

INCIDENCE D'*HETERODERA AVENAE* SUR LE BLE DUR, *TRITICUM DURUM*, SOUS LES CONDITIONS NATURELLES TUNISIENNES

N. Namouchi-Kachouri¹, S. Kallel² et M.M. B'Chir³

¹ Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie, 2049 Ariana, Tunisie

² Institut National Agronomique de Tunisie, 1082 Mabrajène, Tunisie

³ Ministère de l'Agriculture El-Rumais Sultanat, Oman

Résumé. L'effet des densités initiales d'*Heterodera avenae* sur la production du blé dur cv. Karim et sur la dynamique de ses populations a été étudié en plein champ dans six sites expérimentaux localisés dans les étages bioclimatiques aride à sub-humide. Des densités croissantes du nématode réduisent significativement les différentes composantes du rendement avec des pertes allant de 26 à 96%. Les relations entre les densités du nématode et la production du blé sont conformes aux modèles préalablement établis par Seinhorst avec des seuils de nuisibilité très bas de l'ordre d'un œuf ou larve/g de sol. Les taux de multiplication du nématode sont inversement proportionnels aux densités initiales. Etagés de 5 à 15 pour les densités les plus faibles, ils restent toujours supérieurs à l'unité pour les plus élevées. Selon les sites expérimentaux, les populations d'*H. avenae* manifestent de grandes différences dans les taux de multiplication et les densités de saturation dans le sol. Ces différences pourraient résulter de caractéristiques agroclimatiques des régions céréalières qu'elles colonisent ou/et de l'action d'antagonistes biologiques.

Mots Clés: Nématode à kyste des céréales, développement des populations, tolérance limite, Tunisie.

Summary. Incidence of *Heterodera avenae*, on wheat, *Triticum durum*, under Tunisian field conditions. The effect of initial densities of *Heterodera avenae* on the yield of wheat, *Triticum durum* cv. Karim, and on nematode population dynamics has been studied in six experimental field sites located in different bioclimatic zones, from arid to sub-humid. Increasing *H. avenae* densities significantly reduced the different yield components and grain yield loss varied from 26 to 96%. The relationship between nematode densities and wheat yield is according to Seinhorst models with damage threshold densities of the order of one egg or larva/g soil. Nematode multiplication rates are negatively correlated with initial densities but they remained above unity in all of our trials. The *H. avenae* populations showed large differences in multiplication rates and densities in the soil, depending on the experimental site. These differences may result from agro-climatic characteristics of the regions and/or the action of biological antagonists.

Keywords: Cereal cyst nematode, population dynamics, tolerance limit, Tunisia.

Le nématode à kyste des céréales (CCN), *Heterodera avenae* Woll. 1942, est largement répandu dans les régions tempérées de production céréalière (Rivoal et Cook 1993; Nicol *et al.*, 2003; Smiley *et al.*, 2005). Cette espèce est présente dans près de 50% des cultures céréalières en Europe (Rivoal et Cook, 1993), 66% au Nord-Ouest des USA (Smiley *et al.*, 1994) et 80% en Tunisie (Namouchi-Kachouri et B'Chir, 1997).

Des chutes de rendement de blé et d'orge suite aux attaques d'*H. avenae* sont rapportées, en Angleterre (Dixon, 1969), en Australie (Meagher et Brown, 1974), en Slovaquie (Sabova *et al.*, 1981), en Allemagne (Sachse, 1986), en Libye (Siddiqui et Khan, 1986), en France (Rivoal et Sarr, 1987), en Inde (Dhawan et Nagesh, 1987), au Pakistan (Shahina et Maqbool, 1990), en Espagne (Romero *et al.*, 1991), en Italie (Greco *et al.*, 1993), en Chine (Zhang *et al.*, 1994), au Maroc (Rammah, 1994) en Arabie Saoudite (Ibrahim *et al.*, 1999) et aux USA (Smiley *et al.*, 1994, 2005).

Les chutes de rendement au Maroc étaient de l'ordre de 40 à 50% (Rammah, 1994), 20 à 40% en Australie pour des densités initiales de 2 à 16 œufs et larves/g de sol (Meagher et Brown, 1974), 30 à 50% en Russie pour des densités de 10 à 20 larves/g de sol (Shiabova, 1982),

50% aux USA (Smiley *et al.*, 1994), et 40 à 92% en Arabie Saoudite pour des densités de 16 à 32 œufs et larves/g de sol (Ibrahim *et al.*, 1999).

La relation entre la densité de population initiale (P_i) d'*H. avenae*, la croissance et le rendement de la plante hôte est un facteur très important dans la détermination de l'impact économique de ce nématode sur les cultures. Dixon (1969) rapporte qu'en Angleterre, toute augmentation de 10 œufs/g de sol d'*H. avenae* entraîne chez le blé des pertes de 188 kg/ha. En Arabie Saoudite, un inoculum de 67 larves/g de sol cause des pertes de rendement de 93.5% (Al Hazmi *et al.*, 1994; Al Yahia *et al.*, 1996).

Par ailleurs, Dhawan et Nagesh, (1987) ont montré qu'il existe une corrélation négative entre la densité de population initiale (P_i) d'*H. avenae* et le taux de multiplication du nématode ($R_f = P_f/P_i$) sur des cultures de blé et d'orge. Généralement, la population finale P_f augmente avec une croissance de la population initiale (P_i) même si le taux de multiplication intrinsèque R_f diminue (Magi, 1989).

L'objectif de ce travail est de déterminer d'une part l'effet des densités initiales d'*H. avenae* sur la production du blé et les différentes composantes du rendement, d'autre part la dynamique des populations de ce

parasite dans six régions céréalières aux conditions pédo-climatiques différentes.

MATERIELS ET METHODES

L'incidence de différents niveaux d'infestation d'*H. avenae* sur le rendement du blé dur d'hiver cv. Karim et sur les taux de multiplication du nématode a été étudiée en plein champ dans six sites expérimentaux localisés dans différents biotopes climatiques: Kairouan en aride supérieur; Kef, Séliana et Zaghouan en semi-aride; Béja et Mateur en sub-humide. Ces biotopes climatiques (Fig.1 in Namouchi Kachouri et B'Chir, 2008) se caractérisent en outre par des spécificités au niveau des températures et des précipitations moyennes annuelles.

A Mateur, ces caractéristiques de température et de pluviométrie sont respectivement de 23 °C et de 300 à 800 mm. A Béja, elles sont de 18 °C et de 300 à 1000 mm. A Kef, la température moyenne annuelle est de 8 °C en hiver et 26 °C en été avec une pluviométrie annuelle de 450 mm. A Zaghouan, la température moyenne annuelle est de 18 °C et la pluviométrie de 450 mm/an. La région de Séliana se caractérise par une température annuelle moyenne de 17,7 °C et une pluviométrie de 450 mm. Enfin, à Kairouan, la moyenne annuelle des températures est de 22,5 °C l'hiver et de 34 °C l'été avec une pluviométrie moyenne de 300 mm. Le site de Kairouan est en outre équipé d'un système d'irrigation par aspersion et reçoit une précipitation complémentaire de 200 à 280 mm pendant la saison culturale.

Les sols de ces différents sites présentent des caractéristiques granulométriques différentes. A Kairouan, Séliana et Zaghouan ils sont sablonneux; à Béja, Mateur et Kef ils sont limoneux.

Les parcelles mises en expérimentation sont naturellement infestées. En fonction d'informations précédentes, huit sous parcelles de 1 m² présentant des gradients d'infestation ont été sélectionnées et les densités initiales (P_i) évaluées après échantillonnage du sol. Les sous-parcelles de 1 m² ayant une densité nulle sont considérées comme des témoins. Pour chaque densité initiale (P_i), cinq répétitions ont été définies. Les sept gradients d'infestation (P_i) en œufs et larves/g de sol présentent des valeurs variant de 8 à 49 à Zaghouan, 5 à 53 à Séliana, 8 à 57 à Kairouan, 7 à 46 à Béja, 4 à 43 à Mateur et 5 à 43 au Kef.

Dans chaque parcelle expérimentale de chaque site, une dizaine d'échantillons de sol constitués de cinq prises à une profondeur de 20 à 30 cm sont prélevés dans le sol avant le semis pour déterminer la population initiale (P_i) et après la récolte pour déterminer la population finale (P_f). Les kystes et les juvéniles L2 libres d'*H. avenae* sont extraits selon la technique de décantation et de la double centrifugation (Jenkins, 1964) Les kystes récupérés sont prélevés et écrasés entre lame et lamelle pour en dénombrer le contenu en œufs et larves, sous loupe binoculaire.

Les densités P_i et P_f sont exprimées en kystes/g de sol et en nombres d'œufs et de larves L2 viables/g de sol. Les taux de reproduction (R_f : résultat du rapport P_f/P_i) sont aussi calculés. En fin de culture, toutes les plantes de la même sous-parcelle d'une surface d'un m² sont délicatement arrachées et l'estimation des rendements a été réalisée à partir des différents paramètres suivants: nombre d'épis/m², nombre de grains par épi, poids de 1000 grains et poids total de grains/m².

Le parasitisme des œufs par les champignons nématophages a été étudié dans chaque site expérimental. De chaque parcelle, une vingtaine de femelles ont été isolées des racines de céréales, délicatement écrasées et colorées au bleu de Meldola à 1‰ pour estimer le nombre d'œufs parasités (Ogica et Estey, 1974). Après 24 h, le contenu en œufs de chaque femelle est examiné et dénombré sous loupe binoculaire pour noter la présence d'hyphes. Lorsqu'un œuf est parasité, tous les œufs contenus dans le kyste sont lavés trois fois à l'eau stérile avec 50 ppm de chlorotétracycline (CTC). Ils sont ensuite prélevés individuellement à l'aide d'un tube capillaire et placés sur de l'agar aqueux contenant 50 ppm de CTC. Après 24 heures à 20 °C, les œufs sont examinés pour noter le développement des champignons. Ces derniers sont purifiés sur un milieu corn meal agar à 2% puis identifiés au microscope Leica Diaplan.

Les données sont analysées statistiquement par le logiciel STATISTICA®. Les données relatives aux infestations et aux rendements ont été soumises en premier lieu à l'analyse en composante principale (ACP) afin de déterminer les corrélations (Jolliffe, 1986; Du Toit *et al.*, 1986; Celeux *et al.*, 1989). Le test de sphéricité de Bartlett (Jolliffe, 1986), la mesure d'adéquation d'échantillonnage de Kaiser-Meyer-Olkin (Jolliffe, 1986), le tracé des valeurs propres, les valeurs propres et l'analyse des corrélations sont utilisés en préliminaire comme test de diagnostic de l'ACP et pour sélectionner le nombre de composantes principales ou facteurs.

Pour chaque site expérimental, des analyses de régression ont été réalisées afin de décrire la relation entre (P_i) et le rendement du blé, (P_i) et la population finale (P_f) du nématode ainsi que (P_i) et le taux de multiplication (R_f). La relation entre la densité initiale du nématode et la production du blé a été dégagée en appliquant le modèle de Seinhorst (1965, 1986, 1998). Ce modèle établit la relation entre le logarithme décimal de P_i et la production relative des parcelles infestées par rapport à celles du témoin par l'équation

$$y = m + (1 - m) z^{P_i - T} \text{ pour } P_i \geq T$$

$$\text{et } y = 1 \text{ pour } P_i \leq T.$$

Dans cette équation y est le rapport entre la production à P_i considéré et la production à $P_i \leq T$, m est la valeur minimale de y (la valeur à P_i élevé), P_i est la population initiale, T est la tolérance limite et z est une constante définie <1 , avec $z^T = 1,05$.

Les données sur les densités de nématodes et sur les composantes de rendement (nombre d'épis/m², nombre de grains par épi, poids de 1000 grains et poids total de

Tableau I. Coordonnées des variables dans les deux facteurs extraits par l'Analyse en Composante Principale (ACP).

Variabes	Facteur 1	Facteur 2
Population initiale P_i	0,903715 ¹	-0,257720
Nombre moyen de grains par épi	-0,853531	0,254195
Nombre moyen d'épis/m ²	-0,925613	0,192381
Poids moyen de 1000 grains	-0,897652	0,223088
Rendement total/m ²	-0,969337	0,130202
Population finale P_f	0,574421	0,808285
Taux de multiplication ($R_f=P_f/P_i$)	0,029328	0,785163
Nombre de kystes/g de sol	0,600293	0,778090

¹ Les coordonnées des différentes variables sur l'axe factoriel sont comprises entre -1,00 et 1,00. La contribution de chaque variable à un facteur est mesurée par les valeurs relatives des coefficients de cette variable sur les différents facteurs retenus.

grains/m²) ont été en outre soumises à une analyse discriminante par le logiciel STATISTICA®.

RESULTATS

Caractéristiques de l'Analyse en Composante Principale. A l'exception du taux de multiplication (R_f) du nématode, la plupart des variables contribuent d'une façon importante à l'ACP où on retient deux facteurs ayant une valeur propre supérieure 1 sur la base du critère de Kaiser. L'ACP explique 87% de la variabilité totale avec 61% pour le premier axe factoriel et seulement 27% pour le second. Le facteur 1 extrait par l'ACP est lié aux différents paramètres de rendement du blé et aux densités initiales d'infestation, alors que le facteur 2 est associé aux densités finales et aux taux de multiplication du nématode (Tableau I). Le nombre de kystes est forcément corrélé à la densité finale du nématode et au taux de multiplication du nématode R_f . Le plan factoriel F1 x F2 de l'ACP démontre clairement l'opposition entre les densités initiales (P_i) d'*H. avenae* et les différents paramètres de rendement du blé tels que le

nombre moyen d'épis/m², le nombre moyen de grains par épi, le poids moyen de 1000 grains et le poids total de grains/m² (Fig. 1).

*Relations entre les densités initiales (P_i) d'*H. avenae* et les rendement du blé dur.* Compte tenu des différences agroclimatiques entre les régions concernées, le modèle de Seinhorst, assurant les relations entre les densités de nématodes dans le sol et le rendement des cultures, a été appliqué séparément pour chaque groupe de sites expérimentaux ayant les mêmes potentialités. Trois courbes ont été ajustées selon les données relatives à chaque groupe: Zaghouan dont le rendement potentiel moyen est de 23 q/ha (Fig. 2A). Béja et Mateur avec un rendement potentiel moyen de 40 q/ha (Fig. 2B), enfin Séliana, Kef et Kairouan dont le rendement potentiel moyen varie de 30 à 32 q/ha (Fig. 2C). Ainsi, le niveau théorique de tolérance aux dégâts pour chaque groupe de sites est compris entre 1,2 et 1,4 œufs/g de sol et le rendement minimum (m) devient nul lorsque les densités initiales de *H. avenae* atteignent des valeurs comprises entre 100 et 128 œufs/g de sol. Etant donné que les valeurs de tolérance limite estimées sont similaires pour tous les sites, et que pour $m = 0$, l'équation de Seinhorst devient

$$y = z^{P_i \cdot T}$$

(Fig. 2D), la tolérance limite moyenne T pour toutes les localités a été évaluée à 1,3 œufs/g de sol et les pertes de rendement en grains de 20, 50 et 80% pour respectivement des densités initiales de 8, 20 et 48 œufs d'*H. avenae*/g sol.

*Relations entre les densités initiales (P_i) et finales (P_f) d'*H. avenae*.* La diminution de la production relative du blé dans les différentes régions est négativement corrélée aux densités d'infestation initiale d'*H. avenae* et elle est indépendante des caractéristiques pédoclimatiques des sites expérimentaux. Par contre, le taux de multiplication du nématode sur blé est fortement influencé par les conditions du milieu. Ce taux est le plus élevé à Kairouan et le plus faible à Béja, Mateur et Kef (Fig. 3).

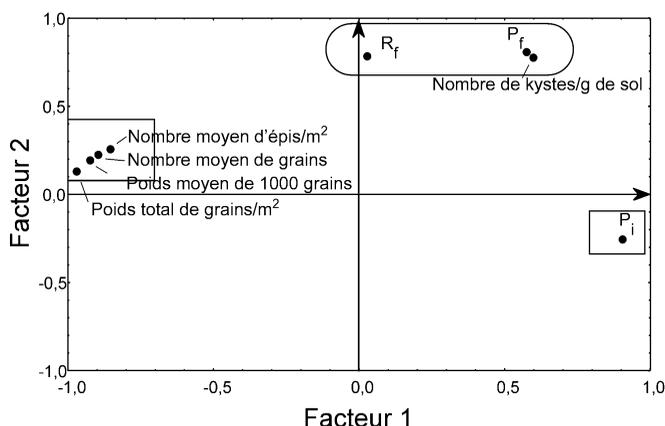


Fig. 1. Distribution des variables dans le plan factoriel extrait par l'Analyse en Composante Principale (ACP). P_i = densité initiale; P_f = densité finale; $R_f = P_f/P_i$.

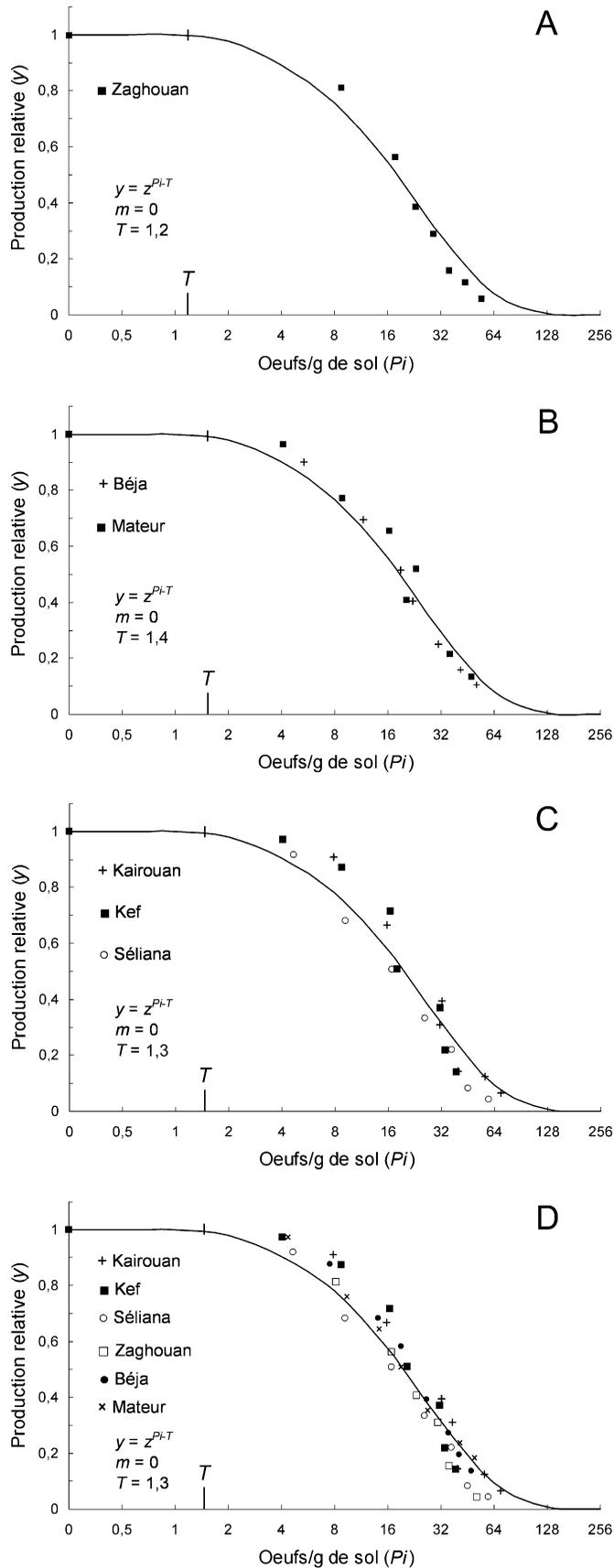


Fig. 2. Relations entre les densités initiales (P_i) d'*Heterodera avenae* et le rendement du blé dur cv. Karim dans les différents sites expérimentaux, ajustées au modèle de Seinhorst. A: Zaghoun, B: Béja et Mateur, C: Kairouan, Kef et Séliana, D: Moyenne des six sites expérimentaux (Zaghoun, Béja, Mateur, Kairouan, Kef, Séliana).

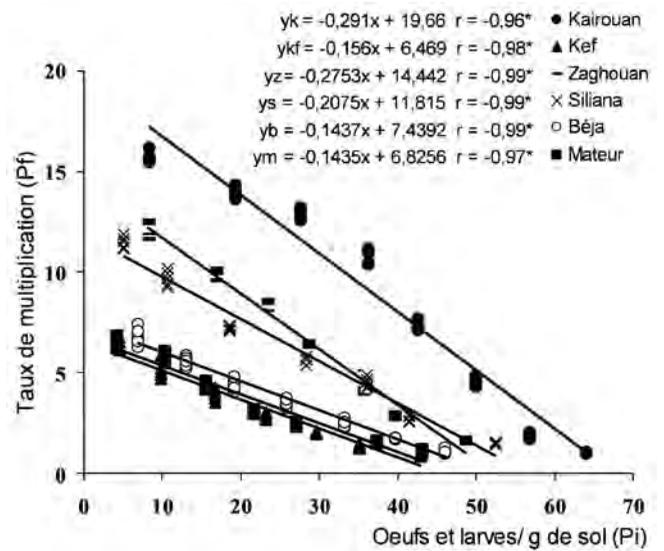


Fig. 3. Relations linéaires entre les densités initiales (P_i) d'*Heterodera avenae* et les taux de multiplication (R_f) dans les différents sites expérimentaux. Coefficient de corrélation de Pearson (r) et signification (*) à $P = 0,05$.

Pour chaque site, les analyses de régression ont montré une corrélation négative hautement significative ($P \leq 0,05$) entre P_i et le taux de multiplication R_f (Fig. 3). Les densités finales d'œufs et de larves viables par gramme de sol augmentent jusqu'à une valeur critique (effet plafond) et peuvent diminuer ultérieurement pour des valeurs supérieures à ces densités. A Kairouan, cette valeur plafond est de 400 pour une densité initiale de 36 individus/g de sol. Dans la région du Kef cette valeur P_f critique est seulement de 60 individus pour une valeur P_i de 20 individus/g de sol (Fig. 4).

Effet régional sur les relations P_i /Rendement et P_i / P_f . L'analyse discriminante effectuée sur les composantes du rendement du blé dur et les densités initiales du né-

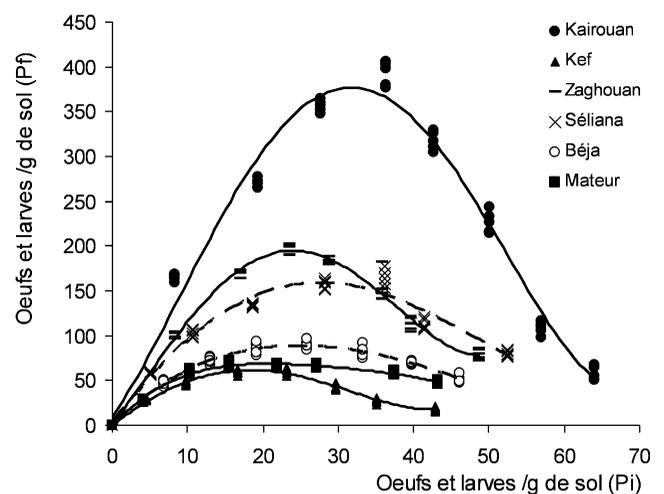


Fig. 4. Relations entre les densités initiales (P_i) et les densités finales (P_f) d'*Heterodera avenae* dans les différents sites expérimentaux.

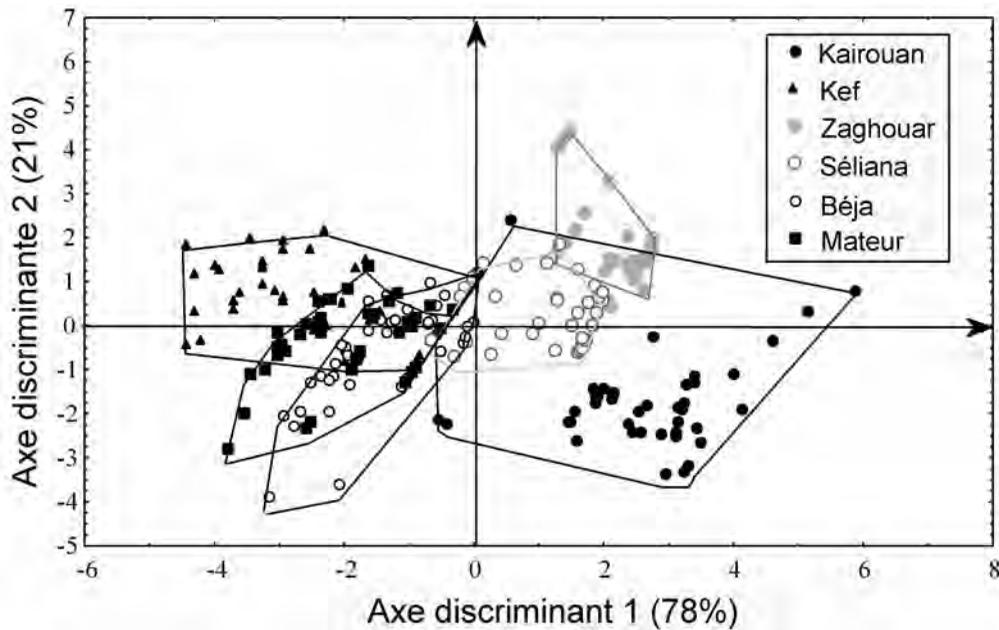


Fig. 5. Distribution des nuages de points relatifs aux observations effectuées dans les différentes régions en prenant en considération les différentes variables représentant les densités d'*Heterodera avenae* et les composantes du rendement du blé dur cv. Karim dans le plan extrait par l'analyse discriminante.

matode afin de dégager un effet régional sur l'expression de la nuisibilité d'*H. avenae* et sa multiplication a permis d'extraire deux axes qui expliquent une variabilité globale de 99%. Le premier axe explique 78% de la variation totale contre seulement 20% pour le second. Le premier axe sépare clairement les sites Béja et Mateur de l'étage bioclimatique sub-humide des sites Séliana et Zaghoular appartenant à l'étage semi-aride (Fig. 5). Les parcelles irriguées de Kairouan de l'aride supérieur présentent des potentialités de production voisines de celles de ces deux sites du semi-aride. Bien qu'en semi-aride, le site de Kef est statistiquement assi-

milé aux sites Béja et Mateur de l'étage subhumide. Ses potentialités de production sont accrues par rapport aux sites de Séliana et Zaghoular, du même étage bioclimatique, et pourraient s'expliquer par des densités plus faibles d'*H. avenae* résultant d'une mortalité élevée des œufs et des larves dans les kystes (Figs 5 et 6).

DISCUSSION ET CONCLUSION

Comme en Europe, en Asie ou en Australie, nos expérimentations en conditions naturelles démontrent que le nématode à kyste des céréales *H. avenae* cause des déprédations importantes à la culture du blé dur en Tunisie. Les diminutions de rendement consécutives aux infestations sont quasiment équivalentes quelque soit les conditions agroclimatiques des sites expérimentaux. Les baisses de la production du blé résultent de l'altération des paramètres du rendement (nombre d'épis, nombre de grains/épi, poids de 1000 grains) qui sont fortement corrélées aux densités initiales du nématode. Ces relations, préalablement modélisées par Seinhorst (1965, 1986, 1998), ont été confirmées dans les six sites expérimentaux. L'analyse des données selon ce modèle montre que le seuil de nuisibilité du parasite se situe à des niveaux de densité excessivement bas (de l'ordre de 1 œuf ou larve/g de sol) qui sont comparables à ceux observés en Australie (Meagher et Brown, 1974) ou en Europe (Andersson, 1982). Les densités initiales croissantes du nématode occasionnent en conséquence des baisses croissantes de rendement de 20, 50 et 80% pour atteindre 85 et même 96% pour les densités les plus élevées. Ces diminutions sont du même ordre que celles

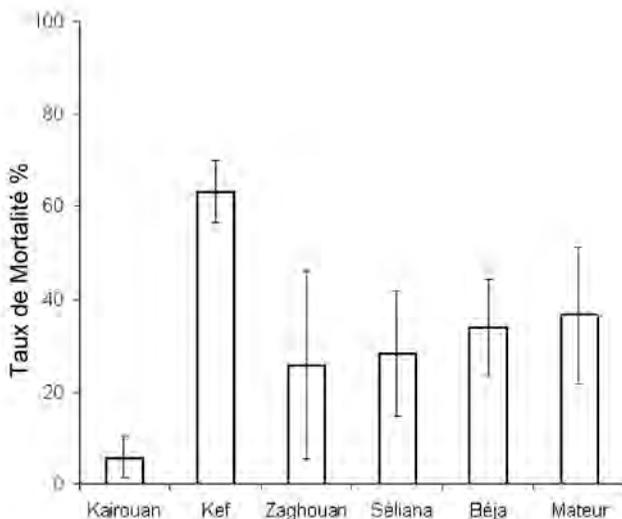


Fig. 6. Mortalité des œufs d'*Heterodera avenae* dans les différents sites expérimentaux. Les barres verticales correspondent aux intervalles de confiance à P = 0,05.

observées préalablement en Espagne (Romero *et al.*, 1991), au Maroc (Rammah, 1994) et en Arabie Saoudite (Ibrahim *et al.*, 1999).

L'analyse discriminante montre que l'incidence globale du nématode varie en fonction des conditions agroclimatiques des sites expérimentaux avec des effets plus marqués en étage semi aride (Zaghouan, Kef) qu'en étage sub-humide (Béja, Mateur). L'apport d'une pluviométrie complémentaire de 280 mm permet au site de Kairouan en étage aride d'assurer une production équivalente à celle observée en étage semi-aride (Zaghouan, Séliana) et confirme ainsi que le stress hydrique est un des facteurs déterminants de la nuisibilité d'*H. avenae* sur céréales (Rivoal et Cook, 1993; Lili, 1993). L'infestation par les larves occasionne un développement superficiel du système racinaire du blé qui pénalise la croissance et la production des plantes dans le cas de précipitations insuffisantes (Rivoal et Rivière, 1989). Il est généralement admis que les caractéristiques granulométriques des sols sont des facteurs d'aggravation des dégâts notamment quand les sols sont de structure légère comme à Kairouan, Séliana ou Zaghouan (Jones *et al.*, 1969; Workneh *et al.*, 1999).

En climat méditerranéen, il y a généralement coïncidence entre les sorties larvaire hivernale d'*H. avenae* et les périodes de semis des céréales (Rivoal, 1982; Mokabli *et al.*, 1998; Namouchi-Kachouri *et al.*, 2008). Ces sorties larvaires précoces occasionnent une plus grande sensibilité des cultures qui explique la forte nuisibilité de cet agent pathogène, notamment en Tunisie et dans d'autres régions d'Europe méridionale et d'Afrique du Nord (Rivoal et Cook, 1993).

Les études de dynamique des populations ont confirmé que la multiplication d'*H. avenae* est inversement proportionnelle aux densités initiales (P_i) (Rivoal et Sarr, 1987). Les taux de multiplication sont les plus élevés quand les densités initiales sont les plus faibles. Inversement, ces taux diminuent quand les densités initiales augmentent pour atteindre l'unité aux valeurs de saturation (effet plafond) du nématode dans le sol. De très fortes densités initiales peuvent se traduire par des réductions de population à cause de la compétition entre les individus pour les sites nourriciers ou simplement à cause du mauvais état végétatif des plantes hôtes, voire de leur destruction (Rivoal et Sarr, 1987; Rivoal et Cook, 1993). Pour des densités initiales comprises entre 0 et 10 œufs/g de sol, nous avons observé des taux de multiplication de 5 à 15 qui sont comparables à ceux observés en Australie (Fisher et Hancock, 1991) ou en France (Rivoal et Sarr, 1987).

La comparaison de la dynamique des populations d'*H. avenae* entre les différents sites expérimentaux montre par contre des différences aussi bien dans les taux de multiplication que dans les valeurs de saturation. La population qui se multiplie le mieux sur le blé dur cv. Karim et assure la densité de saturation la plus élevée dans le sol est Kairouan. A l'inverse, les populations qui se développent le moins sont celles de Mateur

et Béja; celles de Séliana et Zaghouan se situant en position intermédiaire. Ces différences pourraient avoir plusieurs explications. Rivoal *et al.* (2001) ont démontré entre des populations de France et de l'ouest de l'Asie des différences de fitness qui correspond à la capacité des larves à se transformer en femelles. Le type de sol joue aussi un rôle déterminant sur le développement et la multiplication d'*H. avenae* (Tard *et al.*, 2005). Les sols légers ou à structure grossière de type sableux ou sablo-limoneux sont réputés pour être plus favorables à la multiplication des nématodes en assurant une meilleure aération et des déplacements plus faciles que dans les sols limoneux de texture fine, à faible porosité (Jones *et al.*, 1969; Workneh *et al.*, 1999). Ces différences agrologiques pourraient ainsi expliquer les faibles potentiels de multiplication d'*H. avenae* dans les sites de Béja et Mateur dont les sols sont limoneux par rapport à Kairouan où le sol est sableux. Ces résultats confirment des observations faites précédemment en Australie (Brown, 1984). Les faibles potentialités de multiplication de la population du Kef pourraient résulter de l'effet combiné de la structure limoneuse du sol et de la présence, en plus grande quantité, de champignons antagonistes tels que *Pochonia chlamydosporia* (= *Verticillium chlamydosporium*) dans les femelles blanches ou les kystes du nématode.

Cette étude a démontré qu'*H. avenae* est un agent pathogène particulièrement nuisible à la culture du blé dur en Tunisie et plus particulièrement au cultivar Karim qui est la variété la plus cultivée. Ce nématode présente d'énormes potentialités pour l'établissement de densités dommageables même si des différences dans les taux de multiplication et les densités de saturation dans le sol varient en fonction des populations et de leurs conditions agroclimatiques. Quelque soit la localisation, les dégâts se produisent avec des densités faibles, dès la présence d'1 œuf ou larve par gramme de sol, et les relations entre les baisses de rendement et les densités croissantes suivent les modélisations de Seinhorst. Nos résultats permettent une gestion théorique des populations du nématode pour les maintenir à des niveaux de densités non dommageables et contribueront à la recherche de techniques et pratiques culturales pour atteindre ces objectifs.

LITTÉRATURE CITÉE

- Al Hazmi A.S., Ibrahim A.A.M. et Abdul-Razig A.T., 1994. Occurrence, morphology and reproduction of *Heterodera avenae* on wheat and barley in Saudi Arabia. *Pakistan Journal of Nematology*, 12: 117-129.
- Al Yahia F.A., Al Hazmi A.S., Ibrahim A.A.M. et Alderfasi A.A., 1996. Effect of cereal cyst nematode on wheat yield under field conditions. *Abstracts of 7th Annual Meeting of the Saudi Biological Society*. 28-30 May. Buraidah, Saudi Arabia.
- Andersson S., 1982. Population dynamics and control of *Heterodera avenae* - A review with some original results. *EPPO, Bulletin*, 12: 463-475.

- Brown R.H., 1984. The ecology and control of cereal cyst nematode (*Heterodera avenae*) in southern Australia. *Journal of Nematology*, 16: 216-222.
- Celex G., Diday E., Govaert G., Lechevallier Y. et Rlambondrainy H., 1989. *Classification automatique des données - Environnement statistique et informatique*. Dunod informatique, Paris, France, 285 pp.
- Dhawan S.C. et Nagesh M., 1987. On the relationship between population densities of *Heterodera avenae*, growth of wheat and nematode multiplication. *Indian Journal of Nematology*, 17: 231-236.
- Dixon G.M., 1969. The effect of cereal cyst eelworm on spring sown cereals. *Plant Pathology*, 18: 109-112.
- Du Toit S.H.C., Steyn A.G.W. et Stumpf R.H., 1986. *Graphical exploratory data analysis*. Springer-Verlag Inc., New York, USA, 314 pp.
- Fisher J.M. et Hancock T.W., 1991. Population dynamics of *Heterodera avenae* Woll. in South Australia. *Australian Journal of Agricultural Research*, 42: 53-68.
- Greco N., D'addabbo T., Brandonisio A. et Elia F., 1993. Damage to Italian crops caused by cyst-forming nematodes. *Journal of Nematology*, 25(S): 836-842.
- Ibrahim A.A.M., Al Hazmi A.S., Al Yahya F.A. et Alderfasi A.A., 1999. Damage potential and reproduction of *Heterodera avenae* on wheat and barley under Saudi field conditions. *Nematology*, 1: 625-630.
- Jenkins W.R., 1964. A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. *Plant Disease Reporter*, 15: 692.
- Jolliffe I.T., 1986. *Principal component analysis*. Springer-Verlag Inc, New York, USA, 272 pp.
- Jones F.G.W., Larbey D.W. et Parrott D.M., 1969. The influence of soil structure and moisture on nematodes, especially *Xiphinema*, *Longidorus*, *Trichodorus* and *Heterodera* spp. *Soil Biology & Biochemistry*, 1: 153-165.
- Lili Z., 1993. Télédétection infrarouge thermique et quantification de stress hydriques d'origine pathologique; validation sur blé infesté par *Heterodera avenae* Woll. Thèse doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes (Ensar), France, 245 pp.
- Magi E., 1989. The relationships between the cereal cyst nematode population density, barley yield and nematode multiplication in field plots. *Eesti NSV Teaduste Akadeemia Toimetised Biologia*, 38: 189-194.
- Meagher J.W. et Brown R.H., 1974. Microplot experiments on the effect of plant hosts on populations of the cereal cyst nematode (*Heterodera avenae*) and on the subsequent yield of wheat. *Nematologica*, 20: 337-346.
- Mokabli A., Valette S. et Rivoal R. 1998. Influence of temperature on hatching of the cereal cyst nematodes, *Heterodera avenae* and *Heterodera latipons*, from different geographic origins, in Mediterranean regions. *Nematologica*, 38: 494-501.
- Namouchi-Kachouri N. et B'Chir M.M., 1997. Distribution of nematodes associated to cereals in Tunisia. *Abstracts of Sixth Arab Congress of Plant Protection*, Oct. 27-31, Beirut, Lebanon, p. 346.
- Namouchi-Kachouri N. et B'Chir M.M., 2008. Influence de la température sur l'éclosion des populations Tunisiennes d'*Heterodera avenae*. *Nematologia Mediterranea*, 36: 31-37.
- Nicol J.M., Rivoal R., Taylor S. et 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. Pp. 233-251. In: Proceedings of the Fourth International Congress of Nematology - Nematology Monographs and Perspectives 2 (Cook R. et Hunt D.J., eds). Brill NV, Leiden, The Netherlands.
- Ogica I.R. et Estey R.H., 1974. The use of Meldola Blue and Nile Blue A, for distinguishing dead from living nematodes. *Nematologica*, 20: 271-276.
- Rammah A., 1994. Cereal cyst nematode (*Heterodera avenae*) in Morocco. *Arab and Near East Plant Protection Newsletter*, 19: 40.
- Rivoal R., 1982. Caractérisation de deux écotypes d'*Heterodera avenae* en France par leurs cycles et conditions thermiques d'éclosion des races Fr1 et Fr4. *Revue de Nématologie*, 2: 233-248.
- Rivoal R. et Rivière J.M., 1989. Etude du profil cultural de deux sites, l'un infesté, l'autre non, par *Heterodera avenae* Woll. *Agronomie*, 9: 719-728.
- Rivoal R. et Cook R., 1993. Nematode pests of cereals. Pp. 259-303. In: Plant Parasitic Nematodes in Temperate Agriculture (Evans K., Trudgill D.L. and Webster J.M., eds). CAB International, Wallingford, UK.
- Rivoal R. et Sarr E., 1987. Field experiments on *Heterodera avenae* in France and implications for winter wheat performance. *Nematologica*, 33: 460-479.
- Rivoal R., Bekal S., Valette S., Gauthier J.P., Bel Hadj Fraj M., Mokabli A., Jahier J., Nicol J. et Yahyaoui A., 2001. Variation in reproductive capacity and virulence on different genotypes and resistance genes of Triticeae, in the cereal cyst nematode species complex. *Nematology*, 3: 581-592.
- Romero M.D., Valdeolivas A. et Lacasta C., 1991. Incidence of *Heterodera avenae* on the growth and yield of cereals in Spain. *Nematologia Mediterranea*, 19: 77-79.
- Sabova M., Valocka B. et Liskova M., 1981. Effect of *Heterodera avenae* on some cereal cultivars under experimental conditions. *Sborník UVTIZ, Ochrana Rostlin*, 17: 191-197.
- Sachse B., 1986. Yield losses caused by the cereal cyst nematode (*Heterodera avenae*) on diluvial (D2/D3) soil. *Archiv. Fur Phytopathologie und Pflanzenschutz*, 22: 219-227.
- Seinhorst J.W., 1965. The relation between nematode density and damage to plants. *Nematologica*, 11: 137-154.
- Seinhorst J.W., 1986. The development of individuals and populations of cyst nematodes on plants. Pp. 101-117. In: Cyst Nematodes (Lamberti F. and Taylor C.E., eds). Plenum Press, New York, USA.
- Seinhorst J.W., 1998. The common relation between population density and plant weight in pot and microplot experiments with various nematode plant combinations. *Fundamental and Applied Nematology*, 21: 459-468.
- Shiabova T.N., 1982. Pathogenicity factors of *Heterodera avenae*. *Nauchno-Tekhnicheskii Byulleten' VASKhNIL, Sibirskoe Otdelenie*, 22: 32-36.
- Shahina F. et Maqbool M.A., 1990. Effects of different inoculum levels of *Heterodera zaeae* on *Zea mays* and *H. avenae* on *Hordeum vulgare*. *International Nematology Network Newsletter*, 7: 43-44.

- Siddiqui Z.A. et Khan M.W., 1986. Nematodes causing damage to wheat crops in Libya. *International Nematology Network Newsletter*, 3: 23.
- Simon A., 1980. A plant assay of soil to assess potential damage to wheat by *Heterodera avenae*. *Plant disease*, 64: 917-919.
- Smiley R.W., Ingham R.E., Uddin W. et Cook G.H., 1994. Crop sequences for winter wheat in soil infested with cereal cyst nematode and fungal pathogens. *Plant Disease*, 78: 1142-1149.
- Smiley R.W., Whittaker R.G., Gourlie J.A., Easley S.A. et Ingham R.E., 2005. Plant parasitic nematodes associated with reduced wheat yield in Oregon: *Heterodera avenae*. *Journal of Nematology*, 37: 297-307.
- Tard O.P., Siddiqui A.U., Parihar A. et Yadav Y.S., 2005. Effect of soil types on multiplication and development of cereal cyst nematode, *Heterodera avenae*, on wheat. *Indian Journal of Nematology*, 35: 75-76.
- Workneh F., Yang X.B. et Tylka G.L., 1999. Soybean brown stem rot, *Phytophthora sojae*, and *Heterodera glycines* affected by soil texture and tillage relations. *Phytopathology*, 89: 844-850.
- Zhang D.S., Peng D.L., Lu Z.Q. et Wang Y.X., 1994. Reproduction characteristics of *Heterodera avenae* and its effects on the development of winter wheat. *Plant Protection*, 20: 4-6.

Accepté pour publication le 25 Novembre 2008.