

Impact des facteurs limitants du rendement du Tournesol (*Helianthus annuus* L.) en conditions réelles d'utilisation par les agriculteurs, en Midi-Pyrénées – Etude de cas

V. Thebaud, J.D. Scheiner, J. Dayde

E.I. Purpan 75, voie du T.O.E.C, 31076 Toulouse, FRANCE, E-mail: javier.scheiner@purpan.fr

ABSTRACT

Sunflower (*Helianthus annuus* L.) is largely cropped in France, particularly in Midi-Pyrénées (second producing area) and it is naturally adapted to South-west agro-climate conditions. The yield depends on plant/environment interactions in its growth cycle. The main limiting factors are drought stress and cryptogamic diseases. The aim of this work was i) to identify which factors influence the sunflower yield limitations, and ii) to evaluate the importance of cryptogamic diseases and deep tillage in these limitations. This study presents the results of an initial experiment carried out in 2007. Two types of tillage were compared: control and deep tillage. The results showed that *Phoma macdonaldii* was the main factor influencing yield, its components, and morphological data. Significant differences on tillage were observed in morphological data stem length. Moreover, connections between organs linked to stress were highlighted. The slight difference between the two types of tillage on yield can be attributed to three main facts, i) neither tillage treatment was discriminating enough, ii) the presence of *Phoma macdonaldii*, iii) the absence of drought conditions. Similar studies will be carried out from 2008 to 2010 in different agro-ecosystems, with the aim of establishing the importance of physical soil constraints on the limitation of sunflower yield in Midi-Pyrénées (France).

Key words: compaction – fatty acids – France – *Phoma macdonaldii* – tillage – yield.

RESUME

Le Tournesol (*Helianthus annuus* L.) est une culture largement cultivée en Midi-Pyrénées (seconde région productrice de France) et naturellement adaptée à ses conditions agro-climatiques. Le rendement est la résultante d'interactions tout au long du cycle cultural. De nombreux facteurs limitants existent, au premier rang desquels figurent les maladies cryptogamiques et le stress hydrique. Les objectifs de ce travail sont i) de définir quels facteurs agissent sur la limitation du rendement du tournesol et ii) dans quelles mesures la présence de maladies et le type de travail du sol y jouent un rôle. Ce travail présente les résultats d'une étude de cas préliminaire réalisée au cours de la saison 2007, en suivi de parcelles d'expérimentations, selon les pratiques agricoles usuelles. Sur cet essai étaient comparés deux types de travail du sol, un témoin, un travaillé en profondeur. Nos résultats montrent que le premier facteur impactant sur le rendement, ses composantes, et les données morphologiques recueillies, est *Phoma macdonaldii*. Des différences significatives entre les deux types de travail du sol ont été observées sur une donnée morphologique, la longueur de la tige. Par ailleurs des relations liées au stress entre différents organes (aériens et souterrains), ont aussi été mises en évidence. La faible différence entre les deux types de travail du sol sur le critère rendement peut être imputée à plusieurs faits: i) les deux traitements n'étaient pas suffisamment discriminants, ii) la présence de *Phoma macdonaldii*, iii) l'absence de conditions sèches. Des études similaires seront conduites de 2008 à 2010, dans différents agro-écosystèmes, dans le but d'établir l'importance des contraintes physique du sol sur la limitation du rendement en Midi Pyrénées.

Mots clés: acides gras - *Phoma macdonaldii* - rendement - tassement - travail du sol - tournesol.

INTRODUCTION

La culture du tournesol (*Helianthus annuus* L.) présente des atouts agronomiques et environnementaux dans les régions à faible disponibilité en eau comme le Sud-ouest de la France, tel que la tolérance aux stress thermiques et hydriques (Merrien et Milan, 1992). Le rendement obtenu est le résultat d'interactions entre la plante et son milieu tout au long du cycle cultural ; de nombreux facteurs limitants sont signalés au premier rang desquels figurent les maladies cryptogamiques et le stress hydrique (Alignan, 2006; Merrien et Milan, 1992). En France, le rendement moyen oscille entre 20 et 25 quintaux hectare, alors que

le potentiel des meilleures variétés avoisine 45 quintaux hectare dans les milieux les plus favorables (CETIOM, 2006). Ceci rend le tournesol peu compétitif vis-à-vis des autres grandes cultures, et ne s'explique pas par un défaut de progrès génétique (Vear et al., 2003). Le Phoma (*Phoma macdonaldii*) classé en 2004 seconde maladie plus importante après le mildiou (Alignan, 2006), est un facteur déterminant de la limitation du rendement du tournesol. De la même façon, le tassement sous-superficielle du sol et donc de la résistance qu'offre le sol à la pénétration des racines agit négativement dans l'élaboration du rendement pour les espèces à système pivotant (Andrade et al., 1993; Montagu et al., 2001; Diaz-Zorita, 2004; Sadras et al., 2005).

L'évolution des pratiques culturales depuis les vingt dernières années a engendré des impacts majeurs sur les sols cultivés (Le Bissonais et al., 2002). L'agrandissement des parcelles, la spécialisation des cultures, l'évolution des techniques culturales, entraînent une diminution de la qualité de la structure des sols et la baisse de la teneur en matière organique (Girard et al., 2005). Ces contraintes pourraient être liées au phénomène naturel de tassement (Andrade et al., 1993; Lampurlanès et Cantero-Martinez, 2003; Sadras et al., 2005). Les réductions du rendement attribuables aux évolutions du tassement des sols ont été décrites pour différentes cultures, dans différents types de sols, et dans différentes régions productrices à travers le monde (Diaz-Zorita, 2004; Tennant et Hall, 2001). Chez le tournesol, de fortes conditions de tassement sur des sols à texture fine réduisent l'expansion foliaire, la biomasse aérienne et le développement des racines (Andrade et al., 1993; Diaz-Zorita, 2004). La différence entre les rendements réels et potentiels pourrait être en partie expliquée par une plus faible efficacité d'absorption hydrominérale, consécutive à une réduction du volume de sol exploré par les racines (Connor et al., 1992; Andrade et al., 1993; Diaz-Zorita, 2004; Goodman et Ennos, 1999). Ceci ayant pour conséquence la réduction de la quantité d'eau absorbée et de fait la diminution de l'absorption des éléments minéraux (N, P, K) et des oligoéléments (B) (CETIOM, 1983; Colomb et al., 1995).

Les objectifs de ce travail sont i) de définir quels facteurs agissent sur la limitation du rendement du tournesol, et ii) dans quelles mesures la présence de maladies et le type de travail du sol y jouent un rôle.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le cultivar MELODY (Syngenta SEEDS SAS, Semences NK) a été suivi en parcelle d'expérimentation (dispositif split plot, quatre répétitions, parcelles de 12 rangs sur 10 mètres) au cours de la saison 2007, en conditions réelles d'utilisation agricole sur l'exploitation de l'E.I. Purpan: Ferme de Lamothe, (43°30'11.75''N ; 1°14'54.53''E). Le semis a eu lieu le 30 avril 2007 (semoir pneumatique, écartement 0.6m, 52700 plantes/hectare), en sol Limoneux Sablo-argileux (A: 22.4; L: 47.5; S: 27.3; pH: 6.2). Un covercrop a d'abord été passé sur l'ensemble de la parcelle, suivi d'un passage de décompacteur (profondeur: 0.5m, écartement: 0.6m). Un second passage de décompacteur a été passé perpendiculairement sur la zone correspondant au second traitement du futur essai. Un passage simple constituait le traitement un (T1), deux passages perpendiculaires le traitement deux (T2). La phénologie a été surveillée tout au long de la saison sur trois plantes consécutives dans chaque parcelle expérimentale. L'évolution des surfaces foliaires a été notée à cinq reprises à partir du stade 3.1, jusqu'au stade 5.4 (Hutley Bull, 1995). Pour chaque notation, l'Indice Foliaire (IF) a été estimé à partir de la mesure de la largeur des feuilles (Scheiner et Lavado, 1999). La floraison est intervenue le 17 juillet 2007, stade 4.3. La présence de *Phoma macdonaldii* a été remarquée dès le 24 juillet 2007, des notations de diamètre et de tâche de Phoma au collet ont été réalisées conformément au Tableau 1.

Tableau 1. Echelle de notation inspirée par l'échelle de notes «G2» sur Phoma (*Phoma lingam*) du colza (*Brassica napus*) (CETIOM, 2004).

Notation	Taille de la tache
1	Moins de ¼ de la circonférence
2	Entre ¼ et ½ de la circonférence
3	Entre ½ et ¾ de la circonférence
4	Entre ¾ et toute de la circonférence
5	Tâche encerclante

La parcelle a été récoltée le 11 septembre 2007. Les données de rendement ont été obtenues à partir de prélèvements de capitules réalisés dans chaque parcelle sur huit mètres consécutifs. Du fait de la contamination par *Phoma macdonaldii*, nous avons effectué une double récolte sur chaque répétition, la première étant qualifiée fortement touchée (note Phoma = 5): M1; la seconde de «saine»: M2. Afin

d'obtenir des données physiologiques et morphologiques précises, nous avons extrait dans chaque parcelle et pour chaque traitement, trois plantes entières successives. Les différents organes des plantes entières extraites ont été nettoyés, séparés et caractérisés. Le diamètre des capitules de tournesol a été mesuré avant égrenage. Les feuilles ont été mises en étuve (72h à 45°C), les tiges et les racines séchées à l'air. L'ensemble de l'appareil aérien et souterrain a été pesé et mesuré (diamètre et longueur). Le Poids de Mille Grains (PMG) a été obtenu. Les données de nombre et de poids des grains par capitule, des poids, longueurs et volumes spécifiques, du peuplement hectare par micro parcelle, ont été obtenues par recoupage des données précédentes. Par ailleurs le calcul des données de longueur et volume spécifiques de la tige et de la racine, a été emprunté au manuel de STICS (Brisson, 2002). Les données de qualité d'huile ont été obtenues par spectroscopie proche infrarouge (Ayerdi Gotor et al., 2007). En termes d'analyses statistiques, des modèles linéaires généraux et des régressions linéaires multiples ont été réalisées pour l'ensemble des données recueillies.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Durant la saison 2007 aucun symptôme de stress hydrique n'a été observé sur les plantes. Le rendement de l'essai était égale à 37.5 quintaux / hectares (peuplement récolte égal à 47,083 plantes/hectare).

Dans les conditions expérimentales, l'appareil foliaire présente une relation directe avec les composantes de rendements, mais aussi avec la partie aérienne de la plante (Merrien et Milan, 1992) (Tableau 2). Conformément aux observations de Sadras et al. (1993), le poids de l'appareil foliaire augmente à mesure que la longueur de la tige diminue (Fig. 1). De plus l'augmentation de la biomasse des feuilles présente une corrélation positive avec l'augmentation de la biomasse souterraine (appareil racinaire) (Fig 1.). Ces deux systèmes, le système racinaire et le système aérien (tige et feuilles), ont un impact direct sur les composantes de rendement. En effet, le PMG augmente en parallèle du poids de la tige, et dans une moindre mesure avec le diamètre de la racine (Fig. 1). Le type de travail du sol a eu un impact sur la longueur de tige, qui s'accroît avec un passage supplémentaire de décompacteur, (Tableau 2).

Tableau 2. Mesures morphologiques réalisées sur plantes entières prélevées au champ: Analyses de variance, moyenne des traitements¹. Travail du sol: T; Présence de Phoma: M.

Mesures morphologiques	Moyenne T1	Moyenne T2	Moyenne M1	Moyenne M2	Moyenne des Traitements
Nombre de feuille	16.1	16.3	15.3 a**	17 b**	16.2 ± 0.45
Nombre de grains par capitule	1,153.9	1,234	1,080 a**	1,307.9 b**	1,193.9 ± 65.4
Longueur spécifique des racines	1.3	1.4	1.5 a**	1.2 b**	1.3 ± 0.1
Longueur tige	147.7 a**	153 b**	149	15.8	150.4 ± 1.5
Poids des grains par capitule	43.1	48.1	36.1 a***	55.1 b***	45.6 ± 3.4
Poids spécifique de la racine	29.2	23.4	19.2 a**	33.5 b**	26.3 ± 4.2
Poids de Mille Grains	36.1	38.1	32.6 a***	41.7 b***	37.1 ± 1.4
Volume de la racine	19.8	18.6	16.7 a*	21.7 b*	19.2 ± 1.7
Volume spécifique de la racine	0.8	0.9	0.9 a**	0.8 b**	0.9 ± 0.1
Biomasse feuille	17	16.6	14 a**	19.6 b**	16.8 ± 1.7
Biomasse Tige	50.5	52.8	45.7 a**	57.9 b**	51.6 ± 3.1
Longueur spécifique de la tige	3.2	3.1	3.5 a**	2.8 b**	3.1 ± 0.2

¹a, b: groupes homogènes selon le Test de Student; *: Probabilité significatives à 0.05; **: Probabilité significatives à 0.01; ***: Probabilité significatives à 0.001.

Les conditions climatiques de la saison 2007 ont été particulièrement favorable au développement de *Phoma macdonaldii* (PROLEA, 2005; CETIOM, 2006). Des symptômes ont été observés après le stade 4.3, bien que le tournesol soit sensible depuis le stade cotylédon (Alignan, 2006). D'après le CETIOM (PROLEA, 2005), le taux de pieds secs tendrait à augmenter avec la surface foliaire. Une perte du poids de la biomasse foliaire de l'ordre de 16% a été observée, traduisant non pas une baisse du nombre de feuilles (non significatif), mais à un dessèchement précoce de ces dernières dû à la maladie (Tableau 2). De plus les infections issues de la tige (causant notamment les tâches encerclantes) sont plus agressives que celles issues des feuilles (PROLEA, 2005), ainsi nous avons pu constater une perte de 11% de la masse de la tige (Tableau 2). Les résultats présentés dans le Tableau 2 montrent que l'infection impacte négativement les organes directement liés aux fonctions de nutrition (racine, feuille) et de réserve (tige, capitule), ce qui limite la synthèse de ces mêmes réserves ou leur acheminement vers la graine (Abou Al Fadil, 2006; Darvishzadeh, 2007). Les données dont nous disposons, nous amènent à penser que cette relation est probablement expliquée par ces deux hypothèses de manières successive ou simultanément.

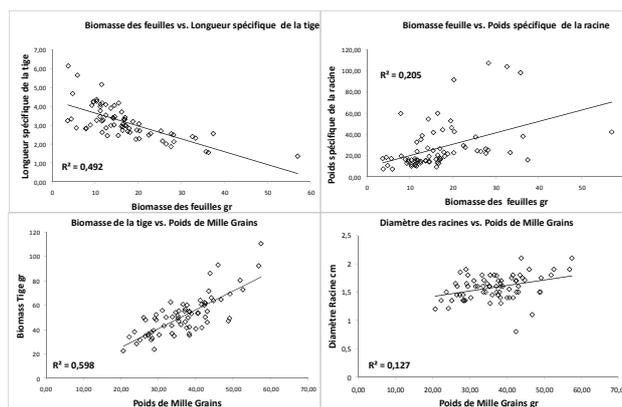


Fig. 1 Relations liées aux stress entre organes. Les corrélations sont significatives (régressions linéaires, $P < 0,001$) entre les données morphologiques.

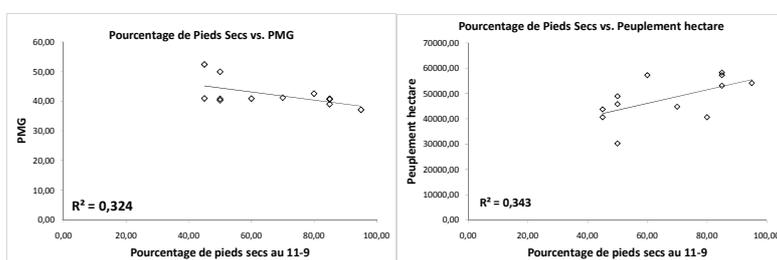


Fig. 2. Relation entre le pourcentage de pied sec (note Phoma = 5) par parcelle au 11 septembre 2007, le PMG (régression linéaire, $P=0.053$) et le peuplement hectare (régression linéaire, $P=0.045$).

Les contaminations par le sol causent entre autre les nécroses au niveau du collet (zone de jonction entre la tige et la racine), celles-ci se traduisent alors par des nécroses encerclant la tige empêchant le transfert des assimilés (Alignan, 2006). Ainsi nous avons pu constater une perte de 27% du poids spécifique de la racine, de 13% du volume de celle-ci (Tableau 2). L'ensemble des symptômes, se traduit par une sénescence précoce de la plante ayant pour conséquence directe une perte de rendement. Le pourcentage de pieds secs par parcelle réalisé le 11 septembre 2007, nous montre que le PMG décroît à mesure que le taux augmente (Fig. 2). Dans les conditions expérimentales, le Phoma a pour conséquence une diminution de 12% du PMG. Nous avons aussi pu observer une diminution significative du nombre de grains par capitule de 10%. Ceci ayant pour conséquence une diminution significative de 49% du poids des grains par capitule, et plus globalement de 25% de perte de rendement sur l'ensemble de la parcelle expérimentale (Tableau 2 et 3). Ceci est en relation avec les observations réalisées par Abou Al Fadil (2006) et Darvishzadeh (2007). La diminution significative du nombre de grains par capitule nous amène à penser que l'infection se serait produite à partir du stade correspondant à la mise en place du nombre de grains par capitule et ce jusqu'à maturité (Alignan, 2006). De plus, le fait que nous ayons observé une augmentation du pourcentage de pieds secs avec le nombre de plantes à l'hectare, nous amène à émettre l'hypothèse de la présence d'une contamination secondaire (Fig. 2).

Tableau 3. Mesures et analyses réalisées sur des capitules prélevés sur huit mètres consécutifs: Analyses de variance, moyenne des traitements¹. Travail du sol: T; Présence de Phoma: M.

Mesures au champ	Moyenne T1	Moyenne T2	Moyenne M1	Moyenne M2	Moyenne Des Traitements
Rendement	36.2	39.9	28.6 a**	47.5 b**	38.1 ± 4.2
PMG	42	42.4	36.4 a***	48.1 b***	42.2 ± 2.1
Poids spécifique	42.5	42.7	41.2 a***	43.9 b***	22.6 ± 0.4
Protéines	15.6	14.9	15.9 a*	14.6 b*	15.3 ± 0.5
Acide Palmitique	6.8 a*	6.9 b*	6.9 a***	6.7 b***	6.8 ± 0.04
Acide Stéarique	2.8	2.8	3 a*	2.6 b*	2.8 ± 0.1
Acide Oléique	23.1 a*	21.3 b*	20.8 a***	23.7 b***	22.2 ± 0.6
Acide Linoléique	68 a*	68.9 b*	70.1 a**	67.8 b**	68.5 ± 0.6

¹a, b: groupes homogènes selon le Test de Student ; * : Probabilité significatives à 0.05; ** : Probabilité significatives à 0.01; *** : Probabilité significatives à 0.001.

Dans le contexte expérimental les teneurs en acides palmitique, stéarique et linoléique sont plus élevées en présence de stress induit par le Phoma (M1), seule la teneur en acide oléique tend à diminuer dans le traitement M2. Cette diminution peut s'expliquer par la sénescence précoce de la plante (CETIOM, 1996). En effet, une plante de tournesol soumise à un stress dû à la maladie souffrira de prématurité, et de ce fait sera récoltée à surmaturité, lorsque ses congénères seront arrivées à leur maturité physiologique (CETIOM, 1996). Dans ce cas, Baldini et al. (2002) ont observé que la surmaturité entraînait une baisse de la teneur en acide oléique dans les graines récoltées. Les protéines étant les premières composantes à s'accumuler dans la graine de tournesol (Roche, 2005), elles souffriront moins du phénomène de prématurité. De la même manière, les acides palmitiques, stéarique, étant des précurseurs de l'acide oléique (Lagravère, 1999), ils auront tendance à moins souffrir de la sénescence précoce de la plante causée par le champignon, conformément à nos observations (Tableau 3). Le fait que la durée d'activité de la feuille est directement liée à la lipidogenèse, tend à confirmer ce fait (Merrien et Milan, 1992). Nous avons observé des différences sur la teneur des différents acides gras selon le type de travail du sol, bien que la teneur en huile ne soit pas en elle-même significative (Tableau 3). Nos résultats nous montrent une amélioration significative des teneurs en acide palmitique, stéarique et linoléique sur le traitement T2 (passage supplémentaire de décompacteur). Seule la teneur en acide oléique tendrait à s'améliorer sur un sol moins travaillé, et à décroître sur T2. Les variations de la teneur en acide gras saturés et insaturés dues aux conditions environnementales restent encore peu connues et controversées. Flagella et al. (2006), ont mis en évidence que la teneur en acide oléique était positivement influencée par l'irrigation, et la teneur en acide linoléique négativement impactée par celle-ci. Cependant, Baldini et al. (2002) ont observés un effet positif d'un léger stress hydrique, sur la teneur en acide oléique ; et de fait un effet négatif sur la teneur en acide linoléique. L'augmentation de la teneur en acide oléique sur T2, semblerait concordante avec les résultats de Baldini et al. (2002). Cependant en l'absence de stress hydrique réel, ces résultats seront à mettre en relation avec les résultats de nos travaux de 2008 à 2010.

Le rendement est le résultat d'une série d'interactions entre la plante et son milieu tout au long de son cycle. Il dépend dans les conditions de l'expérimentation, de la bonne capacité de la plante de tournesol à s'adapter à son milieu, à absorber l'eau et les nutriments nécessaires, à intercepter suffisamment de rayonnement solaire et à résister aux attaques de ravageurs et aux maladies. Si toutes ces conditions sont réunies, la plante sera à même d'optimiser son nombre de grains par capitule et son remplissage. Contrairement aux travaux de Diaz-Zorita (2004), une réduction du rendement liée au travail du sol n'a pas été observée. Les données précédentes nous amènent à penser que bien que le travail du sol a un effet sur la morphologie de la plante de tournesol, il ne se traduit pas directement sur les données de rendement au champ. Parallèlement dans les conditions expérimentales, nous avons constaté une baisse du rendement lié au Phoma. Cette relation directe s'établirait sur une de ses composantes principales, le PMG et sur le nombre de grains par capitule. Il existerait donc une relation entre le degré d'infection de la plante et la baisse du nombre et remplissage de ces grains. D'un point de vue strictement morphologique (dans l'attente de données physiologiques), l'expression du stress causé par le Phoma (hormis les symptômes caractéristiques) semble difficile à distinguer des symptômes de stress observés par Andrade (1993) et Diaz-Zorita (2004). La présence de cette maladie pourrait expliquer le fait qu'aucune différence significative n'ait été observée entre les deux types de travail du sol sur le critère rendement. Ceci pourrait aussi s'expliquer par le fait que ces deux traitements n'étaient pas suffisamment discriminants dans les conditions expérimentales. L'absence de contraintes liées à la sécheresse durant la saison 2007 peut aussi être une des raisons de l'absence de différence significative entre les deux types de travaux du sol sur la quasi-totalité des critères étudiés.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont au personnel de la ferme de Lamothe pour son appui technique, ainsi qu'à, Mme. Mestries (CETIOM) et Mr. Debaeke (INRA - UMR 1248 –AGIR).

REFERENCES

- Abou Al Fadil, T. 2006. Déterminisme de la tolérance du tournesol à *Phoma macdonaldii* au collet et sur racines: approches génétiques et histologiques. Thèse doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 196 p.
- Alignan, M. 2006. Phoma du tournesol: déterminisme de la tolérance de l'hôte à la maladie. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 297 p.

- Andrade, A., D. Wolfe, and E. Fereres. 1993. Leaf expansion, photosynthesis and water relations of sunflower plants grown on compacted soil. *Plant Soil* 149:175-184.
- Ayerdi Gotor, A., E. Farkas, M. Berger, F. Labalette, S. Centis, J. Dayde, and A. Calmon. 2007. Determination of tocopherols and phytosterols in sunflower seeds by NIR spectrometry. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 109:525-530.
- Baldini, M., R. Giovanardi, S. Tahmasebi-Enferadi, and G.P. Vannozzi. 2002. Effects of water regime on Fatty Acid accumulation and final Fatty Acid composition in the oil of standard and high oleic sunflower hybrids. *Italian J. Agron.* 6:119-126.
- Brisson, N. 2002. STICS, Notice concepts et formalismes. INRA-Logiciel déposé à l'Agence pour la protection des programmes n°99 17002600, version 6.0.
- CETIOM. 1983. Physiologie de la formation du rendement chez le tournesol. Informations techniques, n° 83.
- CETIOM. 1996. Guide Pratique, Les accidents du tournesol, édition CETIOM, p. 112.
- CETIOM. 2004. Guide de l'expérimentateur colza, édition CETIOM, 2004, p. 206.
- CETIOM. 2006. Les techniques culturales, le contexte économiques, édition CETIOM. p.26.
- Colomb, B., A. Bouniols, and C. Delpech. 1995. Effect of various phosphorus availabilities on radiation-use efficiency in sunflower biomass until anthesis. *J. Plant Nutr.* 18:1649-1658.
- Connor, D.J., and V.O. Sadras. 1992. Physiology of yield expression in sunflower. *Field Crops Res.* 30:333-389.
- Darvishzadeh, R. 2007. Déterminisme Génétique de la résistance du Tournesol au Phoma. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 201 p.
- Díaz-Zorita, M. 2004. Efecto de la compactación subsuperficial de un hapludol Típico sobre la producción de girasol (*Helianthus annuus* L.). *Ciencia del Suelo* 22:40-43.
- Flagella, Z, R. Di Caterina, M. Monteleone, L. Giuzo, M. Pompa, E. Tarantino, and T. Rotunno. 2006. Potentials for sunflower cultivation for fuel production in southern Italy. *Helia* 29:81-88.
- Girard, M., C. Walter, J.R. Rémy, J. Berthelin, and J.L. Morel. 2005. Sols et Environnement, édition DUNOD, Paris. ch. 24:538-553.
- Goodman, A.M., and A. Ennos. 1999. The effect of soil bulk density on the morphology and anchorage mechanics of the root systems of sunflower and maize. *Ann. Bot.* 83:293-302.
- Hutley Bull, P.D. 1995. Sunflower growth stages, A summary of Sunflower Growth Stages for UK Use. Adapted and translated from CETIOM.
- Lagravère, T. 1999. Déterminisme Agro-physiologique de l'expression de la très haute teneur en acide oléique dans l'huile de Tournesol. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse: Toulouse. 145 p.
- Lampurlanès, J., and C. Cantero-Martinez. 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agron. J.* 95:526-536.
- Le Bissonnais, Y., J. Thorette, C. Bardet, and J. Daroussin. 2002. L'érosion hydrique des sols en France. INRA-IFEN. p. 106.
- Merrien, A., and M.J. Milan. 1992. Physiologie du tournesol, édition CETIOM. Paris, 65 p.
- Montagu, K., J. Conroy, and J. Atwell. 2001. The position of localized soil compaction determines root subsequent shoot growth responses. *J. Exp. Bot.* 52:2127-2133.
- PROLEA. 2005. Neutraliser le Phomopsis et le Phoma du tournesol. Oléoscope, n° 80.
- Roche, J. 2005. Composition de la graine de tournesol (*Helianthus annuus* L.) sous l'effet conjugué des contraintes agri-environnementales et des potentiels variétaux. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 305 p.
- Sadras, V.O., D.J. Connor, and D.M. Whitfield. 1993. Yield, yield components and source-sink relationships in water-stressed sunflower. *Field Crops Res.* 31:27-39.
- Sadras, V.O., G.J. O'Leary, and D.K. Roget. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Res.* 91:131-148.
- Scheiner, J.D., and R.S. Lavado. 1999. Soil water content, absorption of nutrient elements, and responses to fertilization of sunflower: a case study. *J. Plant Nutr.* 22:369-377.
- Tennant, D., and D. Hall. 2001. Improving water use of annual crops and pastures - limitations and opportunities in western Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 52:171-182.
- Vear, F., H. Bony, G. Joubert, D. Tourvieille, I. Pauchet, and X. Pinochet. 2003. 30 year of sunflower breeding in France. *Oléagineux Corps Gras Lipides* 10:66-73.