

Effet comparé de l'inoculation par *Pyrenophora teres f. maculata* et/ou la défoliation simultanée des quatre feuilles supérieures, sur le rendement grain de l'orge

Jebbouj R.¹ et Yousfi B.^{2*}

1- Université Hassan 1^{er}, Faculté des Sciences et Techniques, Km 3,5, Route de Casablanca, BP 577 Seltat- Maroc.
(jebbouj_rajaa@yahoo.fr)

2- Laboratoire de phythologie des céréales, Unité de Recherche: Protection des cultures et lutte intégrée, Centre Régional de la Recherche Agronomique de Seltat, BP 589, Seltat, Maroc.
(Elyousfi_brahim@yahoo.com)

* Pour la correspondance, s'adresser à Brahim El. Yousfi.

Elyousfi_brahim@yahoo.com

tél: 023 72 93 00

Fax: 023 72 93 06 / 023 72 09 27

Résumé

L'amélioration de la production de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) se complèterait, entre autres, par une meilleure compréhension de la physiologie d'élaboration de son rendement grain. La défoliation des quatre dernières feuilles de l'orge aux stades gonflement et épiaison, en conditions saines et sous inoculation avec *Pyrenophora teres* f. *maculata*, avait pour but d'évaluer leur contribution au rendement grain en état sain et sous stress biotique. La sévérité de la rayure réticulée a augmenté avec l'âge des plantes aussi bien qu'avec l'âge des feuilles. La sévérité moyenne de la maladie, estimée à 42% sur les quatre feuilles, a réduit le rendement grain de 43% pour les brins-mâtres et de 36% pour la totalité des talles. Les pertes en rendement dépendent du type de talle étudié et du stade de croissance de la plante. Les pertes en rendement sont surestimées de plus de 10% lorsqu'elles sont évaluées sur les brins-mâtres seulement. De plus, les pertes en poids des grains ont été d'autant plus importantes que la défoliation et/ou l'inoculation ont été appliquées au stade gonflement qu'au stade épiaison. Notre étude a mis en évidence que l'effet de la défoliation sur le rendement grain n'équivalait pas celui de l'inoculation. L'effet de la sévérité de la maladie a été supérieur à celui dû à la perte de la totalité de la surface foliaire relative aux quatre dernières feuilles saines et qui a été simulée à 100% de sévérité. De plus, la contribution au rendement de ces quatre feuilles sous stress biotique n'a pas pu contrecarrer l'effet de la maladie. Le rendement grain a été lié positivement à la somme des surfaces saines au niveau des quatre dernières feuilles infectées selon l'équation: $y = 8.65 + 0.185x$ ($R^2=0.67$). L'usage de ces résultats pour l'amélioration de l'évaluation de l'effet de la maladie sur le rendement est discuté.

Mots clés: Orge (*Hordeum vulgare* L.), Rayure réticulée, *Pyrenophora teres* f. *maculata*, Défoliation, Inoculation, Rendement grain.

تأثير استئصال الأوراق الأربعة العليا للشعير على المردودية ومقارنة استئصال الأوراق بتأثير التلقيح بالفطر *Pyrenophora teres f. maculata*

رجاء جبوج¹ وإبراهيم اليوسفي²

- 1 - جامعة الحسن الأول، كلية العلوم والتقنيات، كلم 3.5 طريق الدار البيضاء ص- 557 سطات
2 - المركز الجهوي للبحث الزراعي لسطات، ص ب 589، سطات - المغرب

ملخص

يعد فهم فيزيولوجية تكون المردودية عند الشعير (*Hordeum vulgare* L.) واحدا من بين عدة أساليب لتحسين إنتاج هذه الزراعة. لقد تم استئصال أوراق نبات الشعير الأربعة الأخيرة في طور الانتفاخ والسنبلة تحت تأثير التلقيح بالفطر المسبب لمرض التبقع الشبكي *Pyrenophora teres f. maculata* وأيضا في غياب هذا التلقيح بهدف تقدير مساهمتها في المردودية. تبين أن حدة مرض التبقع الشبكي تزداد مع كبر سن النبات وكذلك مع سن الأوراق. كان معدل حدة المرض على مستوى الأوراق الأربعة يقدر بـ 42% وقد تسبب في خسائر في وزن الحبوب تقدر بمعدل 43% بالنسبة للسيقان الرئيسية و 36% بالنسبة لمجموع سيقان النبات. لذلك فإن تقييم الخسائر في المردودية ينبغي على نوع سيقان النبات بالإضافة إلى طور نموهم. حصر تقييم الخسائر على سيقان النبات الرئيسية يفوق المعدل الحقيقي بنسبة 10% تبين كذلك أن الخسائر في وزن الحبوب الناتجة عن التلقيح بالفطر المسبب لمرض التبقع الشبكي أو استئصال الأوراق في طور الانتفاخ كانت أكبر من تلك التي كانت في طور السنبلة. أثبتت الدراسة أن تأثير استئصال الأوراق الأربعة الأخيرة على المردودية لا يعادل تأثير التلقيح بالفطر (*P. teres*) فقد فاق تأثير حدة المرض تأثير فقدان الأوراق الأربعة السليمة والذي افترض أنه يعادل 100% من حدة المرض. إضافة إلى ذلك، فقد تبين من خلال استئصال الأوراق الأربعة الأخيرة بعد تلقيح النبات بالفطر (*P. teres*) أن مساهمة هذه الأوراق في المردودية لا تخفف من الخسائر أو من حدة المرض. توصلنا كذلك إلى أن المردودية مرتبطة ايجابيا بمجموع المساحات الورقية السليمة على مستوى الأوراق الأربعة الأخيرة المصابة وذلك حسب المعادلة:

$$y = 8.65 + 0.185x \quad (R^2 = 0.67)$$

بسنحسب استغلال هذه النتائج في تحسين تقييم تأثير مرض التبقع الشبكي على المردودية.

مفتاح الكلمات: الشعير (*Hordeum vulgare* L.)، مرض التبقع الشبكي، *Pyrenophora teres f. maculata*، استئصال الأوراق، التلقيح، المردودية.

Compared effect of inoculation by *Pyrenophora teres f. maculata* and/or defoliation of upper four leaves on grain yield of barley

Abstract

Improvement of barley (*Hordeum vulgare L.*) production will be sustained by a better understanding of the physiology of its grain yield elaboration. Removing the last four leaves of barley at booting and heading, under healthy and diseased conditions, aimed to evaluate their contribution to grain yield. Net blotch severity induced by *Pyrenophora teres f. maculata*, increased with plant age as well as with leaf age within plant canopy. Disease severity estimated to 42% decreased grain yield by 43% on main stems and by 36% on all tillers. Estimation of grain yield losses depended on type of tiller and on plant growth stage. Grain yield losses assessed on main stems were overestimated by more than 10%. Moreover, grain yield losses induced by defoliation and/or inoculation were more important when applied at booting than at heading. The effect of defoliation was not equivalent to that of inoculation. The effect of disease severity was greater than the effect of the removal of healthy leaves. Furthermore, contribution of the last four leaves under biotic stress did not help the plants to overcome disease effect. In this regard, their loss did not affect greatly the grain yield. The later trait was positively related to the sum of healthy leaf areas of the four upper leaves infected, according to the equation: $y = 8.65 + 0.185x$ ($R^2=0.67$). The implication of these results for evaluation of disease severity in relation to grain yield is discussed.

Key words : Barley (*Hordeum vulgare L.*), net blotch, *Pyrenophora teres f. maculata*, Defoliation, Inoculation, Grain yield.

Introduction

L'orge (*Hordeum vulgare* L.) est une culture très répandue dans les zones marocaines à climat semi-aride. En plus de la faiblesse et l'irrégularité des précipitations ainsi que les hautes températures qui peuvent altérer le développement et le rendement des céréales, l'orge est attaquée par de nombreuses maladies foliaires en l'occurrence la rayure réticulée. En conséquence, son potentiel de production demeure sous exprimé et les rendements réalisés ne dépassent guère les 10 qx/ha en moyenne. Cependant, l'étude menée par El Yousfi (2002) a mis en évidence que les potentialités de production de l'orge dans les dites zones peuvent atteindre les 30 qx/ha.

Les maladies foliaires de l'orge au Maroc peuvent occasionner des pertes en rendement de 10 à 55 % (Ouattar et Amezciane, 1989). La rayure réticulée constitue l'une des maladies occupant les premiers rangs dans la fréquence des maladies de l'orge autant que l'oïdium et la rouille (Ezzahiri et al., 1996). Son agent causal est le champignon *Pyrenophora teres* Drechs. f. *teres* Smedeg. [anamorph: (*Dreschlera teres* (Sacc.) Shoem. f. *teres* Smedeg.) (*P. teres*). Les pertes dues à cette maladie varient en moyenne entre 14 et 29% et peuvent atteindre les 39% chez les variétés sensibles (El Yousfi et Ezzahiri, 2002). Ces pertes dépendent des régions des variétés, des conditions climatiques de chaque saison culturale ainsi que du stade de croissance de la plante qui coïncide avec le développement de la maladie (Boulif, 1975, El Yousfi et Ezzahiri, 2002). En général, les pertes se caractérisent par la réduction à la fois de la matière sèche et du poids de mille grains (El Yousfi, 2002). Le développement de la maladie dès le début de la phase végétative est à l'origine de pertes importantes qui frôlent les 50%, sous serre, et sont d'autant plus importantes que l'hôte est sensible (Jebhouj, 2002). La phase reproductive incarne également une grande importance pour l'élaboration du rendement. Son importance réside dans l'étroite corrélation qui existe entre le nombre de grains/m², la matière sèche à l'anthesis et le rendement grain (El Mourid, 1988). Cependant, à partir de la floraison, la diminution de la matière sèche des feuilles puis, progressivement celle des tiges s'accompagne par la croissance de la biomasse des épis et plus précisément celle des grains. Durant cette phase, dans le cas du blé, la contribution de la feuille drapeau au remplissage des grains est d'une grande importance. Cette importance varie d'un environnement à l'autre ainsi que selon son âge. Sa contribution peut dépasser 50% (Auriau et al., 1992). Pour le cas du blé, la période des trois semaines avant l'anthesis constitue la phase la plus critique pour la détermination du nombre de grains et donc du rendement (Frederick et Bauer, 1999). Tout stress, tel que la sécheresse, l'attaque des insectes ou maladies survenant avant l'anthesis réduit la photosynthèse de la feuille drapeau, le nombre de grains/m² ou le nombre de grains/épi (Frederick et Bauer, 1999).

Plusieurs études ont abordé la contribution des différentes parties de la plante au rendement en conditions diverses. D'où dérive notre interrogation si la contribution de certaines parties de la plante au rendement serait toujours la même sous stress ou changerait-elle avec celui-ci. De là, l'objectif de cette étude, réalisée sous serre, a été d'évaluer la contribution des quatre feuilles supérieures de l'orge au rendement grain, en les défoliant lors des stades gonflement et épiaison en conditions saines et sous inoculations avec *Pyrenophora teres* f. *maculata* et en comparant, parallèlement, les effets de la défoliation et de la sévérité de la maladie sur le rendement grain.

Matériel et Méthodes

Matériel végétal

La variété d'orge utilisée est "Arig 8". C'est une variété marocaine à 6 rangs, produite par l'INRA et inscrite au catalogue officiel en 1973. C'est une variété moyennement sensible à *P. teres*, selon Douiyssi et al. (1998).

Conduite de l'essai

L'essai a été conduit sous serre et était entamé en début Novembre et durant deux saisons 2000-01 et 2001-02. Le semis a été effectué dans des pots de 20 cm de diamètre, à raison de 5 poquets par pot et 5 graines par poquet. Après la levée, 5 plantules ont été gardées par pot. Au cours de leur croissance, les plantes ont bénéficié des apports suffisants en eau et en fertilisant. Au stade plantule, un volume de 20 cm³ de solution fertilisante préparée avait été apporté aux plantes par pot. La composition de cette solution est 11g de NH₄NO₃, 3g de KH₂PO₄ et 3.64g de KCl par litre d'eau distillée. Les plantes ont poursuivi leur croissance sous la serre maintenue à une température comprise entre 17 et 25°C et une photopériode naturelle. A partir du stade fin montaison, la même solution fertilisante a été apportée à la dose de 40 cm³ par pot.

Isolement et multiplication de *Pyrenophora teres* f. *maculata*

L'isolement de *P. teres* f. *maculata* a été fait à partir des feuilles d'orge originaire de la région de Jemaat Shaim (province de Safi) et montrant les symptômes typiques de la forme «ovale» de la rayure réticulée. Des segments de 1 à 2 cm de ces feuilles ont été rincés 3 fois consécutives dans des bains d'eau distillée stérile (EDS) puis séchées entre deux rondelles de papier filtre. Ces fragments ont été ensuite incubés dans des boîtes de Petri renfermant du papier filtre imbibé d'EDS, à une température de 20±1°C, sous une lumière fluorescente et une photopériode de 12 heures. Après sporulation, un transfert monoconidial est réalisé sur le milieu gélosé V8 (Chedad, 1994). Après sporulation, d'autres transferts servent à la multiplication de *P. teres*.

Inoculum et procédure d'inoculation

Les spores de *P. teres* sont collectées des boîtes de Petri renfermant des cultures âgées de 10 jours. La surface de ces cultures est grattée au moyen d'un petit pinceau tout en y ajoutant un volume réduit d'EDS auquel est additionné du Tween 20 à raison d'une goutte par 100 ml d'eau distillée. La suspension obtenue est filtrée à travers une toile de tissu puis, la concentration de l'inoculum est ajustée à 20000 conidies/ml. L'inoculation a été faite aux stades gonflement et épiaison et réalisée au moyen d'un atomiseur manuel à raison de 30 cm³/pot. Chaque pot inoculé était couvert d'un sachet en plastique transparent, pour une durée de 3 à 5 jours, afin de maintenir une humidité relative élevée pour favoriser le processus d'infection.

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental adopté est le Split Plot avec 4 répétitions. Les parcelles primaires sont représentées par le stade végétatif (gonflement et épiaison) et les parcelles secondaires sont les traitements qui sont au nombre de quatre à savoir : 1) le témoin (non inoculé et non défolié, 2) Défolié, 3) Inoculé, et 4) Inoculé et Défolié après 10 jours.

Il est à rappeler que la défoliation a concerné les quatre feuilles supérieures et que la défoliation de ces dernières est simulée à une perte totale de leurs surfaces foliaires due à une sévérité de 100% causée par la rayure réticulée.

Observations et mesures

La sévérité (pourcentage de tissu infecté) a été évaluée sur les quatre feuilles séparément, au stade gonflement et épiaison le dixième jour après inoculation. Les surfaces de ces feuilles ainsi que celles des feuilles défoliées (sans inoculation) ont été mesurées manuellement en cm (longueur \times largeur à la base de la feuille) ainsi qu'au moyen du planimètre électronique (L.I-3100C, Area meter, LI, Cor inc. Lincoln, Nebraska, USA).

Nous avons désigné par la surface saine la surface foliaire restée intacte et saine après l'inoculation des plantes par *P. teres*. Elle a été calculée pour chaque type de feuille selon la formule suivante: **Surface saine = surface mesurée - (surface mesurée \times sévérité)/100.**

Les dates de maturité physiologique des plantes ont été notées pour tous les traitements afin d'en déduire l'étendue du cycle de croissance. A maturité, le nombre des épis pleins et vides ainsi que le poids de la matière sèche ont été évalués pour chaque traitement. Le poids et le nombre de grains des épis de cinq brins-mâtres, dont chacun dérivait d'une des cinq plantes par pot (traitement), étaient déterminés séparément des épis du reste des talles. Les données de rendement analysées correspondent au rendement moyen des cinq plantes par pot.

Analyse statistique

Les données ont été analysées au moyen du logiciel SAS V6.12 (Statistical Analysis System) (SAS Institute, 1990). Elles ont fait l'objet d'analyse de la variance selon la procédure du Proc Gln et la comparaison des effets majeurs et des traitements au moyen du contrast. Etant donnée que l'effet de l'année n'a pas été significatif, les analyses ont été portées sur les moyennes des deux années. Le model appliqué est le stade, bloc, et bloc*stade (erreur 1), traitement, traitement*stade, et bloc*stade*traitement (erreur 2).

Résultats

Relation entre les surfaces foliaires mesurées et celles calculées

Les surfaces des feuilles, défoliées aux deux stades gonflement et épiaison et mesurées au moyen du planimètre électronique peuvent être exprimées en fonction des surfaces foliaires calculées à partir du produit longueur×largeur à la base des feuilles. Cette relation est linéaire et elle est décrite par l'équation suivante: $y = -2.18 + 0.71x$ ($R^2 = 0.90$, $p < 0.001$)

Avec y : Surface foliaire mesurée au moyen du planimètre (en cm^2).

x : Surface foliaire calculée à partir du produit longueur×largeur.

Cette relation a été établie pour les quatre types de feuilles saines ou infectées par la rayure réticulée (Figure 1). Cette équation a été définie au terme de la première année d'expérimentation et a servi, lors de la deuxième année, à déterminer les surfaces foliaires, en se basant uniquement sur les mesures morphobiométriques, sans avoir recours à les déterminer au moyen du planimètre électronique.

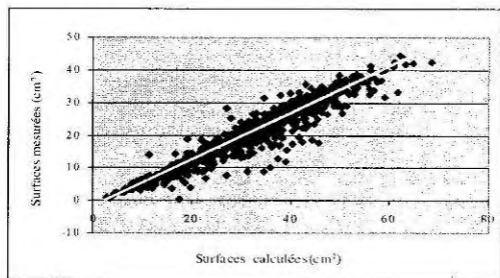


Figure 1 : Relation entre la surface foliaire des quatre dernières feuilles de la variété d'orge "Arig 8" mesurée au moyen du planimètre et celle calculée à partir du produit longueur×largeur.

Surfaces et sévérités de la rayure réticulée au niveau des étages foliaires

La sévérité de la rayure réticulée au niveau des feuilles des brins-maîtres s'est révélée similaire à celle des tiges secondaires au sein du traitement inoculation associée à la défoliation. Par contre, ces sévérités ont été significativement différentes selon le stade de croissance et l'étage foliaire. La sévérité a varié selon un gradient décroissant de la

quatrième feuille (F4) à la feuille drapeau (F1) pour les deux stades de croissance. C'est la quatrième feuille qui a exhibé la sévérité la plus élevée (70 et 84% respectivement aux stades gonflement et épiaison) suivie par la troisième feuille (respectivement 48 et 62%) alors que la sévérité la plus faible a été enregistrée au niveau de la feuille drapeau (respectivement 10 et 3%). Les sévérités de la rayure réticulée au niveau de la feuille drapeau (F1) et la feuille sous-jacente (F2) ont été statistiquement similaires aux deux stades gonflement et épiaison, tandis que la sévérité a augmenté pour les feuilles F3 et F4 allant du stade gonflement au stade épiaison (Tableau 1).

Les surfaces foliaires n'ont pas été significativement différentes d'un stade de croissance à l'autre. C'est la F3 qui a la surface foliaire la plus grande (29 cm²) suivie relativement par la F2, alors que la feuille drapeau (F1) a la surface foliaire la plus petite estimée à 14 cm² (Tableau 1).

La surface saine la plus importante a été celle de la F2 (21% en moyenne), suivie par celle de la F3 (13% en moyenne) tandis que la surface saine la plus petite correspond à celle de la F4 (5% en moyenne) (Tableau 1).

Tableau 1: Sévérités de la rayure réticulée, surface foliaire totale et surface foliaire saine au niveau des quatre dernières feuilles, aux deux stades gonflement et épiaison de la variété d'orge "Arig 8".

	Sévérité (en %)		Surface foliaire totale (en cm ²)	Surface foliaire saine (cm ²)	
	Gonflement	Epiaison		Gonflement	Epiaison
F1	10 d	3 d	14 c	12	13
F2	28 c	24 c	27 a	20	21
F3	48 b	62 b	29 a	15	11
F4	70 a	84 a	23 b	7	3

F1: Feuille drapeau, F2: Feuille drapeau-1, F3: Feuille drapeau-2, F4: Feuille drapeau-3. Les valeurs d'une même colonne suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes à 5% de probabilité, selon le Test de Duncan.

Inoculation, défoliation et leur effet conjugué sur le rendement et ses composantes

Le rendement grain des brins-mâtres ainsi que celui de la totalité des talles ont été significativement réduits sous l'effet de tous les traitements (défoliation, inoculation, et inoculation associée à la défoliation). L'effet de ces traitements a été significativement différent selon les deux stades de croissance gonflement et épiaison.

Pour les brins-mâtres, l'effet de l'inoculation associée à la défoliation a engendré des pertes importantes en poids de mille grains (PMG) estimées à 37%. Les pertes en cette composante dues à la défoliation seule ont été estimées à 21% tandis que l'inoculation l'a réduit de 11%. Le PMG des brins-mâtres a été réduit sous l'effet de l'inoculation et/ou la défoliation au stade gonflement, tandis qu'au stade épiaison ni l'inoculation ni la défoliation ni leur effet conjugué n'ont eu d'effet significatif sur le PMG des brins-mâtres (Tableau 2).

Le nombre de grains/épi des brins-mâtres a été significativement réduit sous l'effet conjugué de l'inoculation et de la défoliation. L'effet de ces deux traitements combinés a été supérieur à celui dû à l'inoculation ou la défoliation seule au stade gonflement. Cependant, les effets de ces deux traitements ont été similaires au stade épiaison. Les pertes dues à l'inoculation associée à la défoliation ont été estimées à 40 et 46% respectivement aux stades gonflement et épiaison. L'effet de l'inoculation seule a réduit cette composante respectivement de 23 et 51% aux mêmes stades de croissance alors que l'effet de la défoliation n'a été que de 3% seulement (Tableau 2).

Tableau 2: Pertes en rendement grain et ses composantes (en %) des brins-mâtres et de la totalité des plantes dues à l'inoculation associée à la défoliation, à l'inoculation seule et à la défoliation des quatre dernières feuilles de la variété d'orge "Arig 8" aux stades gonflement et épiaison.

	Pertes en rendement des brins-mâtres						Pertes en rendement total	
	PMG		Nb gr/épi		Pds		Pds total	
	Gf	Ep	Gf	Ep	Gf	Ep	Gf	Ep
Inoc-déf	37a	2a	40a	46a	58a	47a	60a	26a
Inoculé	11c	3a	23b	51a	37ab	49a	47a	24a
Défolié	21b	7a	3c	3b	20b	8b	34b	9b

Inoc-déf : Traitement inoculé défolié. PMG: Poids de mille grains. Nb gr/épi: Nombre de grains par épi. Pds: Poids des grains. Pds total: Poids des grains de la totalité des plantes incluant brins-mâtres et talles. Les valeurs d'une même colonne suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes à 5% de probabilité, selon le Test de Duncan.

Par ailleurs, l'effet conjugué de l'inoculation associée à la défoliation sur le poids des grains des brins-mâtres a été similaire à l'effet de l'inoculation seule aux deux stades gonflement et épiaison. L'effet conjugué de l'inoculation et de la défoliation ainsi que l'effet de l'inoculation ont réduit cette composante de 58 et 37% respectivement au stade gonflement et de 47% et 49% respectivement au stade épiaison. La défoliation, appliquée aux deux stades de croissance, a eu un effet moindre sur le poids des grains des brins-mâtres en comparaison avec l'inoculation seule ou l'inoculation associée à la défoliation. L'effet de la défoliation au stade gonflement a réduit cette composante de 20% en uniquement de 8% au stade épiaison.

Le poids des grains de la totalité des plantes, incluant brins-mâtres et talles secondaires, a été très réduit par l'effet conjugué de l'inoculation et de la défoliation. Les pertes ont atteint 60% lorsque l'inoculation jointe à la défoliation ont été appliquées au stade gonflement et 26% lorsqu'elles l'ont été au stade épiaison. L'effet de l'inoculation seule a réduit cette composante de 47% au stade gonflement et de 24% au stade épiaison. Les pertes en rendement grain dues à l'inoculation associée à défoliation ainsi que celles dues à l'inoculation seule ont été plus importantes que celles dues à la défoliation seule. Celle-ci appliquée au stade gonflement a causé des pertes en poids des grains de la totalité des plantes estimées à 34%. L'effet de l'ensemble de ces traitements a été d'autant plus important lorsqu'ils ont été appliqués au stade gonflement qu'au stade épiaison (Tableau 2).

Effet sur le cycle de croissance

Le traitement inoculation associée à la défoliation a allongé significativement le cycle de croissance des plantes par 7%, alors que l'inoculation seule ne l'a allongé que de 5%. Par contre, la défoliation n'a pas eu d'effet significatif sur le cycle de croissance.

Relation entre la surface foliaire saine, la sévérité et le rendement

Les équations reliant la sévérité au rendement grain total ont été déterminées pour les quatre type de feuilles (Tableau 3). Les huit données relatives à ces figures dérivent de la moyenne du traitement d'inoculation-défoliation sur les quatre blocs, pour les deux stades de croissance et les deux années d'expérimentation.

Tableau 3 : Equations liant les sévérités de la rayure réticulée au niveau des quatre feuilles supérieures de la variété d'orge "Arig 8" inoculée et défoliée aux stades gonflement et épiaison.

Feuilles	Equation liant la sévérité au rendement grain	Coefficient de détermination et probabilités
Feuille 1	$y = 22,73 - 0,25x_1$	R^2 0,08 ($p=0,505$)
Feuille 2	$y = 25,36 - 0,26x_2$	R^2 0,47 ($p=0,060$)
Feuille 3	$y = 26,35 - 0,16x_3$	R^2 0,65 ($p=0,015$)
Feuille 4	$y = 26,81 - 0,13x_4$	R^2 0,74 ($p=0,006$)

Feuille 1: Feuille drapeau. Feuille 2: Feuille drapeau -1. Feuille 3: Feuille drapeau -2. Feuille 4: Feuille drapeau -3. y: Le rendement grain. x_i : la sévérité de la rayure réticulée sur Fi. (i allant de 1 à 4).

La relation liant la sévérité de la rayure réticulée sur la feuille drapeau (F1) et sur la F2 au rendement grain a eu une tendance négative mais non significative. Les coefficients de détermination obtenus pour ces deux feuilles ont été faibles et estimés à 0,08 pour la feuille drapeau (F1) et 0,47 pour la F2 (Figures 2 et 3).

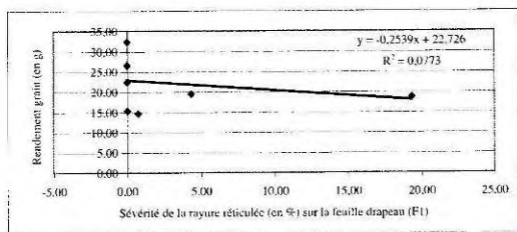


Figure 2: Relation entre le rendement grain et la sévérité de la rayure réticulée au niveau de la feuille drapeau (F1) de la variété d'orge Arig 8.

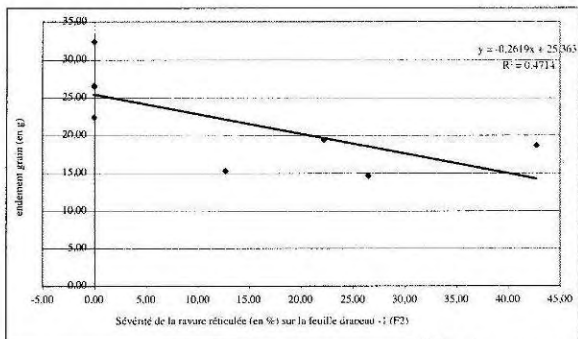


Figure 3: Relation entre le rendement grain et la sévérité de la rayure réticulée au niveau de la deuxième feuille supérieure (feuille drapeau -1) de la variété d'orge Arig 8.

Cependant, l'équation concernant la relation entre la sévérité au niveau de la quatrième feuille (F4) et le rendement grain a eu le coefficient de détermination (R^2) le plus important (0,74, $p=0,006$) suivi par celui correspondant à la troisième feuille ($R^2=0,65$, $p=0,015$) (Figures 4 et 5).

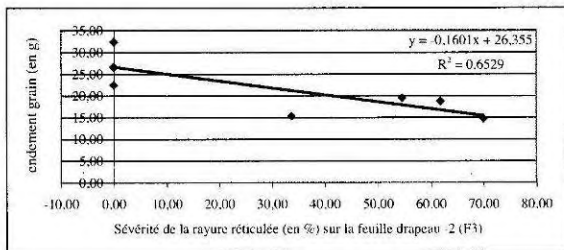


Figure 4: Relation entre le rendement grain et la sévérité de la rayure réticulée au niveau de la troisième feuille supérieure (feuille drapeau -2 de la variété d'orge Arig

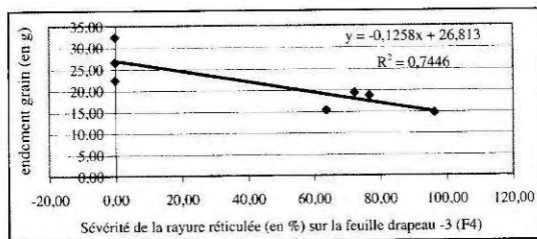


Figure 5: Relation entre le rendement grain et la sévérité de la rayure réticulée au niveau de la quatrième feuille supérieure (feuille drapeau -3) de la variété d'orge Arig 8.

En plus de la détermination de l'équation reliant les surfaces mesurées à celles calculées, les surfaces foliaires mesurées ont servi à calculer les surfaces saines selon la formule précitée. Les surfaces saines désignent, en effet, les tissus foliaires sains et supposés fonctionnels au niveau des feuilles infectées par la rayure réticulée. Concernant, la relation liant ces surfaces saines au rendement grain, c'est la somme de la totalité des surfaces saines au niveau des quatre dernières feuilles qui a été trouvée liée positivement au rendement (Figure 6) selon l'équation suivante:

$$y = 8,65 + 0,185x \quad R^2=0,67 \quad (p=0,01)$$

Avec: y : le rendement grain

x : la somme des surfaces saines sur les quatre feuilles supérieures.

Ainsi, pour un 1 cm^2 de surface foliaire saine évaluée au niveau des quatre dernières feuilles de la plante, le rendement grain augmente de $0,185\text{g}$.

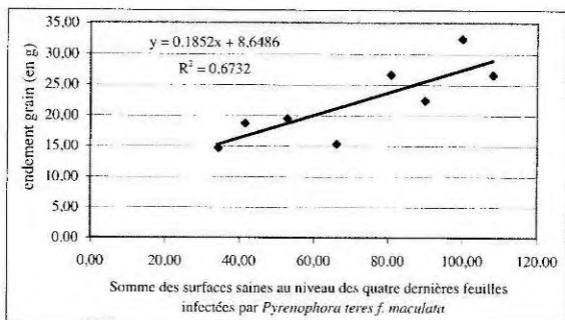


Figure 6 : Relation entre le rendement grain et la somme des surfaces saines au niveau des quatre feuilles supérieures de la variété d'orge Arig 8, après inoculation par *Pyrenophora teres f. maculata*.

Discussion

La défoliation est une manipulation de la morphologie de la plante et elle a été employée avec succès pour divers objectifs, sur différentes cultures et dans plusieurs travaux de recherche qui s'intéressent à investir la physiologie de croissance d'une culture et son rendement (Ouattar, 1985; EL Mzouri, 1994; Muro et al., 2000; Abbad et al., 2004; Buntin et al., 2004).

Dans la présente étude, la défoliation simultanée des quatre dernières feuilles de l'orge, après l'émergence de la feuille drapeau, visait à évaluer la contribution de leurs surfaces foliaires au rendement grain lors de la phase reproductive du cycle de croissance. Cela s'inspire particulièrement du rôle important de la dernière et de l'avant-dernière feuille au remplissage des grains (Saghir et al., 1968). Chez le blé dur, la feuille drapeau, en plus de l'épi, est considérée comme étant l'organe photosynthétique principal pour le remplissage des grains (Evans, 1975). Elle a été décrite comme étant la source principale des produits de la photosynthèse importés par les grains lors de leurs remplissage (Rawson et al., 1976). Pour la même espèce, en plus de la feuille drapeau, la contribution des trois feuilles supérieures au rendement a été rapportée d'une grande importance et que toute perte de leurs surfaces foliaires peut engendrer des pertes significatives en rendement (Thomas et al., 1989).

Diverses études ont démontré la variation de la réaction de la plante à la maladie selon le stade de croissance (jeune ou adulte) et que la sensibilité des tissus foliaires augmente avec l'âge de la plante (EL Yousfi, 2002; Tekauz, 1986; Populer, 1978). Dans notre étude, la sévérité de la rayure réticulée au niveau de la feuille drapeau et la feuille sous-jacente fut restée faible et similaire aux deux stades gonflement et épiaison au moment où elle s'est accentuée au stade épiaison pour la troisième et quatrième feuille supérieure. Nous pouvons tout de même approuver cette tendance d'augmentation de la sévérité de la maladie avec l'âge de la plante. Des inoculations avec *P. teres* f. *maculata*, durant cinq stades de croissance (plantule, tallage, montaison, gonflement et épiaison) de la même variété Arig8 en plus d'une autre variété d'orge, reconnue plus résistante à la rayure réticulée (Taffa), ont révélé une même tendance d'évolution de la sévérité selon un gradient croissant avec les stades de croissance (Jebbouj, 2002). La différence entre ces deux variétés réside dans les taux de sévérité de la rayure réticulée qui dépendent de leurs niveaux de résistance à la maladie. De même pour Bermudagrass, qui est une plante fourragère sauvage poussant dans le sud-est américain, la sévérité d'attaque de plusieurs espèces (*Bipolaris*, *Exserohilum*, *Curvularia* et *Drechslera spp*) sur des feuilles de cette plante a augmenté progressivement allant des jeunes feuilles à celles plus âgées (Pratt, 2003). En plus du niveau de résistance de l'hôte et la virulence du pathogène, la variabilité de la réponse de l'hôte à la maladie peut dépendre, aussi, du stade de croissance, de la température lors de l'infection et la variation de la lumière (Khan and Boyd, 1969; Doulyssi et al., 1998).

Les surfaces foliaires trouvées similaires aux deux stades de croissance gonflement et épiaison prouve que les feuilles atteignent leurs surfaces optimales à partir du stade gonflement. Concernant la relation entre les surfaces foliaires mesurées et celles calculées, une formule presque similaire accordée à Quarrie et Jones (1977) et utilisée et rapportée par Cruz-Aguado et al. (1999) concorde à la formule révélée dans nos résultats. Elle stipule que: Surface foliaire = longueur \times largeur maximal \times 0,78.

L'accentuation de la sévérité de la rayure réticulée de la feuille drapeau à la quatrième feuille au-dessous prouve que la sensibilité du tissu foliaire augmente avec son âge physiologique. Cela confirme des résultats rapportés par Tekauz, (1986); Abouelfida (2000); El Yousfi (2002); Jebbouj (2002). En effet, il a été rapporté que des feuilles issues d'un même étage foliaire, évaluées à deux stades différents mais ayant un même âge physiologique montrent des sévérités similaires (Al-Ali, 1988). La faible sévérité au niveau de la feuille drapeau renseigne aussi sur sa résistance à l'infection par *P. teres*. Cette feuille s'est toujours montrée résistante aux stades adultes dans des études antérieures et dans d'autres systèmes hôte/pathogène (Singh, 1963; Quayoum et Line, 1985; Tekauz, 1986). Tekauz (1986) avait interprété cela par le fait que les lésions réduites sur les feuilles supérieures laissent plus de tissu vert effectif, ce qui supporte ainsi le remplissage des grains donc le rendement grain.

En considérant les moyennes de pertes aux deux stades de croissance, les pertes en rendement grain dues à l'inoculation associée à la défoliation encaissées par les brins-mâtres, estimées à 53%, ont été supérieures à celles de la totalité des plantes estimées à 43%. De même dans le cas des pertes en rendement dues à l'effet de l'inoculation seule, les pertes encaissées par

les brins-mâtres ont été de 43% en moyenne et de 36% pour la totalité des plantes. Les pertes en rendement grain ont été donc d'autant plus importantes lorsqu'il s'agit des brins-mâtres que de la totalité des talles. Les talles de la même plante n'ont pas une réaction uniforme à l'infection par *P. teres* aux stades adultes à cause de la différence d'âges physiologiques. Généralement 3 à 5 talles d'un même pied constituent des talles principales alors que le reste est formé de talles immatures par rapport aux premières (Tekauz, 1986). De plus, le rendement grain des céréales est le résultat de l'élaboration de toutes les composantes de rendement et des compensations qui existent entre elles (Karrou et al., 2001). Les talles ont fait modérer les pertes en rendement via le phénomène de compensation entre les talles pour l'élaboration du rendement. Ainsi, les pertes en rendement grain évaluées sur les brins-mâtres seulement seraient surestimées puisque l'estimation des pertes serait biaisée de plus de 10%.

Au stade épiason, les pertes en poids des grains des brins-mâtres ainsi que de la totalité des plantes dues à la défoliation associée à l'inoculation n'étaient pas significativement différentes de celles dues à l'inoculation seule. Cela laisse déduire que les pertes dues à l'inoculation/défoliation sont occasionnées principalement par l'effet de l'infection avec *P. teres*. L'effet de la défoliation a été masqué par celui de l'infection. Cela démontre que les quatre feuilles supérieures des plantes infectées ne contribuent pratiquement pas au rendement.

Les pertes en rendement grain dues à l'inoculation qui ont été supérieures à celles dues à la défoliation prouvent que la perte des surfaces foliaires saines n'équivaut pas la perte de la même surface due à l'infection par *P. teres*. La sévérité de la rayure réticulée a été comprise, en moyenne, entre 7% et 77% au niveau de la feuille drapeau et la quatrième feuille sous-jacente respectivement, soit 42% en moyenne au niveau des quatre feuilles supérieures. Néanmoins, les pourcentages de tissus nécrosés et chlorosés par rapport aux tissus sains, laissant certaines surfaces foliaires saines, ont réduit le rendement plus que l'a fait l'élimination totale des surfaces foliaires. La maladie semble donc avoir un effet perturbant de la physiologie de l'hôte plus qu'une simple réduction des tissus photosynthétiques ou leur dessèchement prématuré qui apparaît dans les symptômes de la rayure réticulée décrit par Scott (1992). La contribution en carbohydrates des tissus foliaires fonctionnels au rendement sous stress biotique est déviée physiologiquement par l'hôte vers la lutte contre l'effet néfaste de la maladie.

L'étude du mécanisme de défense de l'orge face à une infection par *P. teres* a montré que la plante hôte synthétise des substances anti-fongiques. La vitesse d'induction de ces substances ou leur quantités de sécrétion détermine la réaction de la plante hôte. Le pathogène, par la suite, produit des phyto-toxines spécifiques qui jouent un rôle important dans l'apparition des symptômes (Keeling et Bantari, 1975). Trois majeures toxines (A, B et C) ont été isolées des cultures de *P. teres* f. *teres* et *P. teres* f. *maculata* vu leur faculté à produire expérimentalement des chloroses et des nécroses typiques de la rayure réticulée. Aussi, une forte corrélation entre la sensibilité des fragments foliaires issus des variétés d'orge à ces toxines et l'infection par le champignon *P. teres* a été rapportée par Weiergang (2002).

La diminution du nombre de grains/épi sous l'effet conjugué de l'inoculation et de la défoliation peut être attribuée à l'effet de l'inoculation puisque l'effet de la défoliation seule sur cette composante n'a pas été significatif. Cette réduction est attribuée principalement à la diminution des épillets fertiles sous l'effet de la maladie. Le poids de mille grains a été rapporté comme étant la composante de rendement la plus affectée par la rayure réticulée (Boulif, 1975 ; Jordan, 1981 ; EL Yousfi, 2002). Parallèlement, d'autres auteurs ont attribué les pertes en rendement à la diminution du nombre de grains/épi (Piening et Kaufmann, 1969).

L'effet des divers traitements de défoliation et/ou d'inoculation appliqués au stade gonflement sur le poids des grains de la totalité des plantes, trouvé supérieur à l'effet de ceux appliqués au stade épiaison, concorde avec des résultats rapportés dans l'étude de Buntin *et al.* (2004). Dans cette étude, le poids des grains et le nombre de grains/épi ont été affectés davantage par la défoliation au stade gonflement qu'aux stades épiaison et celui du remplissage des grains.

On aurait privilégié l'application de l'équation concernant la quatrième feuille supérieure F4 (feuille drapeau -3), dont le coefficient de détermination a été le plus grand, pour l'estimation des pertes en rendement grain. Pourtant, l'application de cette équation est logiquement limitée. En effet, la sévérité de la rayure réticulée sur cette feuille au niveau du champ (et au niveau de la serre) frôle généralement les 100% auquel s'ajoutent sa sénescence et son ombrage par les autres tiges et feuilles en émergence. Cela induit son jaunissement et flétrissement. D'où le masquage des taux de sévérité réels et par conséquent, la difficulté de l'évaluation de la sévérité aussi bien que de l'estimation des pertes en rendement moyennant par cette équation. L'application de l'équation reliant le rendement grain avec la sévérité au niveau de la troisième feuille supérieure (F3) semble être plus fiable vu la commodité d'évaluation de la sévérité de la rayure réticulée, généralement importante, sur sa surface, d'autant plus, le coefficient de détermination tiré du graphe représentant la relation entre le rendement grain et la sévérité de la rayure réticulée sur cette feuille reste relativement satisfaisant. Cependant, l'équation concernant la relation entre la somme de la surface foliaire saine de l'ensemble des quatre dernières feuilles et le rendement grain est beaucoup plus judicieuse au sens biologique, sachant que son coefficient de détermination R^2 a été de 0,67. Cette équation devrait être vérifiée pour différentes variétés d'orge au niveau du champ en conditions naturelles de développement de la maladie.

Conclusion

Notre étude a été une investigation traitant la contribution des feuilles lors de la phase d'élaboration du rendement en condition saine et sous stress biotique.

La défoliation simultanée des quatre feuilles supérieures de l'orge n'équivaut pas leur infection par *P. teres* f. *maculata*. L'effet de la sévérité de la maladie au niveau de ces feuilles a été supérieur à celui de la perte de la totalité des surfaces foliaires saines. D'un autre côté, l'investigation de la défoliation des feuilles sous l'effet de l'inoculation a

révéle que cet effet équivaut celui dû à l'inoculation seule. La contribution du tissu sain, supposé effectif, au niveau des feuilles infectées est dissimulée par l'effet de l'infection. Aussi, l'importance des quatre dernières feuilles de l'orge au rendement grain dépend du type de talles selon qu'il s'agisse des brins-maîtres ou des talles secondaires. Les pertes sont surestimées lorsqu'elles sont évaluées au niveau des brins-maîtres seulement. Par conséquent, l'évaluation de l'importance des feuilles au rendement devrait prendre en considération cette différence entre les talles de la même plante. La considération du stade de croissance est également importante du fait que les pertes en poids des grains sous les divers traitements ont été généralement beaucoup plus importantes avant l'épiaison. Ces considérations amélioreraient les méthodes d'évaluation de la sévérité de la maladie en relation avec les pertes en rendement.

Ce travail se compléterait par une étude de la contribution des feuilles supérieures au rendement chez d'autres variétés d'orge en prenant en considération la contribution individuelle de chacune des ces dernières feuilles au rendement. De plus, cette contribution devrait être poursuivie durant tout le cycle de croissance de la plante.

Du fait que la croissance des plantes d'orge au champ est exposée à plus d'interactions, de stress et de compétition qu'au niveau de la serre, l'étude de l'effet de la défoliation des feuilles supérieures, autrement dit leur contribution au rendement au niveau du champ, compléterait sûrement nos résultats.

Remerciements

Les auteurs adressent leurs remerciements au Directeur de l'Institut National de la Recherche Agronomique, au Chef du CRRRA de Settat (Dr Elgharous M.) ainsi qu'au responsable de l'UFR-DESA:APA (Dr. Benchekroun M.). Nos remerciements vont aussi aux Dr Lhaloui Saadia et Tanji Abbass pour la révision de la première version de ce document.

Références bibliographiques

- Abbad H., EL Jaafari S., Bort J. and Araus J. L. 2004. Comparison of flag leaf and ear photosynthesis with biomass and grain yield of durum wheat under various water conditions and genotypes. *Agronomie* 24, 19-28.
- Abouelfida M. 2000. Etude de la résistance quantitative et qualitative de l'orge à la rayure réticulée, de la résistance qualitative à l'oïdium et de l'effet variétal de l'orge et du blé sur la virulence et l'agressivité de *Pyrenophora teres f. teres*. Mémoire de 3ème cycle. Université Hassan 1er, FST, Settat, Maroc. 108 p.
- Al-Ali, B. Y. Y. 1988. The pathogenicity of *Pyrenophora teres*. Ph.D. thesis. Imperial College of Science and Technology. Dept. of Pure and Applied Biology. Ascot, Berkshire. UK. 210 pp.
- Auriau P., Doussinault G., Jahier J., Lecompte C., Pierre J., Pluchard P., Rousset M., Saur L. et Trottet M. 1992. Le blé tendre. In « A. Gallais et H. Bannerot Eds, Amélioration des espèces végétales cultivées ». INRA France. p. 22-38.
- Boulif M. 1975. Contribution à l'étude des helminthosporioses de l'orge au Maroc. Mémoire de fin d'étude, IAV Hassan II, Rabat, Maroc.
- Buntin G. D., Flanders K. L., Slaughter R. W. and Delamar Z. D. 2004. Damage loss assessment and control of the cereal leaf beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) in winter wheat. *J. Econ. Entomol.* 97(2), 374-382.
- Chedad, K., 1994. Contribution à l'étude de la maladie en taches de réseaux de l'orge. (*Pyrenophora teres*). Thèse DES à l'Université Moulay Ismail. Meknes. Maroc. 84p.
- Cruz-guado J. A., Reyes F., Rodes R., Peres I. and Dorado M. 1999. Effect of source-to-sink ratio on partitioning of dry matter and ¹⁴C-photosynthates in wheat during grain filling. *Annals of botany*, 83, 655-665.
- Doujyssi A., Rasmusson D. C. and Roelfs A. P. (1998). Response of barley cultivars and lines to isolates of *Pyrenophora teres*. *Plant Dis.* 82, 316-321.
- EL Mourid M. and Karrou M. 1996. Agriculture in arid and semi-arid regions of Morocco: Challenges and Prospects. *Al Awamia* 92, 83-91.
- EL Mourid M., Karrou M. et EL Gharous M. 1996. La recherche en aridoculture respectueuse de l'environnement. *Al Awamia*. 92, 69-81.
- EL Mzouri E. 1994. Barley growth, physiology and forage quality as influenced by defoliation and water stress. Ph.D. dissertation. Iowa State University. Ames, USA. 189 p.
- EL Yousfi B. 2002. Barley net blotch disease in semi arid regions of Morocco: Epidemiology, effect of host growth and yield loss modeling. Thèse de doctorat ès sciences agronomiques. IAV Hassan II, Rabat, Maroc.
- EL Yousfi B. and Ezzahiri B. 2002. Net blotch in semi-arid regions of Morocco. II. Yield and Yield-loss modeling. *Field Crops Research*. 73, 81-93.
- Evans L. T., Wardlaw I. F. and Fischer R. A. 1975. Wheat, In Evans L. T. (Ed.), *Crop physiology; some case histories*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 101-150.
- Ezzahiri B., Farih A. et Taoufiq M. 1996. Surveillance des maladies du blé et de l'orge au Maroc. In « Symposium régional sur les maladies des céréales et des légumineuses alimentaires ». p. 71-77.

- Frederick J. R. and Bauer P. J. 1999. Physiological and numerical components of wheat yield. In G. A. Slafer and E. H. Satorre (eds.), Wheat ecology and physiology of yield determination. Food Products Press, An Imprint of The Haworth Press, New York. pp. 45-65.
- Jebbouj R. 2002. Rayure réticulée de l'orge, résistance qualitative et quantitative à *Pyrenophora teres* f. *maculata*, effet sur l'hôte et contribution des étages foliaires au rendement. Mémoire de 3ème cycle, Université Hassan 1^{er}, Faculté des Sciences et Techniques, Settat, Maroc. 126 p.
- Jordan V. W. L. (1981). Actiology of barley net blotch caused by *Pyrenophora teres* and some effects on yield. Plant Pathol. 30:77-78. In Rasmusson D.C. (éd) Barley. Agronomy 26, 269-312, Madison, Wisconsin, USA.
- Karrou M., EL Mourid M., Boulal H., Boutfirass M. et El Gharous M. (2001). Ecophysiologie des céréales en zones semi-arides. INRA. Maroc. 111 p.
- Keeling B. L. and Bantari E. E. 1975. Factors associated with the resistance of barley to *Helminthosporium teres*. *Phytopathology*. 59, 906-909.
- Khan T. N. and Boyd W. J. R. 1969. Environmentally induced variability in the host reaction of barley to net blotch. Aust. J. Biol. Sci. 22, 1237-1244.
- Muro J., Irigoyen I., Lamsfus C. and Fernandez Militino A. 2000. Effect of defoliation on garlic yield. (abstr.) *Scientia Horticulturae*. 86(2), 161-167.
- Ouattar S. 1985. Adaptation of corn (*Zea Mays* L.) kernel development to conditions of drought and thermal stress. Thèse de Doctorat es Sciences Agronomiques. IAV Hassan II, Rabat, Maroc. 132p.
- Ouattar S. et Ameziane T. F. 1989. Les céréales au Maroc. Edition Toubkal. Casablanca.
- Piening L. and Kaufmann L. 1969. Comparison of the effect of net blotch and leaf removal on yield in barley. *Canadian Journal of Plant Science* 49, 731-735.
- Populer C. 1978. Changes in host susceptibility with time. An advanced treatise. J. G. Horsfall and E. B. Cowling, eds. Academic Press, New York. Plant Disease. 2, 239-262.
- Pratt R. G. 2003. An excised-leaf inoculation technique for evaluating host-pathogen interaction and quantitative resistance of bermudagrass genotypes to *Dematiaceous hyphomycetes*. *Phytopathology*. 93, 1565-1571.
- Qayoum A. and Line R. F. 1985. High temperature adult-plant resistance to stripe rust of wheat. *Phytopathology* 75, 1121-1125.
- Quarrie S. A. and Jones H. G. 1977. Effect of abscisic acid and water stress on development and morphology of wheat. *Journal of Experimental Botany*, 28, 192-203.
- Rawson H. M., Gifford R. M. and Bremner P. M. 1976. Carbon dioxide exchange in relation to sink demand in wheat. *Planta* 132, 19-23.
- Saghir A. R., Khan A. R. and Worzella W. W. 1968. Effects of plant parts on the grain yield, kernel weight and plant height of wheat and barley. *Agron. J.* 60, 95-97.
- SAS Institute. 1990. SAS user's guide: Statistics. SAS Inst., Inc., Cary, NC.
- Scott D. B. 1992. Assessment of resistance in barley to *Pyrenophora teres* and *Pyrenophora japonica*. *Crop Protection*. 11, 240-243.
- Tekauz A. 1986. Effect of plant age and leaf position on the reaction of barley to *Pyrenophora teres*. *Can. J. Plant Pathol.* 8, 380-386.

- Thomas, M. R., Cook R. J. and King J. F. 1989. Factors affecting development of *Septoria tritici* in winter wheat and its effect on yield. *Plant Path.* 38: 246-257.
- Visker M. H. P. W., Keizer L. C. P., Budding D. J., Van Loon L. C., Colon L. T. and Struik P. C. 2003. Leaf position prevails over plant age and leaf age in reflecting resistance to late blight in potato. *Phytopathology.* 93, 666-674.
- Weiergang I., Lyngs Jorgensen H. J., Moller I. M., Friis P. et Smedegaard-petersen V. 2002. Correlation between sensitivity of barley to *Pyrenophora teres* toxins and susceptibility to the fungus. (Abstr.) *Physiological and Molecular Plant Pathology.* 60(3), 121-129.