartoideae (riz) et les Pooideae (blé, orge) (Bolot *et al.*, 2009).

D'après Feillet, (2000) les céréales appartiennent à :

Embranchement : Stomatifères

Sous-embranchement : Angiospermes

Classe : Monocotylédones

Ordre : Glumales

Famille : (Graminacées), (Poacées)

Genre : Triticum

Espèce : *Triticum durum* Desf.

I.4. Cycle de développement

Le cycle du blé se compose d'une période végétative marquée par la production de racines, feuilles et tiges puis d'une phase reproductrice marquée par la formation des épis, des fleurs puis par le remplissage des grains. L'observation du cycle de développement du blé a conduit à l'identification de stades clés du développement décrits et normalisés par différents auteurs selon des échelles de développement (Zadcks *et al.*, (1974) (Fig. 3); Feek, BBCH).

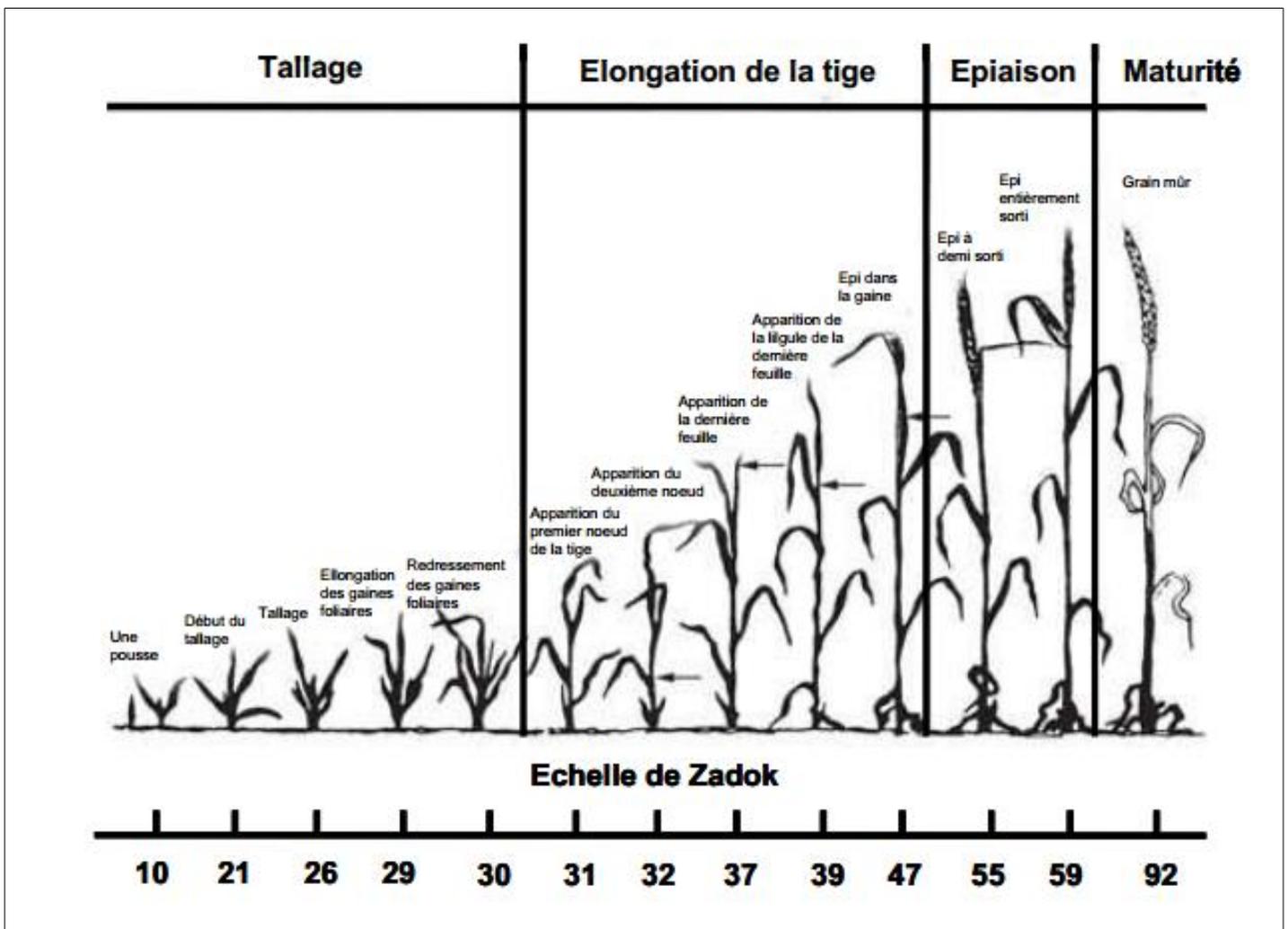


Figure 3. Échelle de Zadock décrivant le cycle de développement du blé (Zadoks *et al.*, 1974). Chaque étape clé du développement est désignée par un nombre allant de 10 à 92.

Le cycle biologique du blé est une succession de périodes subdivisées en phases et en stades. On distingue trois périodes importantes dans le cycle végétatif du blé : Une période végétative, une période de reproduction et une période de maturation.

1.4.1. La période végétative

Elle se caractérise par un développement strictement herbacé et s'étend du semis jusqu'à fin tallage. Elle comprend deux phases :

1.4.1.1. La phase germination – levée

La germination de la graine se caractérise par l'émergence du coléorhize donnant naissance à des racines séminales et de la coléoptile qui protège la sortie de la première feuille fonctionnelle. La germination commence lorsque le grain a absorbé le quart de son poids en eau. La levée est atteinte lorsque la majorité des lignes de semis sont visibles (Gate, 1995). Durant la phase semis levée, l'alimentation de la plante dépend uniquement de son système racinaire primaire et des réserves de la graine. La durée de cette phase varie avec la température, elle se situe entre 8 à 15 jours.

1.4.1.2. La phase levée – tallage

Le début du tallage est marqué par l'apparition de l'extrémité de la première feuille de la -talle latérale primaire. Il est caractérisé par :

- Formation du plateau de tallage,
- Emission des talles,
- Sortie de nouvelles racines

Le tallage marque la fin de la période végétative et le début de la phase reproductive, conditionnée par la photopériode et la vernalisation qui autorisent l'élongation des entrenœuds (Gate, 1995).

1.4.2. Période reproductrice

Elle se caractérise par la formation et la croissance de l'épi. Elle comprend deux phases :

1.4.2.1. Phase montaison- gonflement.

La montaison débute à la fin du tallage. Elle est caractérisée par l'allongement des entre-nœuds et la différenciation des pièces florales. A cette phase, un certain nombre de talles herbacées commence à régresser alors que, d'autres se trouvent couronnées par des épis.

La montaison s'achève à la fin de l'émission de la dernière feuille et des manifestations du gonflement que provoquent les épis dans la gaine.

1.4.2.2. Phase épiaison-floraison

Elle est marquée par la méiose pollinique et l'éclatement de la gaine avec l'émergence de l'épi. C'est au cours de cette phase que s'achève la formation des organes floraux (l'anthèse) et s'effectue la fécondation (Gate *et al.*, 2003).

1.4.3. Période de formation et de maturation du grain

Pendant la phase de formation et de maturation du grain, le grain s'organise, les cellules se multiplient. Les besoins des grains sont inférieurs à ce que fournissent les parties aériennes (plus de 3/4 de la matière sèche sont stockés au niveau des tiges et des feuilles).

Par la suite, les besoins augmentent et le poids des grains dans l'épi s'élève, alors que la matière sèche des parties aériennes diminue progressivement. Seulement 10% à 15% de l'amidon du grain peut provenir de réserves antérieures à la floraison (Boulelouah, 2002). Le grain passe par trois stades consécutifs : laiteux, pâteux (45% d'humidité) et grain mûr. Les acides aminés proviennent de la migration des réserves azotées accumulées dans les parties végétatives (feuilles, tiges, épis) et constituent les protéines du grain (Gate *et al.*, 2003). La majeure partie des réserves accumulées vient des tiges et les feuilles jaunissantes, mais non encore desséchées (Boulelouah, 2002).

La maturation du grain correspond à la phase au cours de laquelle le grain va perdre progressivement son humidité. Le grain ne perdra que l'excès d'eau qu'il contient et passera progressivement aux stades « rayable à l'angle » (20 % d'humidité) puis, « cassant sous la dent » (15-16 % d'humidité) (Gate, 1995).

1.5. Contraintes de la production des céréales

Des fluctuations importantes ont été observées pour le rendement en blé dur et blé tendre peuvent être dues à la variation des conditions climatiques (irrégularité des précipitations), le non-respect d'un itinéraire technique adéquat : envahissement des champs par les adventices et le développement des maladies fongiques à l'instar de la septoriose, la rouille, l'oïdium et la fusariose (Nasraoui, 2000). Les contraintes de production associées aux changements climatiques, la dégradation des sols cultivés, la disponibilité réduite de certains nutriments fertilisants, la salinisation de certaines terres actuellement irriguées, la raréfaction de l'eau dans certaines régions, la concurrence de l'agriculture avec d'autres utilisations potentielles particulièrement près des villes réductions de rendement causées par les ravageurs des cultures (Dababat *et al.*, 2017). Une estimation faite par Feliachi (2002) sur les pertes causées par les ennemis du blé que ce soit lors de la récolte ou lors du stockage est environ 30 %, cette dépréciation est le résultat de l'existence de plusieurs agents tels que les champignons, virus, bactéries et les insectes des denrées stockées.

Les nématodes à kystes des céréales (NKC) sont considérés comme des agents pathogènes majeurs qui affectent la production mondiale des céréales. Le groupe *Heterodera avenae* consiste plus de 12 inféodé aux céréales. Les principaux NKC attaquant les céréales sont *H.avenae* Wollenweber, 1924, *H. filipjevi* (Madzhidov) Steler, 1984 et *H. latipons* Franklin, 1968 (Ahmadi et Tanha Maafi, 2014; Dawabah *et al.*, 2012)

1.6. L'importance, la biologie et les stratégies de gestion des nématodes à kystes des céréales (*Heterodera spp.*)

Les nématodes phytoparasites sont reconnus comme l'une de contraintes de production qui dans de nombreux cas ont été négligées. Dans le blé, le nématode à kyste des céréales (NKC) est reconnu mondialement comme une contrainte biotique pour la production de blé, les nématodes à kystes des céréales peuvent entraîner une réduction considérable des rendements, en particulier dans les climats tempérés et les régions semi-arides, où ils peuvent aggraver le stress dû à la sécheresse (Rivoal et Cook, 1993). Les pertes de rendement causées par les NKC peuvent atteindre 90% dans les champs gravement infestés (Rivoal et Cook, 1993 ; Riley *et al.*, 2009 ; Mokrini *et al.*, 2017).

Comme la plupart des nématodes vivent dans le sol, ils représentent l'un des problèmes les plus difficiles à identifier, à démontrer et à contrôler. Les agriculteurs, les sélectionneurs, les agronomes et les consultants en lutte antiparasitaire sous-estiment généralement leurs effets, mais on estime qu'environ 10% de la production agricole mondiale est perdue en raison des dommages causés par les nématodes des plantes (Whitehead, 1998).

Heterodera est un genre très important de la famille *Heteroderidae* (*Nematoda*). Les membres de ce genre sont des parasites obligatoires et différentes espèces s'attaquent à différentes cultures, causant souvent d'importants dégâts économiques. Le genre est particulier parmi les genres de nématodes en raison de la capacité de la femelle à se transformer en un kyste brun dur qui protège les œufs formés dans son corps (Mokrini et 2017). Le nématode endoparasitaire sédentaire du genre *Heterodera* (Schmidt, 1871) comprend plus de 80 espèces (Turner et Rowe, 2006). Ces espèces divisées en plusieurs groupes taxonomiques : le groupe d'Avenae (*H. filipjevi*, *H. hordecalis*, *H. latipons*), le groupe de Goettingiana (*H. goettingiana*, *H. carotae*, *H. urticae* et *H. cruciferae*), le groupe Humuli (*H. humuli*, *H. ripae*) et le groupe Schachtii (*H. ciceri*, *H. fici* et *H. schachtii*) (Subbotin *et al.*, 2001a, Madani *et al.*, 2004, Subbotin *et al.*, 2010, Turner et Subbotin 2013).

I.6.1. Position taxonomique des nématodes à kystes

Selon Siddiqi., 2000 :

Phylum : Nematoda (Rudolphi, 1808)

Classe : Secernentea (von Linstow, 1905)

Ordre : Tylenchida (Thornei, 1949)

Super famille : Tylenchoidea (Orley, 1888)

Famille : Heteroderidae (Filipjev et Schuurmans Stekhoven, 1941)

Sous-famille : Heteroderinae (Filipjev et Schuurmans Stekhoven, 1941)

Genre : *Heterodera* (Schmidt, 1871)

Le genre *Heterodera* contient beaucoup plus d'espèces d'importance économique. Les espèces importantes dans les régions tempérées sont (hôtes principaux) : *H. avenae*, *H. filipjevi* et *H. latipons* (céréales), *H. cruciferae* (Cruciferae), *H. glycines* (légumineuses), *H. schachtii* (divers) et *H. trifolii* (divers). Les espèces suivantes sont importantes dans les

Chapitre I – Données bibliographiques

régions tropicales : *H. cajani* (légumineuses), *H. oryzicola* (riz, bananes), *H. sacchari* (riz, canne à sucre), *H. sorghi* (céréales) et *H. zae* (céréales) (Perry et Moens, 2013) (Tab. 3).

Tableau 3. Les nématodes à kyste et leur majeure importance économique (Subbotin *et al.*, 2010 citer par Perry et Moens, 2013).

Genre	Espèces	Plante hôte	Région
<i>Heterodera</i>	<i>H.avenae</i>	Blé, orge, avoine, maïs	Tempéré
	<i>H. filipjevi</i>	Blé, orge, avoine, maïs	Tempéré
	<i>H. cajani</i>	Corneille, pois, haricot Phaseolus, pois d'Angole, sésame, soja, maïs doux	Tropical
	<i>H. cruciferae</i>	Chou de Bruxelles, brocoli, chou, chou-fleur, radis, chou-rave, pois, viol	Tempéré
	<i>H. glycines</i>	Fève d'Adzuki, fève, haricot vert, haricot, haricot mite, haricot mungo, haricot bleu marine, haricot de riz, haricot mange-tout, soja, niébé, sésame, lupin blanc, lupin jaune	Tempéré
	<i>H. goettingiana</i>	Fève, pois chiche, lentille, pois, lupin blanc, lupin jaune, trèfle blanc	Tempéré
	<i>H. latipons</i>	Orge, avoine, seigle	Tempéré
	<i>H. oryzicola</i>	Riz, banane et banane plantain	Tropical
	<i>H. sacchari</i>	Riz, canne à sucre	Tropical
	<i>H. schachtii</i>	Fève d'adzuki, betterave, brocoli, chou de Bruxelles, chou, chou-fleur, céleri, pois chiche, chicorée, Chou chinois, niébé, aneth, chou frisé, chou-rave, lentille, pois, radis, colza, rhubarbe, rutabaga, épinards, tomate, navet, lupin jaune	Tempéré
	<i>H. sorghi</i>	Sorgho, maïs, riz	Tropical
	<i>H. trifolii</i>	Oeillet, pois chiche, concombre, cornichon, pois, citrouille, trèfle rouge, rhubarbe, épinard, courge, tomate, trèfle blanc, lupin blanc, courgette	Tempéré
	<i>H. zae</i>	Maïs, orge, riz, sorgho, blé	Tropical

I.6.2. Identification des espèces d'*Heterodera*

La biologie des nématodes à kystes des céréales est complexe. Il existe plusieurs espèces et chaque espèce peut être composée de différents pathotypes (c'est-à-dire des souches ou des races) (Smiley *et al.*, 2017).

Les espèces des *Heteroderinae* partagent une morphologie similaire et ne se distinguent souvent les unes des autres que par de petits détails (Turner et Subbotin, 2013). L'identification traditionnelle repose principalement sur la morphologie et la morphométrie des femelles (kystes) et des juvéniles du deuxième stade (J₂).

I.6.2.1. Kyste

Dans le groupe *H.avenae*, comme dans chaque groupe *Heterodera*, seules des différences mineures morphologiques et morphométriques distinguent les espèces les unes des autres. Les structures du cône vulvaire du kyste, notamment la fenestre, les bullaes et le pont inférieur, sont utilisées pour séparer les espèces (Mokrini *et al.*, 2017).

I.6.2.2. Juvéniles de deuxième stade.

La morphométrie (longueur et largeur du corps, longueur de la queue hyaline, longueur réelle de la queue, longueur du stylet, largeur du bouton du stylet) et la morphologie (forme des boutons du stylet, nombre de lignes dans le champ latéral, anneau de la tête en nombre) de J₂ servent à séparer les genres et les espèces (Fig. 4).

Cependant, le nombre croissant d'espèces de ce groupe rend l'identification morphologique fiable plus difficile et prend beaucoup de temps (Subbotin *et al.*, 2003). L'identification moléculaire peut confirmer l'identification traditionnelle, en particulier pour les espèces étroitement apparentées sur le plan morphologique.

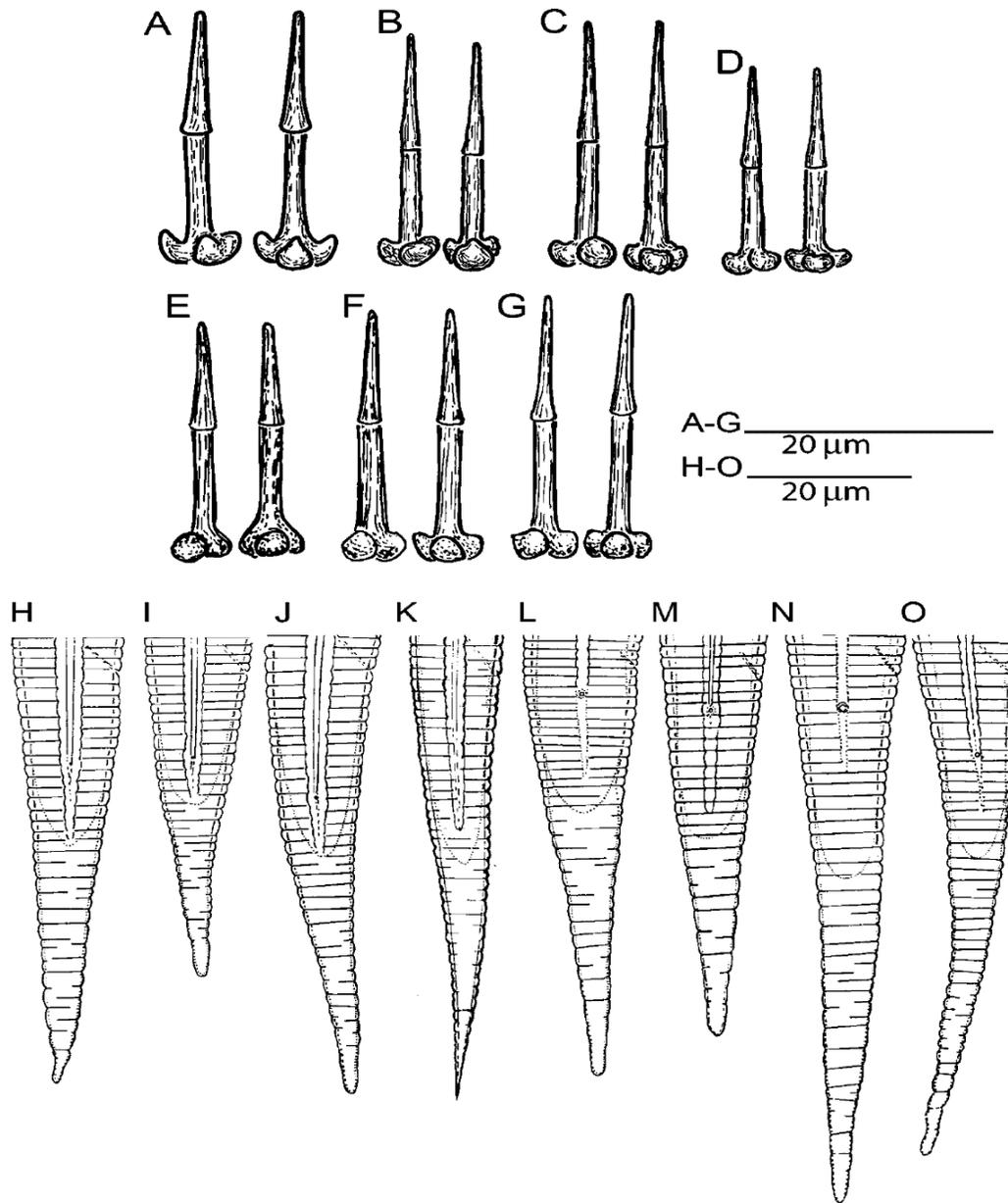


Figure 4. Exemples de la diversité des formes de stylet et de queue de juvénile de deuxième stade (J₂) des nématodes de type A à G, stylets (à gauche latérale et à droite dorsale). A: *Heterodera mani*; B: *H. glycines*; C: *H. trifolii*; D: *H. zae*; E: *Globodera rostochiensis*; F: *G. pallida*; G: *G. tabacum*; H-O: Queues (vue latérale). H: *H. goettingiana*; I: *H. schachtii*; J: *H. trifolii*; K: *H. spinicauda*; L: *H. avenae*; M: *H. hordecalis*; N: *H. ustinovi*; O: *H. bifenestra*. A-D après les Wouts et Baldwin (1998), E-F d’après Baldwin et Mundo-Ocampo (1991), H-O d’après Wouts et Weischer (1977), Sharma (1998) in Subbotin *et al.*, 2010a.

I.6.3. Identification moléculaire

Plusieurs techniques moléculaires peuvent être utilisées pour séparer les espèces et populations du groupe *H.avenae*, y compris les jeux d'amorces spécifiques aux espèces différenciées pour *H.avenae*, *H. filipjevi* et *H. latipons* (Toumi *et al.*, 2013a, Toumi *et al.*, 2013b; Yan *et al.*, 2013; Waeyenberge et Viaene, 2015), les séquences de ITS-ADNr (Ferris *et al.*, 1994; Bekal *et al.*, 1997; Subbotin *et al.*, 2003) et le polymorphisme de longueur des fragments de restriction (RFLP) (Subbotin *et al.*, 1999). ADN profils, peuvent être obtenu rapidement à partir d'un peu de nématodes ou même simples et la clarté des résultats permet d'identifier facilement les espèces. En outre, les effets des variations de l'environnement et du développement ne posent aucun problème (Turner et Subbotin, 2013). Des amorces spécifiques à des espèces ont été développées pour les principales espèces, telles que *H. schachtii* (Amiri *et al.*, 2001, 2002), *H. glycines* (Subbotin *et al.*, 2001), *H. latipons* (Toumi *et al.*, 2013a), *H.avenae* et *H. filipjevi* (Toumi *et al.*, 2013b). La PCR-RFLP de la région d'espaceur interne transcrit (ITS) du gène de l'ADN ribosomal (ADNr) a été utilisée pour identifier des espèces du genre *Heterodera* (Subbotin *et al.*, 1999, 2000; Zheng *et al.*, 2000; Madani *et al.*, 2004). La PCR en temps réel a été utilisée pour la détection de J₂ unique de *G. pallida* et *H. schachtii* (Madani *et al.*, 2005) ou de *H. glycines* (Ye, 2012); un protocole de qPCR a été développé pour *H.avenae* (Toumi *et al.*, 2015).

Il est important d'identifier les espèces de nématodes à kystes des céréales présentes dans chaque domaine ou région, car les variétés de blé, d'orge et d'avoine peuvent différer dans leur réponse aux attaques de *H.avenae* et *H. filipjevi*. Les méthodes permettant de détecter et de distinguer ces espèces sont complexes et reposaient traditionnellement sur des mesures soigneuses de nombreuses caractéristiques du corps observées sous une magnification élevée. Des procédures moléculaires (basées sur l'ADN) sont maintenant disponibles pour identifier ces nématodes de manière plus précise et plus rapide (Smiley et Yan., 2010).

I.6.4. Pathotypes

Un «pathotype» peut être défini comme un groupe de nématodes morphologiquement identiques mais pouvant être distingués des autres de la même espèce par leur pouvoir pathogène sur des hôtes spécifiques (différentiels d'hôtes). Les nématodes

d'un certain pathotype ont le ou les gènes communs pour une virulence qui diffère du gène ou des combinaisons de gènes trouvés dans d'autres groupes (pathotypes). La capacité relative d'un taxon ou d'une population de nématodes à endommager une plante donnée peut être définie par le «pouvoir pathogène ou pathogénicité».

La virulence est une mesure de la capacité d'un nématode à se reproduire sur une plante, en particulier lorsque l'on compare les populations d'une même espèce à leur capacité à se reproduire sur des plantes résistantes (Cook et Starr, 2006).

Les pathotypes sont identifiés en testant la virulence de populations inconnues de *H.avenae* contre des différentiels comprenant un groupe standard d'orge (*Hordeum vulgare* L.), d'avoine (*Avena sativa* L. et *A. sterilis* L.) et de blé (*Triticum aestivum* L. *T. durum* L.) cultivars. Cet ensemble de différentiels a été proposé par Andersen et Andersen (1982b)

I.6.5. Biologie des nématodes à kyste des céréales (NKC)

Comme d'autres nématodes à kystes, le cycle de vie commence par un œuf contenu dans un kyste. À l'intérieur de l'œuf se développe le premier stade larvaire, à la sortie de ce dernier, se développent trois stades juvéniles successifs conduisant aux stades adultes mûrs (mâle et femelle) (Fig. 5). Les nématodes à kystes des céréales ont une génération par an (Greco *et al.*, 2002). Les kystes matures sont bruns et immobiles. Le juvénile du premier stade (J₁) mue en juvénile du deuxième stade (J₂) à l'intérieur de l'œuf. Le J₂ est équipée d'un stylet. Il est utilisé pour inciser une fente dans l'œuf permettant au J₂ d'éclore de l'œuf. Le J₂ non éclos peut être survivre longtemps dans l'œuf, en fonction de l'espèce et des conditions environnementales. Les nématodes à kystes ont deux types de dormance : la diapause et la quiescence (Moens *et al.*, 2018). La diapause a une composante temporelle qui permet au J₂ de surmonter les conditions environnementales saisonnières défavorables à l'éclosion, telles que les températures extrêmes ou la sécheresse. *H.avenae* a généralement une diapause obligatoire au cours de sa première saison de développement. Une fois la diapause terminée, la J₂ peut entrer en repos, une réponse réversible spontanée à des conditions environnementales défavorables imprévisibles (Perry et Moens, 2013).

À l'éclosion, la juvénile J₂ quitte le kyste par la fente ou par le cou. Une fois dans le sol, elle recherche un hôte approprié. Elle localise l'hôte en exploitant les gradients de produits chimiques libérés par le système racinaire de l'hôte. Le stade J₂, stade infestant des nématodes à kyste, pénètre dans le système racinaire de son hôte près de l'extrémité de la

racine (Subbotin *et al.*, 2010a; Turner et Subbotin, 2013). À l'intérieur de la racine, le nématode migre intra cellulièrement, en utilisant son stylet pour couper à travers les parois cellulaires, vers le péricycle, où il sélectionne une cellule appropriée utilisée pour former un site d'alimentation, appelé syncytium (Vanholme *et al.*, 2004). Le stylet creux perce la paroi de cette cellule et la salive est injectée par les glandes pharyngiennes. Si le protoplaste s'effondre ou si le stylet est recouvert d'une couche de matériau semblable à du callose, le stylet est rétracté. Si la J₂ est capable d'induire et de maintenir une syncytia (relation compatible), la juvénile deviendra un adulte mâle ou femelle. Environ 7 jours après la pénétration, le J₂ mue vers le troisième stade juvénile (J₃). La J₃ a un primordium génital et un rectum bien développés. Le sexe des juvéniles se distingue en J₃ ; Le mâle a un seul testicule et la femelle a des ovaires appariés. A ce stade, les nématodes femelles deviennent saccates. La J₃ mue au quatrième stade juvénile. Finalement, le nématode mue une dernière fois au stade adulte. À cette (quatrième) mue, les femelles sont gonflée et leurs extrémités postérieures font saillie à travers le cortex radulaire, prêtes pour l'accouplement. Les mâles se développent sur même racine que les femelles. Quand ils émergent à la quatrième mue, ils sont toujours inclus dans la cuticule. Les mâles reviennent à la forme du corps vermiforme, ne se nourrissent pas et quittent les racines ; ils vivent environ 10 jours après avoir quitté la racine (Evans, 1970). Ils sont attirés par les femelles, qui exsudent les phéromones sexuelles. Les femelles peuvent s'accoupler avec différents mâles. Après l'accouplement, l'embryon se développe dans l'œuf, qui est toujours dans le corps de la femelle. Finalement, la femelle meurt et sa cuticule subit une oxydation des polyphénols oxydase pour former un kyste protecteur résistant contenant plusieurs centaines d'œufs embryonnés (Turner et Subbotin, 2013) (Fig. 6).

Les kystes se détachent des racines lorsque la plante meurt et restent en dormance dans le sol jusqu'à ce que le prochain hôte approprié se développe à proximité (Turner et Evans, 1998). Le nombre de générations par an varie selon les espèces de nématodes à kystes. Sur le tempéré, la plupart des espèces de nématodes à kystes complètent une ou deux générations, correspondant au cycle de vie naturel de son hôte, Par exemple, la température était cruciale pour déterminer le nombre de générations complétées pour l'espèce *H. schachtii* sur le colza pendant la saison de croissance (Kakaire *et al.*, 2015). Cependant, dans les régions tropicales où les conditions environnementales favorables sont plus

constantes tout au long de l'année, plusieurs générations sont présentes, 11 générations au maximum étant signalées pour *H. oryzae* (Jayaprakash et Rao, 1983).

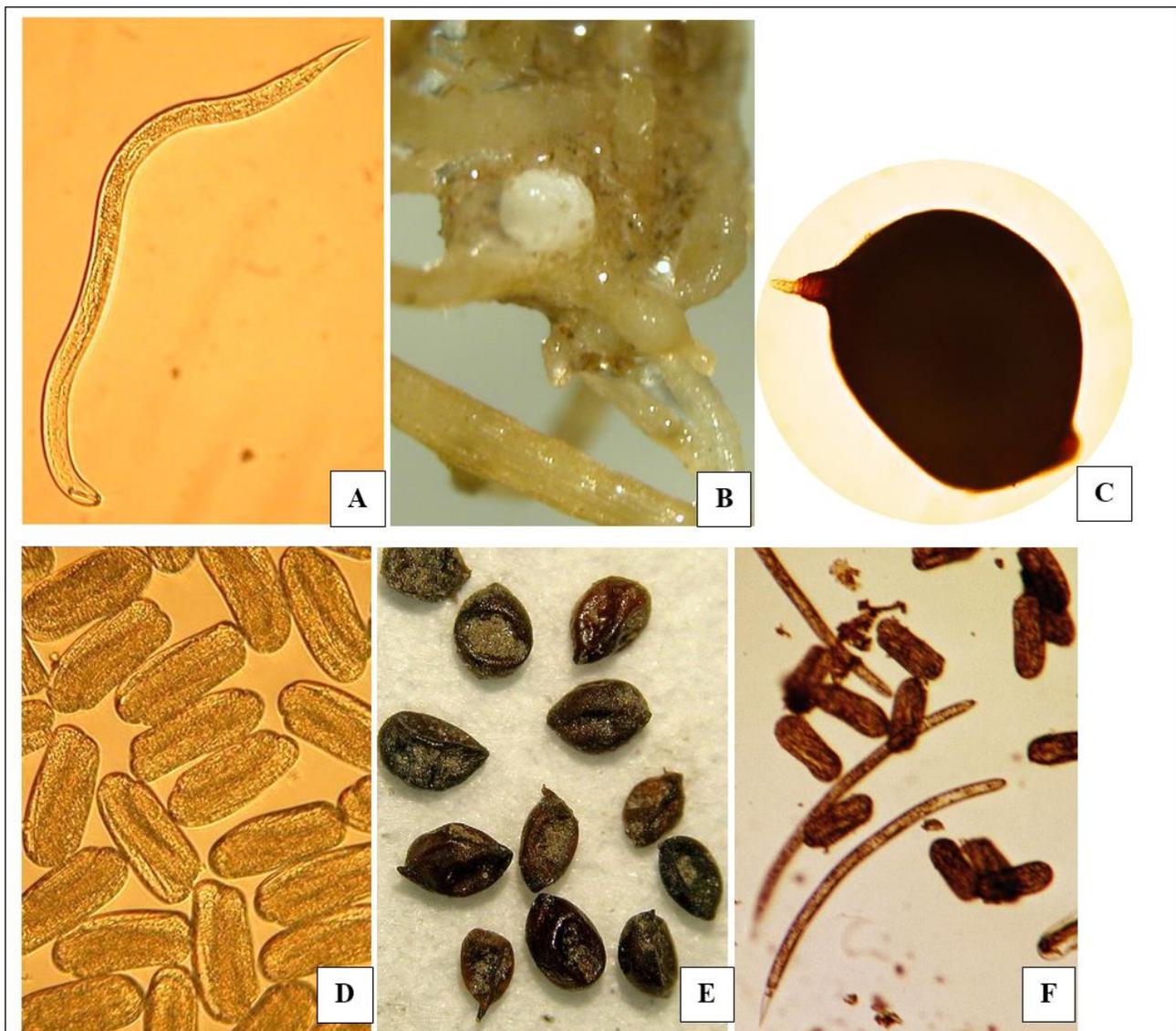


Figure 5. Stade larvaire d'*H.avenae*. (A) Forme vermiforme du stade juvénile infectieux qui émerge d'un kyste (0,5 mm de long) ; (B) femelle blanche élargie incrustée dans une racine ; (C) brun en forme de citron kyste (0,5 × 0,7 mm) contenant des centaines d'œufs ; (D) œufs (50 × 130 µm) contenant de faibles contours du stade juvénile infestant en développement ; (E) kystes extraits d'un sol sec; (F) les œufs et les juvéniles infectieux libérés lorsqu'un kyste sec a été broyé (Smiley et Yan., 2010)

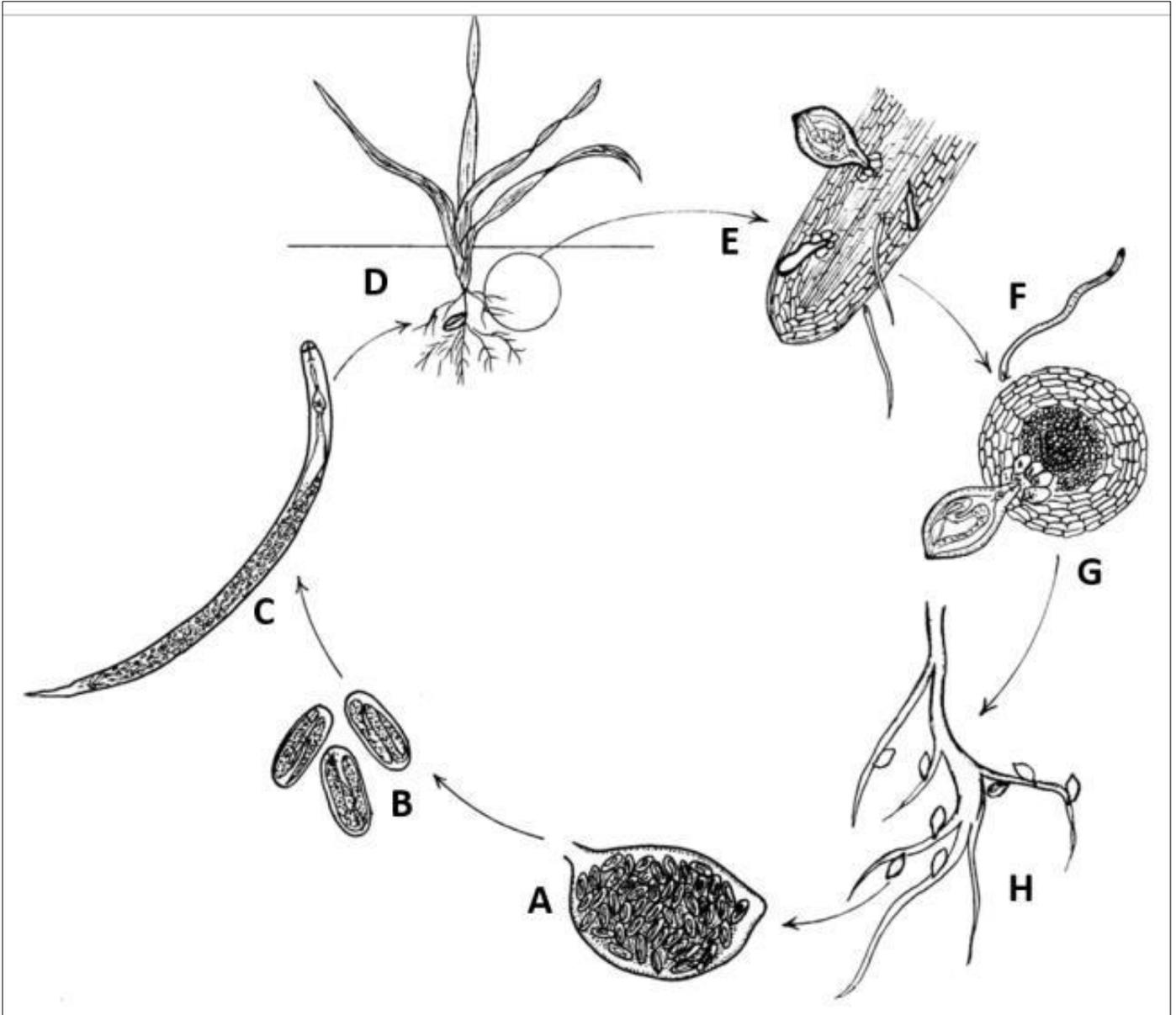


Figure 6. Un dessin illustré du cycle de vie d'un nématode à kyste des céréales; kyste rempli d'œufs hivernants dans le sol (A), œufs contenant du deuxième stade du juvénile (J_2) (B), J_2 libre dans le sol (C), racines de la plante hôte infesté (D), attaque de jeunes racines par J_2 et se développant à divers stades (E), mâle libre dans le sol (F), femelle mature et formation de syncytium (G), femelle mature et kyste toujours attaché à la racine (H). (Smiley *et al.*, 2017).

1.6.6. Symptômes

Les symptômes hors sol causés par les membres du groupe *H.avenae* comprennent le jaunissement, un tallage médiocre, un retard de croissance et une croissance inégale des plantes hôtes (Fig. 7). Il peut y avoir une brûlure des feuilles, semblable à celle causée par la sécheresse (Moens *et al.*, 2018 ; Mokrini *et al.*, 2017) . Cela est dû au fait que le nématode perturbe l'équilibre métabolique de la plante et inhibe la pression hydrostatique de l'eau, ce qui entraîne le flétrissement (Griffin, 1982). Les dégâts peuvent se généraliser et devenir uniformes sur des champs entiers lorsque des céréales sensibles sont fréquemment plantées dans la rotation des cultures (Smiley *et al.*, 2017).



Figure 7. La croissance hétérogène du blé d'hiver causée par *H.avenae*. Le champ n'a pas été irrigué, et la surface était d'un niveau uniforme on Oregon (Etats-Unis) (Smiley et Yan., 2010 ; Smiley *et al.*, 2017).

Des symptômes spécifiques ne se produisent que sur les racines et le type de symptôme varie selon les espèces hôtes. Pour détecter les symptômes racinaires, nettoyez délicatement le sol des racines, puis observez de près le modèle de ramification des racines.

Les modes d'enracinement anormaux ne sont généralement pas reconnaissables avant un mois ou plus que les juvéniles attaquent les racines (Smiley et Nicol, 2009 ; Smiley et Yan., 2010). Le blé attaqué par *H.avenae* montre une production de racines déroulée (Fig. 8) Les racines ont une apparence «touffue en nœuds», généralement avec plusieurs femelles visibles à chaque nœud (Rivoal et Cook, 1993).



Figure 8. Racines de blé de légèrement infesté (à gauche, A) et fortement infesté (à droite, B) par *H.avenae* (Smiley et Yan., 2010 ; Smiley *et al.*, 2017).

I.6.7. Distribution et importance

Les nématodes à kystes des céréales forment un groupe de plusieurs espèces étroitement apparentées qui entraînent des pertes de rendement économiques dans les systèmes de production de blé de plusieurs parties du monde (Fig. 9), notamment en Asie occidentale, en Afrique du Nord, en Europe, en Australie et aux États-Unis d'Amérique (Rivoal et Cook, 1993; Nicol et Rivoal, 2009 ; Sahin *et al.*, 2009; Smiley et Yan, 2010). Douze espèces agissent sur les racines des céréales et des graminées (Nicol et Rivoal, 2009 ; Subbotin *et al.*, 2010), dont trois espèces, à savoir. *H.avenae*, *H. latipons* et *H. flipjevi* sont considérées comme les plus importantes du point de vue économique et coexistent parfois (Rivoal et Cook, 1993 ; Abidou *et al.*, 2005; Mc Donald et Nicol, 2005). Les estimations des dommages aux cultures causés par les nématodes à kystes des céréales

ont été publiées par plusieurs auteurs tels que Tanha Maafi *et al.*, 2007 Riley *et al.* 2009 ; Hajihassani *et al.*, 2010 et Dababat *et al.*, 2015b.

I.6.7.1. *Heterodera avenae* Wollenweber, 1924 (Nématode à kystes des céréales)

Heterodera avenae Wollenweber, 1924 son nom commun est le nématode à kyste de l'avoine ou des céréales. Le nématode à kystes des céréales a été signalé pour la première fois par Kühn (1874) comme parasite des céréales en Allemagne et plus tard dans d'autres pays (Schmidt, 1930, Franklin, 1951). *H.avenae* se trouve maintenant dans la plupart des régions du monde productrices de blé (Meagher, 1977). La plus largement répandue et la plus dommageable dans les régions productrices de blé tempérées du monde (Smiley *et al.*, 2017). Elle est connue comme une contrainte majeure à la production de céréales en Europe (Rivoal et Cook, 1993), en Australie (Brown, 1984), en Inde (Khan *et al.*, 2005; Singh *et al.*, 2009), en Amérique du Nord (Miller, 1986), dans plusieurs pays d'Afrique du Nord et d'Asie occidentale (Sikora, 1987 ; Al-Yahya *et al.*, 1998; Nicol *et al.*, 2011), Tunisie (Namouchi-Kachouri et B'Chir ; 2005), Maroc (Mokrini *et al.*, 2017), Egypte (Baklawa *et al.*, 2015b) et en Algérie (Mokabli *et al.*, 2002 ; Tirchi *et al.*, 2016). Les pertes de rendement causé par *Heterodera* spp. sur le blé et l'orge ont été rapporté de différentes régions.

Namouchi,-Kachouri *et al.*, (2008) ont signalé une perte de rendement de 19 à 86% pour l'orge et de 26 à 96% pour le blé en Tunisie. Une perte de blé de 10 à 40% a été signalée en Chine (actuellement appelée *H. sturhani*) (Peng *et al.*, 2007). En Syrie, Hassan *et al.* (2010) ont étudié l'effet de *H.avenae* sur la croissance des plantes, le rendement et la reproduction des nématodes chez les cultivars de blé dur et de pain pané dans des conditions de plein champ, avec une réduction du rendement de 57% et 50% pour les grains et de 45% et 50% pour la paille de blé dur et de blé tendre, respectivement.

I.6.7.2. *Heterodera latipons* Franklin, 1968 (Méditerranéen Nématode à kystes des céréales)

Les kystes d'*H. latipons* sont similaires à ceux de *H.avenae*, qui ont également des semi-fenestres circulaires, mais ils sont dépourvus de sous-pont et les semi-fenestres sont beaucoup plus proches (Greco *et al.*, 2002). Les *H. latipons* (nématodes à kystes des céréales de la Méditerranée) ont une large distribution et sont essentiellement

répartis dans la région méditerranéenne, à savoir. Italie (Madani *et al.*, 2004), Grèce (Hirschmann *et al.*, 1966), Chypre (Philis, 1988), Espagne (Romero, 1996), Maroc (Mokrini *et al.*, 2012) et au Moyen-Orient où elle a été trouvée en Syrie (Toumi *et al.*, 2015) en Jordanie (AL Abed *et al.* 2004 ; Al-Banna *et al.*, 2015), au Liban (Greco *et al.*, 2002) et en Turquie (Toktay *et al.*, 2015). Elle a également été décelée dans les climats continentaux plus ou moins tempérés de plusieurs républiques de l'ex-URSS (Mulvey et Golden, 1983 ; Subbotin *et al.*, 1996), en Iran (Tanha Maafi *et al.*, 2007 ; Hajihassani *et al.*, 2010), Au Japon (Momota, 1979) et en Europe, y compris en Bulgarie (Stoyanov, 1982), en République tchèque (Kumari., 2017) et au Royaume-Uni (Anon, 2005), Maroc (Mokrini *et al.*, 2012). *H. latipons* infeste l'orge (*Hordeum vulgare*), le blé (*T. aestivum* et *T. durum*), l'avoine (*Avena sativa*) et le seigle (*Secale cereale*). L'importance économique de l'espèce *H. latipons* est mal connue. Comme l'ont examiné Nicol et Rivoal (2008), un rapport de Chypre sur l'orge indiquait une perte de rendement de 50%. Des études récentes menées en Iran sur des microparcelles de terrain ont révélé des pertes de rendement pouvant atteindre 55% sur le blé d'hiver (Hajihassani *et al.*, 2010). En Syrie, on a enregistré une perte de rendement allant jusqu'à 24% pour l'orge et le blé dur dans un champ infesté de 28 œufs et de juvéniles du second stade (J₂) / g de sol de *H. latipons* (Scholz, 2001 in Hajihassani *et al.*, 2010).

I.6.7.3. *Heterodera filipjevi* (Madzhidov) Steler, 1984.

Cette espèce a été trouvée pour la première fois en 1964 dans des champs de céréales près de Douchanbé, au Tadjikistan. Elle a été identifiée pour la première fois comme étant *H. avenae* (Kirjanova et Krall, 1971). Madzhidov (1981) décrit plus tard comme une nouvelle espèce avec la présence d'un sous-pont vulvaire caractéristique dans les kystes et les différences de morphométrie de juvéniles et de kystes provenant d'autres espèces.

Plusieurs différences de morphométrie et la présence d'un léger sous-pont dans le cône vulvaire des kystes ont confirmé la description de ce nématode comme une nouvelle espèce, à savoir. *H. filipjevi* (Madzhidov 1981 ; Subbotin *et al.*, 2010b). Actuellement, *H. filipjevi* est présente dans de nombreux pays d'Europe et d'Asie (Riley *et al.* 2009 ; Dababat *et al.*, 2015) et dans trois États du nord-ouest des États-Unis (Smiley *et al.*, 2015), Italie (Madani *et al.*, 2004), Allemagne (Grosse et Kohlmüller, 2004), Royaume-Uni

(Mitchinson *et al.*, 2009), Syrie (Abidou *et al.*, 2005), Chine (Cui *et al.*, 2016), Inde, Kazakhstan (Subbotin *et al.*, 2010b), Montana (Dyer *et al.*, 2015), Iran (Yavuzaslanoglu *et al.*, 2016) en Algérie (Smaha *et al.*, 2018a).

H. filipjevi diminue également le rendement des céréales. Plusieurs rapports ont confirmé la perte de rendement économique dans de nombreux pays dans différentes conditions climatiques. L'importance économique de *H. filipjevi* sur le blé d'hiver a été déterminée dans des conditions pluviales en Turquie, montrant une perte de rendement moyenne comprise entre 42 et 50% (Nicol *et al.*, 2006). En Iran, la perte de rendement due à *H. filipjevi* a été étudiée sur du blé d'hiver en monoculture. La perte de rendement en grains a été estimée à 48% avec une densité de Pi de 20 œufs et J₂ (g de sol)⁻¹ tandis que la perte de rendement en pousses aériennes était de 40% (Hajihassani *et al.*, 2010a).

Les nématodes à kystes des céréales ont réduit les rendements de 20% au Pakistan, de 50% en Australie, de 50% en Turquie et de 90% en Arabie saoudite (Dababat *et al.*, 2015b ; Riley *et al.*, 2009). Plus de la moitié des champs seraient infestés par des nématodes à kystes céréaliers dans certaines régions productrices de céréales en Turquie (Abidou *et al.*, 2005 ; Elekçioğlu *et al.*, 2009), Iran (Tanha Maafi *et al.*, 2009), États-Unis (Smiley *et al.*, 1994) et en Europe (Rivoal et Cook 1993). Tous les champs de blé sont infestés par les nématodes à kystes des céréales dans plusieurs provinces de Chine (Peng *et al.*, 2009). Une bibliographie de 123 publications sur les nématodes à kystes des céréales concernant tous les aspects de la biologie et de la gestion des nématodes à kystes des céréales en Chine, de 1991 à 2014, a été publiée par Riley et Qi (2015).

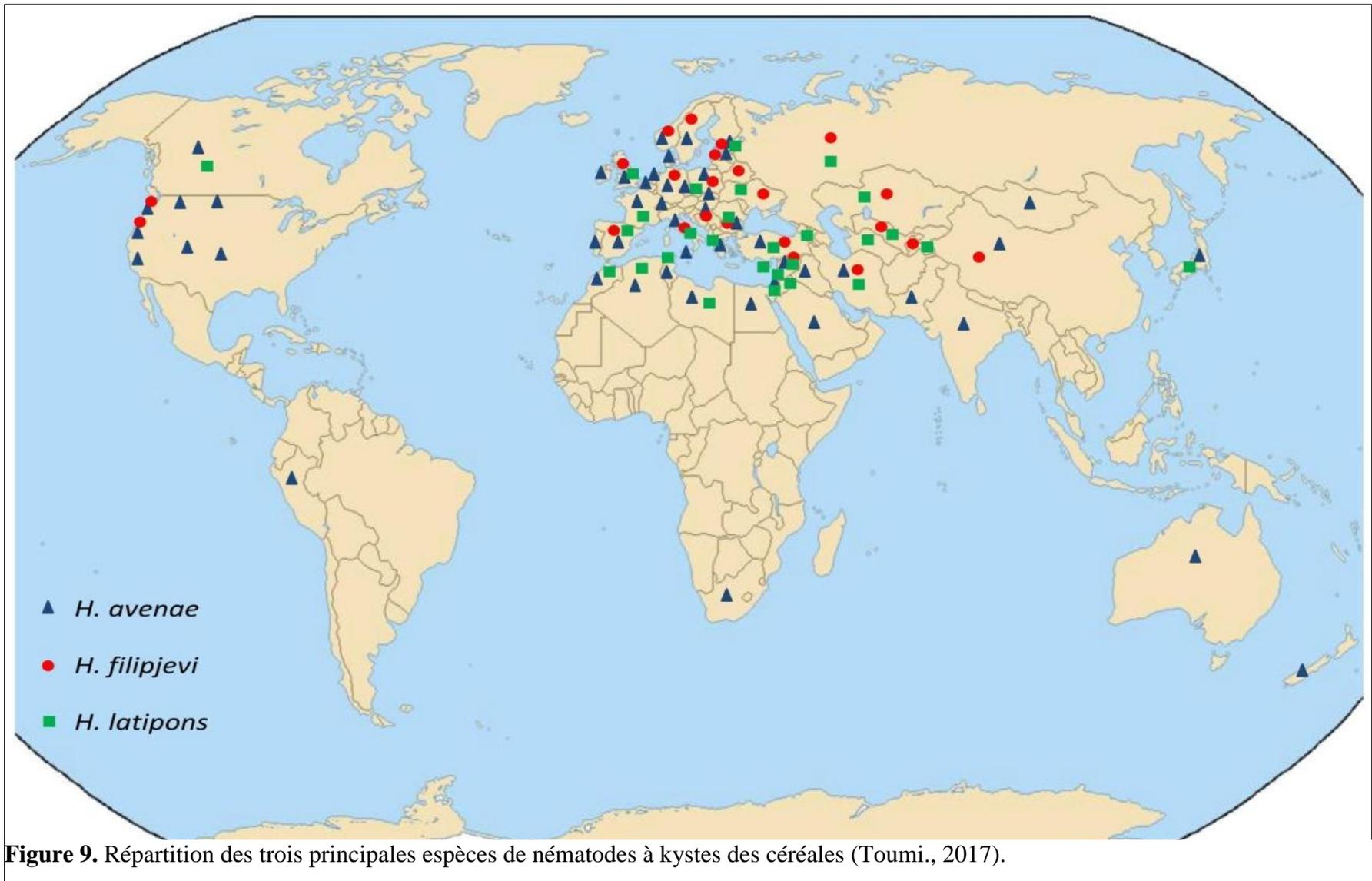


Figure 9. Répartition des trois principales espèces de nématodes à kystes des céréales (Toumi., 2017).

I.6.8. Stratégies de gestion du nématode à kyste des céréales

Premièrement, il est important de protéger les champs non infestés de l'infiltration, car il est rarement possible d'éradiquer les NKC. Une fois les champs infestés, l'objectif de gestion est de réduire la densité de pathogènes à un niveau inférieur au seuil entraînant des coups économiques (Smiley et Yan, 2010).

Des pratiques culturales basées sur des combinaisons de rotation de non-hôtes (non-céréales), de cultivars résistants et de jachères propres permettent de contrôler efficacement les NKC. Cependant, ces stratégies de gestion nécessitent chacune une compréhension complète des caractéristiques de virulence et de diapause pour la population locale de nématodes. Il ne faut pas perdre de vue également, l'efficacité et de la durabilité du ou des gènes de résistance déployés contre une population donnée de nématodes (Dababat *et al.*, 2014).

Le meilleur moyen de contrôler les NKC consiste à adopter une approche concentrée et intégrée. Il existe de nombreux exemples dans lesquels l'utilisation de la rotation des cultures. Singh *et al.*, (2009) ont montré que les densités de population de *H.avenae* diminuaient de 70% après la rotation avec des cultures non hôtes comme la carotte (*Daucus carota*), le fenugrec (*Trigonella foenum-graecum*) et l'oignon (*Allium cepa*), ou encore les jachères et les labours d'été. Une gestion intégrée basée principalement sur la résistance génétique de l'hôte, semble être la plus efficace lorsque deux ou plusieurs agents pathogènes du sol sont présents dans le sol en même temps (Nicol et Rivoal, 2009).

I.6.8.1. Rotation des cultures

Les dommages causés par les nématodes à kystes des céréales sont plus importants lorsque des cultures sensibles sont cultivées chaque année. Les pertes de rendement peuvent également devenir très importantes dans les rotations de deux ans (céréales avec jachère d'été ou d'autre culture telle que la pomme de terre) et dans les rotations de trois ans (par exemple, blé d'hiver, une céréale de printemps et une culture à feuilles larges ou en jachère). Les rotations de cultures comprenant plusieurs années de cultures à feuillus large, de maïs, de jachères ou de variétés de blé, d'orge ou d'avoine résistantes peuvent réduire considérablement la densité de nématodes. En général, la croissance d'un hôte sensible une seule fois au cours d'une période de 3 à 4 ans peut réduire considérablement la densité de *H.avenae* dans le sol (Smiley *et al.*, 2007).

I.6.8.2. Résistance et Tolérance

La résistance est l'une des méthodes les plus rentables et les plus simples pour le contrôle des nématodes. La résistance génétique est favorisée par l'ajout d'une tolérance génétique (capacité de la plante à céder malgré l'attaque du nématode) (Dababat *et al.*, 2015). Les progrès dans la compréhension et la localisation des sources de résistance dans les céréales sont plus avancés pour les nématodes à kyste (*H.avenae*) que pour les nématodes à lésions (*Pratylenchus* spp.), en partie à cause de la relation hôte-parasite spécifique que les nématodes à kyste se forment avec leurs hôtes (Cook et Evans, 1987). En revanche, la relation des nématodes des lésions migratoires avec leurs hôtes est moins spécialisée et donc moins susceptible de suivre un gène pour un modèle génétique (Nicol *et al.*, 2011). Des sources de résistance dans le monde entier ont été obtenues à partir de famille de blé sauvage dans le cadre d'un programme de sélection (Ogbonnaya *et al.*, 2001). Au moins neuf gènes de résistance dominants simples (gènes Cre) ont été découverts, dont beaucoup proviennent de famille sauvages du blé (Dababat *et al.*, 2015). Les sources de résistance identifiées à *H.avenae* ont été trouvées principalement chez des espèces sauvages apparentées au blé du genre *Aegilops* et ont déjà été introgressées dans le blé hexaploïde à des fins de la sélection. Six gènes Cre (CRE2 à Cr7) provenaient d'*Aegilops* spp. (Jahier *et al.*, 2001); d'autres gènes de résistance étaient dérivés des lignées *T. aestivum* (Cr1 et Cr8) et du seigle (*Secale cereale*) (CreR) (Barloy *et al.*, 1996 ; Mc Donald et Nicol, 2005; Nicol et Rivoal, 2008; Vanstone *et al.*, 2008, Haddadi *et al.*, 2013) (Tab. 4).

La tolérance aux nématodes parasites des plantes fait référence à la capacité relative d'une plante à maintenir sa croissance et à bien produire lorsqu'elle est parasitée par un nématode par rapport à des plantes non envahies. La combinaison de résistance et de tolérance dans une plante constitue la gestion idéale du nématode parasite de la plante (Cook et Starr, 2006 ; Nicol et Rivoal, 2009). La combinaison de la résistance et de l'intolérance dans une plante est la deuxième meilleure option (Smiley *et al.*, 2013). La résistance et la tolérance sont génétiquement indépendantes et les cultivars résistants ou tolérants à une espèce ou à un pathotype ne sont pas nécessairement résistants ou tolérants à une autre espèce ou à un pathotype (Smiley et Nicol, 2009 ; Toktay *et al.*, 2013; Dababat *et al.*, 2014). Les plantes sensibles et présentant un rendement significativement réduit lors de l'invasion sont qualifiées d'intolérantes (Cook et Evans, 1987). La combinaison de

plantes intolérantes et résistantes peut contrôler la population de nématodes de manière efficace mais peut être attaquée lorsque les nématodes sont nombreux (Cook et Starr, 2006).

Tableau 4. Principales sources de gènes utilisés dans le blé (*Triticum aestivum*) pour la résistance au nématode à kyste des céréales *H.avenae* (Smiley et Nicol, 2009).

Espèces de céréales	Génotype	Gène de résistance et localisation	Utilisation dans les cultivars
<i>Triticum aestivum</i>	Loros, AUS10894	Cre1 (anciennement Ccn1) sur le chromosome 2BL	Europe du Nord-Ouest, Australie, États-Unis d'Amérique
	Katyil	Con	Australie
	Festiguay	Cre8 (anciennement CreF) sur le chromosome 7L ou 6B	Australie
	AUS4930 = Iraq48	Possible localisation génétique identique à Cre1 : aussi résistante à <i>P. thornei</i>	En cours d'évaluation en Australie, France et CIMMYT
	Molineux	Chromosome 1B	Australie
	Raj MR1	Un gène dominant	Sortie cv. en Inde
<i>T. durum</i>	Psathias 7654, 7655	Inconnu	Inconnu
<i>Triticosecale</i>	T701-4-6	CreR sur le chromosome 6RL	Australie
	Drira	Inconnu	Australie
	Tahara	Inconnu	Inconnu
	Salvo	Inconnu	Royaume-Uni
<i>Secale cereale</i>	R173	CreR sur le chromosome 6RL	Australie
<i>Aegilops tauschii</i>	CPI 110813	Cre4 sur le chromosome 2DL	Ligne hexaploïde synthétique australienne
	AUS 18913	Cre3 on chromosome 2DL	Lignes de reproduction avancées australiennes

<i>A. peregrine</i>	1	Cre (3S) avec Rkn2 sur le chromosome 3S, CRX pas encore localisé	Inconnu
<i>A. longissima</i>	18	Inconnu	France
<i>A. geniculata</i>	79, MZ1, Z61, MZ77, MZ124	Inconnu	France
<i>A. triuancialis</i>	TR-353	Cre7 (anciennement CreA)	France
<i>A. ventricosa</i>	VPM 1	Cre5 (anciennement CreX) sur le chromosome 2AS	Espagne

I.6.8.3. Nématicides

Les nématicides chimiques sont efficaces et largement utilisés dans la recherche, mais ils ne sont généralement pas considérés comme économiquement réalisables ni écologiques pour la gestion des nématodes à kystes des céréales sur petits grains, en particulier dans les champs non irrigués. L'application de nématicides de type fumigant avant de planter des cultures de rotation à valeur élevée telles que la pomme de terre peut réduire la densité des nématodes à kystes des céréales et permettre ainsi un contrôle efficace et économique de ces parasites lors d'une culture de blé ultérieure.

Une formulation de spores de *Bacillus firmus* appliquée aux États-Unis comme traitement biologique des semences a également eu un effet négligeable sur le rendement en grains et sur la densité post-récolte de *H.avenae* (Smiley *et al.*, 2013).

La résistance génétique, les agents biologiques, les pratiques culturales et les stratégies chimiques peuvent faire partie d'une stratégie de gestion, mais chacune d'entre elles a ses limites. Cependant, l'utilisation de lignées ou de cultivars de céréales résistants est considérée comme la méthode la plus rentable et la plus durable pour l'environnement (Mokrini *et al.*, 2017).

Chapitre II. Matériels et Méthodes

Chapitre II. Matériels et Méthodes

Dans le deuxième chapitre, le choix et la description des régions d'étude sont abordés. Par la suite, chacune des différentes méthodes adoptées. Enfin, des analyses statistiques utilisées pour l'exploitation des résultats sont présentés.

II.1. Présentation des régions d'études

II.1.1. Zones d'échantillonnage

Notre étude a été réalisée dans la région centre et Sud de l'Algérie (Fig.10), permettant de prospector les parcelles céréalières de huit wilayas en l'occurrence la wilaya de Tissemsilt, Blida, Bouira, Médéa, Ain Defla, Mostaganem, Adrar et Bordj Bou Arreridj (Fig. 10). Ces régions sont connues par leurs hauts potentiels de production de blé dur en Algérie (Tab.5).

Tableau 5. Superficie, production et rendement de blé dur dans les régions d'étude durant l'année 2015 (MADRP, 2016).

Wilaya	Emblavée (ha)	Récoltée (ha)	Taux de Récolte %	Production (qx)	Rendement (qx/ha)
Médéa	69153	65450	94.6	941655	14.4
B.B. Arreridj	67840	65417	96.4	602000	9.2
Ain-Defla	57728	56320	97.6	1000981	17.8
Tissemsilt	54440	51580	94.7	488440	9.5
Bouira	40284	40280	100	999798	24.8
Blida	6029	6029	100	150092	24.9
Mostaganem	5165	5165	100	76066	14.7
Adrar	4430	4415	99.7	152375	34.5

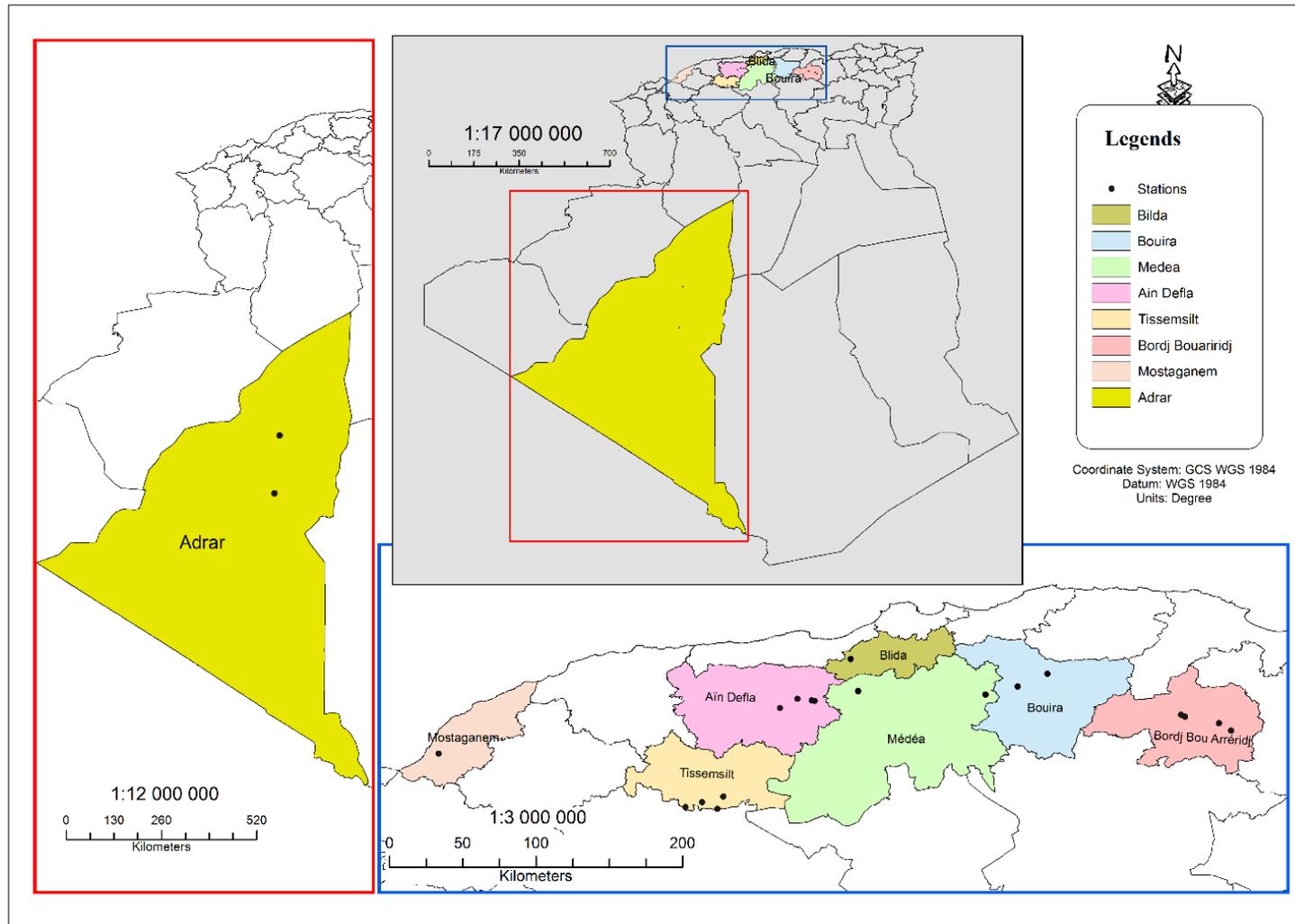


Figure 10. Carte de l'Algérie montrant les zones d'échantillonnage pour les nématodes à kystes des céréales (*Heterodera* spp.) (Originale).

Chapitre II. Matériels et Méthodes

Les localisations géographiques des régions retenues sont abordées l'une après l'autre.

II.1.1.1. Situation géographique de la région de Tissemsilt

La région de Tissemsilt est située à l'Ouest du pays. Elle se présente comme une zone de contact, entre le Centre et l'Ouest, faisant partie des hautes plaines. La Willaya de Tissemsilt est au nord de l'équateur entre (35° 08' à 35 ° .25'N ; 1° .36' à 2° .8' E). S'étalant sur une superficie de 3 152 Km². Elle couvre une partie de l'atlas Tellien au Nord, et les hauts plateaux au centre et au sud. Les stations d'étude dans la région de Tissemsilt sont situées à Ammari ; Beni Maïda et Tissemsilt (Fig.11).

Le sol calcaire occupe une superficie très importante pour l'ensemble des zones céréalières marginales au sud et sud-est de Tissemsilt (plateau du Sersou). Les sols les plus exploités à Tissemsilt sur les deux plateaux (Sersou et Dhaya), correspondent aux sols bruns calcaires à encroûtement calcaire, plus rarement sur croûte et dont la plupart sont issus des sols fersiallitiques rouges méditerranéens ou iso humiques, et qui dans certains cas possèdent des caractères rendziniques. A côté de ces sols, sur le plateau, s'étendent les sols fersiallitiques rouges méditerranéens (Moumene, 1985).

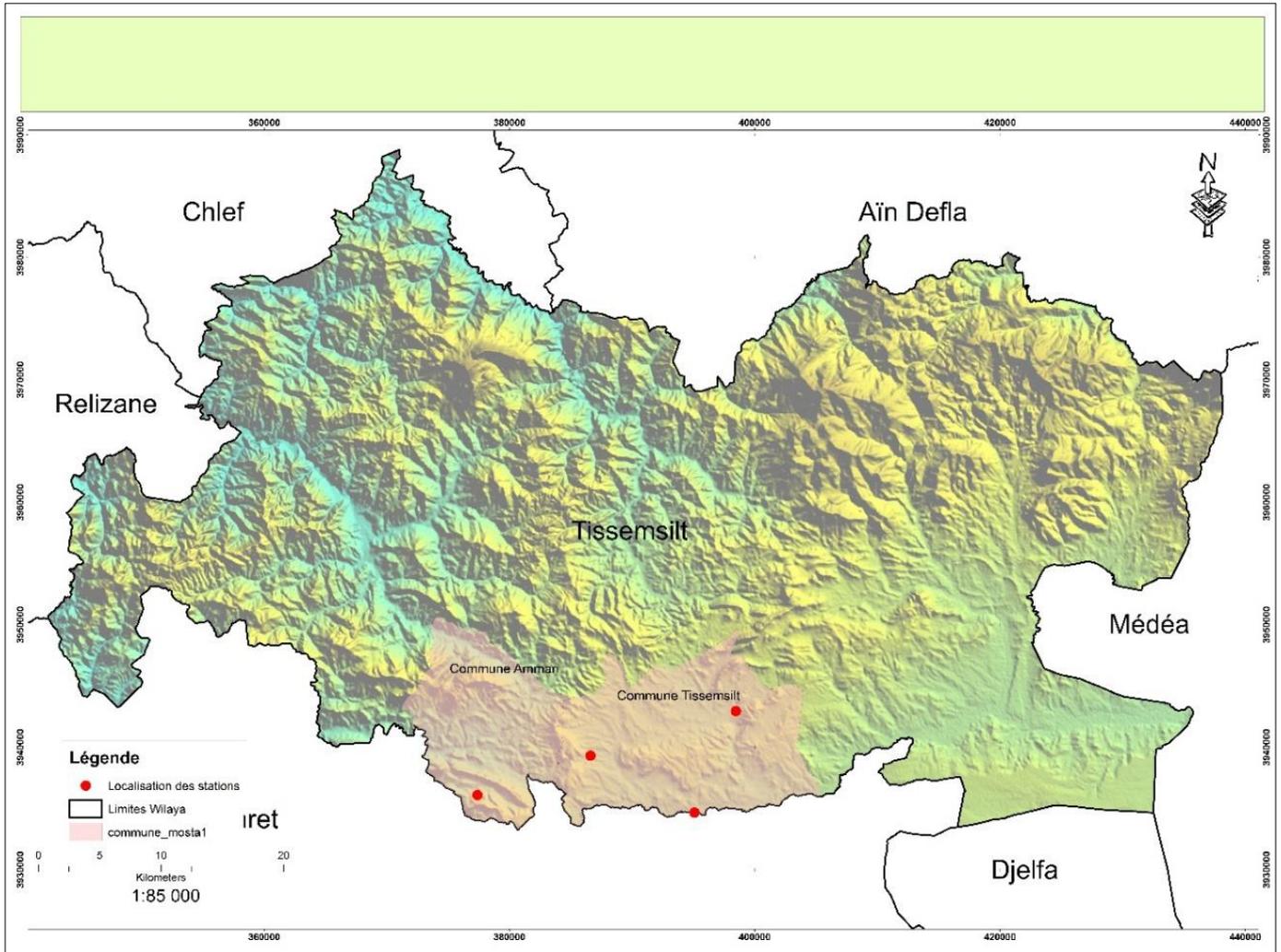


Figure 11. Situation géographique des stations d'étude dans la région de Tissemsilt (Originale).

II.1.1.2. Situation géographique de la région de Blida

La région de Blida est limitée au Nord par la capitale d'Alger, Boumerdes et Tipaza, au sud par Médéa, l'Atlas de montagne de Chréa, les gorges de la Chiffa, à l'Ouest par Aïn Defla et à l'Est par Bouira. Elle s'étend sur une superficie de 1479 km². Elle appartient à la partie orientale de la Mitidja. Les coordonnées géographiques de cette région sont 36° 43'N et 2° 49'E. La région de Blida est représenté par une seule station est Mouzaia (Fig.12). La région de Blida se caractérise d'une manière générale par un climat Méditerranéen.

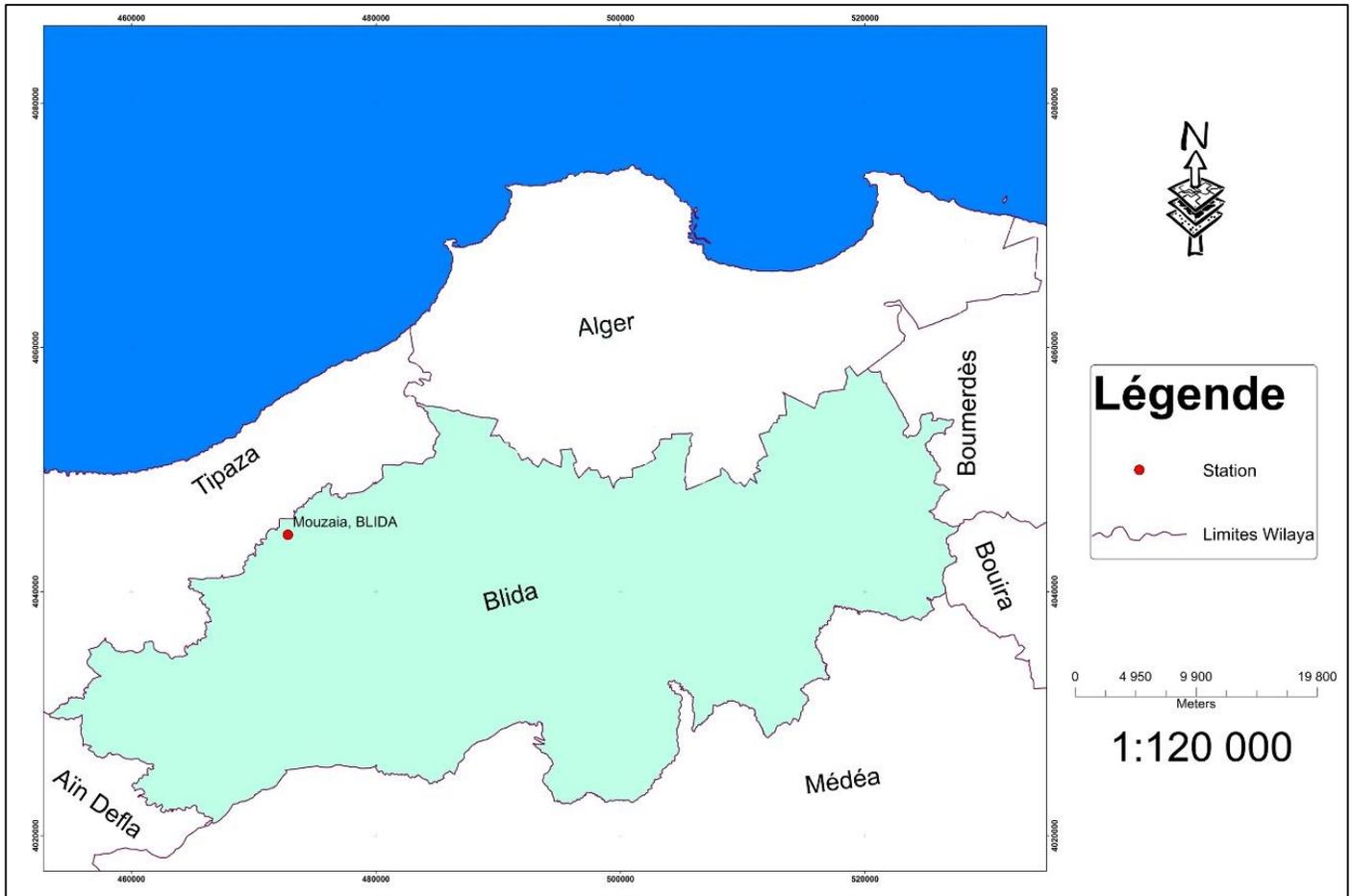


Figure 12. Situation géographique des stations d'étude dans la région de Blida (Originale).

II.1.1.3. Situation géographique de la région de Bouira

La Région de Bouira est limitée au Nord et au Nord-Est par la wilaya de Tizi-Ouzou, la chaîne de montagne du Djurdjura, au Sud-Est par la chaîne montagneuse des Bibans et la Région de Bordj-Bou-Arreridj, au Sud –Ouest par les montagnes de Dirah et la région de Msila et à l'Ouest par la wilaya de Médéa et de Blida. Ses coordonnées géographiques sont 36° 00' N et 3° 00' E (Fig. 13).

La pédologie de la région de Bouira se caractérise par des sols isohumiques, bruns, sur alluvions, profonds, à texture argileuse et à pédoclimat frais pendant la saison pluviale (Mouhouni et Moulti, 2001).

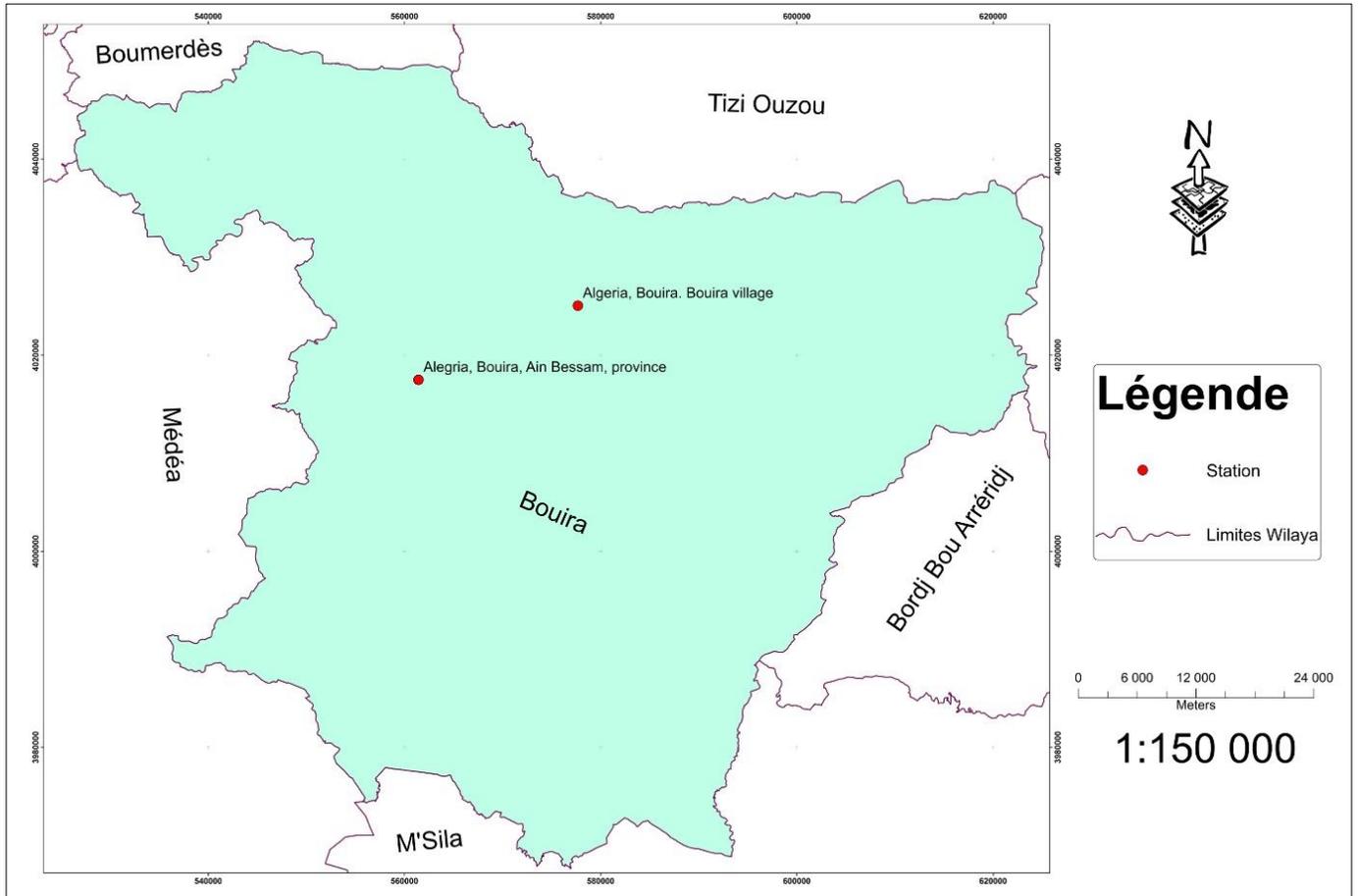


Figure 13. Situation géographique des stations d'étude dans la région de Bouira (Originale).

II.1.1.4. Situation géographique de la région de Médéa

La wilaya est située au Nord de l'Algérie, au cœur de l'Atlas Tellien. Elle s'étend sur une superficie de 8866 km². La wilaya est une zone de transit principale et un trait d'union entre le Tel et le Sahara, d'une part, et entre les Hauts Plateaux de l'Est et ceux de l'Ouest, d'autre part. Les coordonnées géographiques de la Wilaya sont (36°15'51" Nord) et (2°45'14" Est).

Elle est limitée par les wilayas suivantes :

- La wilaya de Blida au Nord.
- La wilaya de Djelfa au Sud.
- Les wilayas d'Ain Defla et Tissemsilt à l'Ouest.
- Les wilayas de M'sila et Bouira à l'Est (Fig.14).

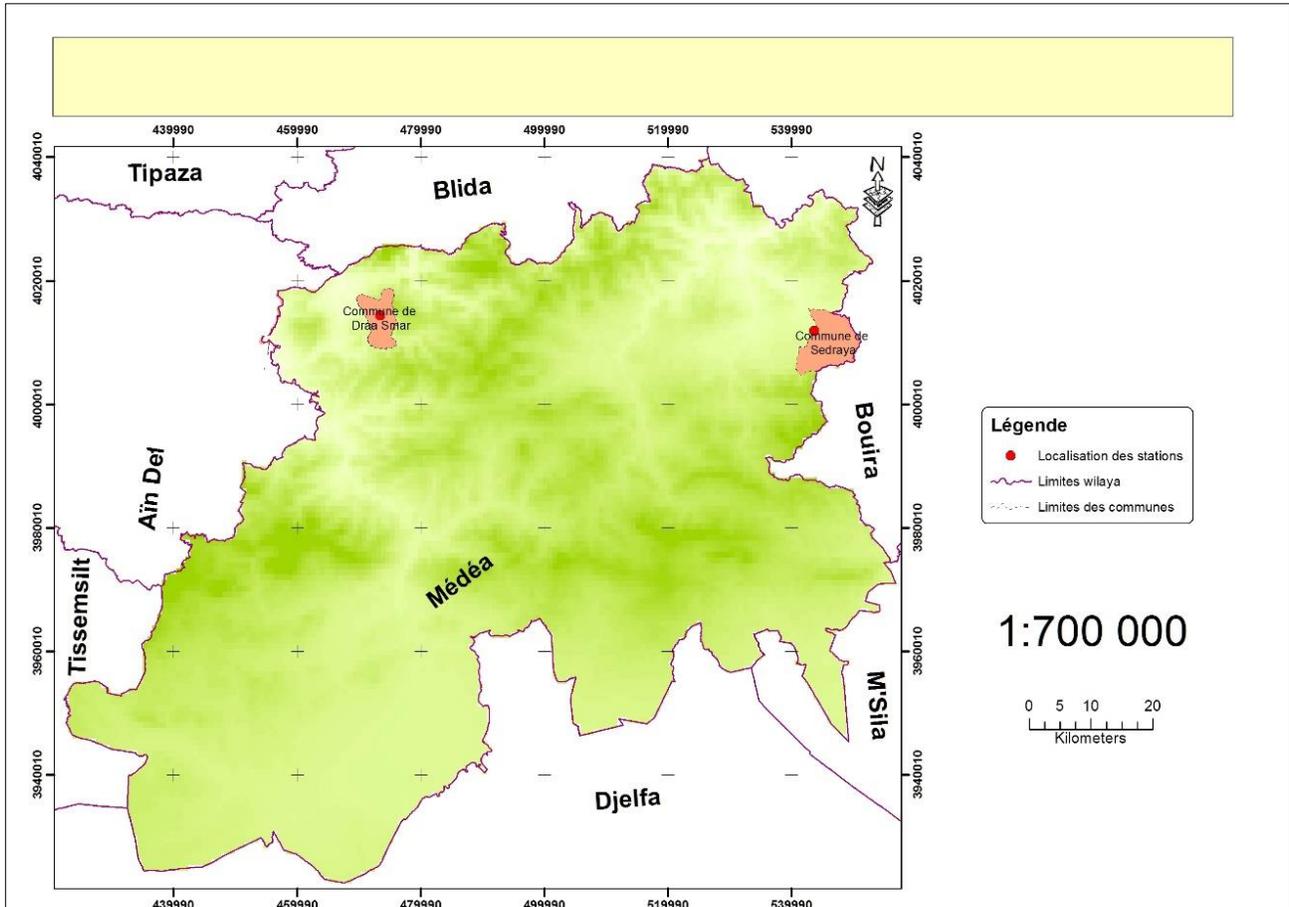


Figure 14. Situation géographique des stations d'étude dans la région de Médéa (Originale).

Selon l'Agence Nationale de Développement de l'Investissement (Andi, 2013), la Wilaya de Médéa peut être découpée en quatre (04) zones naturelles (reliefs) :

Le tell montagneux ; c'est une région au relief marqué, au climat rude. Région forestière, l'arboriculture et la céréaliculture ne sont généralement pas pratiqués.

Le tell collinéen ; C'est une région à une vocation agricole, la polyculture y est de mise ; vigne et arboriculture sur les terres légères, céréales et fourrages sur les terrasses alluviales des principaux oueds.

Les plaines du tell ; traditionnellement vouées à la céréaliculture, les plaines de Beni Slimane et Merachda sont enchâssées à l'intérieur du tell collinéen.

Le piémont méridional du tell ; caractérisé par une pluviométrie irrégulière située entre 300 et 400 mm, le piémont s'affirme comme une zone de transition vers les hautes plaines steppiques où la céréaliculture est la plus répandue. Notre travail est effectué dans les communes : Sedraia et Draa Essamar.

II.1.1.5. Situation géographique de la région d'Ain Defla

La wilaya d'Ain Defla est située à 145Km au Sud-ouest d'Alger. Elle est limitée par :

La wilaya de Tipaza au Nord,

Wilaya de Chlef à l'Ouest,

Wilaya de Médéa et Blida au Nord-Est,

Wilaya de Tissemsilt au Sud (Fig. 15)

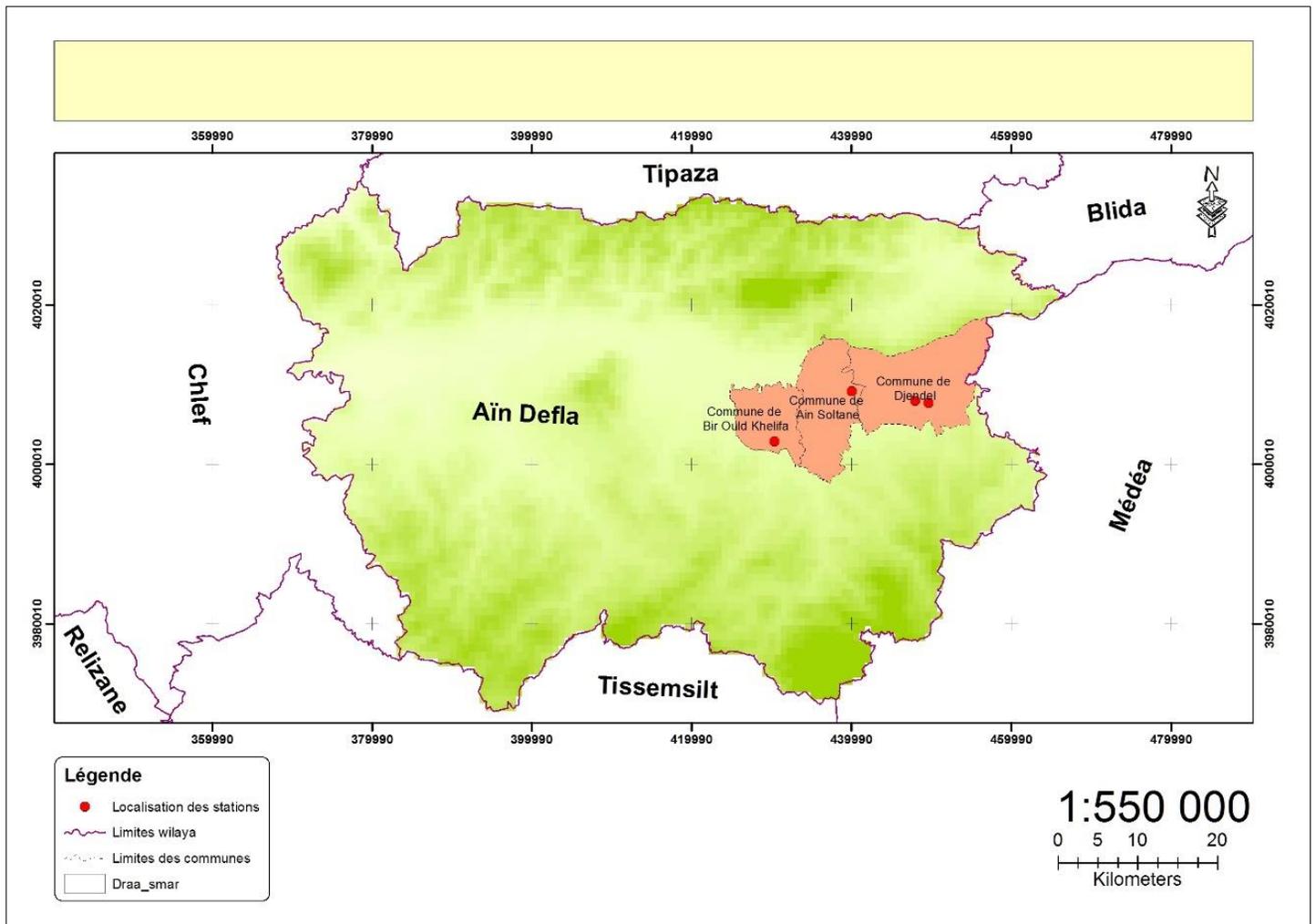


Figure 15. Situation géographique des stations d'étude dans la région d'Ain Defla. (Originale).

Elle se caractérise par un climat de type méditerranéen, semi-aride avec un caractère continental marqué par des écarts de température entre les mois de Janvier et aout avec un hiver froid caractérisé par de gelées fréquentes du mois de Novembre au mois mai.

Chapitre II. Matériels et Méthodes

La région de l'Ain Defla est située dans le centre-ouest de l'Algérie et se caractérise par un climat méditerranéen semi-aride. Les sols à texture fine sont prédominants (80%) et plus de 45% d'entre eux sont représentés par des sols argileux.

II.1.1.6. Situation géographique de la région de Mostaganem

Elle est située au Nord-Ouest du territoire national et couvre une superficie de 2269 Km². Elle est limitée à l'Est par la wilaya de Chlef, au Sud par les wilayas de Mascara et Relizane, à l'Ouest par la wilaya d'Oran et au Nord par la mer méditerranée. Entre les coordonnées géographiques (0°8' Ouest 36°29' Nord) et (0°46' Est 35°37' Nord) (Fig.16). Le relief de la région de Mostaganem s'individualise en deux principales unités morphologique, les monts Dahra et le plateau de Mostaganem.

La wilaya de Mostaganem appartient au climat méditerranéen et précisément au climat de l'Oranie, chaud et sec en été, doux et pluvieux en hiver, les deux éléments principaux du climat (précipitations et températures) conditionnent tous les rythmes d'irrégularités. La culture céréalière est très présente car c'est une culture vivrière pratiquée dans différentes zones de la wilaya dans les plaines et les dépressions, les collines et les piémonts des versants avec une superficie de 57502 ha (Larid, 1992).

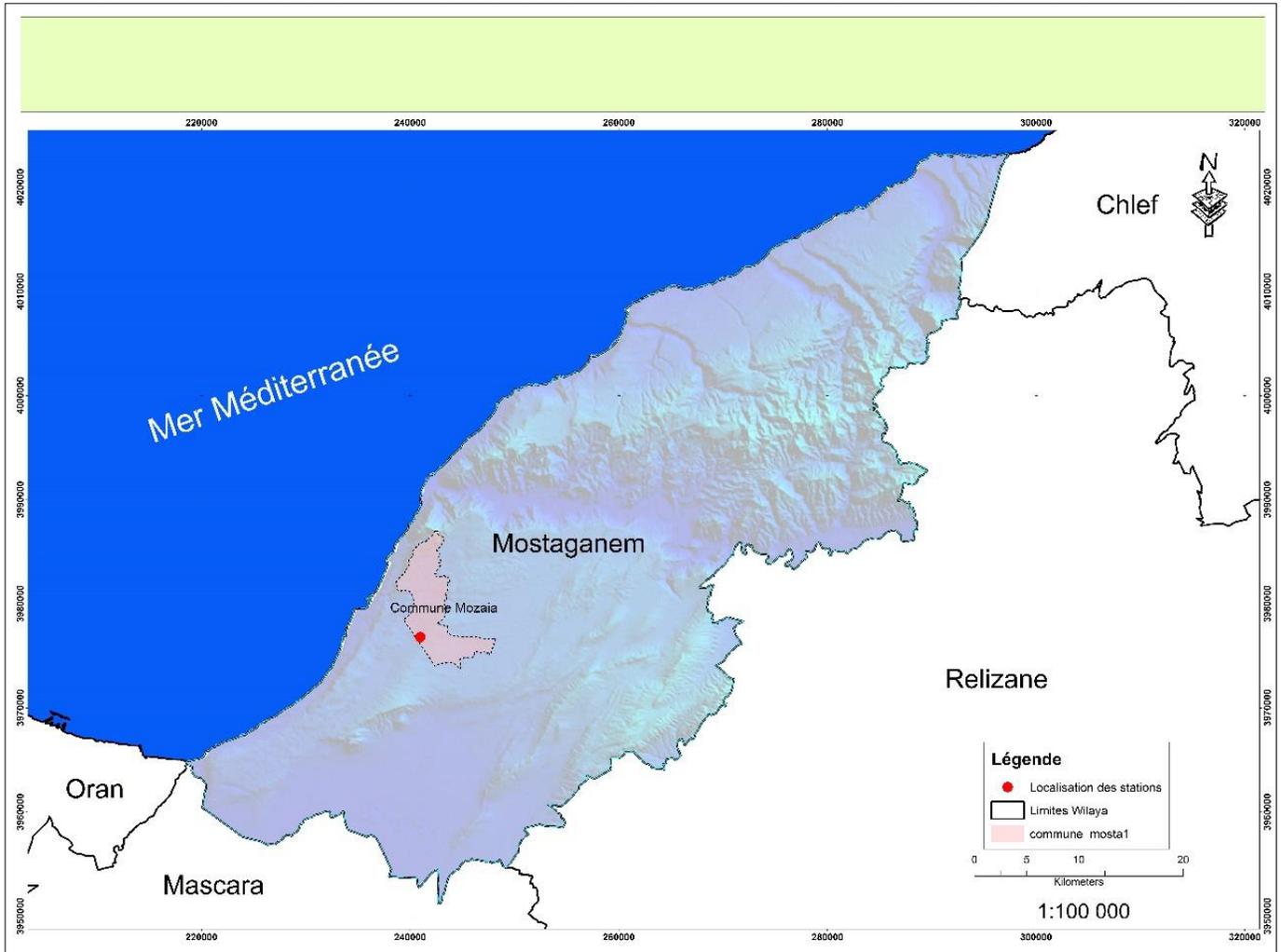


Figure 16. Localisation de la zone d'étude dans la wilaya de Mostaganem (Originale).

II.1.1.7. Situation géographique de la région d'Adrar

La wilaya d'Adrar ; Située au sud-ouest de l'Algérie, à 1543 Km de la capitale Alger, elle couvre une superficie de 427 968 Km² ce qui est équivalent à environ d'un cinquième (1/5) de la surface totale de l'Algérie. Elle se limite au Nord par la wilaya d'El Bayad, au Nord-ouest par la wilaya de Béchar, au Nord-est par la wilaya de Ghardaia, au Sud-est par la wilaya de Tamanrasset et au Sud par la république du Mali, au Sud-ouest par la Mauritanie (Saci *et al.*, 2013) (Fig.17).

La région d'Adrar est caractérisée par des sols de types minéraux bruts, avec une texture sableuse ou sablolimoneuse ou encore limoneuse, en présence de gypse. (Allal-Benfkhih, 2006). Les sols du Sahara sont peu fertiles, avec une capacité de rétention en eau très faible, environ 8%. Par conséquent ces sols ont besoin d'amendement en argile pour améliorer

Chapitre II. Matériels et Méthodes

leur état de fertilité. Ainsi, leur résistance à l'érosion, leur capacité d'échange cationique très limitée, 6 meq/100 g de terre, ne permet pas une bonne nutrition de la plante qui devient plus sensible au stress hydrique (Daoud et Halitim, 1994).

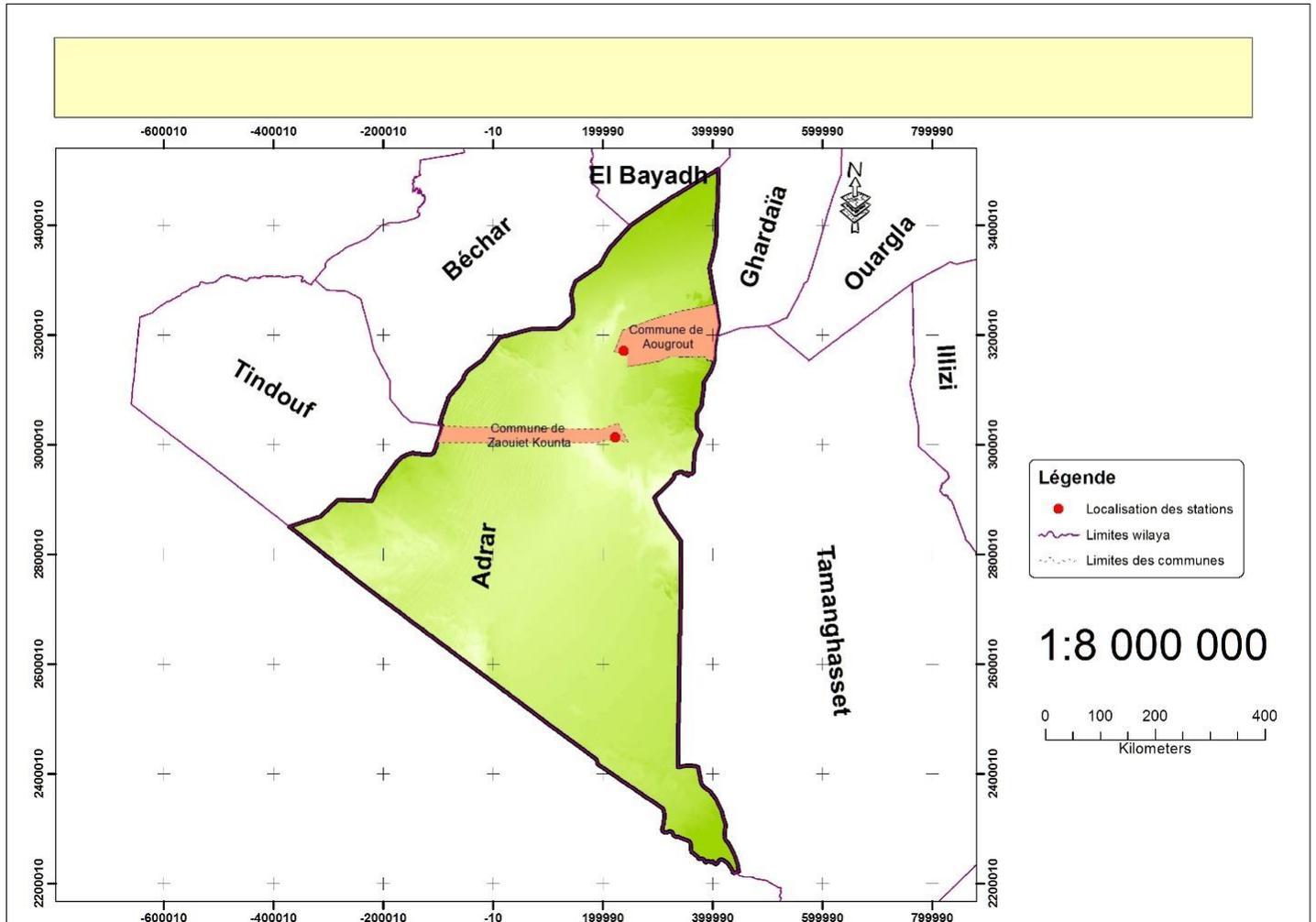


Figure 17. La situation géographique de la région d'Adrar (Originale).

II.1.1.8. Situation géographique de la région de Bordj Bou Arreridj

La wilaya de Bordj Bou Arreridj est située sur les hauts-plateaux. Elle est limitée au nord par la wilaya de Béjaïa, à l'est par la wilaya de Sétif, au sud par la wilaya de Msila et à l'ouest par la wilaya de Bouira, pour une coordonnée géographique ($36^{\circ} 04' N.$, $04^{\circ} 46' E.$). Elle s'étend sur une superficie de 3920.42 km^2 (C.F.B.B.A., 2016) (Fig. 18)

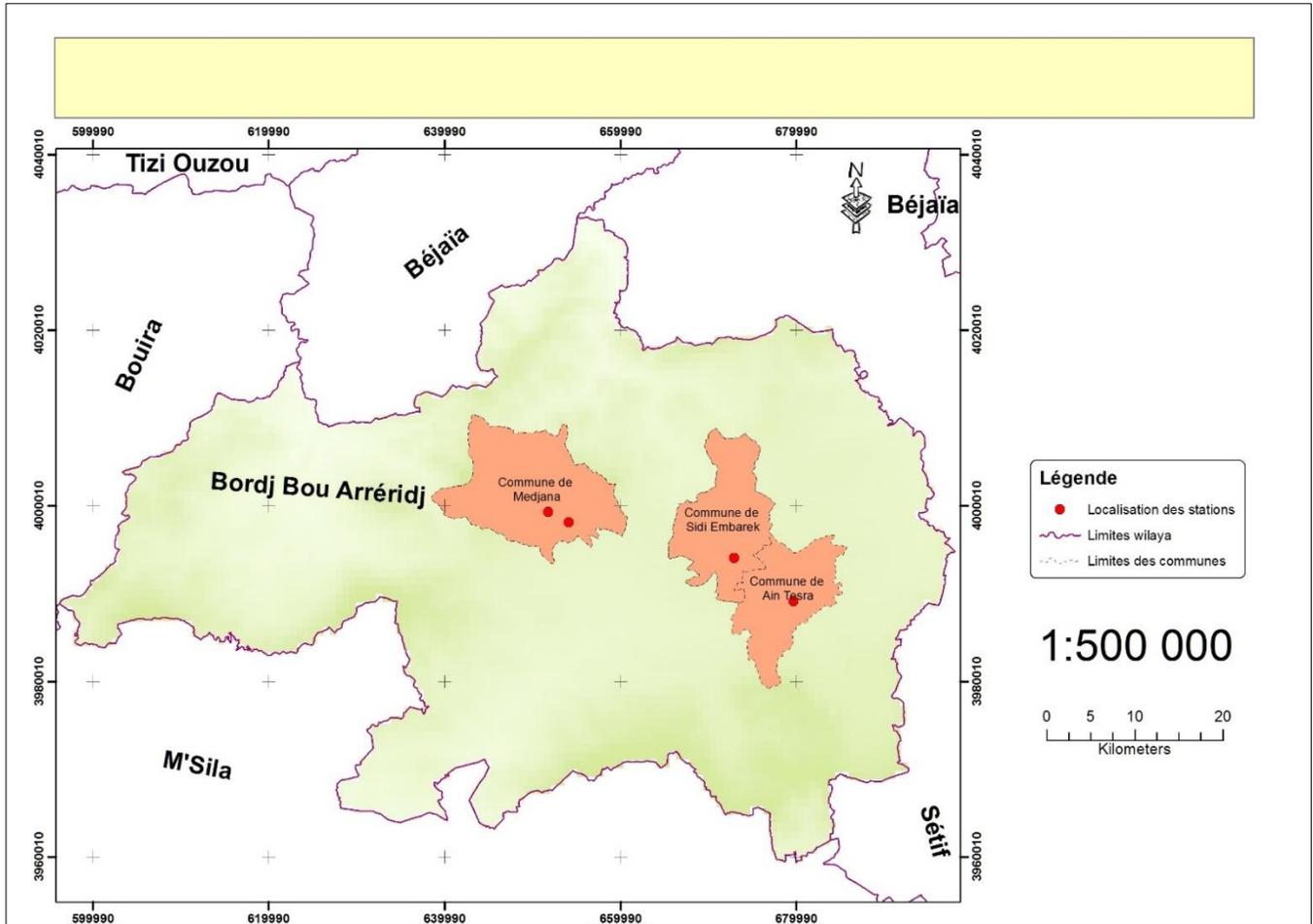


Figure 18. Situation géographique des stations d'étude dans la région de Bordj Bou Arreridj (Originale).

Le tableau suivant représente les stations et leurs coordonnées géographiques.

Tableau 6. Localisation géographique des régions d'étude.

Province	Région étudiée	Localisation géographique
Tissemsilt	Tissemsilt	35°37'31.2"N 1°52'43.6"E
	Bni Maïda	35°33'01.0"N 1°50'33.2"E
	Ammari	35°33'40.0"N 1°38'50.0"E
	Dhaya	35°35'28.5"N 1°44'54.7"E
Blida	Mouzaïa	36°28'09.2"N 2°39'31.1"E
Bouira	Aïn Bessam	36°18'01.3"N 3°41'03.0"E
	Bouira	36°22'02.5"N 3°51'57.1"E
Médéa	Draa Semar	36°16'26.3"N 2°42'16.4"E

Chapitre II. Matériels et Méthodes

	Sedraia	36°15'02.9"N 3°29'09.5"E
Aïn Defla	Djendel Site 01	36°12'55.0"N 2°25'16.3"E
	Djendel Site 02	36°12'46.2"N 2°26'23.2"E
	Ain Soltane	36°13'30.9"N 2°19'59.2"E
	Aïn Defla	36°15'46.5"N 1°55'15.0"E
	Bir Ould Khelifa	36°10'05.8"N 2°13'33.7"E
Mostaganem	Debdaba	35°54'04.9"N 0°07'47.5"E
Adrar	Zaouiet Kounta	27°12'57.2"N 0°11'53.9"E
	Timimoun	28°38'09.5"N 0°19'24.3"E
Bordj Bou Arreridj	Medjana1	36°07'35.9"N 4°41'12.3"E
	Medjana2	36°06'56.0"N 4°42'44.6"E
	Sidi Mbarek Site 01	36°04'32.5"N 4°55'12.6"E
	Sidi Mbarek Site 02	36°05'58.9"N 4°53'07.9"E
	Ras Elouad	36°01'48.8"N 4°59'40.3"E

II.1.2. Facteurs climatiques

Les effets de la température, des précipitations, de la texture du sol, du microbiote du sol et d'autres facteurs édaphiques sur le cycle de vie et les dégâts aux cultures causés par les nématodes à kystes des céréales (NKC) ont été rapportés dans des articles parus dans (Dababat *et al.*, 2015b ; Riley *et al.*, 2009 ; Riley et Qi, 2015). D'après Dajoz (2006), la température et la pluviosité sont les deux éléments principaux du climat. Les facteurs climatiques comme la température et la pluviométrie, suivis par une synthèse climatique des régions d'étude sont présentés.

II.1.2.1. Température

La température est un élément principal de climat (Dajoz, 2006). Elle représente un facteur limitant, parce qu'elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques, synthétiques et fermentaires du monde vivant ainsi que sa distribution dans la biosphère (Ramade, 2009). Seules les températures minimales et maximales sont examinées, car ce sont des facteurs qui peuvent occasionner des dégâts sur la culture du blé.

Chapitre II. Matériels et Méthodes

La température joue un rôle clé dans le processus d'éclosion des kystes. Cotten (1962) est le premier à suggérer qu'une période de basse température était essentielle pour l'éclosion ultérieure de kystes de *Heterodera avenae* en Angleterre. Des études supplémentaires ont démontré que les exigences de température diffèrent selon les espèces (Rivoal et Cook, 1993).

Les données thermiques maximales et minimales des régions d'étude durant l'année 2015 sont mentionnées dans le tableau 07

Au niveau de la région de Tissemsilt durant l'année 2015, la température moyenne mensuelle la plus faible est notée au mois de Décembre ($0,7^{\circ}\text{C}$) et la plus forte température est enregistrée au mois de juin ($36,8^{\circ}\text{C}$). La température moyenne la plus faible dans la région de Bouira est au mois de Janvier ($4,18^{\circ}\text{C}$) et la plus forte température est signalée au mois de Juillet ($35,5^{\circ}\text{C}$). Dans la région de Médéa pendant l'année 2015, le niveau thermique moyen mensuel le plus faible est déclaré au mois de Février (2°C) et le plus fort en Juillet ($34,8^{\circ}\text{C}$). Au sein de la région d'Ain Defla (2015), la température moyenne la plus faible est notée au mois de Février ($4,8^{\circ}\text{C}$) et la température moyenne plus haute est enregistrée au mois de Juillet ($37,6^{\circ}\text{C}$). A Mostaganem durant la même année, il est noté que la température moyenne la plus faible ($4,3^{\circ}\text{C}$) est observée au mois de Janvier et la température moyenne la plus élevée est enregistrée au mois de Juillet ($33,4^{\circ}\text{C}$). Durant la même période dans la région d'Adrar le niveau thermique moyen mensuel le plus faible est noté au mois de Janvier ($4,7^{\circ}\text{C}$) et le plus important est souligné au mois d'Août ($45,1^{\circ}\text{C}$). Cependant dans la région de Bordj Bou Arreridj, la température moyenne la plus faible est observée au mois de Janvier (1°C) et la température moyenne la plus élevée au mois de Juillet (37°C). Tandis que dans la région Blida durant l'année 2015, la moyenne thermique la plus faible est enregistrée au mois de Décembre ($7,10^{\circ}\text{C}$) et la plus élevée est soulignée au mois de Juillet (34°C)

Chapitre II. Matériels et Méthodes

Tableau 7. Températures moyennes mensuelles, maxima et minima des régions d'étude.

Région	Mois	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Tissemsilt	M.° C	16,7	17,2	23,3	27,4	34,9	36,8	29,6	28,7	23,1	16,2	8,7	11,4
	m.° C	1,3	5	11,9	14,5	19,8	18,3	13,2	10,6	7,5	2,5	2	0,7
	(M.°+m.°)/2	9,00	11,10	17,60	20,95	27,35	27,55	21,40	19,65	15,30	9,35	5,35	6,05
Bouira	M.° C	13,05	14,13	17,43	20,41	25,40	31,32	35,50	35,47	30,00	24,86	17,69	13,85
	m.° C	4,18	4,25	6,33	8,41	12,20	16,60	19,79	20,15	17,01	13,26	8,33	5,18
	(M.°+m.°)/2	8,62	9,19	11,88	14,41	18,80	23,96	27,65	27,81	23,51	19,06	13,01	9,52
Médéa	M.° C	9,30	6,30	14,00	20,80	25,00	27,60	34,80	33,00	26,10	21,00	16,10	15,30
	m.° C	3,40	2,00	5,90	10,90	14,40	17,40	23,50	22,10	16,10	13,20	8,20	7,40
	(M.°+m.°)/2	6,35	4,15	9,95	15,85	19,70	22,50	29,15	27,55	21,10	17,10	12,15	11,35
Ain Defla ; Miliana	M.° C	12,8	10,40	17,90	24,00	28,10	30,50	37,60	35,00	29,70	24,30	19,60	18,40
	m.° C	5,20	4,80	7,70	12,60	15,80	18,30	24,60	23,60	18,40	15,10	10,00	8,60
	(M.°+m.°)/2	9,00	7,60	12,80	18,30	21,95	24,40	31,10	29,30	24,05	19,70	14,80	13,50
Mostaganem	M.° C	15,6	14,20	18,60	23,50	27,40	30,00	33,40	32,50	28,20	25,50	20,30	19,30
	m.° C	4,30	7,20	5,10	11,50	13,20	16,10	21,30	22,50	17,20	15,00	8,80	5,90
	(M.°+m.°)/2	9,95	10,70	11,85	17,50	20,30	23,05	27,35	27,50	22,70	20,25	14,55	12,60
Adrar	M.° C	20,8	23,5	26,9	37,3	40,9	43	44,3	45,1	40,5	34,9	27,1	22,8
	m.° C	4,7	8,3	9,9	18,9	22,6	25,6	27,9	30,5	26,2	20,8	12,3	6,9
	(M.°+m.°)/2	12,75	15,90	18,40	28,10	31,75	34,30	36,10	37,80	33,35	27,85	19,70	14,85

Chapitre II. Matériels et Méthodes

Bordj Bou Arreridj	M.° C	11,4	9,7	16,5	23,3	28,5	31,3	37	34,9	29,1	22,4	17,8	15,7
	m.° C	1	1,2	3,6	8,4	12,5	14,8	18,6	20,5	16,7	11,9	5,8	3,4
	(M.°+m.°)/2	6,2	5,45	10,05	15,85	20,5	23,05	27,8	27,7	22,9	17,15	11,8	9,55
Blida	M.° C	20,13	18,72	18,97	23,35	26,25	30,90	34,00	32,91	31,92	29,15	19,83	17,58
	m.° C	11,08	10,14	10,05	16,70	20,10	24,75	26,24	23,80	15,61	15,85	8,76	7,10
	(M.°+m.°)/2	15,61	14,43	14,51	20,03	23,18	27,83	30,12	28,36	23,77	22,50	8,76	12,34

(Tutiempo., 2018)

m : moyennes mensuelles et annuelles des températures minimales sous abri en degrés Celsius. **M** : moyennes mensuelles et annuelles des températures maximales sous abri en degrés Celsius. **T= (M+m)/2** : températures moyennes mensuelles et annuelles sous abri en degrés Celsius.

Chapitre II. Matériels et Méthodes

II.1.2.2. Pluviométrie.

La pluviométrie constitue un facteur fondamental pour tout élément vivant (Ramade, 1984). Elles influent sur la vitesse de développement des animaux, sur leur répartition dans le biotope et sur la densité de leurs populations (Dajoz, 2006). L'humidité est presque toujours présente lors de la plantation de petits grains et les films d'humidité dans le sol sont essentiels à la mobilité de ces nématodes (Smiley *et al.*, 2017). Des films d'humidités excessivement épais peuvent empêcher la mobilité des nématodes et empêcher les J_2 d'envahir les extrémités des racines. Les pertes de rendement en grains dues aux espèces de nématode à kystes des céréales (NKC) sont souvent plus importantes économiquement dans les systèmes de production de blé pluvial que dans les systèmes irrigués (Nicol et Rivoal, 2009 ; Toumi *et al.*, 2015). Par exemple, les dégâts causés au blé par *H. filipjevi* étaient plus importants lorsque le blé n'était irrigué que quatre fois au lieu des sept fois et considérées comme étant optimaux du point de vue agronomique dans la province d'Ispahan en Iran (Fard *et al.*, 2015). Les précipitations mensuelles des régions d'étude mois par mois sont exposées dans le Tab. 8.

Tableau 8. Précipitation mensuelles exprimées en mm des régions d'étude.

Mois P. (mm)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Total
Tissemsilt	87	60,2	113,2	0,7	27,4	7	1,7	0	11,5	0	37,4	68	414,1
Bouira	71,0	49,00	86,00	64	60	21,0	14,90	27,0	38,00	69,00	62,00	93	654,9
Médéa	116,0	331,3	51,06	0	18,54	19,54	0	13,21	63,24	55,87	34,53	0,25	703,6
Ain Defla	89,41	88,54	56,39	0	9,15	6,60	30,99	11,69	22,35	27,93	25,14	0,00	368,1
Mostaganem	83,06	92,21	27,68	1,78	9,90	4,06	0	0,25	2,79	49,78	27,95	0,00	299,4
Adrar	0	0,51	0	0	0	0	0	9,14	0,25	0	0	0	9,9
B.B. Arreridj	44,46	45,73	38,1	7,36	6,86	20,08	24,13	16,26	36,57	58,94	19,56	0	318,0
Blida	71,10	135,1	106	52,4	26,10	0,10	8,00	0	6,00	10,40	86,00	157,7	658,9

(Tutiempo., 2018)

P (mm) : Précipitations.

Chapitre II. Matériels et Méthodes

La somme des précipitations dans la région de Tissemsilt durant l'année 2015 est égale à 414,1 mm. Les chutes les plus élevées sont observées au mois de Mars (113,2 mm). Dans la région de Bouira la somme des précipitations est égale à 659,4mm, les chutes les plus élevées sont observées au mois de Décembre (93mm). Cependant dans la région de Médéa l'ensemble des précipitations est égale à 703,6 mm. Les chutes les plus importantes ont été notées au mois de Février (331,3 mm) et deux mois sont marqués avec aucune précipitation. La région d'Ain Defla ne possède pas des données climatiques dans le site Tutitempo, nous avons pris en considération les données climatiques de celle de Miliana, la globalité des précipitations est égale à 368,19 mm. Les chutes de pluie les plus importantes ont été signalées au mois de Janvier (89,41 mm). Par contre Avril et Décembre sont les plus secs. Concernant la région de Mostaganem la somme des précipitations durant l'année 2015 est égale à 299,46 mm. Il est à noter que les chutes des pluies les plus élevées sont observées au mois de Février (92,21 mm) et les mois les plus secs sont Juillet et décembre. Cependant la pluviométrie dans la région d'Adrar est très faible. Elle est égale à 9,9 mm, les faibles chutes de pluie ont été notées aux mois de Février, Août et Septembre. Au niveau de la région de Bordj Bou Arreridj l'ensemble des précipitations est égale à 318 mm. Les chutes les plus importantes ont été notées au mois d'Octobre (58,94 mm) et aucune pluie n'est observée au mois de décembre. Dans la région de Blida durant l'année 2015, la somme des précipitations est égale à 658,9 mm. La pluviométrie la plus importante a été notée au mois de Décembre (157,70 mm) aucune précipitation n'est observée en Août (0 mm) (Tab. 8).

II.1.3. Synthèse climatique

Pour bien déterminer la synthèse climatique des régions de prospections nous utilisons le diagramme ombrothermique de Gaussen et le Climagramme d'Emberger. En utilisant les données concernant les températures et les précipitations. Le Climagramme pluviométrique d'Emberger permet de situer la région dans l'étage bioclimatique qui lui correspond.

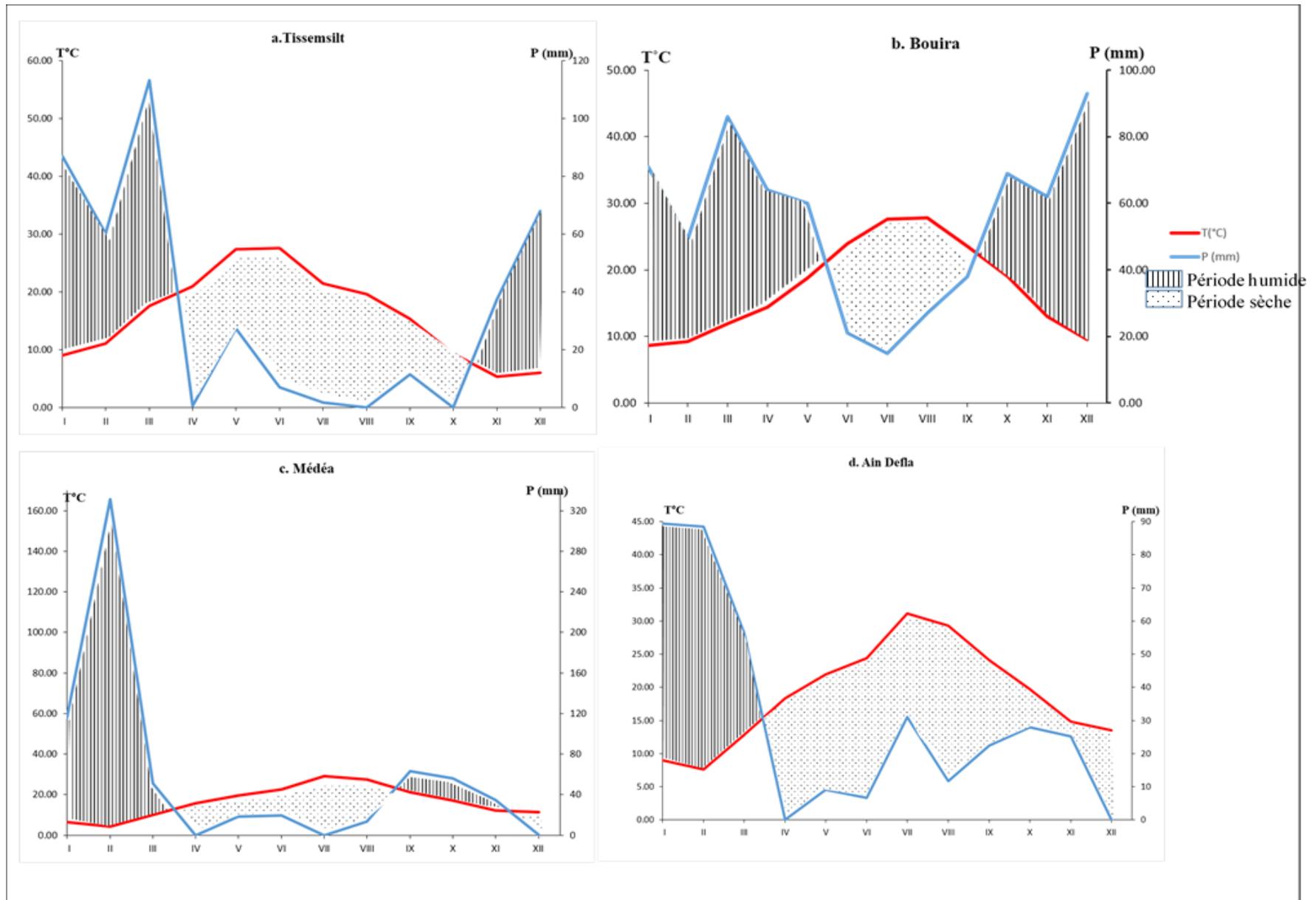
II.1.3.1. Diagramme ombrothermique

Gaussen considère que la sécheresse s'établit pour un mois donné lorsque le total des précipitations P exprimé en millimètres est inférieur au double de la

Chapitre II. Matériels et Méthodes

température, soit $P < 2T$ (Dreux, 1980). A partir de cette hypothèse, il est possible de tracer le diagramme ombrothermique au niveau duquel la saison sèche apparaît nettement (Dajoz, 1982). La figure suivante représente le diagramme ombrothermique de Gaussen des régions d'étude (Fig. 19). Le diagramme ombrothermique de la région de Tissemsilt durant l'année 2015 montre la présence de deux périodes distinctes, l'une sèche qui s'étale sur sept mois presque, soit du début de mois de Mars jusqu'à la mi-October. Les autres mois représentent la période humide (Fig. 19a). La région de Bouira présente deux périodes, une sèche qui s'étale sur une durée de cinq mois, soit du début de mois de Mai jusqu'à la mi-September. L'autre période est humide qui s'étale du mois de Janvier jusqu'au début de Mai et de mi-September jusqu'à le mois de Décembre (Fig. 19b). La région de Médéa présente une période sèche qui s'étale de la mi-Mars jusqu'à Décembre. Elle est interrompue par une période humide, qui s'étale du mois de September jusqu'au mois de Novembre. (Fig. 19c). La région d'Ain Defla subit deux périodes, la première qui est sèche qui s'étale de la moitié du mois de Mars jusqu'au mois de Décembre et la deuxième est humide qui s'étale sur trois mois (Fig. 19d). Au niveau de la région d'Adrar le diagramme ombrothermique a montré la dominance de la période de sécheresse durant toute la période d'étude (Fig. 19e). La région de Mostaganem subit deux périodes l'une sèche qui s'étale du mois de Mars jusqu'au mois de Décembre entrecouper d'un mois humide en October. La période humide est apparait sur presque trois mois (du mois de Janvier jusqu'à la mi-mars) (Fig. 19f). Au niveau de la région de Bordj Bou Arreridj le diagramme ombrothermique a révélé la présence de deux période, la première sèche qui s'étale de la mi-Mars jusqu'au mois de Décembre mais cette période a été interrompue par une durée humide de la mi-September jusqu'à Novembre. La période humide s'étale sur quatre mois (Fig. 19g). La région de Blida subit deux période distinctes, la première sèche qui s'étale de la moitié de mois d'Avril jusqu'au la moitié du mois d'October. La deuxième période est humide qui s'étale sur six mois de Janvier jusqu'à la mi-Avril et la mi-October jusqu'à le mois de Décembre (Fig. 19h).

Chapitre II. Matériels et Méthodes



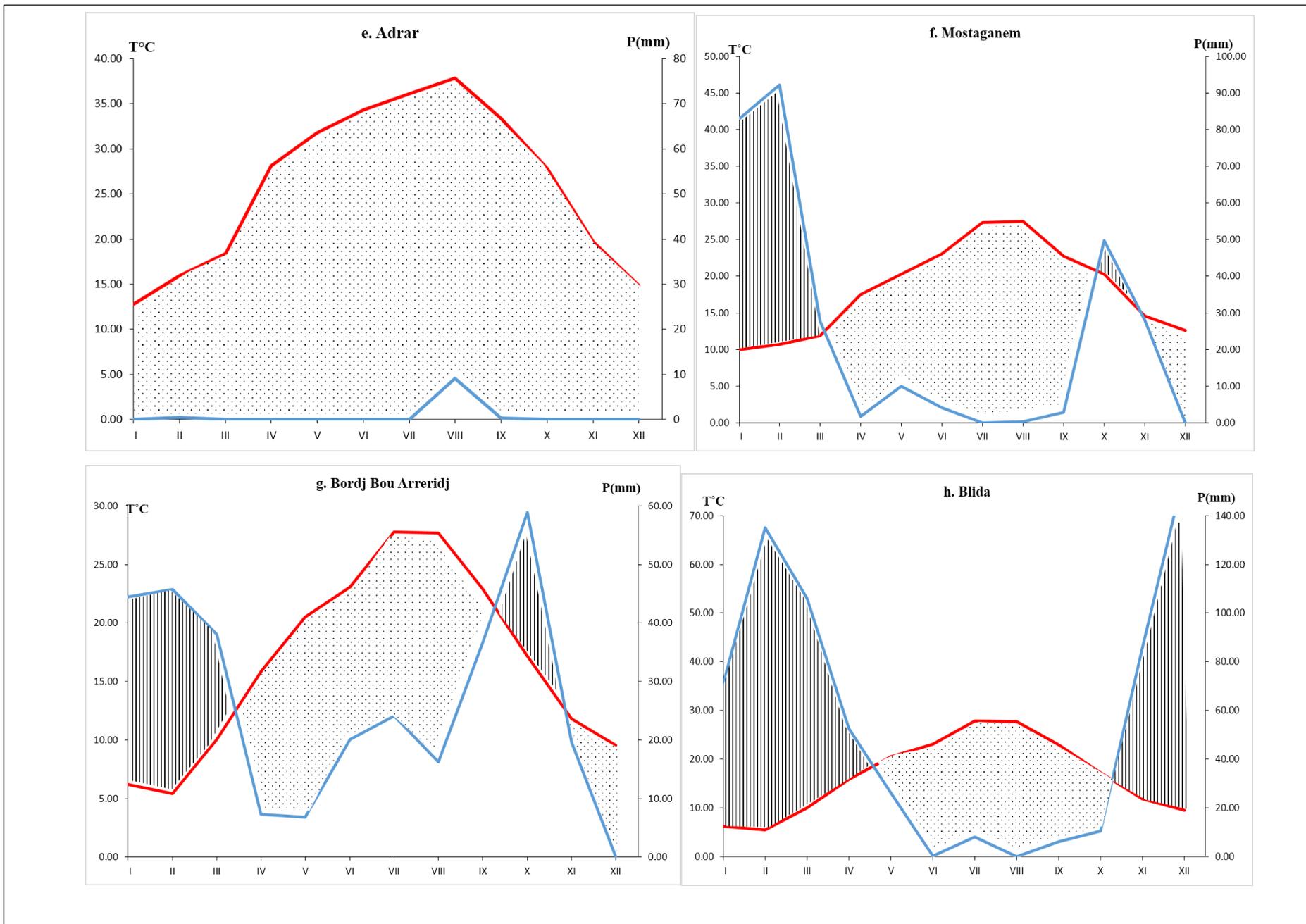


Figure 19. Diagramme ombrothermique des régions d'étude.

II.1.3.2. Place des régions d'études dans le climagramme d'Emberger

Selon Dajoz, (1971), classer une région donnée dans l'un des étages bioclimatiques se fait sur les températures et les précipitations de cette dernière. Emberger a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q2, qui dépend des précipitations moyennes annuelles et des moyennes de températures minima et maxima, respectivement du mois le plus froid et le plus chaud. Cela permet de positionner une station sur un diagramme. Il propose donc la formule suivante :

$$Q2 = 2000P/M^2 - m^2$$

En appliquant la formule élaborée par Stewart (1969) qui a modifié la formule d'Emberger comme suit :

$$Q2 = 3,43 \times P / (M - m)$$

- Q2 : Quotient pluviométrique d'Emberger.
- P : La hauteur des précipitations annuelles exprimées en mm.
- M : La moyenne des températures maxima du mois le plus chaud.
- m : La moyenne des températures minima du mois le plus froid.

La figure suivante représente le diagramme ombrothémique de Gaussen avec l'emplacement des régions prospectées.

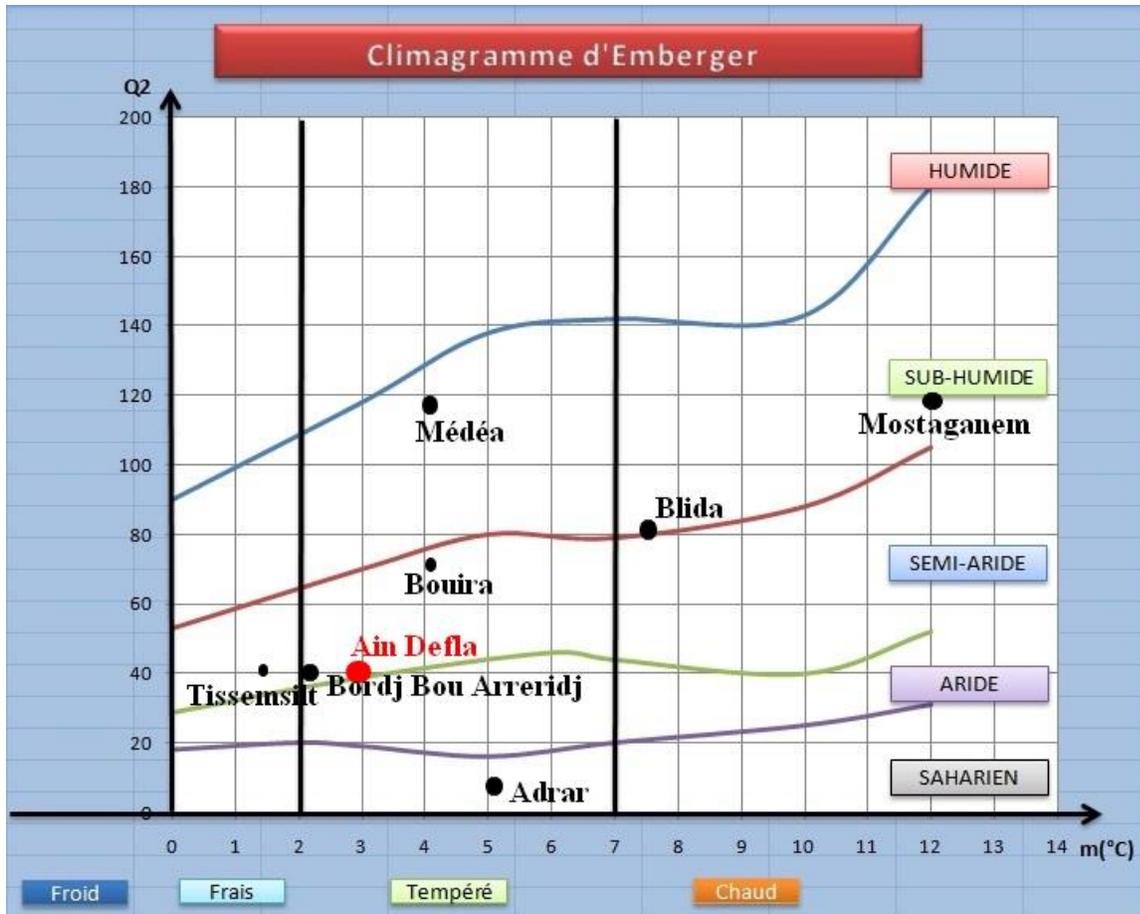


Figure 20. La place des régions d'étude dans le Climagramme d'Emberger.

Le quotient pluviométrique Q_2 de la région de Tissemsilt calculé sur une période de dix ans entre 2006 et 2016 est égal à 41,46. En rapportant cette valeur sur le climagramme d'Emberger, nous observons que la région d'étude se situe dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver frais. Le quotient pluviométrique de la région de Bouira est égal à 71,72. Il est calculé pour une période de 27 ans s'étalant de 1990 à 2017. Il ressort que la région de Bouira se situe dans l'étage bioclimatique semi-aride supérieur à hiver tempéré. La valeur de Q_2 pour la région d'Ain Defla est égale à 38,5, ce qui montre que cette région d'étude appartient à l'étage bioclimatique semi-aride à hiver tempéré. Le quotient pluviométrique Q_2 calculé pour la région de Mostaganem durant la période de 10 ans (2007–2016) est égal à 126,75. En projetant cette valeur sur le climagramme d'Emberger, la région apparaît dans l'étage bioclimatique subhumide à hiver chaud. Le calcul de Q_2 étant de (9,16), place la région d'Adrar dans l'étage bioclimatique saharien à hiver tempéré. Le quotient pluviométrique calculé pour la région de Bordj Bou Arreridj est égal à 38,41 et la

Chapitre II. Matériels et Méthodes

température moyenne des minima du mois le plus froid atteint 2,16 °C. Ces valeurs reportées sur le diagramme pluviothermique d'Emberger montrent que la région appartient à l'étage bioclimatique semis aride à hiver tempéré. En ce qui concerne la région de Blida, le niveau du Q2 est égal à 81,6 ce qui signifie que cette région fait partie de l'étage bioclimatique subhumide à hivers chaud (Fig. 20).

II.2. Etude de l'état d'infestation des régions d'étude par les nématodes à kystes inféodés aux céréales

II.2.1. Échantillonnage du sol

L'échantillonnage de sol est la première étape pour la détection des nématodes à kystes des céréales. Les échantillons de sol sont généralement prélevés après la récolte (Juillet et Août 2015), car les densités de population sont proches de leur maximum et l'analyse fournira des informations opportunes pour la saison suivante. Le prélèvement est effectué en utilisant une binette ou tarière. Des échantillons de sol sont prélevés à une profondeur de 10-20 cm car, la plupart des kystes sont situés dans les 10 à 15 cm supérieurs du sol (Smiley *et al.*, 2007 ; Wang *et al.*, 2013 ; Liu *et al.*, 2014)

Vingt-deux échantillons de sol ont été prélevés dans les champs répartis dans les huit régions céréalières d'Algérie. Chaque échantillon de sol est constitué de 13 sous-échantillons ; un sous-total de 2,5 kg a été récolté autour des systèmes racinaires après avoir enlevé la couche supérieure de 5 cm de la rhizosphère des plants de blé. Les sous-échantillons ont été prélevés en «W» dans des parcelles réservés à la céréaliculture. L'échantillonnage est réalisé avec le modèle systémique, qui donne des résultats fiables sur la distribution des nématodes que le modèle aléatoire (Erginbas *et al.*, 2008). Les échantillons de sol sont placés dans des sacs en plastique étiquetés (date, lieu de prélèvement, le précédent cultural et le numéro de la parcelle) pour conserver l'humidité de sol.

Les échantillons ont été transférés au laboratoire de nématologie, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie (E.N.S.A) El Harrach Alger pour les analyses suivantes.

Chapitre II. Matériels et Méthodes

II.2.2. Extraction des nématodes

Après avoir séché le sol à une température ambiante, chaque échantillon de sol récolté a été soigneusement mélangé dans le but de l'homogénéiser. Les kystes ont été extraits de cinq sous-échantillons de 500 g de l'échantillon global en utilisant la technique de Fenwick modifiée (Fenwick., 1940 ; Smiley., 2011).

II.2.2.1. Fenwick can

L'appareil de Fenwick est utilisé pour l'extraction des kystes de sol secs (Fig. 21). Le poids standard de l'échantillon utilisé dans notre recherche sur les nématodes à kystes des céréales est de 500g avec 5 sous-échantillons.

II.2.2.1.1. Principe et méthode

La méthode utilise les propriétés flottantes des kystes séchés et de différence de taille entre les fractions du sol. Le principe de l'appareil de Fenwick est basé sur la densité des kystes par rapport à celle de l'eau (Nakachian et Jacquemont, 1971 in Mokabli *et al.*, 2002). Les kystes pleins et humides ont une densité supérieure à 1,08. En revanche, les kystes secs ne dépassent pas l'unité. L'échantillon du sol est retenu sur le tamis. Un jet d'eau est activé sur le tamis ce qui entraîne le sol dans le corps de l'appareil. Les particules lourdes passent à travers le puits jusqu'au fond de la boîte (l'appareil) et les particules fines et légères, comme les kystes, restent à flot. Lorsque le récipient est rempli, les kystes flottants sont transportés sur le récipient et tomber sur un tamis de 250 μ m (Bezooijen., 2006).

II.2.2.1.2. Procédure

- Sécher un (sous) échantillon d'un poids de 500 g de sol
- Nettoyez le corps de l'appareil avec de l'eau. Fermez la sortie (Orifice de vidange) et remplissez le corps avec de l'eau. Placer un tamis de 250 μ m sous la sortie du collecteur de débordement (gouttière), de façon à ce qu'il passe sur le tamis. Le tamis doit être légèrement incliné pour faciliter l'écoulement de l'eau.
- Laver l'échantillon à travers le tamis supérieur en utilisant la buse de pulvérisation. Continuez à pulvériser pendant environ 5 minutes.

Chapitre II. Matériels et Méthodes

- Rincer soigneusement l'entonnoir et le collier avec de l'eau pour s'assurer que tous les kystes sont récupérés sur le tamis.
- Les particules récoltées (kystes et débris) dans le tamis sont récupérées sur un papier filtre placé dans un entonnoir porté par un Erlenmeyer.
- Les kystes sont prélevés sous une loupe binoculaire.

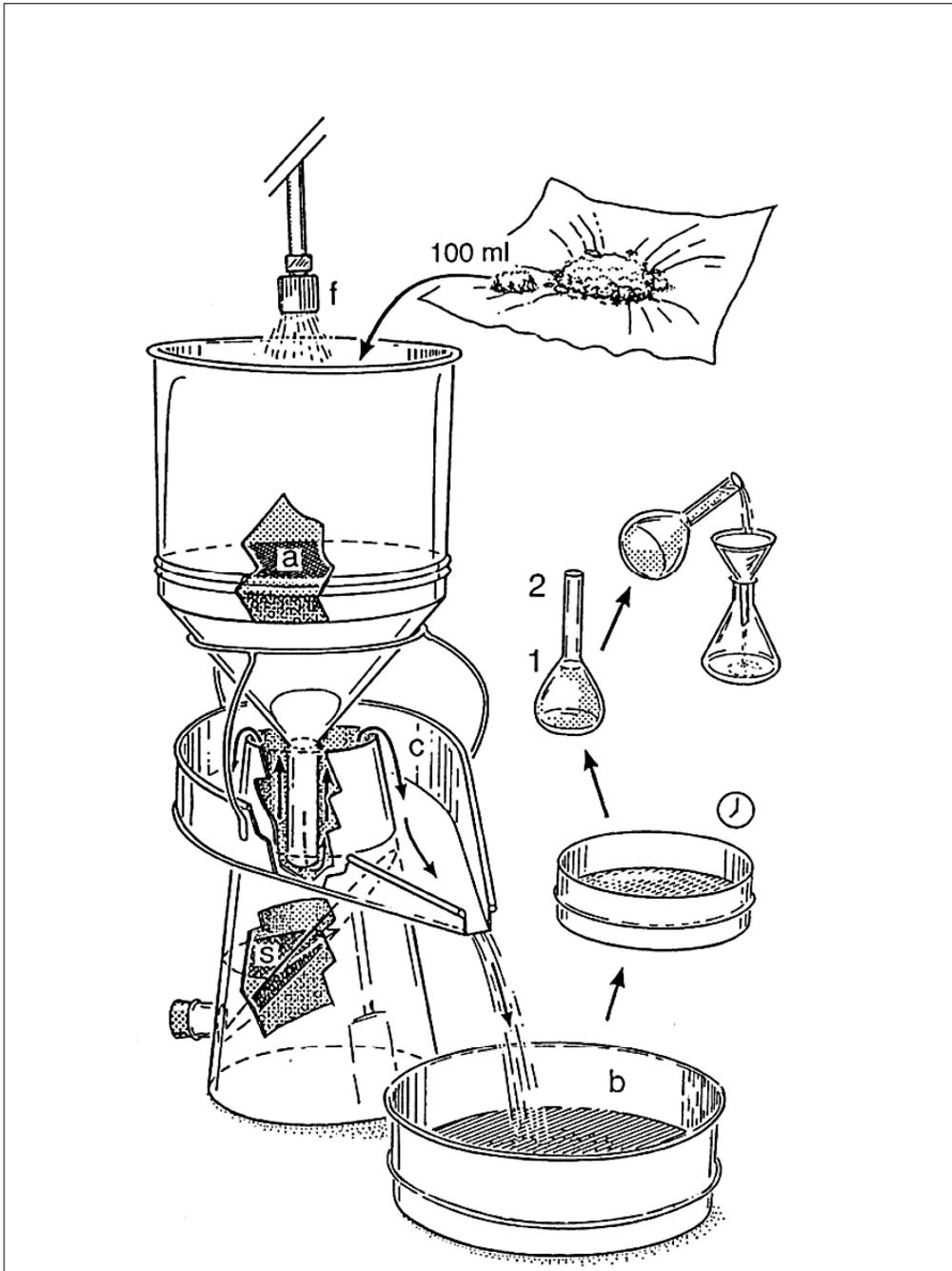


Figure 21. La méthode Fenwick. Extraction des kystes du sol sec (Bezooijen., 2006).

II.2.2.1.3. Avantages et inconvénients

Les grands échantillons peuvent être manipulés de manière standardisée. Mais la méthode nécessite de grandes quantités d'eau. Pour isoler les kystes des débris, un nettoyage supplémentaire est nécessaire (Van Bezooijen., 2006 ; Bellvert *et al.*, 2008). En termes de coûts (équipement, main d'œuvre, eau), le tableau 9 présente les caractéristiques de la méthode d'extraction.

Tableau 9. Caractéristique de la méthode d'extraction (Van Bezooijen., 2006).

Méthode d'extraction (Pour les kystes)	Principe (*)	Poids de l'échantillon (g)	Efficacité d'extraction	Coût de l'équipement	Coût du travail	Consommation d'eau
Fenwick can	tt, sa, ts	300	++	++	++	+++

(*) : tt : Taille et forme de tamis
 sa : Les kystes secs flottent à cause de sa densité
 ts: Taux de décantation (décantation, élutriation)

+ Petit (faible)

+++ Grand (haut)

NB : Selon le même auteur, les gradations ont été grossièrement estimées.

II.2.3. Récupération des kystes

Les kystes pleins ont été retenus sur le tamis de 250 µm et ont été prélevés avec une aiguille de dissection sous une loupe binoculaire (G x25) (Fig. 22). Les espèces ont été identifiées sur la base de caractéristiques morphologiques (Handoo, 2002). Les kystes sont comptés des échantillons de 500 g de sol. Ils ont été stérilisés en surface avec de l'hypochlorite de sodium NaOCl (0,1%) pendant 5 minutes et rincés plusieurs fois avec de l'eau distillée stérile pour nos essais. Les kystes nettoyés et stérilisés ont été transférés dans un Eppendorf et stockés à 4°C jusqu'à utilisation.



Figure 22. Loupe binoculaire (Leica) branché à un ordinateur (Originale).

II.2.4. Estimation et comptage du contenu du kyste

Pour chaque échantillon de sol dans les zones étudiées, le degré d'infestation est exprimé en nombre des kystes pleins /500 g de sol. Le nombre moyen des œufs et les juvéniles de deuxième stade larvaire (J_{2s}) par 100g de sol.

Les œufs et les J_{2s} sont déterminés pour chaque kyste (Abidou *et al.*, 2005; Ahmadi et Tanha Maafi, 2014; Toktay *et al.*, 2015)

Pour calculer le nombre moyen des œufs et des J_{2s} par kyste nous avons utilisés la méthode suivante ;

- Transférer les kystes sur une lame de verre à l'aide d'un pinceau fin, sous un microscope.
- Gardez une distance raisonnable entre les kystes et laissez chaque kyste dans une goutte d'eau.
- Placez une deuxième lame de verre par-dessus de la première et déplacez la lame légèrement d'avant en arrière, de sorte que les kystes éclatent et que les œufs et les larves soient libérés.
- Estimer, le nombre d'œufs et des J_{2s} par kyste.

Les données ont été analysées en utilisant une ANOVA avec un logiciel R. version 3.2.4. Les différences ont été testées en utilisant l'analyse de la variance (ANOVA) suivie du test

Chapitre II. Matériels et Méthodes

HSD de Tukey pour la comparaison des moyennes. Les différences statistiques ont été considérées comme significatives si $P \leq 0,05$.

II.3. Identification moléculaire des espèces de nématodes à kystes (*Heterodera* spp.) en Algérie et une phylogénie basée sur des séquences ITS-ADNr.

Les espèces des NKC peuvent être distinguées les unes des autres par des caractères morphologiques et morphométriques des kystes et des caractéristiques des J_{2s} (Abidou *et al.*, 2005; Subbotin *et al.*, 2003). Cette identification traditionnelle devient plus difficile et exige une étude approfondie et des compétences spécialisées (Tanha Maafi *et al.*, 2003; Rivoal *et al.*, 2003; Subbotin *et al.*, 2003; Waeyenberge *et al.*, 2009). Cependant, l'identification moléculaire est devenue essentielle, plus populaire et rapide pour l'identification précise des espèces et des sous-espèces de nématodes à kystes (Baklawa *et al.*, 2015a; Pridannikov *et al.*, 2015; Smiley et Yan, 2015; Subbotin *et al.*, 2001; Toumi *et al.*, 2013). Au cours des 20 dernières années, l'identification par des méthodes moléculaires utilisant la PCR-RFLP et la PCR avec des amorces spécifiques a été utilisée avec succès pour le diagnostic de nombreux nématodes à kystes. L'analyse des séquences génétiques ITS-ADNr permet une identification plus précise au niveau de l'espèce que la PCR-RFLP (Subbotin *et al.*, 2010). Le gène de la séquence ADNr contient deux régions ITS (ITS-5.8S-ITS2), les 5,8 gènes situés entre les gènes 18S et 28S (Fig. 23).

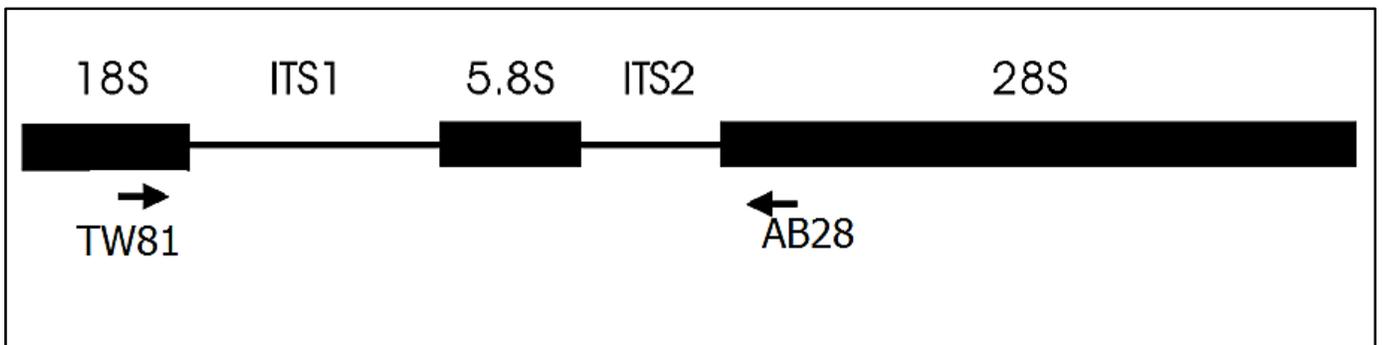


Figure 23. Structure des gènes d'ADNr et position des amorces universelles (Subbotin *et al.*, 2001) (The internal transcribed spacer =Espaceur Transcrit Interne (ITS)).

Chapitre II. Matériels et Méthodes

Les deux espaceurs ITS1 et ITS2 évoluent plus rapidement et sont donc plus variables que les gènes codants. Par conséquent, ils étaient utiles pour identifier les espèces et pour étudier la phylogénétique. Ferris *et al.*, (1993 ; 1994) ont été les premiers à séquencer ITS1 et ITS2 à partir de plusieurs isolats de nématodes à kyste appartenant au genre *Heterodera*, et à comparer les séquences avec celles publiées sur *Caenorhabditis elegans*. En outre, il existe un phénomène d'hétérogénéité ou de polymorphisme tel que rapporté dans les populations de *H. avenae* (Bekal *et al.*, 1997).

Subbotin *et al.*, (2000, 2003) ont signalé des variations intraspécifiques au sein des espèces *Heterodera* : *H. betae*, *H. carotae*, *H. ciceri*, *H. cruciferae*, *H. filipjevi*, *H. glycines*, *H. pratensis*, *H. schachtii*, *H. trifolii*, *H. urticae* et *H. zaeae*. (Madani *et al.*, 2004; Rivoal *et al.*, 2003) ont signalé un niveau relativement élevé de divergence de séquence entre les populations de *H. hordecalis* et ont suggéré que deux espèces puissent être regroupées en sous ce taxon.

II.3.1. Nématodes populations

Neuf populations sont concernées pour cette étude prévenant de six wilayas (Tab. 10).

Tableau 10. Codes et origine des populations de nématodes à kyste des céréales utilisées dans cette étude.

Code de tube	Régions	Origine	Cordonnée géographique
4III	Aïn Defla	Aïn Defla	36°15'46.5"N 1°55'15.0"E
5II	Djendel site 2		36°12'46.2"N 2°26'23.2"E
11	Djendel site 1		36°12'55.0"N 2°25'16.3"E
2II	Bni Maïda	Tissemsilt	35°33'01.0"N 1°50'33.2"E
3	Debdaba	Mostaganem	35°54'04.9"N 0°07'47.5"E
6L	Sidi Embarek	Bordj Bou Arreridj	36°04'32.5"N 4°55'12.6"E
12L	Mouzaïa	Blida	36°28'09.2"N 2°39'31.1"E
10II	Ain Bessam site 1	Bouira	36°18'01.3"N 3°41'03.0"E
9	Bouira		36°22'02.5"N 3°51'57.1"E

Chapitre II. Matériels et Méthodes

II.3.2. Réaction de chaîne de polymérase (PCR)

Au cours de la dernière décennie, des progrès significatifs ont été réalisés dans le diagnostic moléculaire des nématodes, en raison du développement et de l'introduction de la PCR. Cette méthode permet d'obtenir de nombreuses copies à partir d'une ou de quelques molécules extraites de l'ADN de l'organisme par synthèse chimique *in vitro* (Subbotin *et al.*, 2010).

La méthode PCR nécessite ;

- Matrice d'ADN (matière première) contenant la région à amplifier
- Deux amorces oligonucléotidiques flanquantes et complémentaires à cette région cible,
- ADN polymérase et quatre désoxynucléotides triphosphates mélangés dans un tampon contenant des ions magnésium

II.3.3. Caractérisation moléculaire

II.3.3.1. Extraction d'ADN

Pour chaque population, trois à cinq kystes ont été utilisés pour extraction d'ADN. Une seule J₂ isolée d'un seul kyste ou un kyste a été transféré dans un tube Eppendorf contenant 25 µl d'eau bi distillée (ddH₂O) et 25 µl de tampon de lyse nématode (Concentration finale : NaCl 200 mM, Tris-HCl 200 mM (pH8), 1% de mercaptoéthanol et 800 µg de protéinase K). La composition de la solution de lyse est présentée dans l'annexe 01. Chaque échantillon fragmenté mécaniquement grâce à une aiguille stérilisée pour la lyse du nématode et la libération de l'ADN (De Luca *et al.*, 2004). Les tubes ont été incubés à 65°C pendant 2 heures et à 90°C pendant 5 minutes, consécutivement (Holterman *et al.*, 2006). (Fig. 24).

La suspension d'ADN extraite a été stockée à -20 °C ou utilisée immédiatement pour l'amplification de l'ADN.



Figure 24. Incubateur Thermo Shaker (Euro lone) (Originale).

II.3.3.2. Amplification de la PCR

La région ITS-ADNr a été amplifiée en utilisant les amorces AB28 et TW81 (De Ley *et al.*, 1999) (Tab. 11). Un μl d'ADN a été ajouté au mélange (49 μl) réactionnel de PCR contenant 22 μl de ddH₂O, 25 μl 2×DreamTaq PCR Master Mix (Fermentas Life Sciences, Allemagne) et 1 μM des deux amorces (après dilution à 10%). Le mélange est ensuite exposé à une série de températures variables dans un thermocycleur (Fig. 25) et programmée de 5 min à 95°C (dénaturation initiale) ; 35 cycles de 1 minute à 94°C, 45 secondes à 49°C et 1 minute à 72°C ; suivie d'une étape finale d'allongement de 8 min à 72°C (Tab. 12). Après PCR, 15 μl de chaque produit de PCR ont été mélangés avec 1 μl de tampon de charge 6x (Fermentas Life Sciences, Allemagne) et chargés sur un gel d'agarose à tampon TAE standard à 1,5%. Après électrophorèse (90 V pendant 60 min) sur le gel d'agarose (Fig. 25b), le gel a été coloré avec du bromure d'Ethidium (0,1 $\mu\text{g ml}^{-1}$) pendant 30 (Fig. 25c) min, visualisé et photographié sous lumière UV. Le produit de PCR restant a été stocké à -20 °C.

Chapitre II. Matériels et Méthodes

Tableau 11. Séquences des amorces utilisées pour l'amplification des régions de l'ADN (Subbotin *et al.*, 2001).

Combinaison d'amorce et code (direction)*	Région amplifiée	Séquence d'amorce (5'-3')	Référence
TW81 (f)	ITS1-5.8S-ITS2 de rADN	GTTTCCGTAGGTGAACCTGC	Skantar <i>et al.</i> , 2012 ;
AB28 (r)		ATATGCTTAAGTTCAGCGGGT	Subbotin <i>et al.</i> , 2003

f : Forward, **r** : reverse.

Tableau 12. Programme PCR utilisé pour l'amplification d'ADN.

Étapes	Température (°C)	Temps (s)	Nombre de cycles
Dénaturation initiale	95	300	/
Dénaturation	94	60	35
Hybridation	49	45	35
Elongation	72	60	35
Elongation finale	72	480	/
Maintien	4	pause	/

s ; Seconde

Le processus d'amplification et d'électrophorèse a été répété et les produits de PCR ont été regroupés pour la purification. Le produit de PCR a été purifié comme décrit par les instructions du fabricant (Wizard® SV Gel et PCR Clean-Up Kit système, Promega). La taille de l'ADN est déterminée par comparaison avec l'échelle de marqueur de poids moléculaire de 100-bp 'paire de base' DNA ladder (Fermentas Life Sciences). L'ADN de chaque échantillon a été séquencé dans les deux directions pour obtenir des séquences chevauchantes du brin d'ADN direct et inverse.

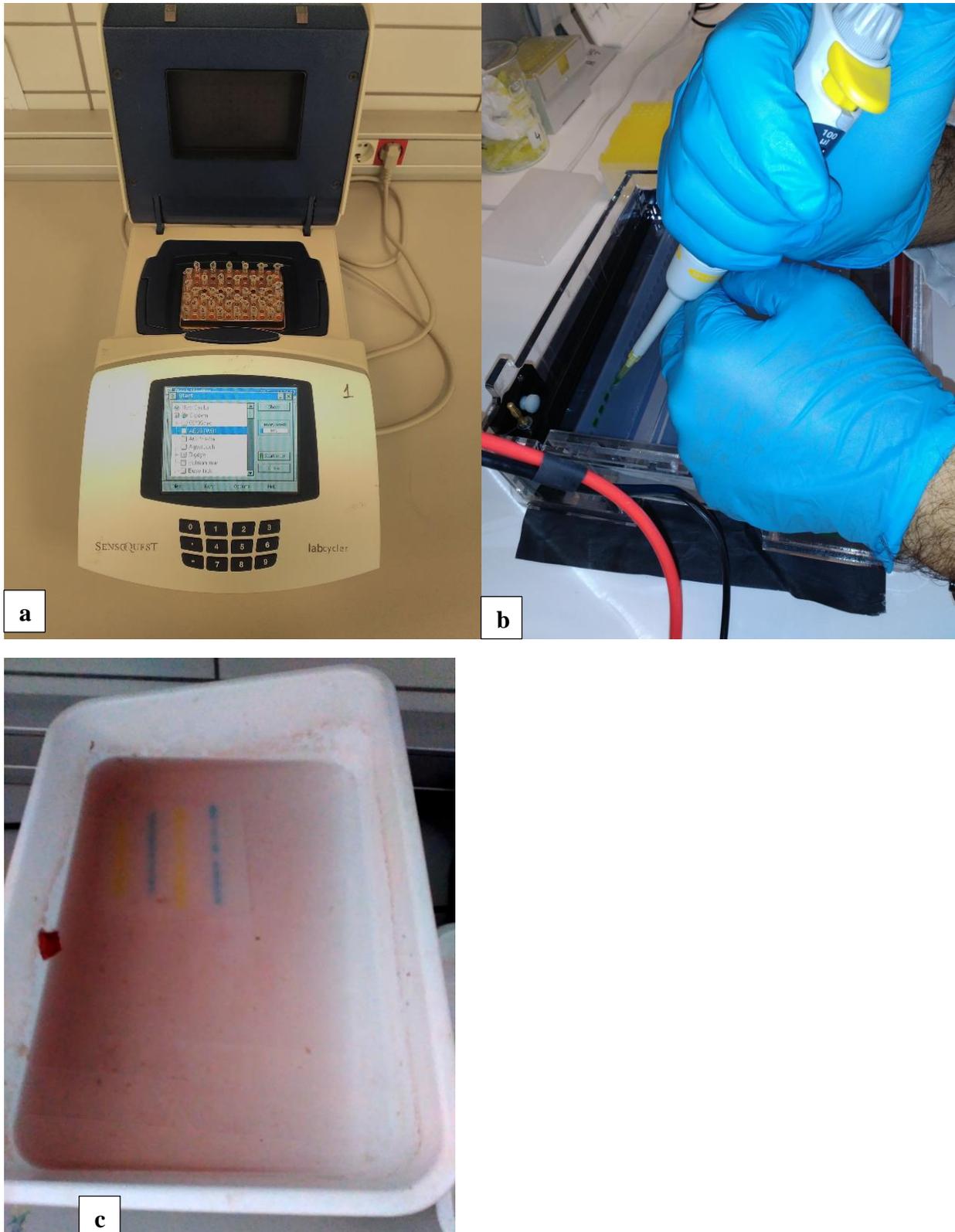


Figure 25. (a) Thermocycleur Thermal Cycler ; (b) Electrophorèse d'ADN sur gel d'agarose ; (c) coloration du gel avec du bromure d'Ethidium ($0,1 \mu\text{g ml}^{-1}$) (Originale).

Chapitre II. Matériels et Méthodes

II.3.3.3. Séquençage d'ADN

Des progrès récents dans le séquençage de l'ADN des nématodes ont été réalisés et ont offert des possibilités dans l'analyse taxonomique des nématodes (Waeyenberge *et al.*, 2009). Les coûts de séquençage de l'ADN ont été multipliés par 100 au cours de la dernière décennie en raison de l'amélioration considérable du développement des équipements, de la technologie et des processus de séquençage. Cependant, des études *in silico* ont également révélé que, dans certains cas, des séquences ITS identiques peuvent être trouvées chez des espèces *Heterodera* bien distinctes sur le plan morphologique, telles que *H. avenae* et *H. arenaria*, *H. carotae* et *H. cruciferae* (Subbotin *et al.*, 1997 ; 2000). De plus, l'identification des nématodes par séquençage reste relativement onéreuse, longue et laborieuse (Waeyenberge *et al.*, 2009).

L'ADN de chaque échantillon a été séquencé dans les deux sens pour obtenir des séquences chevauchantes des deux brins d'ADN. Les séquences ont été éditées et analysées à l'aide des logiciels Chromas 2.00 (Technelysium, Helensvale, QLD, Australie) et BioEdit40 7.0.4.1 (Hall, 1999). Enfin, les séquences nouvellement obtenues de l'ADNr de l'ITS ont été Blaster dans la base de données du Centre national d'information sur la biotechnologie GenBank (Sequin v. 15.50, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) sous les numéros d'accès indiqués dans le Tableau 19 (Chapitre résultats et discussion). Pour identifier les isolats de collection et les comparer avec des séquences les plus proches dans la base de données.

II.3.3.4. Analyse phylogénétique

Les séquences disponibles obtenues à partir des données GenBank ont été ajoutées à nos nouvelles séquences obtenues pour les alignements manuels en utilisant le logiciel Clustal X Version 2.1 avec les options par défaut (Larkin *et al.*, 2007). L'arbre phylogénétique a été inféré en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance basée sur le modèle de Tamura-Nei (Tamura et Nei, 1993). L'arbre de consensus bootstrap déduit de 1000 répliques est pris pour représenter l'histoire évolutive des taxons analysés (Felsenstein, 1985). Les branches correspondant aux partitions reproduites dans moins de 50% des répliques bootstrap sont réduites. Le pourcentage d'arbres répliqués dans lesquels les taxons associés regroupés dans le test bootstrap (1000 répliques) sont affichés à côté des branches (Felsenstein, 1985). Les arbres initiaux pour la recherche heuristique ont été

Chapitre II. Matériels et Méthodes

obtenus automatiquement en appliquant les algorithmes Neighbor-Join et BioNJ à une matrice de distances par paires estimées à l'aide de l'approche du maximum de probabilité composite (MCL), puis en sélectionnant la meilleure valeur log-vraisemblable.

II.4. Capacité d'hôte de quatre variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) à l'égard d'une population d'*H.avenae*.

Deux essais ont été menés sur des microparcelles de blé dur (04 variétés différentes) à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie d'El Harrach, Alger pendant les saisons de culture du blé de la campagne 2015-16 et celle 2016-17, en utilisant la technique employée par plusieurs chercheurs ; (Al-Doss *et al.*, 2010; Dababat *et al.*, 2015, 2014; Hajihassani *et al.*, 2010; Imren et Elekcioglu, 2014; Labdelli *et al.*, 2017; Pariyar *et al.*, 2016).

II.4.1. Variétés testées du blé dur (*Triticum durum* Desf.)

Cette étude est menée pour évaluer la réduction des composantes des rendements céréaliers causés par *H.avenae* sur quatre variétés de blé dur de Chen's, Vitron, Bousselam et Oued Zenati.

Les principales caractéristiques des variétés sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 13. Les principales caractéristiques des variétés étudiées (Boufenar-Zaghouan et Zaghouan, 2006 ; CNCCSP., 2009 ; El Fakhri *et al.*, 2010 ; Ladjal *et al.*, 2014 ; Benmounah et Brinis, 2018).

	Variétés	Chen's	Vitron	Bousselam	Oued Zenati
Caractéristique morphologique	Origine	Syrienne sélection CIMMYT-ITGC en 1990	Espagne, sélectionnée à l'ITGC de Tiaret	Algérienne	Algérienne (ITGC/ Guelma 1936)
	Epi	Compact, blanc à roux pâle	Demi lâche et blancs	Demi-lâche	-
	Grain	-	Moyen et roux	-	Ambré, gros et peu allongé

Chapitre II. Matériels et Méthodes

		Chen's	Vitron	Bousselam	Oued Zenati
Caractère culturales	Cycle végétatif	Précoce	Semi-précoce	Mi- tardif	Tardive
	Tallage	Moyen	Moyen	Fort	Moyen
Tolérance aux maladies et aux différentes conditions climatiques	Rouille brune	Moyennement sensible	Moyennement tolérante	Résistante	-
	Rouille jaune	Résistante	Moyennement tolérante	Résistante	
	Oïdium,	Moyennement sensible	Résistante	Moyennement résistante	
	Septoriose	Sensible	Peu sensible	Résistante	
	Fusariose	Sensible	Moyennement résistante	Résistante	
	La verse	Résistante	Tolérante	Bonne	
	La sécheresse	Moyennement tolérante	Sensible	Bonne	Faible
Caractères technologiques	-	PMG* : 35à 45g Moyennement résistante à la moucheture. Résistante au mitadinage	PMG élevé. Assez résistant à la moucheture et au mitadinage.	Le rendement élevé, PMG élevé. Résistante à la moucheture et au mitadinage.	Le PMG est élevé. Assez résistant à la moucheture et au mitadinage.

CIMMYT : Centre international d'amélioration du maïs et du blé, **ITGC** : Institut Technique des Grandes Cultures, **PMG*** : Poids de 1000 grains.

Le matériel est fourni par le Centre National de Contrôle et Certifications des Semences et des Plants (**CNCCSP**, d'Alger).

Chapitre II. Matériels et Méthodes

II.4.2. Inoculum

Les kystes de *H.avenae* ont été obtenus à partir d'échantillons de sol prélevés dans un champ de blé à Djendel, région Ain Defla, en Algérie (36°12'55.0"N 2°25'16.3"E), au début du mois de Septembre 2015. Ils ont été extraits du sol en utilisant la méthode de Fenwick can (Stirling *et al.*, 1999). Les kystes matures ont été prélevés à l'aide d'un stereomicroscope, puis stérilisés en surface avec 0,5% de NaOCl pendant 10 min et finalement rincés plusieurs fois dans de l'eau distillée. Ils sont conservés entre 4 et 5 °C pendant 4-5 semaines avant d'être utilisés comme inoculum. Pour améliorer l'éclosion, les kystes ont été transférés à température ambiante de 10°C (8 h) pendant 3 jours (Dababat *et al.*, 2014). Le nombre d'œufs et de juvéniles de deuxième stade par kyste est estimé. Des kystes en nombre de (10) ont été écrasés dans un broyeur de verre pour calculer le nombre d'œufs et des J₂s. L'identification a été confirmée par PCR par la méthode décrite précédemment.

II.4.3. Dispositif expérimental

Des pots en plastique de 17 cm de diamètre et une hauteur de 15cm ont été stérilisés avec du NaOCl avant utilisation et remplis de 1.5 kg de mélange composé de terre et de terreau (2/3terreau et 1/3 du terre) provenant d'un champ de céréales non infesté par *Heterodera* spp. Le sol utilisé pour cette expérimentation est stérilisé dans une étuve à 120°C pendant 48 heures. Les variétés ont été évaluées et le nombre de répétitions est de 05 pour les témoins et inoculés. Le nombre total de pots est de 40, dans un dispositif expérimental qui s'organise en quatre blocs. Nous avons échelonné deux dates de semis, pour la campagne (2015-16) est le 24 Janvier et pour la deuxième campagne (2016-17) c'est le 18 Décembre.

Après deux jours de semis des grains de blé dur, les pots ont été inoculés avec des populations initiales (Pi) de 20 kystes pleins enfermés (moyenne de 212.3 ±90.45 Œufs et J₂s/ kyste) dans des nouets de gaze aux mailles de 250 microns (tulle) permettant la sortie des larves infestantes. Les tulles sont placés à une profondeur de 03 à 5cm dans les pots. (Fig. 28).



Figure 26. Inoculation des kystes d'*H.avenae* après deux jours de semis (Originale).

Le dispositif expérimental s'organise en quatre blocs, chaque variété est semée dans deux blocs, un bloc témoin et un bloc inoculé (Fig. 27 ; Fig. 28).

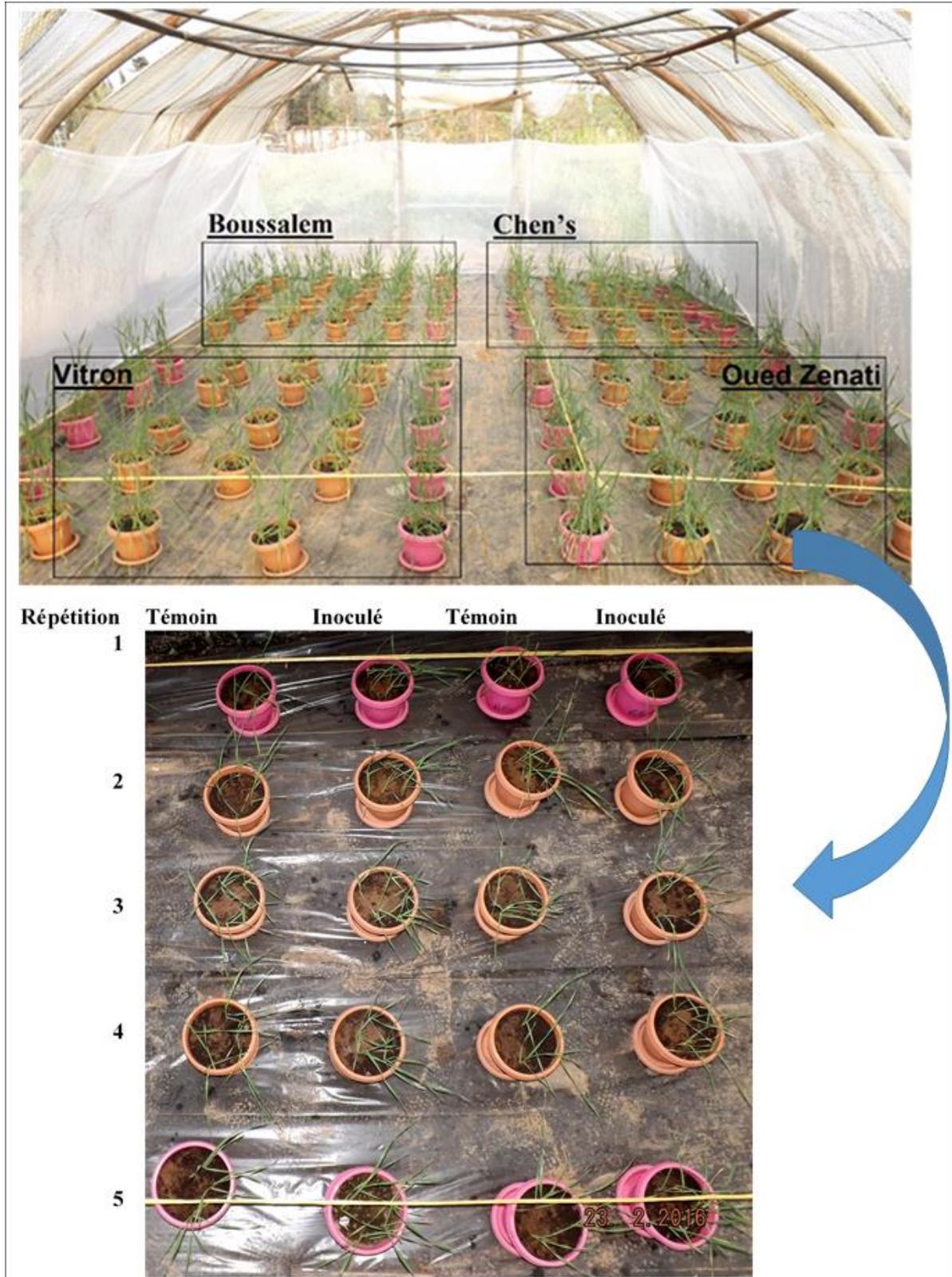


Figure 27. Dispositif expérimental de la campagne 2015/16 (Condition sous serre) à l'ENSA. (Originale).



Figure 28. Dispositif expérimental de la campagne 2016/17 (Condition naturel) à l'ENSA. (Originale).

II.4.4. Entretien de la culture

Les plantes ont été arrosées chaque fois que nécessaire pendant l'expérience et fertilisés au besoin. Des herbicides, insecticides et fongicides sont utilisés pour lutter contre les mauvaises herbes, les pucerons et les maladies fongiques, respectivement.

II.4.4.1. Fertilisation

L'apport engrais de fond (NPK : 15.15.15) est apporté avant le semis. L'apport d'azote s'est fait en plusieurs fractions, le premier a été apporté au stade trois feuilles et le dernier au stade épiaison, comme c'est présenté dans le tableau 14.

Tableau 14. Récapitulatif de la fertilisation azotique et phosphorique.

Fertilisant utilisé et dose	Dose d'azote apporté (unités//ha)	Stade de culture
Engrais de fond (15.15.15)	92	Avant le semis
Urée (100 kg/ha)	46	3 feuilles
Urée (100 kg/ha)	46	Plein tallage
Urée (100 kg/ha)	40	Montaison
Phosamco 6 sp (2.5kg/ha)	0.5	Plein tallage
		Epiaison



Figure 29. Application de la fertilisation des plants (Originale).

II.4.4.2. Traitements phytosanitaires

Nous avons réalisés quelques traitements contre les maladies et les ravageurs. Les traitements effectués sont portés dans le tableau 15.

Chapitre II. Matériels et Méthodes

Tableau 15. Traitements phytosanitaires appliqués.

	Type de traitement (stade végétatif)	Maladies et ravageurs	Matière active	Nom commercial
Traitement contre les maladies	Fongicide ; (semences)	cryptogamiques	Rhodiasan Flash	Thirame
	Fongicide ; (montaison et épisaison)	Oïdium, Septoriose, Rouille	Carbendazim 500g/l	Occidor 50SC 100ml/hl
Traitement contre les ravageurs	Insecticide (Semis, plein tallage et épisaison)- Traitement chaque 10 jours.	Fourmis et pucerons	Chloropyriphos	Pychlorex 1,77 l/ha
	Acaricide ; (plein tallage et montaison)	Acariens		Abamectine 50 ml/hl

II.4.5. La récolte

Le tableau suivant résume les dates de semis et de récolte pour les deux campagnes

Tableau 16. Date de semis et la récolte pour les campagnes 2015/16 et 2016/17.

Campagne	Date de semis	Date de récolte	Nombre des jours
2015/16	24 Janvier	15 Mai 2016	111(Montaison)
2016/17	18 Décembre	22 juin 2017	184

-Campagne 2015/16

L'expérimentation est terminée après 111 jours, avant le stade épisaison. Les maladies et les ravageurs constituent la contrainte biotique majeure pour la céréaliculture. Les principales maladies rencontrées sont d'origine cryptogamique comme les rouilles, les septorioses, les pourritures racinaires, l'Helminthosporiose, l'oïdium et la carie qui touchent le blé (Fig. 30). D'autres facteurs abiotiques comme la température et l'humidité dans la serre ont causé ces maladies (Tab. 17). En revanche, il existe des maladies virales causées par les pucerons (Famille : Aphidoidea).

Chapitre II. Matériels et Méthodes



Chapitre II. Matériels et Méthodes

Les valeurs de température et d'humidité sont prélevées trois fois par jour (Matin, midi et soir)

Tableau 17. Variation de température journalière et d'humidité de la serre durant la campagne 2015/16.

Mois	Température (°C)	Humidité (%)
Janvier	26.75	66.6
Février	23.05	59.55
Mars	24.73	60.37
Avril	23.75	57.75
Mai	27.6	60.5

- Campagne 2016/17

Pour la deuxième campagne 2016/17, la récolte s'est faite manuellement le 22 juin 2017. Nous avons effectué des mesures sur les caractères morphologiques et de production de blé dur (Titre II.4.6.).

II.4.6. Evaluation de la résistance

A maturité, les données sur les paramètres de croissance, y compris la hauteur moyenne des tiges, le nombre total des épis, la longueur des épis, le nombre des grains par épi et le rendement total en grain (g) ont été enregistrés (Fig. 31)

II.4.6.1. Etude des caractères morphologiques

II.4.6.1.1. Nombre et hauteur des tiges

Le nombre des tiges est calculé pour chaque variété. La hauteur est mesurée en centimètre de la base de la tige à la base de l'épi.

II.4.6.1.2. Longueur et largeur de l'épi

La longueur est mesurée en centimètre de la base de l'épi à l'extrémité du dernier épillet avec les barbes. La largeur de l'épi est aussi mesurée en centimètre.

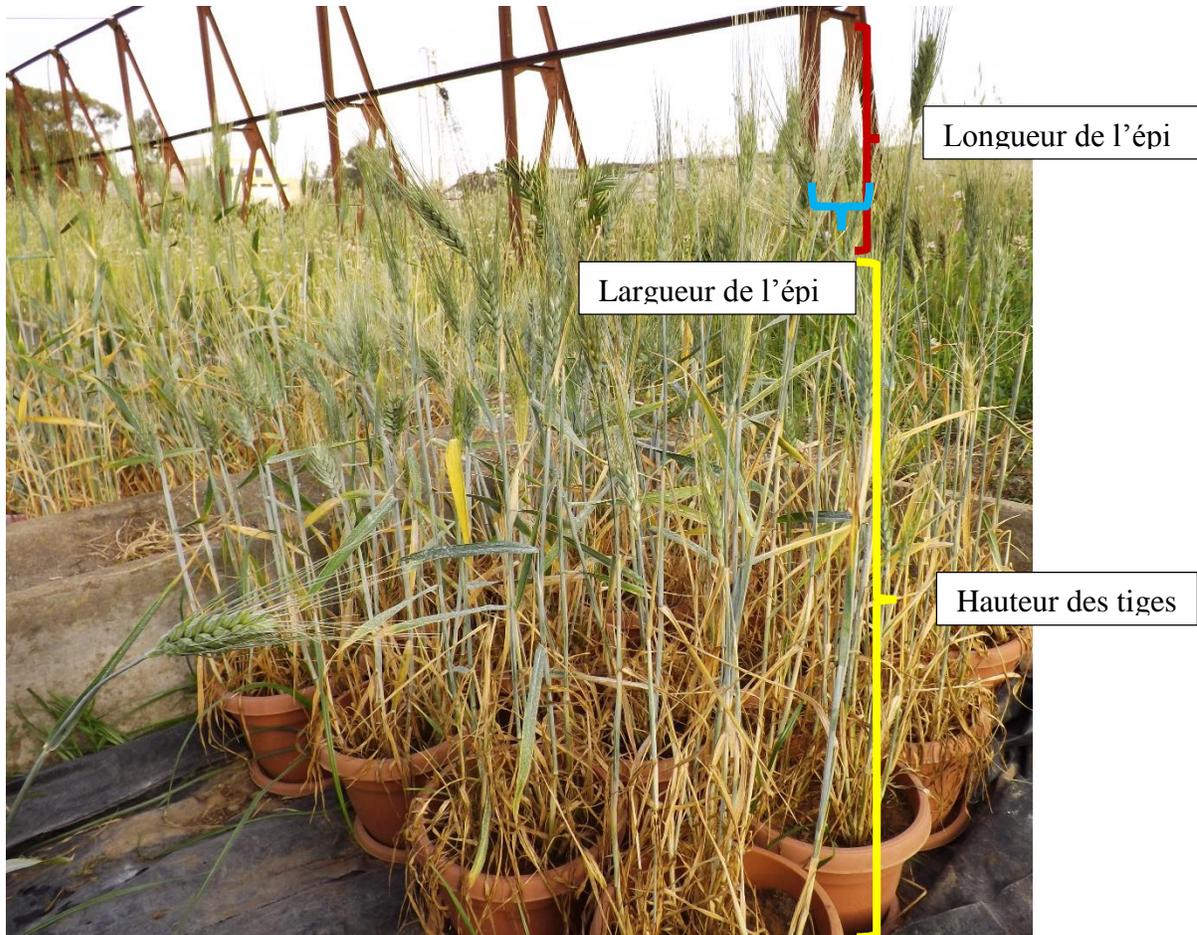


Figure 31. Les caractères morphologiques mesurés (Variété ; Bousselem).

II.4.6.2. Etude des caractères de production

II.4.6.2.1. Nombre de grains par épi

Après la récolte des épis, le nombre des grains est calculé pour chaque épi.

II.4.6.2.2. Le poids des grains

Nous avons pesé le poids total pour les variétés témoins (indemne de nématode) et pour les variétés infestées par *H.avenae*.

II.4.6.2.3. Le rendement en grain estimé

L'ensemble des grains de chacune des variétés est pesé séparément. Le rendement est calculé par la formule suivante ;

$$\text{Rend.} = (\text{Nombre des épis/m}^2) * (\text{Nombre des grains /épis}) * (\text{PMG}/1000)$$

Chapitre II. Matériels et Méthodes

Pour notre étude, le rendement est exprimé en g/cm² ensuite on fait une extrapolation à des q/ Ha. La superficie totale des pots est de 268,66 cm².

II.4.7. Analyse statistique.

Toutes les données sont analysées avec une analyse de la variance avec logiciel R. version 3.2.4. Le test de la différence la moins significative Fisher (LSD) a été utilisé pour comparer les moyennes au niveau de 5% (α).

II.4.8. Test d'évaluation de sensibilité de blé dur vis-à-vis d'*H.avenae*

Les racines sont lavées sous un jet d'eau à forte pression qui détache les femelles blanches et les kystes bruns, recueillis sur un tamis de 250 μ m de maille et dénombrés ensuite sous la loupe binoculaire.

Après l'extraction des kystes à partir de sol infesté par *H.avenae*. Le nombre des kystes néoformés (Pf) est calculé dans 100 (g) de sol. Le facteur de reproduction (Rf) est calculé à partir de la formule suivante ;

$$Rf = Pf/Pi$$

Pi : Le nombre initial des kystes par 100 g de sol

Le taux de multiplication ou de reproduction est exprimé en pourcentage (%) ;

$$Tr = Rf * 100$$

Pour évaluer la sensibilité de ces quatre variétés, en utilisant l'échelle de Valocka *et al.*, 1994, qui a pour principe d'évaluer le taux de multiplication des nématodes néoformés.

I 0-2% : Très fortement résistante

II 2,1-5% : Fortement résistante

III 5,1-15% : Résistante

IV 15,1-30% : Résistante à moyennement résistante

V 30,1-50% : Moyennement résistante

VI 50,1-70% : Moyennement résistant à fortement sensible

VII 70,1-90% : Fortement sensible

VIII 90,1-100% : Fortement sensible à très fortement sensible

IX > 100% : Très fortement sensible

Chapitre III. Résultats et discussions

III.1. Description du nématode à kystes des céréales (NKC).

Les kystes bruns de toutes les populations sont de taille variable et généralement en forme de citron, avec un col saillant et une structure de cône vulvaire (Dawbah *et al.*, 2012). Les juvéniles ont été obtenus à partir des mêmes kystes et des montages temporaires ont été réalisés dans de l'eau sur des lames de verre et immédiatement examinés à un microscope (Fig. 32).

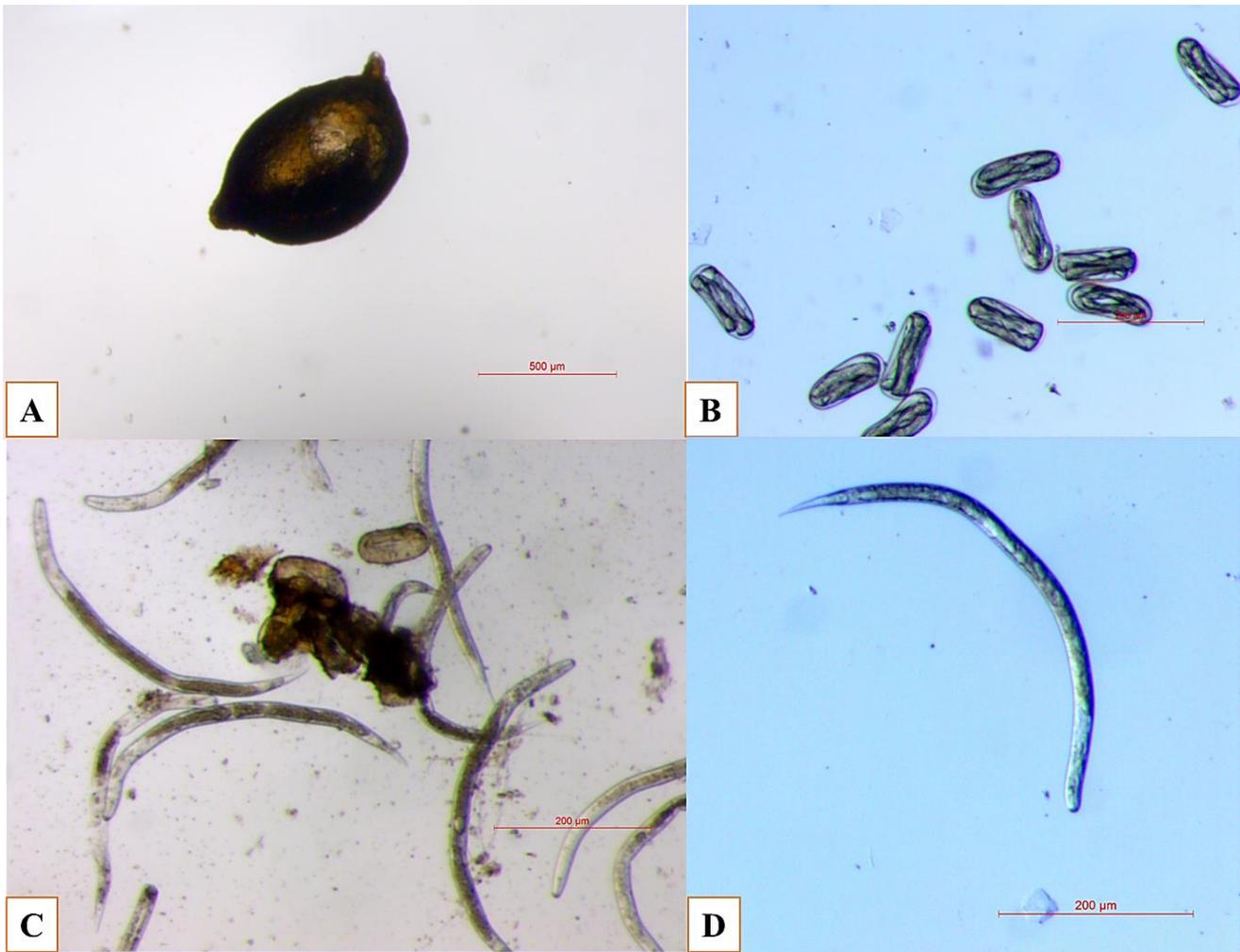


Figure 32. Morphologie des nématodes à kystes (A) kyste de couleur marron d'*H. schachtii* ; (B) des œufs d'*H.avenae* ; (C et D) une larve J₂s d'*H. cruciferae* et *H.avenae*. (Originale).

III.2. Etude de l'état d'infestation de quelques parcelles par les nématodes à kystes inféodés aux céréales.

Les nématodes à kystes des céréales sont considérés comme les bio-agresseurs telluriques les plus redoutables. Il n'y avait pas assez d'informations sur le statut des NKC dans le secteur des céréales en Algérie. Le but de cette étude était de déterminer l'occurrence, la distribution et la densité de population des NKC dans les champs de blé. Les infestations des différentes régions sont exprimées en nombre de kystes par un 500g de sol. La plupart des localités étudiées sont situées dans le nord de l'Algérie. Les résultats ont montré que 60 de 110 sous-échantillons de sol soit 54,55% sont infestés par *Heterodera* spp. (Tab. 18).

Les nématodes à kystes des céréales ont été détectés dans presque tous les champs de monoculture de blé dans sept provinces de Bouira (Aïn Bessam et Bouira), Aïn Defla (Site Djendel 01, Site Djendel 02 et Aïn Defla), Médéa (Draa Semar, Sedraia), Bordj Bou Arreridj (site 1 de Sidi Mbarek, site 2 de Sidi Mbarek et Ras El Oued), Tissemsilt (Bni Maïda), Mostaganem (Debdaba) et Blida (Mouzaia). Le NKC n'a pas été détecté dans neuf provinces, à savoir Ain Soltane, Bir Ould Khelifa, les sites 1 et 2 de Medjana, Tissemsilt, Ammari, Dhaya, Zaouiet Kounta et Timimoun.

Les deux régions de Bouira sont infestées. Dans ces dernières, les cultures alternent chaque année avec d'autres légumes comme la pomme de terre. À Aïn Bessam, nous avons observé que les NKC sont moins dispersés que précédemment (Haddadi et Mokabli, 2015). Nos résultats sont comparable avec le travail de Hammache *et al.*, (2017) dans la même région, avec une culture de blé pratiquée pendant trois années consécutives avec la même variété (Chen's). Les nombres moyens des kystes, d'œufs et des J_{2s} / 100 g de sol dans les parcelles de blé ont été plus élevés que dans les parcelles d'orge (Ahmadi et Tanha Maafi, 2014). Selon Smiley *et al.*, (2007), Les terres cultivés en céréales comme le blé et l'orge sont attaquées par *Heterodera* spp.

À Aïn Defla, 25 sous-échantillons de sol ont été analysé de cinq parcelles, trois échantillons sont positifs. La forte infestation a été recensée sur le site 02 de Djendel avec une monoculture de blé d'hiver. Aucune infestation n'a été constatée à Ain Soltane sur des sols en jachère et à Bir Ould Khelifa où des céréales ont été permutées avec des pommes de terre. L'impact de ce parasite dépend de l'hôte rapportant Ahmadi et Tanha Maafi, 2014.

Tableau 18. Le degré d'infestation des nématodes à kystes des céréales *Heterodera* spp. dans les régions d'étude, au cours de la campagne 2015-2016.

Wilaya	Code	Localité	Hôte	M.K. \pm sd	M.E. \pm sd	Situation passée			
						Année	Hôte	M.K. dans le sol	Référence
Bouira	BAB10	Aïn Bessam	Blé dur	12,8 \pm 2,77	92,10 \pm 17,05	2009/11	Orge	65,7kyste*kg ⁻¹	(1)
	BB10	Bouira	Blé dur	9,6 \pm 2,07	117,80 \pm 42,62	-	Blé (Chen's)	1 kyste*100g-1	(2)
	-	Bachloul	-	-	-	2009/11	Orge	68,4Kyste*kg ⁻¹	(1)
	-	El Asnem	-	-	-	2009/11	Blé	145kyste*kg ⁻¹	(1)
	-	Mechedallah	-	-	-	2009/11	Orge	17,7 kyste*kg ⁻¹	(1)
Aïn Defla	AD144	Djendel site 01	Blé dur	12,8 \pm 6.26	212,30 \pm 90.45	2009/11	Blé	69,4kyste*kg ⁻¹	(1)
	AD244	Djendel site 02	Blé dur	57,4 \pm 17.55	195,10 \pm 130				
	AAS44	Ain Soltane	Jachère	0,0 \pm 0,00	-	-	-	-	-
	AA44	Aïn Defla	Blé dur	10,8 \pm 3,19	292,70 \pm 88,52	-	-	-	-
	AB44	Bir Ould Khelifa	Blé dur	0,0 \pm 0,00	-	-	-	-	-
Médéa	MDS26	Draa Semar	Blé dur	86,6 \pm 19,96	364,70 \pm 81,93	-	-	-	-
	MS26	Sedraia	Blé dur	2,4 \pm 1,67	174.90 \pm 22,20	-	-	-	-
B. B. Arreridj	AM134	Medjana site 1	Blé dur	0,0 \pm 0,00	-	-	-	-	-
	AM234	Medjana site 2	Blé dur	0,0 \pm 0,00	-	-	-	-	-
	AS134	Sidi Mbarek site 1	Blé dur	1,6 \pm 1,67	108 \pm 43,85	-	-	-	-
	AS234	Sidi Mbarek site 2	Blé dur	8,8 \pm 3,11	84.30 \pm 25,21	-	-	-	-
	AR34	Ras El Oued	Blé dur	0,6 \pm 0,54	56,33 \pm 15,18	-	-	-	-

Chapitre III. Résultats et discussions

	-	Mansoura	-	-	-	2009/11	Blé	71,2 kyste*kg ⁻¹	(1)
Tissemsilt	TT38	Tissemsilt	Blé dur	0,0±0,00	-				
	TB38	Bni Maïda	Blé dur	22,2±7,75	244,40±29,33	2013/14	Maïs	5,89 kyste*100g	(3)
	TA38	Ammari	Blé dur	0,0±0,00	-	-	-	-	-
	TD38	Dhaya	Blé dur	0,0±0,00	-	-	-	-	-
Mostaganem	MD27	Debdaba	Blé dur	17,2±3,49	143,40±44,68				
	-	Mostaganem	-	-	-	2009/11	Blé	25,4 kyste*kg ⁻¹	(1)
Blida	BM09	Mozaia	Blé dur	6,2±2,58	137,10±71,61	-	-	-	-
	-	Boufarik	-	-	-	2009/11	Céréales	28,72 kyste*kg ⁻¹	(1)
Adrar	AZ01	Zaouiet Kounta	Blé dur	0,0±0,00		2009/11	Céréales	Non infesté	(1)
	AT01	Timimoun	Blé dur	0,0 ±0,00	-				

(**M.K.**) Moyenne de kystes * 500g⁻¹ sol ± S.D. ; (**M.E.**) Moyenne des œufs + J_{2s} /kyste ± S.D. ; (**S.d**) Standard déviation ; (**1**) Haddadi et Mokabli, 2015 ; (**2**) Hammache *et al.*, 2017 ; (**3**) Djetti *et al.*, 2014.

Chapitre III. Résultats et discussions

La région de Médéa est représentée par deux parcelles, Draa Semar et Sedraia, où se déroulait une monoculture de blé. Le nombre moyen de kystes est élevé dans les deux parcelles. La région d'étude est située à l'étage bioclimatique semi-aride et les NKC's sont très développés et associés à une perte de rendement dans ces régions (Sikora, 1987).

À Bordj Bou Arreridj, des nématodes à kystes des céréales sont trouvés dans 60% des parcelles (25 sous-échantillons). À Medjana, nous avons noté l'absence de ces derniers car les parcelles sont remplacées chaque année avec d'autres cultures non hôte ou en jachère. Cependant, quelques kystes ont été trouvés à Ras El Oued, un champ situé à une certaine distance de 47 Km à l'autre champ cité précédemment. Les infestations les plus basses ont été enregistrées à Sidi Mbarek site 1 et à Ras El Oued. Ceci est probablement dû à la pratique de la jachère chaque deux ans. La jachère réduit jusqu'à 70% la population des nématodes dans le sol (Singh *et al.*, 2009).

Ces endoparasites ont été détectés dans une seule parcelle de Bni Maïda des quatre régions de Tissemsilt. Les résultats sont en accord avec notre étude en 2013 rapportée par Djetti *et al.*, (2014) dans la même parcelle. De plus, les parcelles de Dhaya et Ammari ne présentent aucune infestation, ce qui est probablement lié à la rotation céréales / (Fabacées) légumineuses pratiquée dans ces localités. Cette absence de ces ravageurs ne signifie pas nécessairement que les champs sont exempts de ces parasites (Haddadi et Mokabli, 2015).

Tous les sous-échantillons présents dans la localité de Debdaba à Mostaganem, dans le nord-ouest du pays, sont infestés par les NKC's. Dans l'ouest de l'Algérie, à Sidi Bel Abbès, l'extraction des kystes dans les sols prélevés dans les parcelles cultivées en blé de Lamtar avec 9 kystes / 100 cm³ et de Telagh avec 11 kystes / 100 cm³ de sol (Smaha *et al.*, 2018a), à Mascara plus précisément à El Ghoumri, une parcelle cultivée avec de l'orge, l'infestation est de 21,7 kystes / kg a été signalée (Haddadi et Mokabli, 2015).

La région de Mouzaia (Blida) présente un niveau d'infestation très faible. La parcelle est cultivée avec du blé d'hiver en 2015 en rotation avec la pomme de terre et la jachère les années précédentes ce qui s'explique par le nombre faible des nématodes. Selon l'expérience de Rivoal et Bourdon, (2005), la rotation avec une autre culture non hôte est la meilleure méthode pour contrôler le parasite. Singh *et al.*, 2009 in Mokrini *et al.*, (2017) ont montré que les densités de nématodes diminuent après la rotation avec des cultures non hôtes comme la carotte (*Daucus*

carota), le fénugrec (*Trigonella foenum –graecum*) et l'oignon (*Allium cepa*), ou par le labour en jachère et en été.

Les parcelles sahariennes de Zaouiet Kounta et Timimoun sont cultivées pour la première fois avec des cultures céréalières sont indemnes des nématodes du genre *Heterodera*. Il faut noter que dans ces deux zones, il y avait un système d'irrigation par pivot. Ces derniers ne sont pas fixes ils sont transférés d'une parcelle à une autre. D'autres travaux n'ont pas indiqué la présence de ces parasites dans les zones irriguées du sud algérien, près d'Adrar (Haddadi, 1999 dans Haddadi *et al.*, (2013). En Jordanie, le nématode à kystes des céréales de la méditerranée (*H. latipons*) est largement réparti dans plusieurs zones du nord et du sud de la méditerranée et dans les zones désertiques orientales, avec une incidence variant de 30 à 100% (Al Abed *et al.*, 2004). En Égypte, le nématode à kyste des céréales a été trouvé dans cinq des sept régions d'El Ismaïlia, avec une occurrence de 79,4%. La densité de population était de 29 kystes en moyenne, 10 J₂s / 100 cm³ (Baklawia *et al.*, 2015). Une étude des NKC a montré que 56% des parcelles de blé de la région de l'Anatolie orientale en Turquie sont infestés. Des nématodes à kystes ont été détectés dans tous les champs de blé des provinces d'Elazig, Malatya, Erzurum, Erzincan, Sivas, Kars et Igridir (Toktay *et al.*, 2015). Selon Toumi *et al.*, (2015), une enquête menée dans le Nord-est de la Syrie dans des zones de culture de blé et d'orge a révélé que 62% des champs sont infestés par l'espèce *H. avenae*. En Russie (Tcheliabinsk), la densité de population de nématodes la plus élevée a été observée entre 2010 et 2012, avec une densité moyenne de 100 kystes / 100 g de sol (Pridannikov *et al.*, 2015).

III.2.1. L'analyse de la variance (ANOVA)

III.2.1.1. Nombre de kystes par 500 g de sol

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) ont montré une différence significative entre les infestations par NKC (kystes /500 g de sol) et les régions avec une probabilité de $2e^{-16} < 0,001$. De plus, pour les groupes analysés par le test de Tukey, à partir de sept groupes, le groupe 'd' et le groupe 'e' (Djendel Site 02 et Draa Semar) avait le niveau d'infestation le plus élevé. La plus faible densité de *Heterodera* spp. a été trouvée dans le groupe 'a'. Les densités dans les autres groupes sont illustrées à la figure 33. Plusieurs auteurs ont signalé une forte présence et une grande distribution de ces NKC en Algérie (Mokabli *et al.*, 2002; Djetti *et al.*, 2014; 2017 ; Smaha, 2014; Haddadi et Mokabli, 2015).

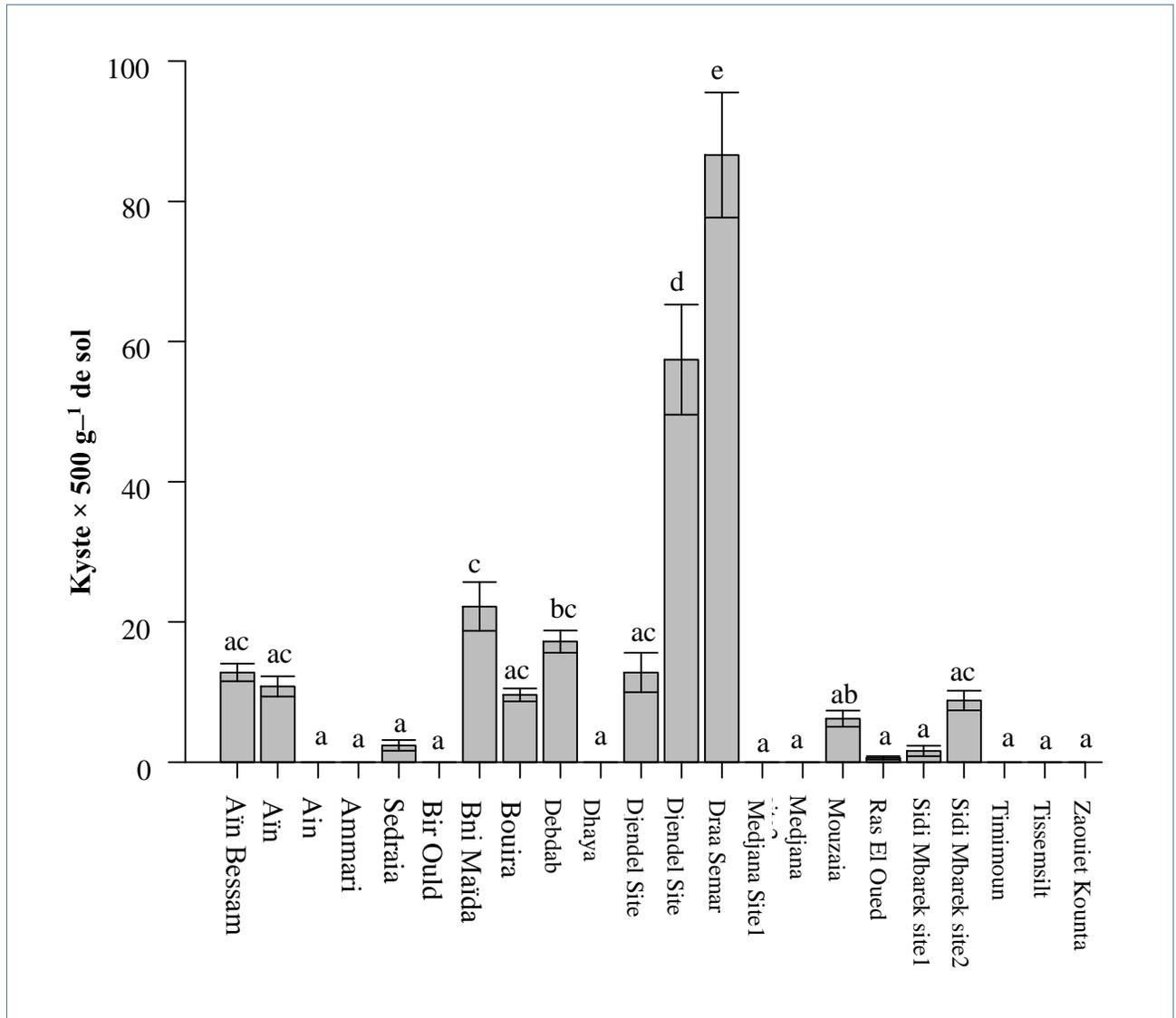


Figure 33. Analyse de la variance de nombre des kystes par 500 g de sol dans les localités étudiées

III.2.1.2. Le nombre d'œufs et de juvéniles (J2s) par kyste

Nos investigations nous ont permis de constater que 13 sur 22 parcelles ont été infestées. L'analyse statistique a indiqué une probabilité de valeur $f < 0,001$. Ce qui signifie qu'il y a une différence très hautement significative. Pour le test de Tukey, il y avait neuf groupes : le groupe 'bc' contenait le site Bouira, Debdaba, Mouzaia et Sidi Mbarek site 01 (Fig. 34). Le nombre moyen d'œufs et de juvéniles par kyste était plus élevé à Draa Semar avec $364,70 \pm 81,93$, selon Haddadi *et al.*, (2015), le nombre moyen est de 600 œufs par kyste.

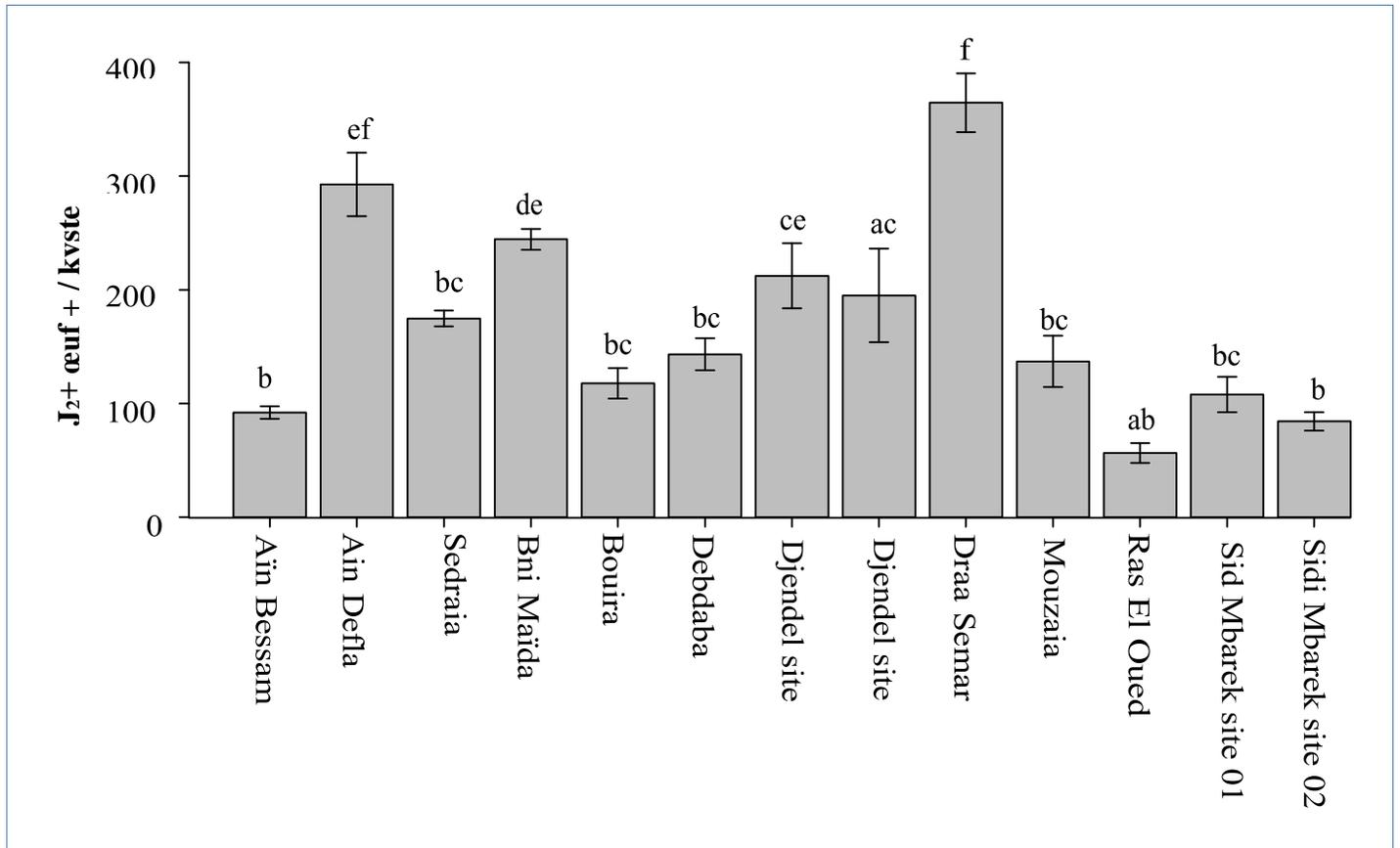


Figure 34. Analyse de la variance de nombre des œufs +J₂s / kyste dans chaque parcelle infestée.

III.2.1.3. Nombre des œufs et des J₂s par 100g de sol

Le nombre moyen d'œufs et de J₂s et des par 100 grammes de sol dans les parcelles de blé est indiqué dans la figure 35.

Le nombre moyen d'œufs et de J₂s par 100 grammes de sol dans les parcelles de blé est plus élevé dans la région de Draa Semar et à Djendel site 2 (>2000 œufs +J₂s/100g) suivi par Bni Maïda et Ain Defla par rapport aux autres parcelles cultivées en céréales.

Selon Ahmadi *et al.*, (2012), une densité de 62 œufs et J₂/g d'*H.avenae* a réduit le nombre des grains entre 11 à 21%, le poids sec des pousses entre 5 et 39% et la hauteur des pousses qui varie entre 6 et 14% au cours de l'année 2009-2010. Cette espèce a réduit le rendement en grains de blé de 11%, même avec une densité plus faible de 2,5 œufs et J₂/g de sol dans un essai sur microparcelles (Hajihassani *et al.*, 2010).

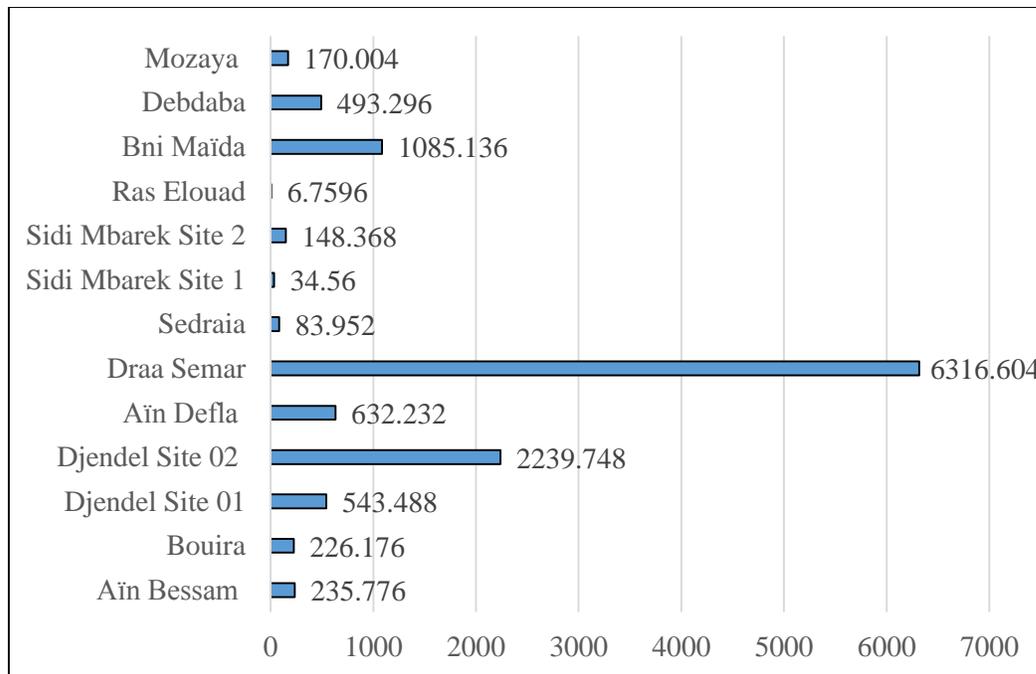


Figure 35. Nombre moyen des œufs et des larves J₂ par 100 g de sol.

Les nématodes à kystes des céréales sont les bioagresseurs les plus importants des cultures céréalières dans de nombreuses régions du monde, avec des effets particulièrement néfastes sur la production de blé et d'orge. Trois espèces appartenant au groupe *Heterodera avenae* ont été identifiées dans des champs de céréales. *H.avenae* est largement répandu dans les régions productrices de blé tempérées du monde (Nicol *et al.*, 2003). En Sicile, en Italie, *H. latipons* et *H. hordecalis* semblent être les espèces les plus communes dans les échantillons de blé dur (*Triticum durum*) et d'orge (*Hordeum vulgare*) (Lombardo *et al.*, 2009). En Algérie, Tirchi *et al.*, (2016) ont identifié *H.avenae* dans quatre localités de l'Ain Defla sur la base de caractères morphologiques et d'une identification moléculaire. Smaha *et al.* (2018a, 2018b) ont également déterminé que *H. flipjevi* et *H. hordecalis* sont distribués dans les zones de culture de blé. À Mascara, le nématode à kystes des céréales méditerranéennes *H. latipons* a été signalé par Mokabli *et al.* (2002). Selon Righi *et al.*, (2014) l'analyse nématologique a permis de déceler la présence de quatre espèces en l'occurrence *H.avenae*, *H. mani*, *H. latipons* et *H. hordecalis* dans quelques régions à l'ouest du pays.

Dans la présente étude, après avoir étudié 22 régions de huit provinces, nous avons constaté que 13 régions sont infestées par *Heterodera* spp. avec des degrés d'infestation différents. Cette enquête montre que les principales zones céréalières d'Algérie sont couramment infestées par *Heterodera* spp.

Chapitre III. Résultats et discussions

Les NKCs peuvent sérieusement réduire les rendements des cultures céréalières, en particulier dans les régions tempérées et semi-arides (Rivoal et Cook, 1993 ; Nicol et Rivoal, 2007). Pour maintenir la densité de population de ces espèces de nématodes en dessous des niveaux dommageables, des mesures de gestion appropriées, telles que les systèmes de rotation et l'utilisation de variétés résistantes, sont nécessaires (Mokabli *et al.*, 2002; Smiley *et al.*, 2007). La rotation des cultures incluant les plantes à feuilles larges, le maïs, les jachères, et les variétés de blé résistant (Toumi *et al.*, 2015), d'orge ou d'avoine peuvent réduire considérablement la densité de nématodes.

En outre, le fait de cultiver des hôtes sensibles moins de 50% du temps dans des sols à texture épaisse et moins de 25% du temps dans des sols à texture légère pourrait réduire considérablement le NKC (Smiley et Yan, 2010). Les autres méthodes de contrôle comprennent la jachère propre et le labour profond 2 à 5 fois de mai à juin en Inde (Swarup et Sosa-Moss, 1990), la plantation précoce de blé afin d'accroître la vigueur et la tolérance de la plante à l'attaque des nématodes et l'application de nématicides en plantation (Brown et Kerry, 1987).

La figure 36 ci-dessous présente la carte de répartition des NKCs dans les parcelles de blé en Algérie (Régions prospectées). Les occurrences des NKCs dans les régions d'étude Djendel Site 02 et Draa Semar sont relativement élevées par rapport aux autres régions. La carte de distribution des NKCs a été tracée à l'aide du logiciel ArcGIS 10.2.2.

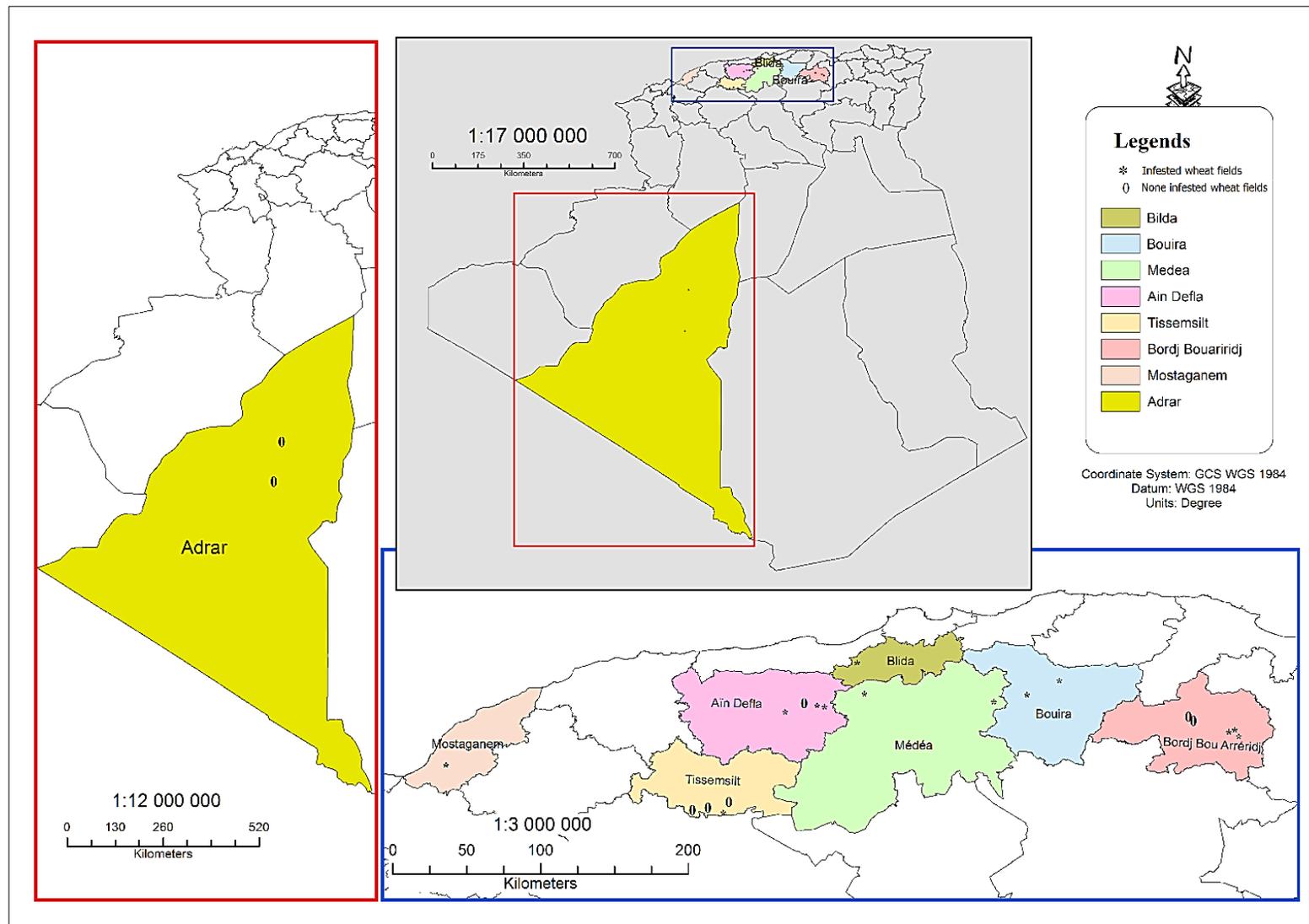


Figure 36. Carte de répartition des nématodes à kystes des céréales *Heterodera* spp., en Algérie dans les zones d'étude au cours de la campagne 2015/16 (Djetti *et al.*, 2018).

En Algérie, il existe relativement peu d'informations sur l'importance économique des NKC et les espèces connues. La large distribution et les essais préliminaires de l'incidence du nématode sur les rendements indiquent que ces nématodes peuvent être considérés comme les plus importants nématodes des céréales dans le monde et nécessitent des recherches intensives. En revanche, des études sur les caractères morphologiques ainsi que des analyses morphométriques et moléculaires doivent être menées pour identifier et séparer les espèces du genre *Heterodera* afin de réaliser une cartographie de distribution des espèces en Algérie.

III.3. Caractérisations moléculaires des nématodes à kystes du genre *Heterodera* (*Tylenchida* : *Heteroderidae*) en Algérie, sur la base d'analyse d'ADN-ITS.

Au sein de chaque groupe de *Heterodera*, seules des différences morphologiques et morphométriques mineures peuvent distinguer toutes ces espèces les unes des autres. L'identification basée sur la morphologie et la morphométrie des kystes et des juvéniles de deuxième stade prend beaucoup de temps et exige beaucoup de connaissances (Dawbah *et al.*, 2012 ; Baklawa *et al.*, 2015). Une identification rapide et précise est très importante pour la connaissance des nématodes phytoparasites des cultures. La région d'espacement transcrite interne (ITS) de l'unité de répétition de l'ADN ribosomal est un bon choix pour les études taxonomiques et phylogénétiques moléculaires. Les gènes ribosomiaux flanquant cette région sont très bien conservés, ce qui permet la construction d'amorces qui permettent l'amplification par réaction en chaîne par polymérase (PCR) de la région ITS très variable entre eux. Au cours des dernières années, l'analyse PCR-ITS-ADNr devient un outil fiable pour une identification précise et rapide des nématodes à kystes. La comparaison des séquences de l'ITS-ADNr des nématodes inconnus avec celles publiées ou déposées dans la banque des gènes (NCBI ; GenBank) (Sabo *et al.*, 2001; Tanha Maafi *et al.*, 2003) permet une identification rapide de la plupart des espèces de nématodes à kystes (Madani *et al.*, 2004 ; Toktay *et al.*, 2015 ; Escobar-avila *et al.*, 2018 ; Mwamula *et al.*, 2018 ; Subbotin *et al.*, 2018).

Dans cette étude, 9 populations de nématodes à kyste ont été identifiés par des méthodes moléculaires. Leurs caractéristiques moléculaires ont été spécifiquement comparées et analysées à l'aide de techniques d'ADNr-ITS.

III.3.1. Identification moléculaire.

L'objectif de cette étude était d'identifier les populations de nématodes à kystes des céréales originaires du Nord de l'Algérie. Cela a été fait sur la base de caractéristiques moléculaires. Après amplification de la région ITS-ADNr, le séquençage d'ADN. Les nouvelles séquences obtenues sont comparées avec autres séquences disponibles dans la base de données GenBank. Enfin, les relations phylogénétiques entre ces populations ont été déterminées.

III.3.1.1. Amplification d'ADN.

L'amplification des régions ITS de l'ADNr avec l'amorce TW81 et l'amorce inverse AB28 produit un fragment unique d'environ 1100 pb pour toutes les populations de nématodes à savoir : Mostaganem, Djendel site 2 (A) ; Bouira ; Sidi Embarek ; Mouzaia ; Bni Maïda ; Aïn Defla et Djendel site 1. Cependant, aucun produit de PCR n'a migré pour le témoin (Contrôle négatif.) qui ne contient aucune matrice d'ADN, comme indiqué dans l'électrophorèse sur le gel (Fig. 37).

Après l'analyse de l'amplification des ADN des kystes et des larves, nous passons à l'analyse des séquences d'ADN.

III.3.1.2. Analyse des séquences.

Selon les résultats des identifications moléculaires, deux espèces majeures du groupe Avenae, à savoir, *H.avenae*, *H. hordecalis* sont présents dans les parcelles enquêtés dans la région de Ain Defla. Une espèce appartient au groupe Goettingiana représentée par l'espèce, *Heterodera cruciferae*. L'espèce *H. schachtii* est présente dans la région de Blida et appartient au groupe Schachtii. Toutes les données et informations sur les 04 espèces d'ADNr ITS obtenues ont été déposées dans la base de données GenBank nucléotidique de NCBI. Quatre nouvelles séquences de *H.avenae*, trois nouvelles séquences de *H. hordecalis*, une séquence de *H. schachtii* et deux séquences de *H. cruciferae* ont été étudiées (Tab. 19).

Cette partie du travail a porté sur l'identification de 04 espèces de NKC, *Heterodera avenae* ; *H. hordecalis* ; *H. cruciferae* et *H. schachtii* isolées dans 09 régions différentes de l'Algérie.

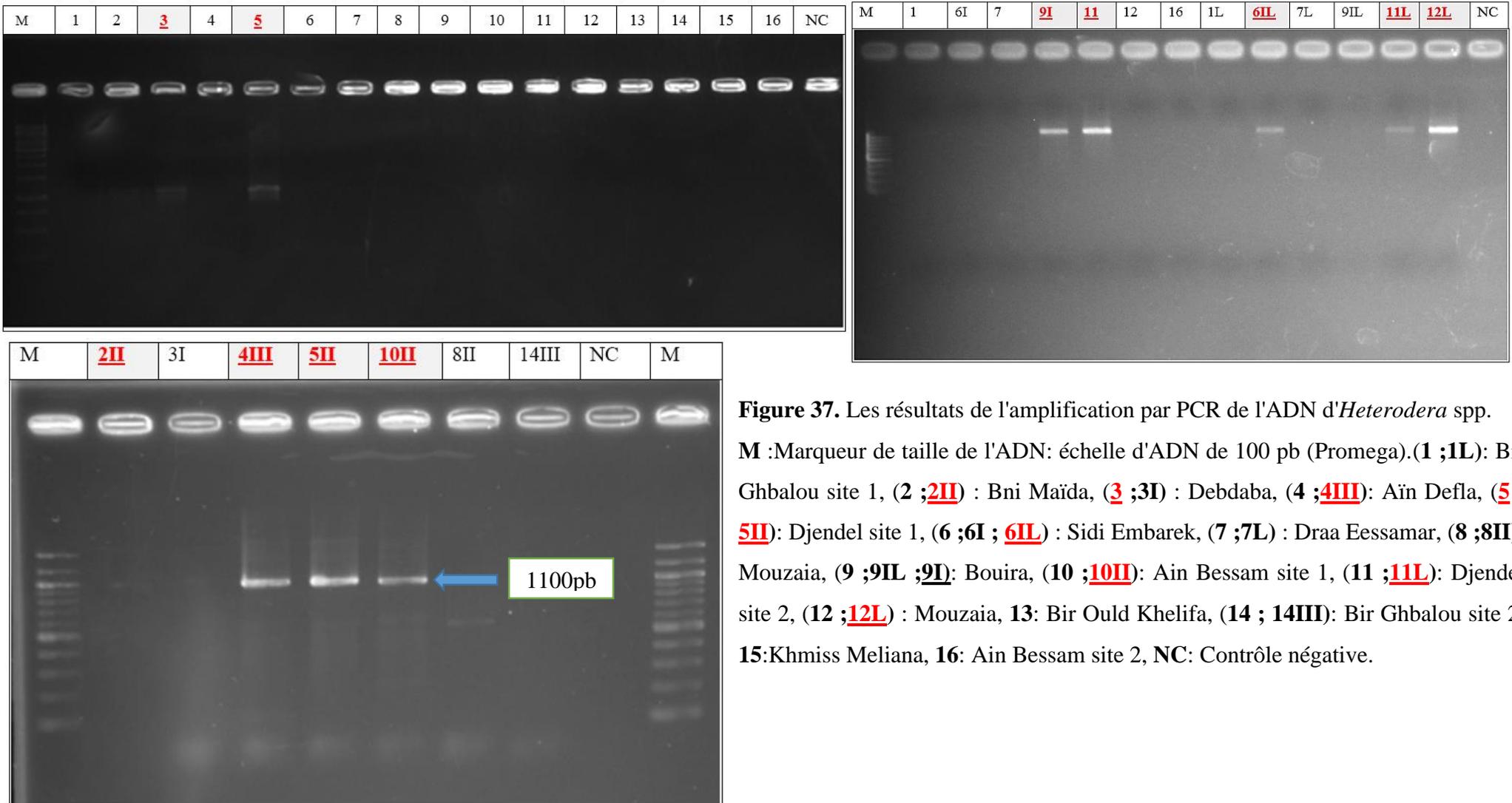


Figure 37. Les résultats de l'amplification par PCR de l'ADN d'*Heterodera* spp.

M :Marqueur de taille de l'ADN: échelle d'ADN de 100 pb (Promega).**(1 ;1L)**: Bir Ghbalou site 1, **(2 ;2II)** : Bni Maïda, **(3 ;3I)** : Debdaba, **(4 ;4III)**: Aïn Defla, **(5 ;5II)**: Djendel site 1, **(6 ;6I ; 6IL)** : Sidi Embarek, **(7 ;7L)** : Draa Eessamar, **(8 ;8II)**: Mouzaia, **(9 ;9IL ;9I)**: Bouira, **(10 ;10II)**: Ain Bessam site 1, **(11 ;11L)**: Djendel site 2, **(12 ;12L)** : Mouzaia, **13**: Bir Ould Khelifa, **(14 ; 14III)**: Bir Ghbalou site 2, **15**:Khmiss Meliana, **16**: Ain Bessam site 2, **NC**: Contrôle négative.

Tableau 19. Code, origine des espèces et numéro d'accèsion sur la base des données NCBI.

Num.	Code	Population	Région	Espèces	Amorces utilisées	Numéro d'accèsion
1	4III	Aïn Defla	Aïn Defla	<i>H.avenae</i>	AB28 et	MG800684
2	5II	Djendel site 2		<i>H.avenae</i>	TW81	MG800685
3	11	Djendel site 1		<i>H.avenae</i>		MG800687
4	11L			<i>H.avenae</i>		MG800689
5	2II	Bni Maïda	Tissemsilt	<i>H. hordecalis</i>		
6	3	Debdaba	Mostaganem	<i>H. hordecalis</i>		MH745137
7	6L	Sidi Embarek	B.B. Arreridj	<i>H. hordecalis</i>		MG800688
8	12L	Mouzaïa	Blida	<i>H. schachtii</i>		MG800690
9	9	Bouira	Bouira	<i>H. cruciferae</i>		MG800686
10	10II	Ain Bessam site1		<i>H. cruciferae</i>		MG693179

Les objectifs de cette étude sont de déduire les relations d'évolution entre les quatre espèces du genre *Heterodera* collectées en Algérie et d'évaluer leur emplacement actuel dans les groupes d'espèces du genre.

III.3.2. Analyse phylogénétique des espèces des nématodes à kyste *Heterodera* spp.

III.3.2.1. Le nématode à kystes des céréales (NKC) *H.avenae* Wollenweber, 1924.

Après le séquençage d'ADN, quatre nouvelles séquences des produits PCR ITS-rDNA représentent différentes populations de l'espèce *H.avenae* en Algérie. Les autres séquences (59) de régions ITS complètes et connues de différentes espèces de genre *Heterodera* ont été obtenues de la base de données GenBank (Tab.20).

Tableau 20. Numéros d'accèsion pour plusieurs ITS, rADN d'espèces du complexe *H.avenae*.

Espèce	Pays	Localisation	Numéro d'accèsion (Banque des gènes ; NCBI)	Références				
<i>Heterodera</i> sp.	Algérie	Aïn Defla, El Amra	LT159845	Tirchi <i>et al.</i> , 2016				
<i>H.avenae</i>	Turquie	Sanliurfa	KR704298	Cui <i>et al.</i> , 2017				
		Diyarbakir	KR704296					
		Mardin	KR704294					
		Kilis	KR704300					
	Gaziantep	KM199833	KM199831	KM199828	Imren <i>et al.</i> , 2015			
						Hatay	KM199806	
								Adana
		KM199820						
			KM199819					
		Osmaniye		KM199837		KM199834		
			Turquie				JX024196	
		Égypte	Abu Suwayr, Ismaïlia	Serabeum, Ismaïlia		El Shark, Ismaïlia	El Kasasen, Ismaïlia	
								KF225723
	KF225721							
					Abu Khalifah, Ismaïlia			KF225719
	Iran	Mehran-Reza Abad	AF498378	Tanha Maafi <i>et al.</i> , 2003				

Chapitre III. Résultats et discussions

Maroc	Ain Taoujdate	KC736863	Mokrini <i>et al.</i> , 2017b
	Settat	KC736876	
		KC736877	
	Marchouch	KC736856	
		KC736874	
	Ait Malk	KC736861	
	Ain Jmaa	KC736869	
	Berchid	KC736860	
	Haj Kaddour	KC736866	
	Inconnu	AY148368	Subbotin <i>et al.</i> , 2003
Syrie	Al-Hasakah	JX024197	Toumi <i>et al.</i> , 2015
Etats-Unis	Idaho	EF153843	Skantar <i>et al.</i> , (non publié)
Serbie	Serbie	KC847094	Oro, (non publié)
Algérie	Aïn Defla, El Amra	LT159843	Tirchi <i>et al.</i> , 2016
		LT159844	
	Aïn Defla	MG800684	Djetti et al. (non publié)
	Djendel site 2	MG800685	
	Djendel site 1	MG800687	
MG800689			
France	Argentan	AF274395	Subbotin <i>et al.</i> , 2001
	Villa Savary	AY148373	Subbotin <i>et al.</i> , 2003
	Nuisement sur Coole	AY148371	
Arabie Saoudite	Inconnu	AY148361	
Espagne	Santa Olalla	AY148356	
Chine	Huang gang	HQ450292	Wei <i>et al.</i> , (non publié)
	Juqiao, Henan	HM560754	

Chapitre III. Résultats et discussions

		Yigou, Henan	HM560745	
		Henan, Kaifeng	KU896211	Feng <i>et al.</i> , 2018
		Beijing	KU896210	Feng <i>et al.</i> , 2018
		Daxing District, Beijing	KR704309	Cui <i>et al.</i> , 2017
		Shanxi	KJ921724	Zheng <i>et al.</i> , (non publié)
		Shangdong, Heze	KF679398	
		Heibei, Baoding	KF679397	
	Inde	Inconnu	KC152906	Rao <i>et al.</i> , 2013
		Delhi	AY148362	Subbotin <i>et al.</i> , 2003
		Delhi	HG738844	Chawla <i>et al.</i> , (non publié)
	Allemagne	Grafenreuth	KF225724	Baklawa <i>et al.</i> , 2015
<i>H. mani</i>	Allemagne	Heinsberg	AY148376	Subbotin <i>et al.</i> , 2003
		Bavaria	AY148378	
<i>H. filipjevi</i>	Inde	Kangra	HG738845	Chawla <i>et al.</i> , (non publié)
<i>H. arenaria</i>	Italie	Italie	MG523155	Subbotin <i>et al.</i> , 2018
	Royaume-Uni	Lincolnshire	AF274396	Subbotin <i>et al.</i> , 2001
<i>Cryphodera brinkmani</i>	Japon	Yokokokowa, Saitama-Ken	AF274418	

La comparaison entre les séquences ITS-ADNr des populations d'*H.avenae* entre elles et avec les séquences des espèces *Heterodera* disponibles dans GenBank est présentée dans la figure 38.

Dans cette étude, les espèces du groupe *H.avenae* sont clairement divisées en deux groupes dans l'arbre phylogénétique. Le groupe (I) comprenait les isolats de *H.avenae* prélevés de Turquie (KF225719), Egypte (KF225721), Maroc (KC736863), Espagne, France (AF274393), Inde (KC152906), Arabie Saoudite (AY148361) et Syrie (JX024197), elles se sont regroupées avec les populations Chinoises (HM560754), Algérienne (LT159844) et Indienne (HG738844)

Chapitre III. Résultats et discussions

à une valeur de 84% nettement différentes à des populations du complexe *H. mani* de groupe (II). Les sous-groupes 1 et 2 ont été séparés l'un de l'autre et chaque un à une valeur de bootstrap qui est de 91 et 78%, respectivement. Le s/g (1) est constitué du groupe complexe *Heterodera*, comprenant *H.avenae*, *H. arenaria* et *H. filipjevi*. Le s/g (2) rassemble les populations de *H.avenae* codés avec 40, 46, 45, 43, et 41 provenant de la chine et différentes aux autres à une valeur de bootstrap de 76%. Nos résultats montrant une large similarité entre les populations d'Ain Defla (MG800684), Djendel (MG800685), et El Amra (LT159843) venus de la même région et avec ceux issues de la chine et de l'inde codées par 39 et 31, respectivement. Elles diffèrent des autres à une valeur bootstrap de 77%. Deux isolats de *H. mani* codés avec 57 et 58, prélevés en Allemagne, ainsi que *H. sp.* (49) d'origine Algérienne ont été regroupés dans une autre branche en un seul groupe (II) avec une valeur de bootstrap de 83%.

Selon Cui *et al.*, (2017), les isolats de *H.avenae*, provenant de Turquie et d'Europe et des États-Unis, se sont regroupés avec *H. arenaria* en un sous-groupe présentant une valeur de bootstrap de 99%. Baklawa *et al.*, (2015) ont signalé que le complexe *H.avenae* est regroupé dans une branche avec une valeur de bootstrap de 100%. Subbotin *et al.*, (2003) ont rapporté que des isolats européens, asiatiques et africains de *H.avenae* forment plusieurs groupes sur la base d'une analyse phylogénétique du gène ITS-ARNr et de PCR-ITS-RFLP.

Les résultats rapportés ici ne montrent aucun polymorphisme intraspécifique entre les populations Algérienne de *H.avenae* basé sur les séquences ITS. Ces résultats sont en accord avec ceux de Tirchi *et al.*, 2016 et de Mokrini *et al.*, (2017) qui ont constaté que les populations de *H.avenae* originaires de différentes localités du Maroc et de l'Algérie se sont regroupées dans le même groupe et présentent des similitudes élevées.

Cette région d'ADNr est couramment utilisée pour séparer les nématodes au niveau des espèces, y compris le genre *Heterodera* (Subbotin *et al.*, 2003). Dans notre étude, basée sur les données de la région ITS, les populations Algériennes d'*H.avenae* se sont regroupées avec des populations de *H.avenae* d'Asie et autres Algérienne publié par Tirchi *et al.*, 2016.

Deux génotypes du NKC européen basés sur les séquences de gènes ITS et COI sont maintenant distingués : les types A et B. Le type A est répandu dans toute l'Europe et l'Amérique du Nord et le type B est distribué en Asie et en Afrique du Nord (Smiley *et al.*, 2017). De plus, un nouveau type a été identifié comme étant "C" de *H.avenae* de Taigu dans la province de Shanxi et Kaifeng, Henan en chine, qui est différent des populations de *H.avenae* précédemment

identifiées (Zheng *et al.*, 2015 ; Feng *et al.*, 2018). L'arbre phylogénétique obtenu dans cette étude est en accord avec les résultats publiés précédemment.

Les nématodes à kystes du groupe *avenae* sont très répandus dans toute l'Europe, la région méditerranéenne d'Afrique, d'Asie et d'Amérique du Nord (Smiley *et al.*, 2017). Ils causent des dommages considérables à la production de blé en Arabie saoudite (Al-Dos *et al.*, 2010). Les pertes de récolte associées aux nématodes varient selon les endroits, les conditions saisonnières et les cultivars (Nicol *et al.*, 2006), mais elles sont estimées. Imren *et al.*, (2015) ont signalé la distribution et la diversité des NKC dans une zone limitée de la région méditerranéenne (Adana, Osmaniye, Kahramanmaraş, Hatay, Gaziantep et Kilis) en Turquie. Parmi ces isolats, 75% ont été identifiés comme *H.avenae*. La prévalence de *H.avenae* dans la province d'Ismailia a été enregistrée avec 79,4% (Baklawa *et al.*, 2015). Les pertes de rendement de blé causées par ce nématode peuvent atteindre 40% dans certaines régions fortement infestées en Chine (Peng *et al.*, 2007). En Europe, plus de 50% des champs situés dans les principales zones de production céréalière sont infestées par ce nématode, avec des pertes de rendement impressionnantes atteignant 3 millions £ (Nicol et Rivoal, 2009). Des études en Oregon dans le nord-ouest du Pacifique ont indiqué des pertes de 24% sur le blé de printemps (Smiley *et al.*, 2005).

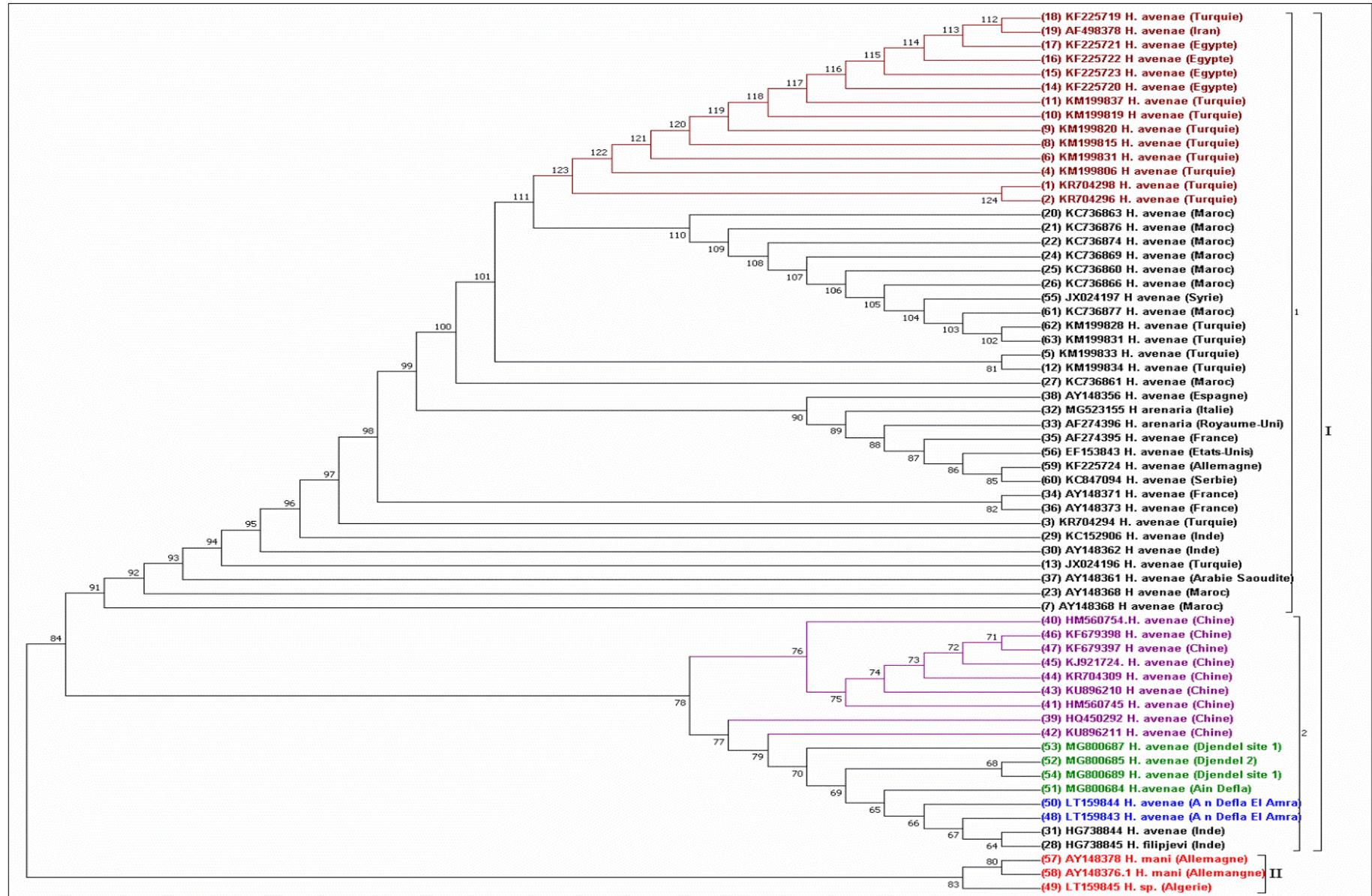


Figure 38. Arbre phylogénétique (maximum de vraisemblance) des séquences Espace Transcrit Interne (ITS) des nématodes.

III.3.2.2. Le nématode à kyste de l'orge *Heterodera hordecalis* Andersson, 1975.

H. hordecalis ressemble le plus à *H. latipons*. Pour différencier l'espèce de plusieurs autres nématodes à kyste, Les profils de PCR-ITS-RFLP pour *H. hordecalis* sont fournis par Subbotin et al. (1999), Tanha Maafi *et al.*, (2003), Rivoal *et al.*, (2003). Les séquences du gène de l'ARN de l'ITS sont données par Clapp *et al.*, (2000), Subbotin *et al.*, (2000), Sabo *et al.*, (2001), Tanha Maafi *et al.*, (2003) et Madani *et al.*, (2004).

Vingt-cinq séquences ITS de *H. hordecalis* (3 nouvelles et 23 de GenBank ; Tab.21) ont été alignées à l'aide de Clustal W (Thompson *et al.*, 1994) et vérifiées visuellement. Les différences entre les séquences ont été estimées à l'aide de l'option ADN distance fournie par l'éditeur d'alignement des séquences de BioEdit (Hall, 1999).

Tableau 21. Espèce et origine de nématode (*H. hordecalis*) utilisée pour l'analyse phylogénétique.

Espèce	Pays	Localisation	Num. acc. (NCBI)	Références	
<i>H. hordecalis</i>	Italie	Zapponeta	AY347924	Madani <i>et al.</i> , 2004	
	Israël	Inconnu	AY347923		Subbotin <i>et al.</i> , 2018
			JX024215	Toumi <i>et al.</i> , 2013	
			MG523147		
	Allemagne	Iran	Ardabil, Meshkin shahr	MG523151	Maafi <i>et al.</i> , 2003
	Suède			MG523150	
	Slovaquie			Inconnu	
		MG523152			
		MG523149			
	AF498381	Maafi <i>et al.</i> , 2003			
	Slovaquie	Inconnu	MG523148	Subbotin <i>et al.</i> , 2018	
	Royaume-Uni	Scotland, Montrose	AF274401	Subbotin <i>et al.</i> , 2000	
	Estonie	Inconnu	AY692356	Ferris <i>et al.</i> , 2003	
	Tunisie		JX024216	Toumi <i>et al.</i> , 2013	
	Algérie	Seriana, Batna	KX574309	Smaha <i>et al.</i> , 2018	

	Maghnia, Tlemcen	KX574306	
	Sebaine, Tiaret	KX574293	
	Hammam Sokhna, Sétif	KX574289	
	Guellal, Sétif	KX574287	
	Ain Arnat, Sétif	KX574307	
	El Amra, Ain Defla	LT159842 ; LT159841	Tirchi <i>et al.</i> , 2016
	Sidi Embarek, Bordj Bou Arreridj	MG800688	Djetti et al. (non publié)
	Debdaba, Mostaganem	MH745137	
	Bni Maïda, Tissemsilt	MH745136	

L'alignement a été importé dans le logiciel Mega 7.0 (Kumar *et al.*, 2016). L'arborescence avec la probabilité la plus élevée (-2608.11) est affichée. Les arborescences initiales de la recherche heuristique ont été obtenues automatiquement en appliquant les algorithmes Neighbor-Join et BioNJ à une matrice de distances par paire estimée à l'aide de l'approche MCL (Maximum Composite Likelihood), puis en sélectionnant la topologie avec une valeur de vraisemblance supérieure. L'analyse a impliqué 26 séquences de nucléotides. Toutes les positions contenant des lacunes et des données manquantes ont été éliminées. Il y avait un total de 602 postes dans l'ensemble de données final. Des analyses évolutives ont été menées (Fig. 39).

Après une comparaison entre les séquences Algérienne de notre étude et les autres publiées sur la base de données (NCBI ; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>). Vingt et une séquences de l'ADN-ITS sont similaires aux séquences de *H. hordecalis* de Bni Maïda (MH745136) avec une similarité de 98 à 99%. Vingt-deux séquences de l'ADN-ITS sont similaires aux séquences de *H. hordecalis* de Debdaba (MH745137) avec un intervalle de 97 et 99%. Dix-huit séquences publiées sont similaires aux séquences de *H. hordecalis* de la population de Sidi Embarek (MG800688) avec une valeur de similarité entre 92 et 93%. Sur la base de la topologie de la règle de la majorité calculée, arbre de vraisemblance maximum consensuel à 60% pour toutes les populations Algériennes collectées dans l'enquête et d'autres populations sont présentes dans la banque des gènes.

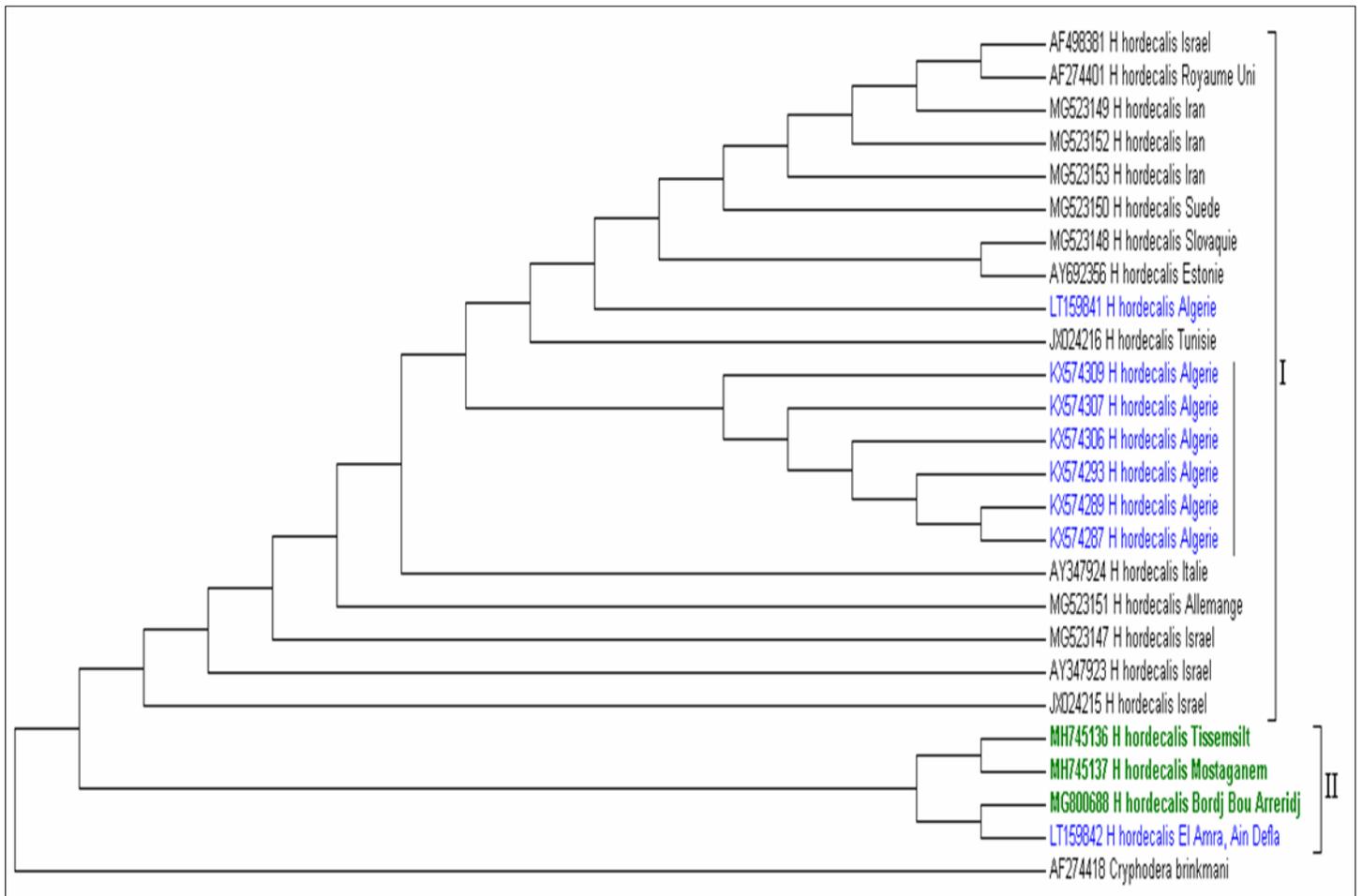


Figure 39. Arbre phylogénétique pour les 3 populations de nématodes à kystes caractérisées dans cette étude et 23 populations précédemment signalées. L'arbre a été construit sur la base des séquences rDNA-ITS en utilisant la méthode de Neighbor-joining N.J. (MEGA 7.0).

Les populations de Beni Maïda, Sidi Mbarek et Debdaba appartenant au groupe avenae, MH745136, MG800688 et MH745137, respectivement. Nos données confirment également par des observations précédente selon laquelle l'espèce appartient au même groupe (Subbotin *et al.*, 2001 ; Tanha Maafi *et al.*, 2003 ; Madani *et al.*, 2004). L'arbre phylogénétique, déduit de l'analyse de ces séquences géniques ITS d'ADNr, contenait deux clades, le clade majeur était clairement divisé en quatre sous-groupes (s/g). Le premier s/g rassemble six populations d'origine algérienne, publié par Smaha *et al.*, 2018, une population d'origine de Ain Defla (LT159841 ; Tirchi *et al.*, 2016), le deuxième s/g regroupe trois populations d'origine d'Israël, le troisième s/g a assemblé les populations d'origine d'Europe (Suède, Slovaquie et Royaume-Uni) et de l'Asie (Iran) et le quatrième s/g regroupe trois populations d'Europe (AY347924,

MG523151 et AY692356). Le deuxième Clade comprenait la population de *H. hordecalis* de Debdaba et Bni Maïda ainsi qu'une autre population Algérienne de la même espèce (El Amra ; LT159842). Comme ces résultats ont consisté en un premier signalement de *H. hordecalis* à Sidi Embarek, Debdaba et Bni Maïda. Seules deux publications pour l'identification moléculaire de l'espèce *H. hordecalis* en Algérie (Tirchi *et al.*, 2016 ; Smaha *et al.*, 2018). *Cryphodera brinkmani* (AF274418) a été utilisé comme taxa du groupe externe (Imren *et al.*, 2015).

L'espèce a été signalée pour la première fois par Tirchi *et al.*, 2016 à El Amra dans la wilaya de Ain Defla et par Smaha *et al.*, 2018 dans les régions de Guellal, Hammam Sokhna, Ain Arnat, Seriana, Sebaine et Maghnia,. *H. hordecalis* attaque les Poacées (graminées) (Andersson, 1974), Orge, *Hordeum vulgare* L. (Subbotin *et al.*, 2010). L'espèce a été signalée dans de nombreux pays à Zapponeta, sud de l'Italie dans un champs de chiendent (Sabo *et al.*, 2001; Madani *et al.*, 2004). Tunisie (Namouchi-Kachouri et B'Chir, 2005), elle a été récupérée de quelques parcelles de blé et autour de graminées dans l'ouest de l'Iran (Tanha Maafi *et al.*, 2007, 2009).

III.3.2.3. Le nématode à kyste du chou *H. cruciferae* Franklin, 1945.

L'amplification de l'ADN a été réalisée pour toutes les populations examinées et n'a révélé aucune différence de longueur entre les produits de PCR amplifié. Deux nouvelles séquences et 16 séquences connues publiées dans Genbank ont été utilisées dans l'étude phylogénétique (Tab. 22).

Les ADNr de ses deux séquences sont différentes dans cinq nucléotides. Une recherche de similarité des séquences ITS obtenues du village d'Ain Bessam dans la base de données NCBI (Banque des gènes) a montré que le score maximum correspondait à 1526, 1498 et 1496 et à 99% similaire à *H. cruciferae* (JX402415, AF274411 et KP114545), avec 98%, accordé à *H. carotae* (KX463294, AY347917, KX463298 et KX463297), respectivement. La séquence ITS a également été obtenue à partir d'un échantillon de kyste originaire de la ville de Bouira, montrant une forte similitude entre (98–99%) avec plusieurs séquences d'*Heterodera*, notamment *H. cruciferae*, *H. carotae*, *H. urticata* et *H. sp.* Cependant, le pourcentage chez d'autres espèces d'*Heterodera* est plus faible.

Tableau 22. Espèces des nématodes (*Heterodera* spp.) et populations téléchargées du NCBI utilisées dans l'analyse phylogénétique.

Espèces	Pays	Localisation	Num. acc. (NCBI)	Références		
<i>Heterodera goettingiana</i> Liebscher, 1892	Chine	Qinghai	EU623623	Ou <i>et al.</i> , (non publié)		
			EU623624			
<i>H. cruciferae</i> Franklin, 1945	Russie	Moscow	GU126667	Chizhov <i>et al.</i> , 2009		
	Italie	Taranto	JX402415	Sasanelli <i>et al.</i> , 2013		
	Pays-Bas	Brielle	AF274411			
	Iran	Iran	KP114545	Jabari (non publié)		
	Algérie	Ain Bessam, Bouira	MG693179	Djetti <i>et al.</i> (non publié)		
			Bouira		MG800686	
<i>H. urticae</i> Cooper, 1955	Belgique	Diksmuide	AF274412	Subbotin <i>et al.</i> , 2001		
<i>H. carotae</i> Jones, 1950	Italie	Forli-Cesena	KX463294	Madani <i>et al.</i> , 2004		
			Canada		Ontario	KX463298
						KX463296
			KX463295			
	France	Creances	AF274413	Subbotin <i>et al.</i> , 2001		
	Italie	Inconnu	AY045754	Sabo <i>et al.</i> , 2001		
<i>Heterodera</i> sp.	Iran	Western Azarbajejan	AF498376	Tanha Maafi <i>et al.</i> , 2003		
		Khoram-Abad	AF498375			
	Chine	Hubei	HM560794	Peng (non publié)		

Deux groupes principaux ont été identifiés dans l'arbre phylogénétique. Le groupe un (I) contient des espèces de *H. cruciferae* ; *H. carotae* ; et *H. sp.* des différents pays du monde (Asie, Europe et États-Unis). Le second groupe (II) couvre deux espèces de *H. cruciferae* collectées dans nos parcelles en Algérie et *H. carotae* de l'Europe (Italie). La population MG800686 (Bouira) est fortement liée à KX463294, une séquence provenant d'Italie. Les populations de *H. cruciferae* originaires de différentes localités algériennes se sont regroupées dans le même groupe et ont présenté de grandes similitudes ; plus de détails sont montrés dans la figure 40.

Chapitre III. Résultats et discussions

Il n'existe pas de polymorphisme intraspécifique entre les populations algériennes de *H. cruciferae* basé sur l'analyse des séquences ITS. Ils sont regroupés avec *H. carotae* d'Europe dans le même groupe et présentent des similitudes importantes. Nos résultats sont conformes aux résultats publiés de nombreux auteurs (Madani *et al.*, 2017; Sabo *et al.*, 2001; Maafi *et al.*, 2003).

L'histoire évolutive a été déduite en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance basée sur le modèle Tamura-Nei (Tamura et Kumar., 2004). Le pourcentage d'arbres dans lequel les taxons associés sont regroupés est indiqué à côté des branches. Les arborescences initiales de la recherche heuristique ont été obtenues automatiquement en appliquant les algorithmes Neighbor-Join et BioNJ à une matrice de distances par paire estimée à l'aide de l'approche MCL (Maximum Composite Likelihood), puis en sélectionnant la topologie avec une valeur de vraisemblance de journal supérieure. L'analyse a impliqué 18 séquences de nucléotides. Toutes les positions contenant des lacunes et des données manquantes ont été éliminées. Il y avait un total de 801 positions dans l'ensemble de données final. Des analyses évolutives ont été menées dans MEGA7 (Kumar *et al.*, 2016).

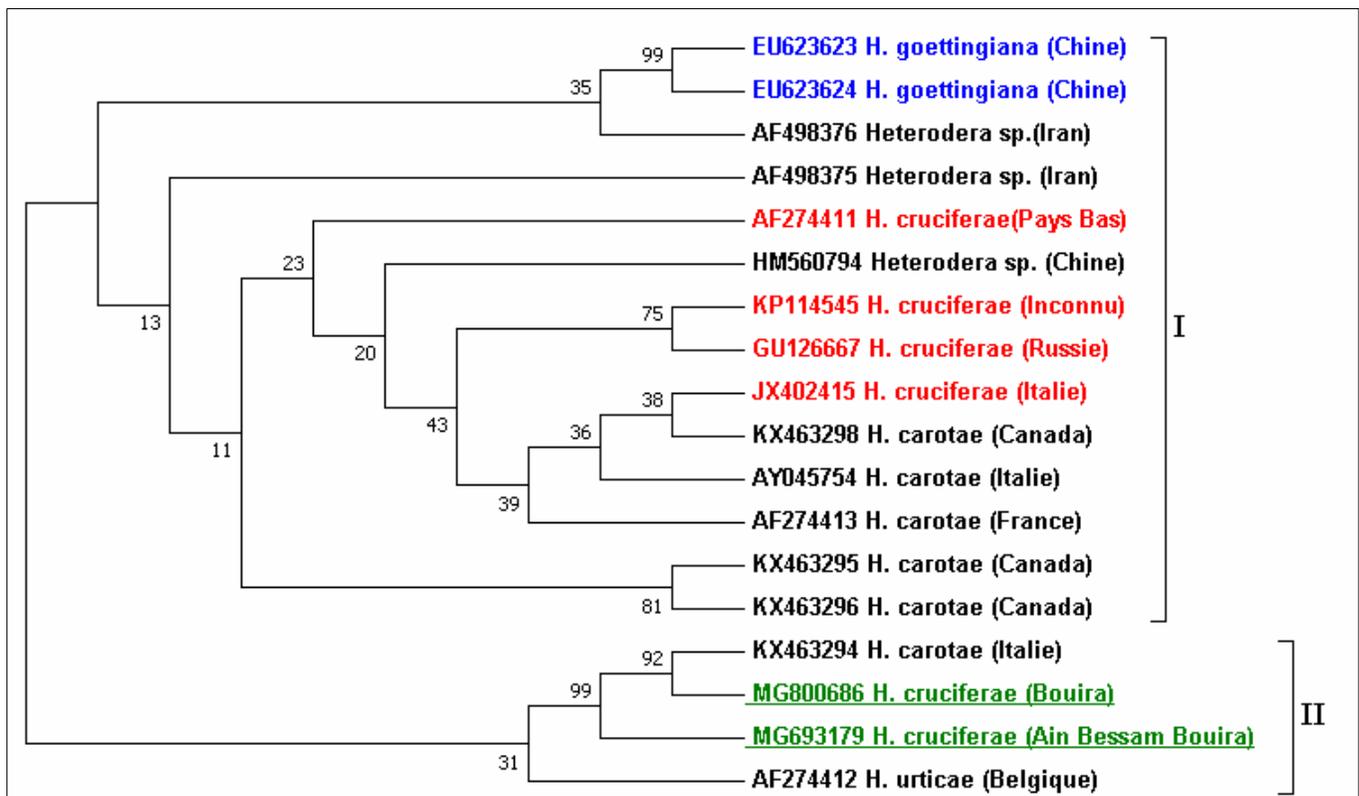


Figure 40. La topologie de l'arbre de vraisemblance pour toutes les populations étudiées avec l'ajout de populations de *goettingiana* groupe obtenues de GenBank sur la base de l'alignement de séquence de l'ADNr.

Chapitre III. Résultats et discussions

Les résultats de l'analyse phylogénétique dans la présente étude montrent clairement que *H. cruciferae* appartient au groupe goettingiana d'*Heterodera*. Le groupe Goettingiana comprend quatre espèces de *H. Goettingiana*, *H. cruciferae*, *H. urticae* et *H. carotae* (Subbotin *et al.*, 2001b; Tanha Maafi *et al.*, 2003; Madani *et al.*, 2004). *H. cruciferae* ressemble le plus à *H. carotae* et *H. goettingiana*. Il diffère de *H. carotae* par la queue plus courte moyenne J₂ (41-50 vs 49-53 µm) et fente vulvaire plus courte (37-46 vs 47 µm) dans le kyste ; et chez *H. goettingiana* par la queue la plus courte J₂ (41-50 vs 58-66 µm) et la longueur du kyste plus courte (429-555 vs 521-650 µm) (Subbotin *et al.*, 2010). Malheureusement, la compétence spécifique en identification morphologique est souvent l'un des problèmes majeurs. Néanmoins, une identification précise et rapide de *H. cruciferae* dans les zones de culture des choux est très importante. Les techniques d'identification moléculaire peuvent être un moyen pour résoudre ce problème.

H. cruciferae a une gamme d'hôtes plus étroite que *H. schachtii*, Brassicaceae est la principale famille hôte de l'espèce, y compris les cultures agricoles courantes telles que le chou, le chou de Bruxelles, le chou-fleur, le brocoli et le radis (Subbotin *et al.*, 2010). Cette espèce a été signalée dans la région de Moscow avec une densité de 180 kystes par 100 g de sol (Chizhov *et al.*, 2009). Dans le sud de l'Italie, la densité était comprise entre 36 et 102 kystes matures par 100 ml de sol (Sasanelli *et al.*, 2013). Edongali et Dabaj, (1982) ont précédemment signalé ce parasite en Afrique du Nord en Libye. Dans la région de Samsun située au centre de la mer noire en Turquie, les parcelles de *Brassica oleracae* sont infestées par 35 kystes pour 1000 ml (78%) d'échantillons de sol rapportés par Mennan et Hando, (2006). Le nématode à kyste du chou a également été enregistré en Asie, en particulier en Iran (Niknam *et al.*, 2004a). En France, les résultats obtenus, basés sur 57 parcelles (soit 114 échantillons analysés) montrent que dans 75 % des cas, les symptômes observés peuvent être directement associés à la présence d'espèces phytoparasites et en particulier à celle de *M. artiellia* et de *H. cruciferae* (Chabert *et al.*, 2012), étant présent le long des côtes atlantiques, de la Manche et jusqu'au sud de la Touraine (Buisson *et al.*, 2011).

Lors d'une étude de la biodiversité des nématodes parasites des plantes dans les champs de légumes de Tabriz, province de l'Azerbaïdjan oriental, Iran entre 2004 et 2005, *H. cruciferae* a été trouvée dans la plupart des régions prospectées. Les kystes, les mâles et les juvéniles du deuxième stade ont été extraits des sols des champs et des racines infestées du kohlrabi

(*Brassica oleracea* L. var. Gongylodes) et du chou blanc (*Brassica oleracea* L. var. Capitata) (Jabbari et Niknam., 2008). Dans une évaluation préliminaire de la densité de population d'*H. cruciferae*, le nombre de kystes /g de racine de chou infesté est de 151 et le nombre moyen combiné d'œufs et des J_{2s} dans chaque kyste est de 21 à 170. De même, une moyenne de 227 (83-280) kystes / 100 g de sol a été signalée et le nombre moyen combiné d'œufs et de J_{2s} dans chaque kyste est de 96,8 (40-158) (Niknam *et al.*, 2004). Nos résultats se rapprochent de ceux de ces auteurs (voir : Tab. 22).

Ces enquêtes sur les NKC's en Algérie de Ain Bessam et de Bouira ont montré la présence de *H. cruciferae* Franklin 1945 et la découverte de ce nématode est inattendue. Aucun travail n'a signalé la présence de cette espèce dans les zones agricoles en Algérie jusqu'à présent. Il s'agit du premier signalement du nématode à kyste du chou dans le pays. Nous n'avons pas mené d'étude quantitative sur la perte de rendement causée par le nématode dans la région. Les solutions à mettre en œuvre pour en limiter l'impact de nématode à kyste des choux, l'absence seule de crucifères pendant plusieurs années (la capacité de survie de cette espèce est très importante) dans la rotation peut permettre de réduire les populations (Chabert *et al.*, 2012).

III.3.2.4. Le nématode à kyste de la betterave *H. schachtii* Schmidt, 1871. (NKB).

L'alignement de 29 séquences d'*Heterodera trifolii* ; *H. betae* ; et *H. schachtii* et parmi lesquelles une séquence est nouvellement obtenue durant cette étude (Tab. 23).

La comparaison des séquences ITS-ADNr des populations d'*H. schachtii* entre elles et avec les séquences des espèces d'*Heterodera* disponibles dans GenBank est présentée dans la figure 41. L'arbre phylogénétique résultant de la méthode (Neighbor Joining- NJ). Dans cette étude, les espèces du groupe d'*H. schachtii* sont clairement divisées en quatre groupes dans l'arbre phylogénétique. Le premier clade (groupe I) est construit par la population Algérienne de *H. schachtii* d'origine de Mouzaia et sept autres populations ayant des origines d'Allemagne (KF225726) ; de la Corée du Sud (MF043911) ; de la Belgique (AY166438) ; du Sud d'Afrique (MF754150) et des Pays-Bas (LC208692 et LC208693). Il est à noter que les relations phylogénétiques des séquences ITS ont montré un deuxième groupe (II) des populations d'*H. schachtii* d'origine (Europe ; Asie ; Australie ; Etats-Unis et d'Afrique) regroupé avec des espèces étroitement liées du groupe des Schachtii telles que *H. betae* (LC208691), *H. trifolii* (AY590283). Une population d'*H. schachtii* d'origine de Belgique

Chapitre III. Résultats et discussions

(EF611104) est classée dans le troisième groupe (III). Le quatrième groupe (IV) contient une population d'*H. schachtii* d'une population d'origine Aisne (France, EF611103) (Fig.51).

Tableau 23. Espèce et origine de nématode de groupe *schachtii* utilisée pour l'analyse phylogénétique.

Espèces	Pays	Localisation	Num. acc. (NCBI)	Références
<i>Heterodera trifolii</i>	Etats-Unis	Michigan	AY590283	Catal <i>et al.</i> , (non publié)
<i>H. betae</i>	Pays-Bas	Inconnu	LC208691	Sekimoto <i>et al.</i> , 2017
<i>H. schachtii</i>			LC208692 ; LC208693	
<i>H. schachtii</i>	Sud d'Afrique	Tarlton, Gauteng	MF754150	Shubane.,2018
	Corée du Sud	Inconnu	MF043911	Mwamula <i>et al.</i> , 2018
	Belgique	Ohain	AY166438	Amiri <i>et al.</i> , 2002
		Bossuit	EF611104	Madani <i>et al.</i> , 2007
		Molembaix	EF611105	
		Herme	EF611107	
		Momalle	EF611109 ;EF611100 ; EF611110	
	Pays-Bas	Borsel	EF611101 ; EF611102	
	France	Aisne	EF611103	
	Maroc	Berkane, Mouloya	EF611108	
	Australie	Munster	EF611114	
	Allemagne	Schladen	EF611115	
	Algérie	Mouzaia	MG800690	Djetti et al. (non publié)
	Etats-Unis	Michigan	AY590282	Catal <i>et al.</i> , (non publié)
	Pologne	Pologne	JX024219	Toumi <i>et al.</i> , 2013
	Allemagne	Muenster	KF225726	Baklawa <i>et al.</i> , 2015
Turquie	Sanliurfa	KT874518 ; KT874522 ; KT874524 ; KT874525 ; KT874526 ; KT874527	Cui <i>et al.</i> , 2016	

Les populations n'ont pas été regroupées en fonction de leur localisation géographique et ces résultats sont en accord avec Madani *et al.*, (2007) et Mwamula *et al.*, (2018) qui ont indiqué que la similarité génétique des populations de *H. schachtii* n'est pas corrélée à leur proximité géographique. La séquence de cette population a été déposée dans la banque des gènes sous le numéro d'accèsion ; MG800690.

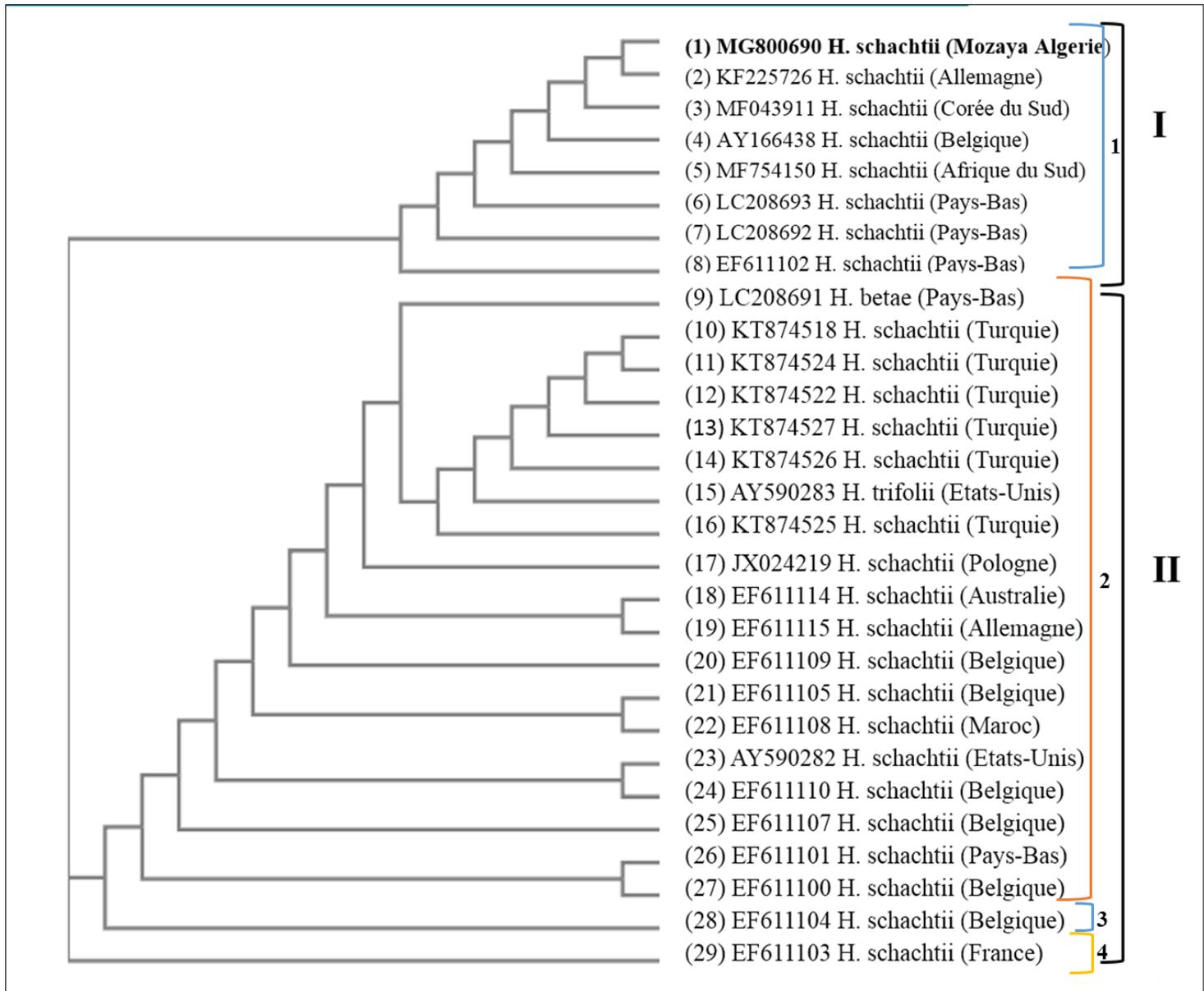


Figure 41. Analyse phylogénétique moléculaire (maximum de vraisemblance) construite par l'alignement des séquences ITS pour 29 nématodes à kyste de groupe *H. schachtii sensu stricto*.

Chapitre III. Résultats et discussions

H. trifolii Goffart, 1932, *H. schachtii* Schmidt, 1871 constituent le groupe *H. schachtii* sensu stricto, avec *H. ciceri*, *H. bêta*, *H. galeopsidis*, *H. daverti*, *H. lespedezae*, *H. glycines*, *H. medicaginis* et *H. rosii* (Subbotin *et al.*, 2000). Cependant, il existe quelques différences morphologiques et morphométriques mineures utiles pour distinguer toutes les espèces du groupe *schachtii* sensu stricto (Amiri *et al.*, 2002). La différenciation morphologique des espèces de nématodes à kystes appartenant au groupe *schachtii* sensu stricto est non seulement difficile, mais prend également beaucoup de temps et nécessite des compétences taxonomiques spécialisées (Amiri *et al.*, 2001). Ainsi, l'identification moléculaire est devenue de plus en plus courante pour des raisons d'efficacité (Amiri *et al.*, 2003) et les amorces du groupe *H. schachtii* sensu stricto pour la région ITS du gène ribosomal ont été développées afin de différencier les espèces appartenant au groupe *schachtii* des autres espèces de nématodes. (Amiri *et al.*, 2001; Waeyenberge *et al.*, 2009).

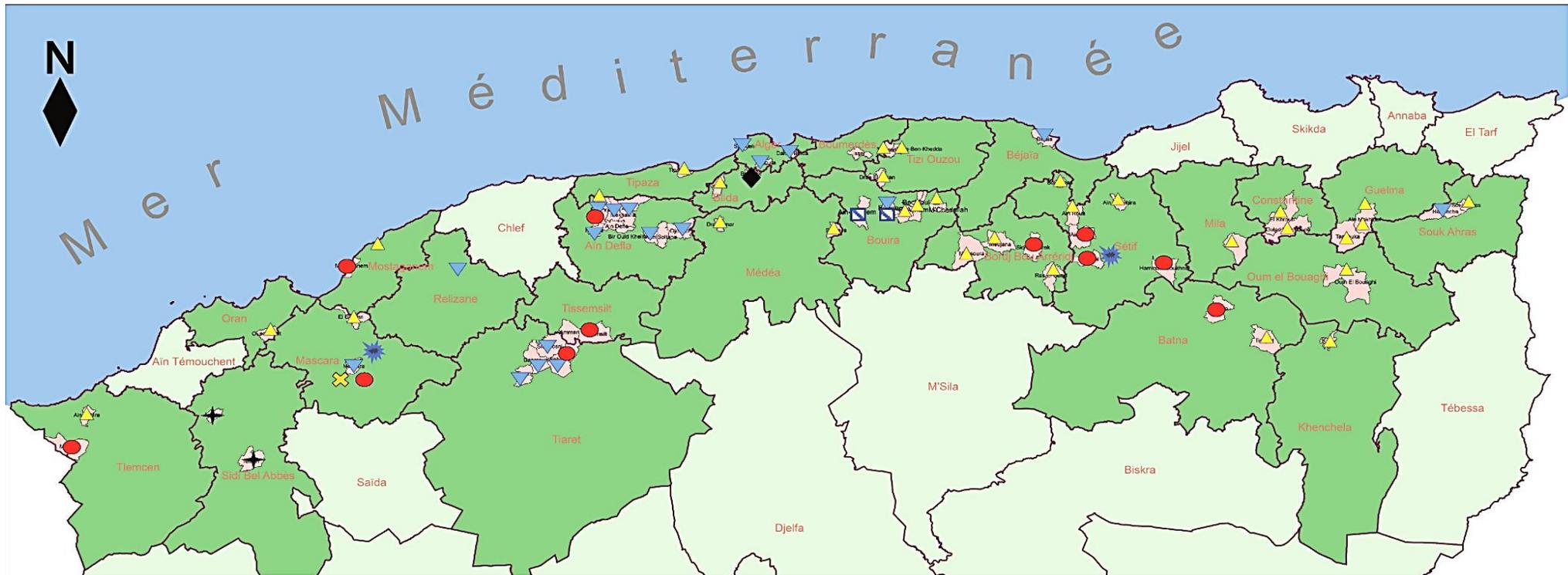
H. schachtii attaque plus de 200 espèces de plantes appartenant à 23 familles de plantes différentes ; notamment les familles Chenopodiaceae ; Brassicaceae (*Brassica oleracea* L. 1753) et Amaranthaceae (*Beta vulgaris* L. 1753) (Amiri *et al.*, 2002 ; Subbotin *et al.*, 2010). L'espèce est largement répandue dans plusieurs pays d'Asie, d'Europe, d'Australie, d'Amérique du Nord, d'Afrique et d'Amérique du Sud et l'Asie (Subbotin *et al.*, 2000 ; Madani *et al.*, 2007 ; Lee *et al.*, 2013 ; Sekimoto *et al.*, 2017 ; Mwamula *et al.*, 2018 ; Shubane.,2018). La présence d'*H. schachtii* au Maroc a été isolée d'un sol lourd à Berkane, dans la zone irriguée de Moulyia (Anon., 1983 in Mokrini *et al.*, 2017). En Turquie, La densité de NKB à Siverek, Karaköprü et à Bozova est respectivement de 11 ; 18,1 et 37,5 œufs par g de sol, ce qui est potentiellement dommageable selon les travaux d'Abawi et Mai 1980 in Cui *et al.*, (2016). Elle a récemment été considérée comme un organisme nuisible grave entraînant de graves dommages et une réduction de rendement dans la province de Gangwon en Corée (Lee *et al.*, 2013; Kabir *et al.*, 2015). Lorsque les parcelles sont infestés par *H. schachtii* et que certains de ces hôtes (y compris la betterave, le radis, la moutarde, le brocoli, le chou-fleur) sont cultivés en rotation, la population de nématodes s'accumule à des niveaux entraînant de graves pertes de rendement. (Shurtleff et Averde, 2000). En Ukraine, à des niveaux modérés d'infestation par les nématodes (101-300 œufs et $J_2s \times 100 \text{ cm}^{-3}$ de sol), les plantes infestées présentent des symptômes chlorotiques et les pertes de rendement sont estimées entre 12 et 50%. Au niveau des infestations les plus élevés (> 300 œufs et J_2s par 100 cm^{-3} de sol), la plupart des plantes ont un

retard de croissance avec des feuilles extérieures mortes et la perte de rendement était estimée à plus de 50% (Pylypenko et Sigareva, 2003). Selon l'étude de Chebret *et al.*, (2012) en France, *H. schachtii* n'est que très rarement présente et uniquement dans des parcelles ayant reçu des betteraves dans leur rotation.

En Algérie, la caractérisation moléculaire de l'espèce *H. schachtii* est originale dans la présente étude. Elle est considérée comme accidentelle dans la zone prospectée. Aucun auteur n'a signalé sa présence en Algérie. Nous avons signalé le nématode à kyste de la betterave (NKB) pour la première fois en Mitidja (Mouzaia, Blida), avec une densité de $6,2 \pm 2,58$ kyste /500g de sol et $137,10 \pm 71,61$ J_{2S+} œufs. Cependant, aucune étude n'a été consacrée à cette espèce en Algérie. Une identification précise et rapide du NKB dans d'autres zones de culture de la betterave est très importante pour la planification des mesures de protection des plantes. Ces résultats indiquent qu'il est nécessaire de surveiller la population de *H. schachtii* en Algérie afin d'éviter une perte économique importante. Il existe de nombreuses variétés de betteraves résistantes (totales ou partielles, associées ou non à la tolérance) ou d'intercultures (moutardes et radis) pour gérer les niveaux des populations de nématode (Chabert *et al.*, 2012). Ainsi, pour une parcelle contaminée, même en utilisant un système de rotation tous les deux ans avec des céréales qui permettant de contrôler la population lors d'une rotation betterave-blé-blé (Amiri *et al.*, 2002 ; Chabert *et al.*, 2012).

III.4. Cartographie de distribution des nématodes à kyste en Algérie.

Pour mieux réaliser une cartographie de distribution de ces parasites. Il est nécessaire de déterminer les espèces des nématodes à kyste. Les résultats de l'analyse des séquences du gène d'ADNr de l'ITS facilitent la séparation des espèces d'*Heterodera* en trois groupes, à savoir *Avenae*, *Goettingiana* et *Schachtii*, comme décrit précédemment par Zheng *et al.* (2008), Skantar *et al.* (2012), De Luca *et al.*, (2013), Wang *et al.*, (2011), Imren *et al.*, (2015), Cui *et al.*, (2017), Mokrini *et al.*, (2017b) et Sekimoto *et al.*, (2017). Selon nos résultats et les travaux de Bekal *et al.*, 1997 ; Mokabli *et al.*, 2002 ; Rivoal *et al.*, 2003 ; Righi *et al.*, 2011 ; Djetti *et al.*, 2014, 2017, 2018 ; Haddadi *et al.*, 2013, 2015, ; Tirchi *et al.*, 2016 ; Mehalaine *et al.*, 2017 ; Smaha *et al.*, 2018a et b, il existe sept espèces des NKC (*H. avenae* ; *H. latipons* ; *H. filipjevi* ; *H. hordecalis* ; *H. mani* ; *H. schachtii* et *H. cruciferae*) (Fig. 42).



Légende

- ▲ *Heterodera* sp.
- ▼ *H. avenae*
- *H. hordecalis*
- ✦ *H. filipjevi*
- *H. cruciferae*
- ◆ *H. schachtii*
- ★ *H. latipons*
- ✕ *H. mani*
- Wilaya d'échantillonnages
- Stations d'étude

Figure 42. Carte de distribution des espèces des nématodes à kystes (NKC ; *Heterodera* spp.) en Algérie.

III.5. Capacité d'hôte de quatre variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) à l'égard d'une population d'*H.avenae*.

Les nématodes à kystes s'attaquent à de nombreuses espèces de céréales. Ils sont également de sérieux ravageurs des céréales dans le monde entier (Handoo, 2002). Les nématodes du groupe des avenae du genre *Heterodera* sont présentés dans toutes les principales zones de production céréalière du bassin méditerranéen et causent des pertes économiques importantes. Ils causent souvent de graves pertes de rendement. Pour cela nous avons étudié l'effet d'*H.avenae* sur les paramètres de rendement de quatre variétés de blé dur à savoir ; Chen's, Vitron, Bousselam et Oued Zenati.

III.5.1. Comparaison entre les variétés de blé dur en tenant compte les différents paramètres.

En fin de culture, les composantes de rendement sont prises en considération pour les comparer avec les plants témoins ; Le nombre des tiges, hauteur des tiges, le nombre d'épis, les longueurs des épis, le nombre des grains par épis ainsi que le poids de 1000 grains (PMG (Tab. 24).

Tableau 24. Différentes paramètres de rendements mesurés des différentes variétés infestées et leurs témoins.

Paramètre mesuré	Variété Année	Chen's		Vitron		Bousselam		Oued Zenati	
		2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017
Nombre des tiges		+	+	+	+	+	+	+	+
Longueur des tiges (cm)		+	+	+	+	+	+	+	+
Nombre épis		-	+	-	+	-	+	-	+
Longueur des épis		-	+	-	+	-	+	-	+
Largeur des épis		-	+	-	+	-	+	-	+
Nombres des grains par épis		-	+	-	+	-	+	-	+
Poids des grains		-	+	-	+	-	+	-	+

+ Paramètres mesuré ; - Paramètre non mesuré

Les résultats des paramètres morphologiques et les composantes du rendement sont présentés dans le tableau 25.

III.5.1.1. Paramètres morphologiques.

III.5.1.1.1. Nombre des tiges.

Pour l'année 2016, le nombre moyen des tiges des quatre variétés étudiées varie entre 3 pour les variétés témoins de Bousselam et de 5 pour Vitron et Oued Zenati. Par contre chez les variétés infestées par *H.avenae*, le nombre des tiges est inférieur à celui des témoins. Il varie entre 2,6 (Bousselam) et $4,4 \pm 0,89$ (Oued Zenati). Pour l'année 2017 (deuxième essai), le nombre moyen des tiges des variétés témoins (5,4 pour Bousselam et 7,4 pour Vitron) est aussi supérieure à celle des variétés infestées (05 pour Chen's et 6.6 pour Bousselam). Ces variétés se sont montrées hôtes favorables pour ce nématode (Tab. 25).

Tableau 25. Résultats globaux de la moyenne des paramètres de rendement entre les variétés témoins et les infestées.

Paramètre en moyenne	Variété	Chen's		Vitron		Bousselam		Oued Zenati	
	Année	Tém.	Inf.	Tém.	Inf.	Tém.	Inf.	Tém.	Inf.
Nombre des tiges	2016	4,6 ¹ ±0,54 ² (4-5) ³	3,8±0,83 (3-5)	5±0 (5-5)	4,4±1,34 (2-5)	3±0,7 (2-4)	2,6±0,54 (2-3)	5±0 (5-5)	4,4±0,89 (3-5)
	2017	7±1,58 (5-9)	5,4±0,89 (4-6)	7,4±1,14 (6-9)	6,2±1,3 (4-7)	5,4±1,14 (4-7)	6,6±1,4 (6-8)	6,4±1,67 (5-9)	6,4±1,14 (5-8)
Longueur des tiges (cm)	2016	31,49±9,06 (21-45,5)	26,74±10,19 (15-41)	33,91±8,87 (19-50,4)	29,27±6,51 (13-42,5)	45,02±9,3 (20,5-58,5)	30,33±8,8 (15-55)	55,61±8,85 (28-70)	36,82±10,3 (26-50,5)
	2017	33,09±5,53 (26,6-43,2)	31,64±7,03 (21-47,1)	36,33±5,8 (24,5-46,4)	34,68±6,3 (24-41,5)	45,16±9,05 (23-59,5)	42,5±8,21 (27-52,5)	47,2±7,27 (33,5-60)	43,76±9,49 (27,7-57)
Longueur des épis (cm)	2017	11,925±0,9 (10-13,5)	9,99±1,12 (8-12,5)	14,07±1,12 (12,6-15,5)	10,67±1,43 (7,4-13)	14,37±1,14 (12,3-16,5)	12,87±1,85 (11-16,5)	17,55±1,78 (15-21)	15,51±1,56 (13,5-19)
Largeur des épis (cm)		1,48±0,52 (0,8-2)	1,25±0,41 (0,5-1,6)	1,19±0,28 (0,8-1,9)	1,05±0,29 (0,5-1,5)	1,13±0,24 (0,8-1,5)	0,96±0,34 (0,5-1,4)	1,17±0,27 (0,8-1,6)	0,9±0,12 (0,8-1,1)
Nombre des épis		6,00	5,80	6,60	6,00	6,00	5,80	2,60	3,20
Nombres des grains par épis		30,2±8,47 (16-46)	24,21±6,90 (13-37)	33,1±4,49 (27-40)	26,43±5,39 (19-37)	30±5,55 (18-35)	18,68±6,73 (6-29)	20,92±7,01 (11-17)	13,62±5,18 (7-15)
Poids de 1000 grains (gr)		86,99	85	51,50	43,50	30,75	31,05	51,95	47,26
Rendement (qt/ha)		58,67	44,67	38,07	25,68	16,48	12,52	10,52	7,67
Perte de rendement (%)		20,28		32,54		23,98		27,1	

Tém. : Témoin ; Inf. : Infesté ; ¹ : Moyenne ; ² : Ecart-type ; ³ : Valeur minimal et maximal.

Chapitre III. Résultats et discussions

L'analyse de la variance pour l'effet de l'année, inoculum (*H.avenae*) et les variétés testées sur le nombre de tiges est présentée dans le tableau 26.

Tableau 26. L'analyse de la variance de l'effet de l'année, inoculum et les variétés en fonction de nombre des tiges.

Facteurs	SCe	DI	F valeur	Pr (>F)	
Année	32,400	1	31,8037	4,147e ⁻⁰⁷	***
Inoculum	4,512	1	4,4294	0,0392561	*
Variété	27,275	5	5,3546	0,0003573	***
Année : inoculum	0,000	1	0,0000	1,0000000	
Année : variété	0,400	1	0,3926	0,5331448	
Inoculum : variété	11,075	5	2,1742	0,0679148	.
Année : inoculum : variété	1,600	1	1,5706	0,2146861	
Résiduels	65,200	64			

SCe : Somme carrée des écarts ; DI : Degré de liberté ; F valeurs : Valeur de test de Fisher ; Pr : Probabilité ; Code significatif : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1.

Le tableau 26 présente les résultats de l'analyse de la variance qui révèlent une différence très hautement significative pour les deux facteurs (Année et variété) en fonction de nombre des tiges. Pour le facteur inoculum, il y a une différence significative sur le même variable (nombre des tiges). Concernant les interactions entre les trois facteurs (Année : inoculum et variété), l'analyse de la variance a montré une différence non significative.

III.5.1.1.2. Longueur des tiges (cm)

Pour le premier essai en 2016, les valeurs de longueur des tiges sont de l'ordre de 31,49 pour Chen's et 55,61cm pour Oued Zenati. En revanche, les valeurs de variétés infestées enregistrées sont de 26,74 cm pour Chen's et 41,41cm pour la variété (Bousselam). Pour l'année 2017, les valeurs moyennes minimales sont notées pour la variété Chen's par contre les valeurs maximale sont enregistrées pour Oued Zenati.

Chapitre III. Résultats et discussions

L'analyse de la variance pour l'effet de l'année (2015-16 et 2016/17), l'inoculum (*H.avenae*) et les variétés testées sur la longueur des tiges est présentée dans le tableau 27.

Tableau 27. L'analyse de la variance de l'effet de l'année/inoculum/variétés en fonction de longueur des tiges.

Facteur	SCe	DI	F valeur	Pr (>F)	
Année	492,7	1	7,7140	0,005752	**
Inoculum	2400,5	1	37,5861	2,198e ⁻⁰⁹	***
Variété	12997,9	4	50,8777	< 2,2e ⁻¹⁶	***
Année : inoculum	1513,3	1	23,6945	1,660e ⁻⁰⁶	***
Année : variété	468,1	2	3,6647	0,026525	*
Inoculum : variété	3,6647	4	3,6647	0,005989	**
Année : inoculum : variété	0,036785	2	0,036785	0,036785	*
Résiduels	24206,0	379			

La valeur la probabilité (Pr) est inférieure à celle du risque d'erreur ($\alpha = 0,05$) d'où on note une différence très hautement significative pour les facteurs inoculum et variété en fonction de la longueur des tiges et pour l'interaction entre l'année et l'inoculum. L'analyse de la variance présente une différence hautement significative pour le facteur (Année) sur le même paramètre, ainsi que pour l'interaction entre inoculum et variété. Par ailleurs, l'analyse de la variance révèle une différence significative au sein de l'interaction entre l'année et la variété et aussi pour l'interaction entre les trois facteurs (Année : inoculum et variété). Ceci nous permet de mentionner que l'effet de l'interaction est bien accentué.

III.5.1.1.3. Nombre d'épis

Le nombre d'épis le plus élevé correspond à la variété Vitron avec une moyenne de 6,6 épis par pots, par contre la plus faible valeur est observée chez la variété Oued Zenati 2,60 épis par pots.

III.5.1.1.4. Longueur des épis (cm)

La longueur moyenne des épis avec barbes pour les témoins est supérieure à celle des variétés infestées. Les valeurs minimales et maximales sont enregistrées chez Chen's et Oued Zenati.

L'analyse de la variance pour l'effet d'inoculum (*H.avenae*) et les variétés testées sur la longueur des épis est présentée dans le tableau 28.

Tableau 28. L'analyse de la variance de l'effet d'inoculum et variétés en fonction de longueur des épis.

Facteur	SCe	DI	F valeur	Pr (>F)	
Inoculum	197,14	1	98,8470	$< 2e^{-16}$	***
Variété	675,46	3	112,8958	$< 2e^{-16}$	***
Inoculum : variété	20,23	3	3,3806	0,01989	*
Résiduels	303,14	152			

Les valeurs la probabilité (Pr) sont inférieure à celle du risque d'erreur ($\alpha = 0,05$). L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative pour les deux facteurs (Inoculum et variété) sur la longueur des épis, aussi une différence significative est enregistrée pour l'interaction entre l'inoculum et les variétés.

III.5.1.1.5. Largeur des épis (cm)

La valeur de largeur de l'épi varie de 1,13 et 1,48 cm pour les témoins. Pour les variétés inoculées par les nématodes les valeurs sont entre 0,9 pour Vitron et 1,25cm pour Chen 's. En moyenne, les valeurs des témoins dépassent les valeurs des variétés infestées. L'analyse de la variance pour l'effet de l'inoculum (*H.avenae*) et les variétés testées en fonction de la largeur des épis est présentée dans le tableau 29.

Tableau 29. L'analyse de la variance de l'effet d'inoculum et variétés sur la largeur des épis.

Facteur	SCe	DI	F valeur	Pr (>F)	
Inoculum	1,6810	1	15,6535	0,0001164	***
Variété	2,8195	3	8,7517	2,165e ⁻⁰⁵	***
Inoculum : Variété	0,1125	3	0,3492	0,7897772	
Résiduels	16,3230	152			

L'analyse de la variance des variétés et de l'inoculum montre une différence très hautement significative pour ce paramètre.

Pour ces paramètres morphologiques, le test de Fisher met en évidence deux groupes homogènes le groupe **B** qui représente les plants témoins et le groupe **A** qui représente les plantes inoculées par *H.avenae* (Annexe 02).

III.5.1.2. Les composantes du rendement

III.5.1.2.1. Nombre des grains/épi

La valeur la plus élevée du nombre des grains par épi est de 33,1 grains/épi observée chez la variété Vitron et la plus réduite est de 20,92 chez la variété Oued Zenati. Tandis que, les variétés infestées présentent les plus faibles valeurs de 13,62 pour Oued Zenati, 18,68 pour Bousselam, 24,21 pour Chen's et 26,43 pour Vitron. Selon Benbelkacem et Kellou, 2000, durant les campagnes 1997-1998 et 1998-1999 à El-Khroub (hautes plaines intérieures algériennes), chez la variété Chen's, le nombre des grains par épi est de 34.

L'analyse de la variance pour l'effet de l'inoculum (*H.avenae*) et les variétés testées sur le nombre des grains par épi est présentée dans le tableau 30.

Tableau 30. L'analyse de la variance de l'effet d'inoculum et variétés sur le nombre des grains par épi.

Facteur	SCe	DI	F valeur	Pr (>F)	
Inoculum	2995,7	1	74,2537	2,450e ⁻¹⁵	***
Variété	3299,4	3	27,2611	9,596e ⁻¹⁵	***
Inoculum : Variété	238,5	3	1,9703	0,1198	
Résiduels	7786,3	193			

L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative pour les deux facteurs (Inoculum et variété) en fonction du nombre de grains par épi. Une différence non significative est enregistrée pour l'interaction entre l'inoculum et les variétés.

III.5.1.2.2. Poids de 1000 grains (PMG)

Le PMG est généralement lié aux effets de l'environnement au moment de la formation et du remplissage du grain (Benbelkacem et Kellou, 2000). D'autres facteurs sont aussi bien liés aux diminutions du PMG comme les nématodes (cas d'étude). La valeur la plus élevée pour ce caractère est obtenue pour la variété Chen's avec une moyenne de 86,99 (g) tandis que, la plus faible valeur caractérise la variété Bousselam avec 30,75gr. Selon Benbelkacem et Kellou, 2000 ont signalé que les sélections à base de Chen's' ont été les plus performantes pour ce paramètre (50,5 gr) dans des conditions naturelles (in vivo) avec un rendement de 45,78 q/ha. Selon Labdelli *et al.*, (2017), le PMG pour les plantes témoin de la variété Vitron est de supérieure à celle des plantes inoculés 39±4,24et 37±2,45(gr), respectivement. En Syrie, la réduction de PMG a atteint 56.6% sur la variété de blé dur (cv. Sham 3) dans des conditions de plein champ (Hassan *et al.*, 2010).

III.5.1.2.3. Effet des nématodes sur le rendement.

Le rendement moyen de l'ensemble des variétés est fortement diminué lorsque l'on passe d'une variété témoin à une autre inoculée par *H.avenae*. Par contre chez la variété Oued Zenati le rendement moyen est très faible et ceci est dû au faible nombre d'épis par pot qui est de 2,60 à 3,20 épis/pot.

Le rendement estimé le plus élevé est obtenu par la variété Chen's avec une moyenne de 58,67 qt/ha. Les autres variétés présentent un faible rendement, le plus faible est observé chez la variété Oued Zenati avec une moyenne de 7,67 qt/ha. Cela peut s'expliquer par la date de semis tardive (18 décembre). Oweis et Hachum, (2001) ont considéré que la date optimale de semis est autour de la mi-novembre (précoce), pour obtenir un haut rendement de blé, en conditions méditerranéennes. Selon Chennafi *et al.*, (2011), des pertes de rendement grain estimées à 39,5 et 68,7% sont observées pour des semis réalisés à la mi-décembre et à la mi-janvier.

Des recherches précédentes ont conclu que les pertes de rendement du blé causées par *H.avenae* sont principalement dues à la réduction du nombre d'épis, le nombre de grains/épi, le poids de 1000 grains (Namouchi-Kachouri *et al.*, 2008 ; Hadjhassani *et al.*, 2010 ; Ahmadi *et al.*, 2012 ; Baklawa *et al.*, 2015b). En Effet, les rendements céréaliers sont souvent en corrélation négative avec le nombre de nématodes à kystes des céréales dans le sol. Cependant, il est difficile de généraliser une relation précise entre le nombre de nématodes et la réduction du rendement, car les réponses du rendement sont fortement influencées par les interactions entre le climat, la variété, les pratiques de gestion, la distribution et la densité des nématodes dans la parcelle ainsi que les propriétés chimiques, biologiques et physiques du sol (Smiley *et al.*, 2017 ; Ali *et al.*, 2019).

III.5.1.2.4. Perte de rendement

Cette étude indique que la population Algérienne d'*H.avenae* est un sérieux bioagresseur du blé. La réduction du nombre de grains des variétés sous l'effet d'un inoculum de nombre de kyste (20 kyste) de *H.avenae* varie entre 20,28 pour Chen's et 32,54% pour Vitron.

Les nématodes à kystes des céréales sont des parasites des plantes qui limitent de façon significative la production céréalière mondiale. Les espèces pathogènes les plus fréquemment signalées sont *H.avenae*, *H. flipjevi* et *H. latipons* (Dababat *et al.*, 2014).

Des pertes de rendement du blé par *H.avenae* ont été signalées dans certaines régions du monde. En effet, en Turquie d'importantes pertes de rendement (42 % en moyenne) ont été signalées dans plusieurs zones de blé d'hiver (Nicol *et al.*, 2005, Dababat *et al.*, 2015). La diminution du rendement en grains des variétés égyptiennes causé par *H.avenae* se suite entre 16 et 40% (Baklawa *et al.*, 2015b). En Tunisie, Selon Namouchi-Kachouri *et al.* 2008, les pertes

de rendement dû au nématode à kyste des céréales varient de 26 à 96 %. Au Maroc, *H.avenae* a causé des pertes de rendement du blé d'environ 40 à 50% (Rammah 1994 in Mokrini *et al.*, 2017). *H.avenae* cause des dommages importants liés au rendement des blés en Arabie saoudite situés entre 40 et 90% (Al-Doss *et al.*, 2010). En Australie (23- 50%) (Riley *et al.*, 2009). Sur un champ de blé dans le nord-est de la Syrie, la réduction des composantes de rendement de blé dur a atteint un maxima de 56,6% de rendement en grains, avec une densité de population initiale de 40,4 œufs et juvéniles/g sol (Hassan *et al.*, 2010).

Il est à signaler que *H. filipjevi* peut réduire les rendements en blé jusqu'à 32 % (Yavuzaslanoglu *et al.*, 2016). Dans les zones de blé d'hiver en Turquie, *H. filipjevi* est une prédominante espèce et occasionne des pertes de rendement considérables (Imren *et al.*, 2013). En Iran, la perte de rendement céréalière causée par *H. filipjevi* dans le blé a atteint une réduction maximale de 47% (Hajihassani *et al.*, 2008 in Hajihassani *et al.*, 2010).

III.5.2. Test d'évaluation de sensibilité de blé dur vis-à-vis d'*H.avenae*.

Le tableau 31 présente le nombre initial des kystes (**pi**), nombre des kystes néoformés (**pf**), facteur de reproduction (**Rf**), Taux de reproduction (**Tr**) Degrée de sensibilité (**Dr.**).

Tableau 31. Densité de population finale (Pf) et facteur de reproduction (Fr) d'*H.avenae* sur quatre variété cultivé de blé dur.

Variété	Pi. (kyste /100g de sol)	Pf. (kyste /100g de sol)	Fr.	Tr. (%)	Dr. (Echelle de Valocka <i>et al.</i> , 1994))
Chen's	1,39±0.05	1,2±0,83	0,86	86,33	VII
Vitron		3±0,7	2,16	215,82	IX
Bousselam		2±0,7	1,44	143,88	IX
Oued Zenati		2.2±0,44	1,58	158,27	IX

Les quatre variétés de blé dur sont nettement plus sensibles aux attaques des nématodes (*H.avenae*). En effet, la variété Chen's est signalée comme fortement sensible (VII) au cours de la campagne (2017). Par ailleurs, les trois autres variétés (Vitron, Bousselam et Oued Zenati) sont très fortement sensibles (IX). A partir de ce principe, nous pouvons constater que la

Chapitre III. Résultats et discussions

population d'*H.avenae* d'Ain Defla a réagi différemment vis-à-vis des quatre variétés de blé dur testées. Nos résultats sont en accord avec Labdelli *et al.*, (2017) qui signalent que la variété Vitron est fortement à très fortement sensible aux attaques des nématodes (*H.avenae*). Selon Smaha, 1998 in Smaha, (2000), la variété Vitron représente un hôte intermédiaire.

Il est important de noter que pour les paramètres morphologiques et les composantes du rendement, les valeurs moyennes des témoins sont généralement plus élevées que les valeurs des plants infestés. Toutes les variétés se sont montrées hôtes favorables pour le développement du nématode.

La gestion des NKC's consiste à une approche intégrée qui inclut notamment l'entretien sur le terrain, la rotation des cultures, la lutte contre les mauvaises herbes, la résistance génétique, le moment des semis, la nutrition des cultures et les apports en eau (Smiley *et al.*, 2017).

Selon une étude récente de Smiley et Nicol, (2009), il est possible de réduire les dommages causés par *H.avenae* en réduisant la fréquence des cultures hôtes dans la rotation, telles que la rotation du blé, de l'orge et de l'avoine avec une culture non hôte ou une jachère. Cependant, ces options sont limitées pour le blé dans la plupart des régions de production céréalière d'Asie occidentale et d'Afrique du Nord en raison des systèmes de monoculture du blé et des limitations des précipitations, mais elles sont économiques pour les cultures irriguées et le blé pluvial dans les régions à fortes précipitations (Hajihassani *et al.*, 2010).

Actuellement, l'utilisation de variétés de blé résistantes ou tolérantes aux nématodes est considérée comme l'une des mesures de lutte les plus coûteuses, les moins polluantes et les plus faciles à adopter qui maintient les populations de nématodes en dessous du seuil économique de dommages (Dababat *et al.*, 2014). Elle est largement utilisée dans certains pays comme l'Australie, l'Angleterre, le Danemark, la Suède et la France (Nicol et Rivoal, 2009).

Il est rapporté que 9 gènes de résistance ont été transférés pour contrôler le nématode à kyste des céréales *H. aveane* dans le blé. Parmi les gènes de résistance, les gènes Cre1 et Cre3 sont présents sous forme de lignées bénéfiques à utiliser dans la sélection du blé (Imren *et al.*, 2013. Toktay *et al.*, 2013). Avec l'utilisation de cultivars résistants, le pathotype de virulence du NKC pourrait changer rapidement, et la pureté de la population pourrait également changer (Cui *et al.*, 2015). Des Agents biologiques, application d'engrais et de fertilisants et les amendements du sol peuvent compenser les effets de réduction des nématodes à kystes des céréales sur le rendement du blé (Nicol et Rivoal, 2009)

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

La présente étude nous renseigne sur les informations les plus récentes sur la présence et la répartition des nématodes à kystes des céréales dans les principales régions productrices de blé en Algérie. Les NKC ont été détectés dans presque toutes les parcelles de cultivées en blé. La plupart des localités étudiées sont situées dans le nord de l'Algérie. Les résultats ont montré que 60 des 110 sous-échantillons de sol, soit 54,55% sont infestés par *Heterodera* spp. Ils ont été détectés dans sept régions à savoir Bouira (Aïn Bessam et Bouira), Aïn Defla (deux site de Djendel et Aïn Defla), Médéa (Draa Semar, Sedraia), Bordj Bou Arreridj (deux site de Sidi Mbarek et Ras El Oued), Tissemsilt (Bni Maïda), Mostaganem (Debdaba) et Blida (Mouzaia). Ils n'ont pas été détectés dans neuf autres régions nous citons Ain Soltane, Bir Ould Khelifa, les deux sites de Medjana, Tissemsilt, Ammari, Dhaya, Zaouiet Kounta et Timimoun.

Le nombre moyen de kystes par 500 g de sol a été estimé à partir des échantillons totaux par parcelle. Le plus grand nombre est de $86,6 \pm 19,96$ enregistré à Draa Semar et $57,4 \pm 17,55$ à Djendel. De faibles niveaux d'infestation ($0,6 \pm 0,54$ et $1,6 \pm 1,67$) ont été enregistrés à Ras El Oued et Sidi Mbarek. Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) ont montré une différence significative entre les infestations par NKC (kystes / 500 g de sol) en fonction des régions avec une probabilité de $2e^{-16} < 0,005$. La même analyse montre le nombre d'œufs est les J₂s par kyste présente une différence très hautement significative avec une probabilité de $< 0,005$. Le nombre moyen des œufs et des J₂s par 100 grammes de sol dans les parcelles de blé était plus élevé dans la région de Draa Semar et Djendel site 2 par rapport aux autres parcelles. Les régions dans lesquels aucun nématode à kyste n'a été détecté ont généralement fait l'objet d'une rotation avec d'autres cultures ou la pratique de jachère. Les *Heterodera* spp. ne causent pas de symptômes précis sur les céréales lorsqu'elles sont présentes à de faibles densités de population dans le sol.

L'identification basée sur la biologie moléculaire en utilisant la région d'espacement transcrite interne (ITS) de l'unité de répétition de l'ADN ribosomal est un bon choix pour les études taxonomiques et phylogénétiques moléculaires. Dans la présente étude, une identification des nématodes à kystes isolés de neuf régions en Algérie, à savoir : Aïn Defla ; Djendel site 1 et 2 ; Bni Maïda ; Debdaba ; Sidi Embarek ; Mouzaia ; Bouira et Ain Bessam. Nous avons utilisé des amorces (TW81 et AB 28) amplifiant un produit d'ADNr comprenant la région ITS. L'amplification produit un fragment de 100 pb pour les neuf populations. Les

Conclusion générale

résultats de l'analyse des séquences du gène d'ADNr permettent de séparer les espèces d'*Heterodera* en trois groupes, à savoir : *Avenae*, *Goettingiana* et *Schachtii*. Les séquences obtenues à partir de ces populations étudiées ont été déposées dans la banque des gènes (NCBI). Les numéros (Espèce : numéro d'accès aux Genbank) sont : (*H.avenae* : MG800684, MG800685, MG800687 et MG800689 ; *H. hordecalis* : MH745136, MH745137 et MG800688 ; *H. schachtii* : MG800690 et *H. cruciferae* : MG800686 et MG693179). Nos résultats démontrent l'existence en Algérie quatre espèces de nématodes à kystes, *H.avenae* et *H. hordecalis*, *H. schachtii* et *H. cruciferae*.

Le plus important nématode attaquant les céréales est *H.avenae*. Dans cette étude, dans l'arbre phylogénétique, les espèces du groupe *avenae* sont clairement divisées en deux groupes. Les trois populations Algériennes sont groupées avec les populations d'origine de chine, d'Inde et d'Allemagne.

Les populations d'*H. hordecalis* sont isolées des régions semi-aride suivantes : Sidi Embarek, Debdaba et Bni Maïda. Ces populations appartenant au même groupe *avenae*. L'arbre phylogénétique, déduit de l'analyse de ces séquences géniques de la région ITS d'ADNr, inclue deux clades. Le premier clade regroupe des populations Algérienne avec d'autres d'origine d'Asie et d'Europe. Le deuxième clade consiste nos populations ainsi qu'une autre population Algérienne de la même espèce. C'est le premier signalement de cette espèce en Bordj Bou Arreridj, Mostaganem et Tissemsilt.

Heterodera cruciferae et *Heterodera schachtii* sont des nématodes à kyste, bien connus tant du point de vue de leur biologie que de leur gamme d'hôte : *H. schachtii* se développe sur une large gamme de plantes hôtes, betteraves, colza, crucifères. *H. cruciferae* est inféodé à cette dernière famille des plantes. Elles ont été signalées en Europe, en Russie, en Californie et en Australie du Sud. Il n'existe pas d'informations sur leur présence en Algérie.

La population d'*H. schachtii* a été isolée à Mouzaia dans la région de Blida. Les analyses phylogénétiques ITS-ADNr ont montré que les différents isolats de *H. schachtii* sont regroupés étroitement. Les espèces du groupe *schachtii* sont clairement divisées en quatre groupes dans l'arbre phylogénétique. Le premier clade (groupe I) est construit par la population Algérienne et sept autres populations ayant des origines d'Allemagne ; de Corée du Sud ; de la Belgique ; du Sud d'Afrique et des Pays-Bas. Il s'agit du premier signalement de *H. schachtii* en Algérie. Des prospections supplémentaires doivent donc être effectuées pour déterminer la répartition

Conclusion générale

de ce nématode dans les zones agricoles Algérienne. Des mesures de lutte devraient être prises pour arrêter la propagation de cette espèce de nématode.

La population d'*H. cruciferae* a été isolée à Bouira et Ain Bessam. La présence de cette espèce est signalée pour la première fois. Les résultats de l'analyse phylogénétique dans la présente étude montrent clairement que cette espèce appartient au groupe *goettingiana* d'*Heterodera*. Ils sont regroupés avec *H. carotae* d'Europe et présentent des similitudes importantes.

La mise en évidence pour la première fois d'*H. cruciferae* à Bouira mérite une attention particulière, vu qu'elle est considérée comme étant une espèce la plus redoutable sur les crucifères. L'identification précise et rapide du nématode à kyste de la betterave dans d'autres zones de culture de betteraves est très importante pour la planification des mesures phytosanitaires

Ces résultats constituent une première donnée pouvant contribuer à la connaissance de la distribution des espèces des nématodes à kystes en Algérie.

L'utilisation de cultivars résistants est une méthode efficace et respectueuse de l'environnement pour réduire les populations de nématodes à des niveaux inférieurs aux niveaux nuisibles. L'étude de l'inoculation d'*H. avenae* sur quatre variétés de blé dur, Chen's, Vitron, Bousselam et Oued Zenati est réalisée. L'étude de l'incidence des nématodes sur les paramètres morphologiques et les composantes du rendement révèle que l'inoculum cause des dégâts importants en diminuant le rendement de 20,28% pour la variété Chen's et à 32,54 % chez Vitron. L'analyse de la variance montre toujours qu'il y a une différence significative à très hautement significative. Le niveau de résistance a été évalué en fonction du nombre kystes extraits du sol infesté de chaque variété. Les résultats indiquent que les quatre variétés de blé ont été classées comme fortement sensible à très fortement sensible contre *H. avenae*.

L'utilisation de cultivars de céréales résistants est l'une des mesures les plus efficaces et les plus importantes pour lutter contre le NKC. Cependant, les différentes espèces de NKC existantes en Algérie présentent une pathogénicité et une virulence différente, ce qui complique leur gestion. Un diagnostic fiable des populations des NKC dans les parcelles est impératif pour recommander l'utilisation de cultivars résistants dans les régions agricoles infestées par des nématodes.

Conclusion générale

C'est grâce aux techniques de biologie moléculaire que nous avons pu identifier pour la première fois en Algérie la présence d'*H. hordecalis* à Tissemsilt et Mostaganem, d'*H. schachtii* à Mouzaia et d'*H. cruciferae* dans la région de Bouira. Tenant compte de la fiabilité de ces techniques, il serait intéressant de l'élargir à d'autres populations prélevées dans les différentes zones céréalières de notre pays. Des travaux approfondis sur ces espèces et méritent d'être approfondis.

En plus une comparaison combinée entre les variations morphologiques, morphométriques et génétiques est toujours l'approche la plus idéale pour identifier et séparer les espèces étroitement liées. Pour proposer et tester les hypothèses d'origine et de répartition des espèces du groupe *Heterodera*. Développement de tests PCR et qPCR spécifiques aux espèces pour l'identification et la détection quantitative des espèces mentionnées ci-dessus. Compte tenu des différences moléculaires mentionnées, nous suggérons de poursuivre les recherches sur les populations du genre *Heterodera* en Algérie

En Algérie, des prospections régionales et intensives sont nécessaires pour mieux comprendre la répartition géographique des nématodes à kystes. Elles permettent d'étudier également sa relation avec différents hôtes.

Des recherches complémentaires sont nécessaires pour identifier les pathotypes des populations de *H.avenae* des régions d'étude, ainsi que les sources de résistance appropriées à utiliser dans les programmes de sélection de céréales.

La recherche de cultivars de blé résistants ou tolérants est une grande nécessité, et c'est l'objectif principal pour la gestion des nématodes à kystes des céréales. Il serait souhaitable de réaliser d'autres essais sur la capacité de l'hôte (céréales) à l'égard des plusieurs populations Algérienne afin de mieux connaître la virulence de chaque population.

L'estimation précise de la densité est nécessaire pour fournir aux nématologistes et aux agriculteurs des informations fiables pour chaque espèce séparément. Ces données pourraient constituer des éléments de base, une grande collaboration entre les centres internationaux et les instituts nationaux de recherche permettront en fin de compte de mieux comprendre la maladie et la meilleure option pour mieux protéger les cultures contre ces bioagresseurs.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. ABELEDO, L.G., SAVIN, R., & SLAFER, G.A., (2008). Wheat productivity in the Mediterranean Ebro Valley: Analyzing the gap between attainable and potential yield with a simulation model. *Europ. J. Agronomy*, 28(1), 541-550.
2. ABIDOU, H., VALETTE, S., GAUTHIER, J.P., RIVOAL, R., EL-AHMED, A., & YAHYAOU, A., (2005). Molecular polymorphism and morphometrics of species of the *Heterodera avenae* group in Syria and Turkey. *J. Nematology*, 37(2), 146-154.
3. AHMADI, A.R., & TANHA MAAFI, Z., (2014). Incidence of Cereal Cyst Nematodes (*Heterodera avenae* type B and *H. filipjevi*) in southwestern Iran. *Journal of Crop Protection*, 3(1), 75–88.
4. AHMADI, A.R., TANHA MAAFI, Z., DABABAT, A.A., & NICOL, J.M., (2012). Impact of *Heterodera avenae* type B on four commercial wheat cultivars under field conditions in southwest of Iran, 31th international symposium of the European society of nematologists, Adana, Turkey, 22-27 September: 315p.
5. AKAR, T., CALISKAN, M., NICOL, J. M., URANBEY, S., SAHIN, E., YAZAR, S., WILLIAM, M., & BRAUN, H. J., (2009). Molecular characterization of Cereal Cyst Nematode diagnostic markers Cre1 and Cre3 in some winter wheat germplasm and their potential use against *Heterodera filipjevi*. *Field Crops Research*, 114(2), 320-323.
6. AL ABED, A., AL-MOMANY, A., & AL BANNA, L., (2004). *Heterodera latipons* on barley in Jordan. *Phytopathologia Mediterranea*, 43(3), 311–317.
7. AL-BANNA, L., AL ABDED, A., FATTASH, I., KHRFAN, W., LAFI, H., ABU SHWEIMEH, T., MAZRAWI, D., & ABU AL RAGHEB, I., (2015). Current status of cyst and root lesion nematodes attacking cereals in Jordan. In: Dababat, A.A., Muminjanov, H., and Smiley, R.W. (Eds.). *Nematodes of Small Grain Cereals: current status and research. Proceedings of the Fifth International Cereal Nematode Initiative Workshop, 12-15 September 2015, FAO: Ankara, Turkey.* 25-34.
8. AL-DOSS, A.A., AL-HAZMI, A.S., DAWABAH, A.A., ABDEL-MAWGOOD, A.A., AL-REHIAYANI, S.M., AL-OTAYK, S., MOUSTAFA, KH.A., & MOTAWEI, M.I., (2010). Impact of Cre and peroxidase genes of selected new wheat lines on cereal cyst nematode (*Heterodera avenae* woll) resistance. *Australian Journal of Crop Science*, 4(9), 737-743.

9. **ALEXANDRATOS, N., & BRUINSMA, J., (2012).** World Agriculture towards 2030/2050: The 2012 Revision; Division, Agricultural Development Economics Division, *Ed.; Food and Agriculture Organization of the United Nations: New York, NY, USA.* ESA Working Paper No. 12-03.
10. **ALI, M. A., SHAHZADI, M., ZAHOOR, A., DABABAT, A. A., TOKTAY, H., BAKHSH, A., BAKHSH, A., NAWAZ, M.A., & LI, H., (2019).** Resistance to Cereal Cyst Nematodes in Wheat and Barley: An Emphasis on Classical and Modern Approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(2), 432.
11. **ALLAL- BENFEKIH, L., (2006).** Recherches quantitatives sur le criquet migrateur *Locusta migratoria* (Orth. Oedipodinae) dans le Sahara algérien. Perspectives delutte biologique à l'aide de microorganismes pathogènes et de peptides synthétiques. Thès. Doc. Sci. Tech. Sant., Inst. Nati. Agro., El Harrach, 140p.
12. **AL-YAHYA, F.A., ALDERFASI, A.A., AL-HAZMI, A.S., IBRAHIM, A.A.M., & ABDUL-RAZIG A.T., (1998).** Effects of cereal cyst nematode on growth and physiological aspects of wheat and barley under field conditions. *Pak. J. Nematol.* 16, 55–62.
13. **AMIRI, S., SUBBOTIN, S.A., & MOENS, M., (2001).** An efficient method for identification of the *Heterodera schachtii* sensu stricto group using PCR with specific primers. *Nematologia Mediterranea*, 29(2), 241-246.
14. **AMIRI, S., SUBBOTIN, S.A., & MOENS, M., (2002).** Identification of the beet cyst nematode *Heterodera schachtii* by PCR. *European Journal of Plant Pathology*, 108, 497-506.
15. **AMIRI, S., SUBBOTIN, S.A., & MOENS, M., (2003).** Comparative morphometries and RAPD studies of *Heterodera schachtii* and *H. betae* populations. *Russian Journal of Nematology*, 11(2), 91–99.
16. **ANDERSEN, S., & ANDERSEN, K., (1982).** Suggestions for determination and terminology of pathotypes and genes for resistance in cyst-forming nematodes, especially *Heterodera avenae*. *EPPO Bulletin* 12, 379–386.
17. **ANDERSEN, S., (1974).** *Heterodera hordecalis* n. sp. (*Nematoda: Heteroderidae*) a cyst nematode of cereals and grasses in southern Sweden. *Nematologica* 20, 445-454.

18. **BAKLAWA, M., MASSOUD, S., HEUER, H., & NIERE, B., (2015A).** Characterisation of cereal cyst nematodes in Egypt based on morphometrics, RFLP and rDNA-ITS sequence analyses. *Nematology*, 17(1), 103-115.
19. **BAKLAWA, M., NIERE, B., & MASSOUD, S., (2015B).** Influence of population density of cereal cyst nematode populations (*Heterodera avenae* Wollenweber) on the nematode reproduction and damage to wheat cultivars under greenhouse conditions. In: Dababat, A.A., Muminjanov, H., and Smiley, R.W. (Eds.). *Nematodes of Small Grain Cereals: current status and research. Proceedings of the Fifth International Cereal Nematode Initiative Workshop, 12-15 September 2015, FAO: Ankara, Turkey.* 79-90.
20. **BALFOURIER, F., ROUSSEL, V., STRELCHENKO, P., EXBRAYAT-VINSON, F., SOURDILLE, P., BOUTET, G., KOENIG, J., RAVEL, C., MITROFANOVA, O., & BECKERT, M., (2007).** A worldwide bread wheat core collection arrayed in a 384-well plate. *Theoretical and Applied Genetics*, 114(7), 1265–1275.
21. **BARLOY, D., MARTIN, J., RIVOAL, R., & JAHIER, J., (1996).** Genetic and molecular characterization of lines of wheat resistant to cereal cyst nematode *Heterodera avenae*. *Nematropica*, 26, 240.
22. **BEKAL, S., GAUTHIER, J.P., & RIVOAL, R., (1997).** Genetic diversity among a complex of cereal cyst nematodes inferred from RFLP analysis of the ribosomal internal transcribed spacer region. *Genome*, 40(4), 479-486.
23. **BELLVERT, J., CROMBIE, K., & HORGAN, F.G., (2008).** Comparative Efficiency of the Fenwick Can and Schuiling Centrifuge in Extracting Nematode Cysts from Different Soil Types. *J. Nematology*, 40(1), 30-34.
24. **BENBELKACEM, A., & KELLOU, K., (2000).** Évaluation du progrès génétique chez quelques variétés de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) cultivées en Algérie. *Options Mediterr CIHEAM Ser A*, 40, 105–110.
25. **BENMOUNAH, H., & BRINIS, L., (2018).** Study of some morpho- physiological expressions in three durum wheat genotypes for drought tolerance selection. *Rev. Sci. Technol., Synthèse*, 37(0), 78-86.
26. **BOLOT, S., ABROUK, M., MASOOD-QURAIISHI, U., STEIN, N., MESSING, J., FEUILLET, C., & SALSE, J., (2009).** The ‘inner circle’ of the cereal genomes. *Current Opinion in Plant Biology*, 12, 119-125.

27. **BONJEAN, A., (sd).** Histoire de la culture des céréales et en particulier de celle du blé tendre (*Triticum aestivum L.*). *Agriculture et Biodiversité des Plantes*, (21), 29-37.
28. **BOUFENAR – ZEGHOUANE, F., & ZAGHOUANE O., (2006).** Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie (blé dur, blé tendre, orge et avoine), ITGC ICARDA. *1ère édition ITGC*. Algérie, 154 p.
29. **BOULELOUAH, N., (2002).** Analyse de la variabilité génotypique de l'absorption de l'azote chez le blé tendre. DEA.INA. *Paris Grignon*, 33p.
30. **BROWN, R., & KERRY, B. (1987).** *Principles and Practice of Nematode Control in Crops*. Academic Press.
31. **BROWN, R.H., (1984).** Ecology and control of cereal cyst nematode (*Heterodera avenae*) in Southern Australia. *J. Nematol.*16, 216–222.
32. **BUISSON, A., CHABERT, A., BRUN, F., BALLANGER, Y., RUCK, L., CHAMPEIL, A., & FOURNET, S., (2011).** *Meloidogyne artiellia* : un nématode phytoparasite associé à l'observation de dégâts en parcelles de colza en France : de nouvelles données sur sa répartition et sa biologie. AFPP, *neuvième conférence internationale sur les ravageurs en agriculture*, Montpellier, octobre.
33. **CASTILLO, P., & VOVLAS. N., (2007).** *Pratylenchus* (Nematoda: Pratylenchidae): Diagnosis, Biology, Pathogenicity and Management'. *Nematology Monographs and Perspectives*. (Brill Leiden-Boston, the Netherlands).
34. **CHABERT, A., BUISSON, A., BRUN, F., RUCK, L., CHAMPEIL, A., THIBORD, J. B., TAUPIN, P., & FOURNET, S., (2012).** Effets des systèmes de production sur les populations de nématodes nuisibles aux grandes cultures : recherche de méthodes pratiques de diagnostic et de gestion des risques. *Innovations Agronomiques*, 25, 205-217.
35. **CHEHAT, F., (2007).** Analyse macroéconomique des filières, la filière blés en Algérie. Projet PAMLIM « *Perspectives agricoles et agroalimentaires Maghrébines Libéralisation et Mondialisation* » Alger : 7-9 avril 2007.
36. **CHENNAFI, H., MAKHLOUF, M., & AYADI, A.L., (2011).** Réponse des variétés contrastées de blé dur (*Triticum durum Desf.*) à la date d'implantation sous semis direct en milieu semi-aride. In *Aces des quatrièmes rencontres méditerranéennes du semis direct*. *Revue INRAA*. Zaragoza, (96), 63-70.

37. **CHIZHOV, V.N., PRIDANNIKOV, M.V., NASONOVA, L.V., & SUBBOTIN, S.A., (2009).** *Heterodera cruciferae* Franklin, 1945, a parasite of *Brassica oleraceae* L. from floodland fields in the Moscow region, Russia. *Russian Journal of Nematology*, 17(2), 107-113.
38. **CLAPP, J.P., STOEL, C.D. VAN DER, & PUTTEN, W. H. VAN DER., (2000).** Rapid identification of cyst (*Heterodera* spp., *Globodera* spp.) and root-knot (*Meloidogyne* spp.) nematodes on the basis of ITS2 sequence variation detected by PCR-single-strand conformational polymorphism (PCR-SSCP) in cultures and field samples. *Molecular Ecology*, 9(9), 1223-1232.
39. **CNCCSP., (2009).** Bulletin des variétés “ Céréales ” Ed : Centre National de Contrôle et de Certification des semences et plants, 96 P.
40. **COOK, R., & EVANS, K., (1987).** Resistance and Tolerance. In: Brown, R.H. and Kerry, B.R. (Eds.). *Principles and Practice of Nematode Control in Crops*. Academic Press, Sydney, Australia. 179-231.
41. **COOK, R., & STARR, J.L., (2006).** Resistant cultivars. In: Perry, R.N. & Moens, M. (Eds.). *Plant Nematology*. CAB International, Wallingford, UK, 370–389.
42. **COTTEN, J., (1962).** The effect of temperature on hatching in the cereal root nematode. *Nature, Lond.* 195, 308p.
43. **CUI, J., HUAN, P., LIU, S., GUL, E.O., HUANG, W., IMREN, M., DABABAT A.A., & PENG, D. (2017).** Occurrence, identification and phylogenetic analyses of cereal cyst nematodes (*Heterodera* spp.) in Turkey. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(0), 1767-1776.
44. **CUI, L., SUN, L., GAO, X., SONG, W., WANG, X. M., LI, H. L., LIU, Z.Y., TANG, W.H., & LI, H. J., (2016).** The impact of resistant and susceptible wheat cultivars on the multiplication of *Heterodera filipjevi* and *H.avenae* in parasite-infested soil. *Plant Pathology*, 65(7), 1192-1199.
45. **DABABAT, A.A., IMREN, M., ERGINBAS-ORAKCI, G., ASHRAFI, S., YAVUZASLANOGLU, E., TOKTAY, H., PARIYAR, S.R., ELEKCIOGLU, H.I., MORGOUNOV, A., & MEKETE, T., (2015).** The importance and management strategies of cereal cyst nematodes, *Heterodera* spp., in Turkey. *Euphytica*, 202(2), 173-188.

46. **DABABAT, A.A., MOKRINI, F., & SMILEY, R.W., (2017).** Sixth International Cereal Nematodes Symposium 11-15 September 2017, Agadir, Morocco. 57p.
47. **DABABAT, A.A., MUMINJANOW, H., SMILEY, R.W., (2015).** Nematodes of small grain cereals: *current status and research Proceedings of the Fifth International Cereal Nematode Initiative Workshop, 12-15 September 2015, FAO: Ankara, Turkey.* 384p.
48. **DABABAT, ABDEL FATTAH A., ERGINBAŞ-ORAKCI, G., TOKTAY, H., IMREN, M., AKIN, B., BRAUN, H.J., DREISIGACKER, S., ELEKÇIOĞLU, I.H., & MORGOUNOV, A. (2014).** Resistance of winter wheat to *Heterodera filipjevi* in Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 38, 180-186.
49. **DAJOZ, R., (1971).** Précis d'écologie. Ed. Dunod, Paris, 343 p.
50. **DAJOZ, R., (1982).** Précis d'écologie, Ed. Gauthier- Villars, Paris, 503 p.
51. **DAJOZ, R., (2006).** Précis d'écologie. Ed. Dunod, Paris, VII, 631 p.
52. **DAOUD, Y., & HALITIM, A., (1994).** Irrigation et salinisation du Sahara algérien. *Sécheresse*, 5(3), 151-160.
53. **DAWABAH, A. A., AL-HAZMI, A. S., AL-REHIAYANI, S. M., ABDEL-MAWGOOD, A. L., MOTAWEI, M. I., AL-OTAYK, S., SADDER, M.T., ELGORBAN, A.M., MIGDADI, H.M., MOUSTAFA, K.A., & AL-DOSS, A.A., (2012).** Morphological and molecular characterization of cereal cyst nematode (*Heterodera avenae*) populations from arid environments. *Australian Journal of Crop Science*, 6(6), 970-979.
54. **DE LUCA, F., FANELLI, E., DI VITO, M., REYES, A., & DE GIORGI, C., (2004).** Comparisons of the sequences of the D3 expansion of the 26S ribosomal genes reveals different degrees of heterogeneity in different populations and species of *Pratylenchus* from the Mediterranean region. *European Journal of Plant Pathology*, 110, 949–957.
55. **DE LUCA, F., VOVLAS, N., LUCARELLI, G., TROCCOLI, A., RADICCI, V., & FANELLI, E., (2013).** *Heterodera elachista* the Japanese cyst nematode parasitizing corn in Northern Italy: integrative diagnosis and bionomics. *European Journal of Plant Pathology*, 136, 857–872.
56. **DIXON, J., BRAUN, J.H., & CROUCH, J.H., (2009).** Overview: Transitioning wheat research to serve the future needs of the developing countries. *In: Dixon, J., Braun, J.H., Kosina, P., and Crouch, J.H. (Eds). Wheat Facts and Futures 2009. Mexico, D.F., CIMMYT.* 1–25.

57. **DJEKOUN, A., YKHLEF, N., BOUZERZOUR, H., HAFSI, M., HAMADA, Y., & KAHALI, L., (2002).** Production du blé dur en zones semi-arides : identification des paramètres d'amélioration du rendement. *Act des 3ème Journées Scientifiques sur le blé dur. Constantine.*
58. **DJERMOUN, A., (2009).** La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. *Revue Nature et Technologie, (1), 45-53.*
59. **DJETTI, T, HAMMACHE, M., & DOUMANDJI, S., (2018).** Incidence and geographical distribution of the cereal cyst nematode (CCN, *Heterodera* spp.) in winter wheat fields in Algeria. *Arxius de Miscel·lània Zoològica, 16(1), 151-162.*
60. **DJETTI, T., BOULAOUAD, B.A., & HAMMACHE, M., (2014).** Etat d'infestation de la région de Tissemsilt par les nématodes à kyste du genre *Heterodera* et *Globodera*. In 'Séminaire National sur la Biodiversité faunistique Du 07 au 09 Décembre 2014.' *Ecole nati. Sup. Agro. El Harrach.*
61. **DJETTI, T., MEHALAINE, K., TOKTAY, H., & HAMMACHE, M., (2017).** Distribution et détermination des nématodes à kyste des céréales NKC (*Heterodera hordicalis*) dans l'ouest du pays (Tissemsilt). *Journées Nationales sur la Biodiversité animale, dégâts et lutte. Le 24 et 25 Mai 2017.*
62. **DREUX, P., (1980).** Précis d'écologie. éd. Presses universitaires de France (*Le Biologiste*). Paris, 231p.
63. **DUBCOVSKY, J., & DVORAK, J., (2007).** Genome plasticity a key factor in the success of polyploidy wheat under domestication. *Science, 316, 1862–1866.*
64. **DYER, A.T., AL-KHAFAJI, R., LANE, T., PAULITZ, T., HANDOO, Z.A., SKANTAR, A.M., & CHITWOOD, D.J., (2015).** First Report of the Cereal Cyst Nematode *Heterodera filipjevi* on Winter Wheat in Montana. *Plant Disease, 99(8), 1188-1188.*
65. **EDONGALI, E.A., & DABAJ, M., (1982).** Cauliflower (*Brassica oleracea* cv. capitata) cyst nematode in Lybia. (Abstr.). *The Libyan Journal of Agriculture 11, 205p.*
66. **EL FAKHRI, M., MAHBOUB, S., BENCHEKROUN, M., & NSARELLAH, N., (2010).** Effet du stress hydrique sur les caractéristiques d'enracinement du blé dur (*Triticum Durum*. Desf). *Nature et Technologie (3). 6-12.*
67. **ELEKÇIOĞLU, İ.H., NICOL, J.M., BOLAT, N., ŞAHIN, E., YORGANCILAR, A., BRAUN, H.J., YORGANCILAR, O., YILDIRIM, A.F., KILINÇ, A.T., TOKTAY,**

- H., & ÇALIŞKAN, M., (2009).** Longterm studies on the cereal cyst nematode *Heterodera filipjevi* in Turkey: international collaboration with regional implications. In: Riley, I.T., Nicol, J.M., and Dababat, A.A (Eds.). Cereal cyst nematodes: status, research and outlook. *Proceedings of the First Workshop of the International Cereal Cyst Nematode Initiative, 21-23 October 2009, Antalya, Turkey*. CIMMYT. 11-16.
68. **ESCOBAR-AVILA, I.M., LOPEZ-VILLEGAS, E.O., SUBBOTIN, S.A., & TOVAR-SOTO, A., (2018).** First Report of Carrot Cyst Nematode *Heterodera carotae* in Mexico: Morphological, Molecular Characterization, and Host Range Study. *J. Nematology*, 50(2), 229-242.
69. **EVANS, K., (1970).** Longevity of males and fertilisation of females of *Heterodera rostochiensis*. *Nematologica*, 16, 369–320.
70. **FAO., (2017).** GIEWS–Global Information and Early Warning System, Country Brief on Algeria. FAO, Rome, Italy.
71. **FAO., (2018).** Cereal Supply and Demand Brief.
72. **FARD, H.K., POURJAM, E., TNAHA MAAFI, Z., & SAFAIE, N., (2017).** Cereal Cyst Nematode, *Heterodera filipjevi* (Madzhidov, 1981) in Wheat Fields of Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran and Its Distribution Based on Interpolation by Geographic Information System. *J. Agr. Sci. Tech*, 19, 1185-1196.
73. **FEILLET, P., (2000).** Le grain de blé. *Composition et Utilisation* INRA. Paris : 312p.
74. **FELDMAN, M., (2001).** Origin of cultivated wheat. In: Bonjean, A.P., and Angus, W.J., (Eds.) *The world wheat book: a history of wheat breeding*. Paris, France: Lavoisier Publishing, 3–56.
75. **FELIACHI, K., (2002).** Programme de développement de la céréaliculture en Algérie. *ITGC*. El Harrach. Alger.
76. **FELSENSTEIN, J., (1985).** Confidence limits on phylogenies: An approach using the bootstrap. *Evolution*, 39, 783-791.
77. **FENWICK, D.W., (1940).** Methods for the recovery and counting of cysts of *Heterodera schachtii* from soil. *J. Helminthology*, 18(04), 155–172.
78. **FERRIS, V.R., FERRIS, J.M., & FAGHIHI, J., (1993).** Variation in spacer ribosomal DNA in some cyst-forming species of plant parasitic nematodes. *Fundam. Appl. Nematol.* 16, 177–184.

79. **FERRIS, V.R., FERRIS, J.M., FAGHIHI, J., & IREHOLM, A., (1994).** Comparisons of isolates of *Heterodera avenae* using 2-D PAG E protein patterns and ribosomal DNA. *J. Nematol.* 26, 144–151.
80. **FILLET., (2000).** La graine de blé composition et utilisation ; INRA paris, 82 Hachette livre 46p.
81. **FISCHER, R.A., BYERLEE, D., & EDMEADES, G.O., (2009).** Can technology deliver on the yield challenge to 2050. FAO expert meeting on how to feed the world in 2050.
82. **FRANKLIN, M.T., (1951).** The cyst forming species of *Heterodera*. Commonwealth Agricultural Bureaux, England, 147p.
83. **FRANKLIN, M.T., (1969).** *Heterodera latipons* n. sp., a cereal cyst nematode from the Mediterranean region. *Nematologica*, 15, 535-542.
84. **GATE, P., (1995).** Ecophysiologie du blé. Ed. ITCF. *Technique et Documentation. Lavoisier*, Paris, 419 p.
85. **GATE, P.H., GIBAN, M., BLONDLOT, A., BRAUN, P.H., COULEAUD, G., JOUY, L., LAURENT, F., LUTTON, A., & VIGNIER, L., (2003).** Stades du blé. Editions ITCF. 68 p.
86. **GRECO, N., FERRIS, H., & BRANDONISIO, A., (1991).** Effect of *Heterodera goettingiana* population densities on the yield of pea, broad bean and vetch. *Nematol.* 14, 619–624.
87. **GRECO, N., VOVLAS, N., TROCCOLI, A., & INSERRA, R.N., (2002).** The Mediterranean Cereal Cyst Nematode, *Heterodera latipons*: a Menace to Cool Season Cereals of the United States. *Nematology Circular.* 221 1-4.
88. **GRIFFIN, G.D., (1982).** Differences in the response of certain weed host populations to *Heterodera schachtii*. *J. Nematol.* 14, 174–182.
89. **GROSSE, E., & KOHLMÜLLER, S., (2004).** Untersuchungen zur Verbreitung von Getreide zysten nematoden nach einer neuen Differential methode. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land-und For stwirtschaft Berlin-Dahlem 396, 563–564.
90. **HADDADI, F., & MOKABLI, A., (2015).** Current occurrence of cereal cyst nematodes in some fields of northern Algeria. In: Dababat, A.A., Muminjanov, H., and Smiley, R.W. (Eds.). Nematodes of Small Grain Cereals: current status and research. *Proceedings of the*

Fifth International Cereal Nematode Initiative Workshop, 12-15 September 2015, FAO: Ankara, Turkey. 59-66.

91. **HADDADI, F., MOKABLI, A., & SMILEY, R.W., (2013).** Characterization of virulence reactions for *Heterodera avenae* populations from two localities in Algeria. *Phytoparasitica*, 41(4), 449-456.
92. **HAJIHASANI, A., TANHA MAAFI, Z., & HAJIHASANI, M., (2010).** The life cycle of *Heterodera filipjevi* in winter wheat under microplot conditions in Iran. *Nematologia Mediterranea*, 38(1), 53-57.
93. **HAJIHASANI, A., TANHA MAAFI, Z., NICOL, J.M., & SERAJI, A., (2010).** Relationships between population densities of the cereal cyst nematode, *Heterodera latipons* and yield losses of winter wheat in microplots. *Australasian Plant Pathology*, 39(6), 530-535.
94. **HALL, T.A., (1999).** Bio Edit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. *Nucl. Acids. Symp. Ser.* 41, 95-98.
95. **HAMMACHE, M., BLEILA, W., HAMMACHE, S. N., & MEHALAINE, K., (2017).** Effect of Direct and Conventional Seeding with Crop Rotations on *Heterodera avenae* Populations. In *Proceedings of the Sixth International Cereal Nematodes Symposium 11-15 September 2017 Agadir, Morocco* Agadir, Morocco: A. A. Dababat., F. Mokrini., R. W. Smiley. Agadir, Morocco. p. 57.
96. **HANDOO, Z. A., (2002).** A key and compendium to species of the *Heterodera avenae* group (*Nematoda: Heteroderidae*). *J. Nematology*, 34(3), 250-262.
97. **HASSAN, G., AL-ASSAS, K., & JAMAL, M., (2010).** Damage potential and reproduction of *Heterodera avenae* on wheat under Syrian field conditions. *Nematologia Mediterranea*, 38(1), 73-78.
98. **HENRY, Y., & DE BUYSER, J., (2001).** L'origine des blés. In : *Belin. Pour la science.* (Eds.) *De la graine à la plante.* Ed. Belin, Paris : 69-72.
99. **HEUN, M., SCHAFFER-PREGL, R., KLAWAN, D., CASTAGNA, R., ACCERBI, M., BORGHI, B., & SALAMINI F., (1997).** Site of einkorn wheat domestication identified by DNA finger printing. *Science*, 278, 1312–1314.

100. **HIRSCHMANN, H., PASCHALAKI-KOURTZI, N., & TRIANTAPHYLLOU, A.C., (1966).** A survey of plant parasitic nematodes in Greece. *Annales de l'Institut Phytopathologique Benaki*. 7, 144–156.
101. **HOLTERMAN, M., WURFF, A. VAN DER., ELSSEN, S. VAN DEN., MEGEN, H. VAN., BONGERS, T., HOLOVACHOV, O., BAKKER, J., & HELDER, J., (2006).** Phylum-Wide Analysis of SSU rDNA Reveals Deep Phylogenetic Relationships among Nematodes and Accelerated Evolution toward Crown Clades. *Molecular Biology and Evolution*, 23(9), 1792-1800.
102. **IMREN, M., & ELEKÇIOĞLU, İ. H., (2014).** Effect of cereal cyst nematode *Heterodera avenae* (Tylenchida: Heteroderidae) on yield of some spring wheat varieties in Adana Province, Turkey. *Turkish Journal of Agriculture And Forestry*, 38(1), 820-823.
103. **IMREN, M., TOKTAY, H., BOZBUĞA, R., ERGİNBAŞ ORAKÇI, G., DABABAT, A.A., & HALİL ELEKÇİOĞLU, İ., (2013).** Identification of genetic resistance to cereal cyst nematodes; *Heterodera avenae* (Wollenweber, 1924), *Heterodera filipjevi* (Madzhidov, 1981) *Stelter* and *Heterodera latipons* (Franklin, 1969) in some international bread wheat germplasms, 3(37), 277-282.
104. **IMREN, M., WAEYENBERGE, L., VIAENE, N., ELEKÇİOĞLU, İ. H., & DABABAT, A.A., (2015).** Morphological and molecular identification of cereal cyst nematodes from the eastern Mediterranean region of Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39(1), 91–98.
105. **JABBARI, H., & NIKNAM, G., (2008).** SEM Observations and Morphometrics of the Cabbage Cyst Nematode, *Heterodera cruciferae* Franklin, 1945, Collected Where *Brassica spp.* are Grown in Tabriz, Iran. *Turkish Journal of Zoology*, 32(1), 253-262.
106. **JAHIER, J., ABELARD, P., TANGUY, A.M., DEDRYVER, F., RIVOAL, R., KHATKAR, S., & BARIANA, H.S., (2001).** The *Aegilops ventricosa* segment on chromosome 2AS of the wheat cultivar « VPM1 » carries the cereal cyst nematode resistance gene Cre5. *Plant Breeding*, 120(2), 125-128.
107. **JAYAPRAKASH, A., & RAO, Y.S., (1983).** Hatching behaviour of the cyst-nematode *Heterodera oryzoicola*. *Indian Journal of Nematology*, 13, 117–118.

108. **KABIR, M.F., SHIN, J.H., KWEON, O.G., & LEE, D.W., (2015).** Temperature and root extract effect on hatching and development of *Heterodera schachtii*. *Korean J. Soil Zool.* 19, 22-27.
109. **KAKAIRE, S., GROVE, I.G., & HAYDOCK, P.J., (2015).** The number of generations of *Heterodera schachtii* completed on oilseed rape (*Brassica napus* L.) during the UK growing season. *Nematology* 17, 557–565.
110. **KHAN, M.R., SHIT, S., PAL, A.K., & BISWAS, B., (2005).** Integrated approach for management of foliar nematode, *Aphelenchoides besseyi* infecting tuberose in West Bengal, India. *Int. J. Nematol.* 15, 30–34.
111. **KIRJANOVA, E.S., & KRALL, E.L., (1971).** *Parasitic nematodes of plants and their control*. Vol. II. Leningrad, USSR, Nauka, 522p.
112. **KUHN, J., (1874).** Über das vorkommen von Rübennematoden an den Wurzeln der Halmfrüchte. *Zeitschrift für wissenschaftliche Landwirtschaft und Archiv des Königlichen Preussischen Landes-Ökonomie-Kollegiums* 3, 47–50.
113. **KUMAR, S., STECHER, G., & TAMURA, K., (2016).** MEGA7: Molecular Evolutionary Genetics Analysis version 7.0 for bigger data sets. *Molecular Biology and Evolution*, 33, 1870-18740.
114. **KUMARI, S., (2017).** Morphological and molecular characterizations of cereal cyst nematode *Heterodera avenae* Wollenweber, 1924 from the Czech Republic. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(3), 532-539.
115. **LABDELLI, F., ADAMOU-DJERBAOUI, M., OULBACHIR, K., & ALLEL, A., (2017).** Behavior of cereal's varieties in the presence of *Heterodera avenae* woll (Heteroderidae, Tylenchida) cyst nematode in Tiaret Area (Algeria). *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9(3), 1378-1394.
116. **LADJAL, I., & AZOUZI, B., (2014).** Etude du comportement variétal de cinq Variétés de blé dur sous l'effet des deux doses de semis différentes en environnement semi-Aride De Djelfa. *Sciences and Technologie*, (40). 25-31
117. **LARID, M., (1992).** Le rôle du machinisme agricole dans l'érosion des sols : cas du plateau de Mostaganem (Algérie). *Thès. Doc. Univ. de Strasbourg.*, 109p.
118. **LARKIN, M.A., BLACKSHIELDS, G., BROWN, N.P., CHENNA, R., MCGETTIGAN, P.A., MCWILLIAM, H., VALENTIN, F., WALLACE, I.M., WILM, A., LOPEZ, R.,**

- THOMPSON, J.D., GIBSON, T.J., & HIGGINS, D.G., (2007).** Clustal W and Clustal X Version 2.0. *Bio inform.* 23, 2947- 2948.
119. **LEE, J.K., PARK, B.Y., & CHO, M.R., (2013).** Sugar beet cyst nematode occurrence and prevention of diffusion. In: *2013 Annual meeting on the Korean Society of Pesticide Science*. 60p.
120. **LIU, Y., HUANG, W., LONG, H., PENG, H., HE, W., & PENG, D., (2014).** Molecular Characterization and Functional Analysis of a New Acid Phosphatase Gene (Ha-acp1) from *Heterodera avenae*. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(6), 1303-1310.
121. **LOMBARDO, S., HANDOO, Z., RAPISARDA, C., & COLOMBO, A., (2009).** Occurrence and distribution of cyst nematodes infecting cereals in Sicily, Italy. In: Riley, I.T., Nicol, J.M., and Dababat, A.A (Eds.). *Cereal cyst nematodes: status, research and outlook. Proceedings of the First Workshop of the International Cereal Cyst Nematode Initiative, 21-23 October 2009, Antalya, Turkey*. CIMMYT. 61-65.
122. **LONG, H., PENG, D., HUANG, W., PENG, H., & WANG, G., (2013).** Molecular characterization and functional analysis of two new β -1,4-endoglucanase genes (Ha-eng-2 , Ha-eng-3) from the cereal cyst nematode *Heterodera avenae*. *Plant Pathology*, 62(4), 953-960.
123. **M.A.D.R.P.** Ministère de l’Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche- 2016. Série B.
124. **MADANI, M., KYNDT, T., COLPAERT, N., SUBBOTIN, S.A., GHEYSEN, G., & MOENS, M., (2007).** Polymorphism among sugar beet cyst nematode *Heterodera schachtii* populations as inferred from AFLP and ITS-rDNA gene analyses. *Russian Journal of Nematology*, 15(2), 117-128.
125. **MADANI, M., PALOMARES RIUS, J.E., VOVLAS, N., CASTILLO, P., & TENUTA, M., (2017).** Integrative diagnosis of carrot cyst nematode (*Heterodera carotae*) using morphology and several molecular markers for an accurate identification. *European Journal of Plant Pathology*.
126. **MADANI, M., SUBBOTIN, S.A., & MOENS, M., (2005).** Quantitative detection of the potato cyst nematode, *Globodera pallida*, and the beet cyst nematode, *Heterodera schachtii*, using Real-Time PCR with SYBR green I dye. *Molecular and Cellular Probes*, 19(2), 81-86.

127. **MADANI, M., VOVLAS, N., CASTILLO, P., SUBBOTIN, S.A., & MOENS, M., (2004).** Molecular Characterization of Cyst Nematode Species (*Heterodera* spp.) from the Mediterranean Basin using RFLPs and Sequences of ITS-rDNA. *Journal of Phytopathology*, 152(4), 229-234.
128. **MADZHIDOV, A.R., (1981).** *Bidera filipjevi* n. sp. (Heteroderina: Tylenchida) in Tajikistan. 83,40-44.
129. **MC DONALD, A.H., & NICOL, J.M., (2005).** Nematode parasites of cereals. In: Luc, M., Sikora, R. A., and Bridge, J. (Eds). *Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture*. CABI Publishing, 2nd Edition, Wallingford, 131–191
130. **MEAGHER, J.W., (1977).** World dissemination of the cereal-cyst nematode (*Heterodera avenae*) and its potential as a pathogen of wheat. *J. Nematology*. 9, 9-15.
131. **MENNAN, S., & HANDOO, Z. A., (2006).** Research note - Nota Investigativa, 36(1), 99-104.
132. **MILLER, L.I., (1986).** Economic importance of cyst nematodes in North America. In: *Lamberti, F. & Taylor, C.E. (Eds). Cyst nematodes*. New York, NY, USA, Plenum Press, 373-385.
133. **MITCHINSON, S., GOWEN, S.R., & KERRY, B.R., (2009).** Increased biodiversity in cereal cyst nematode infestations is not a threat to intensive cereal production in southern Britain. In: Riley, I.T., Nicol, J.M., and Dababat, A.A (Eds.). *Cereal cyst nematodes: status, research and outlook. Proceedings of the First Workshop of the International Cereal Cyst Nematode Initiative, 21-23 October 2009, Antalya, Turkey*. CIMMYT. 215–220.
134. **MOENS, M., PERRY, R.N., & JONES, J.T., (2018).** Cyst nematodes - life cycle and economic importance. In: Perry, R.N., Moens, M., and Jones, J.T. (Eds.). *Cyst Nematodes* Wallingford CABI. 1-26.
135. **MOKABLI, A., VALETTE, S., GAUTHIER, J.P., & RIVOAL, R., (2002).** Variation in virulence of cereal cyst nematode populations from North Africa and Asia. *Nematology*, 4(4), 521–525.
136. **MOKRINI, F., VIAENE, N., WAEYENBERGE, L., AFECHTAL, M., ESSARIOUI, A., & MOENS, M., (2017).** The importance, biology and management of cereal cyst nematodes (*Heterodera* spp.). *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.*, 5(4), 414-421.

137. **MOKRINI, F., VIAENE, N., WAEYENBERGE, L., DABABAT, A. A., & MOENS, M., (2018).** Investigation of resistance to *Pratylenchus penetrans* and *P. thornei* in international wheat lines and its durability when inoculated together with the cereal cyst nematode *Heterodera avenae*, using qPCR for nematode quantification. *European Journal of Plant Pathology*, 151(4), 875-889.
138. **MOKRINI, F., VIAENE, N., WAEYENBERGE, L., DABABAT, A.A., & MOENS, M., (2017).** Characterization of cereal cyst nematodes (*Heterodera* spp.) in Morocco based on morphology, morphometrics and rDNA-ITS sequence analysis. *Journal of Plant Protection Research*, 57(3), 219-227.
139. **MOKRINI, F., WAEYENBERGE, L., VIAENE, N., & MOENS, M., (2012).** First Report of the Cereal Cyst Nematode *Heterodera latipons* on Wheat in Morocco. *Plant Disease*, 96(5), 774-774.
140. **MOMOTA, Y., (1979).** The first report of the nematode *Heterodera latipons* Franklin, 1969 in Japan. *Japanese Journal of Nematology*, 9, 73-74.
141. **MOUMENET., (1985).** Bilan et synthèse des études agro - pédologiques réalisées en Algérie, Mém. Ing, Institut National d'Agronomie El- Harrach Alger. 75p.
142. **MULVEY, R. H., & GOLDEN, A. M., (1983).** An illustrated key to the cyst-forming genera and species of Heteroderidae in the western hemisphere with species morphometrics and distribution. *J. Nematology*, 15, 1-59.
143. **MWAMULA, A.O., KO, H.R., KIM, Y., KIM, Y.H., LEE, J.K., & LEE, D.W., (2018).** Morphological and Molecular Characterization of *Heterodera schachtii* and the Newly Recorded Cyst Nematode, *H. trifolii* Associated with Chinese cabbage in Korea, 4(34), 297-307.
144. **NAMOUCHE-KACHOURI, N., & B'CHIR, M. M., (2005).** Identification morphométrique et moléculaire de quelques populations tunisiennes d'*Heterodera avenae* associées aux céréales. *Nematol. Medit*, 33, 3-9.
145. **NAMOUCHE-KACHOURI, N., B'CHIR, M. M., & HAJJI, A., (2008).** Effects of Initial Populations of *Heterodera avenae* on Wheat and Barley Yield Components and on Final Nematode Populations under Tunisian Field Conditions. *Tunisian Journal of Plant Protection*, 3(1), 19-26.

146. **NAMOUCHE-KACHOURI, N., B'CHIR, M.M., & HAJJI, A., (2009).** Global importance of the main nematodes associated with cereals in Tunisia. In: 'Cereal cyst nematodes: status, research and outlook'. In: Riley, I.T., Nicol, J.M., and Dababat, A.A (Eds.). Cereal cyst nematodes: status, research and outlook. *Proceedings of the First Workshop of the International Cereal Cyst Nematode Initiative, 21-23 October 2009, Antalya, Turkey.* CIMMYT. 41-44.
147. **NASRAOUI, B., (2000).** Principales maladies fongiques des céréales en Tunisie. *Centre de publication universitaire, Tunis, Tunisie.*
148. **NESBITT, M., (1998).** Where was einkorn wheat domesticated?. *Trends in Plant Science* 3, 1360–1385.
149. **NICOL JM, BOLAT N, BAGCI A, TRETOWAN RA, WILLIAM, M., HEKIMHN, H., YIRDIRIM, A.F., SAHIN, E., ELCKCIOGLU, H., TOKTAY, H., TUNALI, B., HEDE, A., TANER, S., BRAUN, H.J., PAYNE, T., VAN GINKEL, M., KESER, M., ARISOY, Z., YORGANCILAR, A., TULEK, A., ERDURMUS, D., BUYUK, O., & AYDOGDU, M., (2006).** CIMMYT and Turkey international shuttle breeding program to develop wheat lines with Fusarium crown rot and other soil borne pathogen resistances. In: 'The Global Fusarium initiative for International Collaboration.' (Eds.T Ban, JM Lewis, EE Phipps) (CIMMYT, El Batán, Mexico). 110-116.
150. **NICOL, J. M., & RIVOAL, R., (2007).** Global knowledge and its application for the integrated control and management of nematodes on wheat. In: Ciancio, A., and Mukerji, K. G., (eds) *Integrated Management and Biocontrol of Vegetable and Grain Crops Nematodes.* Dordrecht, 2(0), 251-294.
151. **NICOL, J. M., & RIVOAL, R., (2009).** Integrated management and biocontrol of vegetable and grain crops nematodes. In: Ciancio A, Mukerji KG (eds) *Global knowledge and its application for the integrated control and management of nematodes on wheat.* Springer, New York, 243–287.
152. **NICOL, J. M., RIVOAL, R., BOLAT, N., AKTAS, H., BRAUN, H. J., MERGOUM, M., YILDRIM, A. F., BAGCI, A., ELECKCIOGLU, I. H., & YAHYAOU, A., (2002).** The frequency and diversity of the cyst and lesion nematode on wheat in the Turkish Central Anatolian Plateau. *Nematology*, 4(2), 272p.

153. **NICOL, J. M., TURNER, S. J., COYNE, D. L., NIJS, L., HOCKLAND, S., & TAHNA MAAFI, Z., (2011).** Current nematode threats to world agriculture. In: Jones, J., Gheysen, G., and Fenoll, C. (Eds). *Genomics and molecular genetics of plant nematode interactions*. Springer, New York, 557p.
154. **NICOL, J., RIVOAL, R., TAYLOR, S., & ZAHARIEVA, M., (2003).** Global importance of cyst (*Heterodera* spp.) and lesion nematodes (*Pratylenchus* spp.) on cereals: Distribution, yield loss, use of host resistance and integration of molecular tools. *Nematology Monographs and Perspectives*, 2, 1-19.
155. **NICOL, J.M., (2002).** Important nematode pests. In: Bread wheat: Improvement and production (Curtis B.C., Rajaram S. and Gomez Macpherson H. Eds). *Plant Production and Protection series* FAO, (30), 345-366.
156. **NICOL, J.M., BOLAT, N., SAHIN, E., TULEK, A., YILDRIRIM, A.F., YORGANCILAR, A., KAPLAN, A., & BRAUN, H.J., (2005).** The cereal cyst nematode is causing economic damage on rainfed wheat production systems of Turkey. *American Phytopathological Society, Pacific Division Annual Meeting*. Portland, Oregon.
157. **NICOL, J.M., RIVOAL, R., & TAYLOR, S., (2003).** Global importance of cyst (*Heterodera* spp.) and lesion nematodes (*Pratylenchus* spp.) on cereals: distribution, yield loss, use of host resistance and integration of molecular tools. *Nematology Monographs & Perspectives*, 2, 1-19.
158. **NIKNAM, G., CHENARI, A., & ZAHEDI, H., (2004A).** A preliminary evaluation of population density of cabbage cyst nematode, *Heterodera cruciferae* in a cabbage field in Tabriz vicinity. In: *Proceeding of the 16th Iranian Plant Protection Congress*, 2, 270p.
159. **NIKNAM, G., CHENARI, A., & ZAHEDI, H., (2004B).** Occurrence of cabbage cyst nematode *Heterodera cruciferae* on cabbage in vegetable fields of Tabriz. In: *Proceeding of the 16th Iranian Plant Protection Congress*, 2, 270p.
160. **OGBONNAYA, F.C., SEAH, S., DELIBES, A., JAHIER, J., LOPEZ-BRANA, I., EASTWOOD, R.F., & LAGUDAH, E.S., (2001).** Molecular-genetic characterisation of a new nematode resistance gene in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 102 (4), 623-629.
161. **OWEIS, T., & HACHUM, A., (2001).** Reducing peak supplemental irrigation demand by extending sowing dates. *Agricultural Water Management*, 50(2), 109–123.

162. **PARIYAR, S. R., DABABAT, A. A., SIDDIQUE, S., ERGINBAS-ORAKCI, G., ELASHRY, A., MORGOUNOV, A., & GRUNDLER, F. M., (2016).** Identification and characterisation of resistance to the cereal cyst nematode *Heterodera filipjevi* in winter wheat. *Nematology*, 18(4), 377–402.
163. **PENG, D.L., NICOL, J.M., LI, H.M., HOU, S.Y., LI, H.X., CHEN, S.L., MA, P., LI, H.L., & RILEY, I.T., (2009).** Current knowledge of cereal cyst nematode (*Heterodera avenae*) on wheat in China. In: In: Riley, I.T., Nicol, J.M., and Dababat, A.A (Eds.). Cereal cyst nematodes: status, research and outlook. *Proceedings of the First Workshop of the International Cereal Cyst Nematode Initiative, 21-23 October 2009, Antalya, Turkey*. CIMMYT. 29–34
164. **PENG, D.L., ZHANG, D., NICOL, J.M., CHEN, S.L., WAEYENBERGE, L., MOENS, M., LI, H.L., TANG, W.H., & RILEY, I.T., (2007).** Occurrence, distribution and research situation of cereal cyst nematode in China. In: *Proceedings of the XVI International Plant Protection Congress 15–18 October 2007*. Glasgow, Scotland, UK. British Crop Protection Council, Alton, Hampshire, UK. 350–351.
165. **PERRY, R N., & MOENS, M., (2013).** *Plant nematology* (Second edition). Boston, MA: CABI. 542p.
166. **PERRY, R.N., WRIGHT, D. & CHITWOOD, D., (2013).** Reproduction, physiology and biochemistry. In: Perry, R.N. and Moens, M. (Eds) *Plant Nematology*, 2nd edn. CAB International, Wallingford, UK, 219–245.
167. **PHILIS, I., (1988).** Occurrence of *Heterodera latipons* on barley in Cyprus. *Nematologia Mediterranea*, 16, 223.
168. **PRIDANNIKOV, M., SUPRUNOVA, T., SHUMILINA, D., LIMANTSEVA, L., SKANTAR, A., HANDOO, Z., & CHITWOOD, D., (2015).** Morphological and molecular observations on the cereal cyst nematode *Heterodera filipjevi* from the Volga and South Ural regions of Russia. *Russian Journal of Nematology*, 23(2), 113–124.
169. **PYLYPENKO, L. A., & SIGAREVA, D. D., (2003).** The distribution of the sugar beet nematode (*Heterodera qschachtii*) in the Ukraine. *Russian Journal of Nematology*, 11(1), 53–56.
170. **RAMADE, F., (1984).** Eléments d'écologie – *Ecologie fondamentale*. Ed. Mc Graw–Hill, Paris, 397 p.

171. **RAMADE, F., (2009)**. Eléments d'écologie : *Ecologie fondamentale*. Ed. Dunod, Paris, 689 p.
172. **RAMMAH, A., (1994)**. Cereal cyst nematode (*Heterodera avenae*) in Morocco. Fifth Arab Congress of Plant Protection, Fez, Morocco, 27th Novembre- 2ⁿ December. 199p.
173. **RAO, U., SHARMA, A., TYAGI, N., BANAKAR, P., & KUMAR, M., (2013)**. Characterization of genetic homogeneity of an Indian population of cereal cyst nematode, *Heterodera avenae* using sequencing and PCR-RFLP of ribosomal DNA. *Bioinformation*, 9(2), 67-71.
174. **RIGHI, K., MOKABLI, A., & ASSIA, F., (2014)**. Dispersion du nématode à kyste des céréales (*Heterodera avenae*) dans quelques régions céréalières de l'ouest Algériens. *Séminaire National sur la biodiversité faunistique* du 07 au 09 décembre 2014. ENSA. El Harrach.
175. **RIGHI, K., MOKABLI, A., RIGHI, F., & GHOURARI, H., (2011)**. Actes du Séminaire International sur la protection des Végétaux. Etude de l'état d'infestation des parcelles céréalières par le nématode à kyste (*Heterodera sp*) dans les Wilayas de Mascara et Relizane et identification des espèces en cause. *Séminaire internati. Protec. vég., 18-21 avril 2011, Dép. Zool. agri. for. Ecole nati. Sup. Agro. El Harrach*, p.384.
176. **RILEY, I. T., & QI, R. D., (2015)**. Annotated bibliography of cereal cyst nematodes (*Heterodera avenae* and *H. filipjevi*) in China, 1991 to 2014. *Australas. Nematol. Newsl*, 26(1), 1-46.
177. **RILEY, I. T., NICOL, J. M., & DABABAT, A. A., (2009)**. Cereal cyst nematodes: status, research and outlook. In *Proceedings of the First Workshop of the International Cereal Cyst Nematode Initiative, 21-23 October 2009, Antalya, Turkey* CIMMYT: Ankara, Turkey. 245p.
178. **RIVOAL, R. & NICOL, J. M., (2009)**. Past research on the cereal cyst nematode complex and future needs. In: Riley, I.T., Nicol, J.M., and Dababat, A.A (Eds.). Cereal cyst nematodes: status, research and outlook. *Proceedings of the First Workshop of the International Cereal Cyst Nematode Initiative, 21-23 October 2009, Antalya, Turkey*. CIMMYT. 3-9.

179. **RIVOAL, R., & BOURDON, P., (2005).** Sélection du ray-grass d'Italie pour la résistance au nématode à kyste des céréales (*Heterodera avenae*). *Fourrages (Versailles)*, (184), 557-566.
180. **RIVOAL, R., COOK, R., (1993).** Nematode pests of cereals. In: Evans, K., Trudgill, D.L. et Webster, J.M. (Eds). *Plant parasitic nematodes in temperate agriculture*. Wallingford, UK, CABI Publishing, 259–303.
181. **RIVOAL, R., PERSON, F., CAUBEL, G., SCOTTO LA MASSESE, C., (1978).** Méthodologie d'évaluation de la résistance des céréales au développement des nématodes *Ditylenchus dipsaci*, *Heterodera avenae* et *Pratylenchus* sp. *Ann. Amélior. Pl*, 28, 71-394.
182. **RIVOAL, R., VALETTE, S., BEKAL, S., GAUTHIER, J. P., & YAHYAOU, A., (2003).** Genetic and phenotypic diversity in the graminaceous cyst nematode complex, inferred from PCR-RFLP of ribosomal DNA and morphometric analysis. *European Journal of Plant Pathology*, 109(3), 227-241.
183. **ROMERO, M.D., ANDRES, M.F., LOPEZ-BRANA, I., & DELIBES, A., (1996).** A pathogenic and biochemical comparison of two Spanish populations of the cereal cyst nematode. *Nematologia mediterranea*, 24(2), 235–244.
184. **ROMERO, M.D., ANDRES, M.F., LOPEZ-BRANA, I., & DELIBES, A., (1996).** A pathogenic and biochemical comparison of two Spanish populations of the cereal cyst nematode. *Nematologia mediterranea*, 24(2), 235–244.
185. **SABO, A., VOLVAS, N., & FERRIS, V. R., (2001).** Phylogenetic Relationships Based on Ribosomal DNA Data for Four Species of Cyst Nematodes from Italy and One from Syria. *J. Nematology*, 33(4), 183-190.
186. **SACI, A., OUIDEN, S., BEN HARZALLAH, F., AKBACHE, M., DJAAFRI, A., AL MAGHILI, E., TITTAFI, M., & KADDOUR, N., (2013).** ADRAR Trésor Du Désert...Oasis De La Magie. Ed. Agence Artis. Audio. vis. Communic. Alger, 100p.
187. **SAHIN, E., NICOL, J.M., ELEKCIOGLU, H., & RIVOAL, R., (2009).** Hatching of *Heterodera filipjevi* in controlled and natural temperature conditions in Turkey. *Nematology*, 12, 277–287.
188. **SAITOU, N., & NEI, M., (1987).** The neighbor-joining method: A new method for reconstructing phylogenetic trees. *Molecular Biology and Evolution*, 4, 406-425.

189. SASANELLI, N., VOVLAS, N., TRISCIUZZI, N., CANTALAPIEDRA-NAVARRETE, C., PALOMARES-RIUS, J. E., & CASTILLO, P., (2013). Pathogenicity and Host-Parasite Relationships of *Heterodera cruciferae* in Cabbage. *Plant Disease*, 97(3), 333-338.
190. SCHOLZ, U., (2001). Biology, pathogenicity and control of the cereal cyst nematode *Heterodera latipons* Franklin, on wheat and barley under semiarid conditions, and interactions with common root rot *Bipolaris sorokiniana* Shoemaker [teleomorph: *Cochliobolus sativus* (Ito et Kurib.) Drechs. Ex Dastur.]. PhD Thesis, Bonn University, Germany.
191. SEKIMOTO, S., UEHARA, T., & MIZUKUBO, T., (2017). Characterisation of populations of *Heterodera trifolii* Goffart, 1932 (*Nematoda: Heteroderidae*) in Japan and their phylogenetic relationships with closely related species. *Nematology*, 19(5), 543-558.
192. SHEWRY, P. R., (2009). Wheat. *Journal of Experimental Botany*, 60(6), 1537-1553.
193. SHUBANE, A. R., (2018). A morphological and molecular study of *Heterodera carotae* Jones, 1950 in South Africa (*Master Degree*). North-West University. 98P.
194. SIDDIQUI, M.R., (2000). Tylenchida. *Parasites of Plants and Insects*. 2nd Edition. CAB International, Wallingford, UK. 833.
195. SIKORA, A., (1987). Plant parasitic nematodes of wheat and barley in temperate semi-arid regions a comparative analysis. In: *nematodes parasitic to cereal and legumes in temperate semi-aride regions*. ICARDA, Aleppo, 46-68.
196. SINGH, A.K., SHARMA, A. K., & SHORAN, J., (2009). *Heterodera avenae* and its management in India. In: Riley, I.T., Nicol, J.M., and Dababat, A.A (Eds.). Cereal cyst nematodes: status, research and outlook. *Proceedings of the First Workshop of the International Cereal Cyst Nematode Initiative, 21-23 October 2009, Antalya, Turkey*. CIMMYT. 17-22.
197. SKANTAR, A. M., HANDOO, Z. A., ZANAKIS, G. N., & TZORTZAKAKIS, E. A., (2012). Molecular and morphological characterization of the corn cyst nematode, *Heterodera zaeae*, from Greece. *J. Nematology*, 44(1), 58-66.
198. SMAHA, D., (2014). Etude de l'influence du bersim sur le développement d'une population Algérienne d'*Heterodera avenae* woll., 1924. Présenté à AFPP – Dixième Conférence Internationale sur les Ravageurs en Agriculture Montpellier – 22 et 23 Octobre 2014, Montpellier.

199. **SMAHA, D., MOKRINI, F., IMREN, M., MOKABLI, A., & DABABAT, A. A., (2018A).** First Report of *Heterodera hordecalis*, a Cereal Cyst Nematode, on Wheat in Algeria. *Plant Disease*, 102(10), 2042.
200. **SMAHA, D., MOKRINI, F., IMREN, M., MOKABLI, A., & DABABAT, A.A., (2018B).** First Report of the Cereal Cyst Nematode (*Heterodera filipjevi*) on Wheat in Algeria. *Plant Disease*, 102(9), 1860-1860.
201. **SMILEY, R.W., & MARSHALL, J.M., (2016).** Detection of Dual *Heterodera avenae* Resistance plus Tolerance Traits in Spring Wheat. *Plant Disease*, 100(8), 1677-1685.
202. **SMILEY, R.W., & NICOL, J.M., (2009).** Nematodes which challenge global wheat production. In: Carver, B.F. (Ed.). Wheat: Science and Trade. (Wiley-Blackwell: Ames, Iowa, USA. 171-18.
203. **SMILEY, R.W., & YAN, G., (2010).** Cereal cyst nematodes: biology and management in Pacific Northwest wheat, barley, and oat crops. Oregon State University. University of Idaho. Washington State University. (620). 9p.
204. **SMILEY, R.W., & YAN, G., (2015).** Discovery of *Heterodera filipjevi* in Washington and Comparative Virulence with *H.avenae* on Wheat. *Plant Disease*, 99(3), 376–386.
205. **SMILEY, R.W., (2009).** Occurrence, distribution and control of *Heterodera avenae* and *H. filipjevi* in the western USA. In: Riley, I.T., Nicol, J.M., and Dababat, A.A (Eds.). Cereal cyst nematodes: status, research and outlook. *Proceedings of the First Workshop of the International Cereal Cyst Nematode Initiative, 21-23 October 2009, Antalya, Turkey.* CIMMYT. 35-40.
206. **SMILEY, R.W., (2011).** Extracting cysts of *Heterodera avenae* using a trudgillfluidizing column constructed with modern materials. ‘Society of Nematologists 2011 Meeting: *J. Nematology*, 43(3–4), 223–297.
207. **SMILEY, R.W., DABABAT, A. A., IQBAL, S., JONES, M.G. K., TANHA MAAFI, Z., PENG, D., SUBBOTIN S.A., & WAEYENBERGE, L., (2017).** Cereal Cyst Nematodes: A Complex and Destructive Group of *Heterodera* Species. *Plant Disease*, 101(10), 1692-1720.
208. **SMILEY, R.W., INGHAM, R.E., UDDIN, W., & COOK, G.H., (1994).** Crop sequences for managing cereal cyst nematode and fungal populations of winter wheat. *Plant Disease*, 78, 1142-1149.

209. SMILEY, R.W., MARSHALL, J.M., GOURLIE, J.A., PAULITZ, T.C., KANDEL, S.L., & PUMPHREY, M.O., GARLAND-CAMPBELL, K., YAN, G.P., ANDERSON, M.D., FLOWERS, M.D., & JACKSON, C.A., (2013). Spring wheat tolerance and resistance to *Heterodera avenae* in the Pacific Northwest. *Plant Disease*. 97(5), 590-600.
210. SMILEY, R.W., SHEEDY, J., PINKERTON, J., EASLEY, S., THOMPSON, A., YAN, G.P., (2007). Cereal cyst nematode: distribution, yield reduction, and crop management strategies. *Oregon State University Agricultural Experiment Station Special Report*, 1074, 15–29.
211. SMILEY, R.W., WHITTAKER, R. G., GOURLIE, J. A., EASLEY, S. A., & INGHAM, R. E., (2005). Plant-Parasitic Nematodes Associated with Reduced Wheat Yield in Oregon: *Heterodera avenae*. *J. Nematology*, 37(3), 297-307.
212. STIRLING, G., NICOL, J., & REAY, F., (1999). Advisory services for nematode pests: operational guidelines. *Rural Industries Research and Development Corporation*: Canberra, Australia.
213. STOYANOV, D., (1982). Cyst-forming nematodes on cereals in Bulgaria. *EPPO Bulletin*, 12, 341–344.
214. SUBBOTIN, S. A., WAEYENBERGE, L., & MOENS, M., (2000). Identification of cyst forming nematodes of the genus *Heterodera* (Nematoda: Heteroderidae) based on the ribosomal DNA-RFLP. *Nematology*, 2(2), 153–164.
215. SUBBOTIN, S. A., WAEYENBERGE, L., MOLOKANOVA, I. A., & MOENS, M., (1999). Identification of *Heterodera avenae* group species by morphometric and rDNA-RFLPs. *Nematology*, 1(2), 195–207.
216. SUBBOTIN, S.A., MUNDO-OCAMPO, M., & BALDWIN, J.G., (2010A). Systematics of cyst nematodes (Nematoda: Heteroderinae), *Nematology monographs and perspectives*: Hunt, D. J., and Perry, R.N (Eds.). Part A. Brill, Leiden, The Netherlands, 351 p.
217. SUBBOTIN, S.A., MUNDO-OCAMPO, M., & BALDWIN, J.G., (2010B). Systematics of cyst nematodes (Nematoda: Heteroderinae), *Nematology monographs and perspectives*: Hunt, D. J., and Perry, R.N., (Eds.) Part B. Brill, Leiden, The Netherlands, 512 p.
218. SUBBOTIN, S.A., RUMPENHORST, H.J., & STURHAN, D., (1996). Morphological and electrophoretic studies on populations of the *Heterodera avenae* complex from the former USSR. *Russian Journal of Nematology*, 4(1), 29–38.

219. **SUBBOTIN, S.A., STURHAN, D., RUMPENHORST, H. J., & MOENS, M., (2003).** Molecular and morphological characterisation of the *Heterodera avenae* species complex (*Tylenchida: Heteroderidae*). *Nematology*, 5(4), 515–538.
220. **SUBBOTIN, S.A., STURHAN, D., WAEYENBERGE, L., & MOENS, M., (1997).** *Heterodera riparia* sp. n. (*Tylenchida: Heteroderidae*) from common nettle, *Urtica dioica*. L. and rDNA-RFLP separation of species from the *H. humuli* group. *Russian Journal of Nematology*. 5, 143-157.
221. **SUBBOTIN, S.A., TOUMI, F., ELEKÇIOĞLU, I.H., WAEYENBERGE, L., & TANHA MAAFI, Z., (2018).** DNA barcoding, phylogeny and phylogeography of the cyst nematode species of the Avenae group from the genus *Heterodera* (*Tylenchida: Heteroderidae*). *Nematology*, 0, 1-32.
222. **SUBBOTIN, S.A., VIERSTRAETE, A., DE LEY, P., ROWE, J., WAEYENBERGE, L., MOENS, M., & VANFLETEREN, J. R., (2001).** Phylogenetic Relationships within the Cyst-Forming Nematodes (*Nematoda, Heteroderidae*) Based on Analysis of Sequences from the ITS Regions of Ribosomal DNA. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 21(1), 1-16.
223. **TAMURA, K., & NEI, M., (1993).** Estimation of the number of nucleotide substitutions in the control region of mitochondrial DNA in humans and chimpanzees. *Molecular Biology and Evolution*, 10, 512-526.
224. **TAMURA, K., NEI, M., & KUMAR, S., (2004).** Prospects for inferring very large phylogenies by using the neighbor-joining method. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* 101, 11030-11035.
225. **TANHA MAAF, Z., STURHAN, D., KHEIRI, A., & GERAERT, E., (2007).** Species of the *Heterodera avenae* group (*Nematoda: Heteroderidae*) from Iran. *Russian Journal of Nematology*, 15(1), 49-58.
226. **TANHA MAAFI, T., SUBBOTIN, S.A., & MOENS, M., (2003).** Molecular identification of cyst-forming nematodes (*Heteroderidae*) from Iran and a phylogeny based on ITS-rDNA sequences. *Nematology*, 5(1), 99–111.
227. **TANHA MAAFI, Z, NICOL, J.M., KAZEMI, H., EBRAHIMI, N., GITTY, M., GHALANDAR, M., MOHAMMADI, M., & KHOSHKHABAR, Z.H., (2009).** Cereal cyst nematodes, root rot pathogens and root lesion nematodes affecting cereal production

- in Iran. In: Riley, I.T., Nicol, J.M., and Dababat, A.A (Eds.). Cereal cyst nematodes: status, research and outlook. *Proceedings of the First Workshop of the International Cereal Cyst Nematode Initiative, 21-23 October 2009, Antalya, Turkey*. CIMMYT. 51-55.
228. **TANHA MAAFI, Z., AHMADI, A., AZADBAKHT, N., GITTI, M., HOSSEININEJAD, S.A., AFSHAR, F.J., KARIMIPOUR, H., MINBASHI, M., PAKNIYAT, M., YAZDI, A.A., RIVANDI, A., SAFAEE, D., AGHAJANI, M.A., NICOL, J.M., DABABAT, A.A., (2015).** Cereal soil borne nematodes status in Iran. In: Dababat, A.A., Muminjanov, H., and Smiley, R.W. (Eds.). *Nematodes of Small Grain Cereals: current status and research. Proceedings of the Fifth International Cereal Nematode Initiative Workshop, 12-15 September 2015, FAO: Ankara, Turkey*. 91-100.
229. **THOMPSON, J.D., HIGGINS, D.G., & GIBSON, T.J., (1994).** CLUSTALW: Improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, positions-specific gap penalties and weight matrix choice. *Nucleic Acids Res.* 22: 4673–4680.
230. **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 their geographical areas. *European Journal of Plant Pathology*, 146(4), 861-880.
231. **TOKTAY, H., ERG, G., DABABAT, A., & BOZBU, R., (2013).** Identification of genetic resistance to cereal cyst nematodes; *Heterodera avenae* (Wollenweber, 1924), *Heterodera filipjevi* (Madzhidov, 1981) Stelter and *Heterodera latipons* (Franklin, 1969) in some international bread wheat germplasms. *Türk. Entomol. Derg.* 37(3), 277-282.
232. **TOKTAY, H., İMREN, M., ÖCAL, A., WAEYENBERGE, L., VIAENE, N., & DABABAT, A., (2015).** Incidence of cereal cyst nematodes in the East Anatolia region in Turkey. *Russian Journal of Nematology*, 23(1), 29-40.
233. **TOUMI, F., (2017).** Cereal cyst nematodes: molecular identification and quantification, and screening for resistance in wheat (PhD thesis). Ghent University, Ghent, Belgium. 228p.
234. **TOUMI, F., HASSAN, G., WAEYENBERGE, L., VIAENE, N., DABABAT, A. A., NICOL, J., OGBONNAYA, F., AL-ASSAS, K., AL-FADIL, T. A., & MOENS, M.,**

- (2015). Distribution of the cereal cyst nematodes (*Heterodera* spp.) in wheat and barley fields in north-eastern regions of Syria. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 122(5-6), 255–263.
235. **TOUMI, F., WAEYENBERGE, L., VIAENE, N., DABABAT, A., NICOL, J. M., OGBONNAYA, F., & MOENS, M., (2013A)**. Development of a species-specific PCR to detect the cereal cyst nematode, *Heterodera latipons*. *Nematology*, 15(6), 709–717.
236. **TOUMI, F., WAEYENBERGE, L., VIAENE, N., DABABAT, A., NICOL, J. M., OGBONNAYA, F., & MOENS, M., (2013B)**. Development of two species-specific primer sets to detect the cereal cyst nematodes *Heterodera avenae* and *Heterodera filipjevi*. *European Journal of Plant Pathology*, 136(3), 613-624.
237. **TURNER, S.J., & EVANS, K., (1998)**. The origins, global distribution and biology of potato cyst nematodes (*Globodera rostochiensis* (Woll.) and *Globodera pallida* (Stone)). In: Marks, R. & Brodie, B. (Eds) Potato Cyst Nematodes. *Biology, Distribution and Control*. CAB International, Wallingford, UK, 7–26.
238. **TURNER, S.J., & ROWE, J.A., (2006)**. Cyst nematodes. In: Maule, A.G., & Marks, N.J. (Eds). *Parasitic Flatworms: Molecular Biology, Biochemistry, Immunology and Physiology*. (CAB International, Wallingford, England). 93-122.
239. **TURNER, S.T., & SUBBOTIN, S.A., (2013)**. Cyst Nematodes. In: Perry, R.N. & Moens, M. (Eds). *Plant Nematology 2nd edition*. CAB International, Wallingford, UK, 109–143.
240. **VALOCKA, B., SABOVA, M., & LSKOVA, M., (1994)**. Response of some winter wheat and spring barley cultivars to *Heterodera avenae* pathotype Ha 12. *Rev. Helminthologica*, 31,155-158.
241. **VAN BEZOOIJEN, J., (2006)**. *Methods and Techniques for Nematology*. Wageningen, Netherlands. 112p.
242. **VANHOLME, B., DE MEUTTER, J., TYTGAT, T., VAN MONTAGU, M., COOMANS, A., & GHEYSEN, G., (2004)**. Secretions of plant-parasitic nematodes: a molecular update. *Gene*, 332, 13–27.
243. **VANSTONE, V.A., HOLLAWAY, G.J., & STIRLING, G.R., (2008)**. Managing nematode pests in the southern and western regions of the Australian cereal industry: continuing progress in a challenging environment. *Australas. Plant Pathol.* 37, 220-234.

244. **WAEYENBERGE, L., & VIAENE, N., (2015).** Molecular identification of cereal cyst nematodes: status, prospects and recommendations. In: Dababat, A.A., Muminjanov, H., and Smiley, R.W. (Eds.). *Nematodes of Small Grain Cereals: current status and research. Proceedings of the Fifth International Cereal Nematode Initiative Workshop, 12-15 September 2015, FAO: Ankara, Turkey.* 329-334.
245. **WAEYENBERGE, L., VIAENE, N., SUBBOTIN, S. A., & MOENS, M., (2009).** Molecular identification of *Heterodera* spp., an overview of fifteen years of research. In *Proceedings of the first workshop of the international cereal cyst nematode initiative, 21* (IT Riley, JM Nicol, AA Dababat). CIMMYT: Ankara, Turkey. 109–114.
246. **WANG, J., REPLOGLE, A., HUSSEY, R., BAUM, T., WANG, X., DAVIS, E. L., & MITCHUM, M. G., (2011).** Identification of potential host plant mimics of CLAVATA3/ESR (CLE)-like peptides from the plant-parasitic nematode *Heterodera schachtii*: Beet cyst nematode CLEs. *Molecular Plant Pathology*, 12(2), 177-186.
247. **WHITEHEAD, A.G., (1998).** Plant nematode control. (CAB International: Wallingford, UK).
248. **YAN, G., SMILEY, R. W., OKUBARA, P. A., & SKANTAR, A. M., (2013).** Species-specific PCR assays for differentiating *Heterodera filipjevi* and *H.avenae*. *Plant Disease*, 97(12), 1611–1619.
249. **YAVUZASLANOGLU, E., ELEKCIOGLU, I. H., NICOL, J. M., & SHEEDY, J. G., (2016).** Resistance of Iranian landrace wheat to the cereal cyst nematode, *Heterodera filipjevi*. *Australasian Plant Pathology*, 45(4), 411-414.
250. **YE, W., (2012).** Development of PrimeTime-Real-Time PCR for species identification of soybean cyst nematode (*Heterodera glycines* Ichinohe, 1952) in North Carolina. *J. Nematology*, 44(3), 284-290.
251. **ZADOKS. J., CHANG. T., & KONZAK, C., (1974).** Decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research*, 14(6), 415–421.
252. **ZHENG, J., LI, X., ZHANG, Y., & SUBBOTIN, S. A., (2008).** Molecular characterisation of the cyst-forming nematode, *Heterodera sinensis* Chen & Zheng, 1994 from China. *Russian Journal of Nematology*, 16(2), 159-162.
253. **ZHENG, J., SUBBOTIN, S. A., WAEYENBERGE, L., & MOENS, M., (2000).** Molecular characterisation of Chinese *Heterodera glycines* and *H.avenae* populations based on

RFLPs and sequences of rDNA-ITS regions. *Russian Journal of Nematology*, 8(2), 109-114.

254. **ZHENG, M., LONG, H., ZHAO, Y., LI, L., XU, D., ZHANG, H., LIU, F., DENG, G., PANG, Z., & YU, M., (2015).** RNA-Seq based identification of candidate parasitism genes of cereal cyst nematode (*Heterodera avenae*) during incompatible infection to *Aegilops variabilis*. *PLOS ONE*, 10(10), 1-23.

255. <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC>

256. <https://fr.tutiempo.net/climat/algerie.html>

Annexes

Annexes

Annexe : 01 Nouveau procédé d'extraction d'ADN

Source.

Holterman, M., van der Wurff, A., van den Elsen, S., van Megen, H., Bongers, T., Holovachov, O., Bakker J and helder, J., (2006). DNA extraction method developed at the university of wageningen, the nederlands and published in phylum-Wide Analysis of SSU rDNA reveals Deep phylogenetic relationships among nematodes and accelerated evolution towards crown clades, *Mol bio, evol.* 23(9):1792-1800.

But

Libérer l'ADN (non purifié) de l'individu à 5 nématodes afin que l'ADN devienne disponible pour des méthodes moléculaires ultérieures comme la PCR.

Préparation de la solution

1) Solution mère de chlorure de sodium 1M (poids 58,44mol.)

-dissoudre 5,84gr de NaCl dans 100ml de dH₂O

Autoclave -Autoclave

-garder sur 4°C pour une durée indéterminée

2)1M tris HCL, pH 8 solution mère (tampon tris : 121, 14 Poids mol.)

-Dissoudre 12.11gr de tampon Tis dans 100ml de H₂O

-Utiliser HCL pour ajuster le PH à 8.0

Autoclave -Autoclave

-garder sur 4°C pour une durée indéterminée

3) 20 mg/ml de solution mère de protéinase K

La poudre lyophilisée Prot K est stable pendant 2 ans seulement !

-dissoudre la prot k dans une certaine quantité d'eau stérile (MilliQ) pour obtenir une concentration de 20 mg/ml

Aliquoter le prot K dissous dans des tubes Eppendorf de -1,5 à 2 ml.

A conserver sur -20°C pendant 1 an au maximum.

4) Tampon de lyse moins (WLB-)

-Mélanger 2ml 1M NaCl +2ml 1M Tris-HCL, PH 8+5.5 ml d'eau stérile (MilliQ) dans un tube plastique stérile de 10-15ml.

-garder sur 4°C pour une durée indéterminée

5) Tampon de lyse Plus (WLB+)

Annexes

!ne le faites que lorsque vous aurez bientôt besoin du tampon pour l'extraction de l'ADN

Le bêta-mercaptoéthanol est toxique ; ne l'ouvrir que dans une hotte fumante avec une protection individuelle appropriée !

Mix 950ul WLB- +10ul beta- mercaptoethanol (le produit pur) +40ul 20mg/ml prot k dans un tube Eppendorf de 1.5-2 ml

-Maintenir à -20°C pour max. 1 mois

Procédure d'extraction de l'ADN

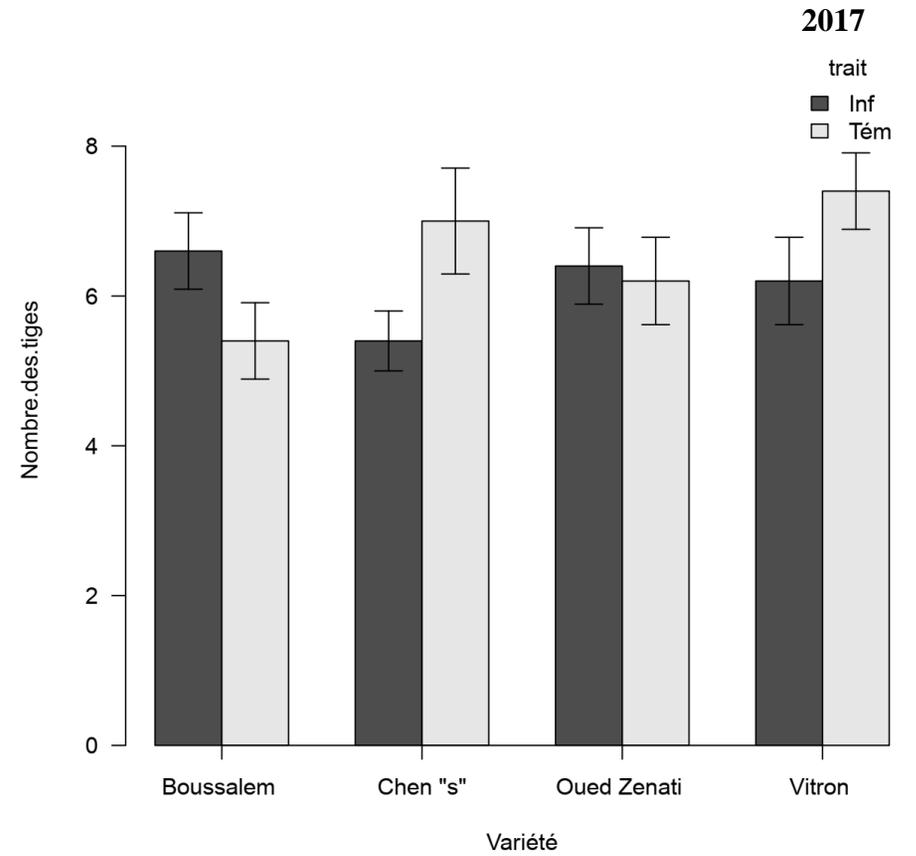
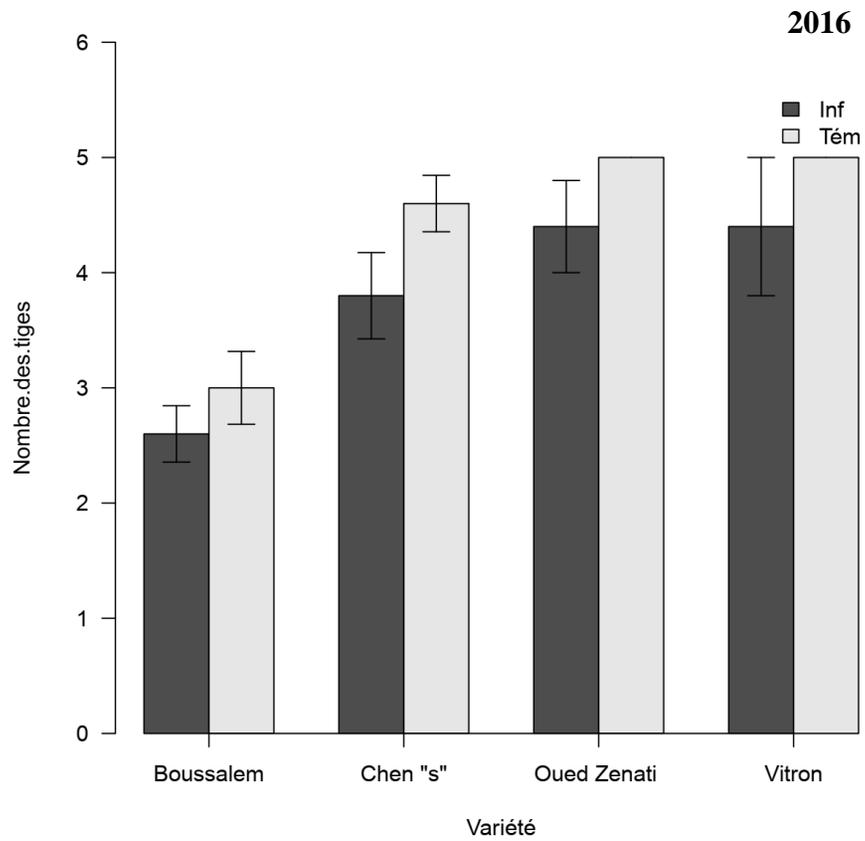
-Ajouter un seul à 5 nematodes à 25ul d'eau stérile (MilliQ) dans un tube PCR.

-Ajouter 25 ul WLB+ aux échantillons

-Incuber pendant 1h30 à 65 °C suivi de 5min, à 99 °C dans un thermocycleur (mieux : thermomixeur).

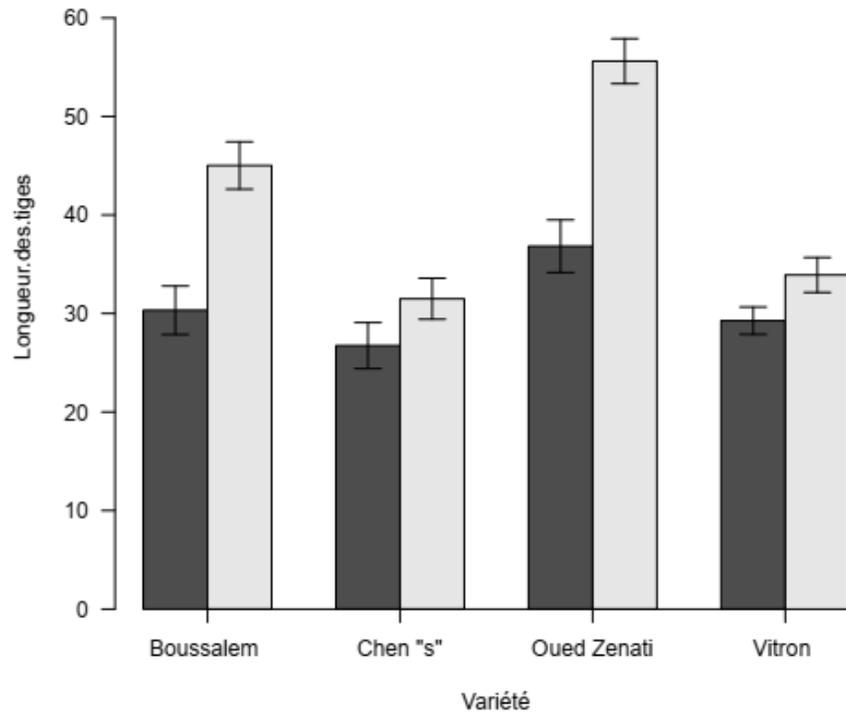
-Utiliser un extrait d'ADN 1ul non dilué ou à partir d'une dilution 1:200 pour la PCR.

Annexe 02 : Test de Fisher pour l'Effet d'*H.avenae* sur les paramètres morphologiques de blé dur.

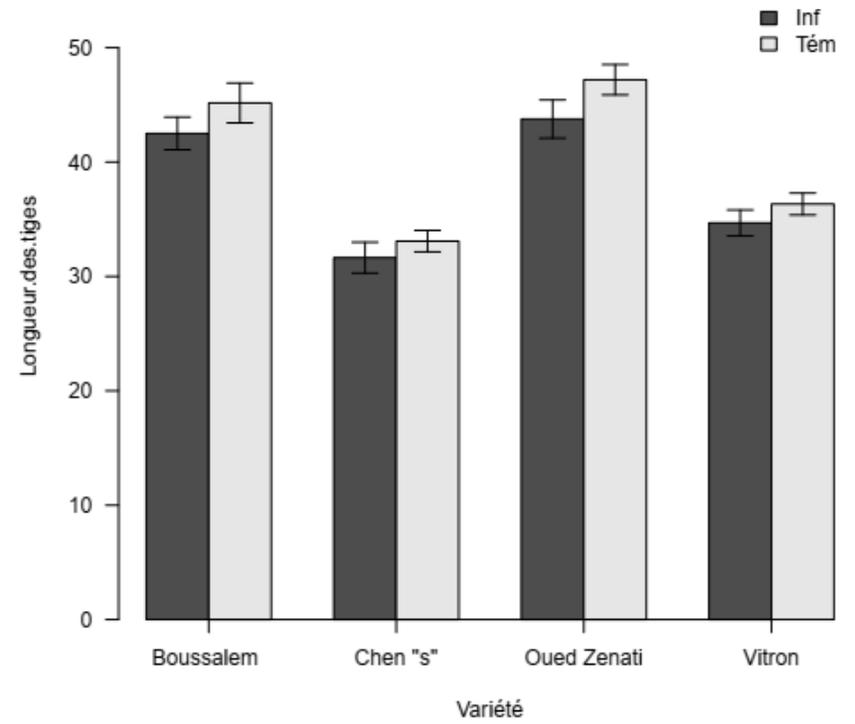


Paramètre : nombre des tiges.

2016

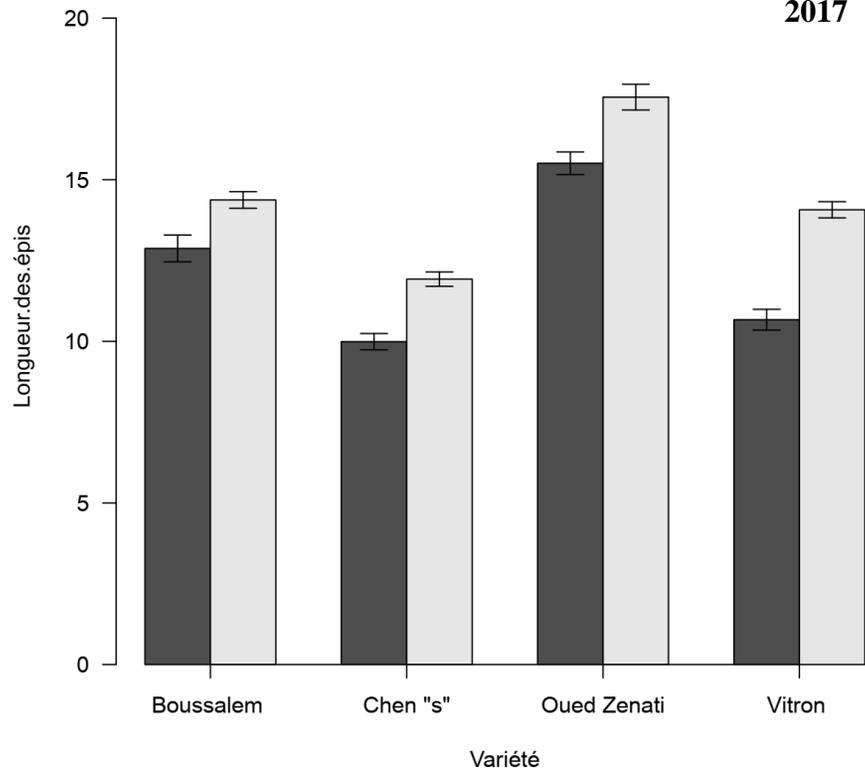


2017

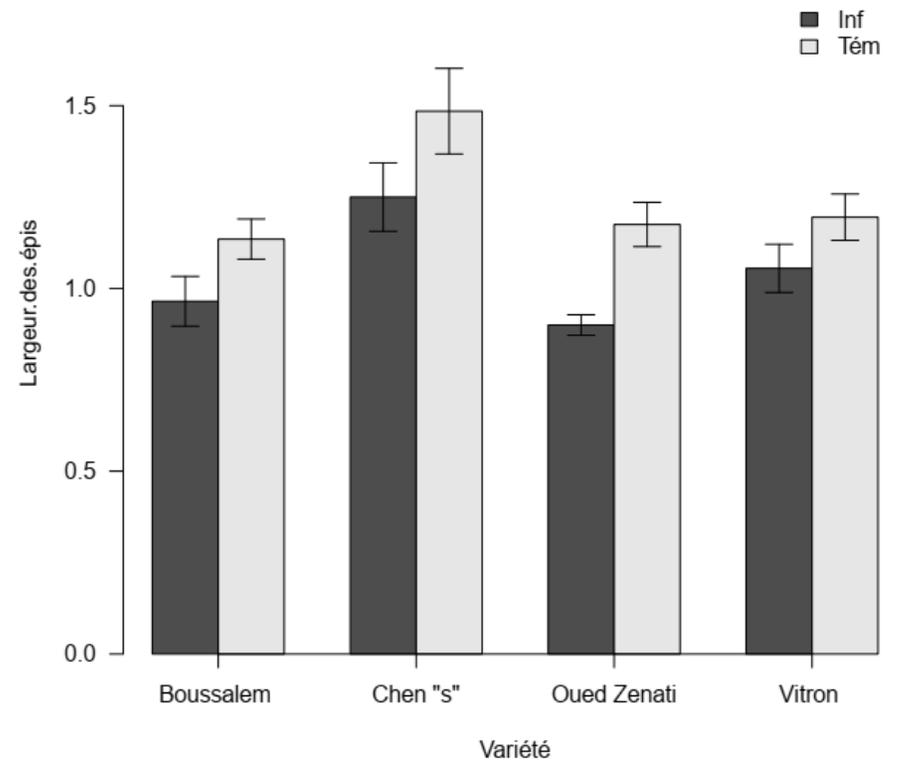


Paramètre : longueur des tiges.

2017



2017



Paramètre : longueur et largeur des épis

Incidence and geographical distribution of the cereal cyst nematode (CCN, *Heterodera* spp.) in winter wheat fields in Algeria

T. Djetti, M. Hammache, S. Doumandji

Djetti, T., Hammache, M., Doumandji, S., 2018. Incidence and geographical distribution of the cereal cyst nematode (CCN, *Heterodera* spp.) in winter wheat fields in Algeria. *Arxius de Miscel·lània Zoològica*, 16: 151–162.

Abstract

Incidence and geographical distribution of the cereal cyst nematode (CCN, Heterodera spp.) in winter wheat fields in Algeria. Cereal cyst nematodes (CCN, *Heterodera* spp.) are the most damaging plant–parasitic nematode species on wheat, causing severe economic loss in global wheat production. In summer 2015, we analyzed samples collected from 22 wheat fields in Algeria using the Fenwick can technique. The study revealed that 54.55 % of wheat fields were infested with cereal cyst nematodes. The species was observed in several locations in the northern part of Algeria but not in the southern desert area. Population densities of CCNs in soil varied between the regions at an infestation rate of between 0.6 ± 0.54 and

86.6 ± 19.96 cysts/500 g of dried soil. Furthermore, we found an average of 56.33 ± 15.18 and 364.70 ± 81.93 second–stage juveniles and eggs per cyst. The infestation was most severe in cereal fields in Draa Semar and Djendel with 86.6 ± 19.96 cyst/500 g of soil and 57.4 ± 17.55 cysts/500 g of soil, respectively. Infestation was lowest in fields in Ras Elouad, Sidi Mbarek and Sedraia with 0.6 ± 0.54 cysts/500 g of soil; 1.6 ± 1.67 cysts/500 g of soil and 2.4 ± 1.67 cysts/500 g of soil, respectively. *Heterodera* spp. was distributed throughout the cereal growing province in Algeria and could cause economic loss in these regions.

Data published in Mendeley ([doi:10.17632/rtsbcn6k9y.1](https://doi.org/10.17632/rtsbcn6k9y.1))

Key words: Cereal cyst nematodes, Incidence, Wheat, Distribution, Algeria

Resumen

Incidencia y distribución geográfica del nematodo enquistado de los cereales (CCN, Heterodera spp.) en campos de trigo de invierno de Argelia. Los nematodos enquistados de los cereales (CCN, *Heterodera* spp.) son los nematodos parásitos vegetales más dañinos para el trigo, especialmente en las zonas de cultivo de cereales, en todo el mundo. En el

verano de 2015 tomamos muestras en 22 trigales y las analizamos utilizando la técnica del embudo de

Fenwick. El estudio reveló que el 54,55 % de los trigales estaban infestados por nematodo enquistado de los cereales. La infestación se observó en varias localizaciones del norte de Argelia, pero no en la zona desértica del sur. Las densidades de población de CCN

© [2018] Copyright belongs to the authors, who license the journal *Arxius de Miscel·lània Zoològica* to publish the paper under a [Creative Commons Attribution 3.0 License](#), which permits its distribution, and reproduction in any medium, provided the original authors and source, the journal *Arxius de Miscel·lània Zoològica*, are cited.

en el suelo de las zonas infestadas variaron entre $0,6 \pm 0,54$ y $8,6 \pm 19,96$ quistes/500 g de suelo seco. Además, hallamos un promedio de $56,33 \pm 15,18$ y $364,70 \pm 81,93$ segundos estadios juveniles y huevos por quiste, respectivamente. La infestación era más severa en los campos dedicados al cereal de Draa Semar y Djendel, con $86,6 \pm 19,96$ quistes/500 g de suelo y $57,4 \pm 17,55$ quistes/500 g de suelo, respectivamente. Las tasas más bajas de infestación se observaron en los otros campos: Ras Elouad, Sidi Mbarek y Sedraia, con $0,6 \pm 0,54$ quistes/500 g de suelo, $1,6 \pm 1,67$ quistes/500 g de suelo y $2,4 \pm 1,67$ quistes/500 g de suelo, respectivamente. *Heterodera* spp. estaba distribuido en toda la zona de cultivo de cereal de Argelia y podría causar una pérdida de rendimiento económico en esas regiones. Mostramos la distribución en un mapa.

Datos publicados en Mendeley ([doi:10.17632/rtsbcn6k9y.1](https://doi.org/10.17632/rtsbcn6k9y.1))

Palabras clave: Nematodo enquistado de los cereales, Incidencia, Trigo, Distribución, Argelia

Resum

Incidència i distribució geogràfica del nematode enquistat dels cereals (CCN, Heterodera spp.) en camps de blat d'hivern d'Algèria. Els nematodes enquistats dels cereals ((CCN, *Heterodera* spp.) són els nematodes paràsits vegetals més nocius per al blat, especialment a les zones de conreu de cereals, arreu del món. L'estiu de 2015 vam prendre mostres en 22 camps de blat i les vam analitzar mitjançant la tècnica de l'embut de Fenwick. L'estudi va revelar que el 54,55 % dels camps de blat estaven infestats pel nematode enquistat dels cereals. La infestació es va observar en diverses localitzacions del nord d'Algèria, però no a la zona desèrtica del sud. Les densitats de població de CCN al sòl de les zones infestades van variar entre $0,6 \pm 0,54$ i $8,6 \pm 19,96$ quists/500 g de sòl sec. A més, vam trobar una mitjana de $56,33 \pm 15,18$ i $364,70 \pm 81,93$ segons estadis juvenils i ous per quist, respectivament. La infestació era més severa als camps dedicats al cereal de Draa Semar i Djendel, amb $86,6 \pm 19,96$ quists/500 g de sòl i $57,4 \pm 17,55$ quists/500 g de sòl, respectivament. Les taxes més baixes d'infestació es van observar als altres camps: Ras Elouad, Sidi Mbarek i Sedraia, amb $0,6 \pm 0,54$ quists/500 g de sòl, $1,6 \pm 1,67$ quists/500 g de sòl i $2,4 \pm 1,67$ quists/500 g de sòl, respectivament. *Heterodera* spp. estava distribuït en tota la zona de conreu de cereal d'Algèria i podria causar una pèrdua de rendiment econòmic en aquestes regions. En mostrem la distribució en un mapa.

Dades publicades a Mendeley ([doi:10.17632/rtsbcn6k9y.1](https://doi.org/10.17632/rtsbcn6k9y.1))

Paraules clau: Nematode enquistat dels cereals, Incidència, Blat, Distribució, Algèria

Received: 20/04/2018; Conditional acceptance: 26/06/2018; Final acceptance: 25/07/2018

Introduction

Wheat is the most important and most strategic cereal crop worldwide. In 2016, the world wheat production reached 759.7 million tons (Mt) (FAO, 2018). In Algeria, wheat was planted in 2 million hectares in the growing season of 2015–2016, with an estimated production of 3.3 Mt

(FAO, 2017). This production does not meet Algeria's needs. In 2016/2017, Algeria imported 8 Mt of wheat (FAO, 2017). Among the biotic stresses, the obstacle to cereal production is the damage caused by plant-parasitic nematodes. The cereal cyst nematodes (CCNs: *Heterodera* spp.) are considered to have a major impact on decreasing the yield of cereals throughout the world (Hando, 2002; Namouchi–Kachouri and B'Chir, 2005; Akar *et al.*, 2009; Toumi *et al.*, 2013; Ahmadi and Tanha Maafi, 2014). Yield losses due to CCN on wheat are reported to be more than 50 % in Iran (Hadjihassani *et al.*, 2010), 26–96 % in Tunisia (Namouchi–Kachouri *et al.*, 2009), 24 % in Syria (Singh *et al.*, 2009), 40–50 % in Morocco (Rammah, 1994 in Mokrini *et al.* [2018]), and between 23–50 % in Australia (Nicol *et al.*, 2002). It has been calculated that the annual yield loss is 72 million Australian dollars in Australia (Brown, 1981 in Mokrini *et al.* [2018]). At least \$US3.4 million in wheat production is estimated to be lost annually because of CCNs in the US states of Idaho, Oregon, and Washington (Turner and Subbotin, 2013).

Twelve out of 80 *Heterodera* species damage roots of cereals and grasses (Akar *et al.*, 2009; Subbotin *et al.*, 2010; Ahmadi and Tanha Maafi, 2014). Among these, *H.avenae* Wollenweber, 1924, *H. filipjevi* Madzhidov, 1981 and *H. latipons* Franklin, 1969 are the main species causing most serious damage to wheat (Nicol, 2002; Toktay *et al.*, 2015; Tirchi *et al.*, 2016).

Previous studies have indicated that CCN are potentially a limiting factor in wheat production in Algeria. The first record of a species from the *H.avenae* group on wheat in Algeria was reported by Scotto La Massese (1962). Since then, *Heterodera* spp. has become more dominant in northern Algeria in the cereal-producing regions, Tissemsilt (Djetti *et al.*, 2014), Aïn Defla (Tirchi *et al.*, 2016), Algiers (Haddadi *et al.*, 2013), Tiaret (Mokabli *et al.*, 2002; Haddadi and Mokabli, 2015). However, little is known about the occurrence and distribution of CCNs on wheat in Algeria.

The aims of the present study were: i) to investigate the infestation and distribution of CCNs (*Heterodera* spp.) collected from wheat fields in northern and southern of Algeria; ii) to evaluate the infestation levels and compare the obtained data with those from previous surveys carried out in Algeria; and iii) to draw a map showing the distribution of CCNs in the country.

Material and methods

Soil sampling

The northern region of Algeria is the most important area for growing cereals. After harvest in July and August of 2015, soil samples were taken from each field using a spade. The sites were situated in eight provinces (table 1).

Twenty-two soil samples were taken from fields in eight cereal growing provinces in Algeria. Each soil sample consisted of 13 soil cores or subsamples; a subtotal of 2.5 kg was collected from around the root systems at 15–20 cm deep after removing the top 5 cm layer from the rhizosphere of wheat plants. Subsamples were taken in a 'W' pattern through the fields. Samples were sent to the Laboratory of Nematology, High National School of Agronomy (E.N.S.A.) El Harrach Algiers, for further processing.

Nematode extraction and counting

Each soil sample was mixed thoroughly. Cysts were extracted from five subsamples of 500 g using the modified Fenwick can technique (Fenwick, 1940; Smiley, 2011) and full

Table 1. Geographical location of the study regions.

Tabla 1. Localización geográfica de las zonas de estudio.

Province	Area surveyed	Geographical location
Bouira	Aïn Bessam	36°18'01.3"N 3°41'03.0"E
	Bouira	36°22'02.5"N 3°51'57.1"E
Aïn Defla	Djendel Site 01	36°12'55.0"N 2°25'16.3"E
	Djendel Site 02	36°12'46.2"N 2°26'23.2"E
	Ain Soltane	36°13'30.9"N 2°19'59.2"E
	Aïn Defla	36°15'46.5"N 1°55'15.0"E
	Bir Ould Khelifa	36°10'05.8"N 2°13'33.7"E
Medea	Draa Semar	36°16'26.3"N 2°42'16.4"E
	Sedraia	36°15'02.9"N 3°29'09.5"E
Bordj Bou Arreridj	Medjana1	36°07'35.9"N 4°41'12.3"E
	Medjana2	36°06'56.0"N 4°42'44.6"E
	Sidi Mbarek Site 01	36°04'32.5"N 4°55'12.6"E
	Sidi Mbarek Site 02	36°05'58.9"N 4°53'07.9"E
	Ras Elouad	36°01'48.8"N 4°59'40.3"E
Tissemsilt	Tissemsilt	35°37'31.2"N 1°52'43.6"E
	Bni Maïda	35°33'01.0"N 1°50'33.2"E
	Ammari	35°33'40.0"N 1°38'50.0"E
	Dhaya	35°35'28.5"N 1°44'54.7"E
Mostaganem	Debdaba	35°54'04.9"N 0°07'47.5"E

Blida	Mozaya	36°28'09.2"N 2°39'31.1"E
Adrar	Zaouiet Kounta	27°12'57.2"N 0°11'53.9"E
	Timimoun	28°38'09.5"N 0°19'24.3"E

mature cysts retained on the 250- μ m sieve were picked with a dissecting needle under a stereomicroscope. Species were identified based on morphological features (Handoo, 2002). Collected cysts were typically ovoid to lemon-shaped but had different sizes (Haddadi and Mokabli, 2015). Cysts were counted in 500 g of soil. The cysts were surface sterilized using sodium hypochlorite NaOCl (0.1 %) for 5 min and rinsed several times with sterile distilled water for further studies. Cleaned and sterilized cysts were transferred into an Eppendorf and stored at 4 °C until use.

Population density of *Heterodera* spp. and data analysis

For each soil sample in the surveyed areas, the population density of CCNs is the number of cyst of *Heterodera* spp. in each 500 g of dry soil, and the number of eggs and second-stage juveniles per cyst. Eggs and J2s were obtained by crushing cysts. The means and standard deviations of the number of cysts, eggs, and J2s were calculated.

Data analysis

Data were analyzed using analysis of variance with a software R version 3.2.4. The average number of cysts was calculated for the five subsamples and expressed per 500 g of soil; the number of eggs and J2 in each cyst was estimated. Differences were tested using analysis of variance (ANOVA) followed by the Tukey HSD test to compare means if the *F*-value was significant. Differences were considered statistically significant if $P \leq 0.05$.

Results

Field infestation and distribution maps

Most study localities were situated in the northern part of Algeria. The results showed that 60 subsamples of 110 soil subsamples (54.55 %) were infected with *Heterodera* spp. (see [dataset published at Mendeley, doi: 10.17632/rtsbcn6k9y.3](#) and table 2).

CCNs were detected in almost all fields with monoculture of wheat in seven provinces in Bouira (Aïn Bessam and Bouira), Aïn Defla (Djendel Site 01, Djendel Site 02 and Aïn Defla), Medea (Draa Semar, Sedraia), Bordj Bou Arreridj (Sidi Mbarek site 1, Sidi Mbarek site 2 and Ras Elouad), Tissemsilt (Bni Maïda), Mostaganem (Debdaba) and Blida (Mozaya). *Heterodera* spp. was not detected in nine provinces *i.e.* Ain Soltane, Bir Ould Khelifa, Medjana Site 1, Medjana Site 2, Tissemsilt, Ammari, Dhaya, Zaouiet Kounta, and Timimoun. Both fields in Bouira province were infested. In these areas, crops rotate annually with other vegetables like potatoes. In Aïn Bessam, we observed that CCNs were less spread than previously reported (Haddadi and Mokabli, 2015). The average numbers of cysts, eggs and juveniles/100 g of soil in wheat fields was higher than in barley fields (Ahmed and Tanha Maafi, 2014). The fields were cultivated with cereal; according to Smiley et al. (2007), *Heterodera* spp. attack Poaceae like wheat and barley.

In Aïn Defla, 25 soil subsamples were analyzed in five fields and three samples were positive. The high infestation was counted in Djendel Site 02 with a monoculture of winter wheat. No infestation was found in Ain Soltane with a fallow period or in Bir Ould Khelifa where cereal was rotated with potato. The impact of this parasite depends on the host (Ah-madi and Tanha Maafi, 2014).

The province of Medea was represented by two fields, Draa Semar and Sedraia, where there was a monoculture of wheat. The average number of cysts was high in both fields. CCNs are highly developed and associated with yield loss in semi–arid regions (Sikora, 1987).

In Bordj Bou Arreridj, CCNs were found in 60 % of fields (25 subsamples). In Medjana there were no CCNs because fields rotated each year with other crops like oat or were fallow crops. However, a few cysts were found in Ras Elouad, a field some distance away from the other field cited above. The lowest level of cysts, eggs, and juveniles was recorded in Sidi Mbarek Site 1 and Ras Elouad. This is probably due to the practice of fallow each second year. Fallow reduces the density population of CCNs in soil by up to 70 % (Singh *et al.*, 2009).

CCNs were detected in only one (Bni Maïda) of the four fields in Tissemsilt. The results are in agreement with our study in 2013 reported by Djetti et al. (2014) in the same field. In addition, the fields Dhaya and Ammari showed zero infestation which is probably related to the cereal/legume rotation practiced in these localities. This absence of CCNs does not necessarily mean that the fields are free of these parasites (Haddadi and Mokabli, 2015).

All the subsamples in the field of Debdaba in Mostaganem in north–west Algeria were infected with CCNs. In the west of Algeria, in Sidi Bel Abbes, cyst extraction from soils taken from the Lamtar and Telagh fields cultivated on wheat showed 9 and 11 cysts/100 cm³ of soil, respectively (Smaha *et al.*, 2018a). In Mascara (El Ghoumri), a field of barley crops, an average of 21.7 cysts/kg was found (Haddadi and Mokabli, 2015).

The area of Mozaya (Blida) was cultivated by winter wheat in 2015. It had previously been

Table 2. Degree of infestation of the cereal cyst nematodes *Heterodera* spp. in the surveyed fields in Algeria, during 2015-2016: MC, Mean of cysts/500 g soil \pm SD; ME, Mean of eggs + J2s/cyst \pm SD. References: 1, Haddadi et Mokabli (2015); 2, Djetti et al. (2014); 3, Haddadi (2009) in Haddadi et al. (2013).

Tabla 2. Grado de infestación por quistes del nematodo de los cereales *Heterodera* spp. en los campos de estudio de Argelia en los años 2015-2016. (para las abreviaturas véase arriba).

Past situation												
Province	Code	Village	Host	MC	ME	Year	Host	Mean of cysts	References			
Bouira	BAB10	Aïn Bessam	Wheat	12.8 \pm 2.77	92.10 \pm 17.05	2009-2011	Barely	65.7 cyst/kg	1			
	BB10	Bouira	Wheat	9.6 \pm 2.07	117.80 \pm 42.62							
	-	Bachloul	-	-	-	2009-2011	Barely	68.4 cyst/kg	1			
	-	El Asnem	-	-	-	2009-2011	Wheat	145 cyst/kg	1			
	-	Mechedellah	-	-	-	2009-2011	Barley	17.7 cyst/kg	1			
Aïn Defla	AD144	Djendel Site 01	Wheat	12.8 \pm 6.26	212.30 \pm 90.45	2009-2011	Wheat	69.4 cyst/kg	1			
	AD244	Djendel Site 02	Wheat	57.4 \pm 17.55	195.10 \pm 130.00							
	AAS44	Ain Soltane	Fallow	0.0 \pm 0.00	-							
	AA44	Aïn Defla	Wheat	10.8 \pm 3.19	292.70 \pm 88.52							
	AB44	Bir Ould Khelifa	Wheat	0.0 \pm 0.00	-							
Medea	MDS26	Draa Semar	Wheat	86.6 \pm 19.96	364.70 \pm 81.93							
	MS26	Sedraia	Wheat	2.4 \pm 1.67	174.90 \pm 22.20							
Bordj Bou Arreridj	BBAM134	Medjana Site 1	Wheat	0.0 \pm 0.00	-							
	BBAM234	Medjana Site 2	Wheat	0.0 \pm 0.00	-							
	BBAS134	Sidi Mbarek Site 1	Wheat	1.6 \pm 1.67	108 \pm 43.85							
	BBAS234	Sidi Mbarek Site 2	Wheat	8.8 \pm 3.11	84.30 \pm 25.21							
	BBAR34	Ras Elouad	Wheat	0.6 \pm 0.54	56.33 \pm 15.18							
	-	Mansoura	-	-	-					2009-2011	Wheat	71.2 cyst/kg
Tissemsilt	TT38	Tissemsilt	Wheat	0.0 \pm 0.00	-							
	TB38	Bni Maïda	Wheat	22.2 \pm 7.75	244.40 \pm 29.33					2013	Maize 5,89 kyste plein/100 g de sol	2
	TA38	Ammari	Wheat	0.0 \pm 0.00	-							

	TD38	Dhaya	Wheat	0.0 ± 0.00	-				
Mostaganem	MD27	Debdaba	Wheat	17.2 ± 3.49	143.40 ± 44.68				
	-	Mostaganem	-	-	-	2009-2011	Wheat	25.4 cyst/kg	1
Blida	BM09	Mozaya	Wheat	6.2 ± 2.58	137.10 ± 71.61				
	-	Boufarik	-	-	-	2009-2011	Cereal straw	28.72cyst/kg	1
Adrar	AZ01	Zaouiet Kounta	Wheat	0.0 ± 0.00	-	2009	Cereal	Not infested	3
	AT01	Timimoun	Wheat	0.0 ± 0.00	-				

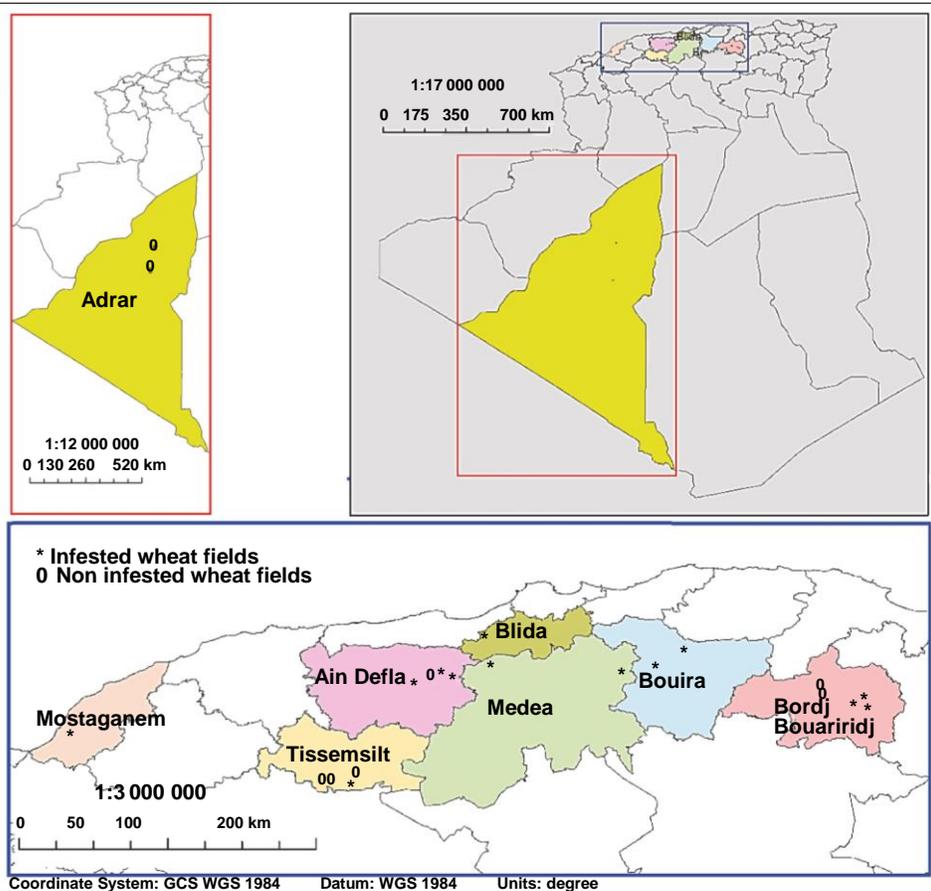


Fig. 1. Distribution map of cereal cyst nematodes, *Heterodera* spp., in Algeria 2015–2016. Fig. 1. Mapa de distribución de nematodos productores del quiste de los cereales *Heterodera* spp., en Argelia en los años 2015–2016.

rotated with potato and fallow. The rotation with another non–host crop is the best method to control the parasite (Rivoal and Bourdon, 2005). Singh et al. (2009) in Mokri et al. (2017) showed that the nematode densities decreased after rotation with non–host crops like carrot (*Daucus carota*), fenugreek (*Trigonella foenum–graecum*), and onion (*Allium cepa*), or by fallow and summer ploughing.

The Sahara fields Zaouiet Kounta and Timimoun are now cultivated for the first time with cereal crops. In these two areas, there was a pivot irrigation system and each year they changed the pivot to other places. There were no CCN in these areas. They have not been detected in the southern Algerian irrigated areas near Adrar (Haddadi, 1999 in Haddadi et al. [2013]). In Jordan, the Mediterranean cereal cyst nematode is widely distributed in several locations in the northern and southern Mediterranean and the eastern desert areas, with an incidence that varies from 30 to 100 % (Al Abed et al., 2004). In Egypt, CCN were found in five of seven regions in the Ismailia governorate with an occurrence of 79.4 %. The population density was 29 cysts on average, 10 J2s/100 cm³ (Baklawia et al., 2015). The

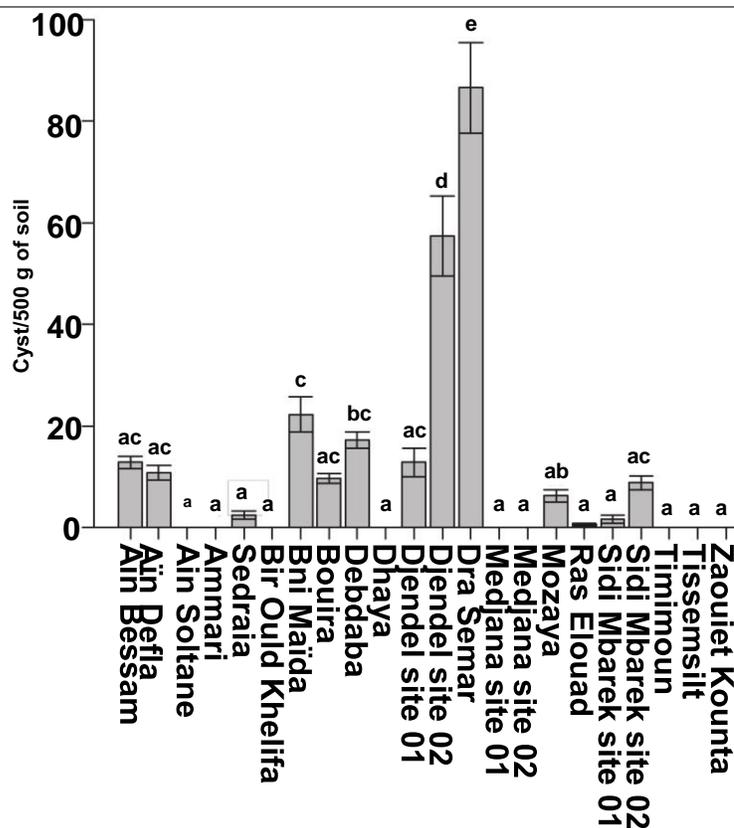


Fig. 2. Analysis of variance of cysts per 500 g of soil in the surveyed localities.

Fig. 2. Análisis de variancia de quistes por 500 g de suelo en las localidades de estudio.

survey of CCNs showed that 56 % of wheat fields in the East Anatolia Region of Turkey were infested. Cyst nematodes were detected in all fields with wheat in Elazig, Malatya, Erzurum, Erzincan, Sivas, Kars and Igdir provinces (Toktay *et al.*, 2015). According to Toumi *et al.* (2015) a survey conducted in north–eastern Syria in wheat and barley growing areas revealed that 62 % of the fields were infested with the Heterodera species. In Russia (Chelyabinsk Region), the highest nematode population density was found between 2010 and 2012, with a mean density of 100 cysts/100 g soil (Pridannikov *et al.*, 2015).

The present survey showed that 54.55 % of wheat fields in Algeria were infested. However, Heterodera spp. was not detected in the Sahara of Adrar. Infestation levels were highest in Medea. In contrast, the lowest levels of infestation were recorded in Bordj Bou Arreridj. *Heterodera* spp. was detected in 13 geographical areas. Figure 1 shows a distribution map of CCNs in wheat fields of Algerian provinces.

The analysis of variance (ANOVA)

Cysts/500 g of soil

Our results using analysis of variance (ANOVA) showed a significant difference between infestations with CCNs (cysts/500 g of soil) and regions with a probability of $2e-16 < 0.001$. In addition, for the groups analyzed by Tukey test, from seven groups, group 'd' and group

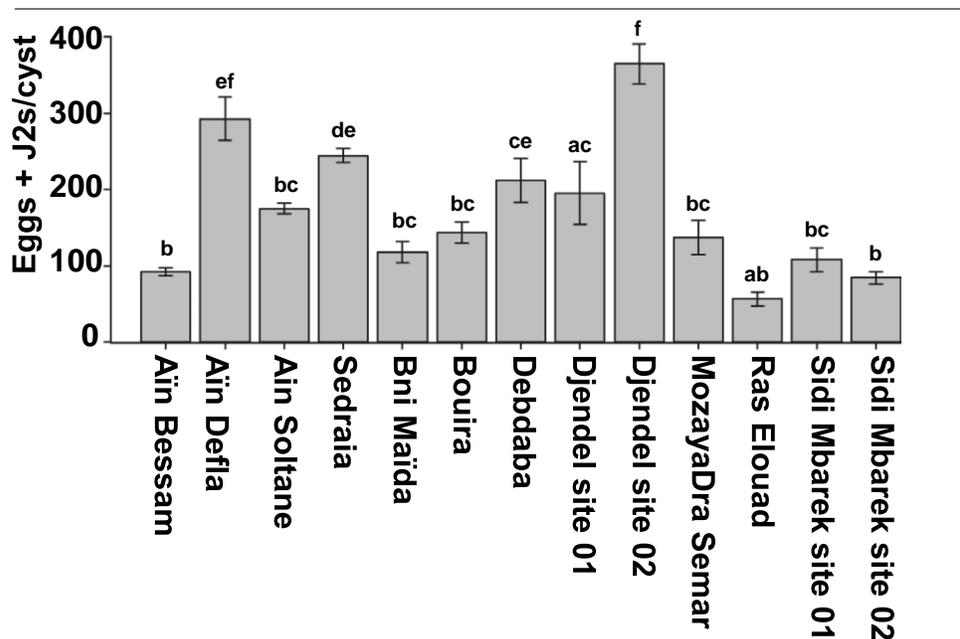


Fig. 3. Analysis of variance of eggs + J2s/cyst in each infested field.

Fig. 3. Análisis de variancia de huevos + J2/quiste en cada campo infestado.

'e' (Djendel Site 02 and Draa Semar) had the highest level of infestation. The lowest density of *Heterodera* spp. was found in-group 'a'. Densities in the other groups are shown in figure 2. Several authors have reported a high occurrence and distribution of these CCNs in Algeria (Mokabli *et al.*, 2002; Djetti *et al.*, 2014; Smaha, 2014; Haddadi and Mokabli, 2015).

Eggs +J2s/cyst

Thirteen of the 22 fields were infested. The statistical analysis indicated a probability of f value < 0.001 . For the Tukey test there were nine groups: the 'bc' group contained Bouira, Debdaba, Mozaya, and Sidi Mbarek site1. Figure 3 shows all groups.

Discussion

Cereal cyst nematodes (CCNs) are the most important pathogens of cereal crops in many parts of the world, with particularly adverse effects on the production of wheat and barley. Three species of CCN belonging to the *Heterodera avenae* group have been identified in cereal fields. *H.avenae* is widely distributed in temperate wheat-producing regions worldwide (Nicol *et al.*, 2003). In Sicily, Italy, *Heterodera latipons* and *Heterodera hordecalis* appear to be the most common species in durum wheat (*Triticum durum*) and barley (*Hordeum vulgare*) samples (Lombardo *et al.*, 2009). In Algeria, Tirchi *et al.* (2016), identified *H.avenae* in four localities in Ain Defla based on morphological characters and molecular identification. Smaha *et al.* (2018a, 2018b) also determined that *H. filipjevi* and *H. hordecalis* was distributed in wheat growing areas. In Mascara, the Mediterranean cereal cyst nematode *H. latipons* was reported by Mokabli *et al.* (2002). In the present study, after studying winter wheat growth in 22 fields in eight provinces, we found that 13 fields were infested by *Heterodera* spp. The degree of infestation varied. This survey shows that the major cereal growing areas in Algeria are commonly infested by *Heterodera* spp.

CCNs can seriously reduce yields of cereal crops, especially in temperate and semi-arid regions (Rivoal and Cook, 1993; Nicol and Rivoal, 2008). To keep the population densities of this parasite below damage levels, appropriate management processes, such as crop rotation, are necessary (Mokabli *et al.*, 2002; Smiley *et al.*, 2007). Crop rotations that include broadleaf crops, corn, fallow, and resistant wheat (Toumi *et al.*, 2015), barley, or oat varieties can greatly reduce the nematode density. In addition, growing susceptible hosts less than 50 % of the time in heavy-textured soils and less than 25 % of the time in light-textured soils could dramatically reduce CCN (Yan and Smiley,

2010). Furthermore, studies about the morphological characters as well as morphometrical and molecular analysis should be conducted to identify and separate species of the Heterodera genus. In Algeria, regional and intensive surveys are necessary to further understand the geographical distribution of this parasite and to investigate their relation with different hosts.

Acknowledgements

The authors would like to thank the ENSA–El Harrach (High National School of Agronomy) for financial support. We also thank all the colleagues who helped us in the field and in the laboratory, KACI, G. for the statistical analysis, and CHERIER, H. for help in the drawing of the map.

References

- Ahmadi, A.R., Tanha Maafi, Z., 2014. Incidence of Cereal Cyst Nematodes (*Heterodera avenae* type B and *H. filipjevi*) in southwestern Iran. *Cereal Cyst Nematodes in Khuzesten, Iran. Journal of Crop Protection*, 3(1): 75–88.
- Akar, T., Caliskan, M., Nicol, J. M., Uranbey, S., Sahin, E., Yazar, S., William, M., Braun, H. J., 2009. Molecular characterization of Cereal Cyst Nematode diagnostic markers Cre1 and Cre3 in some winter wheat germplasm and their potential use against *Heterodera filipjevi*. *Field Crops Research*, 114: 320–323.
- Al Abed, A., Al–Momany, A., Al–Banna, L., 2004. *Heterodera latipons* on barley in Jordan. *Phytopathologia Mediterranea*, 43(3): 311–317.
- Andersson, S., 1974. *Heterodera hordecalis* n. sp. (Nematoda: Heteroderidae) a cyst nematode of cereals and grasses in southern Sweden. *Nematologica*, 20(4): 445–454.
- Baklaw, M., Niere, B., Heuer, H., Massoud, S., 2015. Characterisation of cereal cyst nematodes in Egypt based on morphometrics, RFLP and rDNA–ITS sequence analyses. *Nematology*, 17(1): 103–115.
- Core Team R., 2016. *A language and environment for statistical computing*. R Foundation 425 for Statistical Computing, version 3.2.4 Vienna, Austria, <https://www.R-project.org/>
- Djetti, T., Boulaouad B. A., Hammache, M., 2014. State of infestation of the Tissemsilt region by cereal cyst nematodes of the genus *Heterodera* and *Globodera*. In: *Séminaire National sur la Biodiversité faunistique Du 07 au 09 Décembre 2014. El Harrach, Algeria*: 46–47. High National School of Agronomy E.N.S.A., El Harrach, Algeria. [In French.]
- FAO., 2017. *GIEWS–Global Information and Early Warning System, Country Brief on Algeria*. FAO, Rome, Italy, <http://www.fao.org/giews/countrybrief/country.jsp?lang=en&code=DZA> [Accessed on July 8, 2017].
- 2018. *Cereal Supply and Demand Brief*, <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/> [Accessed on July 8, 2017].
- Fenwick, D.W., 1940. Methods for the recovery and counting of cysts of *Heterodera schachtii* from soil. *Journal of Helminthology*, 18(4): 155–172.
- Franklin, M. T., 1969. *Heterodera latipons* n. sp., a cereal cyst nematode from the Mediterranean region. *Nematologica*, 15(4): 535–542.
- Haddadi, F., Mokabli, A., 2015. Current occurrence of cereal cyst nematodes in some fields of northern Algeria. In: *Nematodes of Small Grain Cereals: current status and research*: 59–66. Fifth International Cereal Nematode Initiative Workshop 12–15 September 2015 Ankara, Turkey.
- Haddadi, F., Mokabli, A., Smiley, R. W., 2013. Characterization of virulence reactions for *Heterodera avenae* populations from two localities in Algeria. *Phytoparasitica*, 41: 449–456.
- Hajjhasani, A., Tanha Maafi, Z., Nicol, J. M., Seraji, A., 2010. Relationships between population densities of the cereal cyst nematode, *Heterodera latipons* and yield losses of winter wheat in microplots. *Australasian Plant Pathology*, 39: 530–535.
- Handoo, Z. A., 2002. A key and compendium to species of the *Heterodera avenae* group (Nematoda: Heteroderidae). *Journal of Nematology*, 34(3): 250–262.
- Lombardo, S., Handoo, Z., Rapisarda, C., Colombo, A., 2009. Occurrence and distribution of cyst nematodes infecting cereals in Sicily, Italy. In: *Cereal cyst nematodes: status, research and outlook. Proceedings of the First Workshop of the International Cereal Cyst Nematode Initiative*, 21–23 October 2009, Antalya, Turkey: 61–65 (I. T. Riley, J. M. Nicol, A. A. Dababat, Eds.). International Maize and Wheat Improvement Centre CIMMYT, Ankara, Turkey.
- Madzhidov, A. R., 1981. New species of *Bidera filipjevi* sp. nov. (Heteroderina: Tylenchida) from Tadzhikistan. *Izvestija Akademii Nauk Tadzhikskov SSR, Otdelenie Biologitseskich Nauk.*, 2: 40–44.
- Mokabli, A., Valette, S., Authier, J. P., Rivoal, R., 2002. Variation in virulence of cereal cyst nematode populations from North Africa and Asia. *Nematology*, 4(4): 521–525.
- Mokrini, F., Viaene, N., Waeyenberge, L., Afechtal M.,

- Essarioui, A., Moens, M., 2017. The importance, biology and management of cereal cyst nematodes. *The Moroccan Journal of Agronomic and Veterinary Sciences*, 5(4): 414–421.
- Mokrini, F., Viaene, N., Waeyenberge, L., Dababat, A. A., Moens, M., 2018. Investigation of resistance to *Pratylenchus penetrans* and *P. thornei* in international wheat lines and its durability when inoculated together with the cereal cyst nematode *Heterodera avenae*, using qPCR for nematode quantification. *European Journal of Plant Pathology*, <https://doi.org/10.1007/s10658-018-1420-0>
- Namouchi-Kachouri, N., B'Chir, M. M., 2005. Identification morphométrique et moléculaire de quelques populations Tunisiennes d'*Heterodera avenae* associées aux céréales. *Nematol. Medit.* 33: 3–9.
- Namouchi-Kachouri, N., B'Chir, M. M., Hajji, A., 2009. Global importance of the main nematodes associated with cereals in Tunisia. In: *Cereal cyst nematodes: status, research and outlook*: 41–44 (I. T. Riley, J. M. Nicol, A. A. Dababat, Eds.). CIMMYT, Ankara, Turkey.
- Nicol, J. M., 2002. Important nematode pests. In: *Bread wheat: Improvement and production*: 345–366 (B. C. Curtis, S. Rajaram, H. Gómez Macpherson, Eds.). FAO Plant Production and Protection Series, Rome, Italy.
- Nicol, J. M., Rivoal, R., 2008. Global knowledge and its application for the integrated control and management of nematodes on wheat. In: *Integrated management and biocontrol of vegetable and grain crops nematodes, Vol. 2*: 243–287 (A. Ciancio, K. G. Mukerji, Eds.). Dordrecht, The Netherlands, Springer.
- Nicol, J. M., Rivoal, R., Bolat, N., Aktas, H., Braun, H. J., Mergoum, M., Yildirim, A. F., Bagci, A., Eleckcioglu, I. H., Yahyaoui, A., 2002. The frequency and diversity of the cyst and lesion nematode on wheat in the Turkish Central Anatolian Plateau. *Nematology*, 4: 272.
- Nicol, J. M., Rivoal, R., Taylor, S., Zaharieva, M., 2003. Global importance of cyst (*Heterodera* spp.) and lesion nematodes (*Pratylenchus* spp.) on cereals: Distribution, yield loss, use of host resistance and integration of molecular tools. In: *Proceedings of the Fourth International Congress of Nematology, 8–13 June 2002, Tenerife, Spain*: 1–19 (R. Cook, D. J. Hunt, Eds.). *Nematology Monographs and Perspectives 2*. Brill, Leiden, the Netherlands.
- Pridannikov, M. V., Suprunova, T. P., Shumilina, D. V., Limantseva, L. A., Skantar, A. M., Handoo, Z. A., Chitwood, D. J., 2015. Morphological and molecular observations on the cereal cyst nematode *Heterodera filipjevi* from the Middle Volga River and South Ural Regions of Russia. *Russian Journal of Nematology*, 23(2): 113–124.
- Rivoal, R., Bourdon, P., 2005. Sélection du ray-grass d'Italie pour la résistance au nématode à kyste des céréales (*Heterodera avenae*) [Breeding Italian Ryegrass for resistance to the cereal cyst nematode, *Heterodera avenae*]. *Fourrages*, 184: 557–566.
- Rivoal, R., Cook, R., 1993. Nematode pests of cereals. In: *Plant parasitic nematodes in temperate agriculture*: 259–303 (K. Evans, D. L. Trudgill, J. M. Webster, Eds.). Wallingford, UK, CABI Publishing.
- Scotto La Massese, C., 1962. Aperçu sur les problèmes posés par les nématodes phytoparasites en Algérie [Overview of the problems posed by pests nematodes in Algeria]. In: *Les nématodes*: 83–109. Association de Coordination Technique Agricole, Paris, France.
- Sikora, R. A., 1987. Plant parasitic nematodes of wheat and barley in temperate semi-arid region – a comparative analysis. In: *Nematodes Parasitic to Cereals and Legumes in Temperate Semi-arid Regions*, Workshop Held at Larnaca, Cyprus, 1–5 March 1987: 46–48. Aleppo, Syria.
- Singh, A. K., Sharma, A. K., Shoran, J., 2009. *Heterodera avenae* and its management on wheat in India. In: *Cereal cyst nematodes: status, research and outlook. Proceedings of the First Workshop of the International Cereal Cyst Nematode Initiative*, 21–23 October 2009 Antalya, Turkey: 17–22 (I. T. Riley, J. M. Nicol, A. A. Dababat, Eds.). CIMMYT, Ankara, Turkey.
- Smaha, D., 2014. Study of the influence of bersim on the development of an Algerian population of *Heterodera avenae* woll., 1924. AFPP – Dixième Conférence Internationale sur les ravageurs en agriculture Montpellier–22 et 23 octobre 2014 [in French]. Smaha, D., Mokrini, F., Mustafa, I., Mokabli, A., Dababat, A. A., 2018a. First Report of the Cereal Cyst Nematode (*Heterodera filipjevi*) on Wheat in Algeria. *Plant disease* <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-17-2003-PDN> – 2018b. First report of *Heterodera hordecalis*, a cereal cyst nematode, on wheat in Algeria. *Plant disease* <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-17-1965-PDN>
- Smiley, R. W., 2011. Extracting cysts of *Heterodera avenae* using a trudgill fluidizing column constructed with modern materials. 'Society of Nematologists 2011 Meeting: Abstracts: Alphabetically by first author. *Journal of Nematology*, 43(3–4): 223–297.
- Smiley, R., Sheedy, J., Pinkerton, J., Easley, S., Thompson, A., Yan, G. P., 2007. Cereal cyst nematode: distribution, yield reduction, and crop management strategies. *Oregon State University Agricultural Experiment Station Special Report*, 1074: 15–29.
- Subbotin, S. A., Mundo-Ocampo, M., Baldwin, J. G., 2010. Systematics of cyst nematodes (Nematode: Heteroderinae). In: *Nematology monographs and Perspectives 8A*, Leiden: 35–449 (D. J. Hunt, R. N. Perry, Eds.). Brill, The Netherlands.

- Tirchi, N., Troccoli, A., Fanelli, E., Mokabli, A., Mouhouche, F., Luca, F. D., 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. *European Journal of Plant Pathology*, 146(4): 861–880.
- Toktay, H., Imren, M., Öcal, A., Waeyenberge, L., Viaene, N., Dababat, A., 2015. Incidence of cereal cyst nematodes in the East Anatolia region in Turkey. *Russian Journal of Nematology*, 23(1): 29–40.
- Toumi, F., Hassan, G., Waeyenberge, L., Viaene, N., Dababat, A. A., Nicol, J., Ogbonnaya, F., Al-Assas, K., Abou Al-Fadil, T., Moens, M., 2015. Distribution of the cereal cyst nematodes (*Heterodera* spp.) in wheat and barley fields in north–eastern regions of Syria. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 122(5/6): 255–263.
- Toumi, F., Waeyenberge, L., Viaene, N., Dababat, A., Nicol, J. M., Ogbonnaya, F., Moens, M., 2013. Development of a species–specific PCR to detect the cereal cyst nematode, *Heterodera latipons*. *Nematology*, 15(6): 709–717.
- Turner, S. J., Subbotin, S. A., 2013. Cyst Nematodes. In: *Plant Nematology*: 1–447 (R. N. Perry, M. Moens, Eds.). CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Yan, G. P., Smiley, R. W., 2010. Distinguishing *Heterodera filipjevi* and *H.avenae* Using Polymerase Chain Reaction–Restriction Fragment Length Polymorphism and Cyst Morphology. *Phytopathology*, 100(3): 216–224.

Résumés

**Répartition spatio-temporelle des nématodes à kyste des céréales en Algérie.
Effet du nématode sur les paramètres du rendement de blé dur.**

Résumé.

Les nématodes à kystes des céréales (NKC, *Heterodera* spp.) sont les espèces de nématodes phytoparasites les plus nuisibles pour le blé, entraînant de graves pertes économiques pour la production mondiale de blé. Pour étudier l'incidence et la répartition géographique du NKC en Algérie et l'effet d'*H.avenae* sur les paramètres de rendement de blé dur. Au cours de l'été 2015, nous avons analysé des échantillons prélevés dans 22 parcelles de blé à l'aide de la technique de l'appareil de Fenwick. L'étude a révélé que 54,55 % des parcelles sont infestées par *Heterodera* spp. Les densités des NKCs dans le sol varient d'une région à l'autre avec un taux d'infestation compris entre $0,6 \pm 0,54$ pour Ras El Oued et $86,6 \pm 19,96$ kystes/500 g de sol pour Draa Semar. Les caractéristiques moléculaires des *Heterodera* spp. prélevées en Algérie, ont fait l'objet de recherches comparatives. L'ADN est extrait et purifié des kystes ou des larves choisies au hasard de chaque population. Les régions ITS ont été soumises à un séquençage direct pour étudier la diversité de ces populations. De nouvelles séquences sont déposées à la GenBank sous les num. d'accès : *H.avenae*: MG800684, MG800685, MG800687 et MG800689 ; *H. hordecalis*: MH745136, MH745137 et MG800688 ; *H. schachtii*: MG800690 et *H. cruciferae*: MG800686 et MG693179. Néanmoins, cette technique a permis de déceler, pour la première fois, l'espèce *H. cruciferae* en Algérie. *H.avenae* s'est montrée à l'échelle internationale comme un nématode nuisible grave causant des pertes de rendement des céréales. Les objectifs de cette recherche sont d'étudier l'effet des densités initiales de $1,39 \pm 0,05/100g$ de sol sur le rendement et les paramètres de croissance de quatre variétés de blé dur cv. Chen's, Vitron, Bousselam et Oued Zenati. Deux expériences ont été menées au cours des campagnes 2015-16 et 2016-17 dans des pots en plastique. Il est démontré que *H.avenae* réduit significativement le rendement en grains qui varie entre 20,28 pour cv. Chen's et 32,54% pour cv. Vitron. L'analyse de la variance montre une différence significative à très hautement significative pour l'effet d'inoculum sur les paramètres morphologiques et de rendement de blé dur. Les quatre variétés sont nettement plus sensibles aux attaques des nématodes.

Mots clés : NKC, distribution, PCR, phylogeny, blé dur, rendement.

Spatial and temporal distribution of cereal cyst nematodes in Algeria. Effect of the nematode on durum wheat yield parameters.

Abstract.

Cereal cyst nematodes (CCN, *Heterodera* spp.) are the most damaging plant nematode species for wheat, causing severe economic losses for world wheat production. To study the incidence and geographical distribution of CCN in Algeria and the effect of *H.avenae* on durum wheat yield. In the summer of 2015, we analyzed samples from 22 wheat fields using the Fenwick device technique. The study revealed that *Heterodera* spp. densities vary from region to another with an infestation rate ranging from 0.6 ± 0.54 for Ras El Oued to 86.6 ± 19.96 cysts/500 g of soil for Draa Semar infests 54.55% of the fields. The molecular characteristics of *Heterodera* spp. collected in Algeria have been the subject of comparative research. DNA is extracted and purified from cysts or larvae randomly selected from each population. ITS regions were directly sequenced to study the diversity of these populations. New sequences are deposited at the GenBank under the access numbers: *H. avenae* : MG800684, MG800685, MG800687 and MG800689 ; *H. hordecalis* : MH745136, MH745137 and MG800688 ; *H. schachtii* : MG800690 and *H. cruciferae* : MG800686 and MG693179). Nevertheless, this technique made it possible to detect, for the first time, the species *H. cruciferae* in Algeria. *H.avenae* has been shown internationally to be a serious pest nematode causing yield losses in cereals. The objectives of this research are to study the effect of initial densities of $1.39\pm 0.05/100\text{g}$ soil on the yield and growth parameters of four varieties of durum wheat cv. Chen's, Vitron, Bousselam and Oued Zenati. Two experiments were carried out during the 2015-16 and 2016-17 campaigns in plastic plant pots. It has been shown that *H.avenae* significantly reduces grain yield, which varies between 20.28 for cv. Chen's and 32.54% for cv. Vitron. The analysis of variance shows a significant to very significant difference for the inoculum effect on durum wheat morphological and yield parameters. All four varieties are significantly more susceptible to nematode attacks.

Keywords: CCN, distribution, PCR, phylogeny, durum wheat, yield.

Résumé

التوزيع المكاني والزمني لنيماتودا التكييس للحبوب من الجنس *Heterodera* في الجزائر. تأثير الديدان الخيطية على محصول القمح الصلب.

المخلص:

نيماتودا الحبوب (*NKC, Heterodera spp*) هي أكثر أنواع النيماتودا الطفيلية المضرة بالقمح، مما يسبب خسائر إقتصادية خطيرة لمردوده في العالم. لدراسة الحالات والتوزيع الجغرافي لنيماتودات التكييس في الجزائر وتأثير النوع *H.avenae* على منتج القمح الصلب. خلال صيف 2015، تم تحليل عينات من 22 قطعة أرض باستخدام تقنية فنويك. تختلف كثافة النيماتود *Heterodera spp* من منطقة الى أخرى. كشفت الدراسة أن 54.55% من قطع الأراضي تنتشر فيها النيماتودا بمعدل إصابة يتراوح بين 0.54 ± 0.6 في راس الوادي و 19.96 ± 86.6 كيس في 500 غ من التربة في ذراع السمار. الخصائص الجزيئية لأصناف *Heterodera spp* في الجزائر كانت هدف البحوث و المقارنة. يتم استخراج الحمض النووي وتنقيته من الخراجات أو يرقات مختارة عشوائيا. تعرضت مناطق ITS لتسلسل مباشر لدراسة تنوع هؤلاء المجتمعات. أودعت تسلسل جديدة في بنك الجينات تحت أرقام الانضمام , *H.avenae* : MG800684, MG800685 , MH745136, MH745137 et MG800688 ; *H. schachtii* MG800687 et MG800689 ; *H. hordecalis* : MG800690 et *H. cruciferae* : MG800686 et MG693179. ومع ذلك، فإن هذه التقنية جعلت من الممكن، لأول مرة، اكتشاف أنواع *H. cruciferae* في الجزائر. تم التعرف على *H.avenae* دوليا كديدان خيطية خطيرة تسبب خسائر في محصول الحبوب. تهدف هذه الدراسة إلى دراسة تأثير الكثافة الأولية البالغة 1.39 ± 0.05 / 100 غ من التربة على معلمات المحصول والنمو لأربعة أنواع من القمح الصلب. Bousselam ، Vitron, Chen's و Oued Zenati. أجريت تجربتان خلال الموسم الزراعي 2015-2016 و 2016-2017. ثبت أن *H.avenae* يقلل بشكل كبير من محصول الحبوب، والذي يتراوح بين 20.28 و 32.54٪. VITRON. يُظهر تحليل التباين اختلافاً كبيراً إلى كبير جداً بالنسبة لتأثير اللقاح على المعلمات المورفولوجية والغلة النهائية للقمح الصلب. الأصناف الأربعة أكثر عرضة بشكل كبير لهجوم النيماتودا.

الكلمات المفتاحية: نيماتودا التكييس للحبوب، التوزيع، PCR، phylogeny، القمح الصلب، المحصول.