

Détection par radiométrie d'un stress parasitaire provoqué par *Tylenchulus semipenetrans* Cobb sur citronnier greffé sur bigaradier

Sadreddine Kallel¹
M.M. B'Chir²

¹ Institut national agronomique de Tunisie (Inat),
43, avenue Charles Nicole,
1 082 Tunis-Mahrajene
Tunisie
<Kallel.sadreddine@inat.agrinet.tn>

² Al Rumais Agriculture Research Centre
P. Box 150,
P.Code 328,
Sultanate of Oman
<Mouldi_bchir@yahoo.com>

Résumé

Les températures de l'air, du sol, des racines, des feuilles et l'écart de température ($T_{\text{feuille}} - T_{\text{air}}$) ont été mesurés, pendant une année, pour détecter un stress pathologique lié à l'infestation des racines de citrus par *Tylenchulus semipenetrans*. La comparaison, par thermoradiométrie, de l'évolution de la somme des écarts de températures des feuilles des plants citronnier indemnes et infestés et de l'air environnant, a permis de déceler un stress parasitaire pendant les saisons automnales et estivales.

Mots clés : Méthodes et outils ; Productions végétales.

Abstract

Radiometric detection of parasitic stress induced by *Tylenchulus semipenetrans* Cobb on citrus trees grafted on infested sour orange trees.

The temperatures of the air, soil, roots, leaves and the difference between leaf and air temperatures ($T_{\text{leaf}} - T_{\text{air}}$) were measured, during one year, on noninfested and infested *Citrus* trees to evaluate nematode-induced stress. Our results indicate that in both the autumn and summer seasons the sums of temperature differences ($T_{\text{leaf}} - T_{\text{air}}$) recorded using a hygrothermograph, showed significant differences between *Tylenchulus semipenetrans*-infested and noninfested citrus trees.

Key words: Tools and methods; Vegetal productions.

La télédétection, technique rapide et non destructive utilisant la partie infrarouge thermique du spectre électromagnétique, a été largement étudiée pour évaluer les stress abiotiques et biotiques [1]. Elle permet la détermination d'un déficit hydrique ou des foyers d'infestation associés aux maladies et parasites liés au sol [2]. Les agents parasites du sol altèrent ou modifient le système racinaire des plantes et provoquent par conséquent une augmentation des résistances au transfert de l'eau à l'interface sol-racine et au transfert d'eau à travers les racines. Ce dysfonctionnement hydrique du système racinaire joue dans le sens d'une augmentation de la résistance de la plante au transfert en phase liquide et donc de la résistance stomatique. Il aboutit à la diminution de l'évapotranspiration par la fermeture des stomates [3] et à l'augmentation de la température de

surface de la feuille de la plante infestée et donc du couvert végétal.

Différents auteurs ont proposé des indices pour quantifier le stress hydrique. Les indices de stress les plus utilisés sont le *Stress Degree Day* [4, 5], *Crop Temperature Variability* [6, 7], *Temperature Stress Day* [1], *Crop Water Stress Index* [8, 9] et la somme des différences de température [10-16]. Ces indices physiques de stress reposent sur des paramètres physiques, notamment la température de surface du couvert en rapport avec la température de l'air, le rayonnement et le déficit de pression de vapeur d'eau dans l'air.

Les stress hydriques d'origine parasitaire sont principalement étudiés sur les nématodes associés aux systèmes racinaires des plantes annuelles qui couvrent complètement le sol [2, 17-25].

Parmi ces nématodes endoparasites sédentaires, *Tylenchulus semipenetrans*,

Tirés à part : S. Kallel

Tableau 1. Température et écart de température entre la feuille et l'air pendant deux journées (16 mai et 23 mai).

Table 1. Temperature and temperature gap between leaf and air during two days (16 May and 23 May).

Heure de mesure journalière	Arbres sains							Arbres infestés						
	10	12	13	14	15	17	17	10	12	13	14	15	17	
Température du sol	21,5 a	25,3 a	23,4 b	22,8 ab	25,5 c	23,7 bc	23,7 bc	20,4 c'	25,9 c'	24,3 b'c'	21,8 a'b'	24,9 c'	23,2 b'c'	
Température des feuilles âgées	34,0 c	36,5 d	34,9 cd	35,3 cd	31,9 b	26,1 a	26,1 a	34,6 c'	36,5 c'	35,4 c'	35,1 c'	30,8 b'	25,0 a'	
Température des feuilles jeunes	32,4 b	36,1 bc	34,7 c	36,8 bc	32,2 bc	26,1 a	26,1 a	32,3 c'	36,6 é	35 c'd'	34,5 d'e'	28,8 b'	22,7 a'	
Écart de température des feuilles âgées et de l'air	1,0 a	0,8 a	-0,8 a	-0,8 a	-0,5 a	-1,3 a	-1,3 a	-0,3 a'b'	1,0 b'	-0,4 a'b'	-0,3 a'b'	-1,1 a'b'	-2,4 a'	
Écart de température des feuilles jeunes et de l'air	-1,0 a	0,0 a	0,2 a	-1,6 a	0,1	-0,4 a	-0,4 a	-0,3 a'b'	1,4 b'	0,1 a'b'	-0,9 a'	-1,3 a'	-1,4 a'	
Température du sol	30,3 a	31,1 a	33,3 ab	36,1 bc	37,3 c	33,2 ab	33,2 ab	36,3 b'	33,6 a'b'	36,1 b'	35,6 b'	34,9 b	30,2 a'	
Température des feuilles âgées	33,7 b	36,8 cd	38,3 d	36,9 cd	35,4 bc	29,6 a	29,6 a	36,3 b'c'	36,1 b'c'	37,7 c'	36,9 b'c'	34,8 b'	27,5 a'	
Température des feuilles jeunes	33,2 b	36,3 cd	39,0 c	37,7 de	35,3 c	29,4 a	29,4 a	34,6 b'	36,8 c'	38,9 d'	37,2 c'	34,9 b'	27,7 a'	
Écart de température des feuilles âgées et de l'air	0,1 a	3,2 b	2,1 ab	1,3 ab	1,6 ab	0,9 ab	0,9 ab	0,3 b'	3,4 c'	2,8 b'c'	1,4 b'c'	1,9 b'c'	-1,7	
Écart de température des feuilles jeunes et de l'air	0,0 a	2,8 a	1,9 a	1,2 a	2,2 a	0,3 a	0,3 a	0,4 b'	3,1 b'	3,4 b'	1,2 b'	1,8 b'	-1,8 a'	

Les moyennes suivies des mêmes lettres (a, b ou a', b') sur la même ligne ne sont pas significativement différentes selon le test de Student, Newman et Keuls à la probabilité de p = 0,05.

parasite des *Citrus*, modifie profondément le système racinaire par l'édification d'un site trophique complexe [26]. L'édification du site trophique induit par les nématodes endoparasites, affecte le potentiel hydrique foliaire, le fonctionnement stomatique, la transpiration, ou la conductivité racinaire [20, 22, 24, 25] et minérale [27] et le métabolisme des arbres [28]. Les populations de *Tylenchulus semipenetrans* Cobb. 1913 [29] fluctuent selon une évolution bimodale avec un pic au printemps et un pic en automne [30-32]. Ces deux populations du nématode n'ont pas la même incidence sur l'arbre. La population printanière a pour effet d'entraîner une modification de la morphogenèse des jeunes arbres [32] et aboutit à une variabilité de la production des arbres en vergers [33]. La population automnale est constituée principalement de femelles phytoparasites. Les agrumes, plantes pérennes, qui restent pendant toute l'année en activité présentent des feuilles fines, luisantes et très peu cuticulisées [34] qui ressentent rapidement l'effet d'un stress hydrique. Le présent travail a pour objectif d'étudier le stress hydrique sur le modèle agrume-nématode des *Citrus* et de préciser la période pendant laquelle on peut détecter un stress parasitaire en fonction de la dynamique des populations du nématode.

Matériel et méthode

L'essai est mené en bac cimenté de 3 mètres de long, un mètre de largeur et un mètre de hauteur sur des citronniers de même vigueur âgés de 4 ans greffés sur bigaradier. Deux rangées de six bacs numérotés 1 à 6, sont orientées nord-est-sud-ouest. Les bacs ont été remplis de mélange de sable de carrière : fumier (3:1 v:v). Dans chaque bac, deux arbres provenant d'une pépinière indemne de nématode et de 2 ans d'âge, ont été plantés. Les bacs ne sont pas équipés d'un système d'irrigation. L'infestation échelonnée des plants de 6 bacs pris au hasard a été effectuée par une population de *T. semipenetrans* provenant de racines infestées de bigaradiers greffés, situés dans un verger de la région agrumicole de Tunisie. L'évaluation des populations saisonnières est effectuée régulièrement arbre par arbre. L'échantillonnage consiste à prélever des jeunes radicelles entre 0-30 cm de profondeur, selon la

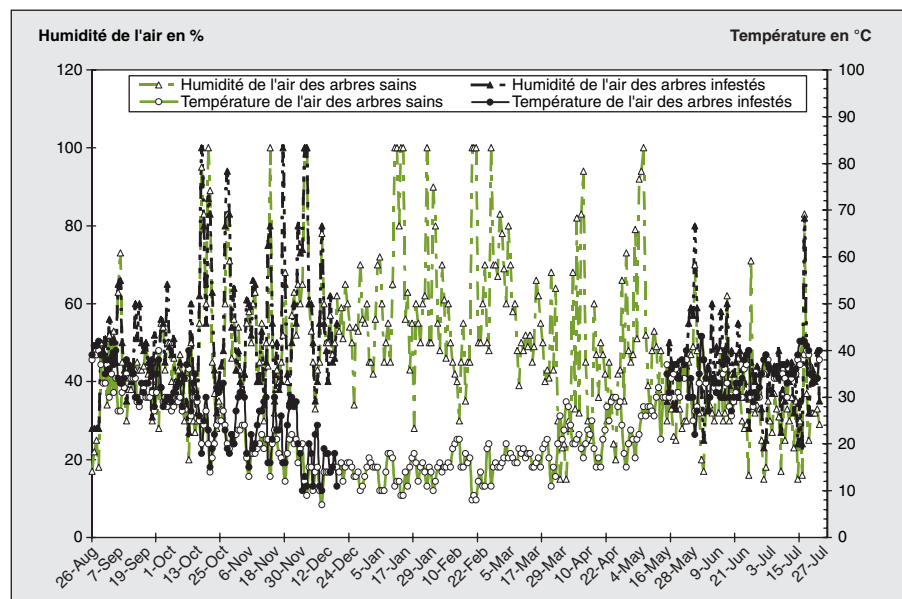


Figure 1. Évolution annuelle de la température et de l'humidité de l'air.

Figure 1. Annual evolution of air temperature and humidity.

technique décrite par Duncan [35]. L'extraction des nématodes, à partir des échantillons de racines, est réalisée selon la méthode de la double centrifugation [36]. Les dénombrements des nématodes sous forme d'œufs, de larves et d'adultes, sont réalisés sous loupe binoculaire. Après deux années de culture, les mesures de la température et de l'humidité de

l'air sont effectuées par un thermo-hygromètre enregistreur positionné sous la cime de arbres situés au milieu de la rangée de bacs. Les températures des racines des arbres sont évaluées à l'aide d'un thermomètre à sonde Quick® novo. Les températures du sol sont mesurées en visée verticale sous la cime de l'arbre et à l'ombre, moyennant un pistolet thermo-

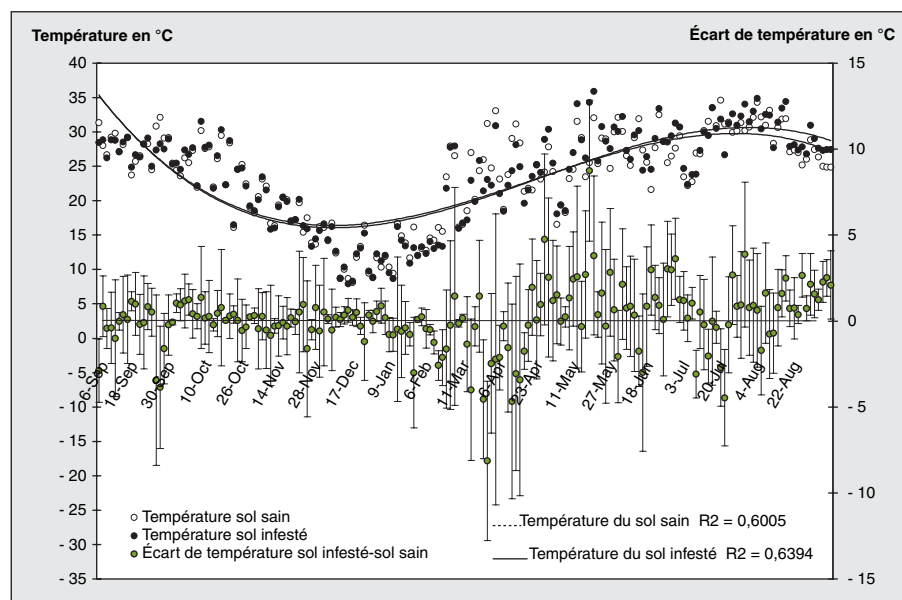


Figure 2. Évolution annuelle de la température des sols indemnes, infestés par le nématode des Citrus et l'écart de température entre les deux types de sols.

Figure 2. Annual soil temperature evolution and temperature difference between infested and noninfested soils.

Les barres correspondent aux intervalles de confiance à $P = 0,05$. R^2 est le coefficient de détermination.

mètre à infrarouge Everest Interscience Inc. Modèle n° 210 série 1126, dont l'angle de champ est de 15° et à bande passante nominale entre 8 et 14 µm [37, 38]. Sur le radiomètre, l'émissivité a été réglée à la valeur de 0,98 [39]. Les températures des feuilles exposées aux radiations solaires et situées du côté sud-est sont mesurées en inclinant le pistolet de 45° par rapport à la verticale tout en gardant la même orientation et la même distance de la feuille (environ 5 cm) [2]. Les écarts de températures entre la feuille et l'air sous-jacent sont mesurés directement sur le pistolet grâce à une sonde télescopique. Les mesures de températures sont effectuées à raison de deux feuilles par arbre et seulement sur les arbres situés dans les quatre bacs n° 2 à 5 de chaque rangée ; les quatre plants des bacs n° 1 et 6 aux extrémités de la rangée ont servi de bordure. Les écarts maximaux entre les feuilles infestées et saines ont été déterminés avant d'effectuer les mesures. Une série de mesures des différentes températures a été réalisée entre 10 heures et 17 heures pendant deux journées sur des feuilles jeunes et âgées. La température des feuilles jeunes et âgées et leur écart sont mesurés sur deux rameaux différents de l'arbre afin d'inclure la variabilité par plant dans le calcul de la moyenne.

Résultats

Pendant deux journées ensoleillées, l'une sans vent (16 mai) et l'autre ventée (23 mai), l'évolution de la température des feuilles des arbres indemnes et des arbres infestés par le nématode présente un maximum entre 12 heures et 13 heures (heure locale) correspondant à la période d'insolation intense. L'écart entre la température de la feuille et celle de l'air environnant suit l'évolution de la température avec des variations beaucoup plus atténuées pour les arbres sains que pour les arbres infestés (tableau 1). La température et l'écart de température des jeunes feuilles d'une part et des feuilles âgées d'autre part ne sont pas significativement différents pendant ces deux journées de mesure. L'évolution journalière de la température à la surface du sol ne suit pas celle des feuilles et présente un pic plus tard dans la journée (tableau 1). La température de l'air à 12 heures (heure locale) varie au cours de l'année entre

Tableau 2. Dynamique des populations de *T. semipenetrans* par 100 grammes de racines et par arbre de *Citrus* infestés pendant les quatre saisons de l'année.

Table 2. Seasonal population density of *T. semipenetrans* per 100 gr root of Citrus trees.

	Automne	Hiver	Printemps	Été
Œufs	1 118	1 056	21 508	4 671
Larves	763	1 291	29 660	8 308
Femelles	498	151	608	598

8 °C et 42 °C (figure 1). Cette température varie de la même manière pour l'air environnant les arbres indemnes que pour l'air situé autour des arbres infestés par *T. semipenetrans*. L'humidité de l'air est autour de 48,4 % pendant la période de l'essai avec des variations journalières en fonction de la pluviosité et de la couverture du ciel. Entre la fin du mois de mai et la mi-octobre, cette humidité relative de l'air diminue de la même manière pour les deux types d'arbres et atteint en moyenne 37,6 % (figure 1).

Les populations de *T. semipenetrans* varient en fonction des saisons et du cycle de développement. La population larvaire est élevée pendant le printemps tandis que la population des femelles sédentaires est faible pendant l'hiver et atteint son maximum pendant le reste de l'année (tableau 2). Les populations du

nématode présentent une grande variabilité liée à sa distribution.

La température du sol sous les cimes des arbres varie au cours de l'année entre 8,3 °C et 34,9 °C avec de faibles variations pendant l'hiver et l'été. L'écart de température entre les sols sains et les sols infestés est pratiquement nul pendant toute l'année, à l'exception de quelques journées au cours de la période de mesure (figure 2).

L'évolution de la température à 12 heures au voisinage des racines nourricières à 10 cm de profondeur varie entre 6,7 °C et 33,8 °C. Aucune différence entre la température des racines saines et des racines infestées n'a été signalée, sauf pendant quelques journées de novembre et de mai (figure 3). Cette variabilité élevée des températures et de leur écart à proximité des racines est en rapport avec

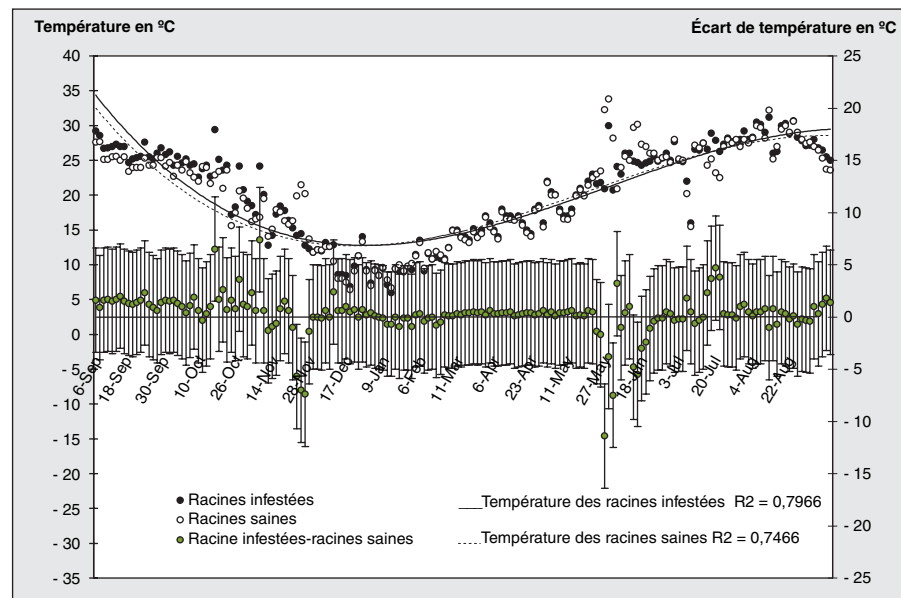


Figure 3. Évolution annuelle de la température des racines saines et des racines infestées, et écart de température entre les deux types de racines.

Figure 3. Annual root temperature evolution and evolution of temperature differences between infested and noninfested soils.

Les barres correspondent aux intervalles de confiance à $p = 0,05$. R^2 est le coefficient de détermination.

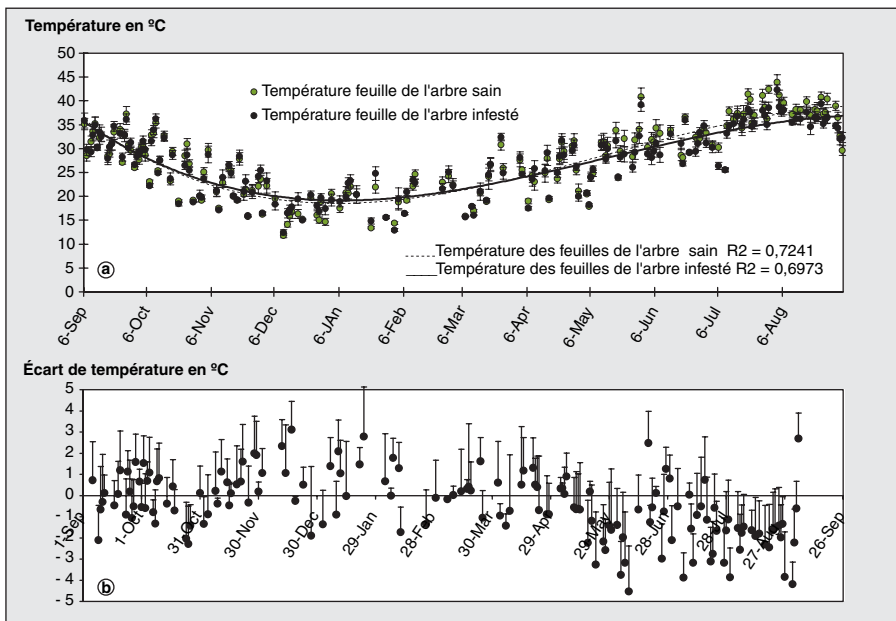


Figure 4. Évolution annuelle de la température des feuilles des arbres sains et de celles des arbres infestés (a) et écart entre les deux types de températures (b).

Figure 4. Annual leaf temperature evolution (a) and difference of temperature between infested and noninfested citrus trees (b).

Les barres correspondent aux intervalles de confiance à $p = 0,05$. R^2 est le coefficient de détermination.

l'hétérogénéité du sol, son humidité et le réchauffement hétérogène des bacs par la lumière incidente du soleil.

La température des jeunes feuilles, mesurée à 12 heures (heure locale), évolue entre 11,8 °C et 43,9 °C selon les saisons. D'une part, les écarts de températures journalières entre les feuilles des arbres infestés et celles des arbres sains sont de l'ordre de 1 à 2 °C avec $(T_{\text{infesté}} - T_{\text{sains}}) < 0$ en été (figure 4). D'autre part, les écarts de températures entre la feuille et l'air environnant $(T_{\text{feuille}} - T_{\text{air}})$ peuvent atteindre 8 °C entre novembre et avril et ne dépassent pas 4 °C le reste de l'année (figure 5). On notera que la différence $(T_{\text{feuille}} - T_{\text{air}})$ mesurée sur les arbres sains, pendant l'été, est supérieure à la différence équivalente mesurée sur les arbres infestés ; cette situation s'inverse le reste de l'année. L'écart type des températures journalières mesurées par le thermoradiomètre ne dépasse pas 1 °C pour les arbres témoins. En revanche, l'écart type des températures mesurées sur les arbres infestés atteint 2 °C. Les écarts types des écarts de températures varient entre les différents arbres observés de la même manière que ceux obtenus pour les températures.

L'écart $(T_{\text{feuille}} - T_{\text{air}})$ permet la mise en évidence du stress hydrique pendant

71 jours par comparaison des valeurs obtenues sur des arbres infestés et sur des arbres indemnes (figure 5). Mais cet écart n'est pas stable et s'estompe après une pluie ou lorsque la nébulosité est très élevée. Dans ces conditions, le cumul de

cet écart permet une meilleure évaluation du stress hydrique (figure 6).

La figure 6 montre que l'écart de température $(T_{\text{feuille}} - T_{\text{air}})$ cumulé diminue d'abord, devient négatif en automne, puis augmente pendant le reste de la période de l'essai. L'écart de température entre les feuilles des arbres sains et celle des arbres infestés augmente progressivement de l'automne jusqu'à la fin du printemps, puis il décroît pendant la période estivale (figure 6). Étant donné que la différence de comportement des arbres est liée seulement à l'infestation par le nématode, on peut dire qu'un changement de pente du cumul relatif aux arbres infestés par rapport à la pente relative aux arbres sains, est révélateur du phénomène parasitaire sous-jacent.

L'initialisation du cumul des écarts après chaque période de pluie montre des épisodes saisonniers de ce stress parasitaire (figure 7). Une période de stress est décelée, d'abord, en automne entre le 17 septembre et le 10 octobre. Durant cette période, les écarts de température $(T_{\text{feuille}} - T_{\text{air}})$ mesurés sur les feuilles appartenant aux arbres infestés sont plus élevés que ceux mesurés sur les feuilles des arbres sains. Pendant l'hiver et le printemps, l'évolution des écarts est similaire. Aucun stress n'apparaît, d'autant plus que ces épisodes correspondent à des périodes pluvieuses. En revanche, au cours de l'été, période de diminution de

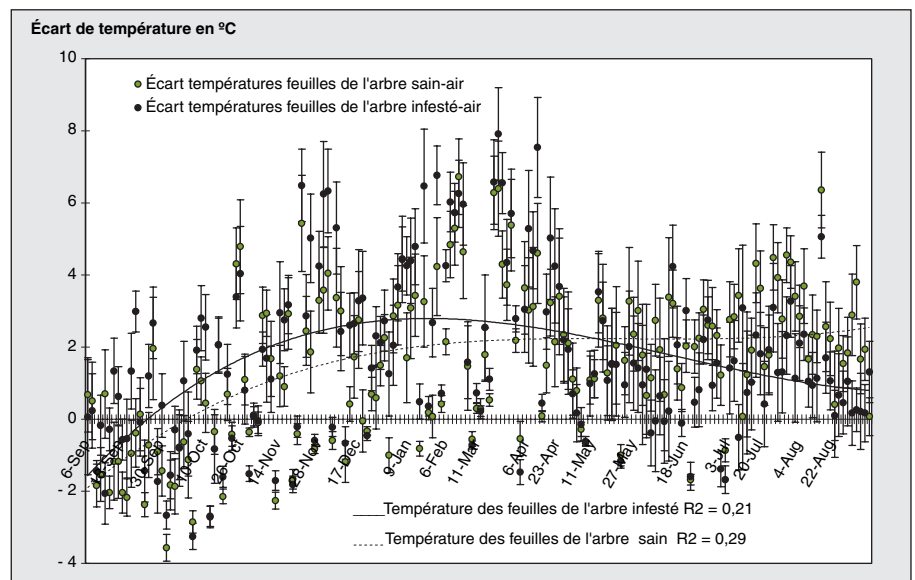


Figure 5. Évolution annuelle de l'écart entre les températures des feuilles des arbres infestés et sains et l'air.

Figure 5. Annual gap evolution between infested and noninfested Citrus tree leaves and air temperature. Les barres correspondent aux intervalles de confiance à $p = 0,05$. R^2 est le coefficient de détermination.

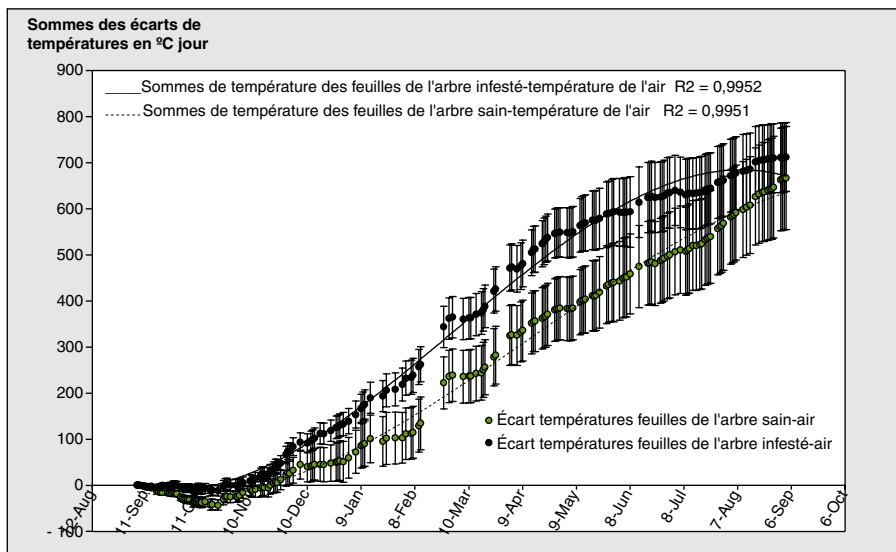


Figure 6. Évolution de la somme des écarts de températures entre les feuilles et l'air.

Figure 6. Evolution of temperature difference sums between infested and noninfested citrus tree leaves and the air.

Les barres correspondent aux intervalles de confiance à $p = 0,05$. R^2 est le coefficient de détermination.

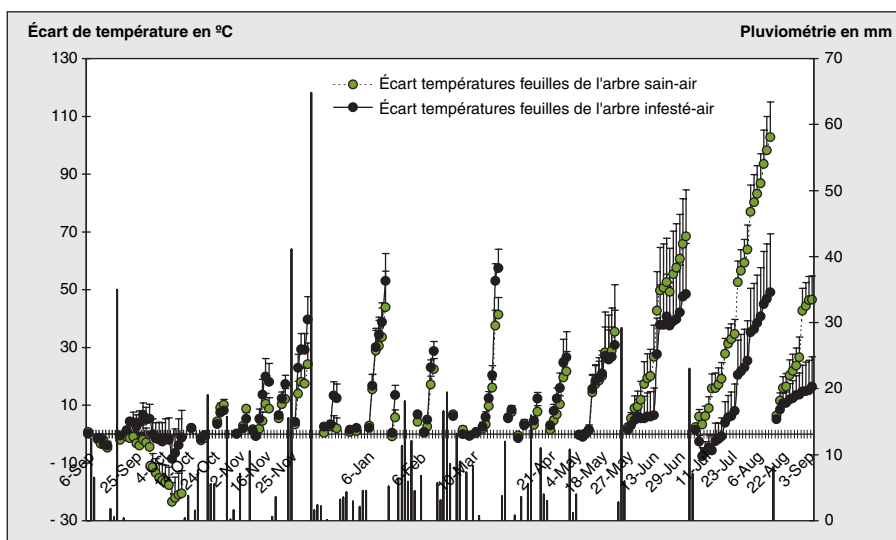


Figure 7. Évolution de la pluviométrie et des écarts cumulés entre les températures des feuilles et l'air par saison.

Figure 7. Evolution of rainfall and of cumulated differences between leaves and air temperatures.

Les barres correspondent aux intervalles de confiance à $p = 0,05$.

l'humidité de l'air, un écart apparaît entre les deux types de feuilles. Cet écart est plus important pour les arbres sains que pour les arbres infestés.

Discussion

La thermométrie infrarouge a permis d'évaluer un écart entre la température de

feuilles de *Citrus* infestés et celle de plants sains dans des conditions où l'écart de la température du sol et de l'air entre les deux types d'arbres est nul et ne participe donc pas aux écarts de mesures entre les feuilles.

La mesure des écarts entre la température de la feuille et celle de l'air pendant la période d'insolation intense permet de mieux comparer un stress hydrique saisonnier des arbres infestés et des arbres

sains que dans le cas où la température de la feuille est mesurée indépendamment de celle de l'air [40-42]. L'écart de température ($T_{\text{feuille}} - T_{\text{air}}$) cumulé n'a permis de déterminer un écart entre les plants infestés et les plants indemnes que pendant les périodes où l'humidité relative de l'air est faible (été et automne). Pendant l'hiver et au printemps, le déficit de saturation de l'air est, semble-t-il, trop faible pour déceler un écart de températures entre les deux types de plants [42]. L'écart de température cumulé a permis de déceler un stress parasitaire en automne, période pendant laquelle les racines nourricières supportent le plus de femelles. Ce stress hydrique est caractérisé par un écart élevé des températures des arbres infestés par rapport aux plants témoins. Un second épisode de stress hydrique survient pendant l'été. Il se caractérise par un écart des températures plus élevé chez les arbres indemnes. Cet épisode pourrait être expliqué par l'état des racines. En été, les arbres infestés présentent un chevelu racinaire peu abondant [43] mais avec un bilan d'absorption de l'eau amélioré avec la chute de la population du nématode et l'initiation de nouvelles racines [44]. En revanche, les arbres sains présentant un système racinaire superficiel bien développé avec une absorption élevée sont rapidement en situation de stress hydrique. La fermeture des stomates permettrait l'élévation de la température de la feuille, ce qui expliquerait l'écart de température de la feuille avec celle de l'air. Avec l'élévation de l'évaporation du sol, à laquelle s'ajoutent la transpiration et la faible humidité relative de l'air, la réserve en eau des sols sains en surface où sont situées la plupart des racines nourricières est rapidement épuisée et les arbres, pendant la période de mesure où l'insolation est intense, sont en situation de stress. Cet épisode montre que les arbres installés en bacs sont rapidement en situation de stress. L'effet de ce nématode est similaire aux attaques de *Globodera rostochiensis* sur pomme de terre qui limite l'absorption en eau et les sels minéraux par la plante à cause d'un développement racinaire détruit ou altéré [17]. Une situation similaire est obtenue sur du blé tendre d'hiver infesté par *Heterodera avenae* lors de la comparaison par l'indice de stress pathologique PSI (*Pathological Stress Index*) d'une parcelle infestée et d'une parcelle témoin. Contrairement à *Tylenchulus semipenetrans*, l'infestation par *Heterodera avenae* a pour conséquence

l'édification d'un système racinaire excessif superficiel [2]. Pendant un épisode de sécheresse succédant à une période de pluie, les plants infestés sont en situation de stress hydrique avec leur système racinaire superficiel excessif alors que les plants sains sont très peu stressés avec un système racinaire profond.

Conclusion

Ce travail a permis de confirmer que la température de surface mesurée par la thermoradiométrie est très sensible au stress et serait un paramètre pertinent pour la détection de stress parasitaire.

Les indices de stress *Temperature Stress Day* et Somme des différences de température fondés sur la comparaison de la température de surface des arbres infestés et des arbres sains ne permettent pas, dans notre cas, de déterminer un stress parasitaire. En revanche, l'indice *Stress Degree Day* calculé à partir de la différence des températures de surface et de l'air est sensible dans nos conditions au stress hydrique lié à une infestation par *T. semipenetrans*.

Cependant, le diagnostic est fondé sur la comparaison des mesures effectuées sur arbres sains et infestés situés dans un même environnement pédoclimatique. La perspective d'un diagnostic direct sans faire référence à une culture de référence pose le problème de la modélisation de la température de surface d'un arbre pris dans son contexte. On peut noter que dans cette étude on a mis en évidence des écarts ($T_{\text{feuille}} - T_{\text{air}}$) atteignant 2 °C entre arbres sains et infestés lors de journées particulières situées dans des périodes sans pluviosité (début octobre, fin janvier, mi-avril, fin août). ■

Remerciements

Les auteurs remercient le professeur M. Mechergui qui a bien voulu nous fournir le radiothermomètre, ainsi que le Groupement interprofessionnel des agrumes et de fruits (GIAF) qui a financé ce travail de recherches sur les Citrus en Tunisie.

Références

1. Nilsson HE. Hand-held radiometry and IR-thermography of plant disease in field plot experiments. *Remote Sens* 1991 ; 12 : 545-57.
2. Lili Z. *Télé-détection infrarouge thermique et quantification de stress hydriques d'origine pathologique ; validation sur blé infesté par Heterodera avenae WOLL*. Thèse doctorat, école nationale supérieure agronomique de Rennes (Ensar), France, 1993, 245 p.
3. Cohen S, Cohen Y. Field studies of leaf conductance response to environmental variables in *Citrus*. *J App Ecol* 1983 ; 20 : 561-70.
4. Idso SB, Jackson RD, Reginato RJ. Remote sensing of crop yields. *Science* 1977 ; 196 : 19-25.
5. Jackson RD, Reginato RJ, Idso SB. Wheat canopy temperature : a practical tools for evaluating water requirement. *Water Res* 1977 ; 13 : 165-74.
6. Clawson KL, Blad BL. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. *Agron J* 1982 ; 74 : 311-6.
7. Gardner BF, Blad BL, Watts DG. Plant and air temperatures in differentially irrigated corn. *Agric Meteor* 1981 ; 25 : 207-17.
8. Idso SB, Jackson RD, Reginato RJ, Reicosky DC, Hatfield JL. Determining soil-induced plant water potential depressions in alfalfa by means of infrared thermometry. *Agron J* 1981 ; 73 : 826-30.
9. Jackson RD, Idso SB, Reginato RJ, Pinter PJ. Canopy temperature as crop water stress indicator. *Water Res* 1981 ; 17 : 1133-8.
10. Dieng SB. *Détection précoce d'une attaque de piétin-verse par radiothermométrie dans l'infrarouge thermique*. Thèse docteur ingénieur de l'école nationale supérieure agronomique de Rennes (Ensar), 1988, 89 p.
11. Dieng SB, Duchesne J, Lili Z, Nicolas H, Rivoal R. Détection de stress hydrique d'origine pathologique par radiothermométrie différentielle. *Bulletin du GFHN* 1989 ; 25 : 74-5.
12. Duchesne J, Lili Z, Nicolas H, Boutemy G. *Température de surface des couverts et protection des cultures*. ANPP-3e conférence internationale sur les maladies des plantes. Bordeaux, 3, 4, 5 décembre 1991 : 129-40.
13. Lili Z. *Comportement hydrique de couverts végétaux et radiothermométrie : application à la télé-détection de stress pathologique*. Mémoire de fin d'études de cycle de spécialisation de l'Institut national agronomique de Tunisie (Inat), école nationale supérieure d'agriculture de Rennes (Ensar), 1989, 128 p.
14. Lili Z, Duchesne J, Nicolas H, Rivoal R. Détection infrarouge thermique des maladies du blé d'hiver. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin* 1991 ; 21 : 659-72.
15. Luquet D. *Suivi de l'état hydrique des plantes par infrarouge thermique-Analyse expérimentale et modélisation 3D de la variabilité des températures au sein d'une culture en rang de cotonniers*. Thèse PhD, Institut national agronomique de Paris-Grignon (Ina-PG), 2002, 167 p.
16. Nicolas H, Rivoal R, Duchesne J, Lili Z. Detection of *Heterodera avenae* infestations on winter wheat by radiothermometry. *Nematology* 1991 ; 14 : 309-15.
17. Evans K, Parkinson KJ, Trudgill DL. Effects of potato cyst-nematodes on potato plants. Effects on the water relations and growth of a resistant and susceptible variety. *Nematologica* 1975 ; 21 : 273-80.
18. Fatemy F, Evans K. Effects of *Globodera rostochiensis* and water stress on shoot and root growth and nutrient uptake of potatoes. *Nematology* 1986 ; 9 : 181-4.
19. Kirkpatrick TL, Oosterhuis DM, Wullschlegel SD. Interaction of *Meloidogyne incognita* and water stress in two cotton cultivars. *Nematology* 1991 ; 23 : 462-7.
20. Rahi GS, Rich JR, Hodge C. Effect of *Meloidogyne incognita* and *M. javanica* on leaf water potential and water use of tobacco. *Nematology* 1988 ; 20 : 516-22.
21. Seinhorst JW. Water consumption of plants attacked by nematodes and mechanisms of growth reduction. *Nematologica* 1981 ; 27 : 34-51.
22. Volkmar KM. Nematode tolerance increases drought stress in young oat plants. *Nematologica* 1991 ; 37 : 304-11.
23. Wallace HR. Effects of nematode parasites on photosynthesis. In : Veech JA, Dickson DW, eds. *Visitas on Nematology*. Hyattsville (Maryland, États-Unis) : Society of Nematology, 1987 : 253-9.
24. Wilcox-Lee DA, Loria R. Effects of soil moisture and root knot nematode, *Meloidogyne hapla* (Chitwood), on water relations, growth, and yield in snap bean. *J Am Soc Hortic Sci* 1987 ; 112 : 629-33.
25. Wilcox-Lee DA, Loria R. Water relations, growth, and yield in two snap bean cultivars infected with root knot nematode, *Meloidogyne hapla* (Chitwood). *J Am Soc Hortic Sci* 1986 ; 111 : 34-8.
26. B'Chir MM. Organisation ultra-structurale du site trophique induit par *Tylenchulus semipenetrans* dans les racines de *Citrus*. *Rev Nematol* 1988 ; 11 : 213-22.
27. Duncan LW, Cohn E. Nematode parasites of *Citrus*. In : Luc M, Sikora A, Bridge J, eds. *Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture*. Wallingford (Royaume-Uni) : CAB International, 1990 : 321-46.
28. Duncan LW, Eissenstat DM. Responses of *Tylenchulus semipenetrans* to *Citrus* fruit removal : Implications for carbohydrate competition. *J Nematol* 1993 ; 25 : 7-14.
29. Maggenti AR, Luc M, Raski DJ, Fortuner R, Geraert E. A reappraisal of *Tylenchina* (Nemata). 2. Classification of the suborder *Tylenchina* (Nemata : Diplogasteria). *Rev Nematol* 1987 ; 10 : 135-42.
30. Abd-Elgawad MN, Youssef MM, Shamseldin MM. Observations on the population fluctuations on the *Citrus* nematode on Calamander orange in Egypt. *Pakistan J Nematol* 1994 ; 12 : 87-94.
31. Al-Sayed AA, Abdel-Hameed SH, El-Nagar HI. Population dynamics of *Tylenchulus semipenetrans* in relation to *Citrus* and soil temperature. *Bull Fac Agric* 1993 ; 44 : 183-90.

32. B'Chir MM, Kallel S. *Effects of Tylenchulus semipenetrans on the morphogenesis of juvenile Citrus trees*. Proceedings of the 7th Congress of the International Society of Citriculture, 1992, Catania (Italy): 62-76.
33. Kallel S, Jaziri A, B'Chir MM. Relation entre l'infestation de *Tylenchulus semipenetrans* Cobb, la morphogénèse et la productivité de *Citrus sinensis* (maltaises) greffées sur *C. aurantium* Osbeck (bigaradier). *Bull OEPP/EPPO Bull* 2001 ; 31 : 105-10.
34. Loussert R. *Les agrumes. 1 Arboriculture. Techniques Agricoles Méditerranéennes*. Paris : Lavoisier, 1987 ; 113 p.
35. Duncan LW. The spatial distribution of *Citrus* feeder roots and of *Citrus* nematode, *Tylenchulus semipenetrans*. *Rev Nematol* 1986 ; 9 : 233-40.
36. Macaron J. *Contribution à l'étude du nématode phytophage Tylenchulus semipenetrans*. Thèse PhD, université des sciences et techniques du Languedoc (USTL), Montpellier (France), 1972, 190 p.
37. Eyal Z, Blum A. Canopy temperature as correlative measure for assessing host response to *Septoria tritici* Blotch of wheat. *Plant Dis* 1989 ; 73 : 468-71.
38. Nilsson HE. Remote sensing and image analysis in plant pathology. *Ann Rev Phytopathol* 1995 ; 15 : 489-537.
39. Fuchs M, Tanner CB. Infrared thermometry of vegetation. *Agron J* 1966 ; 58 : 597-601.
40. O'toole JC, Turner NC, Namico OP, Dingkuhn M, Gomez KA. Comparison of some water stress measurement methods. *Crop Sci* 1984 ; 24 : 1121-8.
41. Walker GK, Hatfield JL. Stress measurement using foliage temperatures. *Agron J* 1983 ; 75 : 623-9.
42. Wiegand CL, Namken LN. Influences of plant moisture stress, solar radiation, and air temperature on cotton leaf temperature. *Agron J* 1966 ; 58 : 582-6.
43. Thomas EE. *The citrus nematode, Tylenchulus semipenetrans*. Berkeley : University of California Publications, 1923 ; 34 p.
44. Duncan LW, Noling JW. The relationship between development of the *Citrus* root system and infestation by *Tylenchulus semipenetrans*. *Rev Nematol* 1987 ; 10 : 61-6.