

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences de la Nature et de la Vie



THESE

Présentée par

LAHOUEL Habiba

Pour l'obtention du diplôme de doctorat de troisième cycle (LMD)

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Biologie

Spécialité : Adaptation et productivité des plantes cultivées

THEME

Etude de l'adaptation et la productivité (rendement et qualité des huiles) du tournesol en conditions de déficit hydrique.

Membres de jury:

Pr. MEDERBEL Khalladi	Université de Tiaret	Président
Pr. BELKHODJA Moulay	Université d'Oran 1	Examineur
Pr. REGAGBA Zineb	Université de Tiaret	Examinatrice
Pr. HASSANI Abdelkrim	Université de Tiaret	Examineur
Pr. REZZOUG Waffa	Université de Tiaret	Directrice

Année universitaire 2018 – 2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents

Mes frères et sœurs et à tous mes proches

Mes beaux frères

Mes belles sœurs

Mes nièces et neveux

Mes professeurs

Mes amis

Remerciements

Avant tout, je remercie mon dieu de m'avoir donnée le courage et la patience pour réaliser ce travail, je remercie également mes chers parents qui ont toujours été là pour moi.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ma directrice de thèse Madame **REZZOUG Waffa** Professeur à l'université de Tiaret d'avoir accepté de diriger cette étude, de la confiance qu'il m'a toujours accordée et de la bonne humeur qu'elle a manifesté tout au long de ce travail.

Je tiens à exprimer également ma profonde gratitude au Professeur **MEDERBEL Khalladi** pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma soutenance.

Mes vifs remerciements s'adressent au Professeur **REGAGBA Zineb** et Professeur **HASSANI Abdelkrim** de l'Université Tiaret et Professeur **BELKHODJA Moulay** de l'université d'Oran 1 Ahmed Ben Bella qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Je tiens à remercier également Professeur **ADDA Ahmed** pour son aide et ses orientations fournis lors de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à tous mes professeurs particulièrement Monsieur BOUKHARI Yahia, Monsieur ELOUISSI Abdelkader, Monsieur HAMIDI Djamel, Monsieur BEN AICHATA Lezerag, Monsieur TAIBI Khaled, Monsieur Gliz Mohamed, Madame DAHLIA Fatima, Madame BOUKHARI Wardia.

Je désire aussi remercier la firme **Syngenta** France qui ma procuré par les semences de tournesol est particulièrement Monsieur LASCABETTES Sylvaine le chef des produits oléagineux.

Mes sincères remerciements vont également à toute l'équipe du laboratoire de santé animal de ex ITMA de Tiaret particulièrement à Monsieur ABDELLY M, Monsieur AGAD H, Redouane, Leila et khalida pour leur précieuse aide et collaboration.

Je tiens à remercier également l'équipe du laboratoire de l'écologie animale, de technologie alimentaire et de science du sol de la faculté de SNV, Université de Tiaret ainsi l'équipe de la ferme expérimentale de l'université de Tiaret.

Mes remerciements vont également à mes chers frères et sœurs pour leur soutien moral et leur encouragement notamment, Idriss je le remercie pour sa patience, sa disponibilité et son aide dans la réalisation de mon expérimentation en plein champ, ainsi Khaled et Nouria.

Je tiens à exprimer profondément mes sincères remerciements à **BERRABAH Hicham** pour sa précieuse contribution dans la réalisation de ce travail. Je le remercie pour son aide, sa patience et sa disponibilité.

Je tiens à remercier également mon collègue DEBBI Mohamed qui m'a assuré une parcelle agricole dans sa ferme et les moyens nécessaires pour l'installation de mon essai.

Je ne saurais terminer sans remercier les personnes précieuses, je suis reconnaissante à mes amis et collègues notamment Nadia, Nabila, Dyhia, Kaouther, Badera, Soumia, Yamina, Amel, Fatima, Noura, Inass, Khaldia, Aicha, Hassiba, Yasmina, Samira, Abdelmajid, Omar, Khaled, Benchohera, pour leurs aides, leur soutien moral et intellectuel leur sincère amitié.

Enfin, un grand merci à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

Notre travail vise à étudier l'adaptation et la productivité de tournesol sous les conditions de déficit hydrique en Algérie.

Dans un premier temps un ensemble des variétés de tournesol ont été installées en conditions contrôlées avec deux régimes hydriques (irrigué et stressé) où les résultats obtenus montrent que le déficit hydrique induit une réduction importante de certains paramètres physiologiques notamment la teneur relative en eau et la conductance stomatique comme il induit une réduction de certains paramètres morphologiques tels que le diamètre de la tige, le poids et le diamètre de capitule. Le rendement en graines et ses deux composantes ont été ainsi diminués.

Dans un deuxième temps l'ensemble des variétés ont été installées en milieu naturel à Relizane durant deux années d'expérimentation sous deux régimes hydriques (irrigué et stressé) où le déficit hydrique implique une réduction de la hauteur de la plante, de diamètre de la tige, de diamètre et de poids de capitule, de rendement en graines et ses deux composantes et de rendement en huile cependant il n'affecte pas le nombre de feuilles et la teneur en huile. Ainsi à l'issue de cette expérimentation des corrélations significatives positives ont été constatées entre le rendement en graines et certains traits morphologiques notamment la hauteur de la plante, le diamètre de capitule d'un côté et entre le rendement en graines et ses deux composantes à savoir le nombre de graines par plante et le poids de 1000 graines d'un autre côté ce qui nous a permis de conclure que ces traits peuvent être utilisés comme des critères de sélection chez le tournesol.

Une évaluation de comportement agronomique des variétés de tournesol a été réalisée en milieu naturel à Tiaret où elle a révélé une différence hautement significative entre ces variétés pour la hauteur de la plante et le diamètre de capitule, une différence très hautement significative pour le nombre de feuilles par plante, le poids de capitule, le nombre de graines par plante et le rendement en graines par plante.

Les analyses physicochimiques de l'huile des graines de tournesol cultivé en milieu naturel à Relizane durant les deux années d'expérimentation montrent que cette huile est de bonne qualité physicochimique.

Mots clés : adaptation, productivité, tournesol, déficit hydrique, rendement en huile, Algérie.

Abstract

Our research aims to study the adaptation and the productivity of sunflower under the water deficit conditions in Algeria.

At first, all the varieties were installed under controlled conditions with two water supplies (irrigated and stressed) where the results obtained show that the water deficit induces a significant reduction of some physiological parameters especially relative water content and stomatal conductance as it induces a reduction of certain morphological parameters such as stem diameter, head weight and head diameter. The seed yield and its two components were also reduced.

Secondly, the varieties were installed in a natural environment at Relizane during two years of experimentation under two water supplies (irrigated and stressed) where the water deficit involved a reduction in plant height, stem diameter, head diameter, head weight, seed yield and its two components and oil yield however it does not affect leaves number and oil content. Thus, from this experiment significant positive correlations were found between seed yield and some morphological traits especially plant height, head diameter on one side and between seed yield and its two components; number of seeds per plant and 1000 seeds weight on the other side, which allowed us to conclude that this traits can be used as selection criteria in sunflower.

An agronomic behavior evaluation of sunflower varieties was carried out in a natural environment in Tiaret where it revealed a highly significant difference between these varieties for plant height and head diameter, a very highly significant difference for leaves number per plant, head weight, seed number per plant and seed yield per plant.

The physicochemical analyzes of oil extracted from the seed of sunflower planted in field experiment in Relizane for two years show that this oil have a good physicochemical quality.

Key words: adaptation, productivity, sunflower, water deficit, oil yield, Algeria.

الملخص

يهدف هذا البحث إلى دراسة تكيف وإنتاجية مجموعة متنوعة من سلالات عباد الشمس في ظل ظروف الإجهاد المائي في الجزائر.

في البداية ، تم زرع جميع السلالات في ظل الظروف المحمية تحت نظامين للسقي (مسقية ومجهدة) حيث أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن نقص المياه يؤدي إلى انخفاض كبير في بعض الصفات الفسيولوجية خاصة المحتوى المائي النسبي والنقل المسامي. كما أنه حدث على تخفيض بعض الصفات المورفولوجية مثل قطر الساق ، قطر و وزن الرأس و انخفاض مردود البذور ومكونيه.

ثانياً ، تم زرع سلالات عباد الشمس في البيئة الطبيعية في غليزان لمدة عامين تحت نظامي سقي (مسقية ومجهدة) حيث أن الإجهاد المائي أدى إلى انخفاض في طول النبتة، قطر الساق، قطر ووزن الرأس، مردود البذور و مكونيه و مردود الزيت غير أنه لم يؤثر على عدد الأوراق ونسبة الزيت. كما دلت النتائج المحصل عليها على وجود ارتباطات إيجابية كبيرة بين مردود البذور وبعض الصفات المورفولوجية لا سيما طول النبتة وقطر الرأس من جهة و بين مردود البذور ومكونيه (عدد البذور لكل نبتة ووزن 1000 بذرة) من جهة أخرى مما سمح لنا باستنتاج أنه يمكن استخدام هذه الصفات كمعايير إنتقاء في عباد الشمس.

تقييم السلوك الزراعي لسلالات عباد الشمس التي أجريت في بيئة طبيعية بتيارات كشف عن اختلاف كبير بين هذه السلالات بالنسبة لطول النبتة وقطر الرأس واختلاف كبير جدا بالنسبة لعدد الأوراق في النبتة، وزن الرأس ، عدد ومردود البذور لكل نبتة.

بينت التحليلات الفيزيائية والكيميائية لزيت بذور عباد الشمس المزروع في بيئة طبيعية في غليزان أن هذا الزيت ذو نوعية فيزيائية و كيميائية جيدة.

الكلمات المفتاحية : التكيف ، الإنتاجية ، عباد الشمس ، الإجهاد المائي ، مردود الزيت ، الجزائر.

Liste des figures

Figure 1. Cycle de développement de tournesol cultivé décrit par le CETIOM.....	8
Figure 2. Dispositif de l'expérimentation en milieu contrôlé... ..	21
Figure 3. Dispositif de l'expérimentation en milieu naturel.... ..	26
Figure 4. Dispositif de l'essai variétal.....	28
Figure 5. Effet de régime hydrique et de la variété sur la teneur relative en eau de tournesol cultivé sous serre.	37
Figure 6. Effet de régime hydrique et de la variété sur la teneur en chlorophylle totale de tournesol cultivé sous serre.	39
Figure 7. Effet de régime hydrique et de la variété sur la conductance stomatique de tournesol cultivé sous serre.	41
Figure 8. Effet de régime hydrique et de la variété sur le nombre de feuilles par plante de tournesol cultivé sous serre.	42
Figure 9. Effet de régime hydrique et de la variété sur la hauteur de la plante de tournesol cultivé sous serre.....	43
Figure 10. Effet de régime hydrique et de la variété sur le diamètre de la tige de tournesol cultivé sous serre.	44
Figure 11. Effet de régime hydrique et de la variété sur le diamètre de capitule de tournesol cultivé sous serre.	46
Figure 12. Effet de régime hydrique et de la variété sur le poids de capitule de tournesol cultivé sous serre.....	46
Figure 13. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en graines par plante de tournesol cultivé sous serre.	48
Figure 14. Effet de régime hydrique et de la variété sur le nombre de graines par plante de tournesol cultivé sous serre..	49
Figure 15. Effet de régime hydrique et de la variété sur le poids de 1000 graines de tournesol cultivé sous serre... ..	50
Figure 16. Effet de régime hydrique et de la variété sur la teneur relative en eau de tournesol	

cultivé en milieu naturel.	54
Figure 17. Effet de régime hydrique et de la variété sur la chlorophylle totale de tournesol cultivé en milieu naturel.....	55
Figure 18. Effet de régime hydrique et de la variété sur le nombre de feuilles par plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.....	56
Figure 19. Effet de régime hydrique et de la variété sur le nombre de feuilles par plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.....	57
Figure 20. Effet de régime hydrique et de la variété sur la hauteur de la plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.....	59
Figure 21. Effet de régime hydrique et de la variété sur la hauteur de la plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel	60
Figure 22. Effet de régime hydrique et de la variété sur le diamètre de la tige de la plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel	61
Figure 23. Effet de régime hydrique et de la variété sur le diamètre de la tige de la plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.....	62
Figure 24. Effet de régime hydrique et de la variété sur le diamètre de capitule de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.....	63
Figure 25. Effet de régime hydrique et de la variété sur le diamètre de capitule de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel	64
Figure 26. Effet de régime hydrique et de la variété sur le poids de capitule de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.....	66
Figure 27. Effet de régime hydrique et de la variété sur le poids de capitule de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.	67
Figure 28. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en graines par plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel	68
Figure 29. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en graines par plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.....	69
Figure 30. Effet de régime hydrique et de la variété sur le nombre de graines par plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel	71

Figure 31. Effet de régime hydrique et de la variété sur le nombre de graines par plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.....	72
Figure 32. Effet de régime hydrique et de la variété sur le poids de 1000 graine de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.....	73
Figure 33. Effet de régime hydrique et de la variété sur le poids de 1000 graines de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.	74
Figure 34. Effet de régime hydrique et de la variété sur la teneur en huile des graines de tournesol de la première année d'expérimentation	82
Figure 35. Effet de régime hydrique et de la variété sur la teneur en huile des graines de tournesol de la deuxième année d'expérimentation.	83
Figure 36. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en huile des graines de tournesol de la première année d'expérimentation.	84
Figure 37. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en huile des graines de tournesol de la deuxième année d'expérimentation	85

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques du matériel végétal utilisé dans l'expérimentation en milieu contrôlé.....	20
Tableau 2. Caractéristique de nouveau matériel végétal utilisé lors de la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.....	23
Tableau 3. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la teneur relative en eau de tournesol cultivé sous serre.....	37
Tableau 4. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la teneur en chlorophylle totale de tournesol cultivé sous serre.	39
Tableau 5. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la conductance stomatique de tournesol cultivé sous serre.....	40
Tableau 6. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le nombre de feuilles par plante de tournesol cultivé sous serre.....	42
Tableau 7. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la hauteur de la plante de tournesol cultivé sous serre.....	43
Tableau 8. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le diamètre de la tige de tournesol cultivé sous serre.....	44
Tableau 9. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le diamètre de capitule de tournesol cultivé sous serre.....	45
Tableau 10. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le poids de capitule de tournesol cultivé sous serre.....	45
Tableau 11. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le rendement en graines par plante de tournesol cultivé sous serre.....	47

Tableau 12. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le nombre de graines par plante de tournesol cultivé sous serre.....	49
Tableau 13. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le poids de 1000 graines de tournesol cultivé sous serre.....	50
Tableau 14. Coefficients de corrélation de rendement en graines par plante avec les différents paramètres de tournesol cultivé sous serre (Coefficients de Perseon).....	51
Tableau 15. Caractéristiques physico-chimiques du sol de l'expérimentation en milieu naturel.....	52
Tableau 16. Données Climatiques moyennes mensuelles de Relizane de l'année 2016.....	53
Tableau 17. Données Climatiques moyennes mensuelles de Relizane de l'année 2018.....	53
Tableau 18. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la teneur relative en eau de tournesol cultivé en milieu naturel.....	54
Tableau 19. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la chlorophylle totale de tournesol cultivé en milieu naturel.....	55
Tableau 20. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le nombre de feuilles par plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel...	56
Tableau 21. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le nombre de feuilles par plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel	57
Tableau 22. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la hauteur de la plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.....	58
Tableau 23. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la hauteur de la plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.....	59

Tableau 24. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le diamètre de la tige de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.....	61
Tableau 25. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le diamètre de la tige de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.....	62
Tableau 26. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le diamètre de capitule de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.....	63
Tableau 27. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le diamètre de capitule de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.....	64
Tableau 28. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le poids de capitule de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.....	65
Tableau 29. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le poids de capitule de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.....	66
Tableau 30. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le rendement en graines par plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.....	68
Tableau 31. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le rendement en graines par plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel	69
Tableau 32. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le nombre de graines par plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.	70
Tableau 33. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le nombre de graines par plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel	71
Tableau 34. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le poids de 1000 graines de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.	73

Tableau 35. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le poids de 1000 graines de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel74
Tableau 36. Coefficients de corrélation de rendement en graines avec les différents paramètres de la première année d'expérimentation en milieu naturel (Coefficients de Pearson).....	.75
Tableau 37. Coefficients de corrélation de rendement en graines avec les différents paramètres de la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel (Coefficients de Pearson).....	.76
Tableau 38. Caractéristiques physico-chimiques du sol de l'essai variétal77
Tableau 39. Données Climatiques moyennes mensuelles de Tiaret de l'année 2016.78
Tableau 40. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de la variété, de bloc et de leur interaction sur les paramètres morphologiques, le rendement et ses deux composantes de tournesol.78
Tableau 41. Moyennes des caractères morphologiques, rendement et ses deux composantes des variétés de tournesol évaluées en milieu naturel.....	.79
Tableau 42. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la teneur en huile des graines de tournesol de la première année d'expérimentation.....	.81
Tableau 43. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la teneur en huile des graines de tournesol de la deuxième année d'expérimentation.....	.82
Tableau 44. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le rendement en huile des graines de tournesol de la première année d'expérimentation.....	.84
Tableau 45. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le rendement en huile des graines de tournesol de la deuxième année d'expérimentation.....	.85
Tableau 46. Coefficients de corrélation de rendement en huile avec les différents caractères de la première année d'expérimentation en milieu naturel (Coefficients de Pearson).....	.88

Tableau 47. Coefficients de corrélation de rendement en huile avec les différents paramètres de la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel (Coefficients de Pearson).....	.88
Tableau 48. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur les caractéristiques physico-chimiques de l'huile des graines de tournesol de la première année d'expérimentation....	.89
Tableau 49. Moyennes des caractères physico-chimiques de l'huile des graines de tournesol de la première année d'expérimentation.....	.90
Tableau 50. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur les caractéristiques physico-chimiques de l'huile des graines de tournesol de la deuxième année d'expérimentation....	.90
Tableau 51. Moyennes des caractères physico-chimiques de l'huile des graines de tournesol de la deuxième année d'expérimentation.....	.91

Liste des abréviations

ABA : Acide abscissique

ANOVA : Analyse de variance

C.E : Conductivité électrique

ddl : Degré de liberté

DO : Densité optique

ETM : EvapoTranspiration Maximale

F : Fisher

FAO : Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

g.m-2 : Gramme par mètre carré

H% : humidité

Meq : milliéquivalent

mm : millimètre

MO% : Matière organique

P : Probabilité

pH : Potentiel Hydrogène.

pp : Pluviométrie

q/ha : Quintaux par hectare

RH : Régime hydrique

ROS : espèces réactives de l'oxygène.

T_{MAX} : Température maximal

T_{MIN} : Température minimal

TRE : Teneur relative en eau

Table des matières

- Dédicace
- Remerciements

- الملخص

- Résumé
- Abstract
- Liste des figures
- Liste des tableaux
- Liste des abréviations
- Table des matières
- Introduction

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

1. Historique de tournesol	3
2. Classification botanique de tournesol	3
3. Morphologie de tournesol	4
3.1. L'appareil végétatif aérien	4
3.2. L'appareil végétatif souterrain	4
3.3. Le système reproducteur	5
3.4. La graine	5
4. Physiologie et Phénologie de tournesol	5
4.1. Phase germinative - Levée (A1- A2)	6
4.2. Phase végétative (B1- B5)	6
4.3. Phase bouton floral (E1-E4)	7
4.4. Phase floraison (F1-F3.2)	7
4.5. Phase maturation (M0-M4)	7
5. Importance économique de tournesol	9
6. Utilisation de tournesol	9
6.1. Utilisation alimentaire	9
6.2. Utilisation non alimentaire	10

7. L'huile de tournesol	10
7.1. Composition	10
7.2. Caractéristiques	11
7.3. Qualité nutritionnelle	11
8. Exigences édaphoclimatiques de la culture de tournesol	12
9. La conduite de la culture de tournesol	12
9.1. Choix variétale	12
9.2. Implantation	12
9.3. Fertilisation	13
9.4. Irrigation	13
9.5. Désherbage	14
9.6. Lutte contre les ravageurs et les maladies	14
9.7. La récolte	15
10. Effet de stress hydrique sur le tournesol	15
10.1. Effet de stress hydrique sur la morphologie	15
10.2. Effet de stress hydrique sur la physiologie	16
10.3. Effet de stress hydrique sur le rendement	17
11. Mécanismes d'adaptation du tournesol à la sécheresse	18
11.1. L'esquive	18
11.2. L'évitement	18
11.3. La tolérance	19

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

1. Expérimentation en milieu contrôlé (Essai sous serre)	20
1.1. Matériel végétal	20
1.2. Dispositif expérimental et conditions de culture	20
1.3. Conduite de l'essai	21
1.3.1. Préparation de substrat	21
1.3.2. Germination et repiquage des graines	21
1.3.3. Irrigation	22
1.3.4. Fertilisation et protection phytosanitaire	22
2. Expérimentation en milieu naturel	22
2.1. Matériel végétal	22
2.2. Analyse du sol	23

2.2.1. Les analyses physiques	23
2.2.1.1. Mesure de l'humidité	23
2.2.1.2. Dosage de la matière organique (Méthode de calcination)	23
2.2.1.3. Analyse granulométrique	23
2.2.2. Les analyses chimiques	24
2.2.2.1. Mesure de pH	24
2.2.2.2. Mesure de la conductivité électrique	24
2.2.2.3. Dosage de calcaire total	25
2.3. Données climatiques de Relizane	25
2.4. Dispositif expérimental et conduite culturale	25
2.4.1. Travail du sol et précédent cultural	27
2.4.2. Semis et désherbage	27
2.4.3. Irrigation	27
3. Expérimentation en milieu naturel (Essai variétal)	27
3.1. Matériel végétal	27
3.2. Données climatiques de Tiaret	27
3.3. Dispositif expérimental et conduite culturale	27
3.3.1. Travail du sol et précédent cultural	29
3.3.2. Semis et désherbage	29
3.3.3. Irrigation	29
4. Stade de mesure et paramètres étudiés	29
4.1. Paramètres physiologiques	29
4.1.1. Teneur relative en eau	29
4.1.2. Conductance stomatique	29
4.1.3. Dosage des pigments chlorophyllien	30
4.2. Paramètres morphologiques	30
4.3. Paramètres de production	30
5. Extraction et caractérisation de l'huile de tournesol	31
5.1. Préparation de la farine	31
5.2. Extraction de l'huile par soxhlet	31
5.2.1. Teneur et rendement en huile	32
5.3. Caractérisation physico-chimique de l'huile	33
5.3.1. Analyse physique	33
5.3.1.1. Indice de Réfraction	33

5.3.2. Analyses chimiques	33
5.3.2.1. Indice d'acide et acidité	33
5.3.2.2. Indice de saponification	34
5.3.2.3. Indice d'ester	35
5.3.2.4. Pourcentage d'altération	35
5.3.2.5. Indice de peroxyde	35
6. Analyse statistique	36

Chapitre 3 : Résultats et discussion

1. Expérimentation en milieu contrôlé (Essai sous serre)	37
1.1. Effet de régime hydrique et de la variété sur les paramètres physiologiques	37
1.1.1. Teneur relative en eau	37
1.1.2. Teneur en chlorophylle totale	38
1.1.3. Conductance stomatique	40
1.2. Effet de régime hydrique et de la variété sur les paramètres morphologiques	41
1.2.1. Nombre de feuilles par plante	41
1.2.2. Hauteur de la plante	43
1.2.3. Diamètre de la tige	44
1.2.4. Diamètre et poids de capitule	45
1.3. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en graines et ses deux composantes	47
1.3.1. Rendement en graines par plante	47
1.3.2. Nombre de graines par plante	49
1.3.3. Le poids de 1000 graines	50
1.4. Corrélations binaires entre le rendement en graines et les différents paramètres étudiés	51
2. Expérimentation en milieu naturel	52
2.1. Analyse du sol	52
2.2. Données Climatiques de Relizane	52
2.3. Effet de régime hydrique et de la variété sur les paramètres physiologiques	53

2.3.1. Teneur relative en eau	53
2.3.2. Teneur en chlorophylle totale	55
2.4. Effet de régime hydrique et de la variété sur les paramètres morphologiques	56
2.4.1. Nombre de feuilles par plante	56
2.4.2. Hauteur de la plante	58
2.4.3. Diamètre de la tige	61
2.4.4. Diamètre de capitule	63
2.4.5. Poids de capitule	65
2.5. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en graines et ses deux composantes	67
2.5.1. Rendement en graines par plante	67
2.5.2. Nombre de graines par plante	70
2.5.3. Poids de 1000 graines	73
2.6. Corrélations binaires entre le rendement en graines et les différents paramètres étudiés	75
2.6.1. Première année d'expérimentation	75
2.6.2. Deuxième année d'expérimentation	76
3. Expérimentation en milieu naturel (Essai variétale)	77
3.1. Analyse de sol	77
3.2. Données climatiques de Tiaret	77
3.3. Etude des paramètres morphologiques, de rendement et ses composantes	78
4. Extraction et caractérisation de l'huile de tournesol	81
4.1. Effet de régime hydrique et de la variété sur la teneur en huile	81
4.1.1. Première année d'expérimentation	81
4.1.2. Deuxième année d'expérimentation	82
4.2. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en huile de tournesol	84
4.2.1. Première année d'expérimentation	84
4.2.2. Deuxième année d'expérimentation	84

4.3. Corrélations binaires entre le rendement en graines et les différents paramètres étudiés	87
4.3.1. Première année d'expérimentation	87
4.3.2. Deuxième année d'expérimentation	88
4.4. Effet de régime hydrique et de la variété sur les caractéristiques physico-chimiques de l'huile de tournesol	89
4.4.1. Première année d'expérimentation	89
4.4.2. Deuxième année d'expérimentation	90
Conclusion	95
Références bibliographiques	97
Annexes	

Introduction

Introduction

La culture de tournesol avec une production mondiale oscillant autour de 47 millions de tonnes, un rendement mondiale de 18q/ha et une superficie cultivée mondial de 26 millions d'hectares est l'une des cultures oléagineuses annuelle les plus importantes dans le monde avec le coton, le colza, le soja et l'arachide (FAOSTAT, 2017). Les principaux pays producteurs de tournesol sont l'Ukraine avec 12,23 millions de tonnes, la Russie avec 10,48 millions de tonnes, l'Union européenne avec 10,29 millions de tonnes et l'Argentine avec 3.5 millions de tonnes (FAOSTAT, 2017).

Cette culture s'inscrit dans une politique d'agriculture durable tout en présentant de nombreux atouts agronomiques, technologiques et environnementaux; c'est une plante rustique avec de faibles exigences en eau et en intrants (Ayerdi-Gotor, 2008) ; elle est simple, souple et adaptable à une large gamme de situations pédoclimatiques et de systèmes de culture, laissant le sol dans un état favorable aux cultures suivantes (Lecomte et Nolot, 2011) ce qui contribue à l'équilibre des rotations et favorise la biodiversité (Ayerdi-Gotor, 2008). Le tournesol se caractérise par une productivité appréciable et une bonne qualité de matière première. Ces aspects sont influencés par le génotype, l'environnement et les facteurs agronomiques.

D'autre part, le tournesol présente de nombreux débouchés que ce soit dans le domaine alimentaire ou non alimentaire. Dans le secteur alimentaire, Le tournesol est d'abord cultivé pour ses graines qui représentent l'une des plus importantes sources d'huiles alimentaires au monde dont la teneur en huile est voisine de 45%. L'huile de tournesol bénéficie d'une bonne image en raison de sa couleur pâle, grande diversité de composition en acides gras, saveur neutre, forte résistance à l'oxydation et point de fumée élevé (Asa, 2008). Ainsi sa richesse en composées mineures notamment les tocophérols et phytostérols apporte un intérêt nutritionnel supplémentaire avec des effets bénéfiques sur la santé (Ayerdi-Gotor et al. 2008).

Dans le secteur non alimentaire, l'huile de tournesol peut être utilisée dans la fabrication des lubrifiants, des peintures, des biosolvants et des produits cosmétiques ou pharmaceutiques (Roche, 2005). Ainsi elle peut être utilisée directement comme biocarburant dans les moteurs diesel ou après estérification en ester méthylique. Enfin, les tourteaux résiduels de l'extraction d'huile sont valorisés en tant qu'alimentation pour bétail ou comme biomatériaux (Ayerdi-Gotor, 2008).

En Algérie, la production des graines oléagineuses n'a jamais été importante en raison des conditions climatiques et de la préférence accordée à la production de céréales avec jachère.

En conséquence, le colza, l'arachide et le tournesol qui sont les seuls oléagineux cultivés restent cantonnés à quelques milliers de tonnes depuis des décennies. Toutefois le tournesol qui a connu un pic de production à 1800 tonne au milieu des années 1970 est actuellement disparu (Rastoin et Benabderrazik, 2014). D'autre part, selon Hachemi (2006) après les céréales et le lait les huiles alimentaires constituent le troisième aliment consommé en Algérie dont l'huile de tournesol s'avère appréciée par le consommateur Algérien avec une valeur d'environ 1.98 kg/personne/an (Nouri, 2011 ; FAO, 2013). Ce déséquilibre entre la production locale et la consommation de l'huile est résolu par l'importation des graines et de l'huile de tournesol avec des factures qui ne cesse d'augmenter.

Devant cette situation il est impératif de relancer les cultures oléagineuses en Algérie y compris le tournesol qui est une plante à débouchés nationaux garantis qui doit bénéficier d'une grande attention. Les premiers essais sur les possibilités de la mise en culture des graines oléagineuses en Algérie ont été réalisés en 1954 à la station d'essai de semences et d'amélioration des plantes à El-Harrach où les cultures suivantes ont été testées avec succès : tournesol, soja, colza, carthame, arachide, coton, ricin et le lin (Temagoult, 2009).

Le tournesol est une culture de printemps pratiquée en conditions pluviales cependant la contrainte majeure en Afrique du Nord est le déficit hydrique en fin de cycle qui pénalise énormément le rendement. Ce déficit en eau affecte la turgescence cellulaire et induit également une fermeture stomatique ce qui limite les échanges gazeux principalement l'assimilation de carbone atmosphérique comme il réduit la transpiration. Ainsi, il a des effets négatifs sur la nutrition minérale notamment l'absorption et le transport des nutriments. Ces effets peuvent pénaliser la croissance et la photosynthèse, les principales fonctions physiologiques impliquées dans l'élaboration du rendement (Lisar et al. 2012 ; Maury et al. 2011).

Dans ce contexte, notre travail vise à étudier la possibilité de la réhabilitation de la culture de tournesol en Algérie et ce à travers l'étude de l'adaptation et la productivité de cette plante en conditions de déficit hydrique qui est probablement le facteur limitant le plus important des rendements des cultures à travers le monde et en Algérie.

Notre thèse sera présentée sous forme de trois chapitres :

-Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique relative au tournesol, à l'effet de stress hydrique sur le tournesol et les mécanismes d'adaptation à la sécheresse.

-Le deuxième chapitre présente les matériels et les méthodes utilisés.

-Le troisième chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus.

Enfin la thèse se conclura en proposant quelques perspectives à ce travail.

Synthèse bibliographique

1. Historique de tournesol

Le tournesol (*Helianthus annuus* L.) est originaire d'Amérique du nord où l'on trouve encore sa forme sauvage (Burke et al. 2002), les Indiens ont été les premiers à la domestiquer. Les Amérindiens ont ainsi cultivé le tournesol dès le XVI^{ème} siècle où ils utilisaient ses graines et son huile à des fins alimentaires, médicinales, tinctoriales et cérémoniales.

Les Espagnols ont introduit le tournesol en Europe pour la première fois au XVI^{ème} siècle où il était utilisé comme plante ornementale d'abord en Espagne, en France puis en Italie et enfin sur presque tout le continent Européen. Ce n'est qu'au XVIII^{ème} siècle que l'intérêt alimentaire et oléagineux du tournesol s'est révélé notamment avec la sélection de variétés à gros capitules et à grosses graines pour l'alimentation humaine ainsi que la sélection massale de variétés à forte teneur en huile. C'est vers 1830-1840 que la trituration se fait à l'échelle industrielle en Russie où le développement des variétés de tournesol riches en huile a servi à de nombreux programmes de sélection (Abou al fadil, 2006).

A partir de 1960 avec l'exploitation de la vigueur hybride surtout grâce à la découverte de la stérilité male cytoplasmique ainsi que de celle des gènes de restauration de la fertilité, la production mondiale et l'industrie semencière de tournesol sont fortement développées (Leclercq, 1969).

2. Classification botanique de tournesol

Le tournesol a été décrit pour la première fois dans l'herbier du botaniste Dodaneus en 1568 sous le nom de *Chrysanthemum perviranum*. Le mouvement héliotropique de la fleur de tournesol due à la courbure de la tige lui a valu son nom botanique d'*Helianthus* (du grec helios : soleil et anthos : fleur), *annuus* étant lié à sa durée de vie annuelle (Abou al fadil, 2006).

C'est une espèce diploïde ($2n = 34$ chromosomes) et annuelle. Le genre *Helianthus*, originaire d'Amérique du Nord renferme plusieurs espèces réparties en 4 sections selon la classification de Heiser (1969) nommées *divaricati* (30 espèces), *annui* (13 espèces), *ciliaries* (6 espèces) et *fruticosi* (17 espèces). Deux espèces sont exploitées à des fins alimentaires : *tuberosus* L. (le topinambour) et *annuus* (le tournesol cultivé).

D'après Chadefaud et Emberger (1960), le tournesol cultivé *Helianthus annuus* L. appartient :

- à l'embranchement des Spermaphytes
- au sous-embranchement des Angiospermes
- à la classe des Dicotylédones
- au phylum des Pariétales-Rhoeadales-Synanthérées

- à l'ordre des Synanthérales
- à la famille des Astéracées ou Composées
- à la sous-famille des Tubuliflores
- au genre *Helianthus* L
- à l'espèce *annuus*

3. Morphologie de tournesol

3.1. L'appareil végétatif aérien

L'espèce cultivée (*Helianthus annuus* L) a une tige cylindrique, non ramifié « simple » et peut varier de glabre à très pubescente. Elle mesure de 1 à 4 cm de diamètre et de 50 à 300 cm de hauteur. En règle générale les premières paires de feuille sont toujours opposées et les suivantes alternées suivant une phyllotaxie en spirale. Les feuilles sont habituellement pétiolées et trinervées; leur forme varient de linéaire à ovée et elles sont généralement entières ou dentelées. Leur taille est ainsi variables où les feuilles les plus grandes se localisent à une hauteur intermédiaire et jouent un rôle important dans la formation et l'accumulation des réserves lipidiques. Le nombre de feuilles chez les variétés cultivées de tournesol varient entre 20 et 30, l'intensité de leur couleur peut varier de vert pâle à vert foncé. Toute la partie aérienne se tourne vers le soleil du matin au soir, ce mouvement s'arrête à la floraison où le capitule demeurant face au soleil levant (Seiler, 1997; Vear, 1992).

3.2. L'appareil végétatif souterrain

Le système racinaire de tournesol est de forme pivotant, il se caractérise par un axe principal « le pivot » qui peut atteindre de très grandes profondeurs (2.70 m) dans des sols légers ou meubles (Seiler, 1997) et un embranchement de racines de premier et second ordre (racines secondaires, tertiaires et quaternaires respectivement). Bien que le pivot puisse dépasser les 2 mètres de profondeur, il est peu agressif face aux obstacles présents dans le sol (galets, semelle de labour). Les racines secondaires sont surtout présentes en surface à proximité du pivot. Leur quantité et leur diamètre diminuent en fonction de l'éloignement de celui-ci, les racines de second ordre étant elles mêmes plus fines et plus courtes (Aguirrezabal, 1993). Le système racinaire de tournesol est considérée comme performant dans l'absorption d'eau du fait de son profondeur aussi puisque il occupe un volume très important du sol ce qui lui permettant d'atteindre des ressources non accessibles par d'autres plantes annuelles et une grande résistance à la sécheresse (Scheiner et Lavado, 1999 ; Vear, 1992).

3.3. Le système reproducteur

L'inflorescence est un capitule ce qui est une caractéristique de la famille des Composées. Celui-ci mesure à maturité entre 5 à 50 cm de diamètre et comprend de 50 à 3000 fleurs. Elle est composée d'un plateau parenchymateux de 1 à 4 cm d'épaisseur sur lequel sont disposées des fleurs ou fleurons organisés en hélices multiples. Les fleurons sont de deux types : à la périphérie du capitule les fleurs extérieures ligulées (jaunes et stériles) dont le rôle principale est d'attirer les pollinisateurs, au centre les fleurs intérieures tubulées caractérisées par une corolle courte (2 sépales rudimentaires, 5 étamines à filets libres et à anthères soudé, un ovaire et un style) assurent la reproduction. La fécondation est allogame, entomophile mais peut aussi être anémophile. Les fruits sont appelée akènes et disposés en spirale. La floraison du tournesol est centripète où les parastiques extérieurs étant fécondés en premier lieu (Seiler, 1997 ; Vear, 1992 ; Mirleau-Thebaud, 2012).

3.4. La graine

La graine de tournesol est en réalité un akène, fruit sec indéhiscent constitué d'un embryon recouvert d'un tégument séminal formant l'amande et d'un péricarpe non soudé dérivé de la paroi de l'ovaire sec et indéhiscent correspondant à l'enveloppe de l'akène (ou coque). La taille de la graine peut varier de 7 à 25 mm de longueur et de 4 à 13 mm de largeur. Quant à leur forme peut être linéaire, ovale ou presque ronde (Côme et Corbineau, 1998).

La coque est essentiellement formée de fibres de cellulose, de lignine et d'hémicellulose (70 à 90% de la matière sèche) (Connor et Hall, 1997). Cependant il est rapporté dans la littérature que de larges différences de composition en constituants sont observées sur la teneur en lipides (0,9 à 7,1% /MS) et en protéines (2,8 à 7,1% /MS) (Ayerdi-Gotor, 2008).

L'amande est le lieu de stockage des réserves nécessaires au développement de l'embryon et indispensable à la germination et au développement de la plantule. Ces réserves sont constituées de deux types de substances, les protéines et les lipides représentant respectivement 20 et 50% de la matière sèche de la graine. Ces valeurs varient selon le génotype et les conditions de culture. Les 38% restant reviennent aux carbohydrates et minéraux (14%), à l'eau (9%) et à la cellulose (15%) (Roche, 2005).

4. Physiologie et Phénologie de tournesol

Le développement phénologique de tournesol est caractérisé par une succession de stades repères identifiés de manière visuelle ou physiologique (Merrien et Milan, 1992). Le cycle complet de tournesol dure de 80 à plus de 170 jours selon les génotypes, les conditions climatiques et culturales (Abou al fadil, 2006). La plante ayant besoin de 1500 à 1700°C/jour pour arriver à maturité physiologique (Mirleau-Thebaud, 2012). Différentes échelles de

notations phénologiques ont ainsi été proposées pour le tournesol tel que Schneiter et Miller (1981), l'échelle du CETIOM basée sur des observations morphologiques notamment le nombre de feuilles puis stades du bouton et du capitule a été mise en place et largement utilisée par la suite (CETIOM, 2004). L'acquisition de biomasse se déroule principalement pendant les premières phases du cycle jusqu'à la floraison. Selon les organes (feuille, tige, racines) l'acquisition est maximale entre 50 et 75 jours après le semis (Maertens et Bosc, 1981; Merrien et Milan, 1992).

4.1. Phase germinative - Levée (A1- A2)

Suivant les conditions de températures et de pluviométrie cette phase peut s'étendre de 7 à 20 jours. La germination de la graine est possible à partir de 3°C cependant qu'elle est optimale autour de 8°C, le zéro de végétation est de 4.8°C (Granier et Tardieu, 1998). Dans un premier temps les organes de réserve que constituent les cotylédons sont les premiers à émerger. Ils serviront de source principale pour les premières phases de croissance jusqu'à ce que la plante soit en mesure de synthétiser elle-même ses ressources (Merrien et Milan, 1992). Durant cette phase, le système racinaire présente une croissance linéaire où la racine primaire (pivot) connaît une croissance géotropique et colonise le sol rapidement suivi par des racines secondaires qui connaissent une croissance diagéotropique dépendante de leur position d'insertion et de leur environnement (Merrien et Milan, 1992).

4.2. Phase végétative (B1- B5)

Cette phase dure en moyenne 30 jours jusqu'à cinq paires de feuilles (B5) dont les organes aériens et souterrains se mettent en place. Ce début de cycle est déterminant pour le bon fonctionnement de la plante en devenir puisqu'il déterminera à la fois la capacité de la plante à fournir de l'eau et des minéraux par son système souterrain (les accidents cultureux ont alors de graves conséquences) et la capacité de la plante à assurer sa survie grâce à la photosynthèse (Merrien et Milan, 1992). En début de cycle la plante privilégie la mise en place du système racinaire qui croît en moyenne trois fois plus vite que l'appareil aérien avec une croissance linéaire (Maertens et Bosc, 1981). Ainsi cette phase est marquée par l'accumulation de biomasse dans les feuilles qui sont considérées siège de la synthèse des assimilats, ces derniers seront redistribués à destination du système racinaire (translocation). A partir de la cinquième paire de feuilles (B5), la phylotaxie devient alterne et l'initiation des ébauches florales commence. Durant cette phase, les accidents climatiques peuvent conduire à une réduction de la surface foliaire pouvant engendrer à terme des effets négatifs à la fois sur le rendement et sur la teneur en huile (Mirleau-Thebaud, 2012).

4.3. Phase bouton floral (E1-E4)

Elle dure de 40 à 50 jours, c'est la phase de croissance exponentielle de la partie aérienne de la plante alors que la croissance racinaire a atteint sa valeur maximale. L'initiation des ébauches florales s'achève au stade bouton étoilé (E1). C'est également la période d'absorption maximale des éléments minéraux (azote, bore...). Le mouvement des assimilats s'est inversé du système racinaire vers la partie aérienne (Maertens et Bosc, 1981).

4.4. Phase floraison (F1-F3.2)

Cette période peut durer jusqu'à trente jours pour une parcelle alors que pour une plante elle varie autour de 9 jours en fonction du génotype. C'est une période clé pour la productivité où la plante est extrêmement sensible au stress hydrique (Nouri, 2011).

La floraison est centripète le long des parastiques débutant avec les fleurs ligulées extérieures qui restent présentes jusqu'à la fin de la floraison de toutes les fleurs tubulées. La floraison des fleurs tubulées débute avec l'apparition des étamines qui libèrent leurs grains de pollen puis du stigmate qui émerge à travers le tube formé par les anthères. La formation d'un akène résulte de la transformation d'un ovule après sa fécondation par le grain de pollen (Nouri, 2011).

La croissance aérienne a atteint son maximum, les premières racelles se nécrosent engendrant une baisse de la longueur totale du système racinaire. A partir de la floraison, les assimilats sont orientés vers le remplissage des grains (Mirleau-Thebaud, 2012).

4.5. Phase maturation (M0-M4)

Pendant cette phase on assiste à la sénescence foliaire et à une redistribution des assimilats protéique vers les akènes pour la protéogénèse. D'autre part, il existe des mouvements de translocation de saccharose des feuilles encore actives vers l'organe puits que constitue le capitule. Ces produits de la photosynthèse sont exclusivement destinés à la lipidogénèse (Nouri, 2011). De ce fait une chute de biomasse des feuilles et des tiges (organes sources) est observée de façon concomitante avec l'augmentation du poids du capitule (organe puits) (Mirleau-Thebaud, 2012). La mise en place des réserves dans l'embryon s'accompagne d'une baisse progressive de la teneur en eau (9% d'humidité à la maturité complète). Le système souterrain disparaît progressivement au cours de la maturation de la plante.

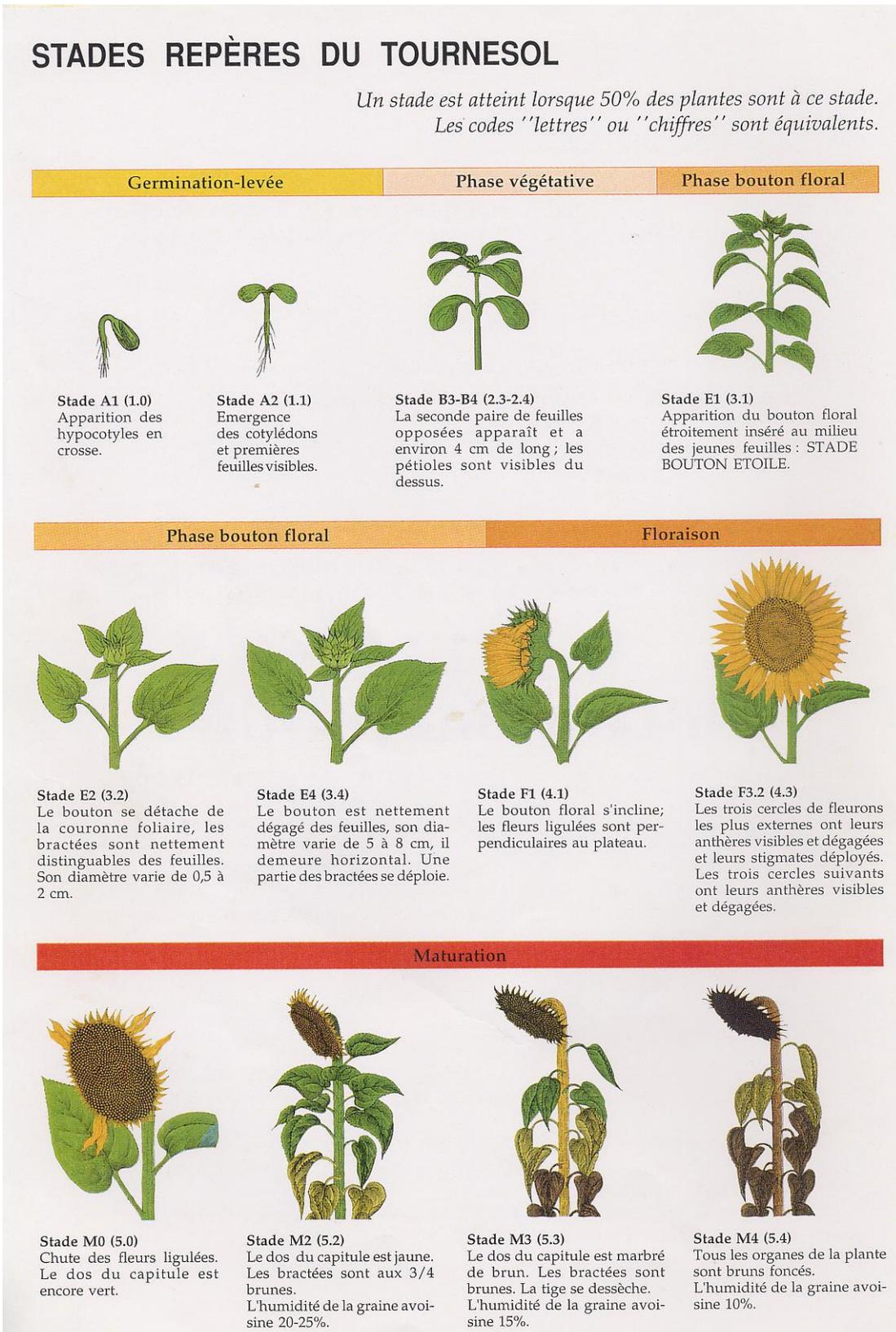


Figure 1. Cycle de développement de tournesol cultivé décrit par le CETIOM (Cetiom, 2004).

5. Importance économique de tournesol

Le tournesol est l'une des espèces oléagineuses annuelle les plus importantes dans le monde où il occupe la quatrième position après le soja, le colza et le coton (Fernández Luqueño et al. 2014) avec une superficie de 26 millions ha, une production de 47 millions de tonnes et un rendement de 18. q/ha (FAOSTAT, 2017) comme il représente 8% du marché mondial des oléagineux.

Selon la FAOSTAT(2017), les principaux pays producteurs sont l'Ukraine avec 12.23 millions de tonnes, la Russie avec 10,48 millions de tonnes, l'Union européenne avec 10,29 million de tonnes et l'Argentine avec 3.5 millions de tonnes. D'autre part, l'huile de tournesol avec une production mondiale de 15.84 millions de tonnes se classe après l'huile de soja et l'huile de colza respectivement.

La production des graines oléagineuses en Algérie n'a jamais été importante en raison des conditions climatiques et de la préférence accordée à la production de céréales avec jachère. En conséquence, le colza, l'arachide et le tournesol qui sont les seuls oléagineux cultivés restent cantonnés à quelques milliers de tonnes depuis des décennies. Toutefois le tournesol qui a connu un pic de production à 1800 tonne au milieu des années 1970 a disparu (Rastoin et Benabderrazik, 2014) en revanche selon la FAOSTAT(2017) la production des graines de tournesol est de 85 tonnes.

D'autre part, la consommation de l'huile de tournesol en Algérie s'établissait à environ 1.98 kg/personne/an (FAO, 2013) par conséquent ce déficit alimentaire entre la production et la consommation est comblé par le recours à l'importation des graines et de l'huile de tournesol avec des quantités estimées selon la FAOSTAT (2016) à 10430 et 65552 de tonnes respectivement dont les factures sont de 14210 et 54121 de dollar.

6. Utilisation de tournesol

Le tournesol présente de nombreux débouchés que ce soit dans l'alimentation humaine, animale ou dans la valorisation des sous-produits des industries huilières (Asa, 2008).

6.1. Utilisation alimentaire

Le tournesol est d'abord cultivé pour ses graines qui représentent l'une des plus importantes sources d'huiles alimentaires au monde. La teneur en huile des graines de tournesol est voisine de 45% (Asa, 2008).

L'huile de tournesol seule ou combinée à d'autres huiles est capable de répondre à de nombreuses exigences du secteur de l'agro-alimentaire. Elle est le plus souvent utilisée comme huile de table pure ou en mélange et dans l'industrie alimentaire pour la fabrication d'assaisonnements, de sauces, de margarines (Ayerdi-Gotor, 2008).

En outre, la graine entière de tournesol peut également être valorisée dans l'alimentation humaine. Certains pays (Maroc, Espagne,...) sont de gros consommateurs de graines de tournesol de bouche et bénéficient de la forte teneur en acide oléique des graines (Roche, 2005).

Le tourteau pour l'alimentation animale; coproduit de l'huilerie (55% de la graine) constitue la deuxième utilisation des graines de tournesol. Le tourteau de tournesol se caractérise par sa haute teneur en protéines (20-35%) qui ont peu de composés antinutritionnels et d'excellentes propriétés physico-chimiques (Ayerdi-Gotor, 2008).

6.2. Utilisation non alimentaire

Au niveau non-alimentaire, les principaux secteurs de valorisation de l'huile de tournesol sont l'énergie avec la production de biocarburants et l'oléochimie avec la production de bioproduits élaborés à partir de l'huile ou ses dérivés.

Le raffinage des huiles alimentaires élimine une partie des tocophérols et des phytostérols qui peuvent être récupérées et valorisées en particulier dans l'industrie pharmaceutique et cosmétique. Les phytostérols présentent une action anti-inflammatoire et anti-dessiccateurs (Folmer, 2003; Borlescu et al. 2007). Les tocophérols sont abondamment utilisés en cosmétologie grâce à leur action de vasodilatation et leur pouvoir anti-oxydant (Ayerdi-Gotor, 2008).

En outre, les résidus de récolte (tiges, feuilles, capitules évidés) peuvent être réincorporés au sol afin de l'enrichir mais ils peuvent également être collectés pour entrer dans la fabrication de biomatériaux (Rouilly et al. 2006; Ramaraj, 2007).

7. L'huile de tournesol

7.1. Composition

L'huile de tournesol est majoritairement constituée de triglycérides ou triacylglycérols (95 à 99% d'huile) contenant les acides gras. Les 1 à 5% restants renferment des composés dits « mineurs » en raison de leur faible teneur tels que des hydrocarbures, des alcools aliphatiques et triterpéniques, des tocophérols et des stérols (Prevost, 1987).

La composition en acides gras des triglycérides de l'huile de tournesol varie d'un cultivar à l'autre. Globalement, cette huile se compose d'environ 90% d'acides gras insaturés (acides oléique et linoléique) et 10 % d'acides gras saturés (acides palmitique et stéarique) (Roche, 2005).

Actuellement, trois types de cultivars peuvent être rencontrés selon leur teneur en acide oléique: de 20 à 50%, les cultivars standard (classiques), de 50 à 70% les cultivars mi-oléiques et plus de 70%, les cultivars oléiques (Sadras et Villalobos, 1996).

7.2. Caractéristiques

L'huile de tournesol est considérée comme une huile de première qualité grâce à ces caractéristiques : Couleur pâle, forte teneur en acides gras non saturés, absence d'acide linoléique et d'acides gras trans, saveur neutre, forte résistance à l'oxydation et point de fumée élevé et la grande diversité de composition en acides gras.

Selon le codex alimentarius (1999), l'huile de tournesol se caractérise par les caractéristiques physico-chimiques suivantes :

Densité relative (x°C/eau à 20 °C) : 0.918-0.923

Indice de réfraction : 1.461-1.468

Indice de saponification (mg KOH/g d'huile) : 188-194

Indice d'iode : 118-141

Insaponifiable (g/kg) : < 15

Indice d'acide (mg de KOH/ g de graisse ou d'huile) : 4.0

Indice de peroxyde (meq d'oxygène actif / Kg d'huile) : 15

7.3. Qualité nutritionnelle

L'huile de tournesol a plus récemment fait l'objet d'un intérêt croissant en raison de leur stabilité qui les rend plus propre à la cuisson. Ainsi sa composition intermédiaire permet de remplacer les huiles de palme, de coton, de soja et de colza (Kartika, 2005). Il est riche en acides gras mono et polyinsaturés correspond parfaitement aux recommandations nutritionnelles actuelles (Kartika, 2005).

En outre cette huile possède de nombreuses propriétés nutritives et bénéfiques pour la santé. La forte teneur en acide oléique et la forte teneur en acides gras polyinsaturés des génotypes oléiques permet de prévenir l'athérosclérose. La diversité des acides gras dans l'alimentation humaine et leurs apports en quantités appropriées sont nécessaires pour la prévention des maladies cardiovasculaires (Delplanque, 2000).

Les tocophérols présentent des propriétés anti-oxydantes responsables de la stabilité oxydative de l'huile (Demir et Cetin, 1999). In vivo, L' α -tocophérol, appelé vitamine E, a pour fonction de protéger les structures sensibles à l'oxydation comme les lipides (essentiellement sous forme condensée dans les membranes et les lipoprotéines), les bases nucléotidiques de l'ADN et les protéines. L'activité anti-oxydante des tocophérols protège également les acides gras en éliminant les radicaux libres et les espèces oxygène réactives (Roche, 2005). Outre ces propriétés anti-oxydantes, des études montrent que les tocophérols réduisent les maladies cardiovasculaires et ont certaines propriétés anti-cancéreuses (Riccioni et al. 2007).

Les phytostérols inhibent l'absorption intestinale du cholestérol en le remplaçant dans les micelles de sels biliaires (Calpe-Berdiel et al. 2005) comme ils inhibent la biosynthèse du cholestérol (leur biosynthèse). Ils diminuaient les risques des maladies cardiovasculaires, aussi ils ont une action anticancéreuse et immunomodulatrice (Zangenberg et al. 2004) et anti inflammatoire (Bouic et al. 1999).

8. Exigences édaphoclimatiques de tournesol

Le tournesol s'adapte à différentes conditions climatiques; semi-arides, chaud et modéré. La température idéale de la croissance varié entre 27 et 28°C cependant la production ne varie pas beaucoup si les températures restent entre 8°C et 34°C. La germination est inhibée si la température est inférieure à 4°C. La plante supporte les périodes de stress hydrique mais le rendement et la teneur en huile sont réduits lorsque la plante est exposée au déficit hydrique durant les stades de croissance notamment la floraison et le remplissage des graines. Le tournesol produit un rendement moyen avec une précipitation de 300mm quoique l'idéal est d'avoir entre 500 et 700 mm de précipitations bien distribuées. Les régions trop humides sont inadaptées à cette culture du fait des maladies qui prolifèrent dans ces environnements (Rousset, 2008 ; FAO, 2010).

Du point de vu édaphique ; le tournesol se développe bien dans des sols variant d'une texture sablonneuse à argileuse ainsi il n'exige pas une grande fertilité pour produire de façon satisfaisante. D'autre part, le sol ne doit pas avoir de problème d'acidité (pH minimum = 5,2) et de compactage comme il est préférable d'opter pour des sols corrigés, profonds, fertiles, plats et bien drainés afin que les racines se développent normalement (Rousset, 2008).

9. La conduite de la culture de tournesol

9.1. Choix variétale

Le choix des variétés s'effectue en fonction de sa précocité ou il faut adaptez la précocité de la variété et la date du semis à la région de culture pour limiter le développement des maladies de fin de cycle (sclérotinia du capitule et botrytis) et assurer de bonnes conditions de récolte (Lartigot, 2015). Outre la productivité et la richesse en huile, la sensibilité à la verse et aux pucerons ainsi que les degrés de tolérance aux différentes maladies (Phomopsis, sclerotinia) sont des critères de choix importants des variétés (Agreste, 2003).

9.2. Implantation

Le tournesol peut se développer sur différents types de sols, mais préfère les sols qui se réchauffent rapidement. L'implantation du tournesol est généralement réalisée après un travail du sol profond pour favoriser un bon développement du pivot racinaire, la compaction du sol étant très dommageable pour le rendement (Mirleau-Thebaud, 2012). Par conséquent il faut

assurez une bonne structure de sol pour permettre une levée rapide et suffisante (Lartigot, 2015).

Le semis se fait dès que le sol soit suffisamment réchauffé « 8°C » dans un lit de semence bien ressuyé à une profondeur de 2 à 3 cm si le sol est frais et entre 4 à 5 cm si le sol est sec en surface. La période de semis s'étale entre le début avril et début mai. Des écartements de 40 à 60 cm sont préférés (Lartigot, 2015) ce qui est optimum pour la capture d'énergie lumineuse et l'exploration du sol par le système racinaire (Desanlis, 2013). Le peuplement optimal se situe vers 60 000 pieds/ha, si la densité de peuplement est trop élevée, les capitules sont petits et les tiges plus fragiles. Par contre, si la densité est faible, les capitules sont plus gros et restent humides plus longtemps (Desanlis, 2013).

9.3. Fertilisation

La fertilisation azotée se pratique au semis par un apport initial de 60 à 80 unités complété parfois au stade 14 feuilles afin de mieux répondre aux besoins croissants de la plante. Cependant un excès d'azote peut augmenter le risque de verse, de maladies et retarder la récolte. Comme pour les autres cultures, les doses à apporter se raisonnent en fonction des besoins de la plante, de l'objectif de rendement et de la fourniture par le sol. Grâce au système racinaire bien développé, le tournesol mobilise très bien l'azote minéral du sol et requiert une fertilisation modérée. L'optimum de fertilisation peut ainsi varier de 0 à 120 kg N/ha selon les situations (Seassau, 2010).

Le tournesol est moyennement exigeant en potasse et peu exigeant en phosphore (Lartigot, 2015) où 40 à 70 unités de phosphore et de potassium sont recommandées.

9.4. Irrigation

Le tournesol est une culture réputée tolérante à la sécheresse mais qui valorise bien de faibles apports d'eau apportés autour de la floraison (Champolivier et al. 2011).

Les besoins en eau de la culture pour maximiser le rendement ont été évalués à 420 mm en moyenne, ceci correspond à 69 % de l'évapotranspiration maximale du tournesol, contrairement à d'autres cultures comme le maïs qui maximisent leur production pour une consommation d'eau proche de 100 % de l'ETM (Merrien et Grandin, 1990; Nolot et Debaeke, 2003).

Les besoins optimaux par phase sont en moyenne de 160 mm en pré-floraison, 70 mm pendant la floraison et 190 mm en post-floraison. Les trois objectifs qui guident la gestion de l'eau en tournesol qu'il s'agisse d'eau du sol ou d'irrigation sont les suivants :

-En pré-floraison, obtenir un indice foliaire modéré (environ 2.5) ou une biomasse aérienne de 400 g.m⁻²

-Au cours de la floraison, une bonne alimentation hydrique est requise pour réussir la fécondation et la nouaison (Robelin, 1967).

-On post floraison, le maintien de la surface foliaire active est une condition nécessaire au bon remplissage des akènes (rendement des akènes et teneur en huile) (Merrien et Grandin, 1990).

9.5. Désherbage

L'écartement des lignes de semis et le démarrage lent de la culture l'exposent à la compétition des adventices jusqu'au stade 5 paires de feuilles. En l'absence d'un désherbant de post-levée à spectre large et sélectif le programme de traitement fait souvent appel à des traitements échelonnés (pré-semis puis post-semis/pré-levée). Les traitements chimiques sont avantageusement complétés par le binage (Amrani, 2013 ; Agreste, 2003).

9.6. Lutte contre les ravageurs et les maladies

Le tournesol est une culture confrontée à de nombreuses maladies et ravageurs qui entraînent des pertes de levée, de rendement et de teneur en huile variables suivant les années, les conditions environnementales et les pratiques culturales (Seassau, 2010).

Parmi les ravageurs qui peuvent attaquer le tournesol, les pucerons provoquent une déformation et une crispation des feuilles lors des piqures d'alimentation sur le tournesol, les limaces attaquent les graines en cours de germination et provoquent des trous au milieu des limbes comme ils peuvent jouer un rôle dans la propagation d'agents pathogènes fongiques, les taupins qui peuvent diminuer la vigueur de la culture par un affaiblissement de son système racinaire et provoquer des pertes de rendement importante ainsi les oiseaux et les petits mammifères peuvent attaqué la culture surtout en fin de cycle (Ghoribi, 2009).

La prévention de ces ravageurs ce fait par la maitrise des pratiques culturelles qui consistent a évité les sols creux, motteux, riche en argile avec des résidus de récolte en surface et semez dans un sol suffisamment réchauffé et bien drainé. Ainsi l'augmentation légère de la densité de semis peut compenser les pertes éventuelles de plantes. Pour les oiseaux, les effaroucher (sonores ou visuels) peuvent constituer des méthodes de dissuasion présentant une certaine efficacité s'ils sont mis en œuvre de façon préventive. En fin de cycle, la récolte tôt, dès que la maturité est atteinte est la seule parade pour limiter les prélèvements de graines par les oiseaux. Pour les mammifères, des clôtures électriques adaptées sont efficaces (Lartigot, 2015).

Parmi les maladies qui peuvent attaquer la culture de tournesol ; quatre sont reconnues comme particulièrement dommageables pour la culture et sont le fait d'organismes

fongiformes « champignons »: le Mildiou, le Sclerotinia, le Phomopsis, et le Phoma (Seassau, 2010). Pour gérer du mieux le risque de ces maladies, un ensemble de techniques culturales sont préconisés :

- Le respect de la rotation qui rompre le cycle de développement des agents pathogènes.
- Le semis dans un sol bien ressuyé et réchauffé.
- Un semis tardif si des fortes pluies sont annoncées les jours suivant afin d'esquiver les conditions favorable aux infections.
- Eviter les peuplements denses et les faibles écartements.
- L'utilisation des géotypes tolérants est aussi parmi les moyens de lutte génétiques des maladies de tournesol (Lartigot, 2015).

9.7. La récolte

La récolte de tournesol s'effectue lorsque la maturité physiologique est atteinte (140 à 150 jours après le semis), l'humidité des graines ne doit pas dépasser les 12% afin d'assurer une bonne conservation. L'observation des plantes notamment les capitules permettre d'identifier le stade optimal de récolte qui est atteint lorsque la couleur du dos des capitules vire du jaune au brun, les feuilles sont toutes sénescentes, la tige se dessèche et passe du vert au beige clair. Cependant il est inutile voire risqué d'attendre la sur maturité (plantes entièrement desséchées, noires) pour récolter car le risque de pertes de graines est important (dégâts d'oiseaux, botrytis) (Lartigot, 2015 ; Amrani, 2013).

10. Effet de stress hydrique sur le tournesol

Le stress hydrique est l'un des principaux stress abiotiques résultant de la sécheresse et de la salinité où il affecte la croissance et le développement des plantes et par conséquent leur productivité (Gueta-Dahan et al. 1997).

Selon wang et al. (2003), le stress hydrique est l'une des principales causes de pertes de cultures à travers le monde, réduisant les rendements moyens de 50% et plus. Les plantes subissent un stress de sécheresse soit lorsque l'approvisionnement en eau des racines devient limité, soit lorsque le taux de transpiration devient très élevé (Anjum et al. 2011). Ces deux conditions mentionnées coïncident souvent dans des régions arides et semi-arides (Reddy et al. 2004).

La diminution des réserves d'eau affecte de manière temporaire ou permanente les processus morphologiques, physiologiques et biochimiques des plantes (Iqbal et al. 2008).

10.1. Effet de stress hydrique sur la morphologie

Selon Pekcan et al. (2015) chez le tournesol le stress hydrique affecte négativement la biomasse aérienne où il induit une diminution importante de la taille et de la surface foliaire.

La réduction de la surface foliaire provient d'une diminution de l'expansion foliaire et/ou d'une sénescence accélérée des feuilles.

La croissance foliaire de tournesol est stoppée très rapidement par un déficit hydrique avant toute réduction de la photosynthèse ou d'autres processus métaboliques (Boyer, 1968). Au niveau cellulaire, deux facteurs sont déterminants sur la croissance : l'extensibilité de la paroi et la turgescence (Matthews et al. 1984 ; Cosgrove, 1993). La réduction de la surface foliaire réduit la surface évaporatrice de la plante mais peut aussi limiter considérablement la production primaire (Maury, 1997).

La croissance racinaire est réduite lors d'une contrainte hydrique mais de façon moins marquée que celle des parties aériennes. La diminution du diamètre des racines sous l'effet de la déshydratation peut contribuer à limiter l'absorption de l'eau et des éléments minéraux (Moriz et Merrien, 1990).

10.2. Effet de stress hydrique sur la physiologie

Le stress hydrique réduit la croissance et le développement des plantes tout en affectant les différents processus physiologiques et biochimiques telle que la photosynthèse, la respiration, translocation, l'absorption et le métabolisme (Jaleel et al. 2008). D'autres changements physiologiques peuvent être ainsi induit par le stress hydrique chez les plantes notamment la perte de turgescence, la réduction d'élongation cellulaire, la réduction de la teneur en eau, de la transpiration et l'accumulation des osmolytes et osmoprotecteurs (Jaleel et al. 2008).

La nutrition minérale des plantes est aussi affecté par le stress hydrique et ce par la réduction d'absorption des minéraux et leur transport par les racines vers la tige. Selon (Shabala et Pottosin, 2014).

L'activité physiologique de la feuille de tournesol et plus particulièrement la photosynthèse est fortement affectée lors d'un déficit hydrique. La réduction de la photosynthèse est supposée dépendre à la fois de la fermeture stomatique qui s'accompagne d'une réduction de l'assimilation de CO₂ dans les feuilles par diminution de sa diffusion et d'une limitation biochimique du chloroplaste pour fixer le CO₂ (Graan et Boyer, 1990) probablement associée à la régénération limitante du RuBP (Gimenez et al. 1992).

Lors de l'abaissement du potentiel hydrique foliaire chez le tournesol la conductance stomatique diminue où elle devient négligeable à des potentiels proches de -2 MPa (Mojayad, 1993).

Selon Ghobadi et al. (2013) l'une des réponses physiologiques de tournesol au stress hydrique est la réduction de la concentration de la chlorophylle totale et la réduction de la performance de la photosynthèse, d'autre part l'accumulation de certains osmolytes

notamment la proline sous les conditions de stress hydrique est l'un des changements physiologiques observés chez le tournesol.

Ainsi le stress hydrique réduit la teneur relative en eau et le potentiel osmotique de la feuille de tournesol ce qui engendre la perte de turgescence (Iqbal et al. 2008).

Une conséquence du stress hydrique est l'apparition d'un stress oxydatif, c'est-à-dire l'accumulation d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) créant des dommages au niveau des structures cellulaires (Smirnoff, 1993).

Selon (Zeevaart et Creelman, 1988), ces changements physiologiques sont corrélés avec l'augmentation de la concentration de l'ABA dans les organes de la plante.

10.3. Effet de stress hydrique sur le rendement

Le rendement en graines est influencé par la génétique, l'environnement, la conduite de la culture et leur interaction (Maqbool et al. 2001; Lobell et al. 2009). Elle dépend principalement du nombre de graines par capitule et de leur poids qui sont génétiquement déterminés mais ils peuvent être affectés par les facteurs environnementaux qui pouvant varier fortement au cours du cycle de la culture (Alberio et al. 2015).

Selon Iqbal et al. (2005), le stress hydrique affecte le rendement de tournesol et ses deux composantes notamment le nombre de graines /m² et le poids moyen d'une graine. La période de sensibilité maximale des deux composantes à la sécheresse correspond aux 40 jours qui encadrent la floraison (Robelin, 1967). Une contrainte hydrique peut avoir des conséquences de nature et d'intensité variables selon sa position dans le cycle de développement de tournesol; tout dépend de la composante du rendement mise en place à ce moment-là. Le nombre d'akènes est fortement affecté si le déficit hydrique est subi en période végétative, en revanche c'est plutôt leur poids qui sera diminué si le déficit a lieu après la floraison (Maury, 1997). Dans le cas d'un déficit hydrique tardif, la lipidogénèse est inhibée et les remobilisations notamment azotées sont favorisées (Maury, 1997).

D'autre part; La réduction de la quantité de carbone répartit vers le capitule sous l'effet de stress hydrique est l'un des facteurs qui peut induire une réduction de nombre de graines chez le tournesol. D'autres facteurs peuvent aussi être impliqués dans la réduction de rendement tel que les effets directs de potentiel hydrique sur le métabolisme de l'ovaire et le changement de balance hormonal des fleurs.

La teneur en huile ainsi que la composition de l'huile de tournesol sont également affectées par la sécheresse, avec une diminution des teneurs en acide linoléique et une augmentation du taux d'acide oléique (Roche, 2005).

11. Mécanismes d'adaptation du tournesol à la sécheresse

L'adaptation désigne la survie et la propagation des espèces dans les conditions limitant en eau. C'est l'ensemble des mécanismes phénologiques, morphologiques et physiologiques que la plante met en jeu pour poursuivre et finir son cycle de production (Bammoun, 1997 ; Djebrani, 2000 ; Hayek et al. 2000, Grieu et al. 2008).

Selon Debeake et Mestries (2016), le tournesol peut s'adapter à la sécheresse avec trois grands types de stratégies : l'esquive, l'évitement et la tolérance à la déshydratation.

11.1. L'esquive

La culture complète leur cycle avant l'installation de stress. Il permet à la plante de réduire ou d'annuler les effets de la contrainte hydrique par une bonne adaptation de son cycle de culture à la longueur de la saison des pluies ce qui évite les périodes sèches. Le développement rapide avec une floraison précoce permet à la plante d'éviter les périodes sèches. Cette stratégie appliquée aux espèces cultivées a amené à décaler la date de semis ou d'utiliser des variétés plus précoces permettant d'éviter les déficits hydriques de fin de cycle (kiani, 2007).

Selon Allinne (2009) parmi les stratégies de conduite culturales, les semis précoces de tournesol sont envisagés pour esquiver la sécheresse. Cette stratégie d'avancement de la date de semis du tournesol est pertinente pour augmenter le rendement (Grieu et al. 2008).

11.2. L'évitement

La culture maintien un état hydrique satisfaisant tout en maximisons l'absorption par les racines et minimisons les pertes d'eau en réduisons la transpiration. La diminution de la transpiration est principalement liée à la fermeture des stomates qu'est l'une des réponses précoces au déficit hydrique (Assmann et al. 2000) elle a pour but la protection de la plante contre la déshydratation mais cause en même temps une diminution de l'assimilation du carbone atmosphérique ce qui perturbe la photosynthèse (Cechin et al. 2006). La diminution de la transpiration peut être due également à une diminution des surfaces évaporantes. Parmi les mécanismes permettant de réduire la transpiration chez le tournesol, la réduction de la surface foliaire et la diminution de la conductance stomatique (g_s) jouent un rôle déterminant (Grieu et al. 2008).

L'optimisation de l'absorption d'eau est liée à un ensemble complexe de caractères morphologiques des racines : masse et volume, ramification, profondeur (Ramanjulu et Bartels, 2002). L'absorption de l'eau peut être améliorée par un système racinaire plus profond et plus dense. La croissance racinaire en conditions sèches peut être maintenue par l'ajustement osmotique qui limite la baisse du potentiel de turgescence (Turner, 1988).

11.3. La tolérance

La tolérance des plantes au déficit hydrique interne est assurée par le maintien de la turgescence qui permet de retarder la fermeture des stomates, les variations de volume chloroplastique et le flétrissement foliaire. Au niveau cellulaire, trois processus sont impliqués dans le maintien de la turgescence aux faibles potentiels hydriques foliaires : l'ajustement osmotique, l'élasticité des parois cellulaires et la répartition de l'eau dans la feuille entre l'apoplaste et le symplasme (Maury, 1997).

L'ajustement osmotique à travers l'accumulation des sucres, proline, acides organiques et les ions telle que le sodium et le potassium est la réponse métabolique commune des plantes supérieures pour maintenir l'équilibre hydrique et éviter le stress hydrique (Benlloch-González et al. 2015).

Chez le tournesol, les solutés impliqués sont essentiellement des ions inorganiques, des sucres solubles, des acides aminés et organiques. Le coût énergétique d'un tel ajustement est plus faible chez le tournesol que chez d'autres espèces comme le blé (Munns et Weir 1981) ainsi la contribution des ions inorganiques dans l'ajustement osmotique est importante (Jones et al. 1980).

Matériels et Méthodes

1. Expérimentation en milieu contrôlé (Essai sous serre)

L'expérimentation en milieu contrôlé vise à étudier les effets de déficit hydrique appliqué du stade bouton floral (E1) jusqu'au stade de maturité physiologique (M4) sur les paramètres physiologiques, morphologiques, rendement et ses deux composantes d'un ensemble des variétés oléiques de tournesol.

1.1. Matériel végétal

Cinq variétés de tournesol oléique ont été utilisées dans notre essai dont quatre développées par la société Syngenta France (Aurasol, N.K ferti, Nutrasol, Extrasol) et une variété local (Tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques du matériel végétal utilisé dans l'expérimentation en milieu contrôlé.

Variété	Type génétique	Précocité	Productivité	Richesse en huile	Résistance phomopsis	Taille	PMG	NGP
N.Kferti	hybride oléique	semi précoce	très productif	très riche	TPS	moyenne	moyen	très élevé
Nutrasol	hybride oléique	semi précoce, semi tardif	performant, régulier productif	très riche	TPS	moyenne	élevé	élevé
Extrasol	hybride oléique	précoce	haut potentiel de rendement grain	excellent rendement en huile	PS	courte	élevé	élevé
Aurasol	hybride oléique	précoce	productif	moyenne		moyenne	élevé	élevé

TPS : très peu sensible, PS : peu sensible, PMG : poids de mille graines, NGP : nombre de graines par plante

1.2. Dispositif expérimental et conditions de culture

L'expérimentation en conditions contrôlées a été menée sur le site de l'institut des sciences agronomiques de Tiaret (Ex ITMA) dans une serre en verre caractérisée par une température de 24 ± 2 °C, une humidité relative de 60 ± 5 % et une photopériode de 16 heures ce qui permet de contrôler certains paramètres de milieu notamment la température et l'apport d'eau. L'ensemble des variétés ont été mises en culture dans un dispositif en bloc complètement aléatoire avec deux régimes hydriques : «RH1 : 30 % de la capacité au champ et RH2 : 100% de la capacité au champ», chaque régime hydrique est représenté par trois répétition ; chaque répétition comporte les cinq variétés dont chaque une est représentée par cinq plantes.

	RH1	RH2
R1	V3	V3
	V4	V4
	V1	V1
	V2	V2
	V5	V5
R2	V5	V5
	V4	V4
	V3	V3
	V1	V1
	V2	V2
R3	V1	V1
	V2	V2
	V5	V5
	V4	V4
	V3	V3

V1: local; **V2:** Aurasol; **V3:** N.K ferti; **V4:** Nutrasol; **V5:** Extrasol.

Figure 2. Dispositif de l'expérience en milieu contrôlé.

1.3. Conduite de l'essai

1.3.1. Préparation de substrat

Le substrat a été préparé selon Kiani et al. (2007) par un mélange de 40% sol+40%fumier+20% sable puis désinfecté par voie chimique tout en utilisant un fongicide et un insecticide.

1.3.2. Germination et repiquage des graines

Les graines de la variété locale sont désinfectées par la solution d'hypochlorite de sodium (1%) puis elles ont été mises en germination avec les graines traitées des variétés fournies par Syngenta dans des boîtes de Pétri sur un papier absorbant imbibé d'eau et placées dans une étuve réglée à 25 °C pendant 48 heures.

Les graines germées ont été repiquées à une profondeur de 3 à 4 cm à raison d'une graine par pot dans des cylindres en PVC de 11 cm de diamètre et 60 cm de hauteur contenant le substrat préalablement préparé.

1.3.3. Irrigation

Les plantes sont irriguées à la capacité au champ jour par jour dès le semis jusqu'à stade bouton florale à ce stade le déficit hydrique est appliqué sur la moitié des plantes « plantes stressé : conduites sous le régime hydrique 1 » l'autre moitié des plantes ont reçu suffisamment d'eau pour maintenir le sol à la capacité au champ « plantes bien irriguer : conduites sous le régime hydrique 2 ». Dans le but de stimuler un stress hydrique naturel, la contrainte hydrique consiste à diminué progressivement l'irrigation de 100% à 30% de la capacité au champ pendant 15 jours puis les plantes stressées sont maintenues à 30% de la capacité au champ jusqu'à la récolte (Kiani et al.2007). Dans les deux traitements hydriques; les cylindres ont été pesés et la perte d'eau est remplacée régulièrement.

D'après Tezara et al. (2002), 67% de la capacité au champ est considérée comme un stress moyen et 33% de la capacité au champ est considérée comme un stress sévère chez le tournesol.

1.3.4. Fertilisation et protection phytosanitaire

La fertilisation a été apportée à partir d'une solution nutritif N.P.K (14-12-14) préparée à raison de 2g/L, selon Desanlis (2013) chaque plante a reçu 200ml de cette solution les 14, 21 et 46 jours après plantation.

Deux traitement phytosanitaire préventif ont été appliqués par un insecticide et un fongicide après la levée de la plante et au stade bouton florale.

2. Expérimentation en milieu naturel

Une expérimentation biannuelle a été menée dans la région de Yellel wilaya de Relizane durant les deux années 2016 et 2018 afin d'étudier l'adaptation et la productivité d'un ensemble des variétés de tournesol en conditions de déficit hydrique.

2.1. Matériel végétal

Les mêmes variétés utilisées dans l'essai sous serre sont utilisées dans l'essai en plein champ à Relizane durant la première année d'expérimentation (année 2016). Cependant durant la deuxième année (année 2018) nous avons substitué les deux hybrides (N.K ferti et Aurasol) par (Sy valeo et Sy genio) (Tableau 2).

Tableau 2. Caractéristiques de nouveau matériel végétal utilisé lors de la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

Variété	Type génétique	Précocité	Productivité	Richesse en huile	Résistance phomopsis	Taille	PMG	NGP
Sy valeo	hybride oléique	précoce	excellent potentiel de rendement grain	riche en huile et acide oléique	TPS à PS	moyenne à haute	élevé	élevé
Sy genio	hybride oléique	demi tardif	performant	riche en huile	TPS	moyenne à haute	élevé	très élevé

TPS : très peu sensible, PS : peu sensible, PMG : poids de mille graines, NGP : nombre de graines par plante

2.2 Analyse du sol

Le sol de l'essai en plein champ a été analysé pour déterminer les caractéristiques physico-chimiques.

2.2.1. Les analyses physiques

2.2.1.1. Mesure de l'humidité

Nous avons procédé à la détermination de la teneur pondérale en eau du sol par la méthode gravimétrique. L'échantillon de sol est pesé une première fois (P1) puis le sol est séché à l'étuve à une température de 105°C pendant 24h, par la suite il est pesé une deuxième fois (P2) (Hesse et Hesse, 1971).

Le taux d'humidité s'exprime en % selon la formule suivante : $H\% = (P1 - P2) \times 100 / P2$

P1 : le poids du sol humide.

P2 : le poids du sol séché.

2.2.1.2. Dosage de la matière organique (Méthode de calcination)

Après l'élimination de l'humidité, le P2 (le sol après séchage à 105 °c) est calciné à une température de 700 °c pendant 90 minutes puis pesé « P3 ».

La valeur de la matière organique est donnée par l'expression suivante:

$$MO\% = ((P2 - P3) / P2) * 100$$

2.2.1.3. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique du sol a pour but de quantifier pondéralement les particules et définir la texture des sols. Elle se fait selon Aubert (1978) par les étapes suivantes :

-Peser 20 g de terre broyée et tamisée à 2mm et faire la destruction de la matière organique en ajoutons 50 ml d'eau oxygéné puis laisser pendant 24 heures ou une nuit.

-Ajouter 20 ml d'eau oxygéné et porter au bain de sable jusqu'à arrêt de l'effervescence en couvrant le bécher et en évitant une ébullition trop forte. La réaction est terminée quand la mousse a disparu et que les petites bulles d'oxygène ne viennent plus crever en surface.

-Ajouter 50 ml de la solution dispersante d'Hexaméta phosphate de sodium (pour les sols non calcaire).

Traitements particuliers applicables aux sols calcaires (Décarbonatation au calgon):

-Ajouter 50 ml de calgon (39.2g de metaphosphate de sodium + 10.8g de carbonate de sodium dans 1 l d'eau distillée)

- Agiter pendant 2 heures à l'agitateur rotatif.

-Tamisé à 0.05 mm en lavant avec de l'eau distillée (ne pas dépasser 500 à 600 ml) pour obtenir le sable, Verser le contenu du tamis dans une capsule tarée.

-Sécher à l'étuve à 105c° et peser la capsule.

-Verser la suspension dans une éprouvette de 1 litre et complétée à 1 litre avec l'eau distillée.

Les particules moyennes et fine inférieur à 0.02mm (argile, limons) sont obtenues par la mesure de la vitesse de sédimentation. Le fractionnement de ces particules se fait par l'intermédiaire de la pipette de Robinson par la méthode suivante :

- Agiter l'éprouvette et prélever immédiatement du centre (argile +limons) puis verser le contenu du tamis dans une capsule tarée.

-Agiter et attendre 4 min et 40 seconds et prélever à 10 cm de la surface puis verser le contenu du tamis dans une capsule tarée.

-Agiter et attendre 4 h et 39 min et prélever à 6 cm de la surface, verser le contenu du tamis dans une capsule tarée.

-Sécher à l'étuve à 105°c et peser les capsules.

La composition granulométrique est exprimée en pourcentage (%) et la texture du sol est déterminée par le triangle de texture.

2.2.2. Les analyses chimiques

2.2.2.1. Mesure de pH

20 g du sol préalablement séché et tamisé a été mélangé avec 50 ml de l'eau distillée (extrait 2/5). La solution est agitée pendant une minute puis décantée. Le pH de l'extrait été mesuré à l'aide d'un pH mètre (Baize, 2000).

2.2.2.2. Mesure de la conductivité électrique

20 g du sol préalablement séché et tamisé a été mélangé avec 100 ml d'eau distillé (extrait 1/5). La solution est agitée pendant une minute puis décantée. La conductivité électrique« C.E » de l'extrait a été mesuré à l'aide d'un Conductimètre (Aubert, 1978).

La détermination du degré de la salinité d'un sol est faite à l'aide de l'échelle de salure des sols (annexe 4).

2.2.2.3. Dosage de calcaire total

1g de sol (séché, émiétté et tamisé) est déposé dans un calcimètre de Bernard avec une cuve remplis de Hcl demi concentré, on agite manuellement et on note le volume de CO₂ dégagé « V »

0.3g de calcaire pur « CaCO₃ » est déposé dans un calcimètre de Bernard avec une cuve remplis de Hcl demi concentré, on agite manuellement et on note le volume de CO₂ dégagé « V' » (Baize, 1988).

L'estimation de la valeur de CaCO₃ est donnée par la formule suivante :

$$\text{CaCO}_3\% = \frac{V' \times 0.3 \times 100}{V \times P}$$

P : le poids de l'échantillon du sol.

2.3. Données climatiques de Relizane

Les données climatiques ont été prises pendant les deux années d'expérimentation (2016-2018). Quatre paramètres ont été retenus: pluviométrie, température maximale, température minimale et humidité relative.

2.4. Dispositif expérimental et conduite culturale

L'expérimentation en milieu naturel des deux années a été menée dans deux blocs (irriguer et non irriguer) randomisés avec trois répétitions, chaque répétition comporte l'ensemble des variétés et chaque variété est représentée par une parcelle élémentaire de trois lignes de 4.6m de longueur. L'intervalle entre les lignes est de 45 cm et la distance entre les plantes sur la ligne est de 25cm. Les deux dispositifs sont séparés par une distance de 5m.

	RH1		RH2
R1	V1	5 m ↔	V1
	V2		V2
	V3		V3
	V4		V4
	V5		V5
R2	V5	5m ↔	V5
	V1		V1
	V4		V4
	V2		V2
	V3		V3
R3	V1	5m ↔	V1
	V2		V2
	V3		V3
	V5		V5
	V4		V4

Première année d’expérimentation (2016) :

V1 : Nutrasol, **V2** : N.K ferti, **V3** : locale, **V4** : extrasol, **V5** : Aurasol.

	RH1		RH2
R1	V1	5 m ↔	V1
	V2		V2
	V3		V3
	V4		V4
R2	V4	5m ↔	V4
	V1		V1
	V3		V3
	V2		V2
R3	V1	5m ↔	V1
	V2		V2
	V4		V4
	V3		V3

Deuxième année d’expérimentation (2018) :

V1 : Nutrasol, **V2** : Sy valeo, **V3** : Extrasol, **V4** :Sy genio.

Figure 3. Dispositif de l’expérimentation en milieu naturel.

2.4.1. Travail du sol et précédent cultural

La préparation du sol a été faite par un labour d'automne et un passage d'un outil à train une semaine avant le semis. Le précédent cultural était une céréale «le blé».

2.4.2. Semis et désherbage

Le semis a été réalisé à la fin du mois de Mai pour les deux années d'expérimentation à une profondeur de 3 à 4 cm dans un sol bien réchauffé. Pour éviter la compétition avec les plantes parasites un désherbage manuel a été réalisé en post levée.

2.4.3. Irrigation

L'ensemble des plantes ont subi deux régimes hydriques, le régime hydrique 1(RH) où les plantes ont été irriguées à la capacité au champ du semis jusqu'à le stade bouton florale et le régime hydrique2 (RH2) où les plantes ont été irriguées tout le long de cycle de la culture.

3. Expérimentation en milieu naturel (Essai variétal)

Une expérimentation en plein champ a été réalisée dans la région de Tiaret durant l'année 2016 afin d'étudier l'adaptation de la culture de tournesol aux conditions pédoclimatique de la région et ce à travers l'évaluation de comportement agronomique d'un ensemble des variétés oléiques de tournesol.

3.1. Matériel végétal

Les variétés utilisées dans l'essai variétal de Tiaret sont celles utilisées dans l'expérimentation en milieu contrôlé, à savoir Aurasol, Extrasol, Nutrasol, N.K. ferti et une variété local.

3.2. Données climatiques de Tiaret

Les données climatiques ont été prises pendant l'année 2016. Quatre paramètres ont été retenus: pluviométrie, température maximale, température minimale et humidité relative.

3.3. Dispositif expérimental et conduite culturale

L'essai variétal a été mené en deux blocs randomisés avec trois répétitions, chaque répétition comporte l'ensemble des variétés et chaque variété est représentée par une parcelle élémentaire de trois lignes de 4.6m de longueur. L'intervalle entre les lignes est de 45 cm et la distance entre les plantes sur la ligne est de 25cm. Les deux dispositifs sont séparés par une distance de 5m.

	RH1	RH2
R1	V1	V1
	V2	V2
	V3	V3
	V4	V4
	V5	V5
R2	V5	V5
	V1	V1
	V4	V4
	V2	V2
	V3	V3
R3	V1	V1
	V2	V2
	V3	V3
	V5	V5
	V4	V4

V1 : Nutrasol, **V2** : N.K ferti, **V3** : locale, **V4** : extrasol, **V5** : Aurasol.

Figure 4. Dispositif de l'essai variétal.

3.3.1. Travail du sol et précédent cultural

Le travail du sol a été réalisé par un labour d'automne et un passage d'un outil à train une semaine avant le semis. Le précédent cultural était une jachère.

3.3.2. Semis et désherbage

Le semis a été réalisé à la fin du mois de Mai à 3-4 cm de profondeur dans un sol bien réchauffé. Pour éviter la compétition avec les plantes parasites un désherbage manuel a été réalisé en post levée.

3.3.3. Irrigation

L'irrigation a été réalisé selon Haddadi (2010) où l'ensemble des plantes ont été irriguées régulièrement à la capacité au champ dès le semis jusqu'à la maturité physiologique une fois par semaine.

4. Stade de mesure et paramètres étudiés

4.1. Paramètres physiologiques

Les mesures physiologiques ont été réalisées sur la feuille la plus jeune et complètement développée (la dernière feuille) au stade fin floraison. Ces mesures ont été effectuées sur les plantes bien alimentées en eau et les plantes stressées. L'étude des paramètres physiologiques porte essentiellement sur la teneur relative en eau, le dosage de la chlorophylle total et la conductance stomatique.

4.1.1. Teneur relative en eau

La teneur relative en eau (TRE) est le trait le plus couramment utilisé pour évaluer l'état hydrique des plantes (Tezara et al. 2002). Elle est utilisée dans l'identification de la résistance à la sécheresse chez le tournesol.

La teneur relative en eau est mesurée suivant la méthode de Barrs (1968). Selon cette méthode les feuilles coupées sont directement pesées (Poids frais PF) et plongées dans des tubes à essai remplis d'eau distillée, les tubes sont placés dans l'obscurité dans un endroit frais, après 24H les feuilles saturées sont pesées de nouveau (poids de turgescence PPT) enfin l'échantillon est mis à sécher à l'étuve à 85°C et pesé une dernière fois après 48H (poids sec PS). La teneur relative en eau est calculée selon la formule suivante :

$$TRE (\%) = (PF - PS) / (PPT - PS) \times 100$$

4.1.2. Conductance stomatique

La mesure de la conductance stomatique nous renseigne sur le degré de la fermeture des stomates (Grieu et al. 2008).

La conductance stomatique est mesurée à l'aide d'un poromètre automatique de type AP4 DELATA-T DEVICES CAMBRIDGE UK sur la dernière feuille. Il s'agit d'insérer la partie médiane de la feuille attaché à la plante dans la pince.

4.1.3. Dosage des pigments chlorophyllien

La méthode utilisée est celle de Linchtenthaler et Welburn (1983) elle consiste à broyer une portion de 100mg des feuilles dans un mortier en porcelaine dans 8ml d'acétone dilué à 80%. On filtre le broyat dans un tube à essai en utilisant un papier Watman n°22. On complète le volume de tube à 10 ml en ajoutant de l'acétone dilué. Les absorbances ont été lues au spectrophotomètre aux longueurs d'onde 645 nm et 663nm. Les absorbances ont été converties selon les auteurs afin de quantifier la teneur de Chlorophylle totale en $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ MF selon la formule suivante:

$$\text{Chlt}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{FW}) = 17,32 \times \text{DO645} + 7,18 \cdot \text{DO663}$$

4.2. Paramètres morphologiques

Sanou et Dabire (2004) ont remarqué que pour caractériser le déficit hydrique, l'approche agronomique repose sur la quantification de ses effets finaux sur le végétal. Cette approche consiste à mesurer des paramètres de croissance et de productivité d'un groupe des génotypes en prenant comme référence une situation favorable non limitative.

D'après Andrade et al. (2013), l'analyse des caractères morphologiques est utile pour l'étude de l'adaptation des plantes aux stress environnementaux tels que le déficit hydrique.

L'ensemble des paramètres morphologiques ont été mesurés au stade fin floraison, Quatre paramètres ont été retenus qui sont :

- a- *Le nombre de feuilles* : a été compté.
- b- *La hauteur de la plante « cm »* : mesurée à l'aide d'un métrage du bas du sol jusqu'à le capitule dont le pédoncule inclus.
- c- *Le diamètre de la tige « mm »* : mesuré à l'aide d'un pied à coulisse.
- d- *Le diamètre de capitule « cm »* : mesuré à l'aide d'un métrage.

4.3. Paramètres de production

L'ensemble des paramètres de production ont été estimés à la récolte, ils portent essentiellement sur :

- a- *Le poids de capitule « g »* : Il est obtenu par pesée directe sur la balance de précision.
- b- *Le nombre de graines par capitule* : Il est obtenu par comptage direct.
- c- *Le poids de mille graines « g »* : Il est obtenu par pesée directe sur la balance de précision.

d- *Le rendement en graines par plante « g/plante »*: le rendement est obtenu à partir des deux composantes, le nombre en graines par capitule et le poids individuel d'une graine par la formule suivante :

Rendement en graines plante=nombre de graines par capitule*poids d'une graine.

5. Extraction et caractérisation de l'huile de tournesol

Les graines récoltées de l'expérimentation en milieu naturel de Relizane des deux années d'expérimentation 2016 et 2018 ont subi une extraction et une caractérisation physico-chimique de son huile au niveau de laboratoire de l'écologie animale de la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université de Tiaret.

5.1. Préparation de la farine

Elle se fait selon (AFNOR, 1988) par les étapes suivantes :

-*Triage* : c'est une opération préliminaire qui a pour but d'éliminer les graines non conformes (échaudées, cassé...) et tous corps étrangers.

-*Lavage* : c'est une opération préliminaire qui vise à désinfecter les graines. Elle se fait par l'eau et quelques gouttes de l'eau de javel.

-*Séchage* : les graines ont été séchées dans une étuve à une température de 70°C pendant 5 heures.

-*Décorticage* : Les graines obtenues à partir des capitules sont couvertes d'une couche dure difficile à décortiquer à la main. Le concassage a été réalisé manuellement.

-*Broyage* : Cette opération a été réalisée juste avant l'extraction par un moulin à couteaux métalliques ce qui nous a permis d'obtenir une farine.

5.2. Extraction de l'huile par soxhlet

Selon Despiou (1978), le principe de l'extraction de l'huile consiste à effectuer une extraction par un solvant organique généralement c'est l'hexane à l'aide d'un dispositif Soxhlet d'une capacité de 250 ml. La farine est épuisée en matière grasse par le passage du solvant. On estime qu'une extraction est totale au bout de 6 heures. Une fois l'extraction est terminée les solvants sont éliminés à l'aide d'un Rota vapor. Cette extraction repose sur le principe suivant : les composés apolaires comme les corps gras sont insolubles dans les composés polaires comme l'eau mais solubles dans les solvants apolaires tels que l'hexane. Le point d'évaporation de l'hexane est inférieur à celui des matières grasses à extraire, il est donc très facile de les séparer par chauffage.

Mode opératoire

- Peser à 1 mg près, 10 g de la farine.

- Introduire l'échantillon dans une cartouche en cellulose qui est perméable au solvant et la couvrir avec du coton.
- Mettre la cartouche dans l'appareil extracteur de "Soxhlet". Ce dernier est muni d'un réfrigérant par le haut, d'un ballon et d'un chauffe ballon par le bas.
- Verser la quantité nécessaire de solvant (150 ml d'hexane).
- Conduire le chauffage dans des conditions telles que le débit du reflux soit au moins de 3 gouttes à la seconde.
- Le solvant va s'évaporer puis réfrigéré et le liquide tombe sur la substance à épuiser d'une façon que la cartouche soit immergée. Lorsque la partie intermédiaire est suffisamment remplie de solvant, le siphon s'amorce et le solvant contenant la substance à extraire (l'huile) retourne dans le ballon.
- Après la durée nécessaire (6 heures), on récupère la cartouche d'une part et le ballon d'autre part.
- Le ballon contenant le solvant plus l'huile est passée dans le Rota Vapor pour chasser par distillation la majeure partie du solvant ce qui permet de récupérer l'huile seul (la température d'ébullition des lipides est plus élevée que celle de l'hexane qui s'évapore le premier).
- Eliminer les dernières traces du solvant en chauffant le ballon pendant 20 mn à 103°C.
- Peser le ballon.

5.2.1. Teneur et rendement en huile

La teneur en huile est définit comme étant le rapport entre la masse obtenue et la masse de matière végétale, elle est calculer comme suite :

$$\text{Th \%} = \frac{P_2 - P_1}{P_3} \times 100$$

Th% : Teneur en huile en pourcentage.

P₂: Poids du ballon avec l'huile en g.

P₁: Poids du ballon vide en g.

P₃: Poids de prise d'essai en g.

Le rendement en huile est calculé selon Hussain et al. (2012) par la multiplication de la teneur en huile et le rendement en graines par plante.

5.3. Caractérisation physico-chimique de l'huile

5.3.1. Analyse physique

5.3.1.1. Indice de Réfraction

L'indice de réfraction est défini selon la norme (NFT 60 212) par le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide à une longueur d'onde définie et la vitesse de propagation dans la substance. La longueur d'onde choisie est celle de la moyenne des raies D du sodium.

L'indice de réfraction nous renseigne sur le groupe auquel appartient le corps gras. A 20°C, les huiles siccatives ont des indices de réfraction compris entre 1,480 et 1,523, les huiles demi siccatives ont des indices de réfraction compris entre 1,470 et 1,476 et les huiles non siccatives entre 1,468 et 1,470.

a-Principe

Les mesures sont effectuées à l'aide d'un réfractomètre à une température de 20°C, la méthode suivie est celle décrite dans la norme NFT 60 212 (AFNOR, 1984). Le réfractomètre est étalonné avec de l'eau distillé.

b-Mode opératoire

- Laver les prismes du réfractomètre à l'éther de pétrole.
- Les essuyer avec un chiffon propre très doux.
- Verser entre les prismes 2 à 3 gouttes d'huile.
- Déplacer la lunette de visée pour que la ligne de séparation de la plage claire et de la plage sombre se situe à la croisée des fils du réticule.
- Lire l'indice de réfraction de l'huile à T°C=20°C.

5.3.2. Analyses chimiques

5.3.2.1. Indice d'acide et acidité

L'indice d'acide d'un corps gras est défini comme étant le nombre de milligrammes de potasse nécessaire pour neutraliser les acides libres contenus dans un gramme des corps gras (Lion, 1955). L'indice d'acide et l'acidité sont deux facteurs qui donnent une évaluation sur la quantité d'acides libres provenant d'hydrolyse naturelle des corps gras et qui sont responsables d'une plus grande facilité au rancissement.

a-Principe

Selon la norme NF T60 204 (AFNOR, 1981). Dissoudre la prise d'essai dans un mélange d'éthanol et diéthyléther préalablement neutralisée. Puis titrer par une solution éthanolique d'hydroxyde de potassium à (0,1 N) en présence de phénolphtaléine.

b-Mode opératoire

Dans une fiole conique de 250 ml, peser à 0.01 g près 5g d'huile. Dissoudre la prise d'essai dans 100 ml environ du mélange à parts égales d'éthanol et de diéthyléther préalablement neutralisé. Titrer en agitant avec une solution éthanolique d'hydroxyde de potassium 0.1 N jusqu'à coloration rose de la phénophtaléine persistant pendant au moins 10 secondes.

c-Expression des résultats

L'indice d'acide est calculé selon (Wolff, 1968) par la formule suivante :

$$IA = (V \times 56.1 \times N) / P \quad (\text{mg de KOH/g d'huile})$$

V : désigne le volume de potasse employé.

N : la normalité de la solution.

P : la masse de la prise d'essai.

L'acidité en (%) est calculée comme suit :

$$A(\%) = 0.5 \times I.A$$

5.3.2.2. Indice de saponification

L'indice de saponification correspond au nombre de milligrammes de potasse nécessaires pour saponifier les acides gras contenus dans un gramme de matière grasse (Lion, 1955).

a-Principe

Selon la norme NFT 60 206 (AFNOR , 1981), la prise d'essai est soumise à une ébullition à reflux avec une solution d'hydroxyde de potassium puis titrée par l'acide chlorhydrique (HCL) en présence d'un indicateur coloré (phénolphtaléine).

b-Mode opératoire

Peser dans un Erlenmeyer à fond plat 2g d'huile. Ajouter 25ml de potasse alcoolique (0.5N) et porter à ébullition sous un réfrigérant à reflux. Il est conseillé d'ajouter dans l'Erlenmeyer un régulateur d'ébullition (pierre ponce, billes de verre). Maintenir l'ébullition pendant une heure en agitant de temps en temps. Titrer l'excès d'alcalinité dans la solution savonneuse chaude avec de l'acide chlorhydrique (0.5N) en présence de phénolphtaléine.

Faire un essai à blanc dans les mêmes conditions pour titrer la liqueur alcoolique de potasse.

c-Expression des résultats

Selon Wolff (1968), l'indice de saponification est donné par la formule suivante :

$$I_s = ((C_1 - C_2) \times 28) / M$$

M : la masse en gramme de la prise d'essai.

C₁ : le nombre de millilitres d'acide chlorhydrique utilisé dans l'essai à blanc.

C₂ : le nombre de millilitres d'acide chlorhydrique utilisé dans l'essai avec l'huile.

5.3.2.3. Indice d'ester

L'indice d'ester est le nombre de milligrammes de KOH nécessaire pour saponifier les acides gras liés contenus dans un gramme de corps gras

Ce paramètre est donné par la différence entre l'indice de saponification et l'indice d'acide :

$$I.E = I.S - I.A$$

5.3.2.4. Pourcentage d'altération

L'acidification des corps gras peut avoir lieu avant leur production. Par voie enzymatique (mauvais stockage des produits végétaux ou tissus animaux). Comme elle peut se produire après leur conditionnement par hydrolyse chimique ou enzymatique (Gavrilovic et al. 1996). L'altération d'un corps gras peut être estimée par le calcul du pourcentage d'altération :

$$PA (\%) = \frac{I.A}{I.S} \times 100$$

5.3.2.5. Indice de peroxyde

L'indice de peroxyde est une mesure permettant d'estimer la quantité de peroxyde présent dans une matière grasse. Les peroxydes constituants caractéristiques de l'oxydation des acides gras insaturés sont déterminés en se basant sur leur propriété de libérer l'iode de l'iodure de potassium dans les milieux acides. L'iode libéré est mesuré par la réaction avec le thiosulfate, sachant que 1ml de thiosulfate 0.01N correspond à une quantité de 80mg d'oxygène fixé sur les acides gras (Lion, 1955).

a-Principe

On traite les corps gras en solution dans l'acide acétique et du chloroforme par une solution d'iodure de potassium. Puis on titre par la suite l'iode libéré par une solution de thiosulfate de sodium (0,01 N) NFT 60 220 (AFNOR, 1981).

b-Mode opératoire

Peser 1g d'huile dans un flacon en présence de 10 ml de chloroforme. Ajouter 15 ml d'acide acétique à 99.8% et 1 ml d'une solution saturée d'iodure de potassium, ensuite fermer le flacon et agiter pendant 1 mn pour dissoudre le corps gras, puis laisser reposer dans un

placard pendant 5 mn à l'abri de la lumière. Ajouter 75 ml d'eau distillée pour arrêter la réaction. Titrer l'iode libéré avec une solution de thiosulfate de sodium 0,01 N en agitant vigoureusement en présence d'empois d'amidon comme indicateur coloré jusqu'à disparition totale de la coloration violette. Effectuer dans les mêmes conditions un essai à blanc sans corps gras.

L'essai à blanc ne doit jamais dépasser la valeur de 2 meq O₂/kg. Si cette valeur est dépassée l'analyse n'est pas valable.

c-Expression des résultats

$$I.P(\text{MeqO}_2/\text{KgdeCG}) = \frac{(V - V_0) \times 10}{p}$$

I.P (Meq O₂/Kg de CG) : Indice de peroxyde.

V₀ (ml) : Volume de la solution de thiosulfate de sodium utilisé pour l'essai à blanc.

V (ml) : Volume de la solution de thiosulfate de sodium utilisé pour l'essai.

P(g) : Poids de la prise d'essai

6. Analyse statistique

Une analyse descriptive et une analyse de variance ANOVA à deux facteurs ont été réalisées par le logiciel statistique SPSS version 16 pour déterminer le seuil de signification de l'effet de régime hydrique, de la variété et de l'interaction de ces deux facteurs sur les paramètres physiologiques, morphologiques, le rendement et ses composantes d'un ensemble des variétés de tournesol étudié sous serre et en milieu naturel. D'autre part les coefficients des corrélations entre les différents paramètres ont été ainsi calculés.

L'effet de la variété, de bloc et de l'interaction variété* bloc sur les paramètres morphologiques, le rendement et ses composantes de l'ensemble des variétés évaluées en milieu naturel a été aussi étudié à travers une analyse de variance ANOVA à deux facteurs et une analyse descriptive par le même logiciel.

L'effet de régime hydrique, de la variété et de l'interaction variété*régime hydrique sur le rendement et la qualité physico-chimique de l'huile des graines de tournesol a été aussi étudié par une analyse descriptive et une analyse de variance ANOVA à deux facteurs par le même logiciel. Des corrélations entre le rendement en huile et les différents paramètres ont été aussi calculées.

Résultats et discussion

1. Expérimentation en milieu contrôlé (Essai sous serre)

1.1. Effet de régime hydrique et de la variété sur les paramètres physiologiques

1.1.1. Teneur relative en eau

L'analyse de la variance a révélé un effet très hautement significatif du régime hydrique sur la teneur relative en eau de l'ensemble des variétés de tournesol cultivées sous serre. Cependant l'effet de la variété ainsi que l'effet de l'interaction variété *régime hydrique n'est pas significatif (Tableau 3).

Tableau 3. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la teneur relative en eau de tournesol cultivé sous serre.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	1316.017	12.718	0.001
variété	4	105.019	1.015	0.409
Variété * Régime hydrique	4	251.402	2.429	0.060

Les résultats obtenus montrent que la teneur relative en eau des variétés étudiées diminue sous le régime hydrique 1. Parmi ces variétés, la variété 5 s'avère la plus résistante pour le maintien de son hydratation où elle marque une faible réduction de l'ordre de 10.67% (Figure 5). Cependant la variété 1 qui marque une réduction de l'ordre de 15.9% s'avère la plus sensible.

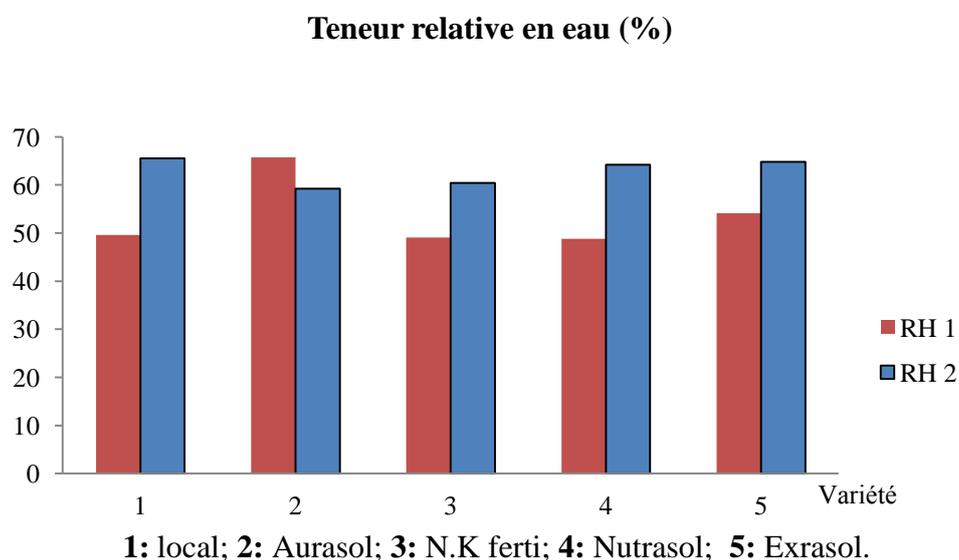


Figure 5. Effet de régime hydrique et de la variété sur la teneur relative en eau de tournesol cultivé sous serre.

La teneur relative en eau (TRE) est le trait le plus couramment utilisé pour évaluer l'état hydrique des plantes. Les différents niveaux de stress hydriques réduisent la teneur relative en

eau ce qui induit une réduction progressive et significative de la conductance stomatique et la photosynthèse (Tezara et al. 2002).

Andrade et al. (2013) ont trouvé dans leur recherche que durant la période de stress hydrique, la teneur relative en eau est réduite d'une manière significative cependant il n'existe aucune différence significative entre les génotypes étudiés pour ce paramètre.

Maury et al. (2000) ont indiqué que la teneur relative en eau a été réduite sous l'effet du stress hydrique. Le même résultat a été signalé par Darvishzadeh et al. (2014) où l'effet des différents traitements hydriques est observé sur la teneur relative en eau chez le tournesol cultivé sous serre.

Kiani (2007) a mentionné que l'effet de régime hydrique et de génotype sur la teneur relative en eau de tournesol cultivé sous serre est très hautement significatif comme il a noté que l'interaction génotype*traitement hydrique est significative.

Roche (2005) a signalé que la teneur relative en eau de tournesol installé dans les conditions contrôlées est affectée négativement dans le cas du stress long comme il a signalé une différence de comportement génotypique vis-à-vis de ce paramètre.

Selon Hervé et al. (2001), une variabilité génotypique significative a été observée pour la teneur relative en eau chez les lignées de tournesol étudiées dans les conditions contrôlées.

Scofield et al. (1988) ont noté que la teneur en eau diminue lorsque le stress augmente où elle diminue plus vite chez les variétés sensibles que chez les variétés résistantes.

Chimenti et al. (2002) ont montré que le maintien de la teneur en eau relative (TRE) peut contribuer à la tolérance à la sécheresse chez le tournesol d'où son importance dans les programmes de sélection.

1.1.2. Teneur en chlorophylle totale

L'analyse de la variance n'a révélé aucune différence significative entre les deux régimes hydriques pour la teneur en chlorophylle totale comme le montre le tableau 4. La variété ainsi que l'interaction variété *régime hydrique n'ont pas un effet significatif sur la teneur en chlorophylle totale (Tableau 4).

Tableau 4. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la teneur en chlorophylle totale de tournesol cultivé sous serre.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	2.128	0.093	0.762
variété	4	3.959	0.173	0.951
variété * Régime hydrique	4	14.036	0.613	0.655

Les résultats de la teneur en chlorophylle totale obtenus oscillent entre (5.3 et 9.31) mg g⁻¹ FW enregistrés chez la variété 1 sous le régime hydrique 1 et 2 respectivement (Figure 6). Sous les conditions de déficit hydrique, la teneur en chlorophylle totale diminue chez certaines variétés à savoir 1 et 4 alors qu'elle augmente chez d'autres à savoir les variétés 2, 3 et 5 (Figure 6).

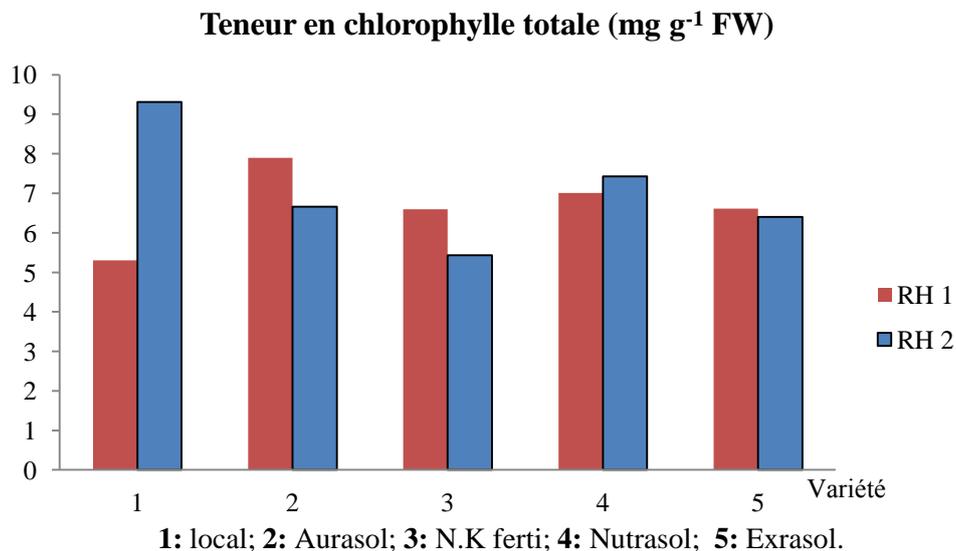


Figure 6. Effet de régime hydrique et de la variété sur la teneur en chlorophylle totale de tournesol cultivé sous serre.

La quantité de la chlorophylle des feuilles peut être influencée par beaucoup de facteurs tels que l'âge des feuilles, la position des feuilles et les facteurs environnementaux comme la lumière, la température et la disponibilité en eau (Hikosaka et al. 2006).

Nezami et al. (2008) ont noté que la différence entre les deux régimes hydriques (100% et 30% de la capacité au champ) chez le tournesol cultivé sous serre n'été pas significative pour la teneur en chlorophylle totale.

Selon Kotchi (2004) en cas d'un stress hydrique prolongé, la plupart des végétaux s'adaptent en réduisant leur surface foliaire tout en maintenant des concentrations en chlorophylles à un niveau similaire à celui sous des conditions idéales de croissance.

Cependant selon (Rong-hual et al. 2006 ; Anjum et al. 2011) le stress hydrique affecte négativement la teneur en chlorophylle où il endommage les pigments chlorophylliens et les membranes de thylakoid.

Andrade et al. (2013) ont constaté que chez le tournesol, les conditions de stress hydriques sévère induit une réduction significative de la teneur en chlorophylle. Ainsi Petcu et al. (2008) ont remarqué que la teneur en chlorophylle totale est réduite sous les conditions de stress hydriques. Le même résultat est trouvé par Manivannan et al. (2014).

Temagoult (2009) a signalé qu'après une semaine d'arrêt total de l'irrigation; la teneur en chlorophylle totale diminue chez certains génotypes cependant qu'elle augmente chez d'autres.

1.1.3. Conductance stomatique

Les résultats présentés dans le tableau 5 montrent que la variété et le régime hydrique influent d'une manière très hautement significative sur la conductance stomatique en revanche l'interaction variété*régime hydrique n'influe pas sur ce paramètre.

Tableau 5. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la conductance stomatique de tournesol cultivé sous serre.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	454.741	17.781	0.000
Variété	4	176.782	6.913	0.000
Variété* Régime hydrique	4	23.091	0.903	0.469

Le stress hydrique a induit une réduction de la conductance stomatique où on remarque que la valeur la plus importante (20.12) $\text{mM}^{-2} \cdot \text{Scm}^{-1}$ est enregistrée chez la variété 5 sous le régime hydrique 2 tandis que la valeur la moins importante (2.83) $\text{mM}^{-2} \cdot \text{Scm}^{-1}$ est marquée chez la variété 3 sous le régime hydrique 1 (Figure 7).

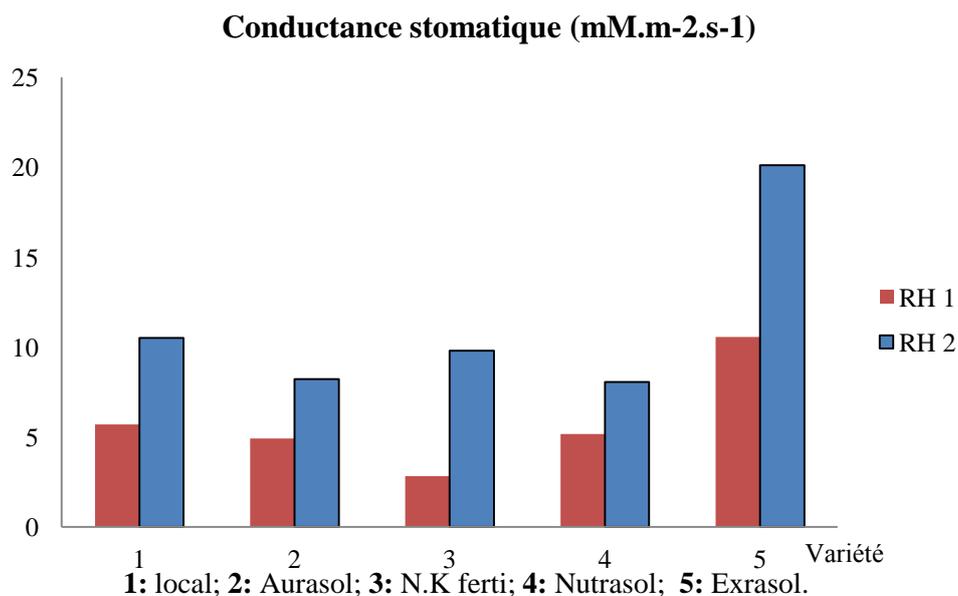


Figure 7. Effet de régime hydrique et de la variété sur la conductance stomatique de tournesol cultivé sous serre.

La fermeture des stomates est l'une des réponses précoces au déficit hydrique qui a pour but la protection de la plante contre la déshydratation mais cause en même temps une diminution de l'assimilation du carbone ce qui perturbe la photosynthèse (Assmann et al. 2000 ; Cechin et al. 2006).

En conditions de déficit hydrique, une faible conductance stomatique conduit à une fermeture rapide des stomates. Il en résulte que la faible conductance est généralement proposée comme un caractère favorable pour l'adaptation à la sécheresse (Ludlow et Muchow, 1990).

Moraes et al. (2015) et Maury et al. (2000) ont indiqué que la conductance stomatique est négativement affectée par le stress hydrique.

Farooq et al. (2009) ont signalé que l'exposition au stress hydrique affecte fortement la conductance stomatique. D'autre part, Grieu et al. (2008) et Kiani (2007) ont indiqué que l'effet de génotype est fortement significatif sur la conductance stomatique chez le tournesol.

1.2. Effet de régime hydrique et de la variété sur les paramètres morphologiques

1.2.1. Nombre de feuilles par plante

L'analyse de la variance a montré que le nombre de feuilles par plante n'est pas influencé par le régime hydrique cependant il est influencé par la variété ainsi que l'interaction variété* régime hydrique (Tableau 6).

Tableau 6. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le nombre de feuilles par plante de tournesol cultivé sous serre.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	16.017	1.943	0.170
Variété	4	22.858	2.773	0.037
Variété*Régime hydrique	4	21.142	2.565	0.049

La figure suivante montre que le nombre de feuilles le plus élevé est enregistré chez la variété 5 avec une valeur de 32 tandis que le moins élevé est enregistré chez la variété 1 avec une valeur de 26.

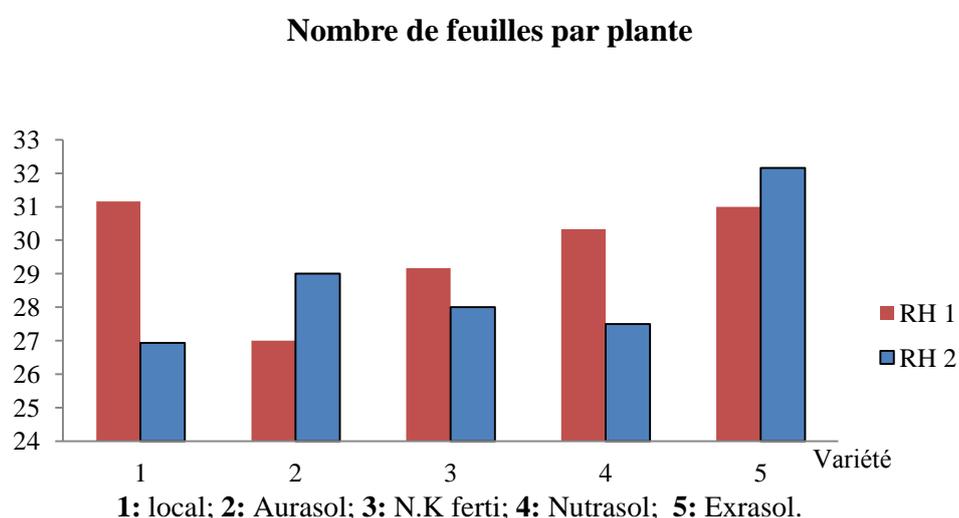


Figure 8. Effet de régime hydrique et de la variété sur le nombre de feuilles par plante de tournesol cultivé sous serre.

Le nombre de feuilles est un caractère génétiquement fixé et légèrement affecté par des facteurs environnementaux (Hall, 2001).

Darvishzadeh et al. (2014) ont constaté que le nombre de feuilles par plante n'a pas été changé entre les deux régimes hydriques; bien irrigué et stressé cependant ils ont mentionné qu'il existe une différence significative entre les génotypes étudiés et les interactions génotype*régime hydrique vis-à-vis de ce caractère.

Kiani (2007) a remarqué que dans les conditions de la serre, l'effet de régime hydrique n'est pas significatif pour le nombre de feuilles cependant l'effet de génotype est significatif.

1.2.2. Hauteur de la plante

Selon les résultats de l'analyse de la variance; la différence entre la hauteur des plantes bien irriguées et celle stressées n'est pas significative. Ainsi la différence entre les variétés et les interactions variétés * régime hydrique n'est pas significative (Tableau 7).

Tableau 7. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la hauteur de la plante de tournesol cultivé sous serre.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	294.817	0.549	0.462
Variété	4	865.608	1.611	0.186
Variété * régime hydrique	4	730.692	1.360	0.261

Quoique la différence entre les variétés n'est pas statistiquement significative; la figure 9 montre que la variété 5 présente la hauteur de la plante la plus élevée à savoir (173.83) cm.

Hauteur de la plante (cm)

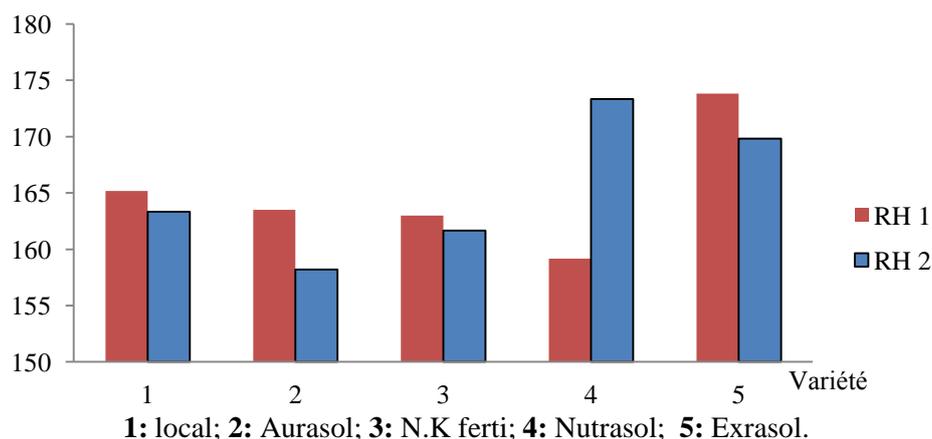


Figure 9. Effet de régime hydrique et de la variété sur la hauteur de la plante de tournesol cultivé sous serre.

L'obtention des hauteurs similaires des plantes stressées et celles bien irriguées peut être expliquée par les conditions de culture sous une serre qui se caractérise par une petite hauteur empêchant le développement des tiges en longueur ce qui provoque le masquage de l'effet de stress hydrique.

Kiani(2007) et Petcu et al. (2008) ont constaté que le déficit hydrique induit une réduction de la hauteur de la plante.

1.2.3. Diamètre de la tige

Les résultats acquis montrent que le régime hydrique et la variété ont un effet significatif sur le diamètre de la tige de la plante de tournesol cultivé sous serre (Tableau 8). D'autre part, l'interaction régime hydrique * variété a un effet hautement significatif sur ce paramètre (Tableau 8).

Tableau 8. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le diamètre de la tige de tournesol cultivé sous serre.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	3.994	3.749	0.051
Variété	4	2.892	2.715	0.040
Variété * Régime hydrique	4	4.945	4.642	0.003

Les résultats obtenus montrent que le diamètre de la tige des plantes stressées est inférieur par rapport aux plantes non stressées avec des valeurs oscillant entre (11.26 et 12.0) mm chez les variétés 3 et 4 respectivement pour le régime hydrique 1 et entre (11.3 et 14.07) mm chez les variétés 1 et 5 respectivement pour le régime hydrique 2 (Figure 10).

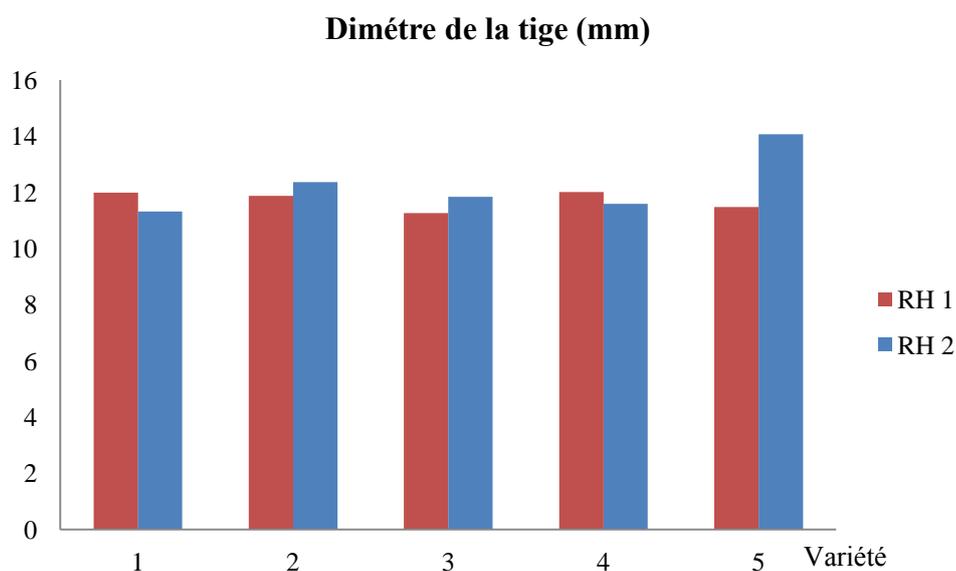


Figure 10. Effet de régime hydrique et de la variété sur le diamètre de la tige de tournesol cultivé sous serre.

Selon Thakur et Rai (1982), le déficit hydrique entraîne un retard dans la croissance végétale se traduit par une réduction de la hauteur et du diamètre de la tige.

Nezami et al. (2008) ont mentionné que le diamètre de la tige est affecté par le déficit hydrique où la réduction de la teneur en eau du sol à 60% et 30% de la capacité au champ

cause une réduction de 20 et 46% de diamètre de la tige par rapport au régime hydrique témoin.

Kiani (2007) a aussi remarqué que le régime hydrique a un effet significatif sur le diamètre de la tige de tournesol dans les conditions de la serre.

1.2.4. Diamètre et poids de capitule

Les résultats d'analyse de la variance récapitulés dans les deux tableaux (9 et 10) montrent que l'effet de régime hydrique sur le diamètre et le poids de capitule est très hautement significatif. Ainsi ils indiquent que l'effet de la variété sur le diamètre de capitule est très hautement significatif tandis que l'effet de l'interaction variété*régime hydrique sur les deux caractères est hautement significatif (Tableaux 9, 10).

Tableau 9. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le diamètre de capitule de tournesol cultivé sous serre.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	35.113	53.243	0.000
Variété	4	16.382	24.840	0.000
Variété* Régime hydrique	4	2.428	3.681	0.011

Tableau 10. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le poids de capitule de tournesol cultivé sous serre.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	1897.313	55.171	0.000
Variété	4	78.740	2.290	0.073
Variété* régime hydrique	4	155.384	4.518	0.003

D'après nos résultats, le déficit hydrique induit une réduction de diamètre de capitule qui varie entre (8.20 et 10.8) cm chez les variétés 1 et 2 conduites sous le régime hydrique 1 cependant il varie entre (9.05 et 12.60) cm chez les mêmes variétés lorsqu'elles sont conduites sous le régime hydrique 2 (Figure 11).

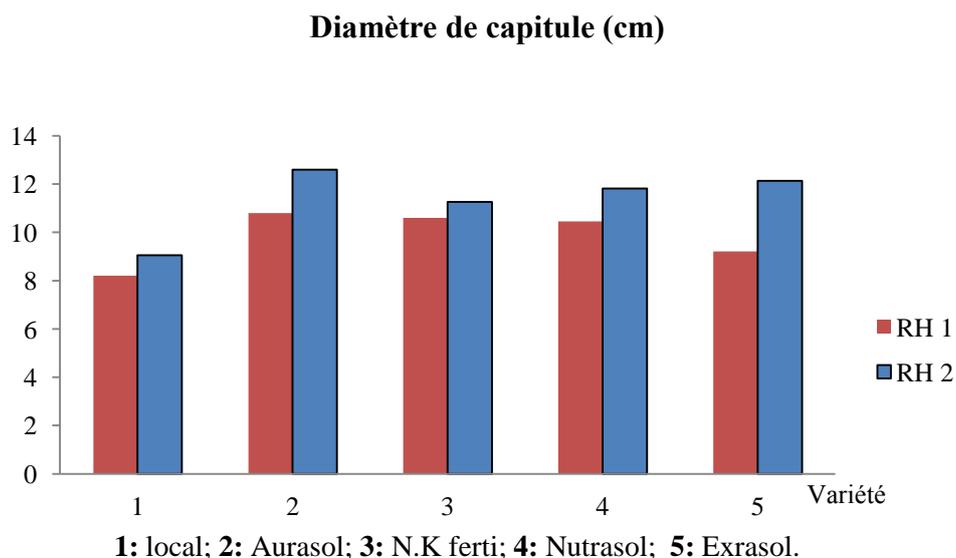


Figure 11. Effet de régime hydrique et de la variété sur le diamètre de capitule de tournesol cultivé sous serre.

D'après nos résultats, le déficit hydrique entraîne une réduction remarquable de poids de capitule où la valeur la plus grande (37.3) g est observée chez la variété 2 sous le régime hydrique 2 toutefois celle la plus petite (13.8) g est observée chez la variété 5 sous le régime hydrique 1(Figure 12).

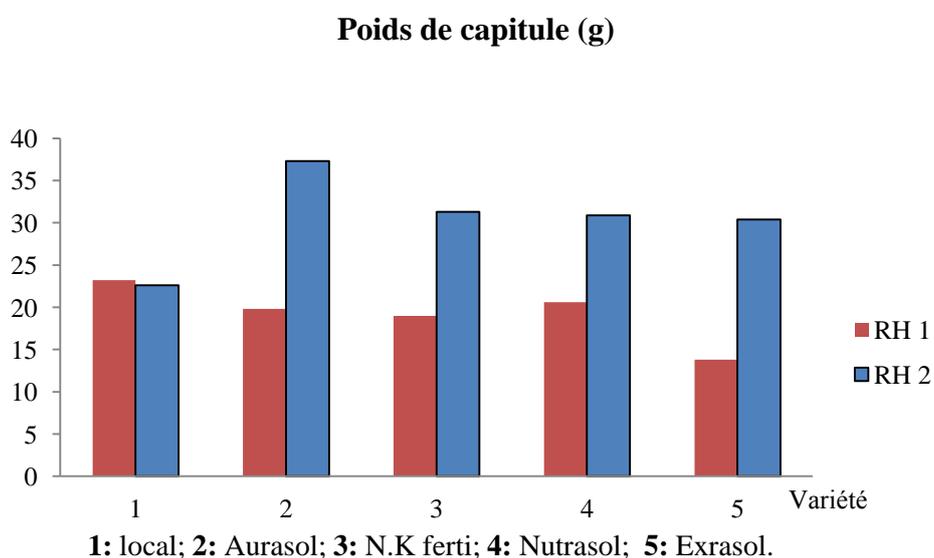


Figure 12. Effet de régime hydrique et de la variété sur le poids de capitule de tournesol cultivé sous serre.

Nezami et al. (2008) ont trouvé une différence significative entre les traitements hydriques pour le diamètre de capitule qui réduit lorsque le déficit hydrique augmente. Le même résultat a été signalée par Kiani (2007) où l'effet de régime hydrique été significatif pour le diamètre et le poids de capitule ainsi que l'effet de génotype.

Darvishzadeh et al. (2014) ont indiqué aussi dans leur recherche que l'effet de deux traitements hydriques bien irrigué et stressé a été observé sur le diamètre et le poids de capitule.

1.3. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en graines et ses deux composantes

1.3.1. Rendement en graines par plante

L'analyse de la variance a montré que le régime hydrique ainsi la variété ont un effet très hautement significatif sur le rendement en graines comme elle a montré que l'effet de l'interaction variété*régime hydrique sur le rendement est hautement significatif (Tableau 11).

Tableau 11. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le rendement en graines par plante de tournesol cultivé sous serre.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	1347.961	173.441	0.000
Variété	4	42.178	5.427	0.001
Variété * régime hydrique	4	28.301	3.641	0.011

D'après nos résultats on constate que le rendement le plus élevé produit sous le régime hydrique 2 avec une valeur de 19.33g/plante enregistrée chez la variété 2 alors que le rendement le plus faible produit sous le régime hydrique 1 avec une valeur de 5.95g/plante enregistrée chez la variété 4 (Figure 13). En outre, sous les conditions de déficit hydrique la variété 3 avec une valeur de 8,0 g/plante présente un rendement élevé par rapport aux autres variétés (Figure 13).

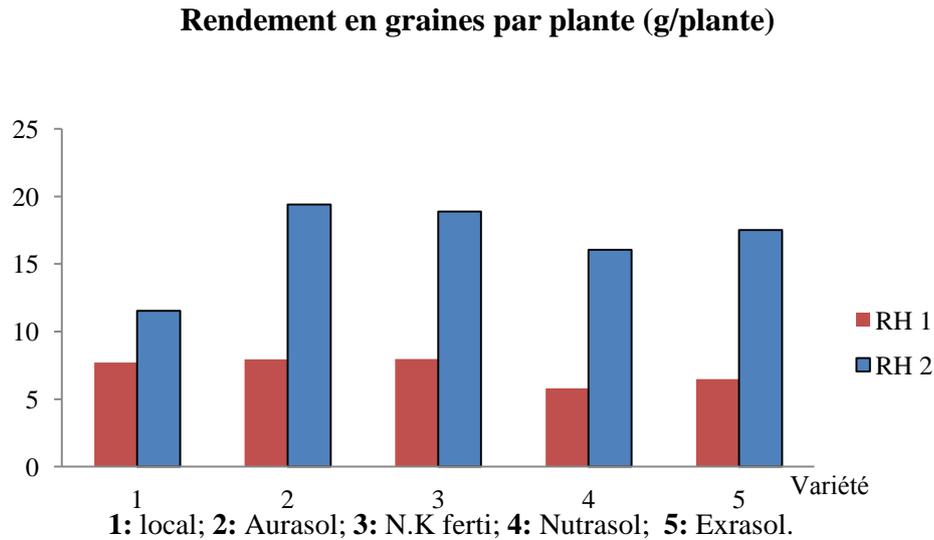


Figure 13. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en graines par plante de tournesol cultivé sous serre.

Les processus impliqués dans l'élaboration de rendement d'une culture sont influencés par deux types de facteurs, les facteurs génétiques (intrinsèques à la plante) et les facteurs environnementaux. Les interactions génotypes-milieu jouent également un rôle important (Radhouane et al. 2014). Selon Fahad et al. (2017), la sécheresse provoque des pertes de rendement importantes chez les grandes cultures.

Le problème de faible rendement qui est due au déficit hydrique a été soulevé aussi par différents auteurs en particulier Hussain et al. (2018) et Petcu et al. (2008) qui ont montré que l'effet de déficit hydrique est significatif pour le rendement en graines par plante de tournesol cultivé sous les conditions de la serre.

Flenet et al. (1996) ont remarqué qu'en fonction du niveau de stress hydrique, le taux de réduction de rendement en graines de tournesol varié entre 22% et 62%.

Pekcan et al. (2015) ont trouvé que le rendement en graines de tournesol était le trait le plus affecté par le stress hydrique parmi les caractéristiques de rendement évalués.

Kiani (2007) a signalé que le rendement en graines par plante de tournesol cultivé sous serre est influencé par le régime hydrique où il est réduit sous un régime hydrique stressé.

Kiani (2007) et Darvishzadeh et al. (2014) ont affirmé que le rendement est ainsi influencé par le génotype et l'interaction de génotype*traitement hydrique.

1.3.2. Nombre de graines par plante

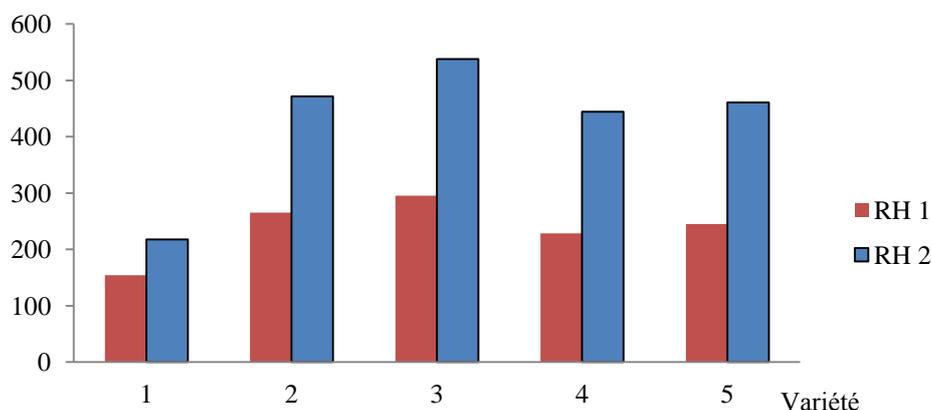
L'analyse de variance a montré que la différence entre les deux régimes hydriques (1 et 2) ainsi que l'ensemble des variétés est très hautement significative pour le nombre de graines par plante. D'autre part l'interaction variété*régime hydrique induit un effet très hautement significatif (Tableau 12).

Tableau 12. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le nombre de graines par plante de tournesol cultivé sous serre.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	557963.267	186.142	0.000
Variété	4	89953.083	30.009	0.000
Variété* régime hydrique	4	16316.600	5.443	0.001

Les résultats obtenus indiquent que le déficit hydrique réduit le nombre de graines par plante qui varié entre (154.0 et 537) chez les variétés 1 et 3 sous les deux régimes hydriques 1 et 2 respectivement. Par ailleurs la variété 3 présente le nombre de graines le plus élevé (295,5) sous les conditions de déficit hydrique (Figure 14).

Nombre de graines par plante



1: local; 2: Aurasol; 3: N.K ferti; 4: Nutrasol; 5: Extrasol.

Figure 14. Effet de régime hydrique et de la variété sur le nombre de graines par plante de tournesol cultivé sous serre.

La réduction de nombre de graines par capitule sous l'effet du déficit hydrique en conditions contrôlées peut être expliquée d'une part par la diminution de la quantité de carbone transféré au capitule et d'autre part par les effets directs du faible potentiel hydrique

sur le métabolisme ovarien et les modifications de l'équilibre hormonal des fleurs (Connor and Sadras, 1992).

Nezami et al. (2008) ont signalé que le nombre de graines par capitule est significativement réduit sous stress hydrique. Ainsi Flagella et al. (2002) et Flenet et al. (1996) ont soulevé que le nombre de graines par capitule diminue lorsque l'intensité de stress hydrique augmente.

1.3.3. Le poids de 1000 graines

Les résultats présentés dans le tableau 13 montrent que le poids de 1000 graines est fortement influencé par le régime hydrique et la variété cependant qu'il n'est pas influencé par l'interaction variété*régime hydrique.

Tableau 13. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le poids de 1000 graines de tournesol cultivé sous serre.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	14.583	14.718	0.000
Variété	4	6.783	6.845	0.000
Variété* régime hydrique	4	0.102	0.103	0.981

Les résultats obtenus indiquent que le déficit hydrique induit une réduction de poids de 1000 graines où la valeur la plus importante (55.2)g est enregistrée chez la variété 1 sous le régime hydrique 2 cependant la plus petite (25) g est enregistrée chez la variété 4 sous le régime hydrique 1. D'autre part, la variété 1 sous le régime hydrique 1 se caractérise par le poids de 1000 graines le plus élevé (Figure 15).

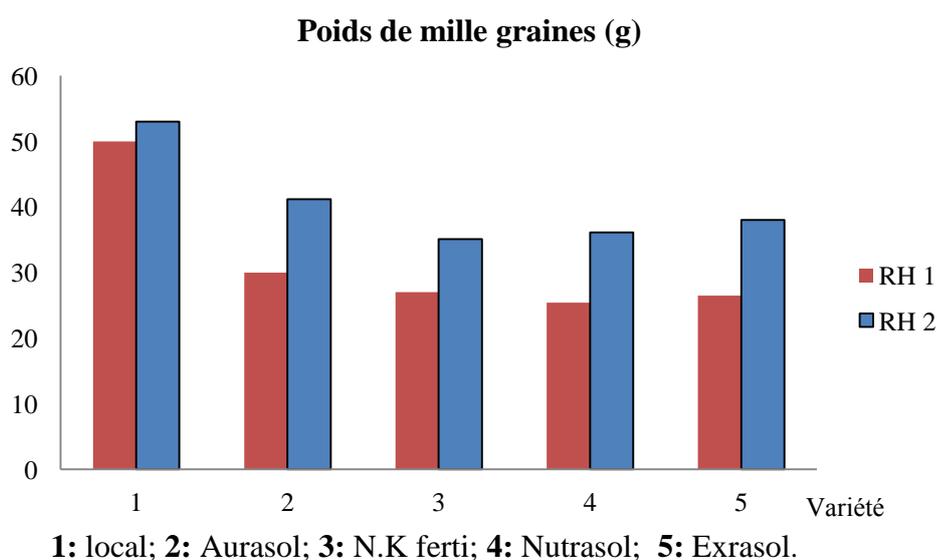


Figure 15. Effet de régime hydrique et de la variété sur le poids de 1000 graines de tournesol cultivé sous serre.

Nezami et al. (2008) ont observé que le poids de 100 graines été significativement affecté par le déficit hydrique où il diminue par un taux de 32.7% lorsque la teneur en eau du sol diminue de 100 à 30%.

Flénet et al. (1996) et Kiani (2007) ont aussi évoqué que le poids de 1000 graines est réduit sous l'effet du stress hydrique.

1.4. Corrélations binaires entre le rendement en graines et les différents paramètres étudiés

L'amélioration de rendement et sa stabilité à travers une sélection directe ont été empêchées par la faible héritabilité du rendement en particulier sous les conditions de sécheresse et la grande interaction génotype *environnement. Par conséquent comme alternative à la sélection directe pour le rendement en graines en période de sécheresse, les traits morpho-physiologiques corrélés au rendement ont été ciblés pour être utilisé comme des critères de sélection (Kiani, 2007).

D'après les résultats figurés dans le tableau 14 on constate que le rendement présente une corrélation significative positive avec le diamètre de la tige ($r=0.288^*$), la teneur relative en eau ($r=0.282^*$) et le poids de 1000 graines ($r=0.433^*$), une corrélation significative négative avec la conductance stomatique ($r=-0.371^*$) comme il présente une corrélation hautement significative positive avec le diamètre de capitule ($r=0.661^{**}$), le poids de capitule ($r=0.820^{**}$) et le nombre de graines par plante ($r=0.847^{**}$).

Tableau 14. Coefficients de corrélation de rendement en graines par plante avec les différents paramètres de tournesol cultivé sous serre (Coefficients de Pearson).

	NFP	HP	DT	TRE	ChIT	CS	DC	PC	NGP	PMG	RDM
RDM	-0,029	-0,158	0,288*	0,282*	-0,147	-0,371*	0,661**	0,820**	0,847**	0,433*	1

NFP : nombre de feuilles par plante, **HP** : hauteur de la plante, **DT** : diamètre de la tige, **TRE** : teneur relative en eau, **ChIT** : chlorophylle totale, **CS** : conductance stomatique, **DC** : diamètre de capitule, **PC** : poids de capitule, **NGP** : nombre de graines par plante, **PMG** : poids de 1000 graines, **RDM** : rendement en graine par plante. * : significative, ** : hautement significative.

La corrélation positive significative entre le rendement et le diamètre de la tige peut être expliquée selon Blum (1988) que la capacité des plantes pour le remplissage des graines est liée à la quantité des réserves dans la tige et la facilité de transport de ces réserves vers les graines dans les conditions de stress hydrique.

kiani (2007) a remarqué que le rendement de tournesol cultivé dans les conditions contrôlées et subit un déficit hydrique au stade de reproduction présente une corrélation très hautement significative positive avec le poids de capitule ($r=0.69^{***}$) cependant il ne présente aucune corrélation avec le nombre de feuilles et la hauteur de la plante.

Selon Merciau et al. (2001) le nombre de graines représente une proportion importante de la variation de rendement.

2. Expérimentation en milieu naturel

2.1. Analyse du sol

Les résultats obtenus montrent que le sol de site de l'expérimentation en milieu naturel est moyennement basique, non salé, modérément calcaire, moyennement riche en matière organique avec une texture Argilo- limoneuse (Tableau 15).

Tableau 15. Caractéristiques physico-chimiques du sol de l'expérimentation en milieu naturel

pH	C.E (µs)	MO%	Calcaire total %	Granulométrie
7.94	227	2.27	23.93	Argilo-limoneuse

C.E : conductivité électrique, MO : la matière organique

Selon Rousset (2008), le tournesol se développe bien dans des sols variant d'une texture sablonneuse à argileuse comme il n'exige pas une grande fertilité pour produire de façon satisfaisante. D'autre part, le sol ne doit pas avoir de problème d'acidité (pH minimum = 5,2).

La comparaison de nos résultats avec les exigences édaphiques de tournesol nous montre que le sol du site de l'expérimentation est favorable à la plantation de cette culture.

2.2. Données Climatiques de Relizane

Durant les deux années d'expérimentation (2016 et 2018) cette zone est caractérisée par une sécheresse qui s'étale sur une période de 5 mois sur douze mois (Juin-Octobre). Elle est définie par des précipitations réduites et rares et des températures maximales élevées (Tableaux 16,17).

Les températures minimales et maximales de la première année d'expérimentation (2016) ont des valeurs moyennes respectives de 13.64°C et 27.13°C. L'humidité relative et les précipitations sont respectivement de 56.49% et 20.51mm.

Au cours de l'essai, les précipitations enregistrées du mois de mai jusqu'au mois de septembre étaient de 19.06 mm. Les températures moyennes maximales et minimales durant la même période étaient respectivement de 34.98 et 14.4°C (Tableau 16).

Tableau 16. Données Climatiques moyennes mensuelles de Relizane de l'année 2016.

Mois	Tmax	Tmin	H	PP
Janvier	19,4	8,2	68,5	13,96
Février	19,5	8,9	62	46,24
Mars	19,4	7,4	68,8	14,1
Avril	24	10,6	61,6	41,39
Mai	28,9	13,5	48,1	12,46
Juin	34,9	17,8	36,6	3,05
Juillet	39,3	21,3	39,2	0,5
Août	38	21,4	43	0
Septembre	33,8	19,4	44,5	3,05
Octobre	30,6	15,9	54,9	3,06
Novembre	21,1	10,9	66,5	79,76
Décembre	16,7	8,4	84,2	28,58

Source : Tutiempo.net

Les températures minimales et maximales de la deuxième année d'expérimentation (2018) ont des valeurs moyennes respectives de 13.43°C et 25.42°C. L'humidité relative et les précipitations sont respectivement de 59.83% et 38.67 mm. Au cours de l'essai, les précipitations enregistrées du mois de mai jusqu' au mois de septembre étaient de 105.41mm. Les températures moyennes maximales et minimales durant la même période étaient respectivement de 33.12 et 19.04°C (Tableau 17).

Tableau 17. Données Climatiques moyennes mensuelles de Relizane de l'année 2018

Mois	Tmax	Tmin	H	PP
Janvier	17,2	6,4	71,4	33,28
Février	15,7	5,6	68,9	27,69
Mars	19,1	10,5	67,8	108,71
Avril	23,6	11,2	60,9	42,43
Mai	26,5	13,1	53,6	23,36
Juin	32,1	17,7	46,8	27,18
Juillet	36,6	21,6	35,4	0
Août	37,7	22,1	39,4	0,25
Septembre	32,7	20,7	56,8	54,62
Octobre	26,1	14,5	61,5	49,53
Novembre	20,1	10,9	73,6	78,73
Décembre	17,7	6,9	81,9	18,29

Source : Tutiempo.net

2.3. Effet de régime hydrique et de la variété sur les paramètres physiologiques

2.3.1. Teneur relative en eau

Les résultats d'analyse de la variance ont montré que le régime hydrique semble avoir un effet hautement significatif sur la teneur relative en eau des plantes cultivées en plein champ

ainsi l'effet de l'interaction régime hydrique*variété est hautement significatif en revanche la différence entre les variétés n'est pas significative (Tableau 18).

Tableau 18. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la teneur relative en eau de tournesol cultivé en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	447.500	8.498	0.005
Variété	4	25.285	0.480	0.750
Variété *Régime hydrique	4	237.598	4.512	0.003

Les résultats obtenus montrent que la teneur relative en eau des variétés étudiées diminue en présence du déficit hydrique. Parmi ces variétés, la variété 1 s'avère la plus résistante pour le maintien de son hydratation où on note une faible réduction de l'ordre de 5.3% par rapport aux autres variétés (Figure 16).

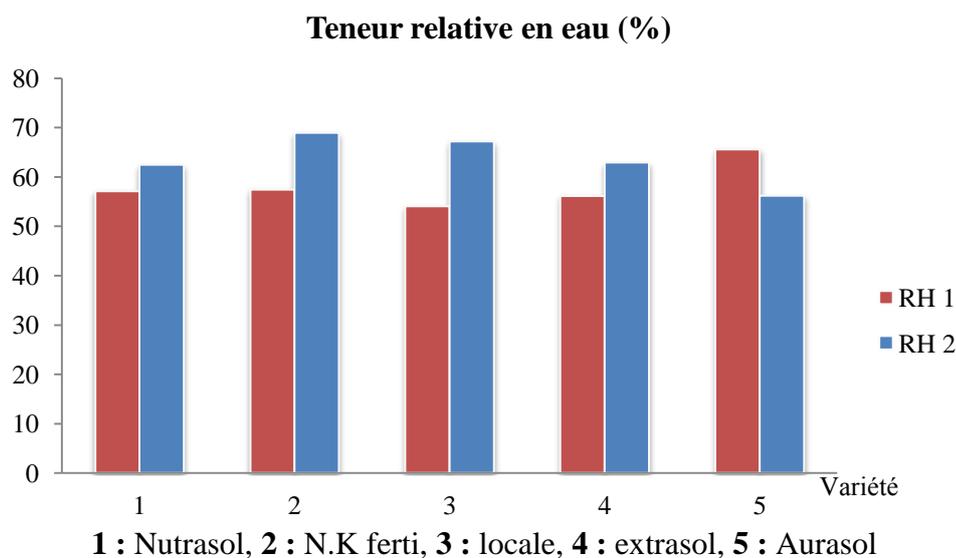


Figure 16. Effet de régime hydrique et de la variété sur la teneur relative en eau de tournesol cultivé en milieu naturel.

Selon kiani (2007), les conditions de stress hydrique induit l'altération de l'état hydrique notamment la teneur relative en eau ce qui provoque la perte de turgescence, le ralentissement du taux de division et d'expansion des cellules et par conséquent le ralentissement de la croissance.

Ghobadi et al. (2013) ont mentionné que la teneur relative en eau diminue avec le stress hydrique comme ils ont mentionné qu'il n'y a pas une différence génotypique pour ce caractère.

Ebrahimi et al. (2014) ont aussi signalé que le stress hydrique réduit la teneur relative en eau.

2.3.2. Teneur en chlorophylle totale

Les résultats d'analyse de la variance récapitulés dans le tableau 19 montrent que la chlorophylle totale des plantes de tournesol cultivées en plein champ n'est pas influencée par le régime hydrique ainsi que la variété et l'interaction variété* régime hydrique.

Tableau 19. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la chlorophylle totale de tournesol cultivé en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	4.783	0.055	0.815
Variété	4	7.864	0.091	0.985
Variété * régime hydrique	4	42.587	0.494	0.740

Les résultats obtenus montrent que les valeurs de la chlorophylle totale oscillent entre (21) mg g⁻¹ FW observée chez la variété 2 sous le régime hydrique 1 et (25.5) mg g⁻¹ FW observée chez la même variété sous le régime hydrique 2 (Figure 17).

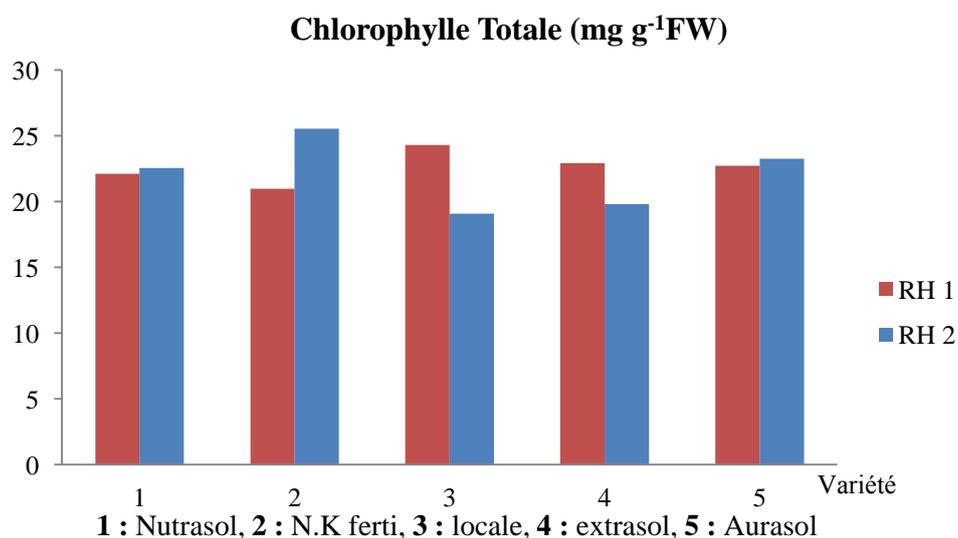


Figure 17. Effet de régime hydrique et de la variété sur la Chlorophylle totale de tournesol cultivé en milieu naturel.

Ebrahimi et al. (2014), Ghobadi et al. (2013) ont signalé que la teneur en chlorophylle total réduit sous les conditions de stress hydrique.

2.4. Effet de régime hydrique et de la variété sur les paramètres morphologiques

2.4.1. Nombre de feuilles par plante

L'étude de l'influence du régime hydrique sur le nombre de feuilles par plante chez le tournesol cultivé en plein champ durant la première année d'expérimentation a montré qu'il n'y a aucune différence significative entre les deux régimes hydrique (Tableau 20). Ainsi la variété et l'interaction variété * régime hydrique n'ont montré aucun effet sur ce paramètre (Tableau 20).

Tableau 20. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le nombre de feuilles par plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	7.350	0.583	0.449
Variété	4	27.833	2.206	0.082
Variété * Régime hydrique	4	4.267	0.338	0.851

Les résultats obtenus durant la première année d'expérimentation de milieu naturel montrent que la variété 4 présente le nombre de feuilles le plus important à savoir 34 (Figure 18).

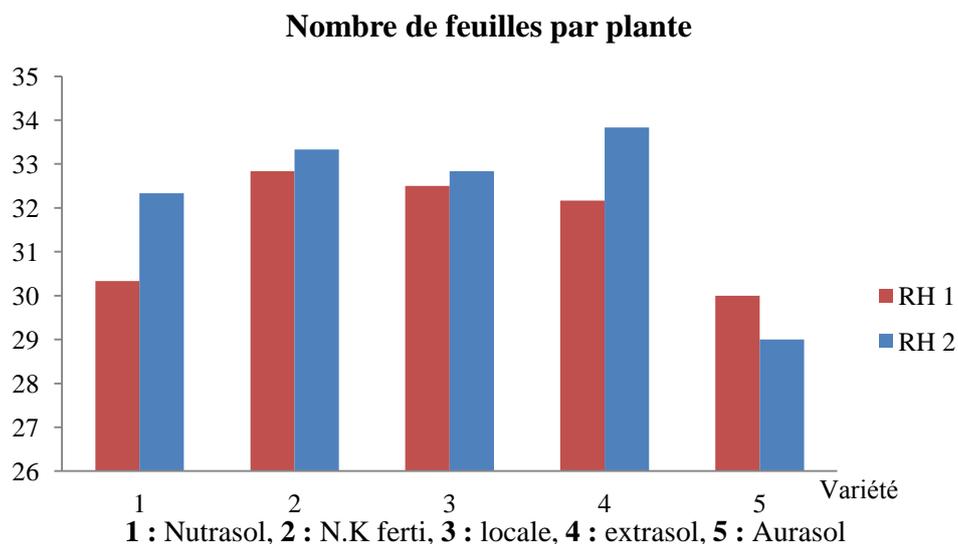


Figure 18. Effet de régime hydrique et de la variété sur le nombre de feuilles par plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Les résultats d'analyse de la variance de la deuxième année d'expérimentation en plein champ indiqués dans le tableau 21 nous a permis de distinguer que l'effet de régime hydrique et de la variété sur le nombre de feuilles par plante est très hautement significatif alors que l'effet de l'interaction variété*régime hydrique n'est pas significatif.

Tableau 21. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le nombre de feuilles par plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	225.333	32.152	0.000
Variété	3	44.806	6.393	0.001
Variété * Régime hydrique	3	4.611	0.658	0.583

Les résultats illustrés dans la figure 19 montrent que le nombre de feuilles le plus élevé (35) est enregistré chez la variété 3 sous le régime hydrique 2 cependant ce le moins élevé (26) est enregistré chez la variété 1 sous le régime hydrique 1. Ainsi la variété 3 présente le nombre de feuilles le plus élevé (31) sous les conditions de déficit hydrique par rapport aux autres variétés.

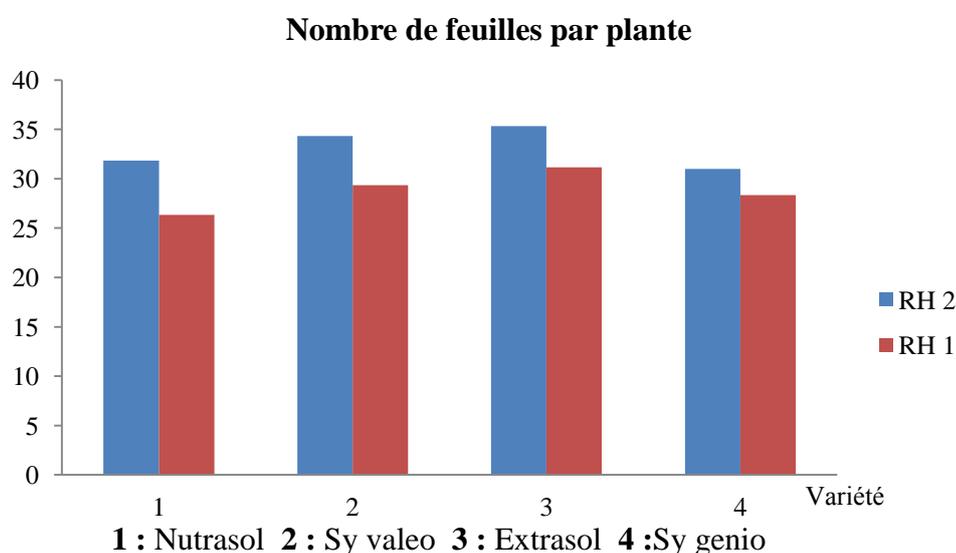


Figure 19. Effet de régime hydrique et de la variété sur le nombre de feuilles par plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

La comparaison des résultats des deux années d'expérimentation montre qu'il n'y a pas une grande différence vis-à-vis le nombre de feuilles par plante chez le tournesol (Figures 18, 19).

Ben Naceur et al. (2002) ont rapporté que le stress hydrique inhibe la croissance des tiges et des feuilles différemment en fonction des génotypes.

Kiani (2007), Go Ksoy et al. (2004) et Andrei (2004) ont mentionné que le nombre de feuilles par plante est moins affecté par le stress hydrique où il montre une plus grande stabilité.

Cependant Shafi et al. (2013) Alahdadi et al. (2014) ont signalé que chez le tournesol; l'irrigation augmente le nombre de feuilles par plante. En outre Unger (1983) a indiqué que le traitement hydrique affecte significativement le nombre de feuilles par plante chez le tournesol implanté en plein champ.

Shafi et al. (2013) ont trouvé que le génotype a un effet significatif sur le nombre de feuilles par plante chez le tournesol cultivé en milieu naturel.

2.4.2. Hauteur de la plante

Les résultats d'analyse de la variance de la première année d'expérimentation ont montré que l'effet de régime hydrique sur la hauteur de la plante de tournesol cultivé en plein champ est très hautement significatif (Tableau 22). Cependant l'effet de la variété ainsi que l'interaction variété* régime hydrique n'est pas significatif (Tableau 22).

Tableau 22. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la hauteur de la plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	3465.600	23.860	0.0001
Variété	4	214.108	1.474	0.224
Variété* Régime hydrique	4	125.142	0.862	0.493

La hauteur de la plante des variétés cultivées en plein champ durant la première année d'expérimentation variée considérablement autour d'une valeur moyenne de (142.56) cm. Cette variation est comprise entre une valeur maximale de (160.2) cm enregistrée chez la variété 4 sous le régime hydrique 2 et une valeur minimale de (132.5) cm enregistrée chez la variété 2 sous le régime hydrique 1 (Figure 20).

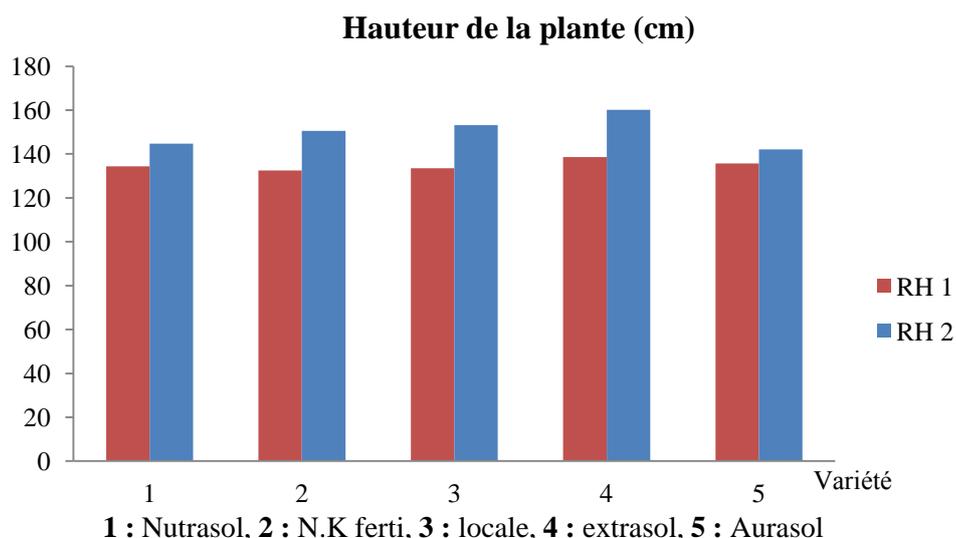


Figure 20. Effet de régime hydrique et de la variété sur la hauteur de la plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Les résultats d'analyse de la variance de la deuxième année d'expérimentation ont montré que le régime hydrique et la variété ont un effet très hautement significatif sur la hauteur de la plante de tournesol cultivé en milieu naturel (Tableau 23). Cependant l'effet de l'interaction variété*régime hydrique n'est pas significatif.

Tableau 23. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la hauteur de la plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	6120.083	50.874	0.000
Variété	3	1826.528	15.183	0.000
Variété *régime hydrique	3	57.417	0.477	0.700

Durant la deuxième année de l'expérimentation, la hauteur de la plante des variétés de tournesol variée considérablement autour d'une valeur moyenne de (154.20) cm. Cette variation est oscillée entre une valeur maximale de (175.33) cm enregistrée chez la variété 4 sous le régime hydrique 2 et une valeur minimale de (126.17) cm enregistrée chez la variété 1 sous le régime hydrique 1. Avec une valeur de (158) cm ; La variété 4 présente la hauteur de la plante la plus élevée par rapport aux autres variétés conduites sous les conditions de déficit hydrique (Figure 21).

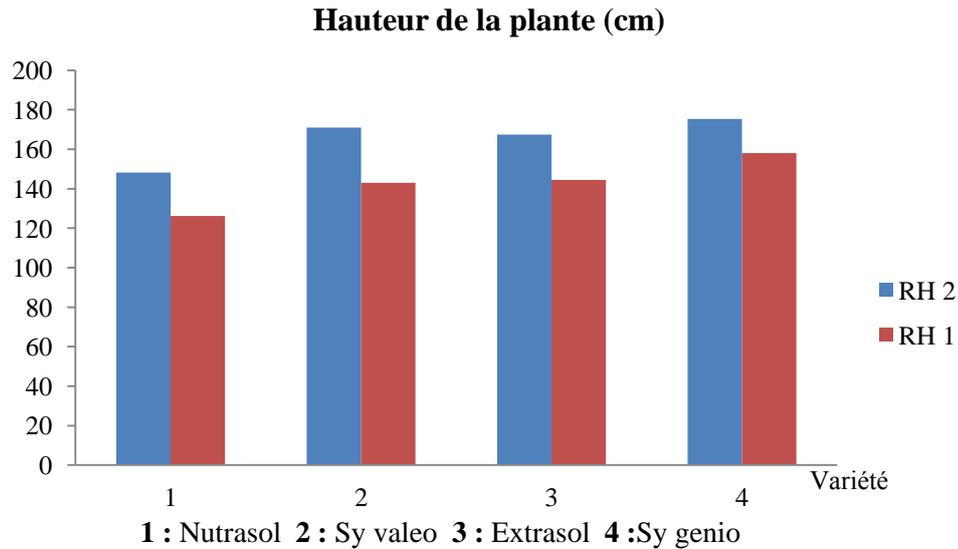


Figure 21. Effet de régime hydrique et de la variété sur la hauteur de la plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

La comparaison des résultats issus des deux années d'expérimentations montre que la hauteur des plantes de tournesol irrigués et stressés de la deuxième année d'expérimentation est supérieure que celle de la première année (Figures 20, 21).

Selon Maury et al. (2011), le développement végétative de tournesol cultivé sous les conditions de déficit hydrique est fortement perturbé où ils ont noté essentiellement une réduction importante de leur taille. Ainsi Lamaze et al. (1994) ont mentionné que l'effet du stress hydrique sur la partie aérienne de la plante entraîne une réduction de la hauteur et du diamètre de la tige de tournesol.

Shafi et al. (2013), GO Ksoy et al. (2004), Andrei (2004), Nadeem Tahir et al. (2002), Kaya et kolsarici (2011) ont indiqué que la hauteur de la plante de tournesol est affectée d'une manière significative par le régime hydrique et le génotype. Ainsi ils ont signalé un effet significatif de l'interaction variété*régime hydrique.

Hussain et al. (2012) ont signalé que le stress hydrique réduit significativement la hauteur de la plante de tournesol implanté dans les conditions naturelles comme ils ont observé que cette réduction est très importante lorsque le stress est survenu au stade bouton floral qu'au début de la floraison.

Alahdadi et al. (2014) qui ont étudié l'effet de trois régimes hydriques sur la culture de tournesol cultivée en plein champ ont montré aussi que le stress hydrique a un effet significatif sur la hauteur de la plante ainsi ils ont montré que la différence entre les variétés étudiées et l'interaction variété*traitement hydrique est significative pour ce paramètre.

Cependant Kiani (2007) a constaté que le stress hydrique n'avait pas un effet significatif sur la hauteur de la plante de tournesol cultivé en plein champ. Ainsi Elsheikh et al. (2015) ont observé que le stress hydrique survenu lors de la floraison et de remplissage du grain n'avait pas d'effet significatif sur la hauteur de la plante.

D'autre part, Kiani (2007) a remarqué que la différence génotypique est hautement significative pour la hauteur de la plante de tournesol cultivé en milieu naturel.

2.4.3. Diamètre de la tige

Les résultats d'analyse de la variance de la première année d'expérimentation figurés dans le tableau 24 indiquent que le régime hydrique ainsi l'interaction variété* régime hydrique impliquent un effet hautement significatif sur le diamètre de la tige. En revanche l'effet de la variété sur ce paramètre n'est pas significatif (Tableau 24).

Tableau 24. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le diamètre de la tige de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	71.592	7.786	0.007
Variété	4	3.694	0.402	0.807
Variété*Régime hydrique	4	37.324	4.059	0.006

Les résultats de la première année d'expérimentation nous renseignent que le déficit hydrique entraîne une réduction de diamètre de la tige des variétés de tournesol où il varié entre une valeur maximal de 27.8 mm chez la variété 4 sous le régime hydrique 2 et une valeur minimal de 21.1mm chez la même variété sous le régime hydrique 1 (Figure 22).

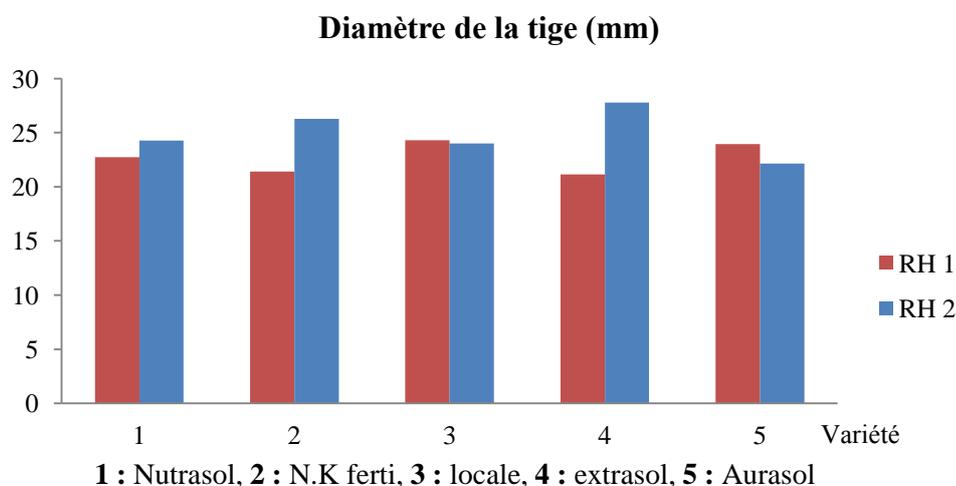


Figure 22. Effet de régime hydrique et de la variété sur le diamètre de la tige de la plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Les résultats d'analyse de la variance de la deuxième année d'expérimentation présentés dans le tableau 25 indiquent que l'effet de régime hydrique sur le diamètre de la tige est très hautement significatif comme ils indiquent que l'effet de la variété est hautement significatif. Néanmoins l'effet de l'interaction variété * régime hydrique n'est pas significatif (Tableau 25).

Tableau 25. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le diamètre de la tige de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	243.000	14.073	0.001
Variété	3	91.333	5.290	0.004
Variété * régime hydrique	3	3.333	0.193	0.901

Les résultats obtenus de la deuxième année d'expérimentation montrent que le régime hydrique 1 entraîne une régression remarquable de diamètre de la tige des variétés de tournesol où il varie entre une valeur maximale (34,00) mm chez la variété 4 sous le régime hydrique 2 et une valeur minimale (22,50) mm chez la variété 1 sous le régime hydrique 1 (Figure 23). La variété 4 présente le diamètre de la tige le plus élevé (28) mm sous les conditions de déficit hydrique. (Figure 23).

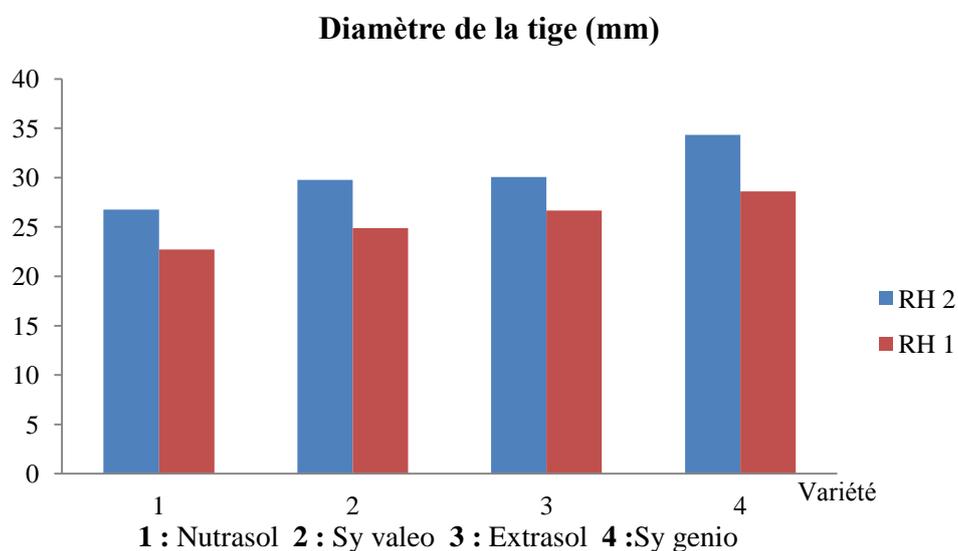


Figure 23. Effet de régime hydrique et de la variété sur le diamètre de la tige de la plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

Les moyennes du diamètre de la tige des plantes irriguées et stressées de la deuxième année sont supérieures que celle de la première année (Figures 22, 23).

Selon Andrei (2004), le diamètre de la tige est affecté par les conditions de stress hydrique.

2.4.4. Diamètre de capitule

Les résultats de la première année d'expérimentation en milieu naturel ont montré que le régime hydrique a un effet très hautement significatif sur le diamètre de capitule comme ils montrent que l'effet de l'interaction variété* régime hydrique est significatif. Toutefois la différence entre l'ensemble des variétés étudiées n'est pas significative (Tableau 26).

Tableau 26. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le diamètre de capitule de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	129.067	38.720	0.0001
Variété	4	2.267	0.680	0.609
Variété*Régime hydrique	4	9.733	2.920	0.030

Les résultats issus de l'expérimentation de la première année montrent que le déficit hydrique provoque une diminution de diamètre de capitule de l'ensemble des variétés de tournesol où le plus grand diamètre (23) cm est enregistré chez la variété 5 sous le régime hydrique 2 cependant le plus petit (17.7) cm est enregistré chez la même variété sous le régime hydrique 1 (Figure 24).

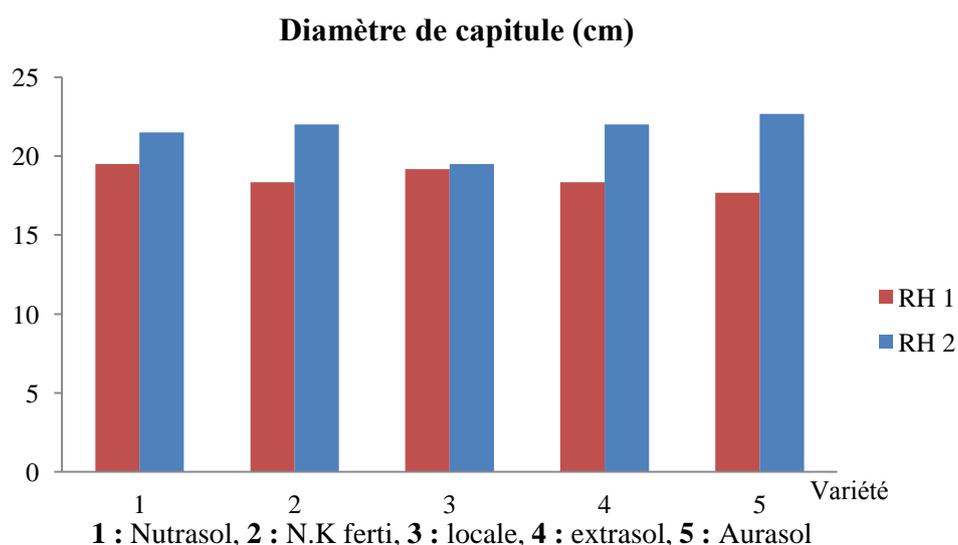


Figure 24. Effet de régime hydrique et de la variété sur le diamètre de capitule de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Les résultats de la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel ont indiqué que l'effet de régime hydrique sur le diamètre de capitule est très hautement significatif cependant l'effet de la variété ainsi que l'interaction variété* régime hydrique sur ce paramètre n'est pas significatif (Tableau 27).

Tableau 27. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le diamètre de capitule de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	96.333	16.190	0.000
Variété	3	3.694	0.621	0.606
Variété * régime hydrique	3	1.944	0.327	0.806

Les résultats issus de l'expérimentation de la deuxième année indiquent que le déficit hydrique induit une réduction considérable du diamètre de capitule de l'ensemble des variétés de tournesol où il a varié entre une valeur maximale de (23.17) cm chez la variété 4 sous le régime hydrique 2 et une valeur minimale de (19.00) cm chez la variété 3 sous le régime hydrique 1 (Figure 25).

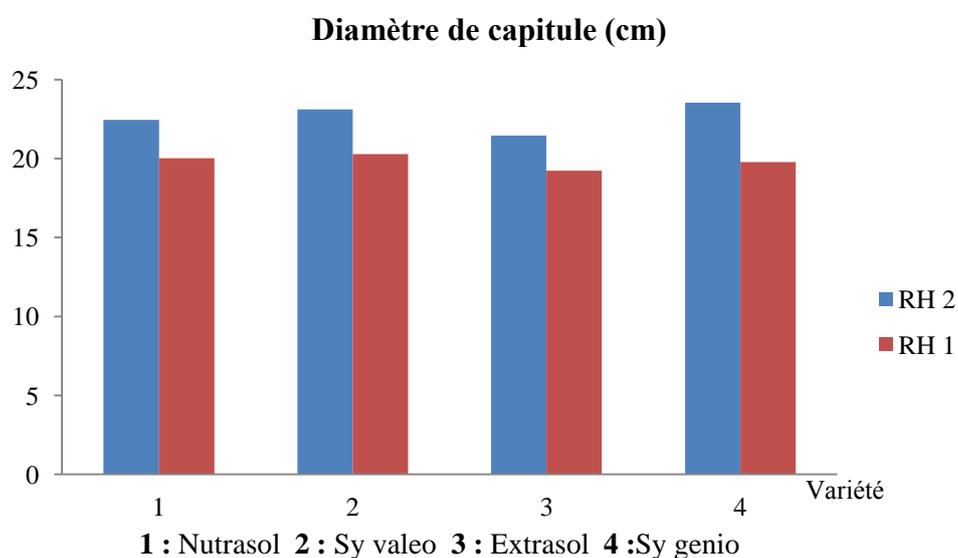


Figure 25. Effet de régime hydrique et de la variété sur le diamètre de capitule de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

Kaya et Kolsarici (2011) et Go ksoy et al. (2004) ont indiqué que le diamètre de capitule des cultivars de tournesol cultivés en milieu naturel a été influencé considérablement par le traitement hydrique et l'interaction génotype*régime hydrique.

Elsheikh et al. (2015) ont mentionné que le diamètre de capitule est significativement affecté par le stress hydrique durant la floraison et le remplissage de graines. Le même résultat est évoqué par Hussain et al. (2012) qui ont signalé que le stress hydrique réduit le diamètre de capitule.

Sinha et al. (2017) ont mentionné que le traitement hydrique affecte le diamètre de capitule où il est élevé avec un régime hydrique de 100% de l'évapotranspiration qu'avec 60%.

Alahdadi et al. (2014), Shafi et al. (2013), Nadeem Tahir et Mehdi (2001) ont indiqué que le diamètre de capitule est significativement affecté par le génotype.

2.4.5. Poids de capitule

Les résultats d'analyse de la variance de la première année d'expérimentation ont indiqué que la différence entre les deux régimes hydriques est très hautement significative pour le poids de capitule comme ils indiquent que la différence entre les variétés et les interactions variété *régime hydrique est hautement significative pour ce paramètre (Tableau 28).

Tableau 28. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le poids de capitule de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	58032.600	66.982	0.0001
Variété	4	3147.267	3.633	0.011
Variété*Régime hydrique	4	4224.933	4.876	0.002

Les résultats obtenus de la première année d'expérimentation nous renseignent que le poids de capitule varie autour d'une valeur moyenne de (148.48) g. Cette variation est comprise entre une valeur maximale de (214) g sous le régime hydrique 2 enregistrée chez la variété 5 et une valeur minimale de (97) g enregistrée chez la même variété sous le régime hydrique 1. D'autre part, sous le régime hydrique 1; la variété 1 présente le poids le plus élevé (142.3) g par rapport aux autres variétés (Figure 26).

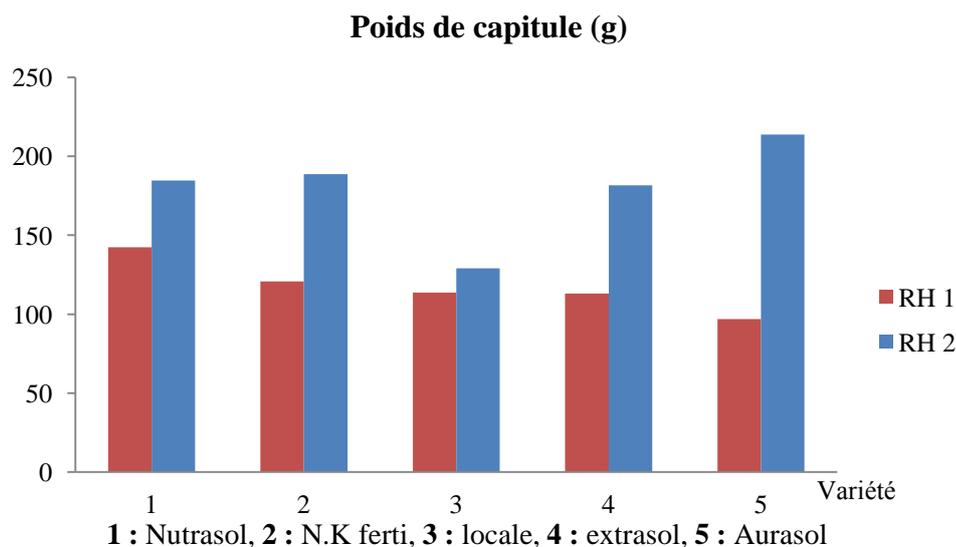


Figure 26. Effet de régime hydrique et de la variété sur le poids de capitule de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Les résultats d'analyse de la variance de la deuxième année d'expérimentation ont indiqué que la différence entre les deux régimes hydriques est très hautement significative pour le poids de capitule comme ils indiquent que la différence entre les variétés et les interactions variété *régime hydrique n'est pas significative pour ce paramètre (Tableau 29).

Tableau 29. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le poids de capitule de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	62424.188	20.499	0.000
Variété	3	5069.799	1.665	0.190
Variété *Régime hydrique	3	3752.743	1.232	0.311

Les résultats de la deuxième année d'expérimentation indiquent que le déficit hydrique entraîne une réduction remarquable de poids de capitule de l'ensemble des variétés de tournesol où la valeur la plus grande (223.33) g est observée chez la variété 2 sous le régime hydrique 2 toutefois celle la plus petite (106.00) g est observée chez la variété 4 sous le régime hydrique 1 (Figure 27).

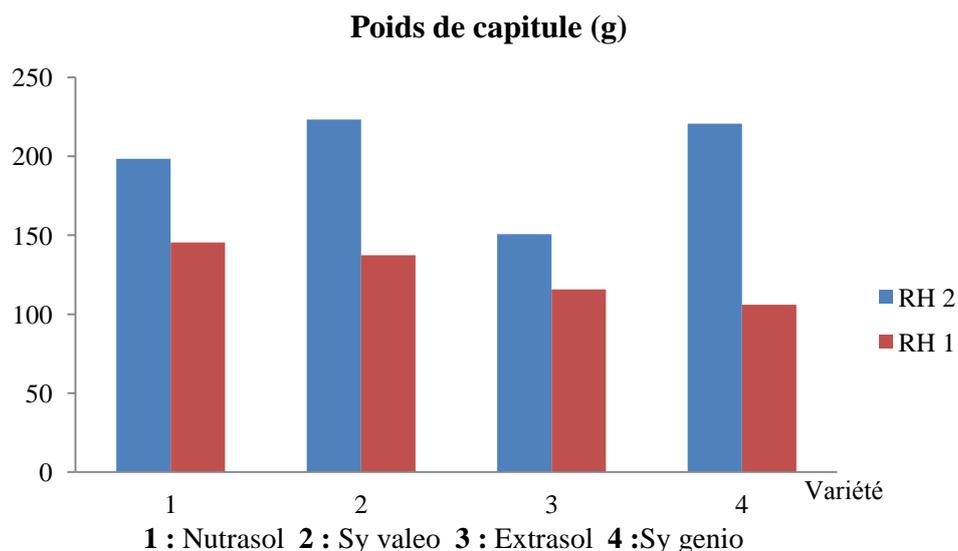


Figure 27. Effet de régime hydrique et de la variété sur le poids de capitule de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

Le poids de capitule des plantes irriguées de la deuxième année d'expérimentation est supérieure que ce de la première année. Tandis que les plantes stressées de la première année d'expérimentation présentent des poids de capitule plus élevés que ceux de la deuxième année (Figures 26,27).

Ebrahimi et al. (2014) et Kiani (2007) ont noté que le stress hydrique réduit le poids de capitule chez le tournesol cultivé en plein champ.

Kiani (2007) a signalé que l'effet de génotype est significatif pour le poids de capitule de tournesol cultivé en plein champ.

2.5. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en graines et ses deux composantes

2.5.1. Rendement en graines par plante

Les résultats figurés dans le tableau 30 montrent que le régime hydrique a un effet très hautement significatif sur le rendement en graine de tournesol cultivé en milieu naturel durant la première année d'expérimentation. La différence entre les variétés n'est pas significatif cependant la différence entre les interactions est hautement significatif pour ce paramètre (Tableau 30).

Tableau 30. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le rendement en graines par plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	14653.489	35.302	0.0001
Variété	4	740.244	1.783	0.147
Variété * Régime hydrique	4	1419.213	3.419	0.015

Selon la figure 28, le déficit hydrique a entraîné une diminution de rendement en graines par plante. Les valeurs de rendement oscillent entre (63.2) g/ plante chez la variété 5 sous le régime hydrique 1 et (133.5) g/plante chez la même variété sous le régime hydrique 2.

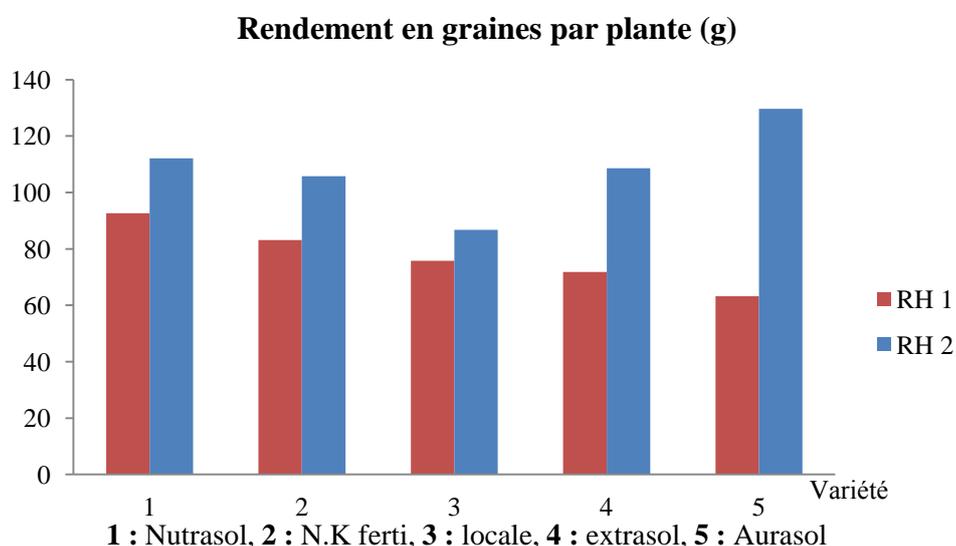


Figure 28. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en graines par plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Les résultats représentés dans le tableau 31 montrent que le régime hydrique a un effet très hautement significatif sur le rendement en graine de tournesol cultivé en milieu naturel durant la deuxième année d'expérimentation cependant l'effet de la variété ainsi l'effet de l'interaction variété* régime hydrique n'est pas significatif (Tableau 31).

Tableau 31. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le rendement en graines par plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	26273.521	44.897	0.000
Variété	3	373.410	0.638	0.595
Variété * régime hydrique	3	563.299	0.963	0.420

Durant la deuxième année d'expérimentation, le déficit hydrique a provoqué une diminution de rendement en graines par plante qui varie entre (135.83) g/plante chez la variété 4 sous le régime hydrique 2 et (67.50) g/plante chez la variété 4 sous le régime hydrique 1 (Figure 29).

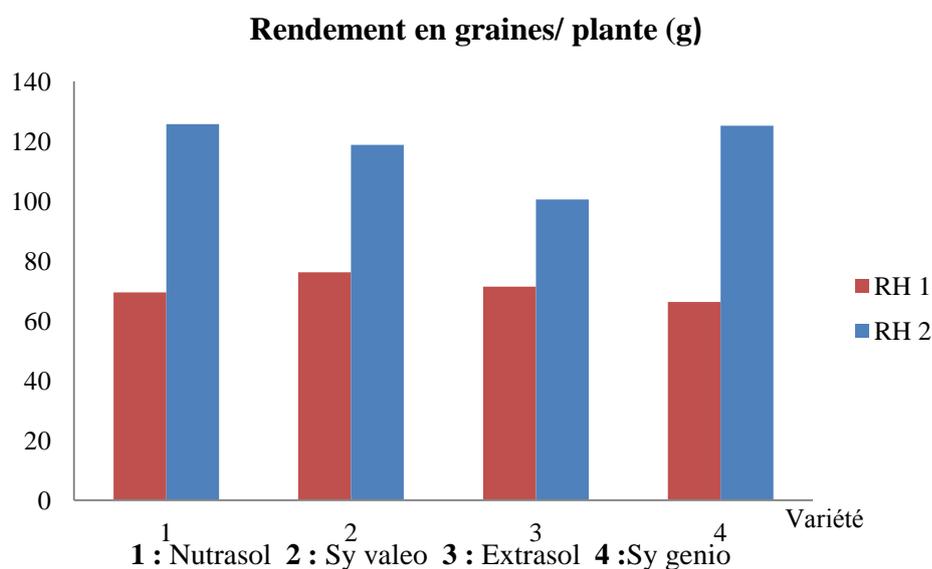


Figure 29. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en graines par plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

Sous les conditions de déficit hydrique le rendement de la première année d'expérimentation est élevé que ce de la deuxième année en revanche sous les conditions d'irrigation le rendement de la deuxième année est important que ce de la première année (Figures 28, 29).

La réduction du rendement est le résultat d'attributs physiologiques et morphologiques perturbés (Hussain et al. 2018). D'autre part la réduction des deux composantes de rendement

notamment le nombre de graines par plante et le poids de 1000 graines provoque la réduction de rendement

Selon Roche et al. (2009), le tournesol est généralement cultivé dans les conditions arides en raison de sa grande capacité à tolérer le stress hydrique cependant un fort stress hydrique réduit également le rendement et la qualité des semences.

Kiani et al. (2016) ont mentionné que le déficit hydrique a un effet significatif sur le rendement en graines. Le même résultat est trouvé par Hussain et al. (2012), Go ksoy et al. (2004), Jalilian et al. (2012), Heidari et Karami (2014) et Nadeem Tahir et al. (2002).

Anastasi et al. (2010) ont indiqué que le régime hydrique affecte les traits productifs de tournesol où leur rendement en graines augmente progressivement avec l'apport d'eau. En outre Gomes et al. (2008) ont trouvé que le rendement sous stress hydrique sévère réduit avec un taux de 30%.

Flagella et al. (2002) ont signalé que le rendement et ses deux composantes montrent une différence significative en fonction de régime hydrique et de génotype.

Kaya et Kolsarici (2011) ont noté que le rendement en graines est influencé par le régime hydrique et l'interaction régime hydrique* variété. Le même résultat est noté par El Midaoui et al. (2003).

En revanche, Shafi et al. (2013) ont trouvé que le rendement en graines n'été pas influencé par le régime hydrique.

Alahdadi et al. (2014) et El Midaoui et al. (2003) ont trouvé que l'effet de génotype sur le rendement en graines est hautement significatif. Le même résultat est trouvé par Kiani (2007).

2.5.2. Nombre de graines par plante

Les résultats de l'analyse de la variance de la première année d'expérimentation ont montré que l'effet de régime hydrique sur le nombre de graines par plante est significatif. En revanche l'effet de la variété et de l'interaction variété* régime hydrique n'est pas significatif (Tableau 32).

Tableau 32. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le nombre de graines par plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	462354.817	4.724	0.035
Variété	4	128995.475	1.318	0.276
Variété *Régime hydrique	4	93968.775	0.960	0.438

D'après nos résultats, durant la première année d'expérimentation le déficit hydrique au cours de la phase reproductrice de la plante implique une réduction remarquable de nombre de graines par capitule qui varié de (1579.8) graines chez la variété 5 sous le régime hydrique 2 à (1096) graines chez la variété 3 sous le régime hydrique 1 (Figure 30).

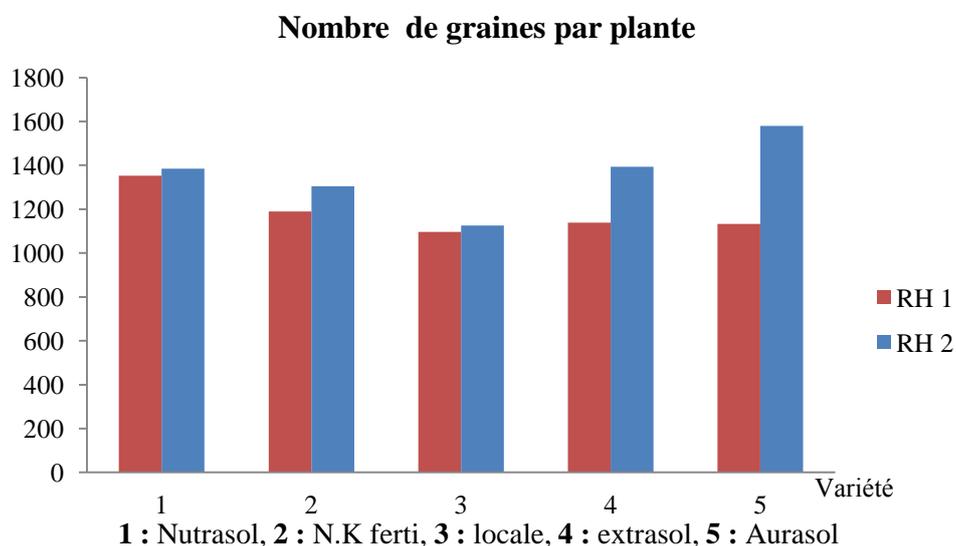


Figure 30. Effet de régime hydrique et de la variété sur le nombre de graines par plante de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Les résultats d'analyse de la variance de la deuxième année d'expérimentation ont montré que l'effet de régime hydrique sur le nombre de graines par plante est très hautement significatif. Egalement, la variété influe significativement sur ce paramètre alors qu'on ne note aucun effet significatif de l'interaction variété* régime hydrique (Tableau 33).

Tableau 33. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le nombre de graines par plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	2483845.021	45.388	0.000
Variété	3	175072.354	3.199	0.033
Variété * Régime hydrique	3	65205.187	1.192	0.325

Les résultats obtenus révèlent que le nombre de graines par plante a diminué de (1484.0) graines chez la variété 4 sous le régime hydrique 2 à (792.00) graines chez la variété 3 sous le régime hydrique 1 durant la deuxième année de l'expérimentation (Figure 31). D'autre part,

parmi les variétés étudiées sous les conditions de déficit hydrique, la variété 4 enregistre un nombre de graines par capitule le plus élevé (973) (Figure 31).

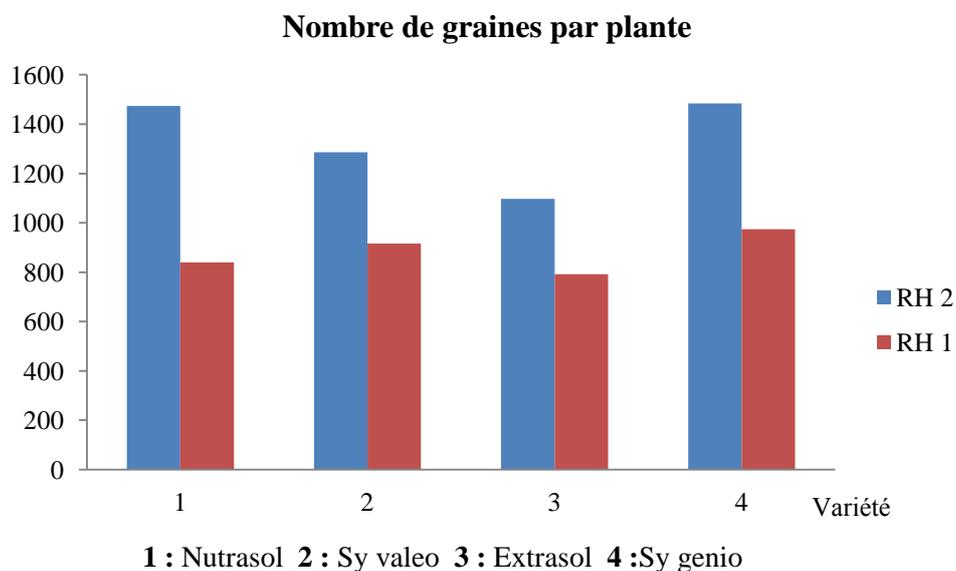


Figure 31. Effet de régime hydrique et de la variété sur le nombre de graines par plante de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

Les plantes irriguées et stressées de la première année de l'expérimentation présentent un nombre de graines par capitule plus important que celles de la deuxième année (Figures 30,31).

La réduction de nombre de graines par capitule peut être expliquée selon Elsheikh et al. (2015) que dans les conditions de déficit hydrique, les graines sont plus ou moins remplies et le diamètre de capitule est réduit entraînant une diminution du nombre de graines.

D'autre part la répartition des photosynthétats vers le capitule joue un rôle important dans la détermination du nombre de graines par conséquent la réduction de la quantité de carbone réparti vers le capitule sous les conditions de stress hydrique est l'un des facteurs qui peuvent induit une réduction dans le nombre de graines par capitule (Flenet et al. 1996).

Andrei (2004) a évoqué que le stress hydrique associé au stress thermique affecte la pollinisation et la fécondation ce qui provoque l'avortement des fleurs tubulaires et par conséquent l'obtention des graines vides ce qui influe sur le nombre de graines par capitule.

Hussain et al. (2012) ont indiqué que le déficit hydrique réduit considérablement le nombre de graines par capitule. Cette réduction été plus sévère lorsque la culture face le déficit hydrique au stade précoce de la floraison qu'au stade bouton floral.

Go Ksoy et al. (2004), Elsheikh et al. (2015), Flenet et al. (1996) et Sinha et al. (2017) ont constaté que le nombre de graines par plante est significativement affecté par le régime hydrique.

2.5.3. Poids de 1000 graines

Les résultats d'analyse de la variance de la première année d'expérimentation ont montré que le régime hydrique influe d'une manière très hautement significative sur le poids de 1000 graines cependant la variété et l'interaction variété *régime hydrique n'ont présenté aucun effet sur ce paramètre (Tableau 34).

Tableau 34. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le poids de 1000 graines de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	33.013	12.863	0.001
Variété	4	1.556	0.606	0.660
Variété * Régime hydrique	4	0.689	0.269	0.897

Les résultats acquis de la première année d'expérimentation en milieu naturel montrent que le poids de 1000 graines est réduit sous l'action de déficit hydrique de (86.0) g chez la variété 3 sous le régime hydrique 2 à (59) g chez la variété 5 sous le régime hydrique 1 (Figure 32).

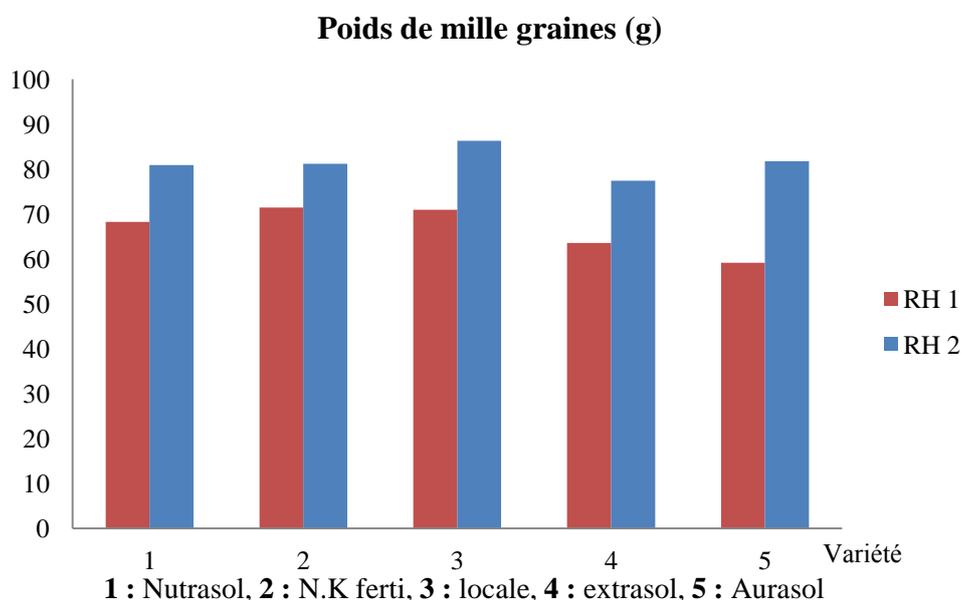


Figure 32. Effet de régime hydrique et de la variété sur le poids de 1000 graine de tournesol cultivé durant la première année d'expérimentation en milieu naturel.

Les résultats d'analyse de la variance de la deuxième année d'expérimentation ont montré que l'effet de régime hydrique ainsi que l'effet de la variété sur le poids de 1000 graines est significatif. Tout de même l'effet de l'interaction variété*régime hydrique n'est pas significatif (Tableau 35).

Tableau 35. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le poids de 1000 graines de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	6.750	3.821	0.058
Variété	3	5.583	3.160	0.035
Variété *Régime hydrique	3	1.250	0.708	0.553

Les résultats de la deuxième année d'expérimentation nous renseignent que le poids de 1000 graines réduit de (90.0) g chez la variété 2 sous le régime hydrique 2 à (63.3) g chez la variété 4 sous le régime hydrique 1 (Figure 33). En outre, Parmi les variétés cultivées sous les conditions de régime hydrique 1; la variété 3 présente le poids de 1000 graines le plus élevé (85,0) g (Figure 33).

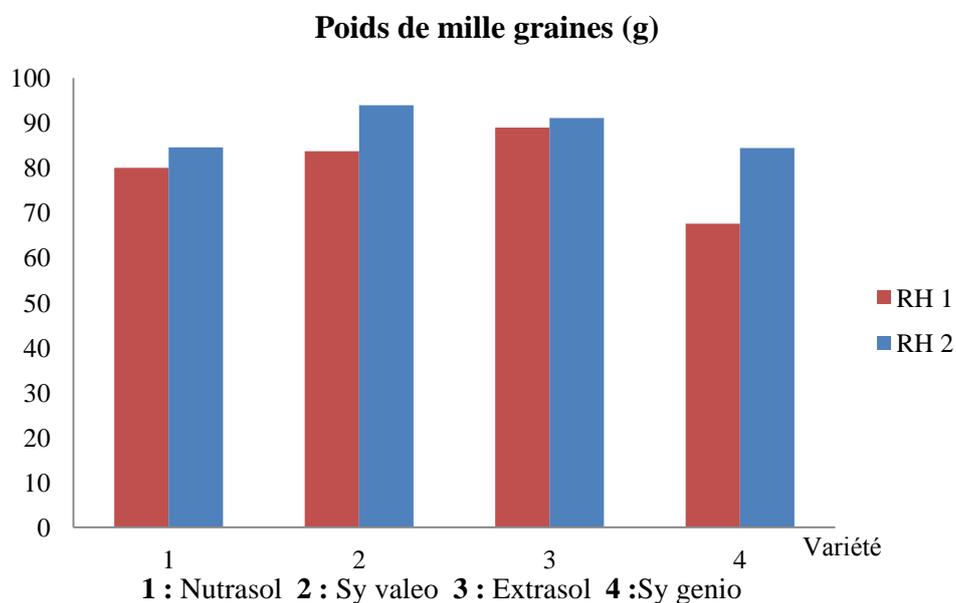


Figure 33. Effet de régime hydrique et de la variété sur le poids de 1000 graines de tournesol cultivé durant la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel.

La comparaison des résultats des deux années d'expérimentation montre que le poids de 1000 graines le plus élevé est marqué chez les plantes de la deuxième année d'expérimentation (Figures 32, 33).

La réduction de poids de 1000 graines sous l'effet de déficit hydrique peut être expliquée selon Asch et al. (2005) et Khan et al. (2000) que la translocation des photosynthétats vers les organes reproductive a été entravée par le stress hydrique entraînant une réduction dans le poids de 1000 graines de tournesol.

Hussain et al. (2012) ont observé une réduction importante de poids de 1000 graines sous les conditions de stress hydrique.

Go ksoy et al. (2004) ont indiqué que le poids de 1000 graines est influencé par le régime hydrique. Le même résultat est mentionné par Sinha et al. (2017), Nadeem Tahir et al. (2002).

Kaya et Kolsarici (2011) ont signalé que l'irrigation augmente le poids de 1000 graines, ainsi ils ont signalé que l'effet de l'interaction génotype*régime hydrique sur le poids de 1000 graines est significatif.

Mrdja et al. (2012) ont indiqué que le génotype influe sur le poids de 1000 graines et le rendement.

Cependant Shafi et al. (2013) ont mentionné que l'effet de régime hydrique sur le poids de 1000 graines n'a été pas significatif.

2.6. Corrélations binaires entre le rendement en graines et les différents paramètres étudiés

2.6.1. Première année d'expérimentation

Les résultats figurés dans le tableau 36 indiquent que le rendement en graines par plante présente une corrélation positive hautement significative avec la hauteur de la plante ($r=0.405^{**}$), le diamètre de capitule ($r=0.809^{**}$), le poids de capitule ($r=0.928^{**}$), le nombre de graines par plante ($r=0.787^{**}$) et le poids de 1000 graines ($r=0.401^{**}$) cependant il n'existe aucune corrélation entre le rendement et le reste des traits (Tableau 36).

Tableau 36. Coefficients de corrélation de rendement en graines avec les différents paramètres de la première année d'expérimentation en milieu naturel (Coefficients de Pearson).

	NFP	HP	DT	TRE	chlT	DC	PC	NGP	PMG	Rendement
rendement	-0.111	0.405**	0.172	-0.209	0.052	0.809**	0.928**	0.787**	0.401**	1

NFP : nombre de feuilles par plante, **HP** : hauteur de la plante, **DT** : diamètre de la tige, **TRE** : teneur relative en eau, **chlT** : chlorophylle totale, **DC** : diamètre de capitule, **PC** : poids de capitule, **NGP** : nombre de graines par plante, **PMG** : poids de 1000 graines, **RDM** : rendement en graine par plante, ****** : hautement significative.

2.6.2. Deuxième année d'expérimentation

A l'exception de diamètre de la tige, le rendement en graines par plante présente une corrélation positive hautement significative avec les différents traits notamment le nombre de feuilles par plante ($r=0.490^{**}$), la hauteur de la plante ($r=0.445^{**}$), le diamètre de capitule ($r=0.759^{**}$), le poids de capitule ($r=0.754^{**}$), le nombre de graines par plante ($r=0.861^{**}$) et le poids de 1000 graines ($r=0.458^{**}$) (Tableau 37).

Tableau 37. Coefficients de corrélation de rendement en graines avec les différents paramètres de la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel (Coefficients de Pearson).

	NFP	HP	DT	DC	PC	NGP	PMG	RDM
RDM	0.490**	0.445**	0.392	0.759**	0.754**	0.861**	0.458**	1

NFP : nombre de feuilles par plante, **HP** : hauteur de la plante, **DT** : diamètre de la tige, **DC** : diamètre de capitule, **PC** : poids de capitule, **NGP** : nombre de graines par plante, **PMG** : poids de 1000 graines, **RDM** : rendement en graine par plante. * : significatif, ** : hautement significatif.

Dans la sélection des variétés de tournesol à haut rendement il est nécessaire de cibler des traits morphologiques et physiologiques qui sont facilement mesurés et améliorés et qui montrent une corrélation avec le rendement en graines afin qu'ils puissent être utilisés comme critères de sélection (Hladni et al. 2008).

Hladni et al. (2006, 2010), Gö ksoy et Turan (2007), Nadeem Tahir (2002), Behradfar et al. (2009) ont trouvé une corrélation positive entre le rendement en graines et le diamètre de capitule, la hauteur de la plante, le nombre de graines par capitule et le poids de 1000 graines.

Selon Flagella et al. (2002), l'augmentation de rendement est due à l'augmentation de poids de 1000 graines et de nombre de graines par capitule.

Kiani (2007) a signalé que le rendement présente une corrélation positive significative avec la hauteur de la plante et le poids de capitule cependant il ne présente aucune corrélation avec le nombre de feuilles par plante.

Pourmohammad et al. (2016) ont indiqué que le rendement est positivement corrélé avec le diamètre de capitule, la hauteur de la plante, le poids de 1000 graines et le nombre en graines. Ainsi ils ont indiqué que selon l'héritabilité et les corrélations entre les traits sous les conditions de stress hydrique et dans les programmes d'amélioration, le nombre de graines par plante, le diamètre de capitule et la hauteur de la plante peuvent être considérer comme des critères de sélection pour les génotypes tolérants avec haut rendement.

D'après Hladni et al. (2004), les coefficients de corrélation indiquent une corrélation significative élevée entre le rendement en graines et la hauteur de la plante, le diamètre de

capitule cependant il n'indique aucune corrélation entre le rendement en graines et le nombre de feuilles par plante.

Hladni et al. (2008) ont signalé l'existence d'une forte corrélation significative positive entre le rendement en graines, le poids de 1000 graines, le diamètre de capitule et le nombre de graines par plante cependant il n'existe aucune corrélation entre le rendement, le nombre de feuilles par plante et la hauteur de la plante.

Marinkovic (1992) a noté une forte corrélation significative positive entre le rendement en graines et les caractères suivants : le diamètre de capitule, le nombre de graines par capitule, le poids de 1000 graines et la teneur en huile.

D'après Anandhan et al. (2010), la corrélation entre le poids de 1000 graines et le rendement en graines par plante est significative positive.

Cependant Andrei (2004) a mentionné que le rendement n'est pas corrélé avec le poids de 1000 graines, la hauteur de la plante et le diamètre de la tige.

3. Expérimentation en milieu naturel (Essai variétale)

3.1. Analyse de sol

Les résultats obtenus montrent que le sol de site de l'expérimentation est moyennement basique, non salé, modérément calcaire, moyennement riche en matière organique avec une texture Argilo- limoneuse (Tableau 38).

Tableau 38. Caractéristiques physico-chimiques du sol de l'essai variétal.

pH	C.E (µs)	MO%	Calcaire total %	Granulométrie
8.46	180	3.32	12.08	Argilo-limoneuse

3.2. Données climatiques de Tiaret

Durant l'année 2016, les températures minimales et maximales ont les valeurs moyennes respectives de 8.61°C et 23.06°C. L'humidité relative et les précipitations sont respectivement de 62.23% et 27.83mm.

Au cours de l'essai, les précipitations enregistrées du mois de mai au mois de septembre étaient de 72.12 mm. Les températures moyennes maximales et minimales durant la même période étaient respectivement de 31.4 et 14.08°C (Tableau 39).

Tableau 39. Données Climatiques moyennes mensuelles de Tiaret de l'année 2016.

Mois	T _{MAX}	T _{MIN}	H	PP
Janvier	15,3	2,5	68,2	18,03
Février	14,4	3,6	75,7	49,53
Mars	14,2	2,4	75,4	94,75
Avril	20,5	5,8	69,3	31,24
Mai	25,2	9	59,6	44,97
Juin	31	13,1	47,1	18
Juillet	36,5	18	41,6	1,53
Août	35,1	16,7	44,9	0,25
Septembre	29,5	13,6	54,3	7,37
Octobre	26,7	10,9	54,1	4,32
Novembre	15,9	5,2	71,9	37,85
Décembre	12,5	2,6	84,7	26,15

Source : Tutiempo.net

3.3. Etude des paramètres morphologiques, le rendement et ses deux composantes

Les résultats d'analyse de la variance récapitulés dans le tableau 40 montrent que la différence entre les variétés est hautement significative pour la hauteur de la plante et le diamètre de capitule tandis qu'elle est très hautement significative pour le nombre de feuilles par plante, le poids de capitule, le nombre de graines par plante et le rendement en graines. Ainsi ils montrent que la différence entre les variétés est non significative pour le diamètre de la tige et le poids de 1000 graines.

En outre, selon les résultats présentés dans le tableau 40 la différence entre les deux blocs est non significative cependant la différence entre les interactions bloc*variété est significative pour le nombre de feuilles par plante et le rendement en graines.

Tableau 40. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de la variété, de bloc et de leur interaction sur les paramètres morphologiques, le rendement et ses deux composantes de tournesol.

SV	NFP	HP	DT	DC	PC	NGP	PMG	RDM
Variété	11,781***	5,011**	0,2	3,290**	7,665***	6,218***	1,655	7,223***
bloc	1,798	0,149	0,016	1,517	3,219	2,75	0,064	1,22
Bloc*variété	2,444*	1,108	1,228	1,629	1,114	1,771	1,792	3,077*

SV : source de variation, NFP : nombre de feuilles par plante, HP : hauteur de la plante, DT : diamètre de la tige, DC : diamètre de capitule, PC : poids de capitule, NGP : nombre de graines par plante, PMG : poids de 1000 graines, RDM : rendement en graines par plante, * : significatif, ** : hautement significatif, *** : très hautement significatif.

Les hybrides sont préférés par les producteurs de tournesol dans de nombreux pays du monde en raison de leurs rendements élevés, de leur uniformité et de leur qualité (Kaya et

Atakisi, 2004). La réussite de la culture de tournesol dans une région donnée est conditionnée par le bon choix d'hybride qui se fait en fonction de leur adaptabilité à diverses conditions environnementales (Crnobarac et al. 1997).

Le nombre de feuilles par plante le plus élevé est obtenu chez la variété 3 avec une valeur de (34) tandis que le moins élevé est obtenu chez la variété 2 avec une valeur de (27) (Tableau 41). Canavar et al. (2010) ont signalé que le nombre de feuilles par plante chez le tournesol varie en fonction des variétés entre 18 et 23.

Tableau 41. Moyennes des caractères morphologiques, rendement et ses deux composantes des variétés de tournesol évaluées en milieu naturel.

bloc	Variété	NFP	HP	DT	DC	PC	NGP	PMG	RDM
	V1	32	121,83	18,02	11,67	35,83	600,83	30,4	18,25
	V2	27	135,83	17,56	13,17	50,83	770,67	42,7	29,21
	V3	32	124,50	16,50	12,17	37,00	477,67	37,5	17,98
	V4	29	117,17	16,02	12,33	61,83	1011,00	41,0	41,66
bloc1	V5	33	132,00	17,74	10,67	41,17	715,17	39,9	28,77
	V1	33	119,17	17,17	10,70	28,00	538,33	34,9	18,75
	V2	28	136,83	16,34	11,33	41,33	651,00	31,5	19,95
	V3	34	132,67	18,76	11,83	44,67	638,25	50,4	30,24
	V4	32	123,17	17,85	12,83	53,00	785,17	41,2	33,55
bloc2	V5	30	124,67	16,17	11,17	31,00	548,00	37,2	20,43

NFP : nombre de feuilles par plante, **HP** : hauteur de la plante, **DT** : diamètre de la tige, **DC** : diamètre de capitule, **PC** : poids de capitule, **NGP** : nombre de graines par plante, **PMG** : poids de 1000 graines, **RDM** : rendement en graines par plant, **V1** : Nutrasol, **V2** : N.K Ferti, **V3** : Locale, **V4** : Extrasol, **V5** : Aurasol.

La hauteur de la plante de l'ensemble des variétés évaluées en plein champ est significativement différente, elle varie autour d'une valeur moyenne de (126.78) cm. Cette variation est comprise entre une valeur minimale de (117,17) cm enregistrée chez la variété 4 et une valeur maximale de (136,83) cm enregistrée chez la variété 2 (Tableau 41). Cette différence entre les variétés peut être attribuée au potentiel génétique des hybrides.

Canavar et al. (2010) ont indiqué que la hauteur de la plante de dix hybrides de tournesol est significativement différente où elle varie entre (88.2) cm et (121.2) cm. Laureti et al. (2007) ont évoqué que la hauteur de la plante de tournesol diffère d'une variété à l'autre entre (152) et (173) cm. Kaya et Atakisi (2004) ont noté que la hauteur de la plante de tournesol varie en fonction de la variété entre (98.3) cm et (134.3) cm. Ainsi Wey et Ibrahima (2007) ont signalé que l'effet génotypique est significatif pour la hauteur de la plante de tournesol qui change entre (98) et (128) cm.

Le diamètre de capitule de l'ensemble des variétés étudiées varie considérablement autour d'une valeur moyenne de (11.78) cm. Cette variation est comprise entre une valeur minimale de (10,67) cm enregistrée chez la variété 5 et une valeur maximale de (13.17) cm enregistrée chez la variété 2 (Tableau 41). Canavar et al. (2010) ont rapporté que l'analyse de la variance a révélé une différence hautement significative entre les variétés de tournesol étudiées pour le diamètre de capitule. Le même résultat est acquis par Kaya et Atakisi (2004) où le diamètre de capitule de la plante de tournesol varie en fonction des génotypes de (12.6) cm à (14.0) cm. Selon Ahmad et al. (2017), le diamètre de capitule est significativement affecté par les différents hybrides de tournesol où il varie entre (16) et (21) cm. D'après Wey et Ibrahima (2007), le diamètre capitulaire est relativement différent selon la variété où il oscille entre (10) cm et (15) cm.

Le poids du capitule des variétés installées au milieu naturel de Tiaret fluctue largement autour d'une valeur moyenne de (42.46) g. Cette variation change entre une valeur minimale de (28.00) g enregistrée chez la variété 1 et une valeur maximale de (61.83) g enregistrée chez la variété 4 (Tableau 41).

Selon Ion et al. (2015) le rendement en graines et ses composantes sont spécifiques à chaque hybride de tournesol mais ils peuvent être influencés par les différents facteurs de croissance.

D'après Flagella et al. (2002) le rendement de tournesol dépend des conditions climatiques pendant la saison de croissance et du potentiel génétique de l'hybride cultivé.

Dans notre expérimentation, le rendement en graines par plante est significativement différent chez l'ensemble des variétés étudiées où il varie autour d'une valeur moyenne de (25.87) g/plante. Cette variation change entre une valeur moyenne minimale de (17.98) g/plante produit par la variété 3 et une valeur moyenne maximale de (41.66) g/plante produit par la variété 4 (Tableau 41). Dans le même contexte, Canavar et al. (2010) ont signalé que la différence entre les variétés de tournesol est hautement significative pour le rendement en graines qui variait de (54,67) g à (76,6) g. Le même résultat est trouvé par Ahmad et al. (2017) Zheljazkov et al. (2008) où des différences significatives ont été observées entre les hybrides pour le rendement en graines. Ainsi Botella Miralles et al. (1997) ont signalé que le rendement en graines est différent chez l'ensemble des variétés. A l'opposé, Laureti et al. (2007), Wey et Ibrahima (2007) ont signalé dans leur recherche que les différents hybrides de tournesol étudiés donnent des rendements en graines similaire.

Le nombre de graines par plante de l'ensemble des variétés de tournesol évaluées varie de (477.67 à 1011.00) chez les deux variétés 3 et 4 respectivement (Tableau 41). Selon Ahmad et al. (2017), le nombre de graines par capitule varie selon les variétés de (917 à 1054).

D'autre part, le poids de 1000 graines obtenus chez les variétés de tournesol varié entre (30,4) g chez la variété 1 et (50,4) g chez la variété 3 (Tableau 41). Laureti et al. (2007) ont indiqué dans leur recherche que le poids de 1000 graines est similaire pour l'ensemble des variétés. Cependant Canavar et al. (2010) ont mentionné que la différence entre les variétés de tournesol est hautement significative pour le poids de 1000 graines qui variait de (53,40) g à (82,88) g. Le même résultat est évoqué par kaya et Atakis (2004), Botella Miralles et al. (1997) où le poids de 1000 graines varie selon les hybrides cultivés.

4. Extraction et caractérisation de l'huile de tournesol

4.1. Effet de régime hydrique et de la variété sur la teneur en huile

4.1.1. Première année d'expérimentation

Les résultats d'analyse de la variance n'ont révélé aucune différence significative entre les deux régimes hydriques pour la teneur en huile des variétés de tournesol cultivées en milieu naturel (Tableau 42). D'autre part la variété ainsi que l'interaction variété*régime hydrique n'ont pas un effet significatif sur la teneur en huile (Tableau 42).

Tableau 42: Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la teneur en huile des graines de tournesol de la première année d'expérimentation.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	20.750	1.073	0.313
Variété	4	10.887	0.563	0.692
Variété * régime hydrique	4	57.462	2.970	0.045

Les résultats indiqués dans la figure 34 montrent que la teneur en huile de tournesol oscille entre (49.40% et 59.80%) enregistrée chez la variété 3 sous le régime hydrique 1 et la variété 5 sous le régime hydrique 1 respectivement.

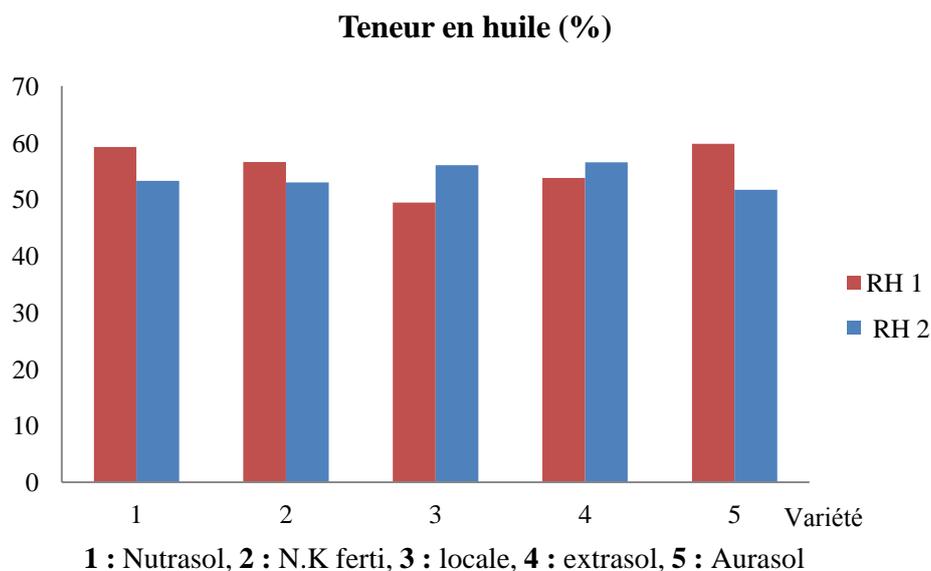


Figure 34. Effet de régime hydrique et de la variété sur la teneur en huile des graines de tournesol de la première année d'expérimentation.

4.1.2. Deuxième année d'expérimentation

Les résultats d'analyse de la variance n'ont révélé aucune différence significative entre les deux régimes hydriques pour la teneur en huile des variétés de tournesol cultivées en milieu naturel comme le montre le tableau 43. D'autre part la variété ainsi que l'interaction variété *régime hydrique n'ont pas un effet significatif sur la teneur en huile (Tableau 43).

Tableau 43. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur la teneur en huile des graines de tournesol de la deuxième année d'expérimentation.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	28.167	0.990	0.335
Variété	3	62.517	2.197	0.128
Variété * régime hydrique	3	21.270	0.747	0.540

Les résultats obtenus indiquent que la teneur en huile présente des valeurs oscillent entre (54.43% et 61.73%) enregistrées chez la variété 1 sous le régime hydrique 2 et la variété 3 sous le régime hydrique 2 respectivement (Figure 35).

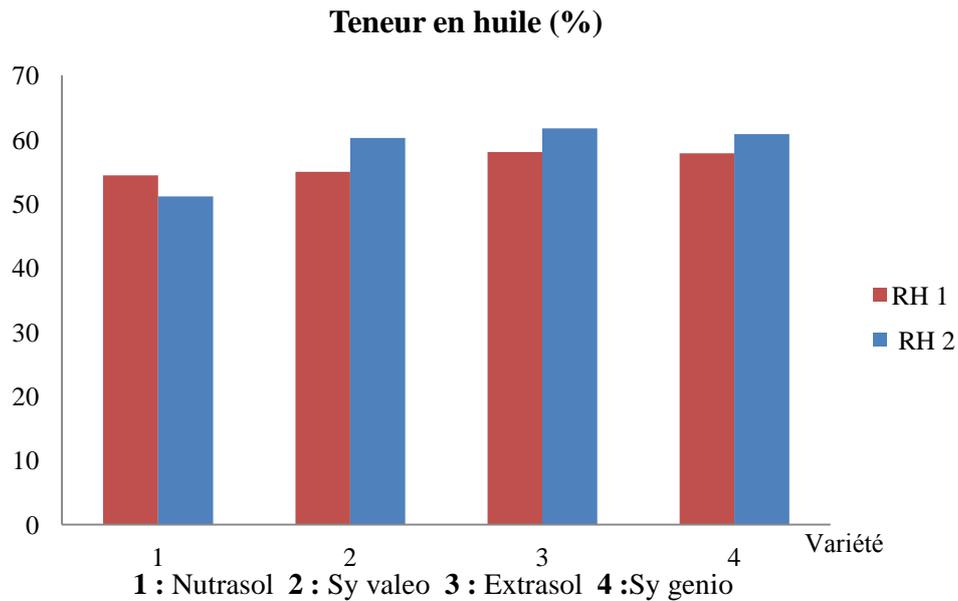


Figure 35. Effet de régime hydrique et de la variété sur la teneur en huile des graines de tournesol de la deuxième année d'expérimentation.

La teneur et le rendement en huile sont des traits quantitatifs complexes déterminés par des facteurs génétiques et environnementaux ainsi par des interactions entre eux (Leon et al. 2003). Selon Debaeke et al. (2017) le tournesol pourrait être plus vulnérable à l'effet direct du stress thermique et à la sécheresse pendant son cycle de croissance, ces deux facteurs entraînant de graves pertes de rendement, une diminution de la teneur en huile et une altération des acides gras.

Skoric (1992) indique que la teneur en huile des graines de tournesol dépend principalement de la température, de régime hydrique et de la durée de stade de remplissage de graines.

Kaya et Kolsarici (2011) ont observé que la teneur en huile n'a été pas changé significativement par l'irrigation ce qui est confirmé aussi par d'autres chercheurs tels que Razi et Assad (1999), Singh et al. (1997), Erdemoglu et al. (2003) cependant Unger (1983), Kumar et al. (1991), Kadayifci and Yildirim (2000) et Kazi et al. (2002) ont trouvé que la teneur en huile de tournesol augmente par l'irrigation.

D'autre part, Alahdadi et al. (2011) ont signalé que l'analyse de la variance montre que le déficit hydrique a un effet significatif sur la teneur en huile de l'ensemble des hybrides étudiés comme ils ont signalé que l'effet de l'interaction régime hydrique * hybride n'a été pas significatif. Toutefois Heidari et Karami (2014) ont signalé que le déficit hydrique augmente la teneur en huile.

4.2. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en huile de tournesol

4.2.1. Première année d'expérimentation

Les résultats indiqués dans le tableau 44 montrent que l'effet de régime hydrique sur le rendement en huile des différents variétés de tournesol installées en milieu naturel est très hautement significatif cependant l'effet de la variété et de l'interaction n'est pas significatif.

Tableau 44. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le rendement en huile des graines de tournesol de la première année d'expérimentation.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	6621.616	81.993	0.000
Variété	4	153.185	1.897	0.150
Variété * régime hydrique	4	188.572	2.335	0.091

Les résultats obtenus montrent que le déficit hydrique engendre une réduction de rendement en huile de tournesol qui varié entre une valeur maximal de (66.89) g observée chez la variété 5 au niveau de régime hydrique 2 et une valeur minimal de (37.24) g observée chez la variété 3 au niveau de régime hydrique 1 (Figure 36).

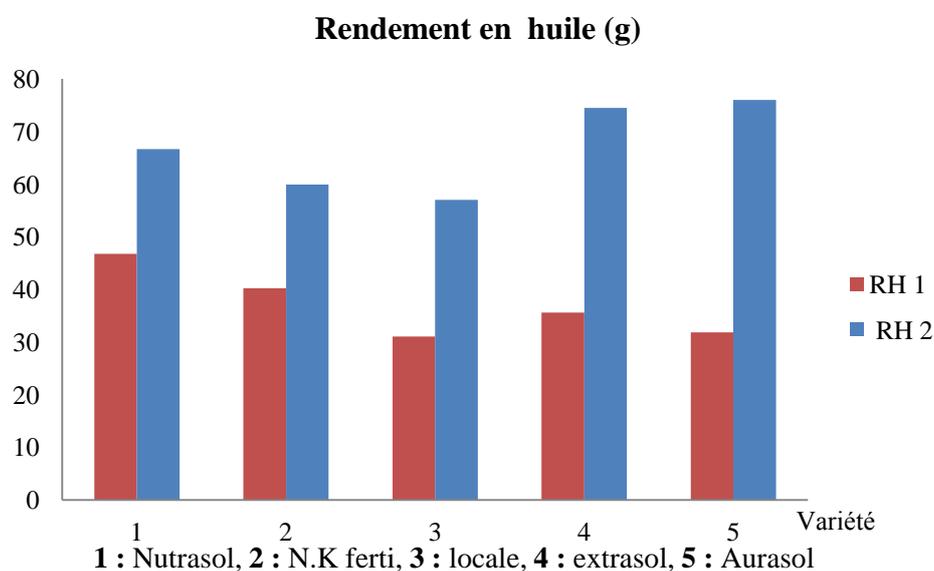


Figure 36. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en huile des graines de tournesol de la première année d'expérimentation.

4.2.2. Deuxième année d'expérimentation

Les résultats d'analyse de la variance figurés dans le tableau 45 montrent que l'effet de régime hydrique sur le rendement en huile de tournesol cultivé en milieu naturel est très

hautement significatif en revanche l'effet de la variété et de l'interaction variété *régime hydrique n'est pas significatif (Tableau 45).

Tableau 45: Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur le rendement en huile des graines de tournesol de la deuxième année d'expérimentation.

Source de variation	ddl	Carré moyen	F	P
Régime hydrique	1	3541.021	15.308	0.001
Variété	3	124.889	0.540	0.662
Variété * régime hydrique	3	216.687	0.937	0.446

Selon les résultats obtenus; le déficit hydrique engendre une diminution remarquable de rendement en huile où la valeur la plus élevée (73.95) g est enregistrée chez la variété 4 sous le régime hydrique 2 et celle la plus faible (30.61) g est enregistrée chez la variété 1 sous le régime hydrique 1 (Figure 37).

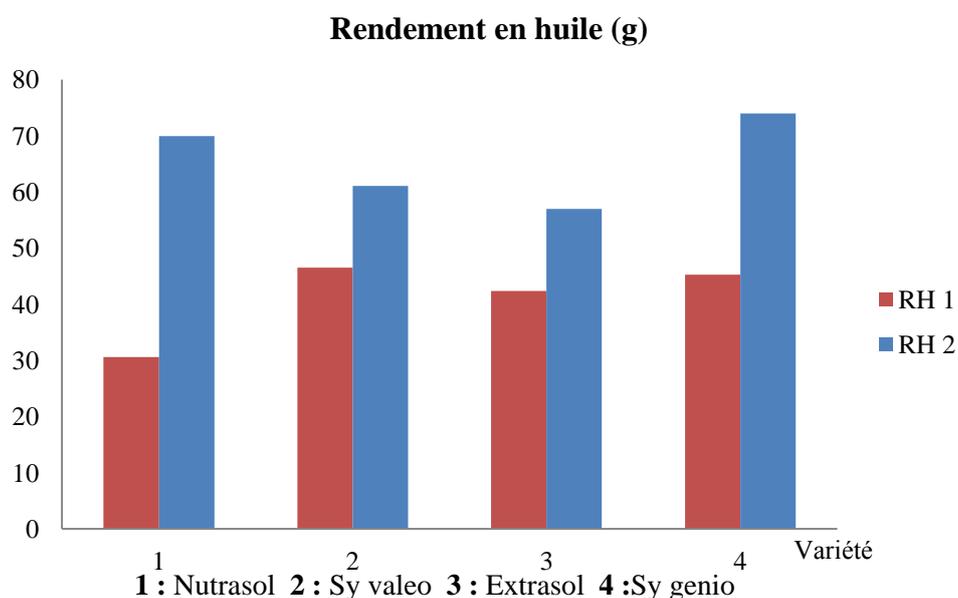


Figure 37. Effet de régime hydrique et de la variété sur le rendement en huile des graines de tournesol de la deuxième année d'expérimentation.

La comparaison des résultats des deux années d'expérimentation montre que le rendement en huile de tournesol de la deuxième année d'expérimentation est élevé par rapport à ce de la première année (Figures 36, 37).

Le rendement en huile par plante est le résultat du nombre de graines par capitule, le poids par graine et la teneur en huile. Ces composantes sont déterminées par des facteurs génétiques mais ils peuvent être modifiés par les conditions environnementales (Connor et Hall, 1997 ; Bange et al. 1997). Selon Škorić et al. (2005), le rendement en huile est une caractéristique majeure de chaque hybride de tournesol.

Selon Ghobadi et al. (2013) chaque facteur environnemental qui réduit la croissance des plantes de tournesol entraîne finalement une réduction de rendement en graines et de rendement en huile.

Selon Iqbal et al. (2005) la quantité et la distribution de l'eau ont un impact significatif sur le rendement en graines et en huile du tournesol. Le déficit en eau au moment de la formation et du remplissage des graines a eu le plus grand effet sur le rendement en graines de tournesol et sur le rendement en huile par unité de surface (Pejić et al. 2009).

La réduction de rendement en huile peut être expliquée selon Merrien (1992) que le développement des graines et l'accumulation d'huile dépendent des glucides disponibles provenant principalement de l'activité photosynthétique après la floraison, toute altération de la photosynthèse due au déficit en eau pourrait probablement réduire la production de graines et le rendement en huile

Kiani et al. (2016) et Hussain et al (2012) ont signalé que le déficit hydrique réduit significativement le rendement en huile où cette réduction est plus prononcée lorsque le déficit survient au stade floraison qu'au stade bouton floral.

García-López et al. (2016) ont constaté des différences significatives de rendement en huile entre les traitements hydriques étudiés.

Selon Kadasiddappa et al. (2017) les niveaux d'irrigation ont influencé la croissance et le rendement de tournesol où une diminution significative de rendement en graines, de nombre de graines par plante et de rendement en huile a été observée lorsqu'un déficit d'irrigation a été appliqué par rapport à l'irrigation à 100% de la capacité au champ.

Alors que Pejić et al. (2009) ont remarqué qu'il n'y a pas de différences significatives de rendement en huile entre le traitement irrigué et non irrigué.

Vega et Hall (2002) ont signalé que l'effet de génotype sur le rendement en huile est significatif, le même résultat est indiqué par Mohamed (2010) où l'analyse de la variance montre une différence hautement significative entre le rendement en huile des différents hybrides.

Jalilian et al. (2012) ont mentionné que la qualité et le rendement en huile dépendent tous les deux du génotype d'une plante et de son interaction avec l'environnement.

Go ksoy et al. (2004) ont mentionné que contrairement à la teneur en huile, le rendement en huile était affecté par les traitements hydriques à cause de différents rendements en graines. Comme Ils ont rapporté que le rendement en huile a augmenté avec l'augmentation de la quantité d'eau d'irrigation. Le même résultat est obtenu par Mehmet Oz et al. (2013) où ils ont rapporté que la teneur en huile n'été pas affecté par le traitement hydrique cependant le rendement en huile est affecté a cause de la différence dans le rendement en graines.

Pekcan et al. (2015) ont trouvé que le rendement en huile de tournesol est influencé par le stress hydrique néanmoins la teneur en huile n'été pas influencé ce qui prouve que la réduction de rendement en huile est due à la réduction de nombres en graines et n'ont pas au teneur en huile. Dans le même contexte, Anastasi et al. (2010) ont remarqué que le régime hydrique affecte le rendement en huile quoique il n'affect pas la teneur en huile.

D'autre part, Jalilian et al. (2012) ont mentionné que le rendement et la concentration en huile sont influencés par le régime hydrique. Ainsi Gholamhoseini et al. (2013) ont signalé que le stress hydrique affecte significativement la teneur en huile et le rendement en huile de tournesol.

Balalic et al. (2012) ont montré que le rendement en huile ainsi que la teneur en huile sont influencé par le génotype. Dans le même contexte, Izquierdo et al. (2008) ont trouvé que la concentration en huile et le rendement en huile était statistiquement différent ($P \leq 0,01$) entre les hybrides étudiés.

La différence remarquée entre les résultats des deux années d'expérimentation en milieu naturel pour l'ensemble des paramètres étudiés peut être due aux différentes variétés de tournesol utilisées et aux conditions climatiques différentes des deux années.

Ainsi l'effet significatif de l'interaction variété*régime hydrique observée pour certain paramètres durant l'expérimentation en milieu contrôlé et en milieu naturel peut indiquer une réponse différente des variétés au déficit hydrique.

4.3. Corrélations binaires entre le rendement en huile et les différents paramètres étudiés

4.3.1. Première année d'expérimentation

Selon les résultats illustrés dans le tableau ci-dessous, le rendement en huile présente une corrélation significative positive avec le poids de 1000 graines ($r=0.395^*$) comme il présente une corrélation positive hautement significative avec le diamètre de capitule ($r=0.762^{**}$), le poids de capitule ($r=0.843^{**}$), le nombre de graines par plante ($r=0.557^{**}$) et le rendement en graines (0.844^{**}). En revanche il ne présente aucune corrélation avec le reste des paramètres.

Tableau 46. Coefficients de corrélation de rendement en huile avec les différents paramètres de la première année d'expérimentation en milieu naturel (Coefficients de Pearson).

	%huile	NTF	HP	DT	TRE	CHLT	DC	PC	NGP	PMG	RDM	RH
RH	0.135	-0.064	0.227	0.038	-0.051	-0.158	0.762**	0.843**	0.557**	0.395*	0.844**	1

RH : rendement en huile, **NTF** : nombre total des feuilles, **HP** : hauteur de la plante, **DT** : diamètre de la tige, **TRE** : teneur relative en eau, **CHLT** : chlorophylle total, **DC** : diamètre de capitule, **PC** : poids de capitule, **NGP** : nombre de graines par plante, **PMG** : poids de 1000 graines, **RDM** : rendement en graines, * : significatif, ** : hautement significatif.

4.3.2. Deuxième année d'expérimentation

Selon les résultats récapitulés dans le tableau 47 le rendement en huile présente une corrélation significative positive avec le nombre de feuilles par plante ($r=0.408^*$) et la hauteur de la plante ($r=0.417^*$) comme il présente une corrélation positive hautement significative avec le reste des traits.

Tableau 47. Coefficients de corrélation de rendement en huile avec les différents paramètres de la deuxième année d'expérimentation en milieu naturel (Coefficients de Pearson).

	NTF	HP	DT	DC	PC	NGP	PMG	RDM	% huile	RH
RH	0.408*	0.417*	0.642**	0.814**	0.812**	0.883**	0.539**	0.898**	0,119	1

RH : rendement en huile, **NTF** : nombre total des feuilles, **HP** : hauteur de la plante, **DT** : diamètre de la tige, **DC** : diamètre de capitule, **PC** : poids de capitule, **NGP** : nombre de graines par plante, **PMG** : poids de 1000 graines, **RDM** : rendement en graines, * : significatif, ** : hautement significatif.

Le rendement en graines et la teneur en huile sont les deux caractéristiques économiques les plus importantes du tournesol. Cependant ils sont influencés par les facteurs environnementaux, ils ont un héritage complexe et une faible héritabilité. C'est pourquoi l'hybridation pour ces traits complexes exige la connaissance des relations entre les traits de la plante (Hladni et al. 2010)

D'après Maksimović (2005), le rendement en huile est le principal indicateur de la productivité des hybrides de tournesol. Il est positivement corrélé avec le rendement en graines et la teneur en huile des graines.

D'autres chercheurs notamment Krizmanic et al. (2004) ont observé que le rendement en huile est fortement corrélé avec le rendement en graines, Razi et Asad (1999) ont montré que le rendement en huile sous les conditions limitante en eau présente une corrélation positive avec le rendement en graines, Laureti et al. (2007) ont signalé que le rendement en huile est principalement influencé par le rendement en graines. Dans le même contexte Sadras et al. (2009) ont conclu que la plasticité du rendement en huile était fortement corrélée avec la plasticité du rendement en graines.

Ainsi, Ruiz et Maddonni (2006) ont remarqué que le rendement en huile est principalement lié au poids des graines comme ils ont remarqué que le rendement en huile est positivement corrélé avec le nombre de graines. De sa part, Elsheikh et al. (2015) ont remarqué que la réduction de rendement en huile est associée à la réduction significative de composantes de rendement.

Selon Miralles et al. (1997), le rendement en huile présente une corrélation positive hautement significative avec le diamètre de capitule et le nombre de graines per capitule.

Krizmanic et al. (2004) ont constaté que le rendement en huile est fortement corrélé avec la teneur en huile.

4.4. Effet de régime hydrique et de la variété sur les caractéristiques physico-chimiques de l'huile de tournesol

4.4.1. Première année d'expérimentation

Les résultats de l'analyse de la variance récapitulés dans le tableau 48 montrent que le régime hydrique affecte d'une manière significative l'indice d'acide et l'acidité comme il affecte d'une manière très hautement significative l'indice de peroxyde. Ils montrent aussi que l'effet de la variété sur l'indice de peroxyde est hautement significatif et l'effet de l'interaction sur le même indice est significatif.

Tableau 48. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur les caractéristiques physico-chimiques de l'huile des graines de tournesol de la première année d'expérimentation.

SV	IA	Acidité	IS	IE	Altération (%)	IP	IR
Var	1.999	1.999	0.882	0.776	0.706	4.941**	1.069
RH	4.483 *	4.477 *	2.176	2.116	0	25.092***	0.951
interaction	1.928	1.928	0.748	0.891	1.202	3.149*	1.016

SV : source de variation, Var : variété, RH : régime hydrique, IA : indice d'acide, IS : indice de saponification, IE : indice d'ester, IP : indice de peroxyde, IR : indice de réfraction, * significatif, ** hautement significatif, *** très hautement significatif.

Tableau 49. Moyennes des caractères physico-chimiques de l'huile des graines de tournesol de la première année d'expérimentation.

	Var	IA	A	IS	IE	Altération (%)	IP	IR
RH1	V1	2.31	1.15	158	155.6	0.014	2.61	1.466
	V2	2.05	1.02	179.2	177.1	0.011	2.05	1.468
	V3	1.12	0.56	162.4	161.2	0.006	1.12	1.473
	V4	2.43	1.21	156.8	154.3	0.015	2.24	1.469
	V5	2.80	1.40	162	159.1	0.017	2.80	1.467
RH2	V1	1.30	0.65	192.2	190.9	0.006	1.49	1.466
	V2	1.12	0.65	162.4	161.2	0.006	1.30	1.468
	V3	1.87	0.93	168	166.1	0.011	1.40	1.470
	V4	1.12	0.93	173.6	172.4	0.006	1.12	1.467
	V5	1.96	0.98	179.2	177.2	0.01	1.68	1.468

Var : variété, **RH** : régime hydrique, **IA** : indice d'acide, **IS** : indice de saponification, **IE** : indice d'ester, **IP** : indice de peroxyde, **IR** : indice de réfraction, **V1** : Nutrasol, **V2** : N.K Ferti, **V3** : Locale, **V4** : Extrasol, **V5** : Aurasol.

4.4.2. Deuxième année d'expérimentation

Selon les résultats d'analyse de la variance présentés dans le tableau 50, le régime hydrique affecte l'indice de saponification et l'indice d'ester cependant il n'affecte pas les autres caractères. D'autre part la différence entre les variétés est significative pour le pourcentage d'altération.

Tableau 50. Analyse de la variance à deux facteurs de l'effet de régime hydrique, de la variété et de leur interaction sur les caractéristiques physico-chimiques de l'huile des graines de tournesol de la deuxième année d'expérimentation.

SV	IA	acidité	IS	IE	Altération (%)	IR	IP
Var	0.991	0.991	0.892	1.834	3.567 *	0.951	1.971
RH	1.846	1.843	6.596 *	8.106 **	0.207	1.815	0.48
interaction	0.376	0.376	0.423	0.792	0.208	0.506	0.505

SV : source de variation, **RH** : régime hydrique, **IA** : indice d'acide, **IS** : indice de saponification, **IE** : indice d'ester, **IP** : indice de peroxyde, **IR** : indice de réfraction.

Tableau 51. Moyennes des caractères physico-chimiques de l'huile des graines de tournesol de la deuxième année d'expérimentation.

RH	Var	IA	A	IS	IE	Altération (%)	IR	IP
RH2	V1	1.30	0.65	151.2	149.8	0.008	1.470	2.8
	V2	0.93	0.46	170.8	169.8	0.005	1.469	3.4
	V3	1.49	0.74	176.4	177.8	0.008	1.469	4.13
	V4	1.12	0.56	184.8	183.6	0.006	1.469	2.13
RH1	V1	2.61	1.30	177.33	174.7	0.014	1.468	3.46
	V2	1.12	0.56	179.2	178.0	0.006	1.469	3.8
	V3	1.87	0.93	196	194.1	0.009	1.466	6
	V4	1.49	0.74	196	194.5	0.007	1.469	2.93

SV : source de variation, **Var** : variété, **RH** : régime hydrique, **IA** : indice d'acide, **IS** : indice de saponification, **IE** : indice d'ester, **IP** : indice de peroxyde, **IR** : indice réfraction, **V1** : Nutrasol **V2** : Sy Valeo **V3** : Extrasol **V4** : Sy Genio

-Indice de réfraction

L'indice de réfraction est considéré comme un critère de pureté d'une huile. Il varie avec la longueur d'onde de la lumière incidente ainsi qu'avec la température. Cet indice est proportionnel au poids moléculaire des acides gras ainsi qu'avec leur degré d'insaturation.

Les résultats obtenus montrent que l'indice de réfraction varie entre (1,466 et 1,473) chez la variété 1 et la variété 3 pour les huiles de la première année d'expérimentation et entre (1,466 et 1,470) chez la variété 3 et la variété 1 pour les huiles de la deuxième année d'expérimentation (Tableaux 49, 51). Ces résultats indiquent que l'ensemble des huiles analysées peuvent être considérées comme pures et non siccatives car elles sont conformes à la norme NF T 60-212 où l'indice de réfraction des huiles non siccatives varie entre 1.468 et 1.470.

D'autre part, nos résultats sont inférieurs par rapport à la valeur de l'indice de réfraction (1.475) trouvée par Mengistie et al. (2018) chez le tournesol.

Ali et al. (2009) ont signalé que l'indice de réfraction de l'huile de tournesol n'a été pas affecté par le stress hydrique appliqué à différents stades de croissance chez deux cultivars de tournesol.

-Indice d'acide et acidité

Les indicateurs fréquemment utilisés pour l'évaluation des altérations de l'huile sont l'indice d'acide et l'indice de peroxyde (Rombaut, 2013). L'indice d'acide d'une huile est une mesure qui permet d'évaluer le niveau d'altération hydrolytique, enzymatique ou chimique des chaînes d'acide gras des triglycérides qui sont alors partiellement hydrolysés en acides

gras libres. (Abaza et al. 2002). D'après Aïssi et al. (2009), l'acidité caractérise la pureté et la stabilité d'une huile à la température ambiante.

Les résultats d'analyse des huiles issus des plantes de tournesol cultivées en milieu naturel durant les deux années d'expérimentation présentés dans les tableaux (49, 51) montrent que ses huiles ont un indice d'acide varié entre (1.12 et 2.80) mg de KOH/g chez les variétés 2, 4 et 5 sous les deux régimes hydriques 2 et 1 respectivement pour la première année et entre (0.93 et 2,61) mg de KOH/g chez les variétés 2 et 1 sous les deux régimes hydriques 2 et 1 respectivement pour la deuxième année. Ces valeurs sont inférieures de la valeur indiquée par le Codex alimentarius (1999) à savoir ; 4,0 mg de KOH/g de graisse ou d'huile ce qui confère une pureté et une bonne stabilité à notre huile. D'autre part, notre huile de tournesol se caractérise par un indice d'acide inférieur à ce lui de l'huile d'olive qui varié de (2 à 16) mg/g d'huile.

L'acidité des huiles issus des plantes de tournesol cultivées en milieu naturel durant la première année d'expérimentation variée entre (0,56 et 1,40) % comme elle variée entre (0,46 et 1,30)% pour la deuxième année d'expérimentation (Tableaux 49, 51). Ces valeurs sont inférieures par rapport à la valeur indiquée par Mengistie et al. (2018) à savoir ; 2.43 %.

D'autre part, Talha et Osman (2009) ont signalé que l'indice d'acide de l'huile de tournesol n'été pas affecté par le régime hydrique.

-Indice de saponification

La connaissance de l'indice de saponification d'une huile nous renseigne sur la longueur de la chaîne carbonée des acides constituants de cette huile. L'indice de saponification d'un corps gras est d'autant plus élevé que la chaîne carbonée des acides gras est courte (Lion, 1955).

Les résultats d'analyse des huiles de la première année montrent que l'indice de saponification est compris entre (156,8 et 192,2) mg KOH/g chez les variétés 4 et 1 sous les deux régimes hydriques 1 et 2 respectivement comme il varié entre (151,2 et 196) mg KOH/g chez les variétés 1 et 3, 4 sous les deux régimes hydriques 2 et 1 respectivement pour les huiles de la deuxième année d'expérimentation (Tableaux 49,51). Ces valeurs sont légèrement inférieures à l'intervalle donné par le Codex alimentarius (1999) à savoir 188-194mg KOH/g d'huile comme elles sont inférieures par rapport à la valeur trouvée par Mengistie et al. (2018) chez l'huile de tournesol, on l'occurrence 197.14 mg KOH/g d'huile et à celle de l'huile d'olive qui varie entre (184 à 196) mg de KOH/g d'huile fixée par le codex alimentarius (1999).

Ali et al. (2009) ont remarqué que l'indice de saponification de l'huile de tournesol, n'est pas influencé par le stress hydrique. Le même résultat est indiqué par Talha et Osman (2009) où l'indice de saponification n'est pas affecté par le traitement hydrique.

-Indice d'ester et pourcentage d'altération

Les valeurs moyennes de l'indice d'ester de l'huile de tournesol de la première année d'expérimentation varient entre (154,3 et 177,2) comme elles varient entre (149,8 et 194,5) pour les huiles de la deuxième année d'expérimentation (Tableaux 49, 51).

Le taux d'altération de notre huile varie entre (0.005 et 0.0017) pour les deux années d'expérimentation (Tableaux 49, 51), ces faibles valeurs confirment la stabilité de notre huile et sa résistance à l'oxydation.

-Indice de peroxyde

L'indice de peroxyde est un critère très utile et d'une sensibilité satisfaisante pour apprécier les premières étapes d'une détérioration oxydative (Perrin, 1992). Il indique en fait, la quantité d'acides gras déjà rances (Aïssi et al. 2009). Ainsi c'est un bon indicateur de l'état de conservation d'un corps gras. Il mesure les hydro peroxydes totaux qui sont les premiers produits d'oxydation (Kiritsakis, 1992).

Les valeurs de l'indice de peroxyde obtenus dans notre étude varient entre (1.12 et 2.80) méq d'oxygène actif/kg chez les variétés 4 et 5 sous les deux régimes hydriques 2 et 1 respectivement durant la première année d'expérimentation comme elle varie entre (2,13 et 6) méq d'oxygène actif/kg chez les variétés 4 et 3 sous les deux régimes hydriques 2 et 1 respectivement durant la deuxième année d'expérimentation (Tableaux 49,51). Ces valeurs sont inférieures à la norme de codex (alimentarius, 1999) fixée à 15 méq d'oxygène actif/kg d'huile.

L'obtention des valeurs d'indice de peroxyde faibles peut être expliquée par la richesse de notre huile en substances antioxydantes naturelles (tocophérols, polyphénols, caroténoïdes.) ce qui lui permet de mieux résister à l'oxydation.

Nos résultats sont inférieurs par rapport à ceux trouvés par Mengistie et al. (2018) qui ont signalé que l'indice de peroxyde de l'huile de tournesol est de 8.80 Meq/Kg. Ainsi ils sont inférieurs par rapport à l'indice de peroxyde de l'huile d'olive qui est fixé par le COI à (IP≤ 20).

D'après nos résultats, les valeurs d'indice d'acide et de peroxyde des huiles des plantes de tournesol stressées (conduit sous le régime hydrique 1) sont supérieures que celles des huiles des plantes de tournesol non stressées (conduit sous le régime hydrique 2) ce qui peut être

expliqué que sous les conditions de déficit hydrique les huiles sont plus soumises à l'altération et l'oxydation.

D'après les résultats d'analyse physicochimique, l'huile de tournesol extrait à partir des graines des plantes cultivées en milieu naturel et conduit sous deux régimes hydriques bien irrigué et stressé durant les deux années d'expérimentation est de bonne qualité physico-chimique .

Conclusion

Conclusion

Le tournesol (*Helianthus annuus* L.) est l'une des plantes oléagineuses les plus importantes dans le monde cependant il est quasi inexistant en Algérie. L'un des problèmes majeur de cette culture est la sécheresse estivale qui ce coïncide avec la fin de cycle et pénalise le rendement en graines et en huile.

Dans ce contexte notre étude a porté sur l'adaptation et la productivité de tournesol (*Helianthus annuus*.L) dans les conditions de déficit hydrique de l'Algérie.

L'étude de l'effet d'une conduite limitante en eau du stade bouton floral jusqu'à la récolte sur l'ensemble des hybrides oléiques de tournesol installés sous les conditions contrôlées (sous serre) a montré que le déficit hydrique induit une réduction importante de certain paramètres physiologiques notamment la teneur relative en eau et la conductance stomatique comme il induit une réduction de certain paramètres morphologiques tels que le diamètre de la tige, le poids et le diamètre de capitule. Le rendement en graines et ses deux composantes à savoir le nombre de graines par plante et le poids de 1000 graines ont été ainsi diminués. D'autre part, la différence entre les variétés a été soulevée pour la conductance stomatique, le rendement en graines et ses deux composantes.

A l'issue de cette étude, des corrélations positives significatives ont été décelées entre le rendement en graines et la teneur relative en eau, le diamètre de la tige, le poids de 1000 graines et des corrélations positives hautement significatives entre le rendement en graines et le diamètre de capitule, le poids de capitule et le nombre de graines par plante.

Dans les deux années d'expérimentation en milieu naturel réalisé à Relizane, le déficit hydrique qui résulte de l'absence de l'irrigation durant la phase reproductrice de la plante affecte les paramètres d'adaptation et ceux de la production par conséquent une réduction de la hauteur de la plante, de diamètre de la tige, de diamètre de capitule, de poids de capitule, de rendement en graines et ses deux composantes a été observée. En outre l'irrigation au stade végétative, floraison et remplissage des graines améliore le rendement en graines à travers ses deux composantes où le rendement le plus élevé (135.83) g/plante est obtenu chez la variété Sy valeo durant la deuxième année d'expérimentation.

La différence entre les variétés étudiées durant la première année d'expérimentation a été soulevée seulement pour le poids de capitule cependant durant la deuxième année d'expérimentation, la différence entre les variétés étudiées a été soulevée pour le nombre de feuille par plante, la hauteur de la plante et le diamètre de la tige.

L'observation des corrélations significatives positives entre le rendement en graines et certain traits morphologiques notamment la hauteur de la plante, le diamètre de capitule d'un côté et entre le rendement en graines et ses deux composantes à savoir le nombre de graines par plante et le poids de 1000 graines d'un autre côté nous a permis de conclure que ses traits peuvent être utilisés comme des critères de sélection chez le tournesol.

L'étude de comportement agronomique des variétés de tournesol conduit en milieu naturel à Tiaret a révélé une différence hautement significative entre les variétés évaluées pour la hauteur de la plante et le diamètre de capitule, une différence très hautement significative pour le nombre de feuille par plante, poids de capitule, nombre de graines par plante et le rendement en graines par plante. En outre, le rendement le plus élevé est obtenu chez la variété Extrasol avec une valeur de 41,66g.

Le déficit hydrique provoque la réduction de rendement en huile chez l'ensemble des variétés de tournesol étudiées cependant il n'affecte pas la teneur en huile. Ainsi le rendement en huile présente une corrélation significative positive avec le diamètre et le poids de capitule, le rendement en graines et ses deux composantes.

Les résultats de la caractérisation physicochimique de l'huile des graines de tournesol montrent qu'elle est de bonne qualité physico-chimique.

A la fin, nous pouvons dire que malgré la plante de tournesol s'avère influencer par les conditions de déficit hydrique lors de notre expérimentation ; elle a montré une grande potentialité agronomique. Par conséquent elle doit impérativement bénéficier d'une grande attention ; il s'agit de la relancer en Algérie et que cette relance doit être accompagnée par des programmes de recherches et d'amélioration.

Ce travail pourrait être développé par :

- L'introduction de la culture de tournesol dans les systèmes de culture de l'Algérie à travers leur introduction dans les rotations avec céréales.

- D'autres essais d'adaptation multilocale et pluriannuelle de tournesol dans le but d'élargir les conditions de milieu (sol, climat) dans lesquelles s'opère l'évaluation variétale.

- L'étude de l'effet de déficit hydrique ainsi que l'effet des conditions pédoclimatique de l'Algérie sur la composition de l'huile de tournesol en acides gras et en composés mineurs on l'occurrence les tocophyroles et les phytostéroles.

- L'étude de l'adaptation de la culture de tournesol aux différents stress biotiques et abiotiques.

-L'amélioration de la productivité de la culture de tournesol par la l'optimisation de la conduite culturale d'une part et d'autre part la sélection des génotypes présentant des caractéristiques intéressantes.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abaza L, Msallem M, Daoud D (2002).** Caractérisations des huiles de sept variétés d'olivier tunisiennes. *Oléagineux, corps gras, Lipides*.9 :174-9.
- 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. 196p.
- AFNOR (1988).** Corps gras, graine oléagineuse, produit dérivés, recueil de norme française, 4^{ème} Edition AFNOR, paris, p 536.
- Agreste (2003).** L'utilisation du territoire en 2002. Agreste Chiffres et Données Agriculture : 55-65.
- Aguirrezabal LAN (1993).** Modélisation de l'allongement et de la ramification du système racinaire du tournesol (*Helianthus annuus* L.). Effet du rayonnement intercepté et de la température. Physiologie végétale, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand II, Paris, France. pp90.
- Ahmad MI, Ali A, Khan A, Sher A, Rashid A, Jamro SA, ur-Rahman S, Ahmad S (2017).** Nitrogen Management of Diverse sunflower (*Helianthus annuus* L) hybrids production under Agro-climatic Conditions of Sargodha Pakistan. American Journal of plant sciences, 8: 1357- 1367.
- Aïssi VM, Soumanou M M, Tchobo FP, Kiki D (2009).** Etude comparative de la qualité des huiles végétales alimentaires raffinées en usage au Bénin. Bulletin d'Informations de la Société Ouest Africaine de Chimie(06) :25-37.
- Alahdadi I, Oraki H, khajani FP (2011).** Effect of water stress on yield and yield components of sunflower hybrids. African Journal of Biotechnology, 10(34): 6504-6509.
- Alahdadi I, Oraki H, Khajani FP (2014).** Changes in morphological and physiological characteristics of sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids in relation to the water deficit stress. African Journal of Agricultural Research. 9(30): 2324-2331.
- Alberio C, Izquierdo NG, Aguirrezabal L (2015).** Sunflower crop physiology and agronomy. Martinez-Force E., Dunford N.T., Salas J.J (Ed). Sunflower: Chemistry production, Processing and utilization, USA, AOCS Press, Urbana, IL 61802: 53-91.
- Ali Q, Ashraf M, Anwar F (2009).** Physico-chemical attributes of seed oil from drought stressed sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. GRASAS Y ACEITES, 60 (5) : 475-481.

- Allinne C (2009).** Modélisation écophysiological et analyse génétique pour la recherche de génotypes de tournesol adaptés aux basses températures associées aux semis précoces. Thèse de doctorat, INP Toulouse, France, 159 p.
- Amrani M (2013).** La culture de tournesol. Fiche technique de l'institut technique des grandes cultures Algérie.
- Anandhan T, Manivannan N, Vindhiyavarman P, Jeyakumar P (2010).** Correlation for oil yield in sunflower (*Helianthus annuus*.L). Electronic Journal of Plant Breeding, 1(4): 869-871.
- Anastasi U, Santonoceto C, Giuffre AM, Sortino O, Gresta F, Abbate V (2010).** Yield performance and grain lipid composition of standard and oleic sunflower as affected by water supply. Field Crops Research. 119: 145–153.
- Andrade A, Vigliocco A, Alemano S, Llanes A, Abdala G (2013).** Comparative morpho-biochemical responses of sunflower lines sensitive and tolerant to water stress. American Journal of Plant Sciences. 4: 156- 167.
- Andrei E (2004).** Drought effects on growth stages and yield components of sunflower hybrids. Crop Production: Physiology. Proc. 16th International Sunflower Conference, Fargo, ND USA.
- Anjum SA, Wang LC, Farooq M, Hussain M, Xue LL, Zou CM (2011).** Brassino-lide application improves the drought tolerance in maize through modulation of enzymatic antioxidants and leaf gas exchange. J. Agron. Crop Sci. 197: 177–185.
- Asa E (2008).** Contrôle génétique de la qualité des graines chez le tournesol (*Helianthus annuus* L.) soumis à la sécheresse. Thèse doctorat : Institut National Polytechnique de Toulouse. 177p.
- Asch F, Dingkuhn M, Sow A, Audebert A (2005).** Drought induced changes in rooting patterns and assimilate partitioning between root and shoot in upland rice. Field Crops Research. 93: 223–236.
- Assmann SM, Snyder JA, Lee YJ (2000).** ABA-deficient (*aba1*) and ABA– insensitive (*abi1-1*, *abi2-1*) mutants of Arabidopsis have a wild-type stomatal reponse to humidity. Plant Cell Environ. 23:387-395.
- Aubert G (1978).** Méthodes d'analyses des sols. Centre national de documentation pédagogique, Centre régional de documentation pédagogique de Marseille. 360p.
- Ayerdi-Gotor A (2008).** Etude des variations des teneurs et de la variabilité des compositions en tocophérols et en phytostérols dans les akènes et l'huile de tournesol (*Helianthus annuus* L.). Thèse doctorat : Institut National Polytechnique de Toulouse. 196p.

- Ayerdi-Gotor A, Berger M, Labalette F, Centis S, Eychenne V, Daydé J, Calmon A (2008)**. Variabilité des teneurs et compositions des composés mineurs dans l'huile de tournesol au cours du développement du capitule. OCL. 15 : 6.
- Baize D (1988)**. Guide des analyses courantes en pédologie, Institut national de la recherche agronomique.
- Baize D (2000)**. Guide des analyses en pédologie. Paris : 2ème édition revue et augmentée. INRA.
- Balalic I, Zoric M, Branković G, Terzić S, Crnobarac J (2012)**. Interpretation of hybrid×sowing date interaction for oil content and oil yield in sunflower. Field Crops Research. 137: 70–77.
- Bammoun A (1997)**. Contribution à l'étude de quelques caractères morpho physiologiques, biochimiques et moléculaires chez des variétés de blé dur, *Triticum Turigidum* esp. durum pour l'étude de la tolérance à la sécheresse dans la région des hauts plateaux de l'ouest Algérien. Thèse de Magistère. 1-33.
- Bange MP, Hammer GL, Rickert KG (1997)**. Environmental control of potential yield of sunflower in the subtropics. Aust. J. Agric. Res. 48: 231–240.
- Barrs H (1968)**. Determination of water deficit in plant tissues. In : Water Deficit and Plant growth, Koslowski, T. Ed. Academy Press, New York. 235-368.
- Behradfar A, Gorttapeh AH, Zardashty MR, Talat F (2009)**. Evaluation correlated traits for seed and oil yield in sunflower (*Heliathus annuus* L.) through path analysis under condition relay cropping. Research Journal of Biological Sciences. 4 (1): 82-85.
- Ben Naceur M, Ben Salem M, Rouaïssi M, Elborji Z, Chaaben R (2002)**. Influence du manque d'eau sur le comportement écophysologique de quatre variétés de blé dur. Annales de l'INRGREF. 5 : 133-152.
- Benlloch-González M, Manuel Quintero J, García-Mateo MJ, Fournier JM, Benlloch M (2015)**. Effect of water stress and subsequent re-watering on K⁺ and water flows in sunflower roots. A possible mechanism to tolerate water stress. Environmental and Experimental Botany. 118: 78–84.
- Blum, A. (1988)**. Plant Breeding for stress environments. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Borlescu C, Giurginca M, Demetrescu I (2007)**. Evaluation of stability of some natural and synthesis antioxidants in dermato-cosmetics with anti-ageing effect. Revista de Chimie. 58 (1): 28- 32.
- Botella Miralles O, Juan Valero JA, Santa Olalla FM (1997)**. Growth, development and yield of five sunflower hybrids. European Journal of Agronomy 6: 47-59.

- Bouic PJD, Clark A, Lamprecht J, Freestone M, Pool EJ, Liebenberg RW, Kotze D, Van jaarsveld PP (1999).** The effects of B-sitosterol (BSS) and B-sitosterol glucoside (BSSG) mixture on selected immune parameters of marathon runners: Inhibition of post marathon immune suppression and inflammation. *International Journal of Sports Medicine*. 20: 258-62.
- Boyer JS (1968).** Relationships of water potential to growth of leaves. *Plant Physiology* 43: 1056-1062.
- Burke JM, Tang S, Knapp SJ, Rieseberg LH (2002).** Genetic analysis of sunflower domestication. *Genetics*. 161 : 1257-1267 .
- Calpe-Berdiel L, Escola-Gil JC, Ribas V, Navarro-Sastre A, Garces-Garces J, Blanco-Vaca F (2005).** Changes in intestinal and liver global gene expression in response to a phytosterol enriched diet. *Atherosclerosis*. 181(1): 75-85.
- Canavar O, Ellmer F, Chmielewski FM (2010).** Investigation of yield and yield components of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars in the ecological conditions of Berlin (Germany). *HELIA*, 33(53):117-130.
- Cechin I, Rossi SC, Oliveira VC, Fumis TF (2006).** Photosynthetic responses and proline content of mature and young leaves of sunflower plants under water deficit. *Photosynthetica*. 44(1):143-146.
- Cetiom (2004).** Centre technique de la filière française des huiles et protéines végétales. Ed. CETIOM.
- Chadefaud M, Emberger L (1960).** Les végétaux vasculaires. Tome II du Traite de Botanique Systematique, Masson, Paris, 1540 p.
- Champolivier L, Debaeke P, Merrien A (2011).** Pourquoi irriguer le tournesol, une culture réputée tolérante à la sécheresse ? *Innovations Agronomiques*. 14 : 151-164.
- Chimenti CA, Pearson J, Hall AJ (2002).** Osmotic adjustment and yield maintenance under drought in sunflower. *Field Crops Research*. 75:235-246.
- Codex alimentarius (1999).** CODEX STAN 210-1999. Norme pour les huiles végétales portant un nom spécifique. Normes alimentaires internationales.
- Côme D, Corbineau F (1998).** Semences et germination. *In: Proc. Physiologie végétale II: Croissance et développement*, Ed .Hermann and P. Mazliak. 185-313.
- Connor DJ, Hall AJ (1997).** Sunflower physiology. In: Schneiter, A.A. (Ed.), *Sunflower Technology and Production*. Agron. Monogr. 35. ASA, Madison, WI, USA, pp. 113–182.

- Connor DJ, Hall AJ (1997).** Sunflower physiology. Sunflower technology and production. Agronomy Monograph. A. A. Schneiter and A. A. Seiler. Madison (USA). 35: 113-182.
- Connor DJ, Sadras VO (1992).** Physiology of yield expression in sunflower. Field Crops Research. 30:333-389.
- Cosgrove DJ (1993).** Water uptake by growing cells: An assessment of the controlling roles of wall relaxation, solute uptake, and hydraulic conductance. International Journal of Plant Sciences. 154 : 10- 20.
- Crnobarac J, Skorić D, Marinkovic R, Dusanić N (1997).** Importance économique, des variétés de tournesol et technologie de production. Technique agricole contemporaine, numéro extraordinaire de la 5ème conférence scientifique "Orientations pour le développement de la technique agricole",178-198.
- Darvishzadeh R, Hatami Maleki H, Pirzad AM, Kholghi MB, Abdollahi Mandoulakani B (2014).** Genetic analysis of yield and yield related traits in sunflower (*Helianthus annuus* L.) under well-watered and water stressed conditions. Genetika. 46(2):369-384.
- Debaeke P, Casadebaig P, Flenet F, Langlade N (2017).** Sunflower crop and climate change: vulnerability, adaptation, and mitigation potential from case-studies in Europe. *Oilseeds & fats Crops and Lipids*. OCL 2, 24(1) D102.
- Debeake P, Mestriés E (2016).** Dossier tournesol. Des années de recherches collaboratives : Résultats marquants. Edition Terres Inovia.
- Delplanque B (2000).** The nutritional value of sunflower oils: linoleic sunflower seeds and seeds with high oleic content. OCL. 7 (6): 467-472.
- Demir C, Cetin M (1999).** Determination of tocopherols, fatty acids and oxidative stability of pecan, walnut and sunflower oils. Deutsche Lebensmittel-Rundschau. 95: 278-282.
- Desanlis M (2013).** Analyse et modélisation des effets de la conduite de culture sur deux maladies cryptogamiques majeures du tournesol : *Phoma macdonaldii* et *Phomopsis helianthi*. Thèse doctorat : Institut National Polytechnique de Toulouse.222p.
- Desanlis M (2013).** Analyse et modélisation des effets de la conduite de culture sur deux maladies cryptogamiques majeures du tournesol : *Phoma macdonaldii* et *Phomopsis helianthi*. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse. 222p.
- Despiau C (1978).** Les solvants d'extraction : Deux aspects technologiques et économiques. Incidences sur le choix du solvant. Revue française de corps gras, Paris. 25(1) : 7 – 9.

- Djebrani M (2000).** Adaptation au déficit hydrique de quatre variétés de blé dur. Symposium Blé. 161-169.
- Ebrahimi M, Khajehpour MR, Naderi A, Nassiri BM (2014).** Physiological responses of sunflower to water stress under different levels of zinc fertilizer. *International journal of plant production*. 8(4): 483-504.
- El Midaoui M, Serieys H, Griveau Y, Benbella M, Talouizte A, Bervillé A, Kaan F (2003).** Effects of osmotic and water stresses on root and shoot morphology and seed yield in sunflower (*Helianthus annuus* L.) genotypes bred for morocco or issued from introgression with *H. argophyllus* T. & G. and *h. debilis* Nutt. *HELIA*, 26 (38): 1-16.
- Elsheikh E, Schultz B, Abraham MH, Hussein SA (2015).** Effect of deficit irrigation on yield and yield components of sunflower (*Helianthus annuus* L.) on Gezira clay soil, Sudan. *African journal of Agricultural*. 10 (29): 2826-2834.
- Erdemoglu N, Kusmenoglu S, Yenice N (2003).** Effect of irrigation on the oil content and fatty acid composition of some sunflower seeds. *Chem. Nat. Comp*. 39: 1-4.
- Fahad S, Bajwa AA, Nazir U, Anjum SA, Farooq A, Zohaib A, Sadia S, Nasim W, Adkins S, Saud S, Ihsan MZ, Alharby H, Wu C, Wang D, Huang J (2017).** Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science*. 8: 1147.
- FAO (2010).** Sunflower crude and refined oils. *Agribusiness handbook*. Investment centre division FAO. 41p.
- FAO (2013).** Site Web de la FAO : www.fao.org.
- FAOSTAT (2016).** Site Web de la FAO : www.fao.org.
- FAOSTAT (2017).** Site Web de la FAO : www.fao.org.
- Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, Fujita D, Basra SMA (2009).** Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agron. Sustain. Dev*. 29: 185–212.
- Fernández-Luqueño F, López-Valdez F, Miranda-Arámula M, Rosas-Morales M, Pariona N, Espinoza-Zapat R (2014).** An introduction to the sunflower crop. Arribas J.I (Ed). *Sunflower growth and development, environmental influences and pests /diseases*. New York, Nova Science Publishers, pp. 1-18.
- Flagella Z, Rotunno T, Tarantino E, Caterina RDi, De Caro A (2002).** Changes in seed yield and oil fatty acid composition of high oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids in relation to the sowing date and the water regime. *European Journal of Agronomy* 17:221-230.

- Flagella Z, Rotunno T, Tarantino E, Di Caterina R, De Caro A (2002).** Changes in seed yield and oil fatty acid composition of high oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids in relation to the sowing date and the water regime. *European Journal of Agronomy*. 17: 221 -230.
- Flenet F, Bouniols A, Saraiva C (1996).** Sunflower response to a range of soil water contents. *European Journal of Agronomy*. 5:161-167.
- Folmer BM (2003).** Sterol surfactants: from synthesis to applications. *Advances in Colloid and Interface Science*. 103: 99-119.
- García-López J, Lorite IJ, García-Ruiz R, Ordonez R, Dominguez J (2016).** Yield response of sunflower to irrigation and fertilization under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management* 176: 151–162.
- Gavrilovic M, Maginot MJ, Wallach J (1996).** Biosciences et technique de manipulation d'analyse biochimique. 3^{ème} édition pp : 36-38.
- Ghobadi M, Taherabadi S, Ghobadi ME, Mohammadi GR, Honarmandt SJ (2013).** Antioxidant capacity, photosynthetic characteristics and water relations of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars in response to drought stress. *Industrial Crops and Products* 50 : 29– 38 .
- Gholamhoseini M, Ghalavand A, Khodaei-Joghan A, Dolatabadian A, Zakikhani H, Farmanbar E (2013).** Zeolite-amended cattle manure effects on sunflower yield, seed quality, water use efficiency and nutrient leaching. *Soil & Tillage Research* 126: 193–202.
- Ghoribi NN (2009).** Étude sur des lignées recombinantes de tournesol (*Helianthus annuus* L.) Et leurs parents dans le cas du semis précoce : Effet du stress thermique et hydrique sur l'identification d'éventuels QTLs adaptatif. Thèse Magistère, Université Mentouri Constantine. 104p.
- Gimenez C, Mitchell VJ, Lawlor DW (1992).** Regulation of photosynthetic rate of two sunflower hybrids under water stress. *Plant Physiology*. 98: 516-524.
- Go ksoy AT, Demir AO, Turan ZM, Dagustu N (2004).** Responses of sunflower (*Helianthus annuus* L.) to full and limited irrigation at different growth stages. *Field Crops Research*. 87: 167-178.
- Gö ksoy AT, Turan ZM (2007).** Correlations and path analysis of yield components in synthetic varieties of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Acta Agronomica Hungarica*. 55(3): 339–345.

- Gomes EM, Ungaro MRG, Dirceu B, Vieira DB (2008).** Sunflower yield and root system development under water stress in tropical conditions. *Crop Production – Management. Proc. 17th International Sunflower Conference, Córdoba, Spain.*
- Graan T, Boyer JS (1990).** Very high CO₂ partially restores photosynthesis in sunflower at low water potentials. *Planta* 181: 378–384.
- Granier C, Tardieu F (1998).** Is thermal time adequate for expressing the effects of temperature on sunflower leaf development? *Plant Cell and Environment.* 21:695-703.
- Grieu P, Maury P, Debaeke P, Ahmad Sarrafi A (2008).** Améliorer la tolérance à la sécheresse du tournesol: Apports de l'écophysiologie et de la génétique. *Innovations Agronomiques.* 2: 37-51.
- Gueta-Dahan Y, Yaniv Z, Zilinskas A, Ben Hayyim G (1997).** Salt and oxidative stress; similar and specific responses and their relation to salt tolerance in Citrus. *Planta.* 203: 460–469.
- Hachemi N(2006).** Impact prévisible de l'intégration de l'Algérie à la zone de libre échange Union Européenne et Organisation Mondiale du Commerce sur la filière huile alimentaire. Magister en Science Agronomiques. Institut National Agronomique-El harrach-Alger.106p.
- Haddadi P(2010).** Analyse physiologique et génétique combinées pour améliorer le contenu en huile et la qualité du tournesol soumis à la sécheresse. Thèse doctorat. Université de Toulouse. 182.
- Hall AJ (2001).** Sunflower Ecophysiology: Some unresolved issues. 15eme conférence internationale tournesol. *Oléagineux Corps gras Lipides.* 8:15–21.
- Hayek T, Bensalem M, Zide E(2000).** Mécanisme ou stratégie de résistance à la sécheresse : cas du blé, de l'orge et du triticale. *Option méditerranéenne.* 40 : 287-290.
- Heidari M, Karami V (2014).** Effects of different mycorrhiza species on grain yield, nutrient uptake and oil content of sunflower under water stress. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences.* 13: 9–13.
- Heiser C.B. (1969).** The North American sunflowers (*Helianthus*). *Mem. Torrey Bot. Club* 22: 1-218.
- Hervé D, Fabre F, Berrios EF, Leroux N, Al Chaarani G, Planchon C, Sarrafi A, Gentzbittel L (2001).** QTL analysis of photosynthesis and water status traits in sunflower (*Helianthus annuus* L.) under greenhouse conditions. *Journal of Experimental Botany.* 52(362): 1857-1864.
- Hesse PR, Hesse P (1971).** A textbook of soil chemical analysis.

- Hikosaka K, Ishikawa K, Borjigidai A, Muller O, Onoda Y (2006).** Temperature acclimation of photosynthesis: mechanisms involved in the changes in temperature dependence of photosynthetic rate. *Journal of Experimental Botany*. 57: 291-302.
- Hladni N, Jocić S, Miklič V, Mijić A, Saftić-Panković D, Škorić D (2010).** Effect of morphological and physiological traits on seed yield and oil content in sunflower. *Helia*. 33 (53):101-116.
- Hladni N, Jocić S, Miklič V, Mijić A, Panković DS (2008).** Direct and indirect effects of morpho-physiological traits on seed yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Crop Production – Physiology*. Proc. 17th International Sunflower Conference, Córdoba, Spain.
- Hladni N, Škorić D, Kraljević-Balalić M, Ivanović M, Sakac Z, Jovanović D (2004).** Correlation of yield components and seed yield per plant in sunflower (*Helianthus annuus*). *Breeding and Genetics*. Proc. 16th International Sunflower Conference, Fargo, ND USA.
- Hladni N, Škorić D, Kraljević-Balalić M, Sakač Z, Jovanović D (2006).** Combining ability for oil content and its correlations with other yield components in sunflower (*Helianthus annuus*L.). *Helia*. 29(44): 101-110.
- Hussain M, Farooq S, Hasan W, Ul -Allah S, Tanveer M, Farooq M, Nawaz A (2018).** Drought stress in sunflower: Physiological effects and its management through breeding and agronomic alternative. *Agricultural Water Management*. 201:152–166.
- Hussain S, Ma BL, Saleem MF, Anjum SA, Saeed A, Iqbal J (2012).** Abscisic Acid Spray on Sunflower Acts Differently under Drought and Irrigation Conditions. *Agronomy Journal*. 104(3): 561–568.
- Ion V, Dicu G, Basa AG, Dumbrava M, Temocico G, Epure LI, State D (2015).** Sunflower Yield and Yield Components under Different Sowing Conditions. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 6: 44 – 51.
- Iqbal N, Ashraf M, Ashraf MY (2008).** Glycine betaine, an osmolyte of interest to improve water stress tolerance in sunflower (*Helianthus annuus* L.): water relations and yield. *South Afr. J. Bot.* 74: 274–281.
- Iqbal N, Ashraf M, Ashraf MY, Azam F (2005).** Effect of exogenous application of glycine betaine on capitulum size and achene number of sunflower under water stress. *International Journal of Biology and Biotechnology*. 2(3): 765-771.

- Iqbal N, Ashraf MY, Ashraf M (2005).** Influence of water stress and exogenous glycinebetaine on sunflower achene weight and oil percentage. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2:155–160.
- Izquierdo NG, Adrian Dosio GA, Cantarero M, Lujan J, Nazareno Aguirrezabal LA(2008).** Weight per Grain, Oil Concentration and Solar Radiation Intercepted during Grain Filling in Black Hull and Striped Hull Sunflower Hybrids. *Crop Sci.* 48:688–699.
- Jaleel CA, Gopi R, Sankar B, Gomathinayagam M, Panneerselvam R (2008).** Differential responses in water use efficiency in two varieties of *Catharanthus roseus* under drought stress. *Comp. Rend. Biol.* 331: 42–47.
- Jalilian J, Modarres-Sanavy SAM, Saberli SF, Sadat-Asilan K (2012).** Effects of the combination of beneficial microbes and nitrogen on sunflower seed yields and seed quality traits under different irrigation regimes. *Field Crops Research.* 127: 26–34.
- Jones MM, Osmond CB, Turner NC (1980).** Accumulation of solutes in leaves of sorghum and sunflower in response to water deficits. *Australian journal of plant physiology* 7: 193-205.
- Kadasiddappa MM, Praveen Rao V, Yella Reddy K, Ramulu V, Uma Devi M, Narender Reddy S (2017).** Effect of irrigation (drip/surface) on sunflower growth, seed and oil yield, nutrient uptake and water use efficiency - A review. *Agricultural Reviews*, 38 (2): 152-158.
- Kadayifci A, Yildirim O (2000).** The response of sunflower grain yield to water. *Turk. J. Agric. For.* 24: 137-145.
- Kartika IA (2005).** Nouveau procédé de fractionnement des graines de tournesol : expression et extraction en extrudeur bi-vis, purification par ultrafiltration de l'huile de tournesol. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse.339 p.
- Kaya MD, Kolsarici O (2011).** Seed yield and oil content of some sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids irrigated at different growth stages. *African Journal of Biotechnology.* 10 (22): 4591-4595.
- Kaya Y, Atakisi IK (2004).** Combining ability analysis of some yield characters of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *HELIA*, 27 (41): 75-84.
- Kazi BR, Oad FC, Jamro GH, Jamali LA, Oad NL (2002).** Effect of water stress on the growth, yield and oil content of sunflower. *Pak. J. Appl. Sci.* 2: 550-552.
- Khan MS, Swati MS, Khali IH, Iqbal A (2000).** Heterotic studies for various characters in sunflower. *Asian Journal of Plant Science.* 2: 1010–1014.

- Kiani M, Gheysari M, Mostafazadeh-Fard B, Majidi MM, Karchani K, Hoogenboom G (2016).** Effect of the interaction of water and nitrogen on sunflower under drip irrigation in an arid region. *Agricultural Water Management* 171: 162–172.
- Kiani SP (2007).** Analyse génétique des réponses physiologiques du tournesol (*Helianthus annuus* L.) soumis à la sécheresse. Thèse doctorat : Institut National Polytechnique de Toulouse. 229p.
- Kiani SP, Talia P, Maury P, Grieu P, Heinz R, Perrault A, Nishinakamasu V, Hopp E, Gentzbittel L, Paniego N, Sarrafi A (2007).** Genetic analysis of plant water status and osmotic adjustment in recombinant inbred lines of sunflower under two water treatments. *Plant Sci.* 172:773-787.
- Kiritsakis A (1992).** Olive oil: Form the tree to the 2eme Ed, Trumbull (Connecticut, USA) Food Nutrition press INC.
- Kotchi SO (2004).** Détection du stress hydrique par thermographie infrarouge. Application à la culture de la pomme de terre. Mémoire Maître ès Sciences (M.Sc.). Faculté de Foresterie et Géomatique ; Université Laval Québec. 130 pages.
- Krizmanic M, Liovic I, Mijic A, Bilandzic M (2004).** Influence of drought and hailstorm on the yield and yield components of sunflower. proc. 16th international sunflower conference, Fargo, ND USA.
- Kumar S, Dixit RS, Tripathi HP (1991).** Effect of nitrogen on nutrient uptake and oil content of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under different moisture regimes. *Indian J. Agric. Sci.* 61: 766-768.
- Lartigot I (2015).** Guide de culture. Centre technique de la filière française des huiles et protéines végétales. Ed. CETIOM.
- Laureti D, Del Gatto A, Pieri S (2007).** Commercial sunflower hybrid evaluation in east central Italy. *HELIA*, 30 (47):141-144.
- Leclerq P (1969).** Une stérilité cytoplasmique chez le tournesol. *Ann. Amélior. Plant.* 19 : 99-106.
- Lecomte V, Nolot JM (2011).** Place du tournesol dans le système de culture. *Innovations Agronomiques* 14 : 59-76.
- Leon AJ, Andrade FH, Lee M (2003).** Genetic analysis of seed-oil concentration across generations and environments in sunflower. *Crop Sci.* 43: 135–140.
- Linchtenthaler HK, Welburn AR (1983).** Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochem. Soc. Trans.* 11: 591-592.

- Lion PH (1955).** Travaux pratiques de chimie organique. Ed. Dunod, Paris.
- Lisar SYS, Motafakkerzad R, Hossain MM, Ismail MM, Rahman IMM (2012).** Water stress in plants: Causes, effects and responses. Introductory Chapter in Book: Water Stress, Publisher: In Tech: Rijeka, Croatia, Editors: Ismail MM. Rahman, Hiroshi Hasegawa.1–14.
- Lobell BD, Cassman KG, Field CB (2009).** Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. Annual Review of Environment and Ressources. 34:179–204.
- Ludlow MM, Muchow RC (1990).** A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. Advances in Agronomy. 43: 107–153.
- Maertens C, Bosc M (1981).** Etude de l'enracinement du tournesol (Variété Stadium). Information Techniques CETIOM. 73:3-11.
- Maksimović L (2005).** Adaptability to variable weather conditions and irrigation response in sunflower hybrids. HELIA, 28 (43):113-124.
- Manivannan P, Rabert GA, Rajasekar M, Somasundaram R(2014).** Drought stress induced modification on growth and pigments composition in different genotypes of (*Helianthus annuus* L) .Current Botany. 5:7-13.
- Maqbool AB, Prathibha D, Mariam BS (2001).** Biotechnology: Genetic improvement of sorghum (*Sorghum bicolor*(L.) Moench). In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant. 37: 504–515.
- Marinkovic R (1992).** Path-coefficient analysis of some yield components of sunflower (*Helianthus annuus* L.), Euphytica 60: 201-205,
- Matthews MA, Van Volkenburgh E, Boyer JS (1984).** Acclimation of leaf growth to low water potentials in sunflower. Plant Cell and Environment. 7: 199–206.
- Maury P (1997).** Adaptation a la sécheresse et photosynthèse chez le tournesol. Thèse doctorat : Institut polytechnique de Toulouse. 160p.
- Maury P, Berger M, Mojayad FC, Planchon C (2000).** Leaf water characteristics and drought acclimation in sunflower genotypes. Plant and Soil. 223: 153–160.
- Maury P, Langlade N, Grieu P, Rengel D, Sarrafi A, Debaeke P, Vincourt P (2011).** Ecophysiologie et génétique de la tolérance à la sécheresse chez le tournesol. Innovations Agronomiques. 14 :123-138.
- Mehmet OZ, Abdullah K, Hayrettin K, Mehmet S, Turan ZM, Go ksoy AT (2013).** Effect of rainfed and irrigated conditions on yield and quality traits of new-improved sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids in a sub-humid climate. Indian Journal of Agricultural Sciences. 83(1): 41-50.

- Mengistie T, Alemu A, Mekonnen A (2018).** Comparison of physicochemical properties of edible vegetable oils commercially available in Bahir Dar, Ethiopia . *Chemistry International* 4(2): 130-135.
- Mercau JL, Sadras VO, Satorre EH, Messina C, Balbi C, Uribelarrea M, Hall AJ (2001).** On-farm assessment of regional and seasonal variation in sunflower yield in Argentina. *Agricultural Systems* 67: 83-103.
- Merrien A (1992).** *Physiologie du tournesol*. CETIOM, Paris. 125pp.
- Merrien A, Grandin G (1990).** Comportement hydrique du tournesol : synthèse des essais ‘irrigation’ 1983-88. In : *Le tournesol et l’eau : adaptation à la sécheresse, réponse à l’irrigation*. Editions Cetiom, Paris .75–90.
- Merrien A, Milan MJ (1992).** *Physiologie du tournesol*. Ed CETIOM , Paris.
- Miralles B, Juan Valero JA, Santa Olalla FM (1997).** Growth development and yield of five sunflower hybrids. *European Journal of Agronomy* 6: 47-59.
- Mirleau-Thebaud V (2012).** Effets des contraintes mécaniques du sol sur la limitation des rendements du tournesol. Thèse doctorat : Institut National Polytechnique de Toulouse. 282p.
- Mohamed MY (2010).** Development and stability of some Sudanese sunflower hybrids under irrigated conditions. *HELIA*, 33 (52): 135-144.
- Mojayad F (1993).** Adaptation à la sécheresse, photosynthèse et photoinhibition chez le tournesol (*Helianthus annuus* L.). Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique, Toulouse, France, 97p.
- Moraes LAC, Mertz-Henning LM, Moreira A (2015).** Physiological parameters and growth in sunflower cultivars under drought stress at controlled conditions. XXI Reuniao Nacional de Pesquisa de Girassol. IX Simposio Nacional sobre a Cultura do Girassol. de outubro, Londrina, PR, Brazil. 28-29.
- Moriz J, Merrien A (1990).** Principaux traits du comportement hydrique du tournesol. In : R. Blanchet, A. Merrien (Eds.), *Le tournesol et l’eau*. Cetiom Publications, Paris p. 7-21.
- Mrdja J, Crnobarac J, Radic V, Miklic V (2012).** Sunflower seed quality and yield in relation to environmental conditions of production region. *Helia*, 35(57): 123-134.
- Munns R. Weir R (1981).** Contribution of sugars to osmotic adjustment in elongating and expanded zones of wheat leaves during moderate water deficits at two light levels. *Australian journal of plant physiology*. 8: 93-105.

- Nadeem Tahir MH, Imran M, Hussain MK (2002).** Evaluation of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Inbred Lines for Drought Tolerance. International journal of agriculture & biology. 04 (3): 398–400
- Nadeem Tahir MH, Mehdi SS (2001).** Evaluation of Open Pollinated Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Populations Under Water Stress and Normal Conditions. *Int. J. Agri. Biol* 03 (2) : 236–238.
- Nadeem Tahir MH, Sadaqat HA, Bashir S (2002).** Correlation and path coefficient analysis of morphological traits in sunflower (*Helianthus annuus* L.) populations. International Journal of Agriculture and Biology. 4(3): 341-343.
- Nezami A, Khazaei HR, Boroumand Rezazadeh Z, Hosseini A (2008).** Effects of drought stress and defoliation on sunflower (*Helianthus annuus*) in controlled conditions. *Desert*.12: 99-104.
- NF T60 204 (AFNOR, 1981).** Détermination de l'indice d'acide. Association Française de Normalisation, Recueil de normes françaises des corps gras, graines oléagineuse, produits dérivés. Ed. AFNOR, 1981. Paris.
- NFT 60 220 (AFNOR, 1981).** Détermination de l'indice de peroxyde. Association Française de Normalisation, Recueil de normes françaises des corps gras, graines oléagineuse, produits dérivés. Ed. AFNOR, 1981. Paris.
- NFT 60 206 (AFNOR, 1981).** Détermination de l'indice de saponification. Association Française de Normalisation, Recueil de normes françaises des corps gras, graines oléagineuse, produits dérivés. Ed. AFNOR, 1981. Paris.
- NFT 60 212 (AFNOR, 1984).** Détermination de l'indice de réfraction. Association Française de Normalisation, Recueil de normes françaises des corps gras, graines oléagineuse, produits dérivés. Ed. AFNOR, 1984. Paris.
- Nolot JM, Debaeke P (2003).** Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture. *Cahiers Agricultures*. 12 : 387-400.
- Nouri L (2011).** Identification de marqueurs physiologiques de la tolérance à la sécheresse chez le tournesol. Thèse doctorat .Université des frères Mentouri Constantine.141p.
- Pejić B, Maksimović L, Škorić D, Milić S, Stričević R, Čupina (2009).** Effect of water stress on yield and evapotranspiration of sunflower. *HELIA*, 32 (51): 19-32.
- Pekcan V, Evcı G, Yilmaz MI, Balkan Nalcaiyi AS, Çulha Erdal S, Cicek N, Ekmekci Y, Kaya Y(2015).** Drought effects on yield traits of some sunflower inbred lines. *Agriculture & Forestry*. 61(4):101-107.

- Perrin JL (1992).** Détermination de l'altération. In manuel des corps gras. Ed. Technique et documentation. Lavoisier. 2: 1201-1204.
- Petcu E, Stanciu M, Stanciu D, Raducanu F (2008).** Physiological traits for quantification of drought tolerance in sunflower. Crop Production- Physiology. Proc. 17th. International Sunflower Conference. Córdoba, Spain.
- Pourmohammad A, Toorchi M, Alavikia SS, Shakiba MR (2016).** Estimation of genetic parameters for yield and yield components in sunflower under normal and stress water deficit. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 22(3):426-430
- Prevost A (1987).** L'huile de tournesol aujourd'hui. Revue Française des Corps Gras. 34 : 183-192.
- Radhouane L, Aissa N, Romdhane L (2014).** Effets d'un stress hydrique appliqué à différents stades de développement sur l'aspect quantitatif et qualitatif des semences chez un écotype autochtone de sorgho grain (*Sorghum bicolor*). Journal of Applied Biosciences. 74:6149– 6156.
- Ramanjulu S, Bartels D (2002).** Drought and desiccation-induced modulation of gene expression in plants. Plant Cell Environ. 25:141–151.
- Ramaraj B. (2007).** Cross linked poly (vinyl alcohol) and starch composite films: Study of their physic mechanical, thermal and swelling properties. Journal of Applied Polymer Science. 103 (2): 1127-1132.
- Rastoin JL, Benabderrazik EH (2014).** Céréales et oléoprotéagineux au Maghreb. Pour un co-développement de filières territorialisées. Institut de prospective économique du monde Méditerranéen.32p 32 page.
- Razi H, Assad MT (1999).** Comparison of selection criteria in normal and limited irrigation in sunflower. Euphytica, 105: 83-90.
- Reddy AR, Chaitanya KV, Vivekanandan M (2004).** Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. J. Plant Physiol.161: 1189–1202.
- Riccioni G, Bucciarelli T, Mancini B, Di Ilio C, Capra V, D'Orazio N (2007).** The role of the antioxidant vitamin supplementation in the prevention of cardiovascular diseases. Expert Opinion on Investigational Drugs. 16 (1): 25-32.
- Robelin M (1967).** Action et arrière-action de la sécheresse sur la croissance et la production du tournesol. Annales Agronomiques. 18 : 579-599.

- 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 doctorat : Institut National Polytechnique de Toulouse. 305p.
- Roche J, Hewezi T, Bouniols A, Gentzbittel L (2009).** Real-time PCR monitoring of signal transduction related genes involved in water stress tolerance mechanism of sunflower. *Plant Physiology and Biochemistry* 47: 139–145.
- Rombaut N(2013).** Etude comparative de trois procédés d'extraction d'huile : aspects qualitatifs et quantitatifs : application aux graines de lin et aux pépins de raisin. Thèse de doctorat. Université de Technologie Compiègne. 255p.
- Rong-hual L, Pei-pol G, Baumz M, Grando S, Ceccarelli S (2006).** Evaluation of Chlorophyll Content and Fluorescence Parameters as Indicators of Drought Tolerance in Barley. *Agricultural Sciences in China*. 5(10): 751-757.
- Rouilly A, Meriaux A, Geneau C, Silvestre F, Rigal L (2006).** Film extrusion of sunflower protein isolate. *Polymer Engineering and Science*. 46 (11): 1635-1640.
- Rousset P(2008).** Guide technique pour une utilisation énergétique des huiles végétales. – Brasília : Cirad, 288p.
- Ruiz RA, Maddonni GA (2006).** Sunflower Seed Weight and Oil Concentration under Different Post-Flowering Source-Sink Ratios. *Crop Sci*. 46:671–680.
- Sadras VO, Reynolds MP, Vega AJ, Petrie PR, Robinson R (2009).** Phenotypic plasticity of yield and phenology in wheat, sunflower and grapevine. *Field Crops Research* 110: 242–250.
- Sadras VO, Villalobos FJ (1996).** Physiological characteristics related to yield improvement in sunflower (*Helianthus annuus* L.). In: Genetic improvement of field crops. Ed.G.Slafer, Marcel Dekker, New York, p.287-320.
- Sanou J, Dabire F (2004).** Progrès dans la sélection pour la tolérance du maïs au stress hydrique au Burkina. In : *Breeding & Seed Production* section II: 176-201.
- Scheiner JD, Lavado RS (1999).** Soil Water content, absorption of nutrient elements, and responses to fertilization of sunflower: a case study. *Journal of Plant nutrition* 22:369-377.
- Schneiter AA, Miller JF (1981).** Description of Sunflower Growth Stages. *Crop Sci*. 21:901-903.
- Scofield T, Evans J, Cook MG, Wardlow IF (1988).** Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat. *Aust.J. Plant physiol*. 4: 785 - 797.

- Seassau C (2010).** Etiologie du syndrome de dessèchement précoce du tournesol : implication de *Phoma macdonaldii* et interaction avec la conduite de culture. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse. 209p.
- Seiler GJ (1997).** Anatomy and morphology of sunflower. In: Sunflower Technology and Production. Agron. 35. pp. 67-111. Ed. Schneiter, A.A.
- Shabala S, Pottosin I (2014).** Regulation of potassium transport in plants under hostile conditions: implication for abiotic and biotic stress tolerance. *Physiol Plant*. 151: 257–279.
- Shafi M, Bakht J, Yousaf M, Aman Khan M (2013).** Effects of irrigation regime on growth and seed yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Pakistan Journal of Botany*. 45(6): 1995-2000.
- Singh V, Yadav BS, Bhunia SR, Singh V (1997).** Effect of planting date and irrigation management on growth and yield of spring sunflower (*Helianthus annuus*). *Indian J. Agric. Sci.* 6: 48-50.
- Sinha I, Buttar GS, Brar AS (2017).** Drip irrigation and fertigation improve economics, water and energy productivity of spring sunflower (*Helianthus annuus* L.) in Indian Punjab. *Agricultural Water Management*. *Agricultural Water Management* 185: 58–64.
- Škorić D (1992).** Achievements and future directions of sunflower breeding. *Field Crops Research* 30: 231-270.
- Skorić D, Joksimovic J, Jocić S, Jovanovic D, Marinkovic R, Hladni N, Gvozdencic S, (2005).** Évaluation de la valeur des propriétés productives des hybrides de tournesol. Actes de l'Institut scientifique des cultures de plein champ et de culture légumineuse, 41: 21-33.
- Smirnoff N (1993).** The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation. *New Phytologist*. 125: 27-58.
- Talha M, Osman F (2009).** Effect of soil water stress on water economy and oil composition in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *The Journal of Agricultural Science*. 84(1): 49-56.
- Temagoult M (2009).** Analyse de la variabilité de la réponse au stress hydrique chez des lignées recombinantes de Tournesol (*Helianthus annuus* L.). Thèse magister. Université Mentouri, Constantine.106p.

- Tezara W, Mitchall V, Driscoll SP, Lawlor DW (2002).** Effects of water deficit and its interaction with CO₂ supply on the biochemistry and physiology of photosynthesis in sunflower. *Journal of Experimental Botany*. 53:1781-1791.
- Tezara W, Mitchall V, Driscoll SP, Lawlor DW (2002).** Effects of water deficit and its interaction with CO₂ supply on the biochemistry and physiology of photosynthesis in sunflower, *J. Exp. Bot.* 375: 1781–1791.
- Thakur PS, Rai VK (1982).** Effect of water stress on protein content in two maize cultivars differing in drought resistance. *Biologia Plant (Praha)*. 24:96-100.
- Turner NC (1988).** Measurement of plant water status by the pressure chamber technique. *Irrigation science*. 9: 289-308.
- Unger PW (1983).** Irrigation effect on sunflower growth, development and water use. *Field Crop Res.* 7: 181-194.
- Vear F (1992).** Le tournesol. In: Gallais A, Bannerot H (Eds). *Amélioration des espèces végétales cultivées*. INRA, Paris, pp.146-160.
- Vega AJ, Hall AJ (2002).** Effects of Planting Date, Genotype and Their Interactions on Sunflower Yield. Determinants of Oil-Corrected Grain Yield. *Crop Sci.* 42:1191–1201.
- Wang W, Vinour B, Altman A (2003).** Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*. 218: 1–14.
- Wey J, Ibrahima S (2007).** Cultures de diversification. Étude de faisabilité du soja et du tournesol dans la zone cotonnière du Nord Cameroun. Résultats de la campagne expérimentale 2006. Institut de Recherche Agricole pour le développement. Centre Nord Station polyvalente de Garoua.
- Wolff JP(1968).** Manuel d'analyse des corps gras. Paris, Azoulay : 517p.
- Zangenberg M, Hansen HB, Jorgensen JR, Hellgren LI (2004).** Cultivar and year-to-year variation of phytosterol content in rye (*Secale cereale* L.). *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 52 (9): 2593-2597.
- Zeevaart JAD, Creelman RA (1988).** Metabolism and physiology of abscisic acid. *Annu Rev Plant Physiol*. 39: 439–473.
- Zheljazkov VD, Vick BA, Ebelhar MW, Buehring N, Baldwin BS, Astatkie T, Miller JF (2008).** Yield Oil Content and composition of sunflower Grown at multiple locations in Mississippi. *Agronomy Journal*. 100, (3).

Annexes

Annexe 1

Stades repères du tournesol sous serre



Phase levée





Phase végétative



Phase bouton floral



Phase floraison



Phase maturité

Annexe 2

Stades repères de tournesol en plein champ Relizane



Phase levée





Phase végétative



Phase bouton florale



Phase floraison

Annexe 3

Stades repères du tournesol Tiaret



Phase végétative



Phase floraison

Annexe 4

Répartition des classes des pH selon les normes DIAEA /DRHA /SEEN (2008)

Classe du sol	pH
Acide	< 6.0
Faiblement acide	6.0 - 6,5
Neutre	6,5 - 7,3
Faiblement basique	7,3 - 7,8
Moyennement basique	7,8 - 8,5
Tendance alcaline	8,5 – 9.0
Très alcaline	> 9.0

Classification des sols en fonction de la conductivité électrique (Aubert, 1978)

Degrés de salinité d sol	CE (mS/cm) 25°C
Non salé	0-0.6
Peu salé	0.6- 1.2
salé	1.2- 2.4
Très salé	2.4- 6
Extrêmement salé	6 <

Echelle du calcaire (Baize, 1998)

Calcaire CaCO ₃ (%)	Classe de sols
≤01	Non calcaire
01 ≤CaCO ₃ ≤05	Peu calcaire
05≤CaCO ₃ ≤25	Modérément calcaire
25≤CaCO ₃ ≤50	Fortement calcaire
50≤CaCO ₃ ≤80	Très fortement calcaire
>80	Excessivement calcaire

Norme d'interprétation selon ITA 1977

Taux de la matière organique	Classe de sols
<1	Très pauvre
1à2	Pauvre
2 à 4	Moyenne
>4	Riche

WATER STRESS EFFECT ON PHYSIOLOGICAL, MORPHOLOGICAL PARAMETERS AND THE YIELD OF FIVE SUNFLOWER CULTIVARS (*Helianthus annuus* L.) GROWN UNDER GREENHOUSE

HABIBA LAHOUEL¹, WAFFA REZZOUG¹, DYHIA BOUKIRAT¹,
HICHAM BERRABAH^{1*} AND NADIA REBATI¹

¹Faculty of Life and Natural Sciences, Ibn Khaldoun University, 14000, Tiaret, Algeria.
Email: hichember55@gmail.com

Received: 14 February 2019

Accepted: 19 April 2019

Published: 30 April 2019

Original Research Article

ABSTRACT

Sunflower (*Helianthus annuus* L.) is one of the world's major oilseeds species however, it faces the problem of summer drought which coincides with the end of its cycle inducing yield decrease. The aim of this study is to identify morpho-physiological traits that can be used as selection criteria in hybridization programs for stress tolerance. In this context, a greenhouse essay has been carried out using five oleic sunflower genotypes arranged in a randomized complete block design with two water regimes; water regime 2:100% of field capacity and water regime 1:30% of field capacity. The obtained results show that water stress affects many measured parameters such as relative water content, stomatal conductance, stem diameter and yield components (seed number per head and 100-seed weigh). Genotype effect was significant for stomatal conductance, number of leaves per plant and yield components. However, the effect of the genotype x water regime interaction was significant only for the number of leaves per plant, yield and seed number per head.

Keywords: Sunflower; *Helianthus annuus* L; drought; yield; greenhouse.

INTRODUCTION

Sunflower is one of the most important oilseed species whose production and global yield oscillate around 27 million tones and 12q/ha respectively. It is simple to manage, flexible and vigorous with low inputs, rich in oil and drought resistant [1,2]. Sunflower oil is considered a premium oil due to its pale color, high content of unsaturated fatty acids, lack of linolenic acid and trans fatty acids, neutral flavor, high resistance to oxidation, high smoke point and high diversity of fatty acid composition [1]. In addition, sunflower cropping offers a wide range of options for adaptation [3]. The importance of hybrid cultivars in sunflower

has recently increased because they are more stable, very self-fertile with higher yields and more uniform at maturity [4].

However, during the summer period particularly at the end of flowering period and the beginning of grain filling stage, sunflower is confronted to high evaporative demand for the atmosphere and low availability of water in soil in dry countries which can disrupts the water balance causing water deficit which is one of the most common environmental constraints [5]. According to Flagella et al. [6], the floral button stage (R1) and other flowering stages are critical for water stress in sunflower. Water deficit affects the water relations of

the plant, including relative water content and turgor. It also induces stomatal closure which limits gas exchange mainly carbon atmospheric assimilation and reduces transpiration. Thus, drought stress has negative effects on mineral nutrition in particular nutrients absorption and transport [7] which can penalize growth and photosynthesis, the main physiological functions involved in yield elaboration [5].

Drought is the most important crop production limiting factor in the changing climate scenario worldwide and in Algeria, its intensity is predicted to increase in future [8]. Because of its complexity, stress tolerance is may be the most difficult trait to be improved through conventional plant improvement. The development of stress tolerant cultivars is actually a major challenge. In this context, The present paper study the response of 5 sunflower genotypes to water stress. The objective is to identify morpho-physiological traits that can be used as selection criteria in hybridization programs for stress tolerance and that can be measured quickly.

MATERIALS AND METHODS

Plant Material

Five oleic sunflower genotypes (commercial hybrid) were used in our experiment; four of them were developed by Syngenta France in particular (Nutrasol: V4, N.K Ferti: V3, Extrasol: V5, Aurasol: V2) and one local genotype (V1).

Essay Conduct and Experimental Design

Seeds of the selected varieties were germinated in a stove at 25°C for 48 hours then they were planted manually at a depth of 2-3 cm in PVC cylinders (11 cm diameter and 60 cm height) containing a substrate

made up of 40% soil, 40% compost and 20% sand as described by [16,30]. This substrate is previously sieved, air-dried and disinfected. Plants were cultured in a glass house (temperature of $25 \pm 2^\circ$ and $60 \pm 5\%$ relative humidity) in randomized complete block design with two water regimes; water regime 2 (WR2): 100% of field capacity and water regime 1 (WR1): 30% of field capacity. Each water regime includes three repetitions where each repetition covers the five genotypes and each genotype is represented by five plants. Plants were irrigated to the field capacity every two days from sowing to flower bud formation stage (R1), at this stage the water deficit was applied on half of plants "stressed plants". The other plants received enough water to maintain the soil at field capacity "well irrigated plants". In order to stimulate natural water stress similar to that of the field, we reduced progressively the irrigation from 100% to 30% of field capacity during 15 days then the stressed plants were maintained irrigated to 30% of field capacity until harvest. In both water regimes; cylinders have been weighed and water loss was carefully replaced.

Measurement Stage and Studied Parameters

Physiological traits

Physiological measurements were carried out on the youngest and fully developed leaf and were focused mainly on:

Relative water content (RWC)

Measured following Barrs method [9]; leaves were weighed directly (FW, fresh weight) then immersed in test tubes filled with distilled water. The tubes were placed in dark and cool place during 24 hours and the saturated leaves weigh was recorded

(TW, turgid weight). Finally, the sample is dried at 85°C stove and weighed after 48 hours (DW, dry weight). The RWC is evaluated following the formula:

$$\text{RWC (\%)} = (\text{FW}-\text{DW}) / (\text{TW}-\text{DW}) * 100.$$

Chlorophyll content

Determined according to Linchtenthaler and Welburn [10]. 100 mg of leaves were crushed in 8 ml of diluted acetone (80%). The crushed material was filtered in a test tube then the tube volume was completed to 10 ml by adding diluted acetone (80%). The absorbances were read with a spectrophotometer at 645 nm, 663 nm wavelengths. Chlorophyll content determination was realized according to the formula:

$$\text{Chl t (mg.g}^{-1}\text{ FW)} = 17,32 \times \text{DO645} + 7,18 \times \text{DO663}.$$

Stomatal conductance

Measured by an AP4 DELATA-T DEVICES CAMBRIDGE UK automatic porometer.

Morphological parameters

Morphological measurements concerned leaves number per plant, plant height (cm), stem diameter (mm) and head diameter (cm). Physiological and morphological measurements were carried out for both well irrigated and stressed plants at the end of flowering stage. Counting of seed number per head, weighing of 100 seed (g) and seed yield per plant estimation (g/plant) were carried out at the harvest.

Statistical Analysis

Two-factorial ANOVA was carried out to determine the effect of water regime on the

physiological and morphological parameters and yield components using SPSS statistical program (version 16).

RESULTS

Physiological Parameters

Analysis of variance reveals a significant effect of water regime on relative water content (RWC). However, the difference between genotypes and genotype x water regime interaction was not significant (Table 1). Relative water content decreases with increased water stress (Fig. 1a). In addition, water regime, genotype and the interaction between these two factors do not have a significant effect on chlorophyll content (Table 1).

The results illustrated in Table 1 show that genotype and water regime has a significant influence on stomatal conductance whereas, genotype x water regime interaction has not revealed any significant differences. The most important value of stomatal conductance is recorded in genotype 5 ($20.12 \text{ mM.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) in stressed plants while the lowest value is reported in genotype 3 ($2.83 \text{ mM.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) in well irrigated plants (Fig. 1c).

Morphological parameters

Our results show that water regime has a significant effect on stem diameter, on head weight and diameter (Table 1). Stem diameter of stressed plants is lower than that of unstressed plants with values ranging between 11.3 and 14.1 mm for WR2, 11.3 and 12.0 mm for WR1 (Fig. 2d). Thus, head weight and diameter have experienced a remarkable reduction under water stressed conditions (Fig. 2e and f).

Table 1. Results of variance analysis of morphological traits, seed yield and yield components of sunflower genotypes under two water regimes in greenhouse conditions

SV	RWC	CHT	SC	NLP	HP	SD	HD	HW	NSH	100SW	SY
Gen	1,015 ^{n.s}	0,173 ^{n.s}	6,913 ^{***}	2,773 [*]	1,611 ^{n.s}	2,715 [*]	24,84 ^{***}	2,29 ^{n.s}	30,009 ^{***}	6,845 ^{***}	5,427 ^{***}
WR	12,718 ^{***}	0,093 ^{n.s}	17,781 ^{***}	1,943 ^{n.s}	0,549 ^{n.s}	3,749 [*]	53,243 ^{***}	55,171 ^{***}	186,142 ^{***}	14,718 ^{***}	173,441 ^{***}
interaction	2,429 ^{n.s}	0,613 ^{n.s}	0,903 ^{n.s}	2,565 [*]	1,36 ^{n.s}	4,642 ^{**}	3,681 ^{**}	4,518 ^{**}	5,443 ^{***}	0,103 ^{n.s}	3,641 ^{**}

SV: source of variation, RWC: relative water content, CHT: chlorophyll content, SC: stomatal conductance, NLP: number of leaves per plant, HP: plant height, SD: stem diameter, HD: head diameter, HW: head weight, NSH: number of seeds per head, 100SW: weight of 100 seeds, SY: seed yield per plant,

*Gen: genotype, WR: water regime, n.s: not significant, *: significant, **: highly significant, ***: very highly significant*

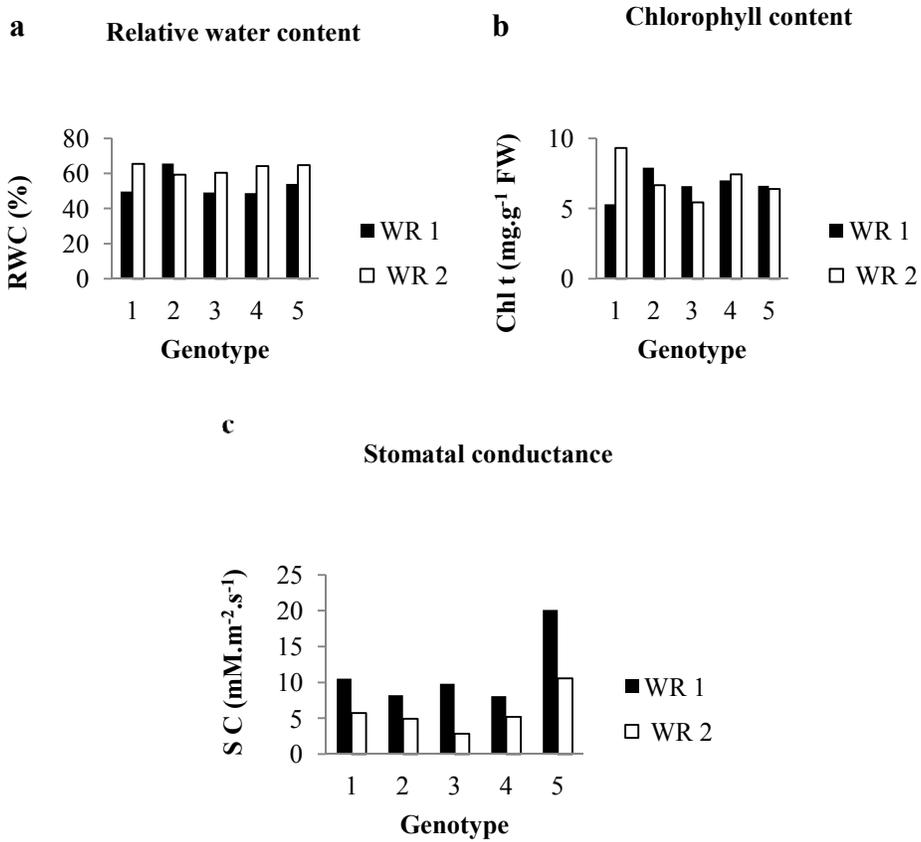
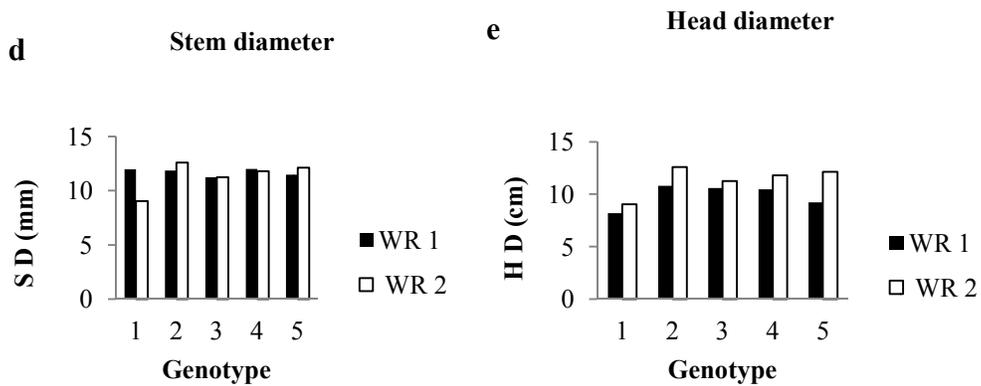


Fig. 1. histogram of the effect of water regime and genotype on physiological parameters of sunflower (*Helianthus annuus* L.): a relative water content (%), b chlorophyll content (mg.g⁻¹ FW), c stomatal conductance (mM.m⁻².s⁻¹)



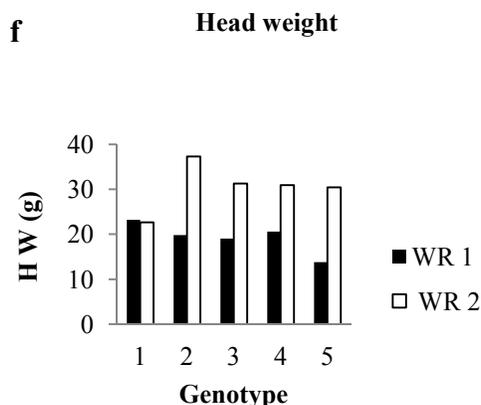


Fig. 2 histogram of the effect of water regime and genotype on some morphological parameters of sunflower (*Helianthus annuus* L): d stem diameter (mm), e head diameter (cm), f head weight (g)

Plant height and leaves number per plant were not influenced by water regime. The difference between genotypes was significant for number of leaves per plant, stem diameter and head diameter. The interaction between the two factors genotype x water regime had a significant effect on the number of leaves per plant, stem diameter, head diameter and head weight (Table 1).

Seed yield and Yield Components

The difference between the two water treatments WR1 and WR2 is highly significant for yield and yield components (number of seeds per head and 100 seed weight) for all genotypes (Table 1). The interaction genotype x water treatment is also responsible for variation in yield and number of seeds per head (Table 1).

The number of seeds per head varied between 154 and 295 in both genotypes 1 and 3 in WR1, in WR2 it varied between 217 and 537 in the same genotypes (Fig. 3g). In addition, 100 seeds weight ranged between 2.54 and 5 g in genotypes 4 and 1 in WR1

and between 3.61 and 5.3g for the same genotypes in WR2 (Fig. 3h). Water regime 2 produces the highest yield with a value of 18.9 g/plant recorded in genotype 3 while the lowest yield is produced by water regime 1 with a value of 5.98 g/plant recorded in genotype 4 (Fig. 3k).

DISCUSSION

Water stress is one of the leading causes of crop loss worldwide [11] affecting plant establishment, growth and development by disturbing various physiological, biochemical and morphological processes [12].

Relative water content (RWC) is the most trait commonly used to evaluate water status of plants [13]. The Different levels of water stress reduce RWC leading to a progressive and significant reduction in stomatal conductance and photosynthesis [13]. In our experiment, water stress reduces RWC which is in agreement with the results found by Andrade et al, Darvishzadeh et al. Poormohammad Kiani et al. [14,15,16].

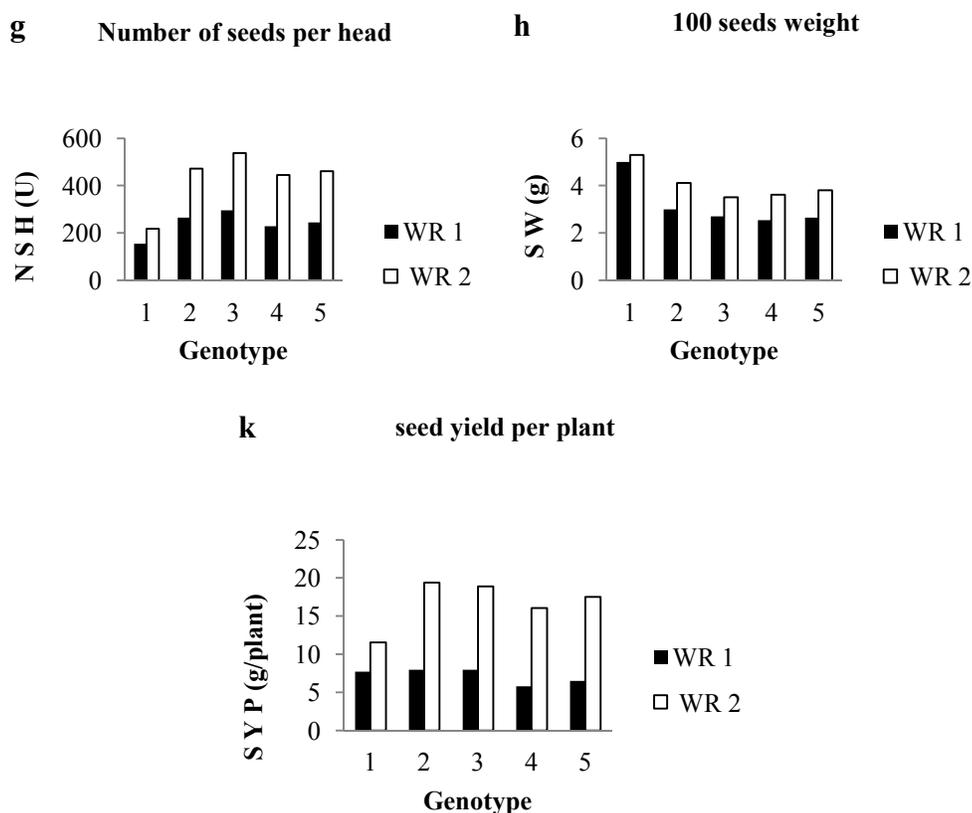


Fig. 3. Histogram of the effect of water regime and genotype on seed yield and yield components of sunflower (*Helianthus annuus* L.): g number of seeds per head, h 100 seeds weight (g), k seed yield per plant (g/plant)

Also, in our experiment we found that the difference in chlorophyll content between both water regimes was not significant. This result is confirmed by Nezami et al. [17]. However, Andrade et al. [14] found that severe water stress conditions induce significant reduction in chlorophyll content in sunflower. In addition; according to Manivannan et al. [18] drought stress lowered the total chlorophyll content significantly.

Stomatal conductance measurement informs us about the degree of stomata

closure [19] which is one of the early responses to water deficit [20]. Its purpose is to protect the plant against dehydration but at the same time causes a decrease in carbon assimilation which disrupts photosynthesis [21]. Our results are consistent with the results of Moraes et al. [22] and Maury et al. [23] who found that stomatal conductance was negatively affected by water stress.

According to Andrade et al. [14], morphological traits analysis is useful for studying plant adaptation to environmental

stress such as water deficit. Unlike the results found in most experiments where water deficit induced a reduction in plant height, obtaining similar heights of stressed and well-irrigated plants can be explained by the growing conditions under a greenhouse that is characterized by a short height which prevent the development of stems in length masking the water stress effect. Our results are contrary to the result of Manivannan et al. [18].

According to Hall [24], leaves number is a trait fixed genetically and slightly affected by environmental factors. According to our results, leaves number has not changed between stressed and unstressed plants which are consistent with the results of Darvishzadeh et al. Poormohammad Kiani et al. [15,25]. However, it has varied from genotype to another which is confirmed by the same authors. The interaction between the two factors; genotype and water regime were significant which is confirmed by [15].

According to Thakur and Rai [26], water deficit causes a delay in plant growth resulting a reduction in plant height and stem diameter. In this context, our results are confirmed by those of Nezami et al. Poormohammad Kiani et al. [17,25].

Based on our experiment, water regime, genotype and interaction of these two factors have negatively influenced the head diameter and weight which is in agreement with the results of Darvishzadeh et al, Nezami et al. and Poormohammad Kiani et al. [15,17,25].

The processes involved in crop yield elaboration are influenced by two types of factors; genetic factors (intrinsic to the plant) and environmental factors. Genotype-environment interactions play also an

important role. Among the morphological characteristics involved in yield elaboration, we cite biomass production and yield components [27]. According to Fahad et al. [28]; significant yield losses have been reported in major field crops due to drought stress. In addition; the problem of low yields which due to water stress in sunflower was also set off by different authors in particular [8, 29,30,31].

The reduction in seed number per head due to water stress observed during our experiment can be explained on one hand by the decrease of carbon amount transferred to the head and on the other hand by the direct effect of low water potential on ovarian metabolism and the modifications in hormonal balance of flowers [32]. This result is confirmed by Flagella et al, Nezami et al, Poormohammad Kiani et al and Buriro et al. [6,17,30,33].

The reduction in weight of seeds under water stress conditions is confirmed by Pekcan et al, Flenet et al, Chimenti et al and Elsheikh et al. [31,34,35,36]. Based on our results, the yield is influenced by genotype and genotype x water regime interaction, which is affirmed by the works of Darvishzadeh et al, Poormohammad Kiani et al. [15,25].

CONCLUSION

Our results indicate that the application of severe water stress on a greenhouse sunflower culture at the reproductive stage induces a very highly significant effect on some physiological parameters including relative water content and stomatal conductance. By the same, the effect is significant on morphological parameters such as stem diameter, head weight and head diameter. Water stress also implies a lowering of yield components. According to

our results, genotypic effect was remarkable for stomatal conductance and yield components. Genotype x water regime interaction was significant only for yield and seed number per head.

COMPETING INTERESTS

Authors have declared that no competing interests exist.

REFERENCES

1. Ebrahimi A. Contrôle génétique de la qualité des graines chez le tournesol (*Helianthus annuus* L.) soumis à la sécheresse. Université De Toulouse. 2008;177.
2. Lecomte V, Nolot JM. Place du tournesol dans le système de culture. Innovations Agronomiques. 2011;14: 59-76.
3. Debaeke P, Casadebaig P, Flenet F, Langlade N. Sunflower crop and climate change: Vulnerability, adaptation, and mitigation potential from case-studies in Europe. OCL journal. 2017;24(1):D102.
4. Kaya Y, Atakisi IK. Combining ability analysis of some yield characters of sunflower (*Helianthus annuus* L.). Helia. 2004;27(41):75–84.
5. Maury P, Langlade N, Grieu P, Rengel D, Sarrafi A, Debaeke P, Vincourt P. Ecophysiologie et génétique de la tolérance à la sécheresse chez le tournesol. Innovations Agronomiques. 2011;14:123-138.
6. Flagella Z, Rotunno T, Tarantino E, Di Caterina R, De Caro A. Changes in seed yield and oil fatty acid composition of high oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids in relation to the sowing date and the water regime. European Journal of Agronomy. 2002;17:221–230.
7. Lisar SYS, Motafakkerzad R, Hossain MM, Ismail MM, Rahman IMM. Water stress in plants: Causes, effects and responses. Introductory Chapter in Book: Water Stress, Publisher: In Tech: Rijeka, Croatia, Editors: Ismail MM. Rahman, Hiroshi Hasegawa. 2012;1–14.
8. Hussain M, Farooq S, Hasan W, Ul-Allah S, Tanveer M, Farooq M, Nawaz A. Drought stress in sunflower: Physiological effects and its management through breeding and agronomic alternative. Agricultural Water Management. 2018;201:152–166.
9. Barrs H. Determination of water deficit in plant tissues. In: Water Deficit and Plant growth, Koslowski, T. (éd.). Academy Press, New York. 1968;235-368.
10. Linchtenthaler HK, Welburn AR. Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. Biochem. Soc. Trans. 1983;11:591-592.
11. Wang W, Vinour B, Altman A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: Towards genetic engineering for stress tolerance. Planta. 2003;218:1–14.
12. Jaleel CA, Gopi R, Sankar B, Gomathinayagam M, Panneerselvam R. Differential responses in water use efficiency in two varieties of *Catharanthus roseus* under drought stress. Comp. Rend. Biol. 2008;331: 42–47.
13. Tezara W, Mitchall V, Driscoll SP, Lawlor DW. Effects of water deficit and its interaction with CO2 supply on the biochemistry and physiology of photosynthesis in sunflower. J. Exp. Bot. 2002;53:1781-1791.
14. Andrade A, Vigliocco A, Alemanno S, Llanes A, Abdala G. Comparative

- morpho-biochemical responses of sunflower lines sensitive and tolerant to water stress. *American Journal of Plant Sciences*. 2013;4:156-167.
15. Darvishzadeh R, Hatami Maleki H, Pirzad AM, Kholghi MB, Abdollahi Mandoulakani B. Genetic analysis of yield and yield related traits in sunflower (*Helianthus annuus* L.) under well-watered and water stressed conditions. *Genetika*. 2014;46(2):369-384.
 16. Poormohammad Kiani S, Talia P, Maury P, Grieu P, Heinz R, Perrault A, Nlshinakamasu V, Hopp E, Gentzbittel L, Paniego N, Sarrafi A. Genetic analysis of plant water status and osmotic adjustment in recombinant inbred lines of sunflower under two water treatments. *Plant Sci*. 2007a;172:773-787.
 17. Nezami A, Khazaei HR, Boroumand Rezazadeh Z, Hosseini A. Effects of drought stress and defoliation on sunflower (*Helianthus annuus*) in controlled conditions. *Desert*. 2008;12: 99-104.
 18. Manivannan P, Rabert GA, Rajasekar M, Somasundaram R. Drought stress-induced modification on growth and pigments composition in different genotypes of *Helianthus annuus* L. *Current Botany*. 2014;5:7-13.
 19. Grieu P, Maury P, Debaeke P, Ahmad Sarrafi A. Améliorer la tolérance à la sécheresse du tournesol: Apports de l'écophysiologie et de la génétique. *Innovations Agronomiques*. 2008;2: 37-51.
 20. Assmann SM, Snyder JA, Lee YJ. ABA-deficient (*aba1*) and ABA-insensitive (*abi1-1*, *abi2-1*) mutants of *Arabidopsis* have a wild-type stomatal reponse to humidity. *Plant Cell Environ*. 2000;23:387-395.
 21. Cechin I, Rossi SC, Oliveira VC, Fumis TF. Photosynthetic responses and proline content of mature and young leaves of sunflower plants under water deficit. *Photosynthetica*. 2006;44(1):143-146.
 22. Moraes LAC, Mertz-Henning LM, Moreira A. Physiological parameters and growth in sunflower cultivars under drought stress at controlled conditions. XXI Reuniao Nacional de Pesquisa de Girassol. IX Simposio Nacional sobre a Cultura do Girassol. de outubro, Londrina, PR, Brazil. 2015;28-29.
 23. Maury P, Berger M, Mojayad FC, Planchon C. Leaf water characteristics and drought acclimation in sunflower genotypes. *Plant and Soil*. 2000;223: 153–160.
 24. Hall AJ. Sunflower ecophysiology: Some unresolved issues. 15e conference international tournesol. Oleagineux Corps gras Lipides. 2001;8:15–21.
 25. Poormohammad Kiani S, Maury P, Nouri L, Ykhlef N, Grieu P, Sarrafi A. QTL analysis of yield-related traits in sunflower under different water treatments. *Plant Breeding*. 2009;128: 363-373.
 26. Thakur PS, Rai VK. Effect of water stress on protein content in two maize cultivars differing in drought resistance. *Biologia Plant (Praha)*. 1982;24:96-100.
 27. Radhouane L, Aissa N, Romdhane L. Effets d'un stress hydrique appliqué à différents stades de développement sur l'aspect quantitatif et qualitatif des semences chez un écotype autochtone de sorgho grain (*Sorghum bicolor*). *Journal of Applied Biosciences*. 2014;74:6149– 6156.
 28. Fahad S, Bajwa AA, Nazir U, Anjum SA, Farooq A, Zohaib A, Sadia S,

- Nasim W, Adkins S, Saud S, Ihsan MZ, Alharby H, Wu C, Wang D, Huang J. Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8: 1147.
29. Petcu E, Stanciu M, Stanciu D, Raducanu F. Physiological traits for quantification of drought tolerance in sunflower. *Crop Production-Physiology*. Proc. 17th. International Sunflower Conference, Córdoba, Spain; 2008.
 30. Poormohammad Kiani S, Grieu P, Maury P, Hewezi T, Gentzbittel L, Sarrafi A. Genetic variability for physiological traits under drought conditions and differential expression of water stress-associated genes in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Theoretical and Applied Genetic*. 2007b;114:193-207.
 31. Pekcan V, Evcı G, Yılmaz MI, Balkan Nalcaiyi AS, Çulha Erdal S, Cicek N, Ekmekci Y, Kaya Y. Drought effects on yield traits of some sunflower inbred lines. *Agriculture & Forestry*. 2015;61(4):101-107.
 32. Connor DJ, Sadras VO. Physiology of yield expression in sunflower. *Field Crops Res*. 1992;30:333-389.
 33. Buriro M, Sanjrani AS, Chachar QI, Chachar NA, Chachar SD, Buriro B, Gandahi AW, Mangan T. Effect of water stress on growth and yield of sunflower. *J. Agric. Technol*. 2015;11(7):1547–1563.
 34. Flenet F, Bouniols A, Saraiva C. Sunflower response to a range of soil water contents. *European Journal of Agronomy*. 1996;5:161-167.
 35. Chimenti CA, Pearson J, Hall AJ. Osmotic adjustment and yield maintenance under drought in sunflower. *Field Crops Research*. 2002;75:235-246.
 36. Elsheikh ERA, Schultz B, Adam HS, Haile AM. Crop water productivity for sunflower under different irrigation regimes and plant spacing in Gezira Scheme. *Sudan. J. Agri. Envir. Int. Develop*. 2015;109(2):221–233.