



HAL
open science

Étude de la tolérance au déficit hydrique et au stress thermique chez le carthame (*Carthamus tinctorius* L.) et leurs effets sur le rendement et la qualité des huiles

Kamel Zemour

► To cite this version:

Kamel Zemour. Étude de la tolérance au déficit hydrique et au stress thermique chez le carthame (*Carthamus tinctorius* L.) et leurs effets sur le rendement et la qualité des huiles. Sciences agricoles. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT; Université Ibn Khaldoun de Tiaret. Faculté des Mathématiques et de l'informatique, 2022. Français. NNT : 2022INPT0021 . tel-04192849

HAL Id: tel-04192849

<https://theses.hal.science/tel-04192849v1>

Submitted on 31 Aug 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Sciences des Agroressources

Présentée et soutenue par :

M. KAMEL ZEMOUR

le mardi 5 avril 2022

Titre :

Etude de la tolérance au déficit hydrique et au stress thermique chez le carthame (*Carthamus tinctorius* L.) et leurs effets sur le rendement et la qualité des huiles.

Ecole doctorale :

Sciences de la Matière (SDM)

Unité de recherche :

Laboratoire de Chimie Agro-Industrielle (LCA)

Directeur(s) de Thèse :

M. OTHMANE MERAH

M. AHMED ADDA

Rapporteurs :

M. CHAKER EL KALAMOUNI, UNIVERSITE DE LA REUNION

MME ASMA EL ZEREY-BELASKRI, UNIV SCIENCES ET TECHNOLOGIE D'ORAN

Membre(s) du jury :

MME MARTINE URRUTIGOÏTY, TOULOUSE INP, Président

M. ABDELKADER DELLAL, UNIVERSITE IBN KHALDOUN TIARET, Invité(e)

M. AHMED ADDA, UNIVERSITE IBN KHALDOUN TIARET, Membre

M. HACHEMI BENHASSAINI, Université Djillali Liabes, Membre

MME JANE ROCHE, UNIVERSITE CLERMONT AUVERGNE, Membre

MME WAFFA REZZOUG, UNIVERSITE IBN KHALDOUN TIARET, Membre

M. OTHMANE MERAH, TOULOUSE INP, Membre

REMERCIEMENT

Je remercie avant tout le Grand Dieu Allah, le plus puissant, le miséricordieux...

Mes plus sincères remerciements et reconnaissances vont spécialement à mes directeurs de thèse Mr ADDA Ahmed et Mr MERAH Othmane, pour leur confiance, leur sincérité, leur rigueur, leur patience et surtout leur gentillesse. Je les remercie chaleureusement notamment pour leur aide à rédiger les articles et le manuscrit;

Je tiens à remercier vivement Mr DELLAL Abdelkader pour son aide, son encouragement, sa disponibilité et ses précieux conseils;

Mes sincères remerciements à mes trois chers enseignants pour m'avoir bien accordé un stage afin de faire mes analyses au sein de laboratoire de chimie agro-industrielle de France dans un cadre de cotutelle de thèse;

J 'exprime mes remerciements aux honorables membres du jury :

- ❖ Mme. URRUTIGOITY Martine pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse;
- ❖ Mr BENHASSAINI Hachemi, Mme REZZOUG Waffa et Mme ROCHE Jane de m'avoir accordé le temps et la patience pour évaluer mon travail;
- ❖ Mr EL KALAMOUNI Chaker et Mme EL ZEREY-BELASKRI Asma de m'avoir accordé le temps et la patience pour faire le rapport de cette thèse.

Ma gratitude ira également à Mr ADDA Mhamed, LABDELLI Amina, BOUZIDI Assia, SAYED AHMED Bouchra, OBEID Sarra, CHOUHIM Kadda, SAHLI Sofiane, Mr DERRADJI H. (INRA Alger), au personnel de la ferme expérimentale de l'Université de Tiaret -Algérie- et l'ensemble de personnels, techniciens et doctorants de laboratoire de chimie agro-industrielle (LCA) de France.

Je ne saurais oublier de remercier tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail.

DÉDICACE

Je dédie ce travail à mes chers parents (*Abdelkader, Halima*)

A ma chère femme et mes chers enfants (*Rahaf Ithar, Rayane Abd El Illah*)

A mes chers frères et sœurs

Et à toute la grande famille

Résumé

Le travail présenté opte pour un objectif d'évaluation des potentialités de tolérance d'une espèce oléagineuse aux stress abiotiques notamment le déficit hydrique et l'hyperthermie. Le carthame est l'une de ces espèces qui constituerait comme un candidat potentiel pour combler le retard enregistré dans la filière oléagineuse en Algérie.

L'étude présentée évalue le comportement, la teneur et la composition chimique de l'huile des graines mûres de trois géotypes de carthame d'origine, Française, Syrienne et Algérienne, cultivés durant trois campagnes (2015, 2016, 2017) à Tiaret. Les résultats indiquent que la teneur en huile des graines varie parmi les géotypes conduits et à travers les trois années pour se limiter à des valeurs comprises entre 22.8% et 35.68%. La composition chimique démontre que durant les trois années d'expérimentation, l'huile extraite est constituée essentiellement d'un acide gras polyinsaturé, l'acide linoléique. Les teneurs de ce composé varient entre 74.4 et 79.9%. Ces valeurs limites sont détenues par Halab et la population locale Touggourt respectivement. Il a été constaté que cette variation est conditionnée entre autres par le bilan pluviométrique annuel, où l'accroissement de la précipitation s'accompagne d'une augmentation de la teneur de cet acide. L'acide oléique détient une part importante dans cette composition pour atteindre des valeurs oscillant entre 9.8 et 14.7%. La teneur en acides gras saturés s'annonce faible, atteignant une limite maximale de 9%. Cette huile s'avère aussi riche en d'autres composants qui présentent un intérêt primordial dans la nutrition et la santé humaine comme les phytostérols et les polyphénols. Ce dernier composant se distingue par une activité antioxydante conjuguée élevée. Les stress abiotiques ont grandement amélioré le statut de phytostérols dans la partie insaponifiable de l'huile de carthame. Alors que, l'accumulation des polyphénols s'avère variable en fonction du géotype testés et le régime hydrique adopté.

L'importance de l'utilisation médicinale de l'huile de carthame serait davantage concrète grâce à ses effets anti-âges liés particulièrement à ses activités anti-élastase et anti-collagénase élaborées. Cette étude a permis aussi de mettre en évidence la richesse du tourteau de carthame en protéine qui pourrait être utilisé comme aliment de bétail.

A la lumière des résultats de ce travail, il a été révélé que l'importance attribuée au carthame et liée grandement à la richesse de ses graines en huile ainsi qu'en composantes chimiques ayant d'intérêt cosmétique et alimentaire remarquable. Par conséquent, l'adaptation de cette espèce oléagineuse dans les aires semi-arides algériennes constituerait un départ réel pour y être exploitée et introduite dans le système de production agricole national.

Mots clés : Carthame, tolérance, déficit hydrique, stress thermique, huiles.

Abstract

The presented work optes for an objective of evaluation of tolerance potentialities of oleaginous species to the abiotic stresses in particular drought and hyperthermia. Safflower is one of these species which would constitute as a potential candidate to fill the delay recorded in the oleaginous crop in Algeria.

This study evaluates the behavior, content and chemical composition of seed oil from three French, Syrian and Algerian safflower genotypes cultivated during three seasons in a semi-arid area of Algeria. The results indicate that the seed oil content varies among the conducted genotypes and throughout the three years to be limited to values between 22.8% and 35.68%. The chemical composition demonstrates that during the three years of experimentation, the extracted oil consists essentially of a polyunsaturated fatty acid, linoleic acid. The contents of this compound vary between 74.4 and 79.9%. These limited values are held by Halab and the local Touggourt population, respectively. It is found that this variation is conditioned inter alia by the annual rainfall record, where the increase in precipitation is accompanied by an increase in the content of this acid. Oleic acid has a significant part in this composition to reach values ranging between 9.8 and 14.7%. The saturated fatty acid content announces to be low, reaching a maximum limit of 9%. This oil proves to be also rich in other components that have paramount interest in the nutrition and human health as phytosterols and polyphenols. This latest component revealed that has high antioxydant activity.

The abiotic stresses largely improved the statute of phytosterols in the insaponifiable part of safflower oil. However, the accumulation of polyphenols is variable depending on the tested genotype and the adopted water regime.

The importance of the use of this oil in medicinal field would be more workable thanks to its antiaging effects related particularly to its anti-elastase and anti-collagenase activity. Also, this study allowed to highlight the richness of the meal of safflower by protein which could be used as food of livestock.

In the light of the results of this work, it was revealed that the importance attributed to safflower is largely linked to the richness of its seeds in oil as well as in chemical components having cosmetic and dietary interest. Consequently, the adaptation of this oleaginous species in the semi-arid areas of Algeria would constitute a real departure to be exploited and introduced into the national agricultural production system.

Key words: Safflower, tolerance, water deficit, thermal stress, oils.

ملخص

يهدف هذا العمل المقدم الى تقييم امكانيات تحمل نوع من النباتات ذات البذور الزيتية للإجهادات اللاحيوية ، ولا سيما نقص الماء وارتفاع الحرارة. القرطم هو أحد هذه الأنواع التي من شأنها ان تحتل مكانة محتملة لسد الفجوة المسجلة في قطاع البذور الزيتية في الجزائر.

تقيم هاته الدراسة المقدمة السلوك والكمية والتركيب الكيميائي للزيت من بذور ثلاثة انواع وراثية من القرطم ذات الأصل ، فرنسي وسوري وجزائري ، تمت زراعتها خلال ثلاث دورات زراعية (2015 ، 2016 ، 2017) في تيارت. تشير النتائج إلى أن كمية زيت البذور يتفاوت بين الاصناف و عبر السنوات الثلاث ليقتصر على قيم تتراوح بين 22.8% و 35.68%. يوضح التركيب الكيميائي أنه خلال السنوات الثلاث من التجربة ، يتكون الزيت المستخرج أساساً من حمض دهني متعدد غير مشبع ، حمض اللينوليك. محتويات هذا المركب تتراوح بين 74.4 و 79.9%. هاته القيم كانت قد سجلت لدى الصنف المحلي توقرت. وقد وجد أن هذا التباين مشروط من بين أمور أخرى بتوازن هطول الأمطار السنوي، حيث تصاحب الزيادة في هطول الأمطار من زيادة في محتوى هذا الحمض. يلعب حمض الأوليك دوراً مهماً في هذه التركيبية ، حيث تتراوح قيمته بين 9.8 و 14.7%. محتوى الأحماض الدهنية المشبعة منخفض ، حيث يصل حده الأقصى إلى 9%. لقد بينت النتائج ان هذا الزيت أيضاً غني بالمكونات الأخرى ذات الأهمية الأساسية للتغذية وصحة الإنسان مثل فيتوستيرول وبوليفينول. يتميز هذا المكون الأخير بفاعلية عالية من مضادات الأكسدة. أدت الضغوط اللاأحيائية إلى تحسين حالة الفيتوستيرول بشكل كبير في الجزء غير القابل للتصبن من زيت القرطم. حيث وجد أن تراكم البوليفينول متغير اعتماداً على التركيب الوراثي الذي تم اختياره ونظام الماء المعتمد. يعتبر أهمية هذا الزيت في الاستخدام الطبي ايجابي بفضل آثاره ضد مكافحة أعراض الشيخوخة التي تظهر بشكل خاص من خلال النشاط المضاد للإيلاستاز والكولاجيناز. أتاحت هذه الدراسة أيضاً تسليط الضوء على ثراء نخالة القرطم بالبروتين الذي يمكن استخدامه كعلف للحيوانات.

في ضوء نتائج هذا العمل ، تم الكشف عن أن الأهمية التي تُنسب إلى القرطم ترتبط إلى حد كبير بغنى بذورها بالزيت وكذلك في المكونات الكيميائية ذات الأهمية التجميلية والغذائية الواضحة. وبالتالي، فإن تكييف هذه الأنواع الزيتية في المناطق شبه الجافة من الجزائر سيشكل انطلاقة حقيقية لاستغلالها وإدخالها في نظام الإنتاج الزراعي الوطني.

الكلمات المفتاحية: القرطم ، التحمل، نقص المياه ، الإجهاد الحراري ، الزيوت

Table des matières

Introduction

Etat de connaissances

| | |
|---|----|
| 1. Rang taxonomique | 1 |
| 2. Diversité génétique de carthame | 2 |
| 3. Importance économique de carthame | 5 |
| 4. Utilisations du carthame | 6 |
| 4.1. Effets thérapeutiques de l'huile de carthame | 6 |
| 4.2. Utilisations industrielles de l'huile | 7 |
| 4.3. Utilisation médicinale et industrielle des sous-produits de carthame | 7 |
| 4.3.1. Les fleurs et feuilles | 7 |
| 4.3.2. Tourteau de carthame | 8 |
| 4.4. Le carthame dans le système de rotation culturale | 9 |
| 4.5. Effet de la date de semis sur le carthame | 10 |
| 5. L'huile, acides gras et protéines de carthame | 10 |
| 5.1. L'huile de carthame..... | 10 |
| 5.1.1. Les méthodes d'extraction de l'huile des oléagineux | 11 |
| 5.1.1.1. Méthode traditionnelle (méthode de Ghani)..... | 11 |
| 5.1.1.2. Méthode de référence (Soxhlet) | 11 |
| 5.1.1.3. Technique d'extraction par fluide supercritique | 12 |
| 5.1.1.4. Méthode d'extraction enzymatique | 13 |
| 5.1.1.5. Méthode d'extraction ultrasonique | 13 |
| 5.1.1.6. L'extraction Sono-Soxhlet | 14 |
| 5.2. Acides gras de l'huile de carthame | 15 |
| 5.3. Protéine | 17 |
| 6. Polyphénols | 18 |
| 6.1. Biosynthèse des polyphénols | 21 |
| 7. Phytostérols | 23 |
| 8. Triglycérols | 25 |
| 8.1. Biosynthèse des triglycérols | 25 |

| | |
|---|----|
| 9. Phospholipides | 27 |
| 10. Les tocophérols..... | 27 |
| 11. Caroténoïdes | 28 |
| 12. Saponines | 29 |
| 13. Biosynthèse des lipides de carthame | 29 |

Matériels et méthodes

| | |
|---|----|
| 1. Matériel végétal | 35 |
| 2. Conduite des essais | 35 |
| 2.1. Paramètres climatiques des campagnes d'expérimentation | 38 |
| 3. Les paramètres mesurés | 39 |
| 3.1. Détermination des paramètres agronomiques | 39 |
| 3.2. Détermination des paramètres physico-chimiques de l'huile des graines mûres..... | 39 |
| 3.2.1. Préparation des échantillons | 39 |
| 3.2.2. Le rendement en huile des graines mûres..... | 40 |
| 3.2.3. Détermination de la composition en acides gras de l'huile extraite | 40 |
| 3.2.4. Détermination de la teneur en phytostérols de l'huile | 41 |
| 3.2.5. Détermination de la teneur d'huile en polyphénols | 42 |
| 3.2.5.1. Extraction des polyphénols totaux | 42 |
| 3.2.5.2. Dosage des polyphénols | 43 |
| 3.2.6. Dosage de l'activité antioxydante (DPPH) de l'huile | 43 |
| 3.2.7. Détermination de l'activité Anti-âge | 43 |
| 3.2.7.1. L'activité Anti-collagénase | 43 |
| 3.2.7.2. L'activité Anti-élastase | 44 |
| 3.3. Acidité de l'huile | 44 |
| 3.4. L'indice de saponification de l'huile | 44 |
| 3.5. L'indice de peroxyde de l'huile | 45 |
| 3.6. L'indice d'iode de l'huile | 45 |
| 3.7. L'indice de réfraction de l'huile | 46 |
| 4. Dosage des protéines de tourteau des graines de carthame | 46 |
| 5. Analyse statistique | 47 |

Résultats et discussion

Influence de la nature génotypique et des facteurs environnementaux sur les paramètres morphologiques et agronomiques de carthame (*Carthamus tinctorius* L.)

| | |
|--|----|
| 1. Première année de conduite de l'essai (2015) | 48 |
| 1.1. Paramètres morphologiques de la plante | 48 |
| 1.2. Le rendement en grains et ses composantes | 49 |
| 2. Deuxième année de conduite de l'essai (2016) | 50 |
| 2.1. Paramètres morphologiques de la plante | 50 |
| 2.2. Le rendement en grains et ses composantes | 51 |
| 3. Troisième année de conduite de l'essai (2017) | 53 |
| 3.1. Paramètres morphologiques de la plante | 53 |
| 3.2. Le rendement en grains et ses composantes | 54 |
| Discussion | 55 |

Effet de facteurs environnementaux et de la nature de génotype sur les indices physico-chimiques de l'huile de carthame (*Carthamus tinctorius* L.)

| | |
|--|----|
| 1. Première année de conduite de l'essai (2015) | 61 |
| 2. Deuxième année de conduite de l'essai (2016) | 62 |
| 3. Troisième année de conduite de l'essai (2017) | 62 |
| Discussion | 64 |

Effet de facteurs environnementaux et de la nature de génotype sur la qualité chimique de l'huile des graines mûres de carthame (*Carthamus tinctorius* L.)

| | |
|--|----|
| I. Teneur en huile des graines récoltées des campagnes 2015/2016/2017 | 68 |
| II. Composition en acides gras de l'huile extraite des graines | 69 |
| 1. Première année de conduite de l'essai (2015) | 69 |
| 2. Deuxième année de conduite de l'essai (2016) | 70 |
| 3. Troisième année de conduite de l'essai (2017) | 71 |
| Discussion | 73 |
| III. Composition en phytostérols de l'huile extraite des graines de carthame | 76 |
| 1. Première année de conduite de l'essai (2015) | 78 |
| 2. Deuxième année de conduite de l'essai (2016) | 79 |
| 3. Troisième année de conduite de l'essai (2017) | 79 |

| | |
|---|----|
| Discussion | 82 |
| IV. Composition en polyphénols de l'huile extraite des graines de carthame | 84 |
| 1. Première année de conduite de l'essai (2015)..... | 85 |
| 2. Deuxième année de conduite de l'essai (2016) | 85 |
| 3. Troisième année de conduite de l'essai (2017) | 85 |
| V. Activité antioxydante et anti-âge de l'huile extraite | 86 |
| 1. Première année de conduite de l'essai (2015)..... | 87 |
| 2. Deuxième année de conduite de l'essai (2016)..... | 88 |
| 3. Troisième année de conduite de l'essai (2017) | 88 |
| Discussion | 90 |
| Effet de la variation environnementale et de la nature de génotype sur la teneur en protéine de tourteau du carthame | |
| 1. Première année de conduite de l'essai (2015)..... | 93 |
| 2. Deuxième année de conduite de l'essai (2016) | 94 |
| 3. Troisième année de conduite de l'essai (2017) | 94 |
| Discussion | 95 |
| Conclusion générale et perspectives | 98 |
| Références bibliographiques | |
| Annexe | |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1. Plante de carthame avec ses capitules..... | 3 |
| Figure 2. Schéma représentatif du cycle de développement de la plante de carthame avec les coefficients de culture..... | 5 |
| Figure 3. Production de l'huile de carthame entre la période 2010-2014 (FAOSTAT, 2019) .. | 6 |
| Figure 4. Distribution de la production mondiale de l'huile de carthame (FAOSTAT, 2019).. | 6 |
| Figure 5. Appareil de Soxhlet | 12 |
| Figure 6. Schéma descriptif de la technique d'extraction par fluide supercritique | 13 |
| Figure 7. Technique d'extraction assistée par ultrasons | 14 |
| Figure 8. Technique d'extraction Sono-Soxhlet..... | 14 |
| Figure 9. La fraction protéique et huileuse dans des cellules des graines de carthame..... | 18 |
| Figure 10. La formule chimique des principaux polyphénols..... | 21 |
| Figure 11. Biosynthèse des polyphénols..... | 22 |
| Figure 12. Les principaux stérols de l'huile de carthame | 24 |
| Figure 13. L'activité anti-cancer de β -sitostérol | 24 |
| Figure 14. Biosynthèse des triglycérides | 26 |
| Figure 15. Biosynthèse des stérols chez les Astéracées | 32 |
| Figure 16. Biosynthèse des acides gras et lipides dans la graine | 34 |
| Figure 17. Plantes de carthame en plein champ | 36 |
| Figure 18. Génotype Français (Gila) | 37 |
| Figure 19. Génotype Algérien (Touggourt) | 37 |
| Figure 20. Génotype Syrien (Halab)..... | 38 |
| Figure 21. Schéma de l'extraction de l'huile et séparation du tourteau des graines de carthame..... | 40 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Caractéristiques du carthame des différentes régions géographiques | 3 |
| Tableau 2. Les stades phénologiques et de développement de carthame (<i>Carthamus tinctorius</i> L.) | 4 |
| Tableau 3. Comparaison de la composition du tourteau du carthame avec d'autres cultures oléagineuses ; teneur en protéines brutes, substances minérales et teneur en acides aminés dans les tourteaux en pourcentage par rapport aux protéines brutes | 9 |
| Tableau 4. Les acides gras communs chez les huiles végétales..... | 15 |
| Tableau 5. Teneur en huile des graines de carthame (TH) et sa composition en acides gras selon l'origine en comparaison avec d'autres espèces des Astéracées et oléagineuses | 16 |
| Tableau 6. Teneur totale des polyphénols (TPC), Activité antioxydante (AA) et Flavonoïde chez des espèces Astéracées et Oléagineuses | 20 |
| Tableau 7. Caractérisation morphologique des génotypes étudiés | 35 |
| Tableau 8. Analyse physico-chimique du sol de parcelles utilisées au cours de trois années de culture | 36 |
| Tableau 9. Conditions climatiques de l'essai au cours de trois années de culture (2015, 2016, 2017)..... | 39 |
| Tableau 10. Analyse de variance des paramètres morphologiques et agronomiques de trois génotypes de carthame cultivés en 2015 à Tiaret | 49 |
| Tableau 11. Analyse de variance des paramètres morphologiques et agronomiques de trois génotypes de carthame cultivés en 2016 à Tiaret..... | 51 |
| Tableau 12. Analyse de variance des paramètres morphologiques et agronomiques de trois génotypes de carthame cultivés en 2017 à Tiaret | 53 |
| Tableau 13. Les paramètres morphologiques et agronomiques de trois génotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015, 2016, 2017) à Tiaret et sous deux régimes hydriques (irrigué, sec). | 55 |
| Tableau 14. Analyse de variance des indices physico-chimiques de l'huile des graines de trois génotypes de carthame cultivés en trois années de culture (2015, 2016, 2017) et sous deux régimes hydriques. | 60 |
| Tableau 15. Les indices physico-chimiques de l'huile des graines de trois génotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015, 2016, 2017) et sous deux régimes hydriques | 64 |
| Tableau 16. Analyse de variance de la teneur en huile et les taux des acides gras constituants des graines de trois génotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015,2016,2017) en zones semi-arides | 68 |

| | |
|---|----|
| Tableau 17. Teneur en huile (%) et la composition en acides gras des graines (%) de trois géotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015,2016, 2017) en zones semi-arides. | 72 |
| Tableau 18. Teneur en acides gras saturés et insaturés et le rapport AGI/AGS de l'huile des graines de trois géotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015,2016, 2017) à Tiaret et en fonction de deux régimes hydriques..... | 73 |
| Tableau 19. Analyse de la variance de la teneur en phytostérols (mg/100g) de trois géotypes de carthame cultivés en deux années consécutives (2015,2016) en zone semi-aride et sous deux régimes hydriques (Irrigué, Sec)..... | 77 |
| Tableau 20. Teneur en phytostérols (mg/100g) de trois géotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015,2016 et 2017) en zone semi-aride et sous deux régimes hydriques (Irrigué, Sec). | 81 |
| Tableau 21. Analyse de variance des polyphénols totaux de l'huile des graines de trois géotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015, 2016, 2017)..... | 84 |
| Tableau 22. Polyphénols totaux (mgEAG/kg d'huile) de l'huile de trois géotypes de carthame durant trois années de culture (2015, 2016, 2017). | 86 |
| Tableau.23. Analyse de variance de l'activité antioxydante de l'huile des graines de trois géotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015, 2016, 2017). | 87 |
| Tableau.24. Analyse de variance de l'activité anti-collagénase et l'activité anti-élastase de l'huile de trois géotypes de carthame durant trois années de culture (2015, 2016, 2017) en zone semi-aride. | 87 |
| Tableau.25. L'activité antioxydante (%) de l'huile de trois géotypes de carthame durant trois années de culture (2015, 2016, 2017). | 89 |
| Tableau.26. L'activité Anti-collagénase et l'activité Anti-élastase de l'huile de trois géotypes de carthame durant trois années de culture (2015, 2016, 2017) en zone semi-aride. | 90 |
| Tableau.27. Analyse de variance de la teneur en protéine du tourteau des graines de carthame cultivées en trois années consécutives (2015, 2016, 2017) à Tiaret. | 93 |
| Tableau.28. Teneur en protéine (%) de tourteau de trois géotypes de carthame durant trois années de culture (2015, 2016, 2017) et sous deux régimes hydriques (sec, irrigué). | 95 |

Liste des abréviations

AA : Activité antioxydante
ACP : Acyl carrier protein
AGPAT : Acylglycerophosphate acyltransferase
AGS : Acide gras saturé
AGSI : Acides gras insaturé
ATP : Adénosine triphosphate
C : Carbone
CI₅₀ : Concentration inhibitrice médiane
C4H : Acide cinnamique-4-hydroxylase
CoA : Coenzyme A
DAG: Diacylglycérol
DGAT : diacylglycerol acyltransferase
Df : Degré de liberté
ESC : Extraction par fluide supercritique
FA-CoA: fatty acid coenzyme A ester
FAOSTAT : Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database
FAS: fatty acid synthase
GAE : Equivalent d'acide gallique
GPAT :glycerol-3-phosphate acyltransferase
HDL : Cholestérol des lipoprotéines de haute densité
HPLC: High-performance liquid chromatography
K_c : Coefficient cultural
LDL : Cholestérol des lipoprotéines de basse densité
LLL : Linoleic, linoleic and linoleic
LLO: Linoleic, linoleic and Oleic
MENA : Middle East and North Africa
NADPH : Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate
OOO: Oleic, oleic and oleic
PA: Acide phosphatidique
PAP : phosphatid acid phosphohydrolase
PAL : Phénylalanine ammoniac-lyase
PLL: Palmitic, linoleic and linoleic
PMG : Poids de mille grains
pH : Potentiel hydrogène
Ppm: Partie par million
R.H : Régime hydrique
ROS : Radical oxygen species
TAG: Triglycérides
TDS : Total dissolved solids
TH : Teneur en huile
TBME : Tert-butyl methyl ether
TMSH : Trimethylsulfonium hydroxide
TPC : Teneur en polyphénols totaux

Introduction

Les cultures oléagineuses comptent parmi les filières agricoles stratégiques des différents pays dans le monde. Les États-Unis, la Chine, le Brésil et l'Inde se distinguent comme les principaux pays producteurs dans cette filière agricole (Rai et *al.*, 2016). Ils détiennent la majorité de la superficie réservée à cette vocation et qui s'évaluait à environ 203 millions d'hectares en 2012 (Mailer, 2016), où les principales espèces conduites sont le tournesol, le soja, le coton, le colza, les arachides, le sésame, les amandes de palmiste, le lin et le ricin (Carré et Pouzet, 2014 ; Waseem et *al.*, 2017 ; Tan et Kaya, 2019). La production mondiale d'huile de ces espèces atteint 300 millions de tonnes dont 166 millions par le soja (56%), 42 millions par le colza (14%), 34 millions par le coton (11%), 27 millions par le tournesol (9%) et 21 millions de tonnes par l'arachide. Au classement des produits agricoles les plus échangés sur les marchés internationaux, les huiles végétales figurent dans le peloton de tête avec 41% des parts (FAO, 2018a). Ces huiles constituent un élément de base des modèles alimentaires et fournissent une valeur nutritive importante (Mailer, 2016), vu leur richesse en vitamines solubles (Gunstone, 2002; Sarwar, 2013) et les acides gras qu'elles contiennent (Sabikhi et SathishKumar, 2012).

Les tourteaux des graines sont les autres produits des oléagineuses destinés principalement à l'alimentation animale (Bulbul et *al.*, 2015 ; Mailer, 2004) et qui se distinguent par leur richesse en protéines brutes, les substances minérales et les acides aminés (Mukherjee et *al.*, 2016 ; Ivanova et *al.*, 2013 ; Angelova et *al.*, 2014). Cette particularité a fait que pour certaines espèces comme le soja et le coton, l'intérêt de leur culture est plus accordé aux tourteaux, très riches en protéines et en fibres qu'aux huiles qu'elles produisent (Mailer, 2004).

En Algérie, la filière oléagineuse concerne principalement la culture de l'olivier qui occupe une superficie de 330.000 hectares avec une production moyenne de 61 600 tonnes/an (Cherfaoui et *al.*, 2017). La conduite des autres espèces oléagineuses est de caractère artisanal et intéresse particulièrement l'arachide, le colza et le tournesol. Il faut noter que l'emploi culinaire de l'huile d'olive reste limité aux habitudes de certaines régions du pays, sinon son utilisation concerne essentiellement certaines préparations d'aspects médicinaux et cosmétiques. Toutefois, Les modèles alimentaires dominants de la population locale exigent une forte utilisation de ces huiles végétales. Avec une consommation moyenne de 17 kg/tête/an (Benassi et Labonne, 2004) et une production locale rudimentaire des cultures des oléagineuses, 90% des besoins du pays (hors huile d'olive) sont couverts par l'importation d'huiles brutes essentiellement de soja, qui sont raffinées sur place. A cet effet, la facture des importations massives des produits oléagineux s'élève à environ 1.4 milliards de dollars (2011), dont 61% pour les huiles de table et 36% pour les tourteaux (Rastoin et

Introduction

Benabderrazik, 2014). Pour atténuer cette dépendance, l'Algérie devra investir dans le développement des cultures oléagineuses. Néanmoins, l'introduction des espèces telles que le tournesol, le soja ou le colza nécessite la satisfaction des besoins écologiques et notamment climatiques pour permettre une productivité suffisante et atteindre une rentabilité de cette spéculation. Cependant, les superficies agricoles se situent pour leur majorité dans les étages bioclimatiques semi-arides et arides caractérisées par une carence du bilan pluviométrique, où la conduite de ces espèces durant les périodes chaudes de l'année, nécessite inévitablement la pratique d'irrigation. Il serait ainsi judicieux de proposer des alternatives compensatoires par la conduite des espèces plus tolérantes à la sécheresse et le stress thermique tout en fournissant des produits de qualité appréciable.

Parmi ces espèces, le carthame (*Carthamus tinctorius* L.) qui dispose de facultés élevées d'adaptation aux stress régis par cet environnement en valorisant les disponibilités du milieu tout en fournissant des produits de qualités appréciables. Il appartient à la famille des Astéracées et dont les graines disposent d'une teneur moyenne en huile proche de celle de tournesol et de colza. La qualité physicochimique de cette huile, lui attribue une place importante dans différents domaines, pharmaceutique (Singhal et al., 2018), cosmétique (Wouters et al., 2010) et industriel (de Oliveira et al., 2018). La valeur principale de l'huile de carthame se justifie par richesse en acides gras mono et polyinsaturés (Katkade et al., 2018 ; Roche et al., 2019), ainsi qu'en acides gras essentiels non synthétisables par le corps humain. En plus, de nombreuses études ont confirmé sa contenance en d'autres composés de haut intérêt nutritionnel comme les polyphénols (Ergönül et Özbek, 2018), tocophérols (Jhajharia et al., 2013), caroténoïdes (Takayanagi et Mukai, 2014) et phytostérols (Taha et Matthäus, 2018 ; Hamrouni-Sellami et al., 2007). Une autre particularité de carthame se justifie par l'utilisation de ses feuilles dans les applications pharmaceutiques (Kim et al., 2003) et les fleurs dans l'industrie de fabrication de colorants alimentaires (Gautam et al., 2014).

Dans le monde, les superficies destinées à sa culture comptent par des milliers d'hectares (FAOSTAT, 2019), où elles se concentrent principalement en Asie (40.90%), l'Amérique du nord (27.27%) et l'Amérique du sud (17.93%) (Sabikhi et SathishKumar, 2012).

Récemment, en Afrique du Nord, cette culture fait l'objet de nombreuses études pour son introduction dans des programmes de développement des oléagineuses, notamment, au Maroc (Ben moumen et al. 2015), en Tunisie (Salem et al., 2014a; Hamrouni-Sellami et al., 2007) et en Egypte (Taha et Matthäus, 2018). Sachant que ces régions de la zone MENA, se particularisent par de faibles précipitations et des hautes températures (Waha et al., 2017). Les résultats de certains travaux ont prouvé de grandes aptitudes du carthame de tolérer les contraintes générées par la sécheresse et les hautes températures (Bagheri et al., 2011; Shabana et al., 2013; Amini et al.,

Introduction

2014 ; Hussain et *al.*, 2015). Ainsi, il se distingue par une rusticité qui lui permet d'être cultivé dans des régions semi arides avec une utilisation réduite des intrants (Aiken et Lamm, 2006). De plus, son cycle végétatif court lui accorde d'être, en conséquence, une espèce idéale pour la rotation des cultures. Les particularités climatiques de ces régions associant la sécheresse et des températures élevées lors du remplissage du grain de carthame seraient davantage bénéfiques pour l'huile extraite et ce en réduisant sa teneur en acides gras saturés (Ashrafi et Razmjoo, 2010) et en l'enrichissant en acides gras insaturés, en polyphénols et en phytostérols (Navas-López et *al.*, 2020).

En Algérie, les recherches menées sur le carthame restent insuffisantes pour permettre une introduction de sa culture dans le schéma de la production végétale. Ces études doivent illustrer son comportement vis-à-vis des conditions environnementales locales et évaluer les rendements et les qualités physico-chimiques des huiles et les sous-produits fournis. Par conséquent, la possibilité d'intégration du carthame dans le système agricole Algérien pourrait amener à combler le retard enregistré dans la filière oléagineuse, atténuer la facture d'importation des huiles et des sous-produits et diversifier la production végétale.

Le travail réalisé dans la thèse présentée verse dans cette stratégie de recherche. Il se fixe deux objectifs. Le premier est d'un aspect agronomique qui permettra une évaluation du comportement et de la productivité du carthame dans la région de Tiaret, caractéristique des zones semi-arides des hauts plateaux Algériens. Le second objectif est d'un aspect biochimique et concerne la caractérisation et une appréciation des propriétés physico-chimiques des huiles extraites des graines de carthame conduit sous cet environnement. A cet effet, on a procédé par la conduite durant trois campagnes consécutives d'un matériel végétal composé de trois cultivars d'origines différentes et incluant une population locale. Des essais menés sous les conditions pluviales et irriguées ont permis d'évaluer le comportement, la productivité et le rendement en huile des graines mûres. Des travaux de caractérisation physico-chimique des huiles extraites ont été réalisés à l'Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs en Arts Chimiques et Technologiques (INP, Toulouse, France) dans le cadre d'un projet Tassili de coopération.

Le carthame, plante oléagineuse cultivée dans de nombreuses régions du monde notamment pour son huile végétale extraite des graines. Il présente une particularité de sa résistance aux conditions environnementales contraignantes comme la sécheresse (La Bella et *al.*, 2019), les hautes températures (Hussain et *al.*, 2015) et la salinité (Thoday-Kennedy et *al.*, 2021). La diversification de l'économie nationale particulièrement pour la population rurale à travers l'introduction des nouvelles cultures résistantes devrait permettre de minimiser l'impact social de ces conditions en leur assurant un minimum de ressources.

Le climat du l'afrique du nord particulièrement le climat algérien se caractérise par une pluviométrie annuelle faible et irrégulière ainsi que par de fortes variations de températures. Pour cela, tout programme d'amélioration des plantes repose essentiellement sur l'étude de l'effet de ces stress et la connaissance des mécanismes physiologiques et biochimiques de tolérance des plantes. La sélection de matériel végétal tolérant la sécheresse et la haute température, en conséquence, demeure une alternative agro-économique afin de combler le faible rendement des cultures. Vu à sa résistance aux stress abiotiques, l'introduction de la culture de carthame dans des zones arides et sem-arides pourrait contribuer à atteindre l'objectif de sécurité alimentaire en huiles alimentaires.

Le carthame (*Carthamus tinctorius* L.) est plante de la famille des Astéracées (Sehgal et *al.*, 2009). Il est cultivé dans certaines régions d'Europe, d'Australie, d'Asie, des Amériques et le nord-africain pour produire des huiles végétales de haute qualité à des fins industriels (Sehgal et *al.*, 2009 ; Wouters et *al.*, 2010). Ainsi, il offre une très grande utilisation grâce à ses fleurs, étant une source des colorants rouges et jaunes (Zohary et Hopf, 2000). Pourtant les différentes vertus apportées par le carthame, cette culture ne tient que des places moins importantes dans le système de production par rapport aux d'autres oléagineux notamment le tournesol.

1. Rang taxonomique

Le genre *Carthamus* compte près de 25 espèces et sous-espèces dont *Carthamus tinctorius* L représente sa forme cultivée. Selon Yesilyurt et *al.* (2019), la position taxonomique de *Carthamus tinctorius* L. est comme suit :

Règne : Tracheobionta

Embranchement : Spermatophyta

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida

Sous-classe : Astéridés

Ordre : Asterales

Famille : Astéracées

Genre : *Carthamus* L.

Espèce : *Carthamus tinctorius* L.

2. Diversité génétique de carthame

Selon Vavilov (1951) le carthame cultivé (*Carthamus tinctorius* L.) présente trois centres d'origine. Le premier est en Inde et il est classifié pour la variabilité de l'ancienneté de la culture. Le deuxième centre, en Afghanistan, est basé sur la diversité du carthame et la proximité des espèces sauvages. Le troisième centre, en Ethiopie, est classifié selon la présence des espèces sauvages de carthame.

Autre auteur a proposé sept centres de diversité pour l'évolution du matériel génétique du carthame, y compris en Extrême-Orient, en Inde et au Pakistan, au Moyen-Orient, en Égypte, au Soudan, en Éthiopie et en Europe (Knowles, 1969). Le centre du Moyen-Orient est subdivisé à son tour en trois pôles de gènes (Ashri, 1975). Ainsi, Chapman et *al.* (2010) ont cité que le Proche-Orient présente l'origine approximatif du carthame.

Carthamus tinctorius L. représente la variété de carthame cultivée avec 12 paires de chromosomes (Ashri et Knowles, 1960). C'est une espèce principalement autogame, mais il est possible que le pollen soit transmis par divers insectes (Rudolphi et *al.*, 2008). Le stade de floraison est l'une des phases de développement de la plante de carthame qui est génétiquement contrôlée. Néanmoins, des températures élevées pendant la pollinisation peuvent réduire la quantité de pollinisation croisée (Ahmadi et Omid, 1997), tandis qu'elles accélèrent son stade de la floraison.

Il y a environ 25 espèces de carthame qui sont divisées par Ashri et Knowles (1960) en différentes sections basées particulièrement sur le nombre de chromosomes. Beaucoup d'entre elles sont sauvages, comme *C. oxyacanthus*. L'une des sections regroupe 4 espèces annuelles de carthame qui ont la formule du génome BB et $2n=24$ chromosomes. Les croisements, dans toutes les combinaisons, produisent des hybrides fertiles (Wrigely et *al.*, 2016). Ces espèces sont ; *C. tinctorius*, *C. palaestinus*, *C. persicus* Willd et *C. oxyacantha*. Ce dernier est considéré comme étant l'ancêtre sauvage du carthame cultivé (Dajue et Mundel, 1996). Les autres sections représentent la section II avec ($2n=20$), III ($2n=44$), VI ($2n=64$)

Dans une autre section de classement, Ashri et Knowles (1960) ajoutent deux espèces ayant 12 paires de chromosomes ($2n=24$) à savoir *C. arborescens* et *C. caeruleus*. Ces espèces se distinguent par leur morphologie appropriée et présentent la caractéristique qu'elles ne se croisent pas avec les autres espèces de carthame.

Etat des connaissances

La distribution géographique de carthame est révélatrice du fait qu'il existe une grande variation génétique conduisant à une haute distinction phénotypique entre les espèces (Tableau 1).

Tableau.1. Caractéristiques du carthame des différentes régions géographiques (Knowles, 1969)

| Région géographique | Hauteur de la plante | Ramification | Présences des épines | Taille du capitule | Couleur de la fleur |
|----------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Extrême-Orient | Longue | Intermédiaire | Avec épines Sans épines | Intermédiaire | Rouge |
| Inde- Pakistan | Petite | Beaucoup | Sans épines | Petite et intermédiaire | Orange, blanche et rouge |
| Moyen Orient | Petite | Peu | Avec épines Sans épines | Intermédiaire et large | Rouge, jaune, blanche et orange |
| Egypte | Intermédiaire | Peu | Avec épines Sans épines | Large et Intermédiaire | Orange, jaune, blanche et rouge |
| Soudan | Petite et intermédiaire | Intermédiaire | Sans épines | Petite et intermédiaire | Jaune et orange |
| Ethiopie | Petite | Beaucoup | Sans épines | Petite | Rouge |
| Europe | Intermédiaire | Intermédiaire | Avec épines Sans épines | Intermédiaire | Orange, Rouge, blanche et jaune |



Figure.1. Plante de carthame avec ses capitules.

Tableau.2. Les stades phénologiques et de développement de carthame (*Carthamus tinctorius* L.)

| Ordre | La phase | La durée (jours) | Description |
|-------|---|--|--|
| 0 | Emergence à 4°C-5°C (Wrigely et <i>al.</i> , 2016). La germination est accéléré à 15 C° (Hoag et <i>al.</i> , 1969). | 21 jours après le semis (Wrigely et <i>al.</i> , 2016) | L'augmentation de la température stimule l'émergence des plantules en 3-4 jours. |
| 1 | Début de la période végétative à la rosette | 25 jours (Doorenbos et Kassam, 1987) 49-57jours (Yesilyurt et <i>al.</i> , 2019) | Les plantes sont tolérantes au gel, d'où si le carthame est planté à la fin de l'automne ou au début de l'hiver, il peut rester sous cette forme pendant 2 à 3 mois. Cependant, les plantes qui émergent à la fin du printemps resteront sous cette forme seulement au moins 4 semaines (Smith, 1996a). Les cultivars de l'Ethiopie ne forment pas de rosette, mais immédiatement une tige principale. |
| 2 | Fin de la période végétative (allongement et ramification) | 60 jours (Doorenbos et Kassam, 1987) 74-81 jours (Yesilyurt et <i>al.</i> , 2019) | A la fin de leur cycle de développement, les plantes mesurent entre 30 et 150 cm de hauteur, mais elles peuvent atteindre une hauteur de 251 cm en Asie (Wrigely et <i>al.</i> , 2016), avec des capitules globuleux (capitules). |
| 3 | Floraison | 30 jours (Doorenbos et Kassam, 1987) | Le carthame en règle générale est une plante de jours longs. Au cours du stade de la floraison, le génotype et l'environnement interagissent avec la longueur du jour, et elle peut être accélérée par des températures élevées (Weiss, 2000). |
| 4 | Remplissage des graines | 25 jours (Doorenbos et Kassam, 1987) | Omidi et <i>al.</i> (2009) ont rapporté que le rendement en graines est significativement corrélé avec la biomasse, le nombre de capitules, le poids de 1000 graines, le nombre de branches secondaires et le rendement en huile par plante. Durant le remplissage des graines, le coefficient cultural (K_c) des plantes de carthame pourrait atteindre son maximum (Fig 2). |
| 5 | Mûrissement | 10 jours (Doorenbos, et <i>al.</i> , 1987). | La récolte des graines se réalise généralement 30 jours après la maturation avec une humidité des graines n'excédant pas 8% (Wrigely, et <i>al.</i> , 2016). |

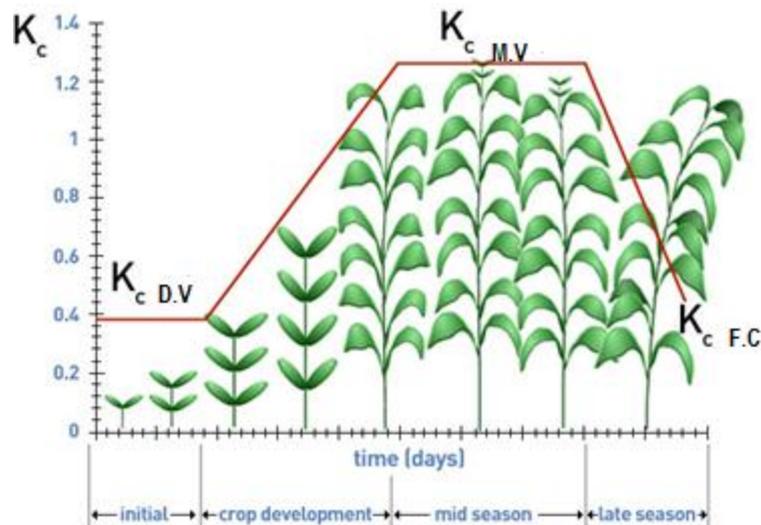


Figure.2. Schéma représentatif du cycle de développement de la plante de carthame avec les coefficients de culture ; $K_{cD.V}=0.37$; $k_{cM.V}=1.29$; $K_{cF.C}=0.35$ (Kar et al., 2007).
D.V : début de végétation; M.V:mi végétation; F.C : fin de cycle

3. Importance économique de carthame

Le carthame n'est actuellement cultivé que dans 25 pays (FAO, 2018b) et cela pourtant les effets bénéfiques de son huile des graines pour la santé ainsi que son adaptation à un climat sec et aride. Pour cela, sa production demeure faible et fluctuée. Elle est de l'ordre de 131803 tonnes en 2010 et 100107 tonnes en 2014 (Figure 3). Celle-ci peut être expliquée par l'importance apportée à l'huile des autres cultures oléagineuses telles que le maïs, le colza, le soja et le tournesol (La Bella et al., 2019). Néanmoins, le carthame est une espèce d'intérêt potentiel pour l'agriculture et l'industrie en raison de sa grande adaptabilité aux conditions pédoclimatiques et de la variabilité des acides gras contenant dans l'huile de ses graines (La Bella et al., 2019). La superficie leurs est réservée par rapport au carthame sont de plus en plus importante. La grande partie de la production est concentrée généralement dans les pays de l'Amérique (USA avec 33.44% et Mexique avec 18.47%) et l'Est de l'Asie (Inde avec 30,78%) dans l'ensemble des pays producteurs (Figure 4).

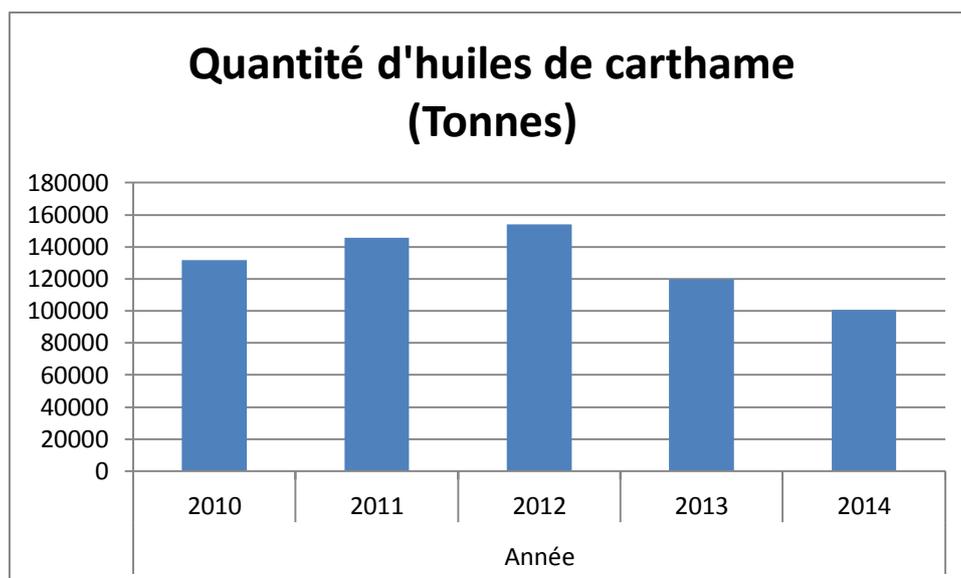


Figure.3. Production de l’huile de carthame entre la période 2010-2014 (FAOSTAT, 2019).

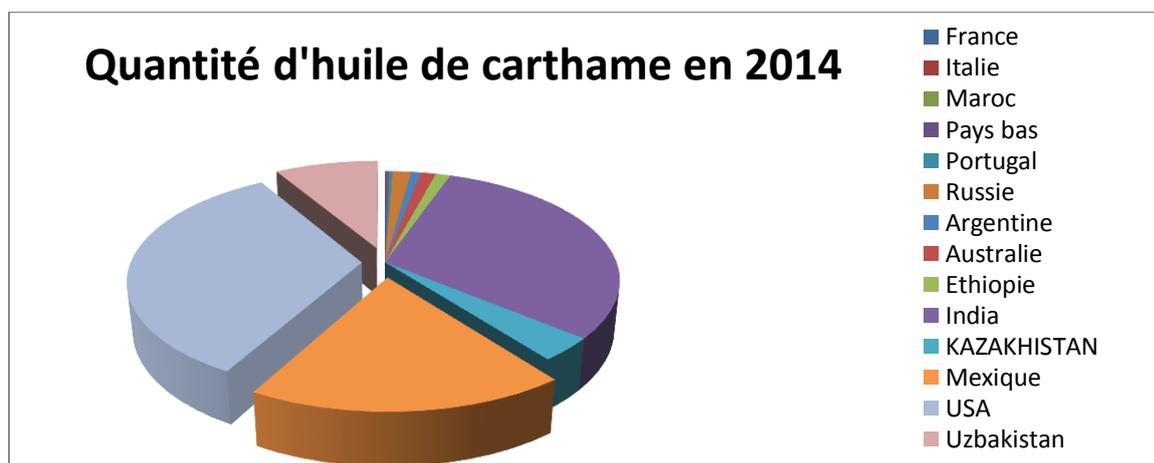


Figure.4. Distribution de la production mondiale de l’huile de carthame (FAOSTAT, 2019).

4. Utilisations du carthame

Toutes les parties botaniques de la plante pourraient être exploitées: tige, feuilles, fleurs, huile extraite de ses graines et le tourteau. Toutes ces caractéristiques font du carthame une source importante de bioraffinage dans un système de développement agricole durable et pourrait être intégré dans différents domaines pharmaceutique, cosmétique et industriel.

4.1. Effets thérapeutiques de l’huile de carthame

La spécificité apportée à l’huile de carthame comme une source nutritionnelle et pharmaceutique est due principalement à sa richesse en acide linoléique associé avec l’acide oléique (Roche et *al.*, 2019). L’effet préventif de ces acides gras polyinsaturés contre les maladies cardiovasculaires, cancer, hypertension et d’autres pathologies est important

(Orsavova et *al.*, 2015). L'huile de carthame est considérée comme un anticoagulant qui fait circuler le sang, prévient des anomalies hémorhéologiques (Asgarpanah et Kazemivash, 2013) et réduit des LDL oxydées (Gupta, 2016). Elle contient de la N-(p-coumaroyl) sérotonine (CS) qui est un antioxydant puissant (Koyama et *al.*, 2006; Gupta, 2016) avec ses effets inhibiteurs sur la production de cytokines pro-inflammatoires à partir de monocytes humains (Takii et *al.*, 1999). Le carthame a des fonctions pharmacologiques comprenant des activités antioxydantes, anti-inflammatoires, analgésiques, antidiabétiques, hépatoprotectrices et antihyperlipémiques (Asgarpanah et Kazemivash, 2013). L'huile de graines de carthame pourrait s'avérer bénéfique pour l'amélioration des cellules souches neurales embryonnaires et leur différenciation neuronale (Ghareghani et *al.*, 2017).

4.2. Utilisations industrielles de l'huile

En raison de ses propriétés biochimiques notamment par la présence de l'acide linoléique et ses caractères physiques à savoir sa faible valeur colorante, l'huile de carthame est considérée comme une source des produits industriels à grand intérêt (Smith, 1996b; Wouters et *al.*, 2010; Emongor et *al.*, 2017), tels que les peintures et les résines alkydes qui sont en largement dérivés (Smith, 1996b ; Velasco et Fernández-Martínez, 2001).

L'introduction des cultures oléagineuses dans le domaine industriel est approuvée par nombreux travaux. Dmytryshyn et *al.* (2004) et Azócar et *al.* (2007) ont rapporté les atouts de l'utilisation de l'huile de colza dans la production de biodiesel dont il ayant été largement fabriqué en Europe. Récemment, l'huile de carthame s'est révélée importante pour produire de substitut du carburant diesel (Nosheen et *al.*, 2018). Ainsi que, elle peut associer avec d'autres huiles pour produire de biodiesel de faible viscosité (Thomas et *al.*, 2012).

Le carthame est utilisé aussi dans des produits cosmétiques tels que la crème (Zhaomu et Lijie, 2001), le shampooing, le parfum, et la lotion pour le corps (Shouchun et *al.*, 1993). Le rouge cosmétique peut être fabriqué à partir de colorant de carthamin (Weiss, 1983 ; Smith, 1996b). En raison de sa stabilité thermique (Lee et *al.*, 2004), l'huile de carthame est utilisée comme huile de cuisson. Elle est également utilisée dans la préparation de la mayonnaise, de l'huile de salade et de la margarine.

4.3. Utilisation médicale et industrielle des sous-produits de carthame

4.3.1. Les fleurs et feuilles

Les fleurs de carthame sont considérées comme des stimulants et des sédatifs ayant un grand effet laxatif (Delshad et *al.*, 2018). Elles jouent un rôle important dans le cosmétique et la coloration des aliments (Gautam et *al.*, 2014). Leur extrait présente une forte activité

antioxydante (Kim et *al.*, 2003). Le jaune de carthamine (Carthamine yellow, YC) isolé des fleurs a un effet contre les troubles hémorragique du sang (Dehariya et Dixit, 2015). Les pigments des fleurs (jaune, rouge) ont des propriétés médicinales contre les maladies coronariennes, les rhumatismes, le diabète (Asgary et *al.*, 2010) et l'hypertension artérielle (Bai et *al.*, 2012). D'après Wu et *al.* (2013), ces pigments ont montré des activités antioxydantes et hépatoprotectrices importantes.

Kumar et *al.* (2016) ont confirmé que les feuilles de carthame sont une source importante en compositions nutritives. Elles sont riches en carotène, riboflavine, vitamines A et C, fer, phosphore et calcium. L'utilisation des feuilles de carthame s'avère efficace contre l'avortement et présente une action curative pour la stérilité des femmes (Gautam et *al.*, 2014). Les produits de la décoction de carthame peuvent être utilisés pour traiter la stérilité masculine. Le carthame est utile dans le traitement des troubles menstruels, de l'arthrite et des affections respiratoires (Gupta, 2016).

4.3.2. Tourteau de carthame

En particulier, les sous-produits de culture ayant une valeur fibreuse sont également extrêmement appropriés pour l'alimentation des bovins. De ce fait, un grand intérêt a été apporté au tourteau des oléagineux grâce à ses hautes valeurs nutritives (De morais oliveira et *al.*, 2016) (Tableau 3). Tiril et Kerim (2015) ont montré la richesse de tourteau de carthame et tournesol en protéine et acides aminés. Cette protéine isolée de tourteau de carthame par ultrafiltration est recommandée pour être utilisée comme ingrédient dans des nombreux produits alimentaires (Ulloa et *al.*, 2011). La richesse des tourteaux des cultures oléagineuses en protéine a été apportée par de nombreuses études chez le tournesol avec 359g/kg (Vanegas et *al.*, 2016), 20% (Galicia-González et *al.*, 2010) et canola (417-415 g/kg) (Radfar et *al.*, 2017).

Le tourteau de carthame contient environ 24% de protéines et de fibres (Emongor et Oagile, 2017) et est utilisé comme complément protéique dans l'alimentation animale (Bulbul et *al.*, 2015). Ce qui présente aussi une autre caractéristique pour le tourteau de tournesol (Alagawany et *al.*, 2015). La composition chimique en protéine et acides aminés des tourteaux de graines de carthame a été apportée par d'autres études ultérieures (Mansouri et *al.*, 2018 ; Angelova et *al.*, 2014). En outre, la composition nutritive de tourteau des oléagineux peut être influencée par le génotype, les conditions environnementales pendant la croissance de la culture, les conditions de récolte et le traitement de la graine et des tourteaux.

Tableau.3. Comparaison de la composition du tourteau du carthame avec d'autres cultures oléagineuses ; teneur en protéines brutes, substances minérales et teneur en acides aminés dans les tourteaux en pourcentage par rapport aux protéines brutes (Angelova et *al.*, 2014).

| Paramètres | Tourteau | | | | | | |
|---------------------------------|--------------|-------|--------|--------|-----------|-----------|--------------|
| | Carthame | Soja | Canola | Cotton | Cacahuète | Tournesol | Noix de coco |
| Protéine brute (%) | 15.6 | 47.5 | 44.0 | 45.0 | 49.3 | 50.3 | 21.9 |
| Ca, g/kg | 3.6 | 3.8 | 7.2 | 1.7 | 2.7 | 4.0 | 2.0 |
| P, g/kg | 8.1 | 7.2 | 10.1 | 13.1 | 6.7 | 11.0 | 6.6 |
| Mg, g/kg | 3.5 | 3.1 | 6.0 | 5.9 | 1.7 | 5.9 | 3.4 |
| K, g/kg | 8.8 | 21.9 | 12.0 | 15.1 | 12.7 | 17.4 | 16.9 |
| Fe, mg/kg | 122.8 | 191 | 200 | 172 | 155 | 279 | 742 |
| Mn, mg/kg | 20.4 | 36 | 60 | 24 | 35 | 31 | 68 |
| Asparagine acid | 11.14 | 11.2 | 8.0 | - | - | - | - |
| Threonine* | 3.16 | 3.80 | 4.5 | 3.3 | 2.6 | 3.2 | 3.1 |
| Serine | 4.57 | 5.0 | 4.39 | - | - | - | - |
| Glutamic acid | 27.48 | 18.00 | 16.69 | - | - | - | - |
| Proline | 5.71 | 4.89 | 7.00 | - | - | - | - |
| Glycine | 5.40 | 4.60 | 4.96 | - | - | - | - |
| Alanine | 4.67 | - | - | - | - | - | - |
| Valine* | 4.66 | 5.00 | 5.11 | 4.30 | 4.00 | 4.10 | 4.90 |
| Cystine | 2.00 | 0.65 | 1.23 | 1.50 | 1.00 | 2.30 | 1.40 |
| Methionine* | 1.55 | 1.40 | 1.78 | 1.70 | 1.00 | 1.70 | 1.30 |
| Methionine*+ Cystine | 3.55 | 2.05 | 3.01 | 3.20 | 2.00 | 4.00 | 2.70 |
| Isoleucine* | 3.04 | 4.69 | 3.98 | 3.10 | 3.60 | 3.40 | 3.40 |
| Leucine* | 6.87 | 7.49 | 6.97 | 6.00 | 5.80 | 5.50 | 6.20 |
| Tirosine* | 2.07 | 2.80 | 2.46 | 2.70 | 3.70 | 2.30 | 2.00 |
| Phenylalanine* | 3.76 | 4.80 | 4.01 | 5.10 | 4.70 | 4.40 | 4.10 |
| Phenylalanine*+Tirosine* | 5.83 | 7.60 | 6.47 | 8.30 | 8.50 | 6.40 | 6.50 |
| Hystidine | 2.70 | 2.40 | 2.81 | 2.80 | 2.30 | 2.20 | 1.80 |
| Lysine* | 3.11 | 6.22 | 5.98 | 3.00 | 3.30 | 3.60 | 2.60 |
| Arginine | 8.11 | 6.44 | 6.11 | 11.0 | 10.40 | 6.90 | 10.90 |

4.4. Le carthame dans le système de rotation culturale

La rotation culturale reste toujours une action primordiale et nécessaire pour lutter contre les mauvaises herbes et réduire le risque des maladies tout en améliorant le rendement des plantes cultivées (Thierfelder et *al.*, 2013). Considéré comme une plante polyvalente, le carthame a non seulement des utilisations commerciales et industrielles, mais aussi des avantages agronomiques cruciaux.

La plante de carthame présente un système racinaire pivotant qui peut briser les couches dures du sol et créer des canaux dans son profil qui facilitent le mouvement de l'air et de l'eau, tout

en pouvant être utilisé comme outil de gestion de la salinité et des conditions d'engorgement (Arshad et *al.*, 2020).

L'introduction du carthame dans tel système de rotation, en conséquence, s'annonce utile afin d'améliorer l'utilisation de l'eau du sol profond et de l'azote et de réduire au minimum le lessivage des nitrates dans les eaux souterraines (Bassil et *al.*, 2002 ; Nuttall et *al.*, 2008). Ce système est adopté dans plusieurs régions de monde (USA, Australie). Le carthame est l'une des cultures qui s'adapte bien dans les sols lourds avec une très grande capacité de rétention de l'eau (Gilbert, 2008). Le système de rotation carthame/cultures céréalières contribue à lutter contre les mauvaises herbes monocotylédone et dicotylédone. Par conséquent, cette particularité accorde à la culture de carthame d'être conçue dans l'agriculture biologique. Différentes recherches ont été menées afin d'évaluer l'effet de carthame dans la rotation culturale. Il a été rapporté que l'introduction de cette culture en rotation avec le haricot vert (Kazemeini et Sadeghi, 2012) et avec la pomme de terre (Rahimi Darabad et *al.*, 2011) améliore significativement leur rendement.

4.5. Effet de la date de semis sur le carthame

Au cours de ces dernières années la recherche agronomique s'est concentrée sur l'évaluation de l'effet des pratiques culturales sur le comportement des plantes cultivées. La qualité de l'huile de carthame ainsi que ses caractéristiques morphologiques sont affectées par des facteurs tels que le génotype, l'environnement et les pratiques agronomiques (Koutroubas et *al.*, 2009). Parmi les facteurs agronomiques affectant la croissance et le rendement des cultures, la date de semis a une influence déterminante. En effet, la détermination de la date de semis appropriée est l'un des facteurs les plus critiques pour optimiser la productivité du carthame (Koutroubas et *al.*, 2009).

Samanci et Ozkaynak (2003) ont démontré que le rendement en graines et la teneur en huile de carthame ont diminué avec une date de plantation tardive. Autre étude a révélé qu'un retard de semis a augmenté la teneur de toutes les catégories de stérols et a diminué significativement l'accumulation finale des acides gras de l'huile de carthame (Roche et *al.*, 2019).

5. L'huile, acides gras et protéines de carthame

5.1. L'huile de carthame

Les graines oléagineuses sont des sources importantes d'huiles végétales de haute qualité alimentaire. L'extraction de l'huile à partir de graines offre une quantité appréciable selon les études menées par Al Surmi et *al.* (2016) et Ada et *al.* (2014). Généralement, l'amande de

graines de carthame contient approximativement 60% d'huile et 26 % de protéine (Hall, 2016). Nombreuses études ont rapporté la teneur en huile des graines de carthame (Ben moumen et *al.*, 2014; Maziero et *al.*, 2019). Cependant, cette teneur est influencée par nombreux facteurs comme la conduite culturale (Caliskan et Caliskan, 2018), le déficit hydrique (Amini et *al.*, 2014 ; Mohammadi et *al.*, 2018), la nature de génotype (Arslan et Culpan, 2018) et les techniques d'extraction de l'huile (Han et *al.*, 2009). La caractéristique phénotypique des feuilles (avec ou sans épines) détermine aussi la variabilité de la teneur en huile de carthame (Ashrafi et Razmjoo, 2010).

5.1.1. Les méthodes d'extraction de l'huile des oléagineux

Dans ce contexte nombreuses méthodes sont adoptées afin d'extraire de l'huile des graines de carthame.

5.1.1.1. Méthode traditionnelle (méthode de Ghani)

L'extraction de l'huile se réalise par un mouvement de pilon dans un mortier contenant les graines de carthame durant 3 à 4 heures. Le rendement moyen est généralement faible avec un taux de 4% (Achaya, 1993).

5.1.1.2. Méthode de référence (Soxhlet)

La méthode du Soxhlet (NF EN ISO 659) consiste en une extraction et une détermination de l'huile par un solvant organique sur une matrice solide (broyat de graines) dans une enceinte fermée selon un processus semi continu (Roche, 2005). Le solvant contenant les lipides dissous est ensuite évaporé à l'évaporateur rotatif. Plusieurs cycles de rotation et d'extraction sont nécessaires pour extraire la totalité de l'huile des graines. Cette méthode est longue (jusqu'à 8h) et peu économique en solvant.

La température de cet évaporateur est réglée selon le solvant utilisé. Il est raccordé avec un appareil de pression sous vide qui sert à son tour à assurer une évaporation totale et parfaite du solvant. Autre avantage de cet évaporation est de récupérer le solvant préalablement utilisé pour être employé dans d'autre opération d'extraction.

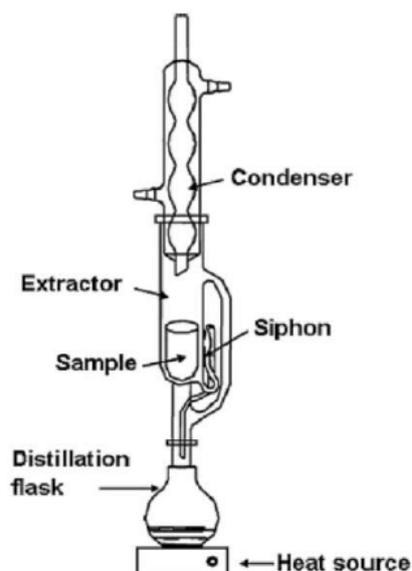


Figure.5. Appareil de Soxhlet.

5.1.1.3. Technique d'extraction par fluide supercritique

Ce type d'extraction est considéré comme une technique de traitement écologique moderne (Crampon et *al.*, 2017) où le CO₂ supercritique (ESC) utilisé offre des avantages qui sont surtout sa non toxicité et son inertie chimique. Ce procédé a été employé par Han et *al.* (2009) pour extraire l'huile de carthame. Pour atteindre leur objectif ils ont modifié les paramètres opérationnels tels que le débit, la température, la pression et la taille des particules. Ces paramètres déterminent grandement le rendement d'extraction. De plus, une température plus basse et une plus petite taille de particules favorisent l'efficacité de l'extraction. A une pression de 28 MPa et une température de 34.85°C, la teneur en huile obtenue est de l'ordre de 27%. Tandis qu'un taux de 40% peut être obtenu après 76 minutes d'extraction sous une température 73°C et une pression de 50 MPa (Ayas et Yilmaz, 2014).

Par cette méthode, la teneur totale en acides gras insaturés notamment en acide linoléique de l'huile extraite est remarquable. La technique d'extraction par fluide supercritique a une densité plus élevée, ce qui entraîne une plus grande solubilité des huiles (Han et *al.*, 2009).

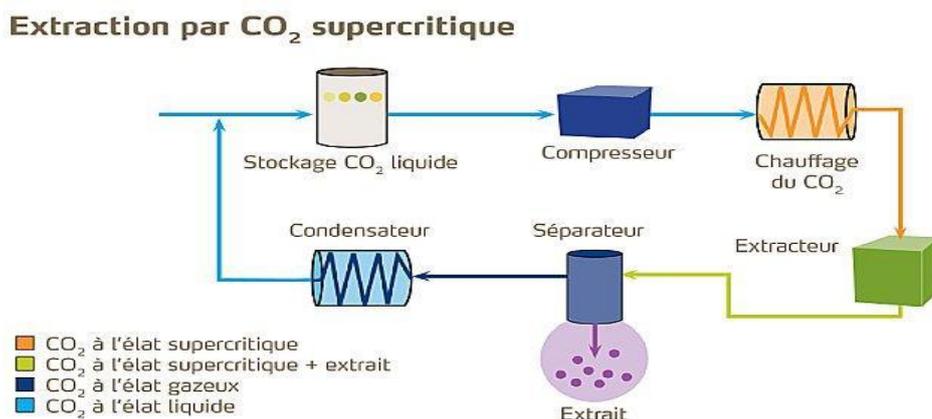


Figure.6. Schéma descriptif de la technique d'extraction par fluide supercritique.

5.1.1.4. Méthode d'extraction enzymatique

L'extraction enzymatique aqueuse est une technique moderne et respectueuse de l'environnement (Mat Yusoff et *al.*, 2017). Le principe de cette technique consiste à briser la paroi cellulaire des matériaux végétaux à l'aide des enzymes, qui vont agir plus finement au niveau intracellulaire (Parmentier et *al.*, 2004). Dans cette technique, l'extraction de l'huile est effectuée dans des conditions de basse température et de faible pH (Konopka et *al.*, 2016). Cette méthode regroupe deux types des enzymes. Les premiers sont les enzymes protéolytiques comme l'alcalase, neutrase, protamax....etc. Tandis que, les deuxièmes sont des enzymes de dégradation de la paroi cellulaire (Pectinex, cellulast, viscozyme...etc.) (Guillemin, 2006). Cette technique d'extraction a été bien employée sur l'huile de carthame (Gibbins et *al.*, 2012) et de colza (Guillemin, 2006). La température, les taux de dilution, le type d'enzyme, la taille des particules et le pH sont l'ensemble des facteurs qui peuvent affecter le taux d'extraction.

5.1.1.5. Méthode d'extraction ultrasonique

L'utilisation des ultrasons permet de mettre en œuvre des processus visant à améliorer le rendement et la qualité et réduire les temps de traitement avec une température d'extraction plus basse (Zhang et *al.*, 2017). La taille des agglomérats des graines préalablement broyées sous forme de poudre est réduite grâce aux ultrasons. Cette méthode a été utilisée pour un large type des oléagineux comme le colza (Jalili et *al.*, 2017) et le carthame (Hu et *al.*, 2012). L'extraction de l'huile de carthame sous une puissance ultrasonique de 300Watt, en utilisant l'hexane avec un ratio (1:6, g/ml) a permis d'obtenir un rendement en huile appréciable après 60 min à 35°C (Hu et *al.*, 2012). Ce rendement a atteint 27.8% en appliquant l'éther de pétrole pendant 20 min à 35°C. Le rapport solide/liquide a été fixé à 1: 9(g/ml) (Kai-bo et *al.*, 2015).

La technique d'extraction assistée par ultrasons montre une grande efficacité avec un temps réduit par rapport à la méthode d'extraction par appareil de Soxhlet (Chemat et *al.*, 2004).

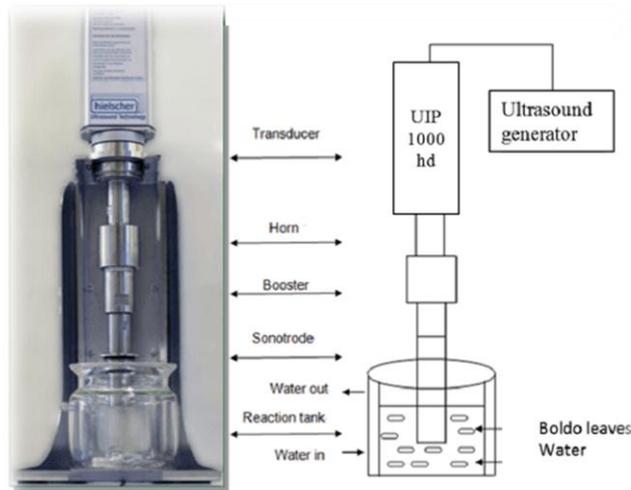


Figure.7. Technique d'extraction assistée par ultrasons.

5.1.1.6. L'extraction Sono-Soxhlet

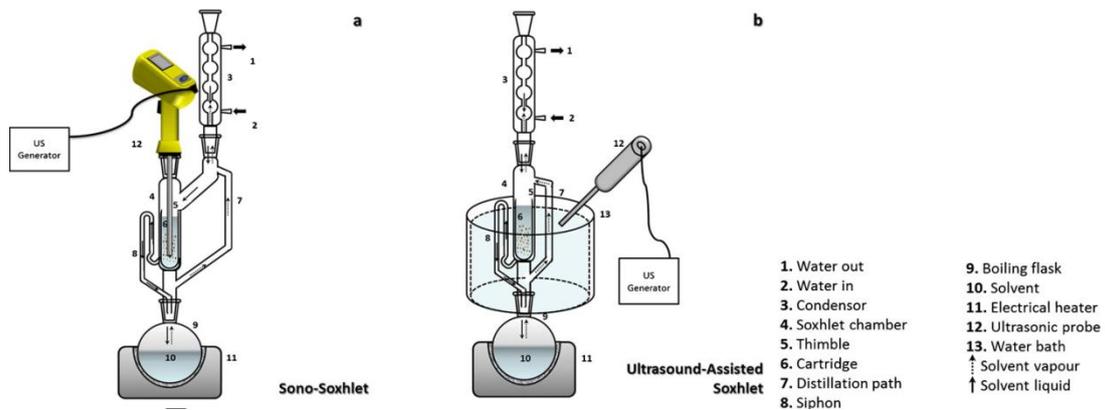


Figure.8. Technique d'extraction Sono-Soxhlet

Djenni et *al.* (2013) ont rapporté une autre méthode d'extraction, il s'agit de l'extraction Sono-Soxhlet qui peut être considérée comme une nouvelle technique, offrant une méthode rapide pour la détermination de la teneur en lipides avec des récupérations et des compositions chimiques similaires à celles obtenues par la méthode de Soxhlet conventionnelle. Ils ont démontré qu'aucune différence significative en termes d'indicateurs de qualité n'est détectée.

5.2. Acides gras de l'huile de carthame

Les acides gras sont des constituants importants des membranes et des molécules de signalisation (Feussner et Wasternack, 2002). Ce sont de grandes réserves de stockage d'énergie pour les animaux et plantes.

Les lipides sont principalement composés de triacylglycérol (95%), tandis que le reste de la partie inclue les antioxydants, les vitamines, les stérols, etc. Les acides gras estérifiés dans le squelette du glycérol varient en longueur de chaîne (entre C10 et C24) et en degré de saturation (saturé, mono ou polyinsaturé). Les acides gras saturés les plus fréquents dans les cultures oléagineuses sont les acides palmitique et stéarique. Alors que, les acides gras insaturés fréquents sont les acides oléique, linoléique et linoléique (Tableau 4). La fluidité des lipides dépend en grande partie de la concentration en ces acides gras. Les acides gras saturés sont plus solides à basse température que les acides insaturés, d'où une corrélation positive existe entre le nombre d'insaturations et la fluidité des lipides.

Tableau.4. Les acides gras communs chez les huiles végétales (Parvaiz, 2017)

| Nom commun | Nom systématique | Abbréviation | Formule moléculaire |
|---------------------|------------------------------------|--------------|--|
| Acide palmitique | Acide Héxadécanoïque | C16:0 | C ₁₆ H ₃₂ O ₂ |
| Acide palmitoléique | Acide Cis-9-Héxadécanoïque | C16:1 | C ₁₆ H ₃₀ O ₂ |
| Acide stéarique | Octadécanoïque | C18:0 | C ₁₈ H ₃₆ O ₂ |
| Acide oléique | Cis-9-Octadécanoïque | C18:1 | C ₁₈ H ₃₄ O ₂ |
| Acide linoléique | Acide Cis-9-,12- Octadiénoïque | C18:2 | C ₁₈ H ₃₂ O ₂ |
| Acide linoléique | Acide Cis-9-,12-15- Octatriénoïque | C18:3 | C ₁₈ H ₃₀ O ₂ |
| Acide arachidique | Acide Eicosanoïque | C20:0 | C ₂₀ H ₄₀ O ₂ |
| Acide gondoïque | Acide Cis-1-Eicosanoïque | C20:1 | C ₂₀ H ₃₈ O ₂ |
| Acide béhénique | Acide Décésanoïque | C22:0 | C ₂₂ H ₄₄ O ₂ |
| Acide lignocérique | Acide Tétracosanoïque | C24:0 | C ₂₄ H ₄₈ O ₂ |

La composition en acides gras confère à l'huile un caractère particulier dans les applications nutritionnelles et pharmaceutiques (Orsavova et *al.*, 2015). Néanmoins, cette composition est influencée par de nombreux facteurs tels que le génotype (Ben Moumen et *al.*, 2015), les conditions environnementales (Gecgel et *al.*, 2007; Roche et *al.*, 2019; Yeilaghi et *al.*, 2012) et la conduite culturale (Gouzy et *al.*, 2016).

Fernández-Cuesta et *al.* (2014) ont mené une étude sur la composition des huiles de carthame des deux variétés CR-6 et IASC-2 issues par pression des graines et par méthode d'extraction en utilisant des solvants. Ils ont conclu que les deux techniques n'ont eu aucun effet sur la composition en acides gras. Le profil des acides gras notamment le changement du ratio oléique/linoléique dépend des conditions climatiques, notamment la température et l'humidité au cours de développement de la graine (Gecgel et *al.*, 2007; Neto et *al.*, 2016).

Généralement, l'intérêt pour la culture du carthame comme une source d'huile comestible a été stimulé grâce à sa richesse en acides gras mono et polyinsaturés (Roche et *al.*, 2019). Cette haute teneur de ce deux types représente un trait commun chez les Astéracées (Petropoulos et *al.*, 2018; Ozcan et *al.*, 2016) et les cultures oléagineuses (Orsavova et *al.*, 2015; Jokić et *al.*, 2013) (Tableau 5). Généralement, l'huile de carthame se distingue par sa haute valeur en acide linoléique comparativement aux autres espèces oléagineuses (Orsavova et *al.*, 2015). Sabzalian et *al.* (2008) et Roche et *al.* (2019) ont rapporté que plus de 96% des acides gras totaux, l'huile de carthame se constitue de l'acide oléique, linoléique, stéarique et l'acide palmitique. Ils sont de l'ordre de 74% (acide linoléique), 11% (acide oléique), 6% (acide palmitique) et 2 % pour l'acide stéarique (Al Surmi et *al.*, 2016).

Tableau.5. Teneur en huile des graines de carthame (TH) et sa composition en acides gras selon l'origine en comparaison avec d'autres espèces des Astéracées et oléagineuses.

| Génotype/Pays | TH (%) | C16:0 | C18:0 | C18:1n9 | C18:2n6 | Références |
|-----------------------------------|--------|-------|-------|---------|---------|---------------------------------|
| Zarghan/Iran | 32.47 | 6.32 | 2.2 | 16.05 | 73.75 | Yeilaghi et <i>al.</i> (2012) |
| Centennial/Turquie | 29 | 4.1 | 2.7 | 17.7 | 74.4 | Arslan (2007) |
| PI-537636/USA | 33.42 | 6.22 | 2.9 | 14.59 | 75.86 | Yeilaghi et <i>al.</i> (2012) |
| Rancho/Maroc | 33.84 | 7.36 | 2.19 | 10.63 | 79.49 | Ben moumen et <i>al.</i> (2014) |
| Giza/Egypte | 31 | 6.73 | 2.85 | 12.34 | 76.42 | Taha et Matthaus (2018) |
| BGR21393/Bulgarie | 31.2 | 6.5 | 2.4 | 26 | 63.4 | Zlatanov et <i>al.</i> (2015) |
| Carthame /India | / | 6.02 | 2.37 | 13.75 | 76.22 | Katkade et <i>al.</i> (2018) |
| Saffire/canada | 30.26 | 6.77 | 2.19 | 14.17 | 73.86 | Sabzalian et <i>al.</i> (2008) |
| <i>C. oxyacantha</i> /Kordestan1 | 24.70 | 6.73 | 2.62 | 17.35 | 71.62 | Sabzalian et <i>al.</i> (2008) |
| <i>Carthamus dentatus</i> /Turque | 15.39 | 9.82 | 3.95 | 19.92 | 66.22 | Tonguç et Erbaş (2012) |
| <i>Centaurea depressa</i> /Turque | 19.68 | 12.29 | 6.79 | 32.66 | 48.25 | Tonguç et Erbaş (2012) |
| Soja/India | 19.54 | 9.79 | 2.2 | 20.09 | 56.79 | Sultan et <i>al.</i> (2015) |
| Colza/ RGS003/Iran | 43.52 | 4.35 | 1.88 | 64.28 | 17.58 | Shirani Rad et Zandi (2012) |
| Tournesol/Tunca/Turque | 44.42 | 4.50 | 3.58 | 65.59 | 24.51 | Akkaya et <i>al.</i> (2018) |
| Arizona/France | / | 7 | 2.3 | 13 | 73 | Roche et <i>al.</i> (2019) |

TH (Teneur en huile) ; C18:2n6 (Acide linoléique); C18:1n9 (Acide oléique); C18:0 (Acide stéarique); C16:0 (Acide palmitique)

Bien que la plupart des espèces de carthame cultivées aient une teneur élevée en acide linoléique (80% des acides gras totaux), certains cultivars s'avèrent riches en acide oléique (Anjani et Yadav, 2017; La Bella et *al.*, 2019). D'après Wood et *al.* (2018), ce type d'huile riche en acide oléique a une bonne stabilité à l'oxydation.

Knowles et Hill (1964) ont rapporté que les taux de l'acide oléique et celui de linoléique dans l'huile de carthame sont contrôlés par trois allèles (*OL*, *ol¹*, *ol*) d'un même locus. La combinaison *olol* donne lieu à une teneur élevée en oléique (64-83%), *LOLO* donne une faible teneur oléique (10-15%), alors que *ol¹ol¹* confère une teneur oléique moyenne (35-50%). Cependant, diverses combinaisons de ces gènes donnent des niveaux intermédiaires. Knowles (1972) a supposé que l'existence de gènes modificateurs intensifie ou diminue les expressions du principal gène *ol* du carthame. La teneur en acide oléique du génotype *olol* est généralement de 71 à 75% des acides gras totaux. Hamdan et *al.* (2012) ont montré le rôle dominant du gène FAD2-1 et l'implication d'au moins un gène modificateur ayant un effet positif qui augmente la teneur en acide oléique du carthame.

5.3. Protéine

Du fait de leur richesse en protéines et des lipides, les cultures oléagineuses sont des sources importantes de nutriments (Yeilaghi et *al.*, 2012). La teneur en protéine et acides aminés chez ces espèces est apportée par nombreuses études (Nosheen et *al.*, 2016 ; Al Surmi et *al.*, 2016 ; Maziero et *al.*, 2019). Cette teneur varie entre 16-21% pour le carthame (Ada, 2014) et 20% chez le tournesol (Youle et Huang, 1978). Tonguç et Erbaş (2012) ont montré des valeurs oscillant entre 9 à 14.9% de protéine chez d'autres espèces des Astéracées.

Le changement de la fraction protéique de l'huile de carthame a été étudié auparavant (Nosheen et *al.*, 2016 ; Amini et *al.*, 2014 ; Movahhedy-Dehnavy et *al.*, 2009). La teneur en protéine des oléagineuses est grandement influencée par les conditions environnementales (Ghanbari-Odivi et *al.*, 2013), la conduite culturale (Poisson et *al.*, 2019; Nosheen et *al.*, 2016) et la variabilité génétique (Cooper et *al.*, 2001, Roche et *al.*, 2004). Toutefois, la haute température augmente le taux de protéine (Song et *al.*, 2016).

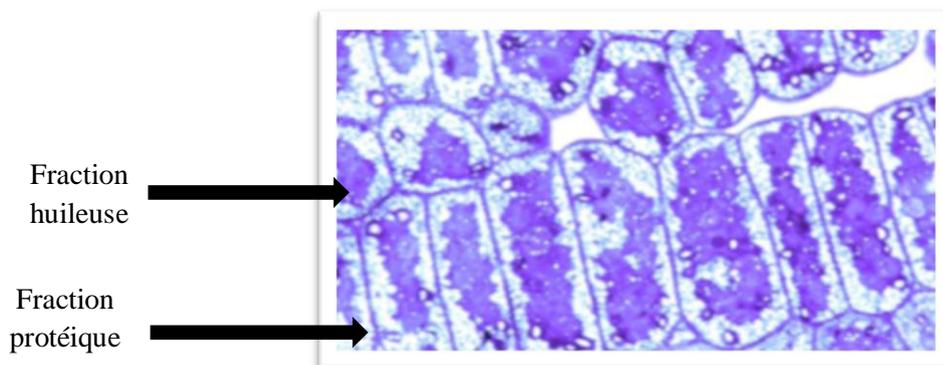


Figure. 9. La fraction protéique et huileuse dans des cellules des graines de carthame (Mündel et *al.*, 2004).

6. Polyphénols

Les composés polyphénoliques ou polyphénols forment une grande famille de composés chimiques très divers, des simples acides phénoliques jusqu'aux grands polymères complexes qui sont par exemple, les tannins et la lignine. Leur structure de base est de phénol, un cycle aromatique hydroxylé (Fig 10).

La recherche sur le carthame s'est concentrée sur l'identification de composés bioactifs dans les fleurs, les graines et l'huile, élucidant plus de 200 structures (Li et *al.*, 2017). Les composés phénoliques sont la majorité des métabolites secondaires du carthame. La fonction de ces molécules est de fournir un meilleur développement et une meilleure mécanisme de défense (Perez-Perez et *al.*, 2018). De plus, l'importance de composés phénoliques est qu'ils ont un effet protecteur contre les radicaux libres responsables des maladies dégénératives chroniques (Tapia-Hernández et *al.*, 2018).

Les Astéracées sont considérées comme une source substantielle de métabolites secondaires comme les polyphénols et les flavonoïdes où elles sont localisés spécifiquement dans leurs fleurs, les feuilles et leur huile extraite des graines (Jachula et *al.*, 2018) (Tabelau 6). Ces composantes ont un effet bénéfique sur la stabilité à l'oxydation des huiles. Cependant, la combinaison de la lumière et du stress hydrique peut augmenter l'accumulation des composés polyphénoliques dans le carthame, ce qui présente une caractéristique souhaitable pour les feuilles qui pourraient être utilisées comme thé ayant des propriétés anti-allergiques et antioxydantes (Yaginuma et *al.*, 2002). En outre, les composés phénoliques sont associés à la qualité nutritionnelle et sensorielle des graines oléagineuses (Bozan et Temelli, 2008). À des concentrations élevées, ils peuvent contribuer à la couleur foncée, au goût amer et à la mauvaise saveur de l'huile (Shahidi, 2000). La majorité des composés phénoliques du carthame est située dans les pétales de fleurs et le tourteau de la graine (Wrigley et *al.*, 2016).

Ils sont de l'ordre 452 à 677 mg/100g chez le tourteau de carthame (Al Surmi *et al.*, 2016). Néanmoins, chez l'huile de carthame, cette composition s'est révélée importante (Ben Moumen *et al.*, 2015). Cho *et al.* (2004) et Golkar et Taghizadeh (2018) ont suggéré que les principaux composés isolés des différentes parties anatomiques du carthame sont des composés phénoliques. Des études ultérieures ont montré que dans la feuille des plantes se trouve la plupart des composés phénoliques parce que la partie aérienne est plus en contact avec l'environnement, augmentant leur formation en tant que facteurs de défense contre les micro-organismes, les insectes et les conditions climatiques défavorables (Shikano *et al.*, 2017).

L'importance de l'utilisation de l'huile de carthame dans l'application pharmaceutiques (Singhal *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2016) et cosmétiques (Zhaomu et Lijie, 2001) est due principalement à sa richesse en composés phénoliques et leurs activités antioxydantes. L'utilisation des traitements à base des graines des espèces de la famille des Astéracées a un effet positif contre les maladies de la peau (Rasul et Akhtar, 2012), ainsi que ces traitements ont une propriétés lissantes très appréciée (Gediya *et al.*, 2011). Les composés phénoliques stimulent la formation osseuse et augmentent les taux de cholestérol HDL plasmatique chez les rats déficients en œstrogènes et inhibent la synthèse de la mélanine (Kim *et al.*, 2006). La variabilité génétique (Sung *et al.*, 2016a) et les conditions environnementales sont à l'origine de la variation de la teneur en polyphénols des graines. Elle s'intensifie avec la recrudescence de la température et le déficit hydrique (Gucci *et al.*, 2019). Le taux des polyphénols et l'activité antioxydante dépendent aussi des méthodes d'extraction (Kollia *et al.*, 2016).

Tableau.6. Teneur totale des polyphénols (TPC), Activité antioxydante (AA) et Flavonoïde chez des espèces Astéracées et Oléagineuses.

| Espèce | Origine | Section de la plante | TPC | AA | Flavonoïde | Références |
|----------------------------------|--------------|----------------------|---|-------------------------|---|--------------------------------|
| <i>Carthamus Tinctorius</i> | Korée du sud | Graines | 126 (mg GAE /g) | 28.7-36.2 (%) | 62.2 (mg QE /g) | Yu et al. (2013) |
| <i>Carthamus Tinctorius</i> | Iran | Fleurs | 245.27 (mg GAE/g Extracts) | 2180.73 (ppm) | / | Ebadi et al. (2014) |
| <i>Carthamus Tinctorius</i> | Mexique | Feuilles | 6.44 mg GAE/g | 91.24 (%) | 11.22 mg QE/g | Del-Toro-Sánchez et al. (2021) |
| <i>Carthamus Tinctorius</i> | Mexique | Tiges | 1.9 mg GAE/g | 83.60 (%) | 3.9 mg QE/g | Del-Toro-Sánchez et al. (2021) |
| <i>Giza/Carthamus Tinctorius</i> | Egypte | Huile de graines | 3.4 (mgGAE/g) | IC ₅₀ = 0.84 | / | Taha et Matthäus (2018) |
| <i>Centaurea kotschyi</i> | Turquie | Partie aérienne | 98.74 (mg GAE/g extract) | / | 5.76 (mg RES/g extract) | Zengin et al.(2016) |
| <i>Carthamus caeruleus</i> | Algérie | Racines | 12.96 (mg equivalent gallic Acid/g lyophilisat) | 0.74 (mg/ml) | 2.231 (mg equivalent Quercetin/g lyophilisat) | Baghiani et al.(2010) |
| FH-37/Tournesol | Pakistane | Graines | 2233.12 (mg/100 g) | 58.33 (%) | / | Nadeem et al. (2010) |
| Albarte/Tournesol | Serbie | Amande | 16.28 (mg/g d.m) | 0.95 (mg d.w) | / | Žilić et al. (2010) |
| <i>Brassica napus</i> | USA | Graines | 71.9(μg/mg) | 699.2(μg/ml) | 34.9(μg/mg) | Jun et al. (2014) |
| Artichaut | Grèce | Tige | 0.37 (mg GAE) /g) | 1.18 mg/ml | / | Kollia et al. (2016) |

Les structures des composés phénoliques se distinguent par leur squelette carboné (nombre de carbone), leur degré de modification (oxydation, hydratation, méthylation) et les liaisons qui peuvent exister avec d'autres molécules comme des sucres ou d'autres composés phénoliques. En fonction des voies de biosynthèse impliquées dans leur élaboration, les composés phénoliques se classent en une dizaine de grandes classes de composés regroupant des formes

simples (phénols simples, acides hydroxybenzoïques, acides hydroxycinnamiques, coumarines, naphthoquinones, stilbènes, flavonoïdes, lignanes...) et des phénols condensés issus de la polymérisation des lignanes (lignines) ou de certains flavonoïdes (tanins).

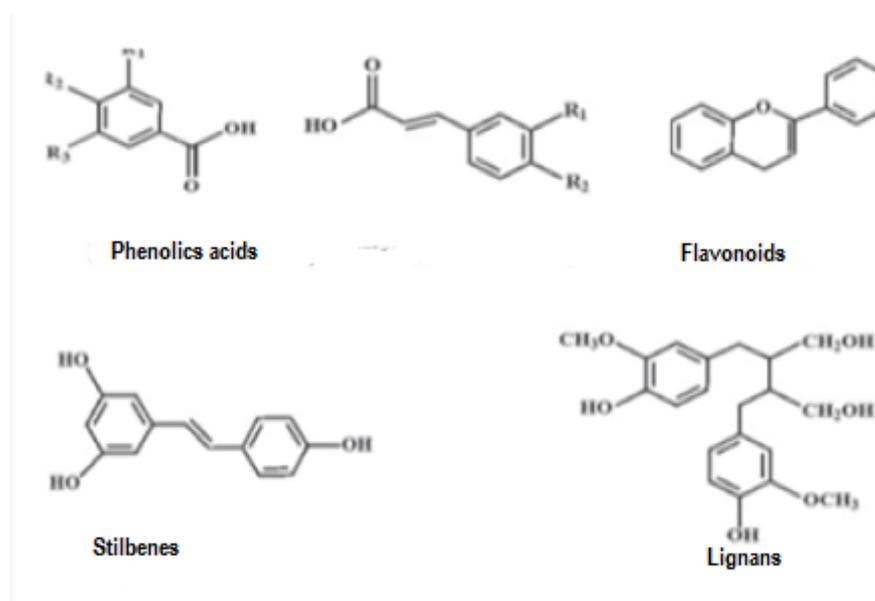


Figure.10. La formule chimique des principaux polyphénols (Amawi et *al.*, 2017).

6.1. Biosynthèse des polyphénols

Les voies de biosynthèse des polyphénols comprennent les voies de métabolisme de l'acide shikimique (Talapatra et Talapatra, 2015) et du phénylpropanoïde (Randhir et *al.*, 2004; Chen et *al.*, 2018). La voie métabolique phénylpropanoïde est une voie importante pour la production de flavonoïdes (Pandey et *al.*, 2016). Tandis que, la voie biochimique de l'acide shikimique est un lien majeur entre le métabolisme primaire et secondaire chez les plantes supérieures (Macheroux et *al.*, 1999). Cette voie donne naissance à des acides aminés aromatiques qui peuvent être à l'origine de métabolites secondaires ou primaires.

La phénylalanine et la tyrosine sont des composés précurseurs de la voie métabolique des phénylpropanoïdes et leurs voies de biosynthèse constituent deux branches parallèles et impliquent l'intervention de cinq enzymes (Huang et *al.*, 2019).

Les enzymes sont la phénylalanine ammoniac-lyase (PAL; une enzyme régulatrice clé dans le métabolisme des plantes), l'acide cinnamique-4-hydroxylase (C4H) et le 4-coumarate: coenzyme A (CoA) ligase (une enzyme régulatrice clé dans la branche phénylalanine), la tyrosine aminotransférase (la première enzyme clé et enzyme limitant la vitesse dans la voie du métabolisme de la tyrosine) et l'acide rosmarinique synthétase (une enzyme clé dans la synthèse catalytique) (Ma et *al.*, 2015).

Généralement, la biosynthèse commence par la conversion de la l-phénylalanine en acide trans-cinnamique par la phénylalanine ammoniac lyase (PAL) (Fig 11). PAL est un enzyme clé dans ce processus chimique puisqu'elle contrôle l'orientation du carbone vers la production de composés phénoliques plutôt que vers la production de métabolites primaires comme les protéines. Son activité est stimulée par de nombreux agents tels que la radiation rouge ou ultra violettes (Hopkins, 2003). De même, lorsque la teneur en une phytoalexine, la glycéroline, augmente suite à une inoculation de plants de soja par un champignon, l'activité de la PAL augmente parallèlement.

Ensuite l'acide cinnamique est rapidement transformé en acide *p*-coumarique par l'addition d'un radical hydroxyle par la cinnamate 4-hydroxylase (C4H). 4-coumarate: CoA ligase (4CL) convertit l'acide *p*-coumarique en son ester de coenzyme-A (*p*-coumaroyl-CoA), qui sera le précurseur de divers dérivés phénylpropanoïdes, notamment les flavonoïdes, les lignines et les isoflavonoïdes (Winkel-Shirley, 2002).

Le composé précurseur de l'acide caféique est la phénylalanine, qui produit de l'acide caféique par l'action des enzymes PAL et C4H.

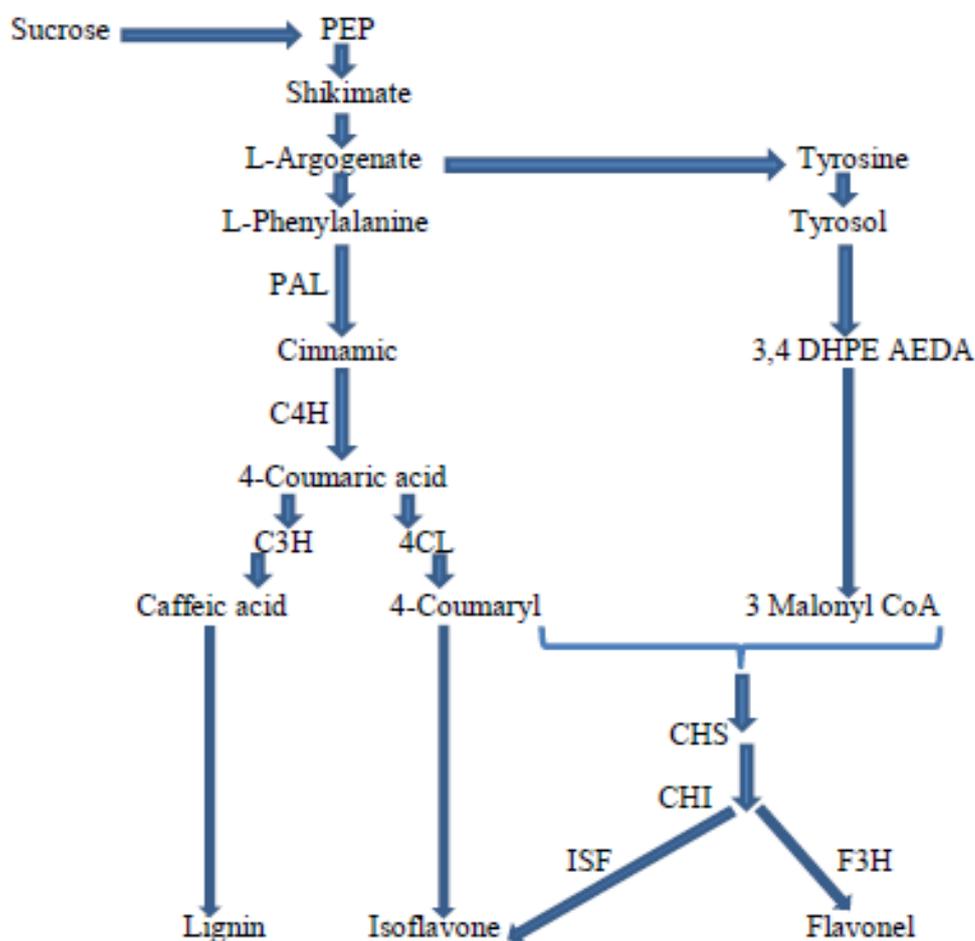


Figure.11. Biosynthèse des polyphénols.

7. Phytostérols

Les phytostérols sont des constituants naturels des plantes qui présentent une similitude structurelle étroite avec le cholestérol (Nes, 2011). Ils jouent un rôle important dans le domaine pharmaceutique (production des stéroïdes), nutritionnel et le domaine cosmétique (Hamrouni-Sellami et al., 2007). Ils se localisent généralement dans la partie insaponifiable de l'huile végétale (Roche, 2005). Les apports des phytostérols provenant de sources alimentaires dans les pays occidentaux et les pays méditerranéens ont été préalablement cités (Jiménez-Escrig et al., 2006; Valsta et al., 2004). Il a été constaté que la gamme des apports en phytostérols est de 150 à 450mg/jour et que les huiles végétales telles que l'huile de maïs, l'huile de colza et l'huile de tournesol sont considérées comme les sources alimentaires les plus riches en phytostérols (Phillips et al., 2002). Les céréales, les légumes, les fruits et les noix sont également une autre source de phytostérols.

La richesse de l'huile de carthame en phytostérols a été annoncée par Hamrouni-Sellami et al. (2007), Ben moumen et al. (2015) et Taha et Matthäus (2018). Cette teneur est aussi apportée chez nombreuses plantes des Astéracées (Hussanein et al., 2011; Roche et al., 2010a).

Dix et six stérols ont été identifiés dans les huiles de graines de *C. oxyacantha* et *C. tinctorius*, respectivement. Campestanol, 24-méthylène cholestérol, gramisterol, 24-éthylcholest-7,24(28)dien-3 β -ol, cycloartenol et 24-méthylèncycloartanol sont présents dans l'espèce *C. oxyacantha*, tandis que *C. tinctorius* contient avenasterol et Δ 7- stigmastérol. Chez les deux espèces, le β -sitostérol constitue la principale élément et représente 36.4% et 46% de la quantité totale de stérols (Chakradhar et al., 2019).

La composition des phytostérols des graines est en rapport direct avec les conditions environnementales, le génotype et la pratique culturale (Tripathi et Agrawal, 2013; Savoie et al., 2015; Velasco et al., 2014). L'élévation de la température s'est accompagnée par une augmentation des phytostérols notamment de campestérol. Tandis que, la haute température diminue le pourcentage de stigmastérol et de β -sitostérol (Vlahakis et Hazebroek, 2000; Roche et al., 2019).

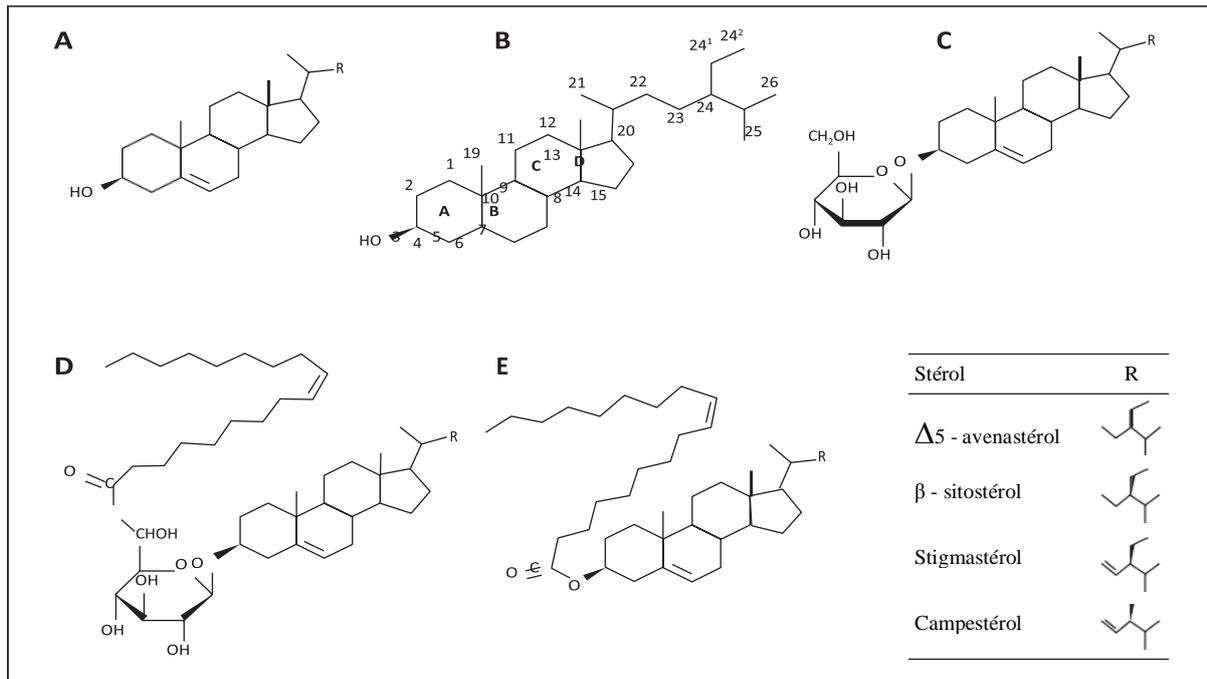


Figure.12. Les principaux stérols de l'huile de carthame. A) structure générale d'un stérol libre ; B) numérotation des carbones; C) stéryl glucoside (SG) ; D) acyl stéryl glucoside (ASG) et ; E) stéryl ester ou (SE). (Berger *et al.*, 2010)

Ovesna *et al.* (2004) ont montré l'inhibition expérimentale du développement du cancer du côlon et du sein par le taraxastérol et le β -sitostérol. La figure 8 résume l'activité anti-cancer de β -sitostérol.

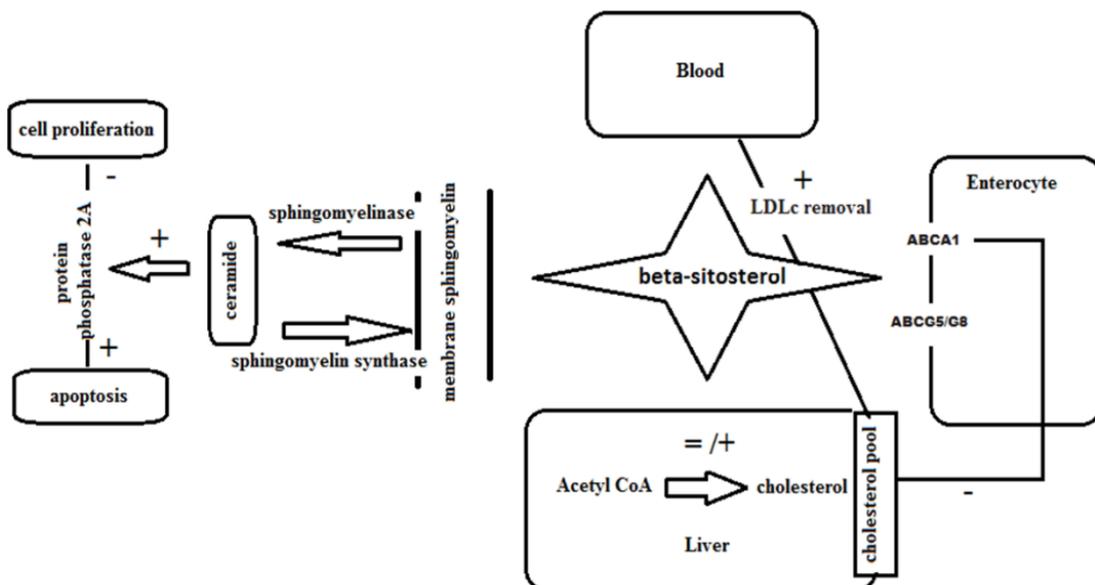


Figure.13. L'activité anti-cancer de β -sitostérol (Saeidnia *et al.*, 2014)

8. Triglycérols

Les triacylglycérols sont une source primordiale d'énergie pendant la germination et la croissance des plantes oléagineuses (Graham, 2008). Les composantes principales des huiles végétales sont principalement des triglycérides (TAGs) avec plus de 97% (Chernova et *al.*, 2019). Ces triglycérides sont généralement composés de trois acides gras estérifiés en glycérol où ils sont considérés comme un critère important pour déterminer les propriétés biochimiques de l'huile (Charnova et *al.*, 2019; Baud et Lepiniec, 2010). Zlatanov et *al.* (2015) ont distingué 9 types de triglycérols chez quatre variétés de carthame à savoir LLL, LLO, PLL, OOO (8-10%) et LOO. Ainsi que, Lisa et Holcapek (2008) ont comparé le profil des triacylglycérols dans nombreuses huiles végétales. Ils ont montré que le carthame représente 56 types de triglycérols avec la dominance de LLL (43%) par rapport aux autres cultures. Le profil des TAGs a été démontré chez nombreuses espèces comme tournesol, colza et artichaut (Charnova et *al.*, 2019; Hassanein et *al.*, 2011).

Au cours de la maturation des graines ce profil des triglycérols est fortement influencé par la température (Velasco et Fernandez-Martinez, 2002).

8.1. Biosynthèse des triglycérols

Le processus de biosynthèse du triacyglycérol se déroule par trois chemins, deux voies qui ont lieu dans le foie et le tissu adipeux, il s'agit des voies sn-glycérol-3-phosphate et dihydroxyacétone phosphate, et une voie monoacylglycérol dans les intestins. Une autre voie a été reconnue dans laquelle une diacylglycérol transférase est impliquée dans les graines matures de plantes et de certains tissus animaux. La voie la plus importante menant aux triacylglycérols est la voie sn-glycérol-3-phosphate ou Kennedy.

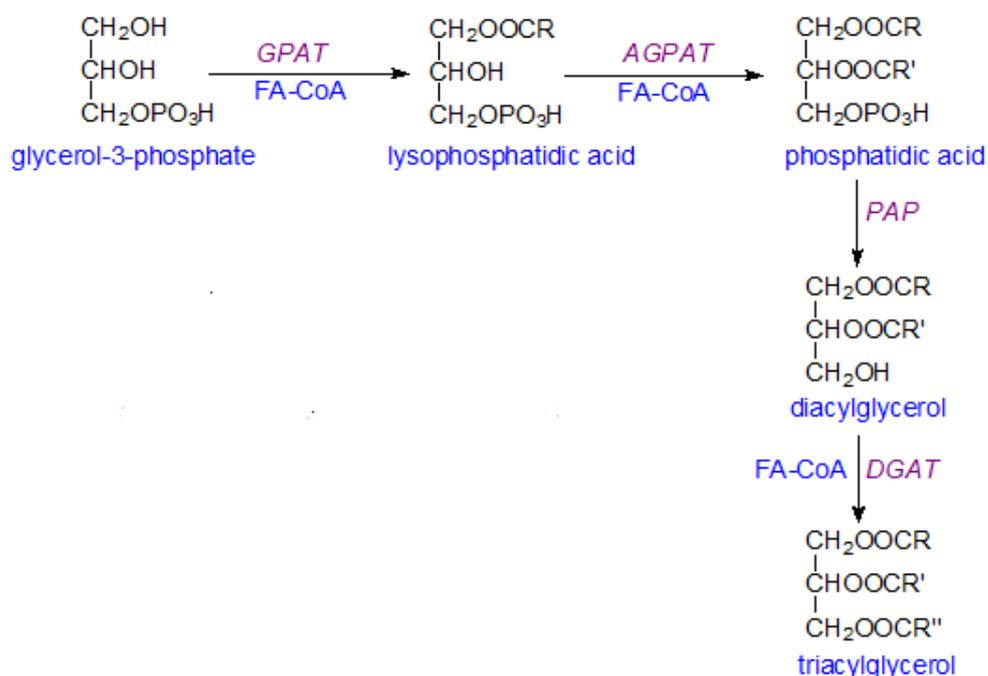


Figure.14. Biosynthèse des triglycérides

La biosynthèse du TAG dépend de trois réactions consécutives: la formation d'acide phosphatidique (PA) à partir du glycérol-3-phosphate, suivie de la formation de diacylglycérol (DAG) à partir de PA et le TAG est finalement formé à partir de DAG par l'intervention de l'enzyme diacylglycérol acyltransférase (Ohlrogge et Browse, 1995).

Chez les oléagineux, les acides gras sont estérifiés pour produire du TAG dans les plastes suite à un allongement ou une désaturation supplémentaire. En conséquence, ces acides gras ne sont pas des précurseurs immédiats pour la biosynthèse du TAG.

Les chaînes Acyle générées dans le plastide sont converties en phosphatidylcholine (PC), substrat pour la désaturation ou la modification des acides gras. Deux mécanismes sont impliqués pour rendre ces acides gras modifiés disponibles pour la formation de TAG. Au cours du premier mécanisme acyl-CoA est libéré des réactions combinées directes d'acyl-CoA : PC acyltransférase (Ohlrogge et Browse, 1995), qui est ensuite utilisé pour la biosynthèse de TAG. Cette réaction permet à l'acide oléique nouvellement synthétisé dans les plastides de passer à une désaturation ou une modification supplémentaire. L'acide gras désaturé ou modifié est ensuite utilisé pour la formation de TAG ou d'autres lipides. Dans le deuxième mécanisme, le PC peut libérer toute sa partie du DAG pour la biosynthèse du TAG (Ohlrogge et Browse, 1995).

Ces nouvelles structures composées d'un glycérol et de 3 acides gras définissent les triglycérides ou triacylglycérol (TAG) qui sont stockés au niveau de la graine sous la forme de corps lipidiques, appelés aussi oléosomes, sphérosomes ou encore corps gras (Stymne et Stobart, 1987).

9. Phospholipides

En général, les phospholipides sont plus insaturés que les triacylglycérols. Ils sont considérés comme des messagers impliqués au cours du développement des plantes et les réponses au stress en induisant la signalisation intracellulaire (Regente et *al.*, 2008). Aussi, les phospholipides peuvent contribuer à l'amélioration de la stabilité oxydative des huiles et des graisses (Velasco et Dobarganes, 2002), puisqu'ils agissent en synergie avec d'autres antioxydants au niveau des huiles végétales (Judde et *al.*, 2003). Les phospholipides sont présentés chez nombreuses huiles oléagineuses comme le soja (3.2%), colza (2.5%) et de tournesol (1.5%) (Gunstone, 2005).

La phosphatidylcholine, phosphatidylinositol et phosphatidyléthanolamine sont parmi les phospholipides fréquemment révélés chez les oléagineux (Zlatanov et *al.*, 2015 ; Lee et *al.*, 2004; Uitterhaegen et *al.*, 2016). La phosphatidylcholine est le phospholipide le plus dominant dans l'huile de carthame (Lee et *al.*, 2004). Regente et *al.* (2008) ont démontré l'existence de phospholipides dans les composés extracellulaires des graines de tournesol. Iwata et *al.* (1991) ont montré que l'huile de carthame avec 23.1% de phosphatidylcholine et 13.1% de phosphatidyléthanolamin induise une réduction du taux plasmatique de cholestérol des lipoprotéines de basse densité (LDL) et augmente du taux de cholestérol des lipoprotéines de haute densité (HDL). Liu et *al.* (2013) et Gunstone (2005) ont montré l'effet de la variété et les conditions environnementales sur le profil des phospholipides.

10. Les tocophérols

Les tocophérols présentent des propriétés anti-oxydantes responsables de la stabilité oxydative de l'huile (Sattler et *al.*, 2004 ; Roche, 2005). Ils sont l'une des traits qui jouent un rôle important pour déterminer la qualité des huiles végétales (Redondo-Cuevas et *al.*, 2018). Il en existe quatre formes à savoir α , β , γ et δ -tocophérol. γ -tocophérol (Seppanen et *al.*, 2010) et quatre tocotriénols (α -tocotriénol, β -tocotriénol, γ -tocotriénol and δ -tocotriénol) (Ayerdi Gotor et *al.*, 2006).

In vivo, l' α -tocophérol, appelé vitamine E (Traber et Atkinson, 2007), prévient contre plusieurs maladies du cancer et cardiovasculaires (Nesaretnem et *al.*, 2007).

L'huile de carthame, contient également des tocophérols, connus pour leur effet antioxydant et leur forte teneur en vitamine E (Jhajharia et al., 2013). Le tocophérol est très répandue chez les graines oléagineuses (Zlatanov et al., 2015; Roche, 2005 ; Siger et al., 2017; Rafalowski et al., 2008). La teneur en tocophérols dépend fortement du génotype et les conditions environnementales (Ayerdi Gotor et al., 2006; 2015), ainsi que le type de l'huile et sa méthode d'extraction (Matthäus et Brühl, 2001). Velasco et al. (2002) ont conclu que la teneur en tocophérol n'est pas corrélée à l'huile de graines ou au rendement en graines, ce qui indique la possibilité de sélectionner ce caractère sans affecter les performances des génotypes.

11. Caroténoïdes

Les caroténoïdes sont un autre groupe de la partie insaponifiable des huiles végétales, ayant un rôle de détermination de leur qualité chimique (Konuskan et al., 2018). Les principaux caroténoïdes actifs sont α -carotène et le β -carotène ainsi que la β -cryptoxanthine. Ces caroténoïdes sont considérés comme un précurseur de vitamine A (Saini et al., 2015). Les concentrations de vitamine E et de caroténoïdes de plusieurs produits céréaliers et légumes ont été caractérisées par HPLC (Balz et al., 1993; Lako et al., 2007). Les caroténoïdes sont aussi présentés en grande quantité chez l'huile de colza (Saleem et Ahmed, 2018). Franke et al. (2010) ont montré que l'huile de carthame ne contient que des traces de caroténoïdes avec 0.22mg/100g comparativement à celles des autres cultures oléagineuses comme le colza (1.47 mg/100g) et l'huile de lin (0.37mg/100g). Une autre étude menée par Ben Moumen et al. (2014) a indiqué que l'huile de carthame contient au moyen de 1.24mg/kg de caroténoïdes. Ils ont montré aussi que quatre différents types de ces composantes ont également été signalés à savoir α -carotène, β -carotène, γ -carotène et β -cryptoxanthin. Ce dernier s'avère le plus important avec une teneur moyenne de 0.34mg/kg. Il est considéré aussi comme des mastocytoses naturelles ce qui attribue une haute qualité à l'huile de carthame (Takayanagi et Mukai, 2014). Cependant, la dégradation des vitamines dépend du contenu et des activités des antioxydants et également des pro-oxydants (lumière, air, haute température, présence d'acides gras libres, métaux de transition, produits d'oxydation) (Burch, 2011).

Au total, six composés caroténoïdes (néoxanthine, violaxanthine, lutéine, zéaxanthine, -cryptoxanthine et -carotène) ont été identifiés chez *C. oxyacantha* et *C. tinctorius*. Le β -carotène peut être considéré comme un marqueur métabolite permettant de distinguer les espèces de carthame. Cependant, le composé caroténoïde le plus répandu dans les espèces de carthame est la zéaxanthine, qui constitue environ 37% et 58% du total des caroténoïdes (Chakradhari et al., 2019).

12. Saponines

Les saponines sont des composés phytochimiques et des glycosides naturels dotés d'un large éventail de propriétés pharmacologiques. La saponine triterpénoïde bioactive, 3 β -O-[β -D-xylopyranosyl(1 \rightarrow 3)-O- β -D-galactopyranosyl]-lup-12-ène-28 acide oïque-28-O- α -l-rhamnopyranosyl ester composé dans la fraction méthanolique, a été rapporté dans les racines de *C. tinctorius* (Yadava et Chakravarti, 2008). De plus, des études récentes ont rapporté deux composés alcaloïdes-saponines (N-coumaroylsérotonine et N-féruloysérotonine) dans les graines de *C. tinctorius* (Chakradhari et al., 2019).

13. Biosynthèse des lipides de carthame

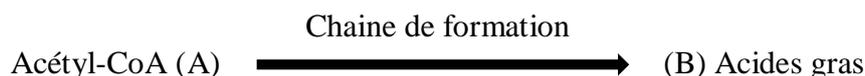
Les plantes synthétisent une grande variété d'acides gras (Gunstone et al., 2007), qui sont des composantes intégrales des stratégies de réponse/protection pour la tolérance aux basses températures dans les organismes photosynthétiques (Gibson et al., 1994).

Le rôle important des acides gras dans l'industrie oléochimique ainsi que dans un certain de processus biologiques fondamentaux suscite l'intérêt de dévoiler sa biosynthèse (Kaufman, 1990). Roche et al. (2019) ont donné un modèle simple indiquant la biosynthèse des acides gras chez les Astéracées.

Chez les oléagineuses la biosynthèse des acides gras se déroule pendant le développement de la graine par l'implication d'une régulation hormonale induite par des enzymes spécifique qui sont, cependant, à la maturité de semence, leur capacité est très faible ou inexistante. Les désaturases solubles et les désaturases membranaires (Sidorov et Tsydendambaev, 2014) sont des enzymes clés permettant de convertir les acides gras saturés (C-C) en acides insaturés (C=C) en ajoutant une liaison à un carbone spécifique.

La voie de synthèse des acides gras dans les plastides détermine la longueur de leur chaîne (jusqu'à 18 carbones) et le niveau de leur saturation dans les huiles de graines (Bates et al., 2013).

Les carbones du précurseur métabolique des acides gras (acétyl-CoA) proviennent du pyruvate et des hexoses. La synthèse des acides gras se fait à partir de l'acétyl-CoA dans les chloroplastes des tissus végétatifs et dans les plastes des tissus non chlorophylliens tels les graines (Harwood, 1996). La formation de malonyl-CoA à partir de l'acétyl-CoA et bicarbonate par acétyl-CoA carboxylase est considérée la clé principale pour la biosynthèse des acides gras (Baud et Lepiniec, 2010).



Cette synthèse des acides gras se fait par intervention de plusieurs complexes multi protéiques, l'acétyl-CoA carboxylase (ACCCase) et FAS (Bates et *al.*, 2013; Sidorov et Tsydendambaev, 2014). Dans les graines de plantes oléagineuses, deux types d'acétyl-CoA carboxylase sont présentes, la forme cytosolique (type I) et la forme chloroplastique (Type II), qui sont à l'origine de la synthèse *de novo* des chaînes d'acyles (Baud et Lepiniec, 2010 ; Bates et *al.*, 2013 ; Sidorov et Tsydendambaev, 2014).

Dans la plupart des graines, le carbone est livré à la synthèse des acides gras par glycolyse avec de l'hexose et/ou du triose comme glucide prédominant entrant dans le plaste. Cependant, les graines vertes peuvent également utiliser la lumière pour fournir du NADPH et de l'ATP, ce qui permet un «contournement» de la glycolyse via l'activité ribulose1,5-bisphosphate carboxylase et les enzymes pentose phosphate. Cette voie alternative est plus économe en carbone, résultant en 20% plus d'acétyl-CoA disponible pour la synthèse d'huile, et ne nécessite pas non plus d'approvisionnement en réducteur de la voie oxydante du pentose phosphate (Hay et Schwender, 2011).

L'ATP et l'acétyl-CoA, le NADPH et le NADH sont nécessaires pour chaque addition de deux carbones à une chaîne acyle en croissance dans les réactions catalysées par l'acétyl-CoA carboxylase et FAS (Slabas et Fawcett, 1992). Cette énergie est fournie par le processus de photosynthèse dans les tissus photosynthétiques. Tandis qu'elle est importée par les plastides ou générés par voie intraplastiale par oxydation des glucides ou par des voies métaboliques dans les tissus non photosynthétiques (Rawsthorne, 2002). FAS utilise acétyl-CoA comme l'unité de démarrage et malonyl-ACP comme pour l'élongation (Baud et Lepiniec, 2010).

La transformation de l'acétylCoA à malonylCoA est catalysée par la 1,3-kétoacyl-ACP synthétase III (KAS, EC 2.3.1.41), l'une des trois kétoacyl synthétases présentes dans les systèmes végétaux. KAS I est responsable des condensations dans chaque cycle d'élongation jusqu'à la production du palmitoyl-ACP (16:0-ACP). KAS II assure l'élongation plastidiale finale, celle du palmitoyl-ACP (16:0-ACP) au stéaroyle-ACP (18:0-ACP).

Le β -kétoacyl-ACP formé au cours de la réaction de condensation subit successivement une réaction de réduction par la β -kétoacyl-ACP réductase, une déshydratation par la β hydroxyacyl-ACP déhydratase et une réduction supplémentaire par enoylacyle-ACP réductase pour former butyryl-ACP. La coenzyme des deux réactions d'oxydoréduction est le NADPH. Le butyryl-ACP sera prolongé par deux autres unités C2 après une nouvelle condensation

avec du malonyl-ACP. Cette réaction est catalysée par la β -kétolacyl-ACP synthétase I (KASI). Après un cycle de sept étapes, le palmitoyl-ACP est formé (Baud et Lepiniec, 2010).

Le produit final de la synthèse d'acide gras est l'acide palmitique (Fig 16). Les acides gras stéarique et oléique sont synthétisés dans le chloroplaste. La palmitoyl-ACP (C16:0 -ACP) sera étendue par deux nouvelles unités pour former une chaîne stéaroyl-ACP (C18:0 -ACP) par une stéaroyl-ACP synthétase soluble dans les plastes qui est un complexe multienzymatique composé de quatre enzymes (KASII, énoyl-ACP réductase, hydroxyacyl-ACP déshydrase et énoylacyl-ACP réductase) (Harwood, 1996).

Le stéaroyl-ACP formé est ensuite désaturé par l'action de stéaroyl-ACP désaturase (SAD, EC 1.14. 19.2) en l'oléoyl-ACP (C18: 1 Δ 9-ACP) (Zhang et *al.*, 2015). Cette enzyme introduit la première double liaison Δ 9 dans l'acide gras saturé, ce qui entraîne la conversion de 18:0-ACP en 18: 1 Δ 9-ACP (Fox et *al.*, 1993).

L'acétyl CoA est également impliquée dans beaucoup d'autres synthèses telles que celle des acides aminés et, par conséquent des protéines. Roche et *al.* (2019) ont aussi indiqué l'importance de l'acétyl CoA dans la biosynthèse des phytostérols chez les Asteracées (Roche et *al.*, 2019) (Figure 15).

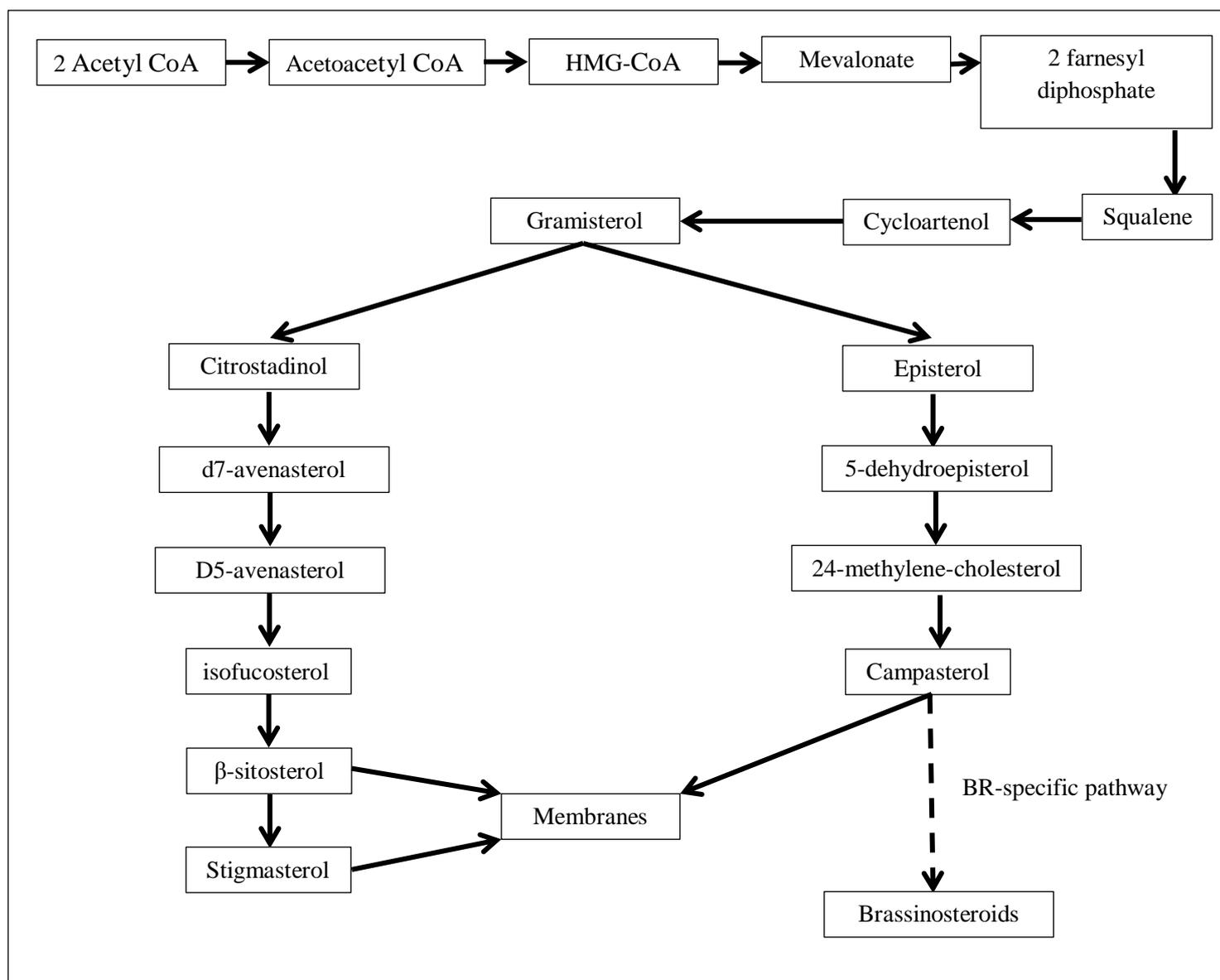


Figure.15. Biosynthèse des stérols chez les Astéracées (Roche et *al.*, 2019)

La production de l'huile au cours du développement de la graine oléagineuse se produit en courte période. Par conséquent, pour bien élucider la biosynthèse des acides gras ça sera nécessaire alors de sélectionner la graine à un stade aussi précoce que possible car elle accumule rapidement des inhibiteurs inconnus, puissants, qui désactivent les enzymes impliquées dans ce processus (Stumpf et Conn, 1987).

Sims et *al.* (1961) montrent que la graine de carthame au cours de son développement représente un changement significatif dans la quantité et la qualité de l'huile. Généralement, la synthèse des lipides se produit à partir de 10^{ème} jours après la floraison (Rahamatalla et *al.*, 1998) et elle s'étale dans les 15 jours suivants. Cependant, Slack et *al.* (1985) ont révélé que l'accumulation la plus rapide de l'huile est dans une période de 4 à 5 jours (13-18 jours après la floraison), correspond à 70% de l'huile produite.

Rahamatalla et *al.* (1998) ont indiqué que la teneur en huile des quatre variétés de carthame au cours de cette période d'accumulation varie entre 10% (dès le 10^{ème} jour) à 43% après 40 jours de floraison, soit un taux d'augmentation d'environ 47% (après 20 jours), à 70% (après 30 jours).

Hamrouni et *al.* (2004) et Gecgel et *al.* (2007) ont révélé que la teneur en huile des graines de carthame augmente pendant la maturation des graines.

L'acide linoléique est l'acide le plus dominant de l'ensemble des acides gras constitués chez de l'huile de carthame. Sa synthèse ne se déroule qu'au cours d'une petite période pendant le développement de la graine. Selon Rahamatalla et *al.* (1998), l'acide linoléique représente un taux de plus de 50% à partir de 10^{ème} jours de la floraison puis il augmente lentement jusqu'aux 40^{ème} jours de ce stade avec un pourcentage de 70.5% selon les géotypes étudiés. Ils ont montré aussi que le taux de l'acide linoléique fait 3 fois de l'acide oléique après 10 jours de la floraison. Sims et *al.* (1961) ont rapporté que dans les graines de carthame en développement, la concentration en acide oléique augmente lentement au cours des 30 premiers jours après la fécondation et, dans certains cas, semble se stabiliser au fur et à mesure jusqu'à la maturité.

Le taux d'acide palmitique au cours de remplissage des graines de carthame est varié de 9.4% à 21.4% après 10 jours de la floraison, puis diminue après 20 jours de la floraison (Rahamatalla et *al.*, 1998). La diminution de taux de l'acide palmitique se réalise progressivement au fur et à mesure du développement des graines (Hill et Knowles, 1968). Quant à l'acide stéarique, il présente une certaine fluctuation selon le géotype étudié avec une valeur qui ne dépasse pas 3.7% (Rahamatalla et *al.*, 1998).

La quantité en huile et la composition des acides gras sont dépendant des conditions de l'environnement. La différence de la température nocturne/diurne est considérée l'une des facteurs abiotiques qui affectent grandement le pourcentage de l'huile et la composition chimiques des graines (Izquierdo et *al.*, 2002, 2006). Les acides gras sont les principales composantes qui déterminent la qualité des huiles. Pendant la germination des graines du tournesol, la teneur en huile augmente après 21^{ème} jours de l'anthèse, puis une l'accumulation se produit lentement jusqu'à pleine maturité.

D'autre auteurs ont cité que cette teneur en huile augmente dès le début de développement de la graine et diminue rapidement après 15-21 jours, et atteint les niveaux les plus élevés à 30^{ème} jours après l'anthèse, puis commence de nouveau à décliner. Cependant, l'accumulation maximale de l'acide oléique atteint au stade de reproduction puis diminue. À contrario, l'accumulation de l'acide linoléique reste dépendante des conditions climatiques et parfois il

est faible au début puis augment avec la maturité des graines et vice versa avec l'augmentation de la température et la diminution de l'humidité (Onemli, 2004). La cinétique d'accumulation des acides gras saturés est presque similaire. Généralement, elle est forte dès le début du stade de remplissage des graines puis faible avec leur maturité. La figure (16) élucide l'ensemble des processus et réactions qui se déroulent dans la graine pour produire de l'huile et les acides gras.

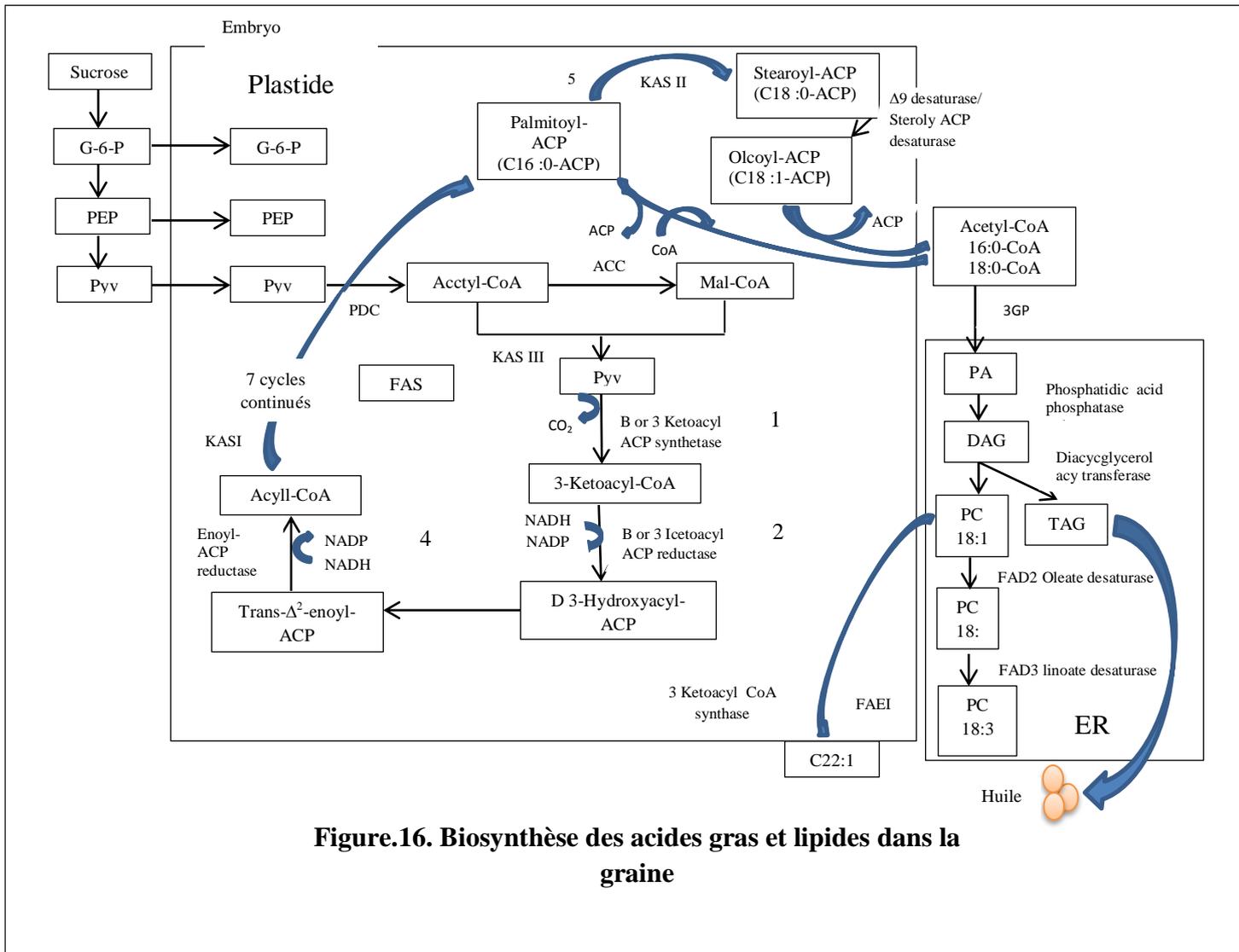


Figure.16. Biosynthèse des acides gras et lipides dans la graine

L'évaluation des conditions climatiques sur le comportement agronomique, la production d'huile des graines mûres du carthame (*Carthamus Tinctorius* L.) et ses qualités physico-chimiques a été réalisée sur trois génotypes conduits dans une zone semi-aride de l'ouest Algérien. Les expérimentations ont concernées trois génotypes de carthame conduites durant trois campagnes consécutives (2015, 2016, 2017) sous deux régimes hydriques, pluvial et avec complément d'irrigation.

1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est constitué de trois accessions de carthame (*Carthamus tinctorius* L.) d'origines et de paramètres agronomiques différents. Il inclue une population locale, Touggourt réputée par d'une bonne adaptation aux conditions climatiques locales. Les semences de cette population ont été fournies par un agriculteur de la région. Les principales caractéristiques du matériel sont mentionnées dans le tableau 7.

Tableau.7. Caractérisation morphologique des génotypes étudiés.

| Génotype | Origine | Couleur des fleurs | Aspects des feuilles | Précocité de maturation |
|-----------------|----------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Touggourt | Algérie | Jaune-rougeâtre | Sans épines | Tardive |
| Gila | France | Blanc-rougeâtre | Avec épines | Précoce |
| Halab | Syrie | Jaune | Avec épines | Précoce |

2. Conduite des essais

Les essais ont été conduits durant trois campagnes consécutifs (2015, 2016, 2017) à Tiaret (35° 20'01" Nord, 1° 80'48" Est), une région semi-aride des hauts plateaux de l'Ouest Algérien, au niveau de la station expérimentale de l'université Ibn Khaldoun. Le support de la culture est un sol d'une texture limono-argileuse et dont les principales caractéristiques pédologiques déterminées sont mentionnées dans le tableau 8. Elle a été conduite sous deux régimes hydriques, un régime pluvial et en irrigué. L'irrigation a été pratiquée dès le stade floraison, à la capacité au champ et à des fréquences déterminées selon les besoins de la culture et l'état du sol.

Tableau.8. Analyse physico-chimique du sol de parcelles utilisées au cours de trois années de culture.

| Année | pH | Conductivité électrique (µs/cm) | TDS (mg/L) | Matière organique (%) | Calcaire (%) | | Phosphore assimilable (ppm) | Texture du sol |
|-------|------|---------------------------------|------------|-----------------------|--------------|-------|-----------------------------|------------------|
| | | | | | total | Actif | | |
| 2015 | 7.73 | 218 | 208 | 1.53 | 3.75 | 1.25 | 206.51 | Limono-argileuse |
| 2016 | 8.07 | 164 | 148.6 | 1.35 | 6.67 | 2.25 | 192.65 | Limono-argileuse |
| 2017 | 7.92 | 112 | 105 | 1.45 | 3.33 | 1.00 | 198.78 | Limono-argileuse |

Le dispositif d'installation de la culture comprend deux traitements, pluvial et irrigué. Au niveau de chaque traitement les trois géotypes sont disposés en blocs aléatoires complets (Trois blocs). Au sein de chaque bloc chaque géotype est installé une seule fois. Les microparcelles sont d'une superficie de 14m². Les deux traitements irrigué et pluvial ont été espacés de 4m. Le semis a été réalisé à la mi-avril manuellement à une dose de 24000 pieds par hectare. Il a été fait en 11 rangs espacés de 0.3 m avec 4 m de longueur de chaque rang.



Figure 17. Plantes de carthame en plein champ (Photo prise par Zemour, 2016)



Figure 18. Génotype Français (Gila) (Photo prise par Zemour, 2016)



Figure 19. Génotype Algérien (Touggourt) (Photo prise par Zemour, 2016)



Figure 20. Génotype Syrien (Halab) (Photo prise par Zemour, 2016)

Afin d'assurer de bonne germination et installation des plants, une série d'irrigation ont été menée pour les essais au cours des trois années.

Bien que le carthame se caractérise par sa résistance à la concurrence des mauvaises herbes, des traitements phytosanitaires ont été procédés à un désherbage manuel périodique afin d'éviter toutes sortes de compétitions des mauvaises herbes et assurer un développement adéquat de l'ensemble des génotypes.

À la fin de cycle (fin Août- début Septembre), les graines ont été récoltées manuellement sur des capitules bien mûrées. Un changement de leur couleur de vert au jaune et le durcissement des capitules reflètent leur maturité finale. Les graines récoltées ont un taux de maturité évaluée par une teneur en eau qui présente approximativement 6%.

2.1. Paramètres climatiques des campagnes d'expérimentation

Les paramètres climatiques enregistrés au cours des trois années d'expérimentation sont mentionnés dans le tableau 9. Des divergences assez prononcées des cumuls pluviométriques ont caractérisées les années de conduite des essais, alors que les températures étaient peu variables. On note que l'année 2016 était la plus pluvieuse (58mm) comparativement aux deux autres (Tableau 9), alors que la répartition s'est avérée plus favorable au déroulement du cycle végétatif de la plante durant les deux campagnes 2015 et 2017. Au cours de ces deux années, la pluviométrie était plus favorable pour l'accomplissement des phases de remplissage des graines et leur maturité physiologique. Les températures moyennes durant le cycle de développement de

la plante variaient faiblement parmi les trois années. On note également que les températures maximales étaient élevées pour atteindre des pics de 36°C durant le mois de juillet.

Tableau.9. Conditions climatiques de l'essai au cours de trois années de culture (2015, 2016, 2017).

| Mois | Température (°C) | | | | | | | | | Pluviométrie (mm) | | |
|----------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|
| | 2015 | | | 2016 | | | 2017 | | | 2015 | 2016 | 2017 |
| | Moy. | Max | Min | Moy. | Max | Min | Moy. | Max | Min | | | |
| Avril | 15.3 | 23.5 | 7.1 | 12.8 | 19.9 | 5.6 | 13.0 | 20.1 | 6.0 | 0.0 | 24.6 | 6.8 |
| Mai | 19.2 | 28.3 | 10.1 | 16.4 | 24.3 | 8.6 | 19.8 | 29.0 | 10.6 | 12.7 | 26.7 | 26 |
| Juin | 21.1 | 29.3 | 12.9 | 21.7 | 30.4 | 12.9 | 25.2 | 34.0 | 16.5 | 7.4 | 6.5 | 0.4 |
| Juillet | 27.0 | 36.2 | 17.8 | 26.7 | 35.7 | 17.7 | 26.8 | 35.1 | 18.5 | 0.0 | 0.2 | 1.0 |
| Août | 27.0 | 34.6 | 19.3 | 25.6 | 34.7 | 16.4 | 27.7 | 36 | 19.5 | 12.0 | 0 | 4.8 |
| Moyenne | 21.9 | 30.4 | 13.4 | 20.6 | 29.0 | 12.2 | 22.5 | 30.4 | 16.3 | | | |
| Total | | | | | | | | | | 32.1 | 58.0 | 39.0 |

3. Les paramètres mesurés

3.1. Détermination des paramètres agronomiques

Au cours de développement de la plante des paramètres agronomiques ont été mesurés et qui se rapportent à:

- Hauteur de la plante à la maturité (cm);
- Nombre de feuilles/plante;
- Nombre de capitules/plante;
- Nombre de graines/capitules;
- Le poids de mille grains (g);
- Le rendement théorique en grains exprimé en qx/ha.

3.2. Détermination des paramètres physico-chimiques de l'huile des graines mûres

3.2.1. Préparation des échantillons

Les différentes mesures effectuées ont été réalisées sur le broyat des graines mûres récoltées. Une quantité de graines (40g) issues de chaque répétition des génotypes des deux traitements, pluviale et irrigué a été broyée par un broyeur (Krupps 70). L'ensemble des manipulations ultérieures ont été opérées sur ce broyat et ont concerné le rendement en huile et ses qualités physico-chimiques. Les différentes analyses ont été faites au niveau du laboratoire de chimie

agro-industrielle /ENSIACET (Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs en Arts Chimiques et Technologiques, Toulouse, France).

3.2.2. Le rendement en huile des graines mûres

L'huile a été extraite par Soxhlet (NF EN ISO 659) sur le broyat préparée préalablement. L'huile a été extraite par un solvant organique, le Cyclohexane. Un poids de 20g de broyat de graines est mélangé avec 200ml de cyclohexane (1p :10v). Après 6h d'extraction, la récupération de l'huile a été faite en passant les ballons contenant l'extrait d'huile et le solvant sur un évaporateur rotatif sous vide sous une température de 45°C. Le rendement en huile des graines a été déterminé selon la méthode suivante

$$\text{Teneur en huile (\%)} = \frac{P1 \times 100}{P2}$$

Où :

P1 : le poids de l'huile extraite

P2 : le poids initial de broyat

Après l'huile extraite a été conservée sous une température de 4°C pour servir à la réalisation des autres paramètres.

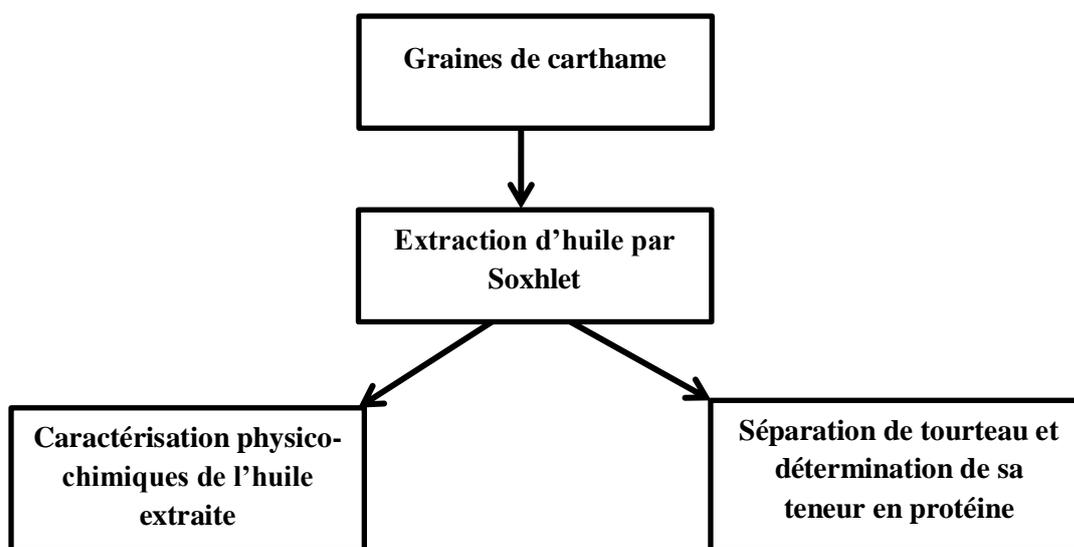


Figure 21. Schéma de l'extraction de l'huile et séparation du tourteau des graines de carthame.

3.2.3. Détermination de la composition en acides gras de l'huile extraite

La teneur en acides gras a été déterminée par analyse des esters méthyliques d'acides gras avec la chromatographie en phase gazeuse (CPG) selon la norme NF EN ISO 5508 qui nécessite deux étapes préliminaires, leur extraction ⁽¹⁾ et leur estérification ⁽²⁾ qui ont été dosés par le CPG. La solubilisation des triglycérides contenus dans 20mg d'huile a été réalisée par ajout de 1ml d'un solvant organique: le Terbutylméthyl éther (TBME). Après une légère agitation, 100µl du

mélange sont prélevés et transférés dans un insert adapté pour procéder à la transestérification par ajout de 50µl de Triméthylsulfonium hydroxyde à 0.5M de solution dans le méthanol (TMSH) pour former des esters méthyliques d'acides gras. La transestérification a lieu au moment de l'injection. La séparation et le dosage des esters méthyliques d'acides gras par CPG constituent la dernière étape. La méthode consiste à vaporiser l'échantillon liquide à analyser dans le gaz porteur (l'hélium). Le flux gazeux passe dans la colonne de séparation, à travers laquelle les composants de l'échantillon se déplacent à des vitesses influencées par le degré d'interaction de chaque constituant avec la phase non-volatile stationnaire. Les molécules présentant la plus grande interaction avec la phase stationnaire sont plus fortement retardées et inversement pour celles dont l'interaction est moins forte. En sortie de colonne, les composés sont détectés par un détecteur FID (Flame Ionisation Detector) et leur signal est amplifié. L'élution s'effectue donc par ordre croissant de masses moléculaires selon le nombre de carbone et du nombre d'insaturation. La proportion relative d'acide gras est quantifiée par une interface informatique qui permet l'intégration de l'aire des pics séparés rapportée à la somme des aires intégrées. La comparaison du temps de rétention de chaque pic avec le profil d'un mélange d'huile de composition connue (rapeseedoil mix, Supelco, USA) permet d'identifier chaque acide gras séparé.

Les conditions optimales utilisées dans l'appareil de CPG se définissent par des températures de 220°C, 220°C et 185°C réglées pour l'injecteur, la colonne et le détecteur respectivement et la pression du gaz vecteur (l'hélium) est de 200 KPa.

10µl de solution préparée sont injectés dans une colonne capillaire apolaire CP select CB de 0.25mm de diamètre intérieur et 50m de long d'une CPG Varian GC-3800. Ce chromatographe est équipé d'un passeur d'échantillons et un système d'injection automatique permettant la programmation de 48 échantillons par série et 54min par échantillon.

3.2.4. Détermination de la teneur en phytostérols de l'huile

Les phytostérols contenus dans la fraction insaponifiable de l'huile sont extraits par saponification avec ajout d'eau puis de cyclohexane qui crée un mélange biphasique. La phase supérieure ou épiphase contient la fraction insaponifiable dont les phytostérols, alors que la phase inférieure aqueuse renferme des sels solubles (savons) contenant les acides gras.

L'analyse quantitative est obtenue par comparaison à un étalon interne (cholestanol) qui est ajouté dans tous les échantillons d'huile avant toute étape d'extraction.

De la même manière que pour les acides gras, les extraits stéroliques sont dérivatisés par ajout d'un groupement silyl de manière à les rendre plus volatils ce qui facilite leur séparation en CPG. Ce dosage consiste de deux étapes.

Etape 1: Extraction de la phase insaponifiable

50µl de solution d'étalon interne de cholestanol (2 g.l⁻¹) (Dihydrocholesterol, Aldrich Chem. Co.) sont dissous dans un tube à vis de 15ml contenant du chloroforme. Après évaporation du chloroforme, environ 100mg d'huile ont été ajoutée avec 2ml de KOH 1M dissouts dans l'éthanol. L'ensemble est agité au vortex et chauffé au bain marie à 75°C pendant 20min. Après refroidissement et rajout de 1ml d'eau distillée et 6ml de cyclohexane au milieu réactionnel, la phase supérieure est récupérée après décantation.

Etape 2 : Silylation

40µl de réactif de silylation (BSTFA à 1% TMCS) sont ajouté à 160µl d'extrait insaponifiable. Les analyses sont faites par CPG (Perkin Elmer voie 2) avec un gradient de températures d'injecteur de :

- 55°C pendant 0.5min
- 200°C/min jusqu'à 340°C
- 340°C pendant 30min.

Les franges de température du four sont de l'ordre de:

- 160°C (0.5min)
- 20°C/min jusqu'à 260°C
- 2°C/min jusqu'à 300°C (10min)
- 45°C/min jusqu'à 350 (3min).

La température du détecteur est réglée à 365°C.

3.2.5. Détermination de la teneur d'huile en polyphénols

3.2.5.1. Extraction des polyphénols totaux

Les composés phénoliques totaux ont été extraits selon la méthode décrite par Ollivier et *al.* (2004) modifiée. 0.5ml d'une solution de méthanol/eau (80/20, v/v) a été ajoutée à 0.5g d'huile de carthame dans un tube à centrifuger. Après passage au vortex pendant 10 min, les tubes ont été centrifugés pendant 15 min à 500g et le surnageant (la phase méthanolique) a été récupéré. Cette opération a été répétée trois fois pour assurer une bonne extraction du TPC, et le volume a été complété à 1.5ml en utilisant la solution méthanol/eau (80/20, v/v).

3.2.5.2. Dosage des polyphénols

La teneur en polyphénol a été déterminée selon la méthode décrite par Merouane et *al.* (2014), utilisant le réactif de Folin-Ciocalteu et l'acide gallique comme standard. 500ml de réactif de Folin-Ciocalteu et 450ml d'eau distillée ont été ajoutés à un tube contenant 50ml d'extrait des polyphénols et agité au vortex durant 3mn. 400ml de Na₂CO₃ (75g/l) ont été ajoutés à la solution et les tubes ont été incubés à 25°C dans l'obscurité pendant 40 minutes.

Le dosage a été effectué par le spectromètre avec une absorbance 725nm. La teneur en polyphénol de l'extrait a été déterminée à partir de la courbe d'étalonnage de l'acide gallique (Figure 1a, Annexe). Les teneurs sont exprimées en mg d'équivalent acide gallique par kg d'huile (mg GAE/ kg d'huile).

3.2.6. Dosage de l'activité antioxydante (DPPH) de l'huile

L'activité antioxydante d'un composé correspond à sa capacité à résister à l'oxydation. Le test au radical libre DPPH est recommandé pour des composés contenant SH-, NH- et OH-groupes (Kreem et *al.*, 2016). Le principe de ce test se résume en la capacité de l'extrait à réduire le radical libre DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl) de couleur violette foncée, qui se transforme en coloration jaunâtre après réduction.

Le dosage a été effectué à une température ambiante de 24°C afin d'éviter les risques de dégradation thermique des molécules thermolabiles.

L'activité antioxydante a été déterminée selon la méthode recommandée par Nogala-Kalucka et *al.* (2010). Elle est basée sur la mesure spectrophotométrique de l'intensité du changement de couleur dans la solution en fonction de la quantité de DPPH. La réaction a été initiée en mélangeant 1ml d'extrait méthanolique avec 3ml de méthanol et 1ml de DPPH (0.012 g/100ml).

Le dosage a été réalisé à une absorbance de 517nm après 15 min d'incubation. L'activité de l'extrait dans le DPPH de balayage a été calculée comme suit:

$$\% \text{ DPPH} = [(\text{Absorbance du contrôle} - \text{Absorbance de l'échantillon}) / \text{Absorbance du contrôle}] * 100$$

3.2.7. Détermination de l'activité Anti-âge

3.2.7.1. L'activité Anti-collagénase

Une collagénase de *Clostridium histolyticum* (Sigma Aldrich, Lyon, France) a été utilisée. L'activité de la collagénase a été évaluée en utilisant du N-[3-(2-furyl) acryloyl]-Leu-Gly-Pro-Ala (Sigma Aldrich, Lyon, France) en tant que substrat conformément au protocole de Wittenauer et *al.* (2015). L'évolution de l'absorbance (diminution) a été évaluée à 335 nm pendant 20 min à l'aide d'un lecteur de microplaques (BioTek ELX800; BioTek Instruments,

Colmar, France). L'activité de la collagénase a été exprimée en pourcentage d'inhibition de la collagénase par rapport à l'échantillon correspondant (extraits de polyphénols).

3.2.7.2. L'activité Anti-élastase

Le dosage d'activité de l'élastase a été réalisé avec de l'élastase pancréatique de porc (Sigma Aldrich, Lyon, France). Elle a été évaluée en utilisant le N-succ-Ala-Ala-Ala-p-nitroanilide (AAAVPN; Sigma Aldrich) comme substrat (Wittenauer et *al.*, 2015). La libération de p-nitroaniline a été effectuée à 410nm en utilisant un lecteur de microplaques (BioTek ELX800; BioTek Instruments). L'activité anti-élastase a été exprimée en pourcentage d'inhibition de l'enzyme par rapport à l'échantillon correspondant (extraits de polyphénols).

3.3. Acidité de l'huile

L'indice d'acide s'effectue par un simple dosage acido-basique et s'exprime en (mg KOH/g) qui présente le nombre de mg d'hydroxyde de potassium nécessaire pour neutraliser les acides gras libres présents dans 1g de corps gras.

1g d'huile de carthame est dissoute dans 50ml d'éthanol, puis titrée avec une solution d'hydroxyde de potassium 0.1N en présence de phénolphthaléine comme indicateur coloré.

$$\text{Indice d'acide (g/100g)} = \frac{56.1 \times C \times (V-V_0)}{m} \quad \text{ou} \quad \text{Acidité} = \frac{M \times C \times (V-V_0)}{10 \times m}$$

56.1: masse molaire de l'hydroxyde de potassium (g/mol)

V₀ : volume de KOH du blanc (ml).

V : volume de KOH (ml) à l'équivalence.

C : concentration de KOH (mol/l).

m: masse de la prise d'essai(g).

M : masse molaire de l'acide oléique (282.47 g/mol).

3.4. L'indice de saponification de l'huile

L'indice de saponification ou indice de Koettstoerfer est la masse en milligrammes de potasse nécessaires pour saponifier 1g de corps gras. 1.5 à 2g d'échantillons sont pesés puis mis en solution dans 25ml de la solution éthanolique d'hydroxyde de potassium dans un ballon conique de 250ml. On place le ballon dans un bain marie bouillant pendant 45 à 60 minutes. Après refroidissement du mélange, l'échantillon est titré avec de l'acide chlorhydrique à 0.5N jusqu'à disparition complète de la couleur rose par la présence de 2 à 3 gouttes de phénolphthaléine à 2%. Un essai à blanc est préparé en suivant le même mode opératoire.

L'indice de saponification (IS) se détermine comme suivant :

$$IS = \frac{56.1 \times C \times (V_0 - V_1)}{m}$$

56.1 : masse molaire de l'hydroxyde de potassium (g/mol)

V₀ : est le volume d'acide chlorhydrique (ml) nécessaire pour titrer le blanc (ml)

V₁ : est le volume d'acide chlorhydrique (ml) nécessaire pour titrer l'essai (ml)

C : la concentration de KOH utilisé.

m: est la masse de la prise d'essai (g).

3.5. L'indice de peroxyde de l'huile

Les peroxydes, constituants caractéristiques de l'oxydation des acides gras insaturés, sont déterminés en se basant sur leurs propriétés de libérer l'iode de l'iodure de potassium dans les milieux acides. L'iode libéré est mesuré par la réaction avec le thiosulfate en sachant que 1ml de thiosulfate à 0.01N correspond à une quantité de 80 mg d'oxygène fixé sur les acides gras.

Un poids 0.5g d'huile de carthame est dissout dans 6.1ml du mélange d'acide acétique/chloroforme 3:2 (v/v). 7.5ml d'une solution d'iodure de potassium saturée sont additionnés au mélange. Ce dernier est placé à l'obscurité pendant 5 min. Ensuite 30ml d'eau distillée et 0.5ml d'une solution d'empois d'amidon sont ajoutées (une couleur violette apparaît). Le mélange obtenu a été titré par une solution de thiosulfate de sodium à 0.01N (Organisation Internationale de Normalisation ISO 3960, 2007). Un essai à blanc est préparé en suivant le même mode opératoire.

$$\text{Indice de peroxyde} = \frac{C \times (V_1 - V_0)}{m} \times 100$$

C : concentration en moles par litre de la solution titrée de thiosulfate de sodium utilisée.

V₁ : volume de thiosulfate de sodium (ml) nécessaire pour la détermination;

V₀ : volume de thiosulfate de sodium (ml) nécessaire pour l'essai à blanc;

m: la masse de la prise d'essai (g).

3.6. L'indice d'iode de l'huile

L'indice d'iode appelé aussi indice de Hübl, est la masse en grammes d'iode fixé sur les doubles liaisons présentes dans 100 g de corps gras (Salgarolo, 2003). La détermination de cet indice permet d'obtenir le degré d'insaturation. Cet indice est effectué par la méthode Wijs qui a pour principe de faire réagir le monochlorure d'iode (réactif de Wijs) sur toutes les insaturations présents dans la molécule.

Une masse d'échantillons d'huile (0.15g) a été dissoute dans 29ml de chloroforme. Après une agitation jusqu'à dissolution totale, 25ml de réactif de Wijs ont été ajoutés. L'erenmeyer contenant la solution est bouché hermétiquement et placé dans un endroit sombre pendant 30 min et sous agitation. On ajoute ensuite 20ml d'iodure de potassium (KI) à 15% et 100ml d'eau

déminéralisée. On titre par le thiosulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) à 0.1N en présence d'empois d'amidon; la couleur devient alors noire jusqu'à décoloration complète (Salgarolo, 2003).

Cet indice est calculé par la formule suivante :

$$\text{Indice d'iode (g/100g)} = \frac{12.69 \times C \times (V_0 - V_{eq})}{m}$$

12.69 : masse molaire de l'iode (g/mol)

V_0 : le volume de thiosulfate de sodium (ml) nécessaire pour l'essai à blanc.

V_{eq} : le volume de thiosulfate de sodium (ml) nécessaire pour l'échantillon.

C : la concentration titrée de thiosulfate de sodium utilisée.

m: est la masse de la prise d'essai(g).

3.7. L'indice de réfraction de l'huile

L'indice de réfraction des huiles varie en fonction des insaturations des acides gras contenus dans les matières grasses. Il permet de différencier l'appartenance du corps gras aux deux groupes suivants :

- Graisses lauriques végétales (R = 1.448 à 1.458) ou animales (R = 1.471 à 1.458)
- Huiles végétales (R = 1.468 à 1.490) ou animales (R = 1.471 à 1.485)

La surface du prisme du réfractomètre de type Abbe est nettoyée et essuyée avec du papier Joseph et, après étalonnage avec de l'eau distillée à 20°C, quelques gouttes d'huiles de carthame sont déposées sur le prisme. La fenêtre de lecture donne directement la valeur de l'indice de réfraction à la température (t) en degré Celsius.

L'indice de réfraction N_D^T à la température de référence T est donné par la formule suivante:

a) Si $t > T \Rightarrow N_D^T = N_D^t + (t-T) \times F$

b) Si $t < T \Rightarrow N_D^T = N_D^t + (T-t) \times F$

t : température de la détermination

T : température de référence qui est 20°C pour les huiles.

F : facteur de correction, en de la température, égal à 0.00035 pour T = 20°C, pour les huiles;

N_D^t : l'indice de réfraction pris sur le réfractomètre.

4. Dosage des protéines de tourteau des graines de carthame

Le dosage des protéines a été effectué par la méthode de Kjeldahl. On a préparé 2 tubes blancs qui sont des tubes dans lesquels ne se trouvent que l'acide sulfurique et les pastilles de catalyseurs. Ils permettent de vérifier que les réactifs ne contiennent pas de biais dans la mesure d'azote. Ainsi que, deux autres témoins permettant de vérifier la minéralisation des échantillons. Ces tubes contiennent de l'urée ou du tryptophane. L'urée ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) est un témoin d'azote

organique contenant 46.6% d'azote alors que le tryptophane ($C_{11}H_{12}N_2O_2$) est un acide aminé difficile à minéraliser contenant 13.7% d'azote.

Dans les tubes de minéralisation, après ajout de la prise d'essai (0.5-0.7g), on ajoute 12.5ml d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4 , 96%). On laisse imprégner la matière durant une nuit complète. On ajoute deux pastilles de sel catalyseur (2 pastilles kjeltabs NH_4^+ , $CuSO_4$). Ces pastilles contiennent aussi du sulfate de potassium de manière à augmenter le point d'ébullition de l'acide sulfurique, et ainsi éviter sa vaporisation totale à $400^\circ C$. Laisser minéraliser pendant 1h à 1h15 en utilisant un bloc de minéralisation TecatorKjeltec. La solution doit devenir limpide et verte émeraude.

Après la minéralisation, l'analyseur Kjeltec™ 8400 est un instrument dédié à l'analyse selon la méthode Kjeldahl permettant le dosage en direct et la gestion des réactifs. Il est associé à Compass™, un logiciel PC dédié à cet appareil. L'analyseur est complété avec un passeur Kjeltec™ 8420 pour une opération entièrement automatisée.

5. Analyse statistique

Les résultats obtenus ont été analysés par le logiciel Statistica (version 8.0, USA). Différents tests ont été utilisés, dont l'ANOVA, les corrélations, comparaison des moyennes par le test Newman-Keuls.

Influence de la nature génotypique et des facteurs environnementaux sur les paramètres morphologiques et agronomiques de carthame (*Carthamus tinctorius* L.)

Cette partie du travail est réservée à l'étude du comportement du carthame sous un environnement semi-aride. Elle englobe l'estimation du développement végétatif de la plante et l'élaboration du rendement en grains dans des conditions climatiques sévères définies par la sécheresse et les hautes températures. A cet effet, on a procédé par la conduite de trois génotypes en plein-champ sous deux régimes hydriques, pluvial et avec complément d'irrigation, durant trois campagnes consécutives (2015, 2016, 2017). Les paramètres retenus se rapportent à la morphologie de la plante (la hauteur de la plante, le nombre de feuilles par plante) et les composantes du rendement (le nombre de capitules par plante, le nombre de grains par plante, le poids de mille grains et le rendement théorique en grains).

1. Première année de conduite de l'essai (2015)

1.1. Paramètres morphologiques de la plante

L'analyse des résultats obtenus démontre que la hauteur de la plante varie de façon hautement significative sous l'influence de la nature du génotype et du régime hydrique appliqué (Tableau 10). L'élaboration du nombre de feuilles par plante n'est par conséquent que faiblement influencé par ces deux facteurs. L'interaction entre le régime hydrique et la nature du génotype s'annonce sans effet marquant sur ces deux paramètres morphologiques et indique l'absence de toute distinction génotypique vis-vis des variations du régime hydrique quant à leur conception (Tableau 10).

Les résultats moyens de la hauteur de la plante, au niveau du traitement mené en conditions pluviales sont de l'ordre de 52.33cm, 55.67cm et 46cm enregistrés respectivement par Halab, Gila et Touggourt. A l'application d'irrigation complémentaire, ces valeurs sont de l'ordre de 63.67cm, 57.5cm et 50cm, relevées dans l'ordre chez Halab, Gila et Touggourt. On constate que l'application d'irrigation a provoqué des augmentations variables des hauteurs des génotypes testés avec 18%, 3% et 8%, concernant dans l'ordre Halab, Gila et Touggourt. Ces variations indiquent qu'au cours de cette campagne, le génotype Halab s'avère le plus sensible aux conditions sèches comparativement aux deux autres.

Le nombre moyen de feuilles par plante au niveau du traitement mené en conditions pluviales est de l'ordre de 10.67 (Halab), 9 (Gila) et 11.33 (Touggourt). L'application d'irrigation a permis d'obtenir des valeurs atteignant 13.33, 11.67 et 12 enregistrés respectivement par

Halab, Gila et Touggourt. Ces résultats indiquent que le génotype Gila est plus sensible aux variations imposées par le régime hydrique que les deux autres génotypes.

Tableau 10: Analyse de variance des paramètres morphologiques et agronomiques de trois génotypes de carthame cultivés en 2015 à Tiaret.

| Source de variation | df | Hauteur de la plante (cm) | Nombre de feuilles/plante | Nombre de capitules/plante | Nombre de graines/capitule | PMG (g) | Rendement théorique (qx/ha) |
|----------------------|----|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|---------|-----------------------------|
| Génotype | 2 | 11.81** | 1.11ns | 4.56* | 29.06** | 10.39* | 1.2ns |
| R.H. | 1 | 9.91** | 4.26ns | 2.1ns | 5.5* | 0.02ns | 3.58** |
| Génotype*R.H. | 2 | 2.50ns | 0.47ns | 0.4ns | 0.4ns | 2.17ns | 0.2ns |

* significatif à $p < 0.05$; ** significatif à $p < 0.01$; ns (not significatif à $p > 0.05$).

1.2. Le rendement en grains et ses composantes

Les variations des résultats des composantes du rendement retenues dans cette étude sont imposées par la nature du génotype et le régime hydrique adopté (Tableau 10). Ainsi, une influence très significative du facteur génotypique et de la pratique d'irrigation complémentaire a été constatée sur l'élaboration du nombre de capitules par plante et du nombre de graines par capitule (Tableau 10). Les vacillations du poids de mille grains s'annoncent plus liées aux génotypes qu'aux variations du régime hydrique. Enfin le rendement en grains est significativement modifié par le régime hydrique indistinctement parmi les génotypes testés.

Les résultats moyens du nombre de capitules par plante au niveau du traitement mené en conditions pluviales, sont de l'ordre de 16.7, 9 et 7.7 enregistrés respectivement par Halab, Gila et Touggourt. Il augmente suite à la pratique d'irrigation pour atteindre dans l'ordre 18.66, 15.67 et 9.67. Ces évolutions indiquent que le génotype Gila est plus sensible aux variations du régime hydrique en enregistrant un taux de réduction de 42%, contrairement à Halab avec 10%. Le génotype Touggourt, tout en inscrivant un nombre de capitules faible, se distingue par une stabilité moyenne (20%).

Le nombre de grains par capitule est à son tour variable parmi les génotypes au sein et entre les deux traitements hydriques adoptés. Il est de l'ordre de 23.33 (Halab), 27 (Gila) et 33 (Touggourt) et ce sous les conditions pluviales et progresse suite à l'apport d'irrigation pour atteindre 26.66, 29 et 34.33 relevés respectivement chez Halab, Gila et Touggourt. Les mêmes constatations sont faites où la population locale Touggourt manifeste une stabilité plus grande. A l'opposé, le génotype Halab se distingue par une faible stabilité pour l'élaboration

de cette composante avec un taux de variation de 12% entre les deux conditions hydriques.

Au cours de cette campagne d'expérimentation, le poids de mille grains s'est maintenu plus ou moins stable entre les deux traitements hydriques. Les résultats moyens enregistrés par les trois génotypes au sein du traitement pluvial ont atteint des valeurs de 36g, 39g et 47.33g, extériorisées respectivement par les génotypes Halab, Gila et Touggourt. La pratique d'irrigation a provoqué quelques changements dans les valeurs de cette composante pour aboutir à 41.33g, 36g et 45.67g extériorisés dans l'ordre par Halab, Gila et Touggourt.

Le rendement théorique en grains est grandement influencé par le régime hydrique à lequel ont été soumises les plantes. Ainsi, dans le traitement mené en conditions pluviales le rendement calculé est de l'ordre de 33.84, 22.74 et 28.87qx/ha enregistré respectivement par les génotypes Halab, Gila et Touggourt. La pratique d'irrigation complémentaire a provoqué une augmentation conséquente du rendement chez l'ensemble des génotypes expérimentés pour atteindre des valeurs estimées dans l'ordre à 51.38, 37.65 et 36.27qx/ha.

Selon ces fluctuations des résultats on constate que le génotype Gila s'est défini par une instabilité plus importante pour l'élaboration du rendement avec un taux de variation de 39%, contrairement à la population locale (Touggourt) qui a inscrit une valeur de 20%.

2. Deuxième année de conduite de l'essai (2016)

2.1. Paramètres morphologiques de la plante

L'analyse des résultats obtenus (Tableau 11) ont montré que les variations de la hauteur de plante sont fortement influencées par le génotype testé et le régime hydrique adopté ainsi que par leur interaction ($p < 0.05$). En conséquence, le facteur régime hydrique a affecté l'ensemble des accessions pour l'élaboration de ce paramètre, d'une manière indistincte. Ceci se prouve par l'absence de tout effet émanant de l'interaction de ces deux facteurs d'étude sur les variations de la hauteur de plante ($p > 0.05$). Les résultats indiquent que l'effet de génotype s'annonce faible sur le nombre de feuille ($p > 0.05$). Alors que ce paramètre dépend fortement du régime hydrique adopté ($p < 0.05$).

Tableau 11: Analyse de variance des paramètres morphologiques et agronomiques de trois géotypes de carthame cultivés en 2016 à Tiaret.

| Source de variation | Df | Hauteur de la plante (cm) | Nombre de feuilles/plante | Nombre de capitules/plante | Nombre de graines/capitule | PMG (g) | Rendement théorique (qx/ha) |
|----------------------|----|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------|-----------------------------|
| Génotype | 2 | 14.53*** | 0.77ns | 0.99ns | 15.75*** | 0.05ns | 2.15ns |
| R.H. | 1 | 99.9*** | 19.35*** | 2.27ns | 2.77ns | 52.83*** | 21.82*** |
| Génotype*R.H. | 2 | 4.71* | 0.07ns | 1.81ns | 0.75ns | 3.26ns | 2.68ns |

* significatif à $p < 0.05$; *** significatif à $p < 0.001$; ns (not significatif à $p > 0.05$).

Au cours de l'année 2016 les valeurs enregistrées de la hauteur de la plante se sont révélées faibles au niveau du lot conduit en régime pluvial par rapport au bloc irrigué. Elles sont de l'ordre de 59.67cm, 51.33cm et 42.33 respectivement enregistrées par Halab, Gila et Touggourt en conditions pluviales. Alors que, ces géotypes ont montré des valeurs respectives de 69.67, 72 et 64.50 cm sous un apport d'irrigation. Ces résultats ont démontré que le génotype Halab s'avère le moins sensible au déficit hydrique avec un taux de réduction de 14% par rapport à Gila (28%) et Touggourt (34%).

Concernant le nombre de feuille par plantes, les géotypes conduits dans le lot sec ont révélé des valeurs de 11.33, 10 et 9 feuilles respectivement enregistrées par Halab, Gila et Touggourt. Tandis que, ce paramètre a indiqué des valeurs de 20.33 feuilles (Halab) et 17.33 feuilles (Gila, Touggourt) en bloc mené en irrigué. Par conséquent, les valeurs de nombre de feuille sont augmentées suite à un apport d'irrigation. Parmi les géotypes conduits, le génotype local algérien s'est avéré le plus sensible au manque d'eau en estimant un taux de régression de 48% par rapport à Gila et Halab.

2.2. Le rendement en grains et ses composantes

Les résultats obtenus (Tableau 11) ont montré que la nature de génotype n'entraîne aucune influence significative sur les paramètres agronomiques de carthame ($P > 0.05$). Néanmoins, ce facteur d'étude a significativement affecté le nombre de grains par capitule ($P < 0.05$). Alors que, le régime hydrique pratiqué impose un effet hautement significatif sur le poids de mille grains et le rendement en grain ($P < 0.05$). Cependant, l'interaction entre ces deux facteurs, génotype et régime hydrique, ne provoque aucun effet sur l'ensemble des paramètres retenus ($P > 0.05$).

Au niveau du lot irrigué, le nombre de capitules par plante a exprimé des valeurs de l'ordre de 15.67 (Halab), 18 (Gila) et 10.33, valeur inscrite par Touggourt. Alors que, ces géotypes ont montré un nombre de 16 (Halab), 18.33 (Gila) et 19 (Touggourt) sous les conditions pluviales. Les résultats ont indiqué que la pratique d'irrigation a permis une nette augmentation de nombre de capitules par plante. Ainsi, le géotype Touggourt se distingue par une grande sensibilité vis-à-vis au stress hydrique en estimant un taux de réduction de 45% par rapport à Gila (2%) et Halab (2%).

Concernant le nombre de graines par capitule, les géotypes testés ont extériorisé un nombre de graines plus élevé sous le régime hydrique irrigué avec une moyenne de 21 graines par rapport à un nombre moyen de 18.33 graines/capitules dans le lot sec. En conditions culturales sèches, le géotype Halab a montré un nombre de 23 graines par rapport à Gila (12.33) et Touggourt (19.67 graines). Tandis que, les valeurs de ce paramètre se sont avérées élevées chez les trois géotypes conduits sous un apport d'irrigation en inscrivant des nombres de 23.67, 14.33 et 25 graines chez Halab, Gila et Touggourt, respectivement. Ainsi, les résultats indiquent que le géotype Touggourt s'est révélé le plus sensible à la sécheresse en indiquant un taux de réduction de 21%. Par contre, le géotype Gila se distingue par une stabilité élevée pour l'élaboration de ce paramètre en indiquant un taux de diminution estimé à 2.8%.

Les résultats obtenus ont démontré que le poids de mille grains des géotypes conduits en conditions pluviales a enregistré des valeurs de 31.7, 29.5 et 34.9g chez Halab, Gila et Touggourt, respectivement. Tandis que, cette caractéristique a montré des valeurs de 46.7g (Halab), 49.7g (Gila) et 42.8g (Touggourt) en régime irrigué. Ces résultats ont révélé que le poids de mille graines est diminué sous un stress hydrique. Parmi les géotypes conduits, le géotype local Touggourt s'avère le plus stable au manque d'eau en indiquant un taux de diminution estimé à 18%.

D'après les résultats obtenus (Tableau 13), le rendement théorique en grain est fortement influencé par le régime hydrique adopté. Au niveau du lot irrigué, les rendements inscrits sont de l'ordre de 38.53, 31.41 et 48.5qx/ha enregistrés respectivement par Halab, Gila et Touggourt. Alors que les valeurs de ce paramètre sont de l'ordre de 28.30qx/ha (Halab), 16.83qx/ha (Gila) et 16.6qx/ha, donnée inscrite par Touggourt en conditions pluviales. En conséquence, le géotype Touggourt se démarque par une instabilité plus grande en exprimant un taux de régression de 65% sous un déficit hydrique.

3. Troisième année de conduite de l'essai (2017)

3.1. Paramètres morphologiques de la plante

L'analyse des résultats obtenus (Tableau 12) de la hauteur de la plante révèle que les variations de cette caractéristique s'opèrent d'une manière dépendante de la nature des génotypes conduits et le régime hydrique adopté ainsi que de leur interaction ($p < 0.05$). Ainsi, le régime hydrique pratiqué impose un effet significatif sur le nombre de feuilles par plantes ($p < 0.05$). Alors que, l'expression de ce paramètre se réalise d'une manière indépendante de la nature des génotypes étudiés ($p > 0.05$).

Tableau.12. Analyse de variance des paramètres morphologiques et agronomiques de trois génotypes de carthame cultivés en 2017 à Tiaret.

| Source de variation | df | Hauteur de la plante (cm) | Nombre de feuilles/plante | Nombre de capitules/plante | Nombre de graines/capitule | PMG (g) | Rendement théorique (qx/ha) |
|----------------------|----|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|---------|-----------------------------|
| Génotype | 2 | 5.42* | 2.60ns | 9.50** | 0.47ns | 7.84** | 0.73ns |
| R.H. | 1 | 20.78** | 6.72* | 1.7ns | 3.53ns | 0.18ns | 2.88ns |
| Génotype*R.H. | 2 | 4.20* | 0.50ns | 0.07ns | 0.32ns | 0.03ns | 0.33ns |

* significatif à $p < 0.05$; ** significatif à $p < 0.01$; ns (not significatif à $p > 0.05$).

Les résultats moyens obtenus (Tableau 12), montrent d'importance variation de la hauteur de la plante apparue à travers les deux traitements hydriques. Elle est de l'ordre de 16.8, 22.3 et 26.7cm chez Halab, Gila et Touggourt respectivement en bloc sec. Alors qu'au niveau du régime hydrique irrigué, les génotypes testés ont divulgué une hauteur de plante de 27.33cm (Halab), 37.33cm (Gila) et 28cm (Touggourt). Ainsi, ces résultats ont démontré que les conditions de sécheresse affectent l'expression de ce paramètre dont le génotype Touggourt se caractérise par une réponse moins sensible au manque d'eau avec un taux de réduction évalué à 2%. À l'opposé, Gila s'avère le génotype le plus sensible où il a affiché un taux de régression de 40%.

Concernant le nombre de feuilles par plante, les résultats obtenus (Tableau 13) ont démontré des valeurs de 7.7, 15.7 et 16.33 feuilles enregistrées respectivement par Halab, Gila et Touggourt en bloc sec. Alors que, elles sont de l'ordre de 17.33, 24.64 et 19.67 feuilles au niveau du lot irrigué. Parmi la variabilité conduite, le génotype Touggourt indique une sensibilité faible par rapport à Gila et Halab où les taux de diminution sont de l'ordre de 16%, 36 et 55%, respectivement.

3.2. Le rendement en grains et ses composantes

Les résultats obtenus (Tableau 12) ont montré que la variabilité génétique étudiée a affecté l'élaboration du nombre de capitules par plante et le poids de mille grains. Ce se justifie par un effet significatif de facteur génotype sur ces deux paramètres agronomiques ($P < 0.05$). Alors que, l'influence du régime hydrique s'est montrée faible sur les composantes de rendements de carthame ($P > 0.05$). Ainsi, l'interaction entre le génotype et le régime hydrique n'impose aucun effet significatif sur l'ensemble des paramètres agronomiques mesurés ($P > 0.05$). Aucune distinction génotypique n'a été révélée en fonction des variations du régime hydrique concernant l'élaboration des paramètres et les composantes de rendements retenus (Tableau 12).

Selon les résultats (Tableau 13) et en conditions pluviales, les valeurs du nombre de capitules enregistrées sont de l'ordre de 5.7, 5.7 et 3.67 pour Halab, Gila et Touggourt respectivement. Alors que ces génotypes expriment des valeurs respectives de 6.3, 6 et 4.3 suite à un apport d'irrigation. Par conséquent, la variation de l'élaboration de ce paramètre s'avère stable en fonction du régime hydrique adopté.

Au cours de cette année de culture les génotypes conduits ont extériorisé une faible variation du nombre de graines formées. Ainsi, les valeurs de cette caractéristique sont de l'ordre de 16.33, 22.3 et 17.7 respectivement enregistrées par Halab, Gila et Touggourt. Tandis que, après alimentation hydrique, le nombre de grains inscrit est de l'ordre de 23.3, 24.67 et 25.67 pour Halab, Gila et Touggourt. Selon ces résultats, le génotype Touggourt montre une instabilité de variation plus au moins grande par rapport aux autres génotypes en indiquant un taux de régression de 31%. Concernant le poids de mille grains, les génotypes cultivés sous conditions pluviales ont divulgué des valeurs de 24.45, 28.2 et 42.1g respectivement enregistrées par Halab, Gila et Touggourt. Alors que, en conditions d'irrigation, le poids de mille grains a atteint des valeurs respectives de 25.51, 29.31 et 45.49g pour Halab, Gila et Touggourt.

Les résultats relevés de rendement théorique en grain ont indiqué qu'au niveau de milieu sec les valeurs de ce paramètre varient entre 4.88qx/ha (Halab) et 9.2qx/ha pour Gila. Alors que, la pratique d'irrigation a permis d'extérioriser des rendements de l'ordre de 8.9, 10.5 et 12.1qx/ha respectivement donnés par Halab, Gila et Touggourt. Selon ces données, Gila est considéré comme le génotype le plus stable pour l'élaboration du rendement en grain en exprimant un taux de régression de 13%.

Tableau.13. Les paramètres morphologiques et agronomiques de trois géotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015, 2016, 2017) à Tiaret et sous deux régimes hydriques (irrigué, sec).

| Année | Régime hydrique | Géotype | Hauteur de la plante (cm) | Nombre de feuilles/plante | Nombre de capitules/plante | Nombre de graines/capitule | PMG (g) | Rendement théorique (qx/ha) |
|-------|-----------------|----------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|-----------------------------|
| 2015 | Pluvial | Halab | 52.33±1.45a | 10.67±1.85a | 16.67±0.7b | 23.33±1.2a | 36±2.3a | 33.84±4.0a |
| | | Gila | 55.67±1.3a | 9±1a | 9±0.0a | 27±0.6a | 39±0.6a | 22.74±0.4a |
| | | Touggourt | 46±4.0a | 11.33±0.9a | 7.7±1.45a | 33.00±1.7b | 47.33±1.8b | 28.87±6.5a |
| | | Moyenne | 51.33±1.9 | 10.3±0.7 | 11.11±2.8 | 27.78±2.8 | 40.8±1.9 | 28.5±3.2 |
| | Irrigué | Halab | 63.67±2.3a | 13.33±0.33a | 18.66±5.5a | 26.66±0.3a | 41.33±3.18a | 51.38±17.6a |
| | | Gila | 57.5±0.3a | 11.67±1.67a | 15.67±4.6a | 29±1.2a | 36.00±2.31a | 37.65±8.4a |
| | | Touggourt | 50.00±2.0b | 12.00±0.58a | 9.67±0.33a | 34.33±1.3b | 45.67±1.85a | 36.27±1.4a |
| | | Moyenne | 56±2.4 | 12.33±0.6 | 14.67±2.6 | 29.89±2.4 | 41±1.9 | 41.7±4.8 |
| 2016 | Pluvial | Halab | 59.67±3.3a | 11.33±0.7a | 15.67±1.2a | 23±4.04a | 31.7±1.5ab | 28.30±6.8a |
| | | Gila | 51.33±2.4a | 10±1.15a | 18±5.03a | 12.33±0.9a | 29.5±1.3a | 16.83±6.7a |
| | | Touggourt | 42.33±1.85b | 9±0.6a | 10.33±2.03a | 19.67±1.2a | 34.9±0.6b | 16.6±2.3a |
| | | Moyenne | 51.11±2.8 | 10.1±0.5 | 14.67±2.3 | 18.33±3.2 | 32.03±1 | 20.6±3.9 |
| | Irrigué | Halab | 69.67±1.45ab | 20.33±2.73a | 16±1a | 23.67±0.7a | 46.7±3.8a | 38.53±3.5a |
| | | Gila | 72.00±1.53b | 17.33±4.33a | 18.33±2.3a | 14.33±1.6b | 49.74±3.4a | 31.41±5.9a |
| | | Touggourt | 64.50±1.89a | 17.33±1.76a | 19±1a | 25±1.15a | 42.8±2.27a | 48.5±2.2a |
| | | Moyenne | 68.7±1.4 | 18.33±1.6 | 17.78±0.9 | 21±3.4 | 46.41±1.9 | 39.5±4.95 |
| 2017 | Pluvial | Halab | 16.8±0.4a | 7.7±0.3a | 5.7±0.9a | 16.33±3.7a | 24.45±3.4a | 4.88±0.4a |
| | | Gila | 22.33±2.8a | 15.7±7.21a | 5.7±0.3a | 22.3±6.4a | 28.2±7.6a | 9.2±4.8a |
| | | Touggourt | 26.67±1.67a | 16.33±0.9a | 3.67±0.67a | 17.7±2.6a | 42.1±1.3a | 6.6±1.5a |
| | | Moyenne | 22.2±3.0 | 13.2±2.5 | 5.0±0.6 | 18.8±1.8 | 31.6±3.6 | 6.9±1.25 |
| | Irrigué | Halab | 27.33±2.9a | 17.33±1.76a | 6.33±0.33a | 23.33±1.76a | 25.51±3.4a | 8.9±1.2a |
| | | Gila | 37.33±3.7a | 24.67±2.9a | 6.00±0.00a | 24.67±1.67a | 29.31±7.6a | 10.5 ±2.88a |
| | | Touggourt | 28±1 a | 19.67±2.7a | 4.3±0.3b | 25.67±4.25a | 45.09±2.7a | 12.1±2.5a |
| | | Moyenne | 30.9±3.2 | 20.55±1.6 | 5.55±0.6 | 24.6±0.7 | 33.3±3.9 | 10.51±0.9 |

Discussion

Les résultats apportées dans cette étude ont pour objet de mettre en évidence l'effet des stress abiotiques notamment le déficit hydrique et la haute température ainsi que la variabilité génétique utilisée sur l'ensemble des paramètres morphologiques et agronomiques de la plante de carthame. Les résultats obtenus ont démontré que la valeur de la hauteur finale des plantes varie considérablement en fonction des campagnes de conduite de la culture, du géotype et des traitements hydriques. Ces variations s'étalent entre 16.8cm et 72cm. On constate que les hauteurs de la plante les plus élevées ont été inscrites durant la campagne 2016 et ce au niveau des deux traitements, pluvial et irrigué. Cette particularité s'explique par la pluviométrie élevée ayant caractérisée cette campagne. Ces résultats s'avèrent dans les

normes suivant les travaux effectués dans ce sens. En effet, en Egypte, Abou-Dahab et *al.* (2014) ont rapporté que la hauteur de la plante de carthame oscille entre 30 et 90cm. Des valeurs plus élevées ont été obtenues par Shim et *al.* (2004) et La bella et *al.* (2019) qui ont démontré que ce paramètre a atteint des valeurs maximales de 128 cm et 122.65cm respectivement. D'après les résultats obtenus de cette étude, la variation de cette caractéristique est due principalement à la variation des niveaux d'alimentation hydrique et à des températures extrêmes constatée au cours du développement de la plante. L'effet de la sécheresse est perceptible sur les processus physiologiques liés à l'absorption minérale et hydrique et le transport des assimilats qui affectent la croissance et la division cellulaire (Nieves-Cordones et *al.*, 2019 ; Fahad et *al.*, 2017). Egalement, l'hyperthermie détient un impact défavorable sur toutes les phases de croissance et de développement des plantes. Ainsi, Blanchard et Runkle (2011) ont révélé que la croissance des plantes de la famille des Asteraceae est affectée par le stress thermique. La réduction de la vigueur de la biomasse aérienne pourrait être attribuable au raccourcissement de la phase végétative et le basculement à la floraison (Tomar, 1995).

La réduction de la masse végétative caulinaires sous l'effet des stress abiotiques concerne également le nombre d'étage foliaires que nous l'avons constaté très variable parmi les années de culture et la nature du génotype. Les plantes ont développé un nombre de feuille supérieur durant les campagnes 2016 et 2017. Sauf qu'on a constaté une compensation entre le nombre et la surface des feuilles formées. Un nombre élevé de feuilles s'est accompagné par une réduction de leurs surfaces. La réduction du nombre et la surface est pénalisant à la production et l'accumulation de l'huile au niveau des graines. En effet, Roche (2005) a suggéré que la diminution de la teneur en huile est souvent le fruit de l'accélération de la sénescence foliaire provoquée par des conditions extrêmes avec par conséquent une réorientation des transferts de photoassimilats destinés à la synthèse lipidique vers d'autres composés de la graine, comme les protéines.

L'effet des paramètres climatiques qui étaient très variables durant les trois années de culture est très important sur l'élaboration du nombre de capitules par plante (Tableau 13). Ainsi, leur nombre oscille entre 3.67 et 18.66 capitules. Les conditions ayant régnées au cours de la campagne 2016 étaient plus favorables à l'élaboration de cette composante car la répartition de la pluviométrie était convenablement répartis durant la période reproductrice. Les résultats obtenus de l'évaluation de cette composante se confirment par ceux obtenus par Ferreira-Santos et *al.* (2018) qui ont rapporté que le nombre de capitules des plantes de carthame est

variable dans un intervalle délimité par des extrêmes de 4.66 et 22.66. Tandis que, Jabbari et *al.*, (2010) ont rapporté un nombre plus élevé de capitules qui oscille entre 18.26 à 26.86 chez trois génotypes de carthame. En Albanie, Vorpsi et *al.*, (2014) ont trouvé un nombre variable entre 20.7 à 25 capitules par plante. Le nombre de capitules le plus élevé a été enregistré en 2016. Chez le carthame, le nombre de capitules dépend fortement de la disponibilité en eau (Nabipour et *al.*, 2007). Egalement, les hautes températures s'avèrent pénalisantes pour la formation des capitules qui les réduisent et ce qui a été constatée lors la campagne 2017.

Le nombre de graines par capitule obtenu durant les trois campagnes de conduite des essais était très variable où il présente des valeurs moyennes vacillant entre 12.33 et 34.33. Ces résultats s'annoncent dans les normes sauf pour la valeur minimale qui s'avère plus faible. Selon Alizadeh et Carapetian (2006), le nombre moyen de graines par capitule chez le carthame est de l'ordre de 36. Selon une autre étude (Nabipour et *al.*, 2007), ce nombre estimé chez trois génotypes de carthame, oscille entre 32 à 35.9. La variation de nombre de graines est tributaire du régime hydrique appliqué (Nabipour et *al.*, 2007 ; Salem et *al.*, 2014b; Ozturk et *al.*, (2008). Chez le tournesol, Merrien et Milan (1992) ont rapporté qu'un déficit hydrique a des effets irréversibles sur la fécondation tout en engendrant par la suite des avortements des fleurs et par conséquent un nombre de graines faible. Selon nos résultats, le nombre de graines était plus réduit au cours des campagnes les plus chaudes. Ce résultat se confirme par les travaux de Tahmasebizadeh et *al.* (2008) qui ont indiqué que le nombre de graines est influencé par la date de plantation et le raccourcissement de la période de croissance. En plus, l'élévation excessive de la température provoque un avortement des fleurs et ce qui a été démontré par Jana et *al.* (2013) qui avaient constaté qu'une exposition des plantes de riz à 41°C pendant 4h au stade de floraison provoque des dommages irréversibles sur la formation des graines. Selon Morrison et *al.* (2016), le stress thermique présente le principal facteur qui peut engendrer une faible production de graines de colza.

Les résultats obtenus de l'estimation du poids de mille grains indiquent que les valeurs les plus élevées ont été obtenues durant la campagne 2016 qui ont atteint un maximum de 49.74g. La campagne 2017 était défavorable pour l'élaboration du poids du grain. Cette variation s'explique par les variations interannuelles de la pluviométrie et la température. Ainsi, une pluviométrie élevée accompagnée d'une température maximale plus faible engendrent un poids de mille grains élevé. Les résultats obtenus se confirment par ceux de Ghanbari-Odivi et *al.* (2013) et Toosi et Azizi (2015) qui ont rapporté que les valeurs de cette composante

sont comprises entre 24 et 44g. L'application d'irrigation complémentaire a eu un effet positif sur l'amélioration du poids du grain au sein de la même année. Le poids et le nombre de grains semblaient être sensibles au stress thermique (Barlow et *al.*, 2015). L'effet de la température s'installe essentiellement lors de la production d'assimilats par la photosynthèse et les transfère aux graines en croissance. En conséquence, le stress thermique prolonge la durée du remplissage du grain avec une réduction de leur croissance, entraînant des pertes de densité et de poids jusqu'à 7% (Guilioni et *al.*, 2003). Un déficit hydrique et un stress thermique réduisent la photosynthèse en modifiant l'organisation structurale des thylakoïdes (Karim et *al.*, 1997). De tels changements entraînent la formation de photosystèmes II (PSII) appauvris en antennes et réduisent ainsi les activités photosynthétiques et respiratoires (Nabipour et *al.*, 2007 ; Zhang et *al.*, 2005). Cette élévation des températures pendant la période de reproduction affecte ainsi la viabilité du pollen, la fertilisation et la formation de grains (Hatfield et *al.*, 2008). Khan et *al.* (2018) ont indiqué que le PMG est en relation étroite avec les conditions environnementales installées pendant la croissance de la culture de maïs.

Les résultats obtenus ont démontré que les valeurs des rendements théoriques vacillent en fonction de l'année de conduite et des traitements hydriques où ses valeurs extrêmes sont de l'ordre de 4.88qx/ha et 51.38qx/ha. Les rendements théoriques les plus élevés ont été inscrites durant les campagnes 2015 et 2016. Par contre les faibles valeurs ont été inscrites en 2017. Cette observation est discutée par la pluviométrie faible et haute température ayant caractérisée cette campagne (2017). Selon la littérature le rendement de carthame a des valeurs allant de 10 à 50qx/ha en moyenne, principalement due aux pratiques culturales et aux conditions environnementales (Yau, 2007 ; El-Lattief, 2012 ; Omid et *al.*, 2009 ; Mohammadi et *al.*, 2018). Ainsi, Jabbari et *al.*, (2010) et Morteza et *al.*, (2015) ont rapporté des rendements allant de 20 à 24qx/ha. Autres études ont relevé des rendement respectifs de 28.5qx/ha (Omid et *al.*, 2010) et 45qx/ha (Yeloojeh et *al.*, 2020). Les phases de floraison et de remplissage des grains sont des phases critiques qui dépendent grandement de niveau d'alimentation hydrique. En effet, un déficit hydrique diminue considérablement les nutriments disponibles et les réserves de photo-assimilation qui sont essentiels pour le développement des structures de reproduction (l'allongement du tube pollinique) (Barnabás et *al.*, 2008). Ainsi, il a été signalé qu'un stress thermique pendant la floraison réduise considérablement le rendement en graines en modifiant la gamétogenèse (de la méiose à la maturité), la différenciation du sac embryonnaire, la fertilisation et les structures de post-fertilisation, telles que la croissance de l'endosperme et de l'embryon (Rieu et *al.*, 2017).

L'hyperthermie est considérée alors comme l'un des stress abiotiques qui affecte grandement les structures reproductrices femelles (Peet et *al.*, 1998) et mâles (Saini et Aspinall, 1982). Chimenti et Hall (2001) ont démontré que des températures supérieures à 31°C au stade de l'anthèse affectent le rendement du tournesol par l'altération de la production de pollen et la fertilité des fleurs. Baker et *al.* (1995) suggèrent que la biomasse végétative maximale de riz est observée à 33°C, tandis que la formation de grains et le rendement sont affectés par des températures supérieures à 25°C. L'effet conjugué de déficit hydrique et l'hyperthermie est très affectant sur la photosynthèse et la conductance stomatique chez le tournesol (Killi et *al.*, 2016).

Effet de facteurs environnementaux et de la nature de génotype sur les indices physico-chimiques de l'huile de carthame (*Carthamus tinctorius* L.)

La présente partie a pour but d'étudier l'impact des facteurs environnementaux et génotypiques sur les paramètres physico-chimiques de l'huile extraite des graines cultivées au cours des trois campagnes. Ils concernent l'indice de saponification, l'acidité, l'indice de peroxyde, l'indice d'iode et l'indice de réfraction.

L'analyse des résultats (Tableau 14), montre que ces indices présentent des dépendances vis-à-vis de la nature du génotype et de la situation hydrique, variables parmi les trois années de culture. Ainsi, au cours de la première année, un effet génotypique s'est montré imposant sur l'ensemble des indices mesurés, tandis que l'alimentation hydrique n'a permis des variations que dans l'expression des indices, de saponification, de peroxyde et de réfraction. Au cours de la seconde année l'expression des indices d'huile était plus influencée par la nature du génotype que par les variations de l'alimentation hydrique qui son action n'était significatif que sur l'indice de réfraction (Tableau14). Enfin, les indices de l'huile extraite au cours de la troisième campagne (2017) s'annoncent grandement modifiés par le génotype et l'alimentation hydrique, à l'exception de l'indice de saponification (Tableau 14).

Les résultats obtenus de cette caractérisation seront présentés distinctement en fonction des années de culture de l'espèce.

Tableau.14. Analyse de variance des indices physico-chimiques de l'huile des graines de trois génotypes de carthame cultivés en trois années de culture (2015, 2016, 2017) et sous deux régimes hydriques.

| Source de variation | Année | Df | Indice de saponification | Acidité | Indice de peroxyde | Indice d'iode | Indice de réfraction |
|------------------------------|-------|----|--------------------------|-----------|--------------------|---------------|----------------------|
| Génotype | 2015 | 2 | 5.8618* | 13.0313* | 27.866*** | 3.56ns | 338*** |
| | 2016 | 2 | 2.1721ns | 4.2839* | 6.8488* | 4.52* | 112*** |
| | 2017 | 2 | 1.4198ns | 8.118** | 18.131*** | 13** | 3ns |
| Régime hydrique | 2015 | 1 | 7.8130* | 0.0ns | 31.050*** | 0.41ns | 21*** |
| | 2016 | 1 | 0.4599ns | 1.2118ns | 2.1192ns | 1.52ns | 57*** |
| | 2017 | 1 | 0.2793ns | 50.950*** | 102.482*** | 173*** | 8* |
| Génotype* Régime hydrique | 2015 | 2 | 3.8130ns | 1.2188ns | 21.378*** | 13.62*** | 61*** |
| | 2016 | 2 | 0.6788ns | 0.3213ns | 9.4535** | 7.81** | 58*** |
| | 2017 | 2 | 3.3041ns | 19.099*** | 51.940*** | 433*** | 59** |

* significatif à $p < 0.05$; ** significatif à $p < 0.01$; *** significatif à $p < 0.001$; ns (not significatif à $p > 0.05$).

1. Première année de conduite de l'essai (2015)

Les résultats moyens (Tableau 15) indiquent que l'huile de carthame cultivé sous ces conditions se définit par une faible acidité. En effet, sous les deux régimes hydriques, l'acidité moyenne génotypique de l'huile est de l'ordre de 0.7%. Toutefois, des variations intergénotypiques ont été constatées au sein et entre les deux traitements hydriques. Au niveau du lot mené en conditions pluviales, l'huile des deux génotypes, Gila et Touggourt se distingue par l'acidité la plus élevée avec une valeur de 0.83%, contrairement à celui de Halab (0.49%). L'application d'irrigation complémentaire a permis des variations d'acidité qui était de l'ordre de 0.45, 0.71 et 0.98% exprimée dans l'ordre par les génotypes Halab, Gila et Touggourt.

La vulnérabilité à l'oxydation évaluée par l'indice de peroxyde d'huile de carthame extraite s'avère faible. On note également que l'application d'irrigation provoque une diminution de la tendance à l'oxydation de l'huile, où la valeur moyenne génotypique d'indice du peroxyde diminue de 14.2meqO₂/Kg constatée au niveau traitement pluvial à 10.7meqO₂/Kg relevée au niveau du lot irrigué. Les résultats indiquent que le génotype Gila fournit une huile avec l'indice de peroxyde le plus élevé sous les deux conditions hydriques avec des valeurs de 16 (pluvial) et 15.2meqO₂/Kg (irrigué). L'huile du génotype Halab se distingue par son faible indice en inscrivant des valeurs de l'ordre de 10.13 et 9.73meqO₂/Kg, respectivement sous les régimes, pluvial et irrigué. Cet indice s'avère moins stable pour l'huile de Touggourt, où il baisse de 16.53meqO₂/Kg sous les conditions pluviales à 7.2meqO₂/Kg dans le traitement irrigué.

Les résultats des indices d'iode et de réfraction (Tableau 15) se montrent élevés et informent sur la richesse de l'huile extraite en acides gras insaturés. Les valeurs moyennes des deux indices vacillent faiblement en fonction du régime hydrique appliqué à la conduite de la culture du carthame. Pour l'indice d'iode, les valeurs moyennes génotypiques ont atteints des niveaux de 144.3g/100g et 146g/100g, relevés respectivement sous les conditions sèches et pluviales. Concernant les valeurs moyennes d'indice de réfraction de l'huile les résultats (Tableau 15) illustrent qu'elles sont de l'ordre de 1.47 pour les deux traitements hydriques.

Enfin, les résultats d'indice de saponification indiquent qu'il est élevé en conditions sèches. En effet, les valeurs moyennes génotypiques ont atteint des taux de 225.8mgKOH/g (sec) et 186.9mgKOH/g (irrigué). Au niveau du traitement mené en condition pluviale, les génotypes Gila et Touggourt ont fournit une huile ayant un indice de saponification plus élevé avec des

valeurs respectives de 237.1 et 270.9mgKOH/g. Cette particularité se maintient dans l'huile des plantes cultivées sous une irrigation complémentaire (176.87mgKOH/g, 199.44mgKOH/g), contrairement à celui de Halab qui était de l'ordre de 176.87mgKOH/g.

2. Deuxième année de conduite de l'essai (2016)

Les valeurs de l'acidité se sont révélées faibles comparativement à la première année 2015. En effet, les géotypes testés ont révélé une acidité dans l'ordre de 0.31, 0.39 et 0.38% enregistrée respectivement par Gila, Halab et Touggourt en conditions pluviales. L'application de l'irrigation a permis d'augmenter les valeurs de ce paramètre où elles sont de l'ordre de 0.32, 0.47 et 0.41% respectivement inscrites par Halab, Gila et Touggourt. Par conséquent, le géotype Halab se distingue par une faible acidité comparativement à Gila et Touggourt.

Les résultats obtenus ont montré des valeurs moyennement élevées par rapport à l'année 2015. Ces résultats indiquent que les géotypes conduits en régime irrigué ont produit une huile ayant un indice de peroxyde faible par rapport au lot sec. En effet, les valeurs moyennes géotypiques sont de l'ordre de 16.4meqO₂/Kg en bloc sec et 14.04meqO₂/Kg suite à la pratique d'irrigation.

Les valeurs moyennes de l'indice d'iode oscillent faiblement en fonction du régime hydrique appliqué. Ses valeurs moyennes géotypiques sont de l'ordre de 143.5g/100g et 146.9g/100g, inscrites respectivement au niveau du traitement sec et irrigué. En ce qui concerne l'indice de réfraction, l'huile des graines de carthame a révélé une valeur moyenne géotypique de l'ordre de 1.47 pour les deux régimes hydriques.

Selon les résultats obtenus, les valeurs de l'indice de saponification s'avèrent élevées en régime irrigué. En effet, les valeurs moyennes géotypiques sont de l'ordre de 153.03mgKOH/g et 166.2mgKOH/g respectivement enregistrées au lot sec et irrigué. Parmi la variabilité conduite, le géotype Touggourt a indiqué l'indice de saponification le plus élevé dans les deux milieux (sec et irrigué) par rapport aux autres accessions. En effet, ce géotype a révélé des valeurs de l'ordre de 165.6mgKOH/g (en sec) et 208.8 mgKOH/g (en irrigué).

3. Troisième année de conduite de l'essai (2017)

Selon les résultats obtenus (Tableau 15), l'acidité mesurée au cours de cette année 2017 a montré des valeurs élevées par rapport aux deux autres campagnes (2015, 2016). Ainsi, la pratique d'irrigation a augmenté significativement les valeurs de ce paramètre. En effet, les géotypes étudiés ont révélé un indice de 0.72, 0.94 et 0.71% respectivement enregistré par Halab, Gila et Touggourt cultivés en sec. Alors que, les valeurs de cette acidité sont de l'ordre

de 0.91, 0.96 et 1.24% révélées respectivement par Halab, Gila et Touggourt suite à l'irrigation.

Les valeurs de l'indice de peroxyde s'avèrent moyennement élevées au cours de cette année. En plus, la pratique d'irrigation a diminué les niveaux de cet indice retenu. En effet, les valeurs moyennes génotypiques sont de l'ordre 21.3meqO₂/Kg (en sec) et 13.7meqO₂/Kg (en irrigué). En conditions pluviales, les géotypes Halab, Gila et Touggourt ont révélé des niveaux de l'indice de peroxyde dans l'ordre de 19.73, 28.3 et 15.9meqO₂/Kg respectivement. Alors que, les valeurs de cet indice sont de l'ordre de 18.4, 10 et 12.80meqO₂/Kg enregistrées respectivement par Halab, Gila et Touggourt en conditions d'irrigation.

Les résultats obtenus (Tableau 14) ont montré que les valeurs moyennes de l'indice d'iode varient en fonction du régime hydrique appliqué et du géotype conduit. Les valeurs moyennes génotypiques sont de l'ordre de 143.5g/100g et 146.9g/100g, inscrites respectivement au niveau du traitement sec et irrigué.

En conditions pluviales, l'huile des graines de géotype Gila se distingue par un faible indice d'iode en inscrivant une valeur de 138.9g/100g par rapport à des valeurs de 145.8 et 140g/100g respectivement enregistrées par Halab et Touggourt. Alors que, cet indice s'est révélé variable après la pratique d'irrigation où ses valeurs sont de l'ordre 140.9, 145.8 et 145 g/100g inscrites dans l'ordre par Halab, Gila et Touggourt.

Les résultats ont montré que l'indice de réfraction de l'huile étudiée varie en fonction du régime hydrique adopté. En conditions sèches, les valeurs de cet indice sont de l'ordre de 1.4712, 1.4732 et 1.4675 enregistrées respectivement par Halab, Gila et Touggourt. Tandis que, ces géotypes ont inscrit des valeurs respectives dans l'ordre de 140.9, 145.8 et 145 g/100g.

Les résultats obtenus indiquent que les valeurs de l'indice de saponification fluctuent faiblement en fonction de variation de géotype et le régime hydrique pratiqué. Les valeurs de cet indice sont de l'ordre de 201.33, 218.3 et 188.15mg KOH/g enregistrées respectivement par Halab, Gila et Touggourt au niveau du traitement sec. Tandis que, ces valeurs sont de l'ordre de 176.9mg KOH/g (Halab), 203.28mg KOH/g (Gila) et 252.1mg KOH/g (Touggourt) en régime hydrique.

Tableau.15. Les indices physico-chimiques de l'huile des graines de trois géotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015, 2016, 2017) et sous deux régimes hydriques.

| Année | Régime hydrique | Géotype | Indice de saponification (mg KOH/g) | Acidité (%) | Indice de peroxyde (meqO ₂ /kg) | Indice d'iode (g I ₂ /100g) | Indice de réfraction |
|-------|-----------------|----------------|-------------------------------------|------------------|--|--|----------------------|
| 2015 | Pluvial | Halab | 169.34±28.4a | 0.49±0.04b | 10.13±0.3b | 136±0.0a | 1.4700±0.0b |
| | | Gila | 237.1±6.5ab | 0.83±0.04a | 16.00±0.0a | 143.8±3.5ab | 1.4763±0.0a |
| | | Touggourt | 270.9±22.6b | 0.83±0.04a | 16.53±0.5a | 153.21±4.2b | 1.4767±0.0a |
| | | Moyenne | 225.8±18.34 | 0.7±0.06 | 14.2±1.04 | 144.3±2.9 | 1.4743±0.0 |
| | Irrigué | Halab | 176.87±13.6a | 0.45±0.0a | 9.73±0.8a | 146.7±4.2ab | 1.4734±0.0a |
| | | Gila | 199.44±13.6a | 0.71±0.1ab | 15.20±1.6b | 155.7±3.3b | 1.4755±0.0b |
| | | Touggourt | 184.39±3.8a | 0.98±0.1a | 7.20±0.0a | 135.6±1.2a | 1.4764±0.0c |
| | | Moyenne | 186.9±6.55 | 0.7±0.1 | 10.7±1.3 | 146±3.3 | 1.4751±0.0 |
| 2016 | Pluvial | Halab | 135.5±6.5a | 0.31±0.02a | 20.27±1.4a | 134.8±5.4a | 1.4681±0.0a |
| | | Gila | 158.05±33.9a | 0.39±0.03a | 21.87±0.3a | 156.9±2.1b | 1.4762±0.0c |
| | | Touggourt | 165.6±24.7a | 0.38±0.03a | 7.2±0.8b | 138.9±0.2a | 1.4707±0.0b |
| | | Moyenne | 153.03±13.05 | 0.36±0.02 | 16.4±2.4 | 143.5±3.8 | 1.4717±0.0 |
| | Irrigué | Halab | 143±35.9a | 0.32±0.04a | 12.53±2.2a | 149.61±3.6a | 1.4734±0.0a |
| | | Gila | 146.8±6.5a | 0.47±0.01a | 14.67±3.1a | 145.43±0.7a | 1.4746±0.0b |
| | | Touggourt | 208.8±16.3a | 0.41±0.1a | 14.93±2.7a | 145.84±4.7a | 1.4730±0.0a |
| | | Moyenne | 166.2±15.7 | 0.39±0.03 | 14.04±1.4 | 146.9±1.8 | 1.4737±0.0 |
| 2017 | Pluvial | Halab | 201.33±6.8a | 0.72±0.03a | 19.73±1.2b | 145.8±0.0c | 1.4712±0.0b |
| | | Gila | 218.3±9.9a | 0.94±0.04b | 28.3±1.3c | 138.9±0.2a | 1.4732±0.0c |
| | | Touggourt | 188.15±43.4a | 0.71±0.07a | 15.9±0.35a | 140.1±0.0b | 1.4675±0.0a |
| | | Moyenne | 202.6±13.7 | 0.8±0.04 | 21.3±1.9 | 141.6±1.1 | 1.4706±0.0 |
| | Irrigué | Halab | 176.9±7.5a | 0.91±0.04a | 18.4±0.5c | 140.9±0.0b | 1.471±0.0a |
| | | Gila | 203.2±6.5b | 0.96±0.03a | 10.00±0.2a | 145.8±0.0a | 1.470±0.0a |
| | | Touggourt | 252.1±3.8c | 1.24±0.00b | 12.80±1.2b | 145.0±0.5a | 1.474±0.0b |
| | | Moyenne | 210.7±11.4 | 1.04±0.05 | 13.7±1.3 | 143.9±0.8 | 1.4717±0.0 |

Discussion

Au cours de cette étude, l'intervalle des valeurs inscrites de l'indice de saponification pour l'ensemble des géotypes est délimité par 135.5 et 270.9 mg KOH/g. Résultat confirmé par Al Surmi et *al.* (2015) dont les valeurs obtenues chez trois géotypes de carthame sont de l'ordre de 211.5, 215.7 et 218.4 mg KOH/g. Alors que, Kakde et Chavan (2012) ont indiqué une valeur de 200.53 mg KOH/g. Cet indice reflète la longueur des chaînes hydrocarbonées des acides gras (Muhammad et *al.*, 2011). En conséquence, ces résultats peuvent indiquer la présence d'acide gras à chaîne carbonée trop longues. Néanmoins, les résultats de cet indice ont connu une faible fluctuation en fonction du régime hydrique apporté. Alors que, Ali et *al.* (2009) et Anwar et *al.* (2006) ont prouvé qu'aucun changement de l'indice de saponification

n'a été trouvé sous stress hydrique chez le tournesol et l'huile de graines de *Moringa oleifera* respectivement.

Les valeurs de l'acidité de l'huile se limitent à des valeurs extrêmes de à 0.31% et 1.24%. Al Surmi et *al.* (2015) ont indiqué une moyenne de 0.9% chez l'huile de carthame. Une acidité élevée est le résultat d'une oxydation poussée, qui se traduit par un rancissement de l'huile et qui est due à la dégradation des acides gras insaturés (acide oléique et linoléique) et à la production de composés secondaires d'oxydation dont certains ont été prouvés nuisibles à la santé (aldéhydes, cétones, radicaux libres, hydroperoxydes) (Chimi, 2001). Sur la base des valeurs de l'acidité et selon la norme commerciale du Conseil Oléicole International (2011), cette huile pourrait être classée dans la catégorie des huiles extra vierges. Tous les échantillons d'huiles analysés ont révélé que le génotype Halab a un faible taux d'acidité comparativement à Gila et Touggourt. Les résultats apportés ont ainsi indiqué que l'augmentation du niveau hydrique du sol a augmenté la valeur de ce paramètre. En particulier, Palese et *al.* (2010) ont démontré que les huiles obtenues à partir des arbres d'olive non irrigués ont des valeurs d'acidité significativement inférieures à celles trouvées dans les huiles provenant des arbres irrigués. Néanmoins, cette acidité a augmenté en 2017 par rapport aux années 2015 et 2016, ce qui pourrait être interprétée par l'effet de l'hyperthermie. Dawodu et *al.* (2015) et Olaniyan (2010) ont confirmé l'augmentation de l'acidité des huiles alimentaires après un traitement avec une haute température. Ceci s'explique que l'activité hydrolytique et lipolytique s'accélère sous l'effet de l'hyperthermie (Dawodu et *al.*, 2015). Alors que, la diminution de ce paramètre indique une résistance élevée à l'hydrolyse (Anwar et *al.*, 2006).

Les valeurs de l'indice de peroxyde des huiles étudiées (Tableau 15) oscillent de 7.20 meqO₂/kg à 28.3 meqO₂/kg. Ce paramètre présente un taux moyen de 4.1 meqO₂/kg chez trois génotypes de carthame (Al Surmi et *al.*, 2015). Meftah et *al.* (2014) et Ben moumen et *al.* (2014) ont rapporté des valeurs respectives de 18.66 meqO₂/kg chez les huiles d'olive et 34meqO₂/kg chez l'huile de carthame. Les valeurs moyennes de cet indice chez les espèces oléagineuses se limite entre 0.3 et 14.34 meqO₂/kg (Hasan et *al.*, 2019). La détermination de ce paramètre permet d'évaluer le niveau d'oxydation primaire produite au cours du stockage et/ou l'élaboration de l'huile qui peut être due à la formation des peroxydes suite à la présence de l'oxygène dissout dans l'huile et de certains facteurs favorisant (UV, eau, enzyme, etc.) (Bentekaya et Hassouna, 2005). Les valeurs obtenues de notre étude restent, presque pour l'ensemble des génotypes testés, inférieures à la limite établie par la norme commerciale du

Conseil Oléicole International (2011) pour les huiles d'olives ($< 20 \text{ meqO}_2/\text{kg}$ d'huile olive). Ainsi qu'au cours des trois années de culture, une alimentation hydrique appliquée a diminué significativement l'indice de peroxyde de l'huile fournie. Palese et *al.* (2010) ont rapporté que l'indice de peroxyde est plus élevé dans les huiles extraites des fruits des arbres d'olive du régime non irrigué. Cependant, Stefanoudaki et *al.* (2009) ont indiqué que l'irrigation n'a aucun effet sur l'expression de ce paramètre chez l'huile d'olive. Alors que Fernandes-Silva et *al.* (2013) ont rapporté des résultats contrastes en indiquant une élévation considérable de cet indice après irrigation. Néanmoins, l'augmentation de température enregistrée au cours de la troisième année (2017) a imposé une augmentation considérable de l'indice de peroxyde chez l'huile de carthame. Résultat similaire a été obtenu par Dawodu et *al.* (2015). Selon notre résultat, une corrélation négative a été signalée entre cet indice de peroxyde et l'acide linoléique ($r = -0.48$) (Fig 2a, annexe) et une corrélation positive avec celui de l'acide oléique ($r = 0.5$) (Fig 3a, annexe).

Les valeurs de l'indice d'iode enregistrées d'après les résultats obtenus (Tableau 15) oscillent entre $134.8 \text{ g}/100\text{g}$ et $156.9\text{g}/100\text{g}$. Al Surmi et *al.* (2015) ont démontré que la valeur de cette caractéristique est de l'ordre de 143, 144 et $147\text{g}/100\text{g}$ chez trois géotypes de carthame. Alors que Kakde et Chavan (2012) ont mentionné un indice plus faible et qui est de l'ordre de $114.21\text{g}/100\text{g}$. Les valeurs obtenues de notre étude nous a permis de classer l'huile des géotypes testés parmi les huiles semi-siccative ($110 \leq \text{IO} \leq 140$) (Ibeto et *al.*, 2012). Un trait lié avec la teneur élevée principalement en triglycérides d'acides linoléique et oléique dans cette huile. La siccativité des huiles végétales est une indication sur leur aptitude à sécher, à température ambiante, en présence de l'oxygène de l'air. Cette propriété est due à la présence des insaturations contenues dans les chaînes aliphatiques des acides gras qui composent l'huile. D'après Atabani et *al.* (2012), l'utilisation de l'huile de carthame pour la fabrication des biodiesel de haute qualité est très important grâce à sa valeur en indice d'iode qui dépasse $120\text{g}/100\text{g}$. Les résultats obtenus (Tableau 15) ont révélé que le taux de cet indice d'iode est élevé chez les géotypes maintenus en régime hydrique irrigué. Ceci pourrait être lié directement à l'augmentation de taux des acides gras insaturés après une irrigation appliquée. Cet indice représente le degré de l'insaturation de l'huile dans la présente étude, a légèrement diminué en raison du stress hydrique et haute température où il a été confirmé par (Dawodu et *al.*, 2015). En revanche, Anwar et *al.* (2006) n'ont signalé aucun effet de la sécheresse sur ce paramètre de l'huile de graines de *Moringa oleifera*. Les résultats obtenus ont démontré que l'indice d'iode corrélé positivement avec l'indice de réfraction ($r = 0.48$) (Fig 4a,

Annexe). Un trait qui pourrait être exploité afin d'améliorer la qualité et la stabilité à l'oxydation de l'huile (Serra et *al.*, 2019).

D'après les résultats illustrés dans le tableau (15), l'huile des génotypes de carthame cultivés au cours de trois années d'expérimentation a extériorisé des valeurs d'indice de réfraction vascillant entre 1.4675 et 1.4767. Al Surmi et *al.* (2015) ont indiqué un indice de réfraction allant de $1.468 \leq R \leq 1.471$ chez le carthame, tandis qu'il est de 1.472 chez l'huile de tournesol (Ariponnammal, 2012). Chez l'huile d'olive les valeurs de cette caractéristique sont comprises entre $1.4670 \leq IR \leq 1.4715$ (Douzane et Bellal, 2004). Généralement, pour les huiles végétales l'indice de réfraction est comprise entre $1.468 \leq IR \leq 1.490$ (Adrian et *al.*, 1998). L'indice de réfraction des huiles varie en fonction de leurs insaturations où il accroît avec le degré d'insaturation des acides gras contenus (Ibeto et *al.*, 2012). En effet, cette étude a montré une corrélation positive entre cet indice et le taux de l'acide linoléique ($r=0.43$) (Fig 5a, annexe) et une corrélation négative avec la teneur en acide oléique ($r= -0.46$) (Fig 6a, annexe). Selon les résultats obtenus, les valeurs de cet indice sont variables en fonction de génotype et l'année de culture (Douzane et Bellal, 2004). Ainsi que, l'irrigation appliquée a augmenté les valeurs moyennes de l'indice de réfraction enregistré.

Effet de facteurs environnementaux et de la nature de génotype sur la qualité chimique de l'huile des graines mûres de carthame (*Carthamus tinctorius* L.)

Cette partie a pour but d'étudier les caractéristiques physico-chimiques d'huile des graines récoltées des essais menés durant les trois campagnes de notre expérimentation. Elle englobe l'extraction d'huile et la détermination de sa composition en différents d'acides gras, en phytostérols et en polyphénols. Différents paramètres chimiques d'huile extraite ont été également concernés par cette étude. Enfin on a procédé par une évaluation de son activité anti-oxydante et anti-âge.

I. Teneur en huile des graines récoltées des campagnes 2015/2016/2017

Les résultats des teneurs en huile des graines se révèlent variables parmi les trois génotypes testés et entre les trois campagnes de culture de l'espèce. Ainsi, on note une unique influence significative du génotype sur cette teneur de la campagne 2015. Cependant, une grande influence du génotype, du régime hydrique et de leur interaction a été constatée sur la teneur en huile durant les deux autres campagnes (2016, 2017) (Tableau 16).

Tableau.16. Analyse de variance de la teneur en huile et les taux des acides gras constituants des graines de trois génotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015,2016,2017) en zones semi-arides.

| Source de variation | Année | Df | Teneur en huile | Acide Linoléique | Acide Oléique | Acide Stéarique | Acide Palmitique | Acide vaccénique | Acide Arachidique | Acide Béhanique |
|--------------------------|-------|----|-----------------|------------------|---------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|
| Génotype | 2015 | 2 | 6.665* | 610*** | 2085.7*** | 106.4*** | 41.5*** | 14.13*** | 0.7168ns | 1.19ns |
| | 2016 | 2 | 13.790*** | 528*** | 800.8*** | 45.9*** | 6.4* | 89.1*** | 48.60*** | 5.70* |
| | 2017 | 2 | 93.14*** | 2169*** | 4889** | 72*** | 505*** | 862.3*** | 334.8*** | 32.847*** |
| Régime hydrique | 2015 | 1 | 3.546ns | 25*** | 13.4** | 10.1** | 46.0*** | 2.78ns | 0.9932ns | 1.56ns |
| | 2016 | 1 | 59.965*** | 8* | 26.5*** | 139.5*** | 70.8*** | 21.3*** | 0.80ns | 3.60ns |
| | 2017 | 1 | 89.99*** | 5624*** | 41520** | 93*** | 31*** | 16.3** | 4.0ns | 0.807ns |
| Génotype Régime hydrique | 2015 | 2 | 0.469ns | 40*** | 105.1*** | 10.2** | 4.6* | 3.17ns | 1.2987ns | 1.94ns |
| | 2016 | 2 | 6.092* | 18*** | 24.6*** | 5.3* | 1.7ns | 2.6ns | 6.20* | 0.90ns |
| | 2017 | 2 | 9.98** | 12009*** | 59289** | 875*** | 415*** | 382.3*** | 243.3*** | 11.167** |

* significatif à $p < 0.05$; ** significatif à $p < 0.01$; *** significatif à $p < 0.001$; ns (not significatif à $p > 0.05$).

Les résultats moyens (Tableau 17) indiquent que les valeurs de la teneur en huiles durant la campagne 2015 et au niveau du traitement pluvial sont de l'ordre de 23.11%, 25.09 et 28.36, enregistrées respectivement chez Touggourt, Gila et Halab. La pratique d'irrigation

complémentaire durant cette période a permis une augmentation pour atteindre des taux de 24.53%, 28.93% et 29.76%, dans l'ordre chez les géotypes Touggourt, Gila et Halab.

Au cours de la campagne 2016, les teneurs relevées s'avèrent supérieures par rapport à celles des deux autres campagnes et ce pour les deux géotypes (Gila, Touggourt). Cette constatation se confirme particulièrement dans le traitement mené en irrigué. En effet, ces teneurs ont atteint dans le traitement soumis au régime pluvial des niveaux de 26.42% (Touggourt), 27.46% (Gila) et 27.83% (Halab). Durant cette même période, la pratique d'irrigation a provoqué une nette amélioration pour atteindre des taux dans l'ordre de 28.95%, 31.78% et 35.68%, représentant des augmentations de l'ordre de 22%, 13% et 8%.

Au cours de la dernière campagne de conduite de la culture, les teneurs en huiles s'annoncent plus faibles. Les valeurs obtenues dans le traitement mené en sec, vacillent de 22.84%, 23.86% à 26.91% inscrites chez Touggourt, Gila et Halab. La pratique d'irrigation s'est accompagnée d'une augmentation dans l'ordre, de cette teneur à des valeurs de 5%, 15% et 8%.

II. Composition en acides gras de l'huile extraite des graines

L'huile extraite se compose de deux fractions d'acides gras de point de vue leur teneur, une fraction principale regroupant, l'acide linoléique, l'acide oléique, l'acide stéarique et l'acide palmitique et une autre secondaire et incluant l'aide vaccénique, l'acide arachidique et l'acide béhénique. La première fraction représente une teneur moyenne de l'ordre de 98.5%, alors que la seconde atteint environ 1.5%.

La teneur de l'huile en différents acides gras de la principale fraction, varie significativement parmi les géotypes durant les trois campagnes et ce en fonction du régime hydrique appliqué (Tableau 16). Ceci indique que la composition de l'huile extraite des trois campagnes en quantité des acides gras de cette première fraction, est significativement modifiée par les variations, du géotype et du régime hydrique.

La teneur de l'huile en acides gras de la fraction qualifiée de secondaire se montre faiblement influencée par les deux facteurs d'étude et ce durant les trois campagnes d'expérimentation (Tableau 16).

1. Première année de conduite de l'essai (2015)

L'huile des graines issues de la campagne 2015 est constituée dans sa fraction principale par l'acide linoléique, polyinsaturé et dont les teneurs moyennes géotypiques atteignent 77.96% et 78.3% relevés respectivement dans les traitements, pluvial et irrigué. Concernant ce

composé la population locale Touggourt se distingue par les autres géotypes en inscrivant les teneurs les plus élevés, au niveau des deux traitements hydriques avec des teneurs de 79.30% (Pluvial) et 79.92 % (irrigué).

Le second constituant de cette fraction est représenté par l'acide oléique monoinsaturé et dont les teneurs moyennes géotypiques ont atteints des niveaux de 11.6% (pluvial) et 11.4% (irrigué). Contrairement au premier composé, l'huile extraite des graines de la population locale s'annonce le plus pauvre en cet acide gras, que les deux autres. Effet, les teneurs relevées dans le traitement sec sont de l'ordre de 12.48%, 12.01% et 10.23% constatées respectivement chez Halab, Gila et Touggourt. Ces teneurs se modifient dans le traitement irrigué pour rejoindre dans l'ordre, des valeurs de l'ordre de 11.97%, 12.6 et 9.8%. Dans cette fraction principale, les acides gras saturés sont représentés par l'acide stéarique et l'acide palmitique, où ce dernier enregistre des taux moyens géotypiques de l'ordre de 7.01 et 6.9% inscrits dans l'ordre dans les traitements, sec et irrigué. Ainsi et d'une façon générale, la pratique d'irrigation s'est soldée par une légère diminution de la teneur d'huile en acide palmitique. La teneur de l'huile en acide stéarique s'avère faible, avec des taux moyens géotypiques de l'ordre de 2.04% (pluvial) et 2% (irrigué). D'une manière générale, la pratique d'irrigation s'est accompagnée d'une légère diminution du taux de cet acide dans l'huile extraite. En effet les valeurs géotypiques enregistrées sont de niveaux de 2.16% (Halab), 2.08% (Gila) et 1.89%, dans le traitement mené en sec et changent aux valeurs de 2.04% (Halab), 2.07% (Gila) et 1.9% (Touggourt) suite à la pratique d'irrigation.

Les trois acides constituant la fraction qualifiée de secondaire détiennent des teneurs très faibles dans la composition de l'huile extraite durant cette campagne. Ainsi, les teneurs moyennes géotypiques sont de l'ordre 0.8% (sec), 0.81% (irrigué) pour l'acide vaccénique et 0.31% (sec), 0.27% (irrigué) pour l'acide arachidique et enfin 0.22% (sec, irrigué) pour l'acide béhénique.

2. Deuxième année de conduite de l'essai (2016)

Au cours de cette année 2016, les géotypes étudiés ont extériorisé des valeurs de l'acide linoléique de l'ordre de 76.65%, 77.49% et 79.08 respectivement enregistrées par Halab, Gila et Touggourt soumis au régime pluvial. L'apport d'irrigation a induit une légère diminution de cet acide en inscrivant des taux respectifs de 75.9%, 77.37% et 77.37 donnés par Halab, Gila et Touggourt.

Concernant l'acide oléique, les valeurs moyennes génotypiques sont de l'ordre de 11.96% et 12.25% respectivement en bloc sec et irrigué. En conditions pluviales, les géotypes Halab, Gila et Touggourt ont révélé des valeurs respectives de 12.93%, 12.28% et 10.66%. Ainsi et contrairement à la première année 2015, l'irrigation pratiquée a permis d'augmenter les taux de cet acide oléique dont les valeurs sont de l'ordre de 13.75%, 12.5% et 10.5% enregistrées respectivement par Halab, Gila et Touggourt.

Dans ce groupe des acides gras majoritaires, les valeurs moyennes génotypiques de l'acide stéarique se sont montrées élevées suite à un apport d'eau supplémentaire. En effet, elles sont de l'ordre de 1.87% en bloc sec et 1.98% en bloc irrigué. Cependant, l'acide palmitique a révélé des taux de 7% pour l'ensemble des géotypes testés en bloc sec. Alors que, ses valeurs en bloc irrigué sont de l'ordre de 6.9%, 6.76% et 6.8% respectivement constatées par Halab, Gila et Touggourt.

Les valeurs moyennes des acides gras de groupe secondaire sont de l'ordre 0.8% (bloc sec) et 0.78% (bloc irrigué) pour l'acide vaccénique et 0.32% (bloc sec et irrigué) pour l'acide arachidique et enfin 0.24% et 0.23% pour l'acide béhénique inscrites en bloc sec et irrigué respectivement (Tableau 17).

3. Troisième année de conduite de l'essai (2017)

En cette année 2017, les géotypes conduits en conditions pluviales ont révélé des taux faibles de l'acide linoléique par rapport aux deux premières années 2015 et 2016 (Tableau 17). Cet acide a exhibé des pourcentages de l'ordre de 77.24%, 75.72% et 75% respectivement enregistrés par Halab, Gila et Touggourt dans le lot sec. Alors que, une augmentation des taux de l'acide linoléique a été constatée suite à la pratique d'irrigation. En effet, ses valeurs sont de l'ordre de 74.4%, 78.4% et 79.9% révélées respectivement par Halab, Gila et Touggourt.

Les valeurs moyennes génotypiques de l'acide oléique sont de l'ordre de 13.86% et 12.33% respectivement enregistrées dans le bloc sec et irrigué. L'apport d'eau d'irrigation a provoqué conséquemment une diminution des taux de cet acide oléique en inscrivant des valeurs respectives de 14.6%, 11.8% et 10.6% pour Halab, Gila et Touggourt. Alors que, en bloc sec, les géotypes testés ont manifesté des valeurs de 12.56%, 14.31% et 14.72% respectivement données par Halab, Gila et Touggourt.

Concernant l'acide stéarique, ses valeurs sont de l'ordre de 1.92%, 1.92% et 2.1% respectivement révélées par Halab, Gila et Touggourt maintenus sous régime pluviale. Ainsi, elles sont augmentées par la pratique d'irrigation en atteignant des taux de 2.08%, 2.01% et 1.94% enregistrées respectivement par Halab, Gila et Touggourt. Les valeurs moyennes

génotypiques de l'acide palmitique sont de l'ordre de 6.64% en bloc sec et 6.57% inscrite en bloc irrigué.

Les taux de l'acide vaccénique sont de l'ordre de 0.79%, 0.77% et 0.76% respectivement enregistrées par Halab, Gila et Touggourt. Les valeurs de cet acide ont diminué faiblement suite à l'apport d'irrigation en rejoignant des valeurs respectives de 0.87%, 0.76% et 0.71% pour Halab, Gila et Touggourt. Les taux des acides gras arachidique et béhénique se sont montrés élevés par rapport aux années 2015 et 2016. En effet, les valeurs moyennes sont de l'ordre de 0.35% (bloc sec) et 0.36% (bloc irrigué) respectivement pour l'acide gras arachidique et 0.4% pour l'acide béhénique.

Tableau.17. Teneur en huile (%) et la composition en acides gras des graines (%) de trois génotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015,2016, 2017) en zones semi-arides.

| Année | Régime hydrique | Génotype | Teneur en huile (%) | C18: 2n6 | C18:1n9 | C18:0 | C16:0 | C18: 1n7 | C20:0 | C22:0 |
|-------|-----------------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 2015 | Pluvial | Halab | 28.36±0.2a | 77.12±0.1a | 12.48±0.03c | 2.16±0.01c | 6.87±0.00a | 0.78±0.00a | 0.33±0.00a | 0.22±0.00a |
| | | Gila | 25.09±3.02a | 77.47±0.02b | 12.01±0.02b | 2.08±0.02b | 7.02±0.02b | 0.80±0.01b | 0.32±0.00a | 0.21±0.00a |
| | | Touggourt | 23.11±1.8a | 79.30±0.01c | 10.23±0.01a | 1.89±0.00a | 7.15±0.00c | 0.83±0.00c | 0.28±0.00b | 0.23±0.01a |
| | | Moyenne | 25.52±1.3 | 77.96±0.3 | 11.6±0.3 | 2.04±0.04 | 7.01±0.04 | 0.80±0.01 | 0.31±0.01 | 0.22±0.00 |
| | Irrigué | Halab | 29.76±0.03c | 77.88±0.1b | 11.97±0.03b | 2.04±0.00a | 6.8±0.02b | 0.8±0.0a | 0.21±0.1a | 0.23±0.1a |
| | | Gila | 28.93±0.2b | 77.00±0.4a | 12.6±0.06c | 2.07±0.01a | 6.9±0.01a | 0.82±0.0a | 0.33±0.0a | 0.22±0.1a |
| | | Touggourt | 24.53±0.25a | 79.92±0.1c | 9.8±0.06a | 1.90±0.03b | 6.9±0.05a | 0.82±0.01a | 0.28±0.0a | 0.22±0.0a |
| | Moyenne | 27.7±0.8 | 78.3±0.4 | 11.4±0.4 | 2.00±0.03 | 6.9±0.03 | 0.81±0.0 | 0.27±0.03 | 0.22±0.0 | |
| 2016 | Pluvial | Halab | 27.83±0.9a | 76.65±0.1a | 12.93±0.1c | 1.90±0.01a | 7.0±0.03a | 0.8±0.0c | 0.33±0.0b | 0.24±0.0a |
| | | Gila | 27.46±0.3a | 77.49±0.0b | 12.28±0.0b | 1.81±0.01b | 7.0±0.01a | 0.81±0.0b | 0.32±0.0a | 0.25±0.0a |
| | | Touggourt | 26.42±1.1a | 79.08±0.1c | 10.66±0.1a | 1.91±0.01a | 7.0±0.01a | 0.77±0.0a | 0.31±0.0a | 0.23±0.0a |
| | | Moyenne | 27.24±0.5 | 77.44±0.4 | 11.96±0.3 | 1.87±0.02 | 6.98±0.01 | 0.8±0.01 | 0.32±0.01 | 0.24±0.0 |
| | Irrigué | Halab | 35.68±0.6c | 75.9±0.04a | 13.75±0.04c | 2.03±0.01c | 6.9±0.03a | 0.81±0.0a | 0.34±0.0c | 0.24±0.0a |
| | | Gila | 31.78±0.5b | 77.37±0.05b | 12.5±0.04b | 1.93±0.01a | 6.76±0.02a | 0.8±0.0a | 0.33±0.0b | 0.24±0.0a |
| | | Touggourt | 28.95±0.9a | 79.37±0.2c | 10.5±0.1a | 1.98±0.00b | 6.82±0.04a | 0.7±0.0b | 0.30±0.0a | 0.22±0.0a |
| | Moyenne | 32.14±1.03 | 77.35±0.5 | 12.25±0.5 | 1.98±0.01 | 6.82±0.02 | 0.78±0.01 | 0.32±0.0 | 0.23±0.0 | |
| 2017 | Pluvial | Halab | 26.91±0.1b | 77.24±0.03c | 12.56±0.0a | 1.92±0.0a | 6.67±0.02a | 0.79±0.0c | 0.36±0.0a | 0.44±0.0b |
| | | Gila | 23.86±0.1a | 75.72±0.0b | 14.31±0.0b | 1.92±0.0a | 6.59±0.03b | 0.77±0.0b | 0.33±0.0b | 0.38±0.0a |
| | | Touggourt | 22.84±0.6a | 75.00±0.02a | 14.72±0.0c | 2.1±0.0b | 6.66±0.00a | 0.76±0.0a | 0.36±0.0a | 0.41±0.0a |
| | | Moyenne | 24.54±0.6 | 75.99±0.3 | 13.86±0.3 | 1.98±0.03 | 6.64±0.02 | 0.77±0.0 | 0.35±0.00 | 0.4±0.01 |
| | Irrigué | Halab | 29.13±0.5c | 74.4±0.04a | 14.6±0.01c | 2.08±0.00c | 7.12±0.01c | 0.87±0.0c | 0.43±0.0c | 0.52±0.02b |
| | | Gila | 28.07±0.2b | 78.4±0.02b | 11.8±0.00b | 2.01±0.00b | 6.35±0.01b | 0.76±0.0b | 0.34±0.0b | 0.34±0.02a |
| | | Touggourt | 24.14±0.1a | 79.9±0.02c | 10.6±0.01a | 1.94±0.01a | 6.24±0.00a | 0.71±0.0a | 0.30±0.0a | 0.33±0.01a |
| | Moyenne | 27.11±0.8 | 77.55±0.8 | 12.33±0.6 | 2.01±0.02 | 6.57±0.14 | 0.78±0.0 | 0.36±0.02 | 0.4±0.03 | |

C18:2n6 (Acide linoléique); C18:1n9 (Acide oléique); C18:0 (Acide stéarique); C16:0 (Acide palmitique); C18:1n7 (Acide vaccénique); C20:0 (Acide arachidique); C22:0 (Acide béhénique)

Les résultats de tableau (18) ont montré que la teneur en acides gras saturés de l'ensemble des génotypes étudiés que ce soit l'année de culture et le régime hydrique adopté a atteint une moyenne de 9%. Une exception a été distingué chez le génotype Halab en 2017 en irrigué (10.15%). Les acides gras insaturés ont enregistré un maximum de 91.18% (Touggourt en 2017) et un minimum de 90.29% (Gila en 2015). Ainsi, ces résultats ont indiqué que le rapport AGI/AGS le plus élevé est inscrit par le génotype Touggourt (10.34) en 2017. Tandis que celui le plus faible a été révélé par l'ensemble des génotypes en 2015 (9.4).

Tableau.18. Teneur en acides gras saturés et insaturés et le rapport AGI/AGS de l'huile des graines de trois génotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015,2016, 2017) à Tiaret et en fonction de deux régimes hydriques.

| Année | Régime hydrique | Génotype | Acides gras saturés (%) | Acides gras insaturés (%) | AGI/AGS |
|-------|-----------------|-----------|-------------------------|---------------------------|---------------|
| 2015 | Pluvial | Halab | 9.58 ± 0.02a | 90.38 ± 0.03a | 9.4 ± 0.02 a |
| | | Gila | 9.63 ± 0.01b | 90.29 ± 0.01b | 9.4 ± 0.01 b |
| | | Touggourt | 9.56 ± 0.0a | 90.36 ± 0.01a | 9.4 ± 0.0 a |
| | Irrigué | Halab | 9.29 ± 0.1a | 90.65 ± 0.1a | 9.8 ± 0.1a |
| | | Gila | 9.53 ± 0.02a | 90.38 ± 0.0a | 9.5 ± 0.02a |
| | | Touggourt | 9.35 ± 0.01a | 90.57 ± 0.1a | 9.7 ± 0.1 a |
| 2016 | Pluvial | Halab | 9.49 ± 0.03a | 90.42 ± 0.03b | 9.5 ± 0.03 a |
| | | Gila | 9.35 ± 0.02b | 90.58 ± 0.02a | 9.7 ± 0.02 b |
| | | Touggourt | 9.43 ± 0.01a | 90.51 ± 0.01a | 9.6 ± 0.01 a |
| | Irrigué | Halab | 9.49 ± 0.04b | 90.41± 0.04b | 9.5 ± 0.0 4b |
| | | Gila | 9.25 ± 0.01a | 90.68 ± 0.0a | 9.8 ± 0.01a |
| | | Touggourt | 9.33 ± 0.04a | 90.63 ± 0.1a | 9.7 ± 0.05a |
| 2017 | Pluvial | Halab | 9.4 ± 0.03b | 90.59 ± 0.03b | 9.6 ± 0.03 b |
| | | Gila | 9.2 ± 0.03a | 90.81 ± 0.00c | 9.8 ± 0.04 a |
| | | Touggourt | 9.5 ± 0.01c | 90.47 ± 0.01a | 9.5 ± 0.01 c |
| | Irrigué | Halab | 10.15 ± 0.03c | 89.85± 0.03a | 9.86 ± 0.0 3a |
| | | Gila | 9.04± 0.04b | 90.96 ± 0.03b | 10.1 ± 0.04b |
| | | Touggourt | 8.82 ± 0.01a | 91.18 ± 0.01c | 10.34 ± 0.01c |

Discussion

Sous les conditions locales, la production d'huile par les graines des génotypes testés de carthame s'est avérée assez élevée pour atteindre les intervalles définis par d'autres travaux. Ainsi, indistinctement du régime hydrique appliqué, le rendement moyen génotypique en huile a atteint 27.4%. Cependant ce rendement varie grandement entre les années de conduite de culture, parmi les génotypes expérimentés et selon le régime hydrique appliqué. Les

graines obtenues de la culture de la campagne 2016 ont fournis un rendement plus élevé en comparaison avec celles des deux autres campagnes. Au cours de cette première année la valeur maximale du taux d'huile obtenu sous les conditions irriguées a avoisinée 38.68%. En conditions sèches le taux moyen d'huile des graines était de l'ordre de 25.8%. Cette capacité de production d'huile a été évoqué par les travaux de 15% Sung *et al.* (2016a) et Bordas et Sioula (2008) qui avaient rapportés que le rendement en huile des graines de carthame se situe entre des extrêmes de 15 à 40%. Ce rendement s'annonce profitable par le fait que celui des autres oléagineuses majeures, le soja et le tournesol, était de l'ordre de 17% et 50%, selon Zanetta *et al.* (2015) et Ebrahimian *et al.* (2019).

Les variations de la teneur en huile des graines cultivées durant ces trois campagnes se justifient par les travaux d'Elfadl *et al.* (2009) qui avaient prouvé que la richesse des graines de carthame en huiles dépend grandement de la variabilité génotypique conduite et des conditions environnementales. En effet, Sung *et al.* (2016b) et Golkar *et al.* (2011) avaient démontré que la nature du génotype impose la teneur huile des graines de carthame à des niveaux fluctuant entre 22.7% et 28%.

L'influence de la nature du génotype s'explique par principalement par un marqueur morphologique lié à l'aspect des feuilles, où les épineuses fournissent des graines plus riches en huile que celles qui en sont dépourvues (Ashrafi et Razmjoo, 2010; Kizil *et al.*, 2008). Ceci se constate au niveau de la variabilité conduite dans le présent travail où les génotypes Halab et Gilla s'avèrent plus rentables en huile que la population locale Touggourt.

Le rendement en huile s'annonce plus faible au niveau des plantes conduites en conditions pluviales, alors que l'apport d'irrigation complémentaire a favorisé cette production. En effet, différents travaux (Fernández-Cuesta *et al.*, 2014 ; Ashrafi et Razmjoo, 2010 ; Istanbuloglu *et al.*, 2009) avaient évoqué la réduction du rendement en huile en situation de déficit hydrique. L'effet pénalisant de ce stress s'avère plus imposant en cas de sa déclaration durant les phases de floraison et le remplissage des graines (Koutroubas *et al.*, 2009 ; Yau, 2007). Durant cette dernière phase la contrainte du déficit hydrique affecte l'activité photosynthétique et réduit par conséquent la disponibilité des assimilés indispensables et la synthèse et l'accumulation d'huile au niveau des graines (Hopkins, 2003). L'hyperthermie détient un effet défavorable sur la capacité de la plante du carthame à produire de l'huile. En effet, les travaux de Elferjani et Soolanayakanahally (2018), Pritchard *et al.* (2000), Quadir *et al.* (2006) et Oraki *et al.* (2011) avaient évoqué cette influence et qui l'avaient considérée comme déterminante dans ce processus. Les mêmes tendances ont évoquées par Roche (2005) et Robertson *et al.* (2004) en menant leurs recherches sur le tournesol et le colza. Les résultats

de ces recherches s'observent dans le présent travail où les rendements les plus faibles ont été relevés durant la campagne 2017 et qui était caractérisée par les pics maximaux de températures les plus élevés comparativement aux deux autres années.

Cette situation s'explique par une perturbation des processus enzymatiques impliquée dans le remplissage des graine (Iyer *et al.*, 2008; Baud et Lepiniec, 2010), une carence en substances carbonées (Roche, 2005) et par une augmentation du rapport coque/amande des graines (Rondanini *et al.*, 2006 ; Emmami *et al.*, 2011), alors que l'amande constitue le site de localisation des parenchymes de réserve contenant la fraction lipidique des graines. Les réductions qui se déroulent dans les membranes thylacoïdiennes des chloroplastes des plantes supérieures, sont très sensibles aux dommages causés par les températures élevées affectant la photosynthèse (Hopkins, 2003).

Les effets émanant de la sécheresse associée aux hautes températures sont davantage dommageable à la production d'huile. Leurs effets conjugués provoqueraient un arrêt prématuré de la lipogénèse (Alpaslan et Gunduz, 2000). Celle-ci est fortement dépendante du flux de carbone qui permet de former les précurseurs de l'acétyl-CoA, mais aussi de fournir l'énergie et le pouvoir réducteur nécessaires grâce à la glycolyse (Weselake *et al.*, 2009).

Les propriétés physicochimiques de l'huile extraite des graines est sujette à des variations d'origines, génotypique, annuelle et d'alimentation hydrique. L'une des particularités biochimiques qui a été définie par une stabilité, se rapporte à sa richesse en acides gras insaturés, particulièrement les acides oléique et linoléique. Ces résultats se confirment par les travaux de Ben moumen *et al.* (2014) et Ergönül et Özbek (2018) qui ont confirmé que l'une des caractéristiques biochimiques de l'huile de carthame est sa teneur élevée en ces deux acides gras. A l'opposé l'huile extraite présente une faible teneur en acide gras saturé représenté particulièrement par l'acide palmitique, résultat qui se confirme par celui de Taha et Matthäus (2018). La distinction de l'huile de carthame par un rapport élevé de sa teneur en acides gras insaturés/ acides gras saturés et qui était de l'ordre d'environ 9 évalué dans notre travail, lui confère une valeur nutritionnelle très élevée. On note dans ce contexte que sous les conditions pluviales ce rapport s'est maintenu stable durant les trois campagnes de culture de la plante (environ 9). Le même résultat du rapport a été obtenu en conditions irriguées, sauf qu'au cours de la troisième campagne était modérément plus élevé pour atteindre une valeur de 10. Les résultats démontrent une variation de ce rapport en fonction de la nature du génotype où la population locale Touggourt s'est distinguée par les valeurs les plus élevées. La variation imposée par la nature du génotype a été évoquée par les travaux de

Gacek *et al.* (2016) et Ben Moumen *et al.* (2015) qui avaient démontré que la composition d'huile en acides gras saturés et insaturés dépend étroitement de la nature de la variabilité génétique.

Les paramètres climatiques influent également sur les teneurs en différents types d'acides gras de l'huile (Roche *et al.*, 2019). En effet, les travaux de Flagella *et al.* (2002), Kizil *et al.* (2008), Ben moumen *et al.* (2013) et Khoufi *et al.* (2014) avaient démontré que la sécheresse accompagnée de hautes températures survenant lors du cycle de développement de la plante enrichissent l'huile extraite en acides gras monoinsaturés et particulièrement en acide oléique. A l'opposé cette particularité s'accompagne d'une nette d'acide gras saturé, l'acide palmitique (Ashrafi et Razmjoo, 2010 ; Roche *et al.*, 2019). Cette situation s'explique selon Martínez-Rivas *et al.* (2003), Garcés et Mancha (1991) et Hamrouni *et al.* (2004) par une inhibition de l'enzyme convertisseur de l'acide oléique en acide linoléique. La température et la régulation en oxygène de l'oléate désaturase microsomale (FAD2) issue de graines de carthame ont été étudiées par Esteban *et al.* (2004) qui ont rapporté qu'une augmentation de la température de 10 à 40°C a entraîné une diminution de l'activité de FAD2.

III. Composition en phytostérols de l'huile extraite des graines de carthame

Les phytostérols des huiles végétales sont considérés parmi les constituants qui offrent de larges utilisations dans les applications pharmaceutiques et tiennent une place importante dans l'alimentation humaine. Le contenu en phytostérols des huiles extraites des graines de carthame a été évalué durant les trois campagnes de conduite des essais.

Les stérols concernés par cette détermination concernent le Campesterol, le Stigmastérol, le β Sitostérol, Δ 5Avenastérol, le Δ 7Stigmastérol, le Δ 7Avenastérol, le Cycloartérol, le Méthylène Cycloartérol et le Citrostadiérol. L'effet des variations du régime hydrique s'annonce très faible sur les teneurs des phytostérols de l'huile extraite des graines, indistinctement des trois campagnes d'expérimentation (2015, 2016, 2017). L'influence de la nature des génotypes était variable en fonction de la campagne de conduite des essais et de la nature du composé appartenant à ce groupe (Tableau 19). Ainsi, les teneurs en Δ 5Avenastérol, Δ 7Avenastérol et Cycloartérol de l'huile extraite des graines de la campagne 2015 sont significativement variables en fonction de la nature du génotype. Egalement, cette influence est perceptible à l'échelle de l'huile des graines de la campagne 2016 et concernent le Campesterol, le β Sitostérol et Δ 5Avenastérol (Tableau 19).

Tableau.19. Analyse de la variance de la teneur en phytostérols (mg/100g) de trois géotypes de carthame cultivés en deux années consécutives (2015, 2016) en zone semi-aride et sous deux régimes hydriques (Irrigué, Sec).

| Année | Source de variation | df | Campestérol | Stigmastérol | β-Sitostérol | Δ5 Avénastérol | Δ7 Stigmastérol | Δ7 Avénastérol. | Cycloartérol | Méthylène cycloartérol | Citrostadiérol | Total |
|-------|---------------------|----|-------------|--------------|--------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------|------------------------|----------------|--------|
| 2015 | Géotype | 2 | 0.29ns | 0.65ns | 0.2ns | 4.56* | 2.72ns | 9.00** | 8.00** | 0.83ns | 0.59ns | 0.22ns |
| | R.H. | 1 | 0.55s | 1.49ns | 1.5ns | 2.5ns | 1 ns | 2.4ns | 0.80ns | 0.32ns | 0.22ns | 1.39ns |
| | Géotype*R.H. | 2 | 0.45ns | 0.54ns | 1.1ns | 1.77ns | 1.11ns | 1.00ns | 0.38ns | 0.15ns | 0.46ns | 0.98ns |
| 2016 | Géotype | 2 | 10.89** | 0.25ns | 16.3*** | 4.74* | 0.11ns | 0.01ns | 1.77ns | 3.17ns | 3.47ns | 6.89* |
| | R.H. | 1 | 4.05ns | 3.95ns | 1.82ns | 0.68ns | 3.12ns | 0.34ns | 4.07ns | 6.14* | 2.21ns | 4.72ns |
| | Géotype*R.H. | 2 | 0.62ns | 0.09ns | 2.08ns | 0.13ns | 1.08ns | 1.47ns | 0.77ns | 1.74ns | 2.39ns | 1.60ns |

* significatif à $p < 0.05$; ** significatif à $p < 0.01$; *** significatif à $p < 0.001$; ns (not significatif à $p > 0.05$).

Les résultats moyens des teneurs génotypiques en différents types de stérols de l'huile extraite durant les trois campagnes et au niveau des deux traitements hydriques (pluvial, irrigué) illustrent que le β -Sitostérol détient les teneurs les plus élevées, suivi de $\Delta 7$ Stigmastérol, le Campestérol, le Stigmastérol et le $\Delta 5$ Avénastérol. La teneur en $\Delta 7$ Avénastérol s'avère intermédiaire. Enfin, les teneurs de l'huile en Cycloarténol, le Méthylène Cycloarténol et le Citrostadiénol s'annoncent très faibles comparativement aux autres constituants. Toutefois, les valeurs de ces teneurs demeurent variables dans les huiles issues des différentes campagnes et seront interprétées distinctement.

1. Première année de conduite de l'essai (2015)

Les résultats moyens génotypiques des teneurs en différents types de phytostérols de l'huile des graines de cette campagne (Tableau 20) indiquent que le β -Sitostérol a détenu les valeurs les plus élevées, avec 187.4mg/100g et 156.8mg/100g, relevées respectivement au niveau des traitements, pluvial et irrigué. Pour ce même constituant et au niveau du traitement sec, le génotype Gila se distingue par la valeur la plus élevée avec 201.1mg/100g et en irrigué c'est le génotype Touggourt qui en inscrit cette extrême avec 186.54mg/100g. La seconde plus élevée teneur est détenue par le $\Delta 7$ Stigmastérol où ses valeurs dans l'ordre équivalent à 71.7mg/100g et 63.7mg/100g enregistrées dans les huiles respectives issues du traitement sec et irrigué. Le Campestérol détient également des fractions élevées pour atteindre 51.8mg/100g (pluvial) et 44.66mg/100g (irrigué). Pour ce même composé et au niveau du traitement sec, le génotype Halab se distingue par une huile plus riche en enregistrant une valeur de 52.18mg/100g, tandis que sous irrigation cette valeur a été enregistrée par la population locale Touggourt.

La fraction des phytostérols existants à des teneurs faibles et qui concernent l'Avénastérol, le Cycloarténol, le Méthylène Cycloarténol et le Citrostadiénol, leurs teneurs moyennes génotypiques respectives au niveau du traitement sec, sont de l'ordre de 9.9, 4.8, 2.8 et 1.8mg/100g. Ces valeurs atteignent dans l'ordre au niveau du traitement irrigué des taux de 7.6, 4.1, 2.4 et 1.6mg/100g. On constate que pour cette fraction de phytostérols, l'huile du génotype Gila se distingue par les taux les plus élevés au niveau des deux traitements, sec et irrigué.

Les teneurs totales en phytostérols de l'huile extraite des graines récoltées au cours de cette campagne ont atteint des valeurs de 381.3mg/100g (traitement sec) et 323.1mg/100g (traitement irrigué). Cette différence informe que la richesse de l'huile en ces constituants est prononcée en conditions sèches qu'en situation d'apport d'irrigation complémentaire.

2. Deuxième année de conduite de l'essai (2016)

Au cours de cette année, le β -Sitostérol a relevé les valeurs les plus élevées parmi les composés de phytostérols déterminés dans l'huile de graines de carthame (Tableau 20). En effet, les valeurs moyennes génotypiques de ce composé sont de l'ordre de 180.4mg/100g et 168.2mg/100g enregistrées respectivement en conditions pluviales et irriguées. Ainsi, l'accession Touggourt se distingue par les teneurs les plus élevées en β -Sitostérol et ce parmi les géotypes conduits où les valeurs enregistrées sont de l'ordre de 204.19mg/100g et 217.68mg/100g en sec et irrigué respectivement. Le second composé majoritaire (Δ^7 Stigmastérol) détient des valeurs moyennes génotypiques dans l'ordre de 78mg/100g et 70.2mg/100g au niveau des traitements menus en sec et irrigué respectivement. Le taux de Campestérol s'est montré élevé pour l'ensemble des géotypes testés pour rejoindre des valeurs moyennes génotypiques de 51.7mg/100g (sec) et 46.7mg/100g (irrigué).

La seconde rangée regroupant des phytostérols à des faibles teneurs et qui correspond l'Avénastérol, le Cycloarténol, le Méthylène Cycloarténol et le Citrostadiénol, a révélé des teneurs moyennes génotypiques respectives de l'ordre de 15.7, 5.7, 2.6 et 2.04 mg/100g en conditions pluviales. Alors que, suite à la pratique d'irrigation, ces teneurs sont dans l'ordre de 13.6, 1.7, 1.4 et 1.4 mg/100g.

Les géotypes étudiés ont extériorisé un taux total de phytostérols dans l'ordre de 378.34 mg/100g, 377.07mg/100g et 415mg/100g enregistré respectivement par Halab, Gila et Touggourt cultivés en conditions pluviales. Alors que, suite à l'apport d'irrigation les valeurs totales de phytostérols inscrites sont de l'ordre de 329mg/100g, 303.58mg/100g et 419.64mg/100g relevées par Halab, Gila et Touggourt respectivement.

3. Troisième année de conduite de l'essai (2017)

La teneur Total en phytostérols de l'huile des graines mûres de carthame a manifesté des valeurs élevées par rapport aux deux autres années (2015, 2016) et ce pour l'ensemble des géotypes conduits (Tableau 20). Ses valeurs moyennes génotypiques sont de l'ordre de 404.48 mg/100g en conditions sèches et 453.39mg/100g en irrigué.

Parmi la variabilité génotypique conduite, le géotype Halab se particularise par une teneur élevée en β -Sitostérol en inscrivant des valeurs dans l'ordre de 211.19 mg/100g et 232.56 mg/100g relevées respectivement au niveau des traitements sec et irrigué. Ainsi, les teneurs de Δ^7 Stigmastérol se sont montrées élevées chez le géotype Halab où les valeurs inscrites sont de l'ordre de 92.27 mg/100g (lot sec) et 100.97mg/100g au niveau du lot irrigué. Concernant le Campestérol, les géotypes testés ont montré des teneurs dans l'ordre de 52.87mg/100g,

Résultats et discussion

51.15 mg/100g et 41.66 mg/100g enregistrées respectivement par Halab, Gila et Touggourt. Tandis que, ces génotypes ont indiqué des valeurs respectives de 64.76 mg/100g, 45.71 mg/100g et 61.53 mg/100g suite à la pratique d'irrigation.

Le groupe de l'Avénastérol, le Cycloarténol, le Méthylène Cycloarténol et le Citrostadiénol, a manifesté des valeurs moyennes génotypiques respectives de l'ordre de 16.65, 12.68, 3.31 et 1.05mg/100g en sec. Tandis que, ces valeurs sont dans l'ordre de 17.21, 12.92, 5.16 et 1.99 mg/100g en bloc soumis en régime hydrique appliqué. On constate que le taux de Cycloarténol a révélé des valeurs élevées en 2017 comparativement aux deux premières années.

Tableau.20. Teneur en phytostérols (mg/100g) de trois géotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015,2016 et 2017) en zone semi-aride et sous deux régimes hydriques (Irrigué, Sec).

| Année | Régime hydrique | Géotype | Campestérol | Stigmastérol | β-Sitostérol | Δ5 Avénastérol | Δ7 Stigmastérol | Δ7 Avénastérol | Cycloartérol | Méthylène cycloartanol | Citrostadiérol | Total |
|-------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------------|-----------------|--------------------|
| 2015 | Pluvial | Halab | 52.18±10.6 | 35.28±6.6 | 195.43±37.6 | 18.31±0.5 | 82.65±10.0 | 10.54±2.2 | 3.82±1 | 3.31±1.5 | 2,31±0.9 | 403.84±69.8 |
| | | Gila | 50.98±22.2 | 38.28±11.7 | 201.1±56.4 | 16.9±4.7 | 79.92±15.6 | 14.24±3.6 | 6.59±1.3 | 3.1±0.7 | 1,95±0.7 | 413.03±113.9 |
| | | Touggourt | 50.10±0.5 | 26.17±0.5 | 165.7±1.03 | 20.32±0.1 | 52.53±2.2 | 5.04±0.1 | 4.02±0.1 | 1.9±0.4 | 1,19±0.2 | 326.99±3.2 |
| | | Moyenne | 51.8±7.1 | 33.24±4.3 | 187.4±20.3 | 18.51±1.5 | 71.7±7.2 | 9.9±1.8 | 4.8±0.6 | 2.8±0.5 | 1.8±0.4 | 381.3±40.9 |
| | Irrigué | Halab | 35.79±8.3 | 25.32±6.01 | 127.92±30.6 | 11.20±1.5 | 58.78±14.1 | 5.78±1.2 | 2.24±0.6 | 2.62±0.6 | 1.57±0.3 | 271.21±63.26 |
| | | Gila | 44.29±0.2 | 29.04±0.45 | 156.02±1.2 | 10.93±4.5 | 74.76±5.4 | 11.65±0.6 | 6.45±1.4 | 2.51±0.8 | 1.71±0.2 | 337.36±4.5 |
| | | Toughourt | 53.92±0.7 | 27.4±0.7 | 186.54±2.7 | 22.71±0.6 | 57.52±0.9 | 5.44±0.1 | 3.75±0.2 | 2.05±0.2 | 1.53±0.6 | 360.85±3.6 |
| | | Moyenne | 44.66±3.6 | 27.25±1.8 | 156.8±12.3 | 14.95±2.4 | 63.7±5.2 | 7.6±1.1 | 4.1±0.8 | 2.4±0.3 | 1.6±0.2 | 323.1±22.7 |
| 2016 | Pluvial | Halab | 49.01±1.5 | 34.73±1.7 | 168.18±6 | 17.82±3.5 | 78.33±1.6 | 16.16±5.3 | 9.63±5.8 | 2.4±0.7 | 2.08±0.9 | 378.34±7.3 |
| | | Gila | 47.95±1.4 | 34.09±1.9 | 168.96±3.6 | 16.06±2.2 | 80.49±0.9 | 19.66±0.6 | 4.58±0.8 | 3.1±0.2 | 2.17±0.9 | 377.07±7.5 |
| | | Touggourt | 58.04±2.7 | 34.77±1.8 | 204.19±7.9 | 24.9±1.0 | 75.11±1.2 | 11.33±5.4 | 2.87±0.6 | 2.3±0.4 | 1.86±0.4 | 415.37±16.6 |
| | | Moyenne | 51.7±1.9 | 34.53±0.9 | 180.4±6.7 | 19.6±1.8 | 78±1 | 15.7±2.5 | 5.7±2 | 2.6±0.3 | 2.04±0.4 | 390.26±8.5 |
| | Irrigué | Halab | 44.11±0.2 | 30.84±0.9 | 147.24±1.9 | 17.19±2.7 | 69.66±1.4 | 13.20±4.2 | 2.3±0.1 | 2.3±0.5 | 2.6±0.1 | 329.41±3.6 |
| | | Gila | 39.52±6.3 | 28.14±4.7 | 139.63±20.7 | 14.56±1.9 | 65.19±10.8 | 10.14±2.3 | 2.89±0.5 | 1.9±1.0 | 1.55±0.2 | 303.58±45.1 |
| | | Touggourt | 56.37±2.1 | 30.98±3.7 | 217.68±14.1 | 21.62±3.7 | 75.66±7.2 | 17.33±6.6 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 419.64±23 |
| | | Moyenne | 46.7±3.2 | 30±1.8 | 168.2±14.4 | 17.8±1.8 | 70.2±4.1 | 13.6±2.6 | 1.7±0.5 | 1.4±0.5 | 1.4±0.4 | 350.88±22.9 |
| 2017 | Pluvial | Halab | 52.87 | 44.69 | 211.19 | 20.59 | 92.27 | 17.8 | 15.09 | 6.52 | 3.16 | 464.18 |
| | | Gila | 51.15 | 30.76 | 182.6 | 15.82 | 83.35 | 15.46 | 9.33 | 3.42 | 0.00 | 391.89 |
| | | Touggourt | 41.66 | 31.94 | 165.91 | 16.65 | 70.89 | 16.7 | 13.61 | 0.00 | 0.00 | 357.36 |
| | | Moyenne | 48.56 | 35.80 | 186.57 | 17.69 | 82.17 | 16.65 | 12.68 | 3.31 | 1.05 | 404.48 |
| | Irrigué | Halab | 64.76 | 47.61 | 232.56 | 20.76 | 100.97 | 19.3 | 12.12 | 6.17 | 3.89 | 508.14 |
| | | Gila | 45.71 | 34.05 | 169.35 | 13.66 | 84.73 | 18.12 | 11.69 | 4.52 | 0.00 | 381.81 |
| | | Touggourt | 61.53 | 33.48 | 229.16 | 21.59 | 88.42 | 14.21 | 14.94 | 4.79 | 2.09 | 470.21 |
| | | Moyenne | 57.33 | 38.38 | 210.36 | 18.67 | 91.37 | 17.21 | 12.92 | 5.16 | 1.99 | 453.39 |

Discussion

Les phytostérols se trouvent dans les plantes sous forme de stérols libres et de formes conjuguées (Piironen et *al.*, 2000). Ce sont des composés clés pour la formation de microdomaines à membrane plasmique végétale. Ces molécules jouent un rôle essentiel dans la régulation de la fluidité membranaire et de la perméabilité en affectant les protéines associées aux membranes. De plus, ils sont des précurseurs des brassinostéroïdes et sont impliqués dans l'embryogenèse (Schaller, 2003).

Selon les résultats obtenus (Tableau 20), les taux des phytostérols s'avèrent fluctuants entre les années de culture. Ainsi, les phytostérols majeures oscillent en fonction des génotypes conduits. Dans notre étude l'intervalle de la variation de la teneur en phytostérols se délimite entre 323.1 à 453.39 (mg/100g). Ces valeurs s'annoncent dans les normes selon les études ultérieures. En effet, cette teneur est de 3051.60, 2958.10 et 2652.46 (mg/kg) pour trois génotypes de carthame cultivés en Egypte (Taha et Matthäus, 2018). En Iran la teneur en phytostérols des variétés de carthame oscille entre 1248.34 et 2976.25 mg/kg (Vosoughkia et *al.*, 2011). Ben Moumen et *al.* (2015) ont indiqué des valeurs oscillant entre 3629.68 mg/kg et 4180.69 mg/kg.

La détermination des phytostérols de l'huile de carthame a divulgué la prédominance de β -Sitostérol parmi les composants définis avec des valeurs moyennes qui varient entre 156.8 à 210.36 mg/100g. Ce composant a été aussi mentionné majoritaire par d'autres travaux chez le carthame (Ben Moumen et *al.*, 2015 ; Hamrouni-Sellami et *al.*, 2007), blé (Alignan et *al.*, 2009) et maïs (Harrabi et *al.*, 2008).

La variation de la teneur totale des phytostérols est liée à l'effet du génotype et les conditions environnementales (Roch et *al.*, 2010 ; Alignan et *al.*, 2009). Généralement, il a été suggéré que le β -Sitostérol joue un rôle important contre la dessiccation de la graine (Roche et *al.*, 2010a). Les plantes réagissent au stress hydrique sous la forme de divers changements physico-biochimiques et moléculaires aux niveaux cellulaires et moléculaires. Ce stress provoque la destruction des membranes cellulaires par désintégration des lipides membranaires (Surma et *al.*, 2013). Les phytostérols sont l'un des principaux groupes de lipides membranaires qui jouent un rôle important dans la préservation de l'intégrité des membranes cellulaires (Kumar et *al.*, 2018). Chez le riz, Kumar et *al.* (2015) ont rapporté une élévation des niveaux de phytostérols ainsi que l'activité de la HMG-CoA réductase (enzyme 3- hydroxy-3-methylglutaryl coenzyme A reductase) sous déficit hydrique. Résultats similaires ont été approuvés chez l'huile d'olive (Fernandes-Silva et *al.*, 2013). Une telle dynamique qui indique le rôle vital des phytostérols dans la tolérance au stress. La HMG-CoA

réductase (HMGR) est la principale enzyme de la biosynthèse des stérols végétaux, synthétisés via la voie de l'acide mévalonique (Wei et *al.*, 2019). Une autre enzyme a été mise en évidence sous stress hydrique chez le riz. Le stérol acyltransférase (PSAT) est une autre enzyme qui joue un rôle important dans le renouvellement des phytostérols en esters de stéryle et aide à maintenir l'homéostasie des lipides membranaires (Kumar et *al.*, 2018).

Une conduite culturale stressante présentée par une absence de l'apport de l'irrigation associée avec une élévation de la température notamment au cours de la période de floraison et de remplissage des graines s'est accompagnée par une nette augmentation de la teneur en phytostérols chez les trois génotypes testés. Une même tendance a été observée où la haute température stimule l'augmentation des phytostérols chez le tournesol (Roche et *al.*, 2006, 2010b; Valsta et *al.*, 2004), soja et canola (Vlahakis et Hazebroek, 2000). Cette augmentation pourrait être à l'origine des mécanismes d'adaptations des plantes à des variations de température (Palta et *al.*, 1993). Ainsi que, Asami et Yoschida (1999) suggèrent l'implication dans la réponse des plantes aux stress, et pourraient expliquer l'augmentation du taux de phytostérols sous l'effet de déficit hydrique associé à l'hyperthermie. Une telle situation qui expliquerait la capacité des phytostérols à résister à l'oxydation par les ROS produits à la suite du stress thermique et hydrique au sein des membranes cellulaires (Piironen et *al.*, 2000).

D'après Vlahakis et Hazebroek (2000), la teneur totale en phytostérols augmente avec la température durant la maturation des graines de soja. La teneur en phytostérols totaux apparaît significativement augmentée par les fortes températures chez certains hybrides de tournesol (Ayerdi-Gotor et *al.*, 2008). Au contraire, chez le seigle, elle diminue si les températures sont élevées (Zangenberg et *al.*, 2004).

Ces phytostérols ont soit un groupe méthyle (campestérol) soit un groupe éthyle (β -sitostérol et stigmastérol) en leur position C-24, et sont donc également appelés 24-méthylstérols et 24-thylstérols, respectivement (Schaller et *al.*, 1998). Deux types des enzymes de SMT « stérol méthyl transférase » (SMT1 et SMT2) sont connus pour être impliqués dans la méthylation primaire et secondaire au cours de la biosynthèse des stérols (Neelakandan et *al.*, 2009). Néanmoins, l'activité de ces enzymes notamment SMT2 est fortement influencée par les conditions environnementales limitantes (Anjanasree et *al.*, 2010). Nombreuses études ont montré que l'enzyme SMT2 joue un rôle déterminant dans l'équilibre du rapport campestérol / β -sitostérol afin de répondre à la fois aux besoins de croissance et à l'intégrité de la membrane (Schaller et *al.*, 1998 ; Schaeffer et *al.*, 2001 ; Hase et *al.*, 2005).

Les résultats ont démontré des corrélations positives entre les composantes majoritaires de phytostérols de l'huile de carthame (Figure 7a, 8a, 9a; annexe). Ces corrélations reflètent les équilibres biochimiques qui se mettent en place entre ces composantes tout au long de la chaîne de leurs biosynthèse (Roche, 2005). Une caractéristique qui pourrait être employée dans la sélection des variétés ayant une forte teneur en phytostérols plus principalement en β -Sitostérol, Campestérol, stigmastérol et Δ^7 Stigmasténol.

IV. Composition en polyphénols de l'huile extraite des graines de carthame

La fraction des polyphénols est l'un des constituants conférant à l'huile de carthame une particularité tant recherchée sur le plan nutritionnel et pharmaceutique. Différentes études montrent la richesse d'huile de cette espèce en ces composés. Toutefois, des variations d'expression de cette particularité et imposées par la variabilité génétique et les conditions de sa culture, ont été évoquées.

En effet, durant les trois campagnes de conduite de la culture du carthame, des effets très significatifs de la nature du génotype et de l'alimentation hydrique ont été enregistrés sur la teneur de l'huile extraite des graines en polyphénols (Tableau 21). Cependant, la répartition des doses de nutrition hydrique le long du cycle végétatif de la plante détient un effet sur le métabolisme de ces composés et leur accumulation dans l'huile. Des différences de teneurs en polyphénols de l'huile ont été révélées parmi les trois campagnes d'expérimentation et parmi les génotypes testés et qui seront exposées distinctement.

Tableau.21. Analyse de variance des polyphénols totaux de l'huile des graines de trois génotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015, 2016, 2017).

| Source de variation | Année | df | Polyphénols |
|------------------------------|-------|----|-------------|
| Génotype | 2015 | 2 | 58.74*** |
| | 2016 | 2 | 12.93** |
| | 2017 | 2 | 95.12*** |
| Régime hydrique | 2015 | 1 | 124.35*** |
| | 2016 | 1 | 6.6* |
| | 2017 | 1 | 2.54ns |
| Génotype* Régime hydrique | 2015 | 2 | 27.76*** |
| | 2016 | 2 | 1.45ns |
| | 2017 | 2 | 4.78* |

* significatif à $p < 0.05$; ** significatif à $p < 0.01$; *** significatif à $p < 0.001$; ns (not significatif à $p > 0.05$).

1. Première année de conduite de l'essai (2015)

D'après les résultats (Tableau 22), les teneurs en composés polyphénoliques sont de l'ordre de 140.86, 199.48 et 168.14 (mgEAG/kg d'huile) enregistrées respectivement par les génotypes Halab, Gila et Touggourt au niveau du traitement sec. Alors que, ces teneurs sont de l'ordre de 171.39, 250.37 et 315.50 (mgEAG/kg d'huile) suite à l'apport d'irrigation.

2. Deuxième année de conduite de l'essai (2016)

Au cours de cette année, les génotypes étudiés ont révélé des valeurs moyennes de l'ordre de 196.5mgEAG/kg d'huile et 212.1mgEAG/kg d'huile au niveau du traitement sec et irrigué respectivement. Par conséquent, l'apport d'irrigation a grandement augmenté le taux de polyphénols de l'huile de graines de carthame. Ainsi, durant cette année, le génotype Gila se distingue par les valeurs de polyphénols les plus élevées en inscrivant des taux de l'ordre de 210.89mgEAG/kg d'huile en bloc sec et 241 mgEAG/kg d'huile au niveau du bloc irrigué.

3. Troisième année de conduite de l'essai (2017)

La teneur en polyphénols enregistrée au cours de cette année 2017 s'avère la plus élevée comparativement à la première et la deuxième année de conduite. En effet, les génotypes cultivés en sec ont extériorisé des teneurs respectives de 412.76, 289.19 et 305.76 mgEAG/kg d'huile pour Halab, Gila et Touggourt. Tandis que, les valeurs relevées en bloc irrigué sont de l'ordre de 465, 266.40, 323.37 mgEAG/kg d'huile respectivement enregistrées pour Halab, Gila et Touggourt.

Tableau.22. Polyphénols totaux (mgEAG / kg d'huile) de l'huile de trois géotypes de carthame durant trois années de culture (2015, 2016, 2017).

| Année | Régime hydrique | Géotype | Polyphénols (mgEAG / kg d'huile) | |
|-----------|-----------------|----------------|----------------------------------|-------------------|
| 2015 | Pluvial | Halab | 140.86±6.9a | |
| | | Gila | 199.48±2.9c | |
| | | Touggourt | 168.13±7.1b | |
| | | | Moyenne | 169.5±8.9 |
| | Irrigué | Halab | 171.34±9.4a | |
| | | Gila | 250.37±4.3b | |
| Touggourt | | 315.50±14.4c | | |
| | | Moyenne | 245.75±21.5 | |
| 2016 | Pluvial | Halab | 186.04±4.0a | |
| | | Gila | 210.89±0.4b | |
| | | Touggourt | 192.56±4.2a | |
| | | | Moyenne | 196.5±4.1 |
| | Irrigué | Halab | 195.81±6.7a | |
| | | Gila | 241.00±15.9b | |
| Touggourt | | 199.48±1.1a | | |
| | | Moyenne | 212.1±8.8 | |
| 2017 | Pluvial | Halab | 412.76±1.3b | |
| | | Gila | 289.19±8.1a | |
| | | Touggourt | 305.76±17.9a | |
| | | | Moyenne | 335.9±20.2 |
| | Irrigué | Halab | 465.84±20.9c | |
| | | Gila | 266.40±4.2a | |
| Touggourt | | 323.37±7.8b | | |
| | | Moyenne | 351.9±30.4 | |

V. Activité antioxydante et anti-âge de l'huile extraite

Comme a été illustré précédemment, l'huile du carthame se distingue par sa richesse en polyphénols. Cette particularité lui confère une activité antioxydante prévenant les effets oxydatifs générés les espèces réactives d'oxygène.

L'activité antioxydante de l'huile extraite des graines récoltées durant les trois campagnes (2015, 2016, 2017), s'annonce significativement variable en fonction de la nature du géotype, du régime hydrique et de leur interaction (Tableau 23). On constate ainsi, que l'amélioration de l'alimentation hydrique des plantes contribue à l'augmentation de cette activité à l'échelle de l'huile extraite.

Tableau.23. Analyse de variance de l'activité antioxydante de l'huile des graines de trois géotypes de carthame cultivés en trois années consécutives (2015, 2016, 2017).

| Source de variation | Année | df | Activité antioxydante |
|-----------------------------|-------|----|-----------------------|
| Géotype | 2015 | 2 | 126.76*** |
| | 2016 | 2 | 111.24*** |
| | 2017 | 2 | 357.36*** |
| Régime hydrique | 2015 | 1 | 678.79*** |
| | 2016 | 1 | 40.35*** |
| | 2017 | 1 | 14.05** |
| Géotype* Régime hydrique | 2015 | 2 | 69.63*** |
| | 2016 | 2 | 15.80*** |
| | 2017 | 2 | 25.10*** |

** significatif à $p < 0.01$; *** significatif à $p < 0.001$

Selon les résultats obtenus (Tableau 24), une caractéristique anti-âge évaluée selon deux activités, anti-collagénase et anti-élastase distingue l'huile de carthame extraite. Ces activités ont été évaluées au niveau de l'huile obtenue des graines conduites sous les conditions pluviales. Un effet hautement significatif imposé par les variations de la nature du géotype, sur ce paramètre a été constaté durant les trois campagnes d'expérimentation (Tableau 24).

Tableau.24. Analyse de variance de l'activité anti-collagénase et l'activité anti-élastase de l'huile de trois géotypes de carthame durant trois années de culture (2015, 2016, 2017) en zone semi-aride.

| Source de variation | df | Activité anti-collagénase | Activité anti-élastase |
|---------------------|----|---------------------------|------------------------|
| Géotype | 2 | 33.84 *** | 86.21 *** |
| Année | 2 | 79.6 *** | 102.3 *** |
| Géotype*Année | 4 | 124.2 *** | 187.9 *** |

*** significatif à $p < 0.001$

1. Première année de conduite de l'essai (2015)

Concernant l'activité antioxydante, les résultats moyens génotypiques (Tableau 25) exprimés en pourcentage du rapport d'inhibition RI (%) sont de l'ordre de 26.15 et 39.25% relevés respectivement dans l'huile issue des traitements, pluvial et irrigué. Ainsi, l'amélioration de la nutrition hydrique des plantes favorise la production d'huile à activité antioxydante plus élevée. En conditions pluviales, cette activité s'annonce plus élevée dans l'huile du géotype Gila avec 33.07%, contrairement au géotype Halab où on a relevé une valeur de 20.65%.

L'irrigation complémentaire, a provoqué une amélioration de cette activité dans l'huile pour enregistrer des valeurs extrêmes de 33.5% (Halab) et 45.22% (Touggourt).

Les résultats de l'activité anti-âge s'avèrent élevés comparativement au témoin. L'activité anti-collagénase moyenne exprimée dans l'huile des trois génotypes est de l'ordre de 62.5% et celle de l'anti-élastase atteint une valeur de 63.6%. Parmi les génotypes, Halab se distingue par les valeurs les plus élevées relevées des deux activités avec 65.2% et 66.7% concernant dans l'ordre l'anti-collagénase et l'anti-élastase. Les valeurs des deux activités s'annoncent plus faible chez le génotype Gila avec 59.1% (activité anti-collagénase) et 59.8% (activité anti-élastase)

2. Deuxième année de conduite de l'essai (2016)

Au cours de cette année, la pratique d'irrigation a amélioré l'élaboration et l'expression de l'activité antioxydante mesurée et ce pour l'ensemble des génotypes testés (Tableau 25). En effet, les valeurs de moyennes génotypiques sont de l'ordre de 33.13% et 36.06% enregistrées respectivement au niveau des traitements, sec et irrigué. Parmi la variabilité conduite, l'huile du génotype Gila se distingue par l'activité antioxydante la plus élevée en inscrivant des valeurs de 38.79% et 39.53% en sec et irrigué respectivement. Alors que, l'huile des graines du génotype Halab a extériorisé une activité antioxydante plus faible dans l'ordre de 27.59% en conditions pluviales et 34.15% suite à l'apport d'irrigation.

Les huiles des graines de génotypes cultivés ont manifesté une activité anti-âge proche de celle du témoin (Tableau 26). Les valeurs moyennes génotypiques de cette activité sont de l'ordre de 66.2% et 41.2% respectivement pour l'activité anti-collagénase et l'activité anti-élastase respectivement.

3. Troisième année de conduite de l'essai (2017)

L'activité antioxydante estimée en 2017 s'est montrée la plus élevée par rapport aux deux autres campagnes 2015 et 2016 (Tableau 25). En effet, les valeurs moyennes génotypiques de cette activité sont de l'ordre 49.5% en sec et 54.5% en régime irrigué. On constate que pour cette activité antioxydante, l'huile extraite du génotype Gila se distingue par les taux les plus élevés au niveau des deux traitements, sec (68.94%) et irrigué (84.53%).

Les résultats obtenus (Tableau 26) ont montré que les valeurs de l'activité anti-élastase se sont révélées importantes en 2017 comparativement aux deux autres années 2015 et 2016. Par contre, l'activité anti-collagénase a enregistré des valeurs moins faibles et ce pour l'ensemble des génotypes étudiés (Tableau 26). Concernant l'activité anti-collagénase, l'huile étudiée a montré des valeurs d'inhibition de l'ordre de 47%, 52.8% et 49.9% enregistrées respectivement pour Halab, Gila et Touggourt. L'estimation du taux d'inhibition de l'activité

de l'élastase ont divulgué des valeurs respectives de 70.3%, 63.2% et 67.2 pour Halab, Gila et Touggourt

Tableau.25. L'activité antioxydante (%) de l'huile de trois géotypes de carthame durant trois années de culture (2015, 2016, 2017).

| Année | Régime hydrique | Géotype | Activité antioxydante (%) |
|-------|-----------------|----------------|---------------------------|
| 2015 | Pluvial | Halab | 20.65±0.6a |
| | | Gila | 33.07±1.0c |
| | | Touggourt | 24.72±0.6b |
| | | Moyenne | 26.15±1.9 |
| | Irrigué | Halab | 33.5±0.3a |
| | | Gila | 39.04±0.6b |
| | | Touggourt | 45.22±0.3c |
| | | Moyenne | 39.25±1.7 |
| 2016 | Pluvial | Halab | 27.59±0.6a |
| | | Gila | 38.79±0.0c |
| | | Touggourt | 33.00±0.8b |
| | | Moyenne | 33.13±1.6 |
| | Irrigué | Halab | 34.15±0.2a |
| | | Gila | 39.53±0.8b |
| | | Touggourt | 34.48±0.5a |
| | | Moyenne | 36.06±0.9 |
| 2017 | Pluvial | Halab | 68.94±0.4b |
| | | Gila | 38.95±1.3a |
| | | Touggourt | 40.53±0.7a |
| | | Moyenne | 49.5±4.9 |
| | Irrigué | Halab | 84.53±1.8c |
| | | Gila | 31.56±0.9a |
| | | Touggourt | 47.35±3.1b |
| | | Moyenne | 54.5±7.9 |

Tableau.26. L'activité Anti-collagénase et l'activité Anti-élastase de l'huile de trois génotypes de carthame durant trois années de culture (2015, 2016, 2017) en zone semi-aride.

| Année | Génotype | Activité Anti-collagénase | | Activité Anti-élastase | |
|-------|----------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| | | CI ₅₀ (µg/ml) | Inhibition (%) à 500 µg/ml | CI ₅₀ (µg/mL) | Inhibition (%) à 1000 µg/ml |
| 2015 | Témoin | 38.7±0.2b | 83.1±0.2a | 32.3±0.2c | 75.8±0.1a |
| | Halab | 135.9±0.3a | 65.2±0.1b | 202.8±0.4a | 66.7±0.4b |
| | Gila | 132.7±0.2a | 59.1±0.2c | 180.7±0.1b | 59.8±0.3c |
| | Touggourt | 133.8±0.4a | 63.2±0.3b | 198.4±0.2a | 64.2±0.5b |
| | Moyenne | 134.1±0.9 | 62.5±1.8 | 194±6.7 | 63.6±2.0 |
| 2016 | Halab | 130.1±0.2a | 72.1±0.6b | 178.6±0.9a | 42.4±0.4b |
| | Gila | 124.6±0.2b | 61.6±0.3c | 163.7±0.8c | 49.1±0.01b |
| | Touggourt | 123.4±0.2b | 64.9±0.4c | 171.4±0.9b | 32.2±0.2b |
| | Moyenne | 126.03±2.1 | 66.2±3.1 | 171.2±4.3 | 41.2±4.9 |
| 2017 | Halab | 144.5±0.2a | 47.0±0.4b | 298.1±1.2a | 70.3±0.6ab |
| | Gila | 134.7±0.2b | 52.8±0.3b | 254.3±0.9a | 63.2±0.4b |
| | Touggourt | 136.1±0.2b | 49.9±0.8b | 274.6±1.1a | 67.2±0.8b |
| | Moyenne | 138.4±3.1 | 49.9±1.7 | 275.7±12.6 | 66.9±2.0 |

Discussion

Les résultats de la teneur en polyphénols et leur activité antioxydant de l'huile des graines de carthame s'annonce variable en fonction de la variabilité génétique et les conditions environnementales. Au cours des années de conduites, les valeurs des polyphénols varient de 140.9 à 465.84mgEAG/kg d'huile (Tableau 22). Ces résultats se concordent avec ceux trouvés par Taha et Matthäus et *al.* (2018) et Ben Moumen et *al.* (2014). Ainsi que, une activité antioxydante élevée a été révélée chez les accessions étudiées, qui était d'environ 20.6% à 84.53% (Tableau 25). De nombreuses études ultérieures ont décrit cette activité chez cette espèce oléagineuse (Sung et *al.*, 2016a; Xuan et *al.*, 2018).

La voie de biosynthèse des phénylpropanoïdes est responsable de la synthèse des composés phénoliques (Kallscheuer et *al.*, 2017). Cependant, la stimulation de la biosynthèse de ces composés est principalement due à la régulation de nombreux gènes codant pour les principales enzymes de la voie phénylpropanoïde en fonction des conditions environnementales (Oh et *al.*, 2009), comme la sécheresse (Gharibi et *al.*, 2019) et la température élevée (Wang et *al.*, 2019). L'effet du génotype sur les composés phénoliques a déjà été prouvé par Gündüz et Özdemir (2014).

La variabilité génotypique et les facteurs climatiques (température, précipitation) (Tableau 9), ont des effets significatifs sur les paramètres étudiés. Roche et *al.* (2019) ont rapporté l'effet des conditions climatiques sur les compositions chimiques des graines de carthame. En 2017,

une température élevée et une faible précipitation sont enregistrées durant les stades de développement de plante de carthame notamment au cours des dernières phases de croissance. C'est au cours de cette même année (2017), que les valeurs de TPC sont les plus élevées (Tableau 22). Résultats confirmés par Gucci *et al.* (2019) sur l'huile d'olive, le blé dur (De Leonardis *et al.*, 2015) et le sésame (Jannat *et al.*, 2010).

Les résultats ont aussi indiqué l'effet des facteurs environnementaux sur l'activité antioxydante. De ce fait, l'augmentation des températures a fait accroître cette activité pour l'ensemble des génotypes. Résultats approuvés par Jannat *et al.* (2010). Ainsi que, Taha et Matthäus (2018) ont montré une augmentation significative de l'activité antioxydante des graines de carthame par le processus de torréfaction.

Le contenu phénolique total dans les graines oléagineuses est très important pour la stabilité à l'oxydation des acides gras polyinsaturés des huiles et indique une activité antioxydante (Rice-Evans *et al.*, 1997; Ali *et al.*, 2010; Ali *et al.*, 2013). En effet, ces composés sont de puissants antioxydants, capables de piéger les espèces réactives de l'oxygène, réduisant ainsi le risque de dommages oxydatifs. L'activité antioxydante de la plante est principalement attribuée à la présence de composés phénoliques (Heim *et al.*, 2002). Le déficit hydrique est un stress abiotique qui induit un dommage oxydatif par la formation d'espèces réactives de l'oxygène (Mittler, 2002). Certaines enzymes importantes impliquées dans l'élimination de ces espèces ROS qui sont la catalase, le polyphénol oxydase et l'ascorbate peroxydase (Ashraf, 2009). En conséquence, l'activité antioxydante a un rôle crucial dans le maintien de l'équilibre entre la production et l'élimination des radicaux libres (Lin *et al.*, 2006).

Selon les résultats obtenus et au cours de la même année d'expérimentation on a constaté que la teneur totale en polyphénols ainsi que leur activité antioxydante conjuguée sont augmentées suite à la pratique d'irrigation. Ces résultats sont mentionnés chez nombreuses espèces comme l'huile d'olive (Greven *et al.*, 2009 ; Palese *et al.*, 2010), Canola (Dawood et Sadak, 2014), l'arachide (Aninbon *et al.*, 2016) et le maïs (Ali *et al.*, 2010). Cela pourrait résulter de la déclinaison de l'activité de la phénylalanine-lyase (PAL) qui est une enzyme régulatrice clé dans la voie de biosynthèse des composés phénoliques (Tovar *et al.*, 2002). Ainsi, une augmentation des composés phénoliques peut conduire à améliorer le rendement en graines en réduisant les effets nocifs des espèces réactives de l'oxygène (Yeloojeh *et al.*, 2020).

La diminution de l'activité antioxydante due à la sécheresse est en accord avec Ali *et al.* (2013), qui ont signalé que l'activité de piégeage des radicaux 1,1-diphényl-2-picrylhydrazyle (DPPH), ont considérablement diminué dans le maïs en raison de cette contrainte climatique.

Bouchereau et *al.* (1996) ont rapporté que cette diminution du contenu phénolique s'explique par l'effet d'un déficit hydrique sévère notamment aux premiers stades du développement et de la floraison du colza qui réduit fortement l'accumulation de ces composés.

Cette étude ont ainsi montré une corrélation positive entre la teneur en composés phénoliques de l'huile de graines de carthame et l'activité antioxydante (figure 10a; annexe). Ce qui suggère que cette augmentation de l'activité antioxydante de l'huile est due à la présence d'une grande quantité de composés phénoliques (Ali et *al.*, 2013 ; Kim et *al.*, 2003).

Une grande importance a été accordée à l'activité anti-inflammatoire dans les utilisations pharmaceutiques et cosmétiques. Cependant, l'évaluation des effets des conditions environnementales sur l'activité anti-âge de l'huile végétale des oléagineux est rare. Au cours des années d'étude, les résultats ont prouvé que l'huile de carthame a une activité anti-collagénase importante qui varie de 47 à 72.1% d'inhibition à 500µg/ml, une valeur correspond à IC50 144.5 et 130.1µg/ml respectivement, des valeurs enregistrées par le génotype Halab. Alors que, l'activité anti-élastase s'est révélée importante dont la valeur minimale est de 32.2% d'inhibition à 1000µg/ml pour Touggourt et une autre maximale (70.3% d'inhibition à 1000 µg/ml), inscrite par Halab. Dans les huiles essentielles extraites de certaines herbes médicinales et plantes alimentaires, Aumeeruddy-Elalfi et *al.* (2018) ont démontré que leurs activités anti-collagénase et anti-élastase minimales étaient respectivement de 52.2% d'inhibition à 400 µg/ml et de 32.23% d'inhibition à 800mg/ml.

De plus, cette étude a montré que l'activité anti-élastase a augmenté de manière significative avec l'élévation de la température moyenne enregistrée en 2017 (Tableau 26). En revanche, l'activité anti-collagénase a connu une tendance inverse. Cependant, l'activité anti-collagénase est restée supérieure à 47% d'inhibition à 500µg/ml quelle que soit la température du milieu.

Effet de la variation environnementale et de la nature de génotype sur la teneur en protéine de tourteau du carthame

Les cultures oléagineuses se caractérisent non seulement par la haute qualité et la quantité de l'huile extraite de leurs graines mais également par un autre débouché ayant des caractéristiques nutritionnelles attractives pour l'alimentation de bétails. Cette spécificité est leur conférée vue que les tourteaux des graines oléagineuses sont considérés comme une source importante de protéine et des éléments nutritionnels.

La teneur en protéine du tourteau des graines de carthame reste tributaire des génotypes testés. En effet, la variabilité génotypique a imposé un effet hautement significatif sur l'expression de paramètre mesuré (Tableau 27). Ainsi, l'influence du régime hydrique est très significative sur l'accumulation de protéine du tourteau ($P < 0.001$). Les résultats ont montré que l'interaction de la nature des génotypes avec les variations du régime hydrique extériorise des variations hautement significatives de la teneur en protéine du tourteau (Tableau 27). En conséquence, les génotypes testés expriment des réponses divergentes en réaction aux variations des régimes hydriques pratiqués.

Tableau.27. Analyse de variance de la teneur en protéine du tourteau des graines de carthame cultivées en trois années consécutives (2015, 2016, 2017) à Tiaret.

| Source de variation | Année | df | Teneur en protéine (%) |
|------------------------------|--------------|-----------|-------------------------------|
| Génotype | 2015 | 2 | 60.96*** |
| | 2016 | 2 | 18.75*** |
| | 2017 | 2 | 13.39*** |
| Régime hydrique | 2015 | 1 | 4.24ns |
| | 2016 | 1 | 8.31*** |
| | 2017 | 1 | 20.51*** |
| Génotype* Régime hydrique | 2015 | 2 | 11.56** |
| | 2016 | 2 | 5.56*** |
| | 2017 | 2 | 18.95** |

** significatif à $p < 0.01$; *** significatif à $p < 0.001$; ns (not significatif à $p > 0.05$).

1. Première année de conduite de l'essai (2015)

Les résultats obtenus indiquent que le tourteau de graines de carthame est une source importante de protéine avec des valeurs moyennes qui dépassent dans la plupart des cas les 20%.

Au niveau du bloc maintenu en régime pluvial, le géotype Gila révèle un taux de protéine élevée en inscrivant un taux de 28.5% par rapport aux géotypes Halab et Touggourt qui montrent des valeurs respectives de 26.4 et 20.6% (Tableau 28).

L'irrigation apportée a augmenté cette fraction protéique de tourteau pour Gila et Touggourt dont les valeurs sont de l'ordre de 31.2 et 24%. Alors que, le géotype Syrien a révélé une diminution de taux de protéine en bloc irrigué en enregistrant une valeur de 23.7%.

2. Deuxième année de conduite de l'essai (2016)

Au cours de cette année de culture les géotypes conduits ont extériorisé une faible variation de taux de protéine du tourteau. Ainsi, les valeurs de cette caractéristique sont de l'ordre de 29.74, 29.07 et 24.6 respectivement relevées par Halab, Gila et Touggourt. Tandis que, suite à l'alimentation complémentaire, le taux de protéine inscrit est de l'ordre de 27.2, 26.5 et 25.5 pour Halab, Gila et Touggourt. Selon ces résultats, le géotype Touggourt montre une stabilité de variation plus au moins grande par rapport aux autres géotypes.

3. Troisième année de conduite de l'essai (2017)

L'absence d'une irrigation appliquée impose une augmentation importante de taux de protéine jusqu'à atteindre une valeur moyenne estimée à 24.53% par rapport à un taux moyen estimé à 21.63 au lot irrigué. Les résultats moyens (Tableau 28), montrent qu'au niveau du bloc soumis au régime pluvial la valeur moyenne de taux de protéine est comprise entre 20% (Halab) et 28.7% (Touggourt). Alors que, les graines des géotypes conduits au régime irrigué ont montré des teneurs moyennes de 22, 21.7 et 21.2% extériorisées respectivement par Halab, Gila et Touggourt.

Tableau.28. Teneur en protéine (%) de tourteau de trois géotypes de carthame durant trois années de culture (2015, 2016, 2017) et sous deux régimes hydriques (sec, irrigué).

| Année | Régime hydrique | Géotype | Teneur en protéine (%) |
|-------|-----------------|----------------|------------------------|
| 2015 | Pluvial | Halab | 26.38±0.7a |
| | | Gila | 28.45±0.2b |
| | | Touggourt | 20.61±0.0c |
| | | Moyenne | 25.15±2.3 |
| | Irrigué | Halab | 23.71±0.9a |
| | | Gila | 31.25±1.2b |
| | | Touggourt | 23.98±0.25a |
| | | Moyenne | 26.31±2.5 |
| 2016 | Pluvial | Halab | 29.74±0.3a |
| | | Gila | 29.07±0.9a |
| | | Touggourt | 24.6±0.6b |
| | | Moyenne | 27.8±1.6 |
| | Irrigué | Halab | 27.2±0.6a |
| | | Gila | 26.5±0.6a |
| | | Touggourt | 25.5±0.3a |
| | | Moyenne | 26.4±0.5 |
| 2017 | Pluvial | Halab | 19.97±1.1a |
| | | Gila | 24.91±0.5b |
| | | Touggourt | 28.7±1.1c |
| | | Moyenne | 24.52±2.5 |
| | Irrigué | Halab | 22.02±0.1a |
| | | Gila | 21.74±0.8a |
| | | Touggourt | 21.25±0.5a |
| | | Moyenne | 21.67±2.0 |

Discussion

Les protéines de graines oléagineuses peuvent être incorporées dans les aliments pour leur conférer une valeur nutritive et des propriétés fonctionnelles d'excellence. Les résultats apportés ont indiqué des valeurs de protéine qui sont comprises entre 20% à 31.2% (Tableau 28). Ces résultats obtenus sont confirmés par des travaux précédents où ils indiquent la richesse de cette espèce en protéine. En effet, selon Emongor et Oagile (2017), le tourteau de carthame contient environ 24% de protéines et de fibres. Paredes-Lopez et Ordorica-Falomir (1986) ont révélé une teneur moyenne en protéines de 14.6%. Ainsi, le décorticage et dégraissage partiel des graines de carthame a permis de produire un tourteau contenant 46.8% de protéines (Paredes-Lopez et Ordorica-Falomir, 1986). Dauguet et al. (2016) ont apporté que le décorticage des graines de tournesol, précédant la trituration, améliore la teneur en

protéines dans le tourteau jusqu'à 36%, alors qu'un tourteau obtenu sans décorticage contient 27-29% de protéines. Le soja, le colza, le coton, le tournesol et l'arachide sont parmi les espèces oléagineuses les plus riches en protéines de tourteaux qui représentent 69%, 12.4%, 6.9%, 5.3% et 2.8% de la production mondiale de tourteaux protéiques (Ash et Dohlman, 2006). Selon cette littérature et à travers de notre étude, il a été démontré que le carthame se distingue par sa grande richesse en protéine du tourteau des graines.

Selon les résultats (Tableau 28), les paramètres environnementaux conditionnent la teneur protéine du tourteau du carthame. Les valeurs de cette caractéristique s'annoncent faible en 2017. En effet, la haute température est considérée comme un facteur abiotique ayant des effets directs sur l'accumulation finale de protéine des graines des espèces végétales. De nombreuses études ont confirmé que l'augmentation de température a comme conséquence un raccourcissement du cycle de développement des plantes et la durée de remplissage des graines (Hatfield et Prueger, 2015 ; Barlow et *al.*, 2015). En conséquence, l'accumulation de l'azote de graines à des températures élevées est limitée à raison d'une durée de remplissage des graines plus courte et d'un taux réduit d'accumulation de matière sèche (Larmure et Munier-Jolain, 2019). Étant donné que le azote transféré aux grains est partiellement remobilisé des feuilles, une surface foliaire plus petite diminue la disponibilité de l'azote à remobiliser (Masclaux-Daubresse et *al.*, 2010 ; Akinçi et Lösel, 2012).

La cinétique de remplissage des graines est influencée par divers mécanismes métaboliques qui se produisent dans les feuilles, en particulier la production et la translocation de photoassimilats et des précurseurs pour la biosynthèse des réserves de graines, des minéraux et d'autres constituants fonctionnels. En résumant, le remplissage des graines est très conditionné par les conditions environnementales en raison de l'implication de divers enzymes et transporteurs, situés dans les feuilles et les graines (Kumer, 2018).

Cependant, et au niveau de chaque année, la pratique d'irrigation conduit à une diminution du taux de protéines des graines. La sécheresse peut remobiliser la composition en protéines et la structure des principaux composants des fibres alimentaires (Balla et *al.*, 2011 ; Esmailian et *al.*, 2012; Ghassemi-Golezani et Lotfi, 2013). Cette fraction protéique est augmentée sous stress hydrique (Stagnari et *al.*, 2016). Chez le blé, l'installation de la sécheresse s'accompagne d'une nette augmentation de la teneur en protéines (Stagnari et *al.*, 2016). Angra et *al.* (2010) ont rapporté une teneur en protéines solubles plus élevée chez des génotypes de soja conduits à un stress hydrique pendant la période de remplissage des grains. De plus, le cultivar le plus tolérant avait une teneur en protéines solubles plus élevée, suggérant un mécanisme de protection plus efficace (Angra et *al.*, 2010).

Résultats et discussion

Une augmentation des protéines dans des conditions de déficit hydrique a été signalée principalement en raison de taux plus élevés d'accumulation d'azote et de taux plus faibles d'accumulation de glucides (Guttieri et *al.*, 2005; Singh et *al.*, 2012)

Conclusion générale et perspectives

L'Algérie dispose de grandes capacités de disponibilité des différents facteurs qui lui confèreraient de détenir une production agricole développée et diversifiée. Néanmoins, l'accomplissement de certaines filières agricoles, malgré leur importance dans le schéma économique du pays, reste largement faible et parfois inexistant. Parmi ces spéculations, les cultures des espèces oléagineuses, s'annoncent les plus délaissées. Certes, la conduite de certaines espèces parmi ce groupe impose un entretien à travers la satisfaction des besoins nutritionnels, notamment hydrique, reste un objectif difficile à atteindre. La rareté des ressources hydriques du pays dans les aires semi-arides agricoles justifie ces difficultés. L'alternative de culture des espèces plus tolérantes à la sécheresse tel le carthame reste une stratégie compensatoire des déficits en production d'huile végétale que connaît le pays.

Le travail effectué dans le cadre de la présente thèse concerne les essais d'introduction et de comportement agronomique du carthame dans la région de Tiaret, représentative des zones semi-arides des hauts plateaux Algériens. Le travail a également concerné l'évaluation de la production d'huile des graines mûres et sa caractérisation physico-chimique. A cet effet, trois génotypes de carthame d'origines différentes ont été cultivées durant trois campagnes, sous deux régimes hydriques (pluvial et irrigué).

Les résultats obtenus de cette étude indique que les génotypes conduits ont inscrit des rendements en grains reflétant ceux inscrits dans d'autres sites de conduite de l'espèce. Cependant, les variations des régimes hydriques adoptés au cours de cette étude ont eu un impact assez important sur l'élaboration du rendement en grains. L'apport d'irrigation complémentaire a induit une augmentation significative de ce trait agronomique. Cependant cette action reste tributaire de la nature du génotype des paramètres climatiques ayant caractérisés chaque année d'expérimentation. On note dans ce contexte que les variations du rendement étaient plus conséquentes au cours des deux premières années d'expérimentation (2015, 2016). En se référant aux paramètres climatiques relevés durant les trois campagnes, il se démontre que les effets du bilan pluviométrique se trouvent toujours associés aux variations de la température, notamment extrêmes. Ceci se justifie par les rendements moyens génotypiques au niveau du traitement pluvial et irrigué respectivement, qui étaient de l'ordre de 28.5 et 41.7Qx/ha (2015), 20.6 et 39.5Qx/ha (2016), 6.9 et 10.51Qx/ha (2017). La formation du rendement en grains était également conditionnée par la nature du génotype, où

Conclusion générale

la population locale Touggourt s'est distinguée par une stabilité de son potentiel productif assez élevé par rapport aux deux autres.

Le rendement en huile des graines était variable selon les années de culture et parmi les géotypes testés. L'application d'irrigation complémentaire a été accompagnée d'une augmentation du rendement jugée modérée. Ce rendement a atteint une valeur minimale de 23% obtenue en conditions sèches durant la campagne 2017 et une autre maximale de 37% enregistrée en conditions irriguée en 2016. Ces rendements s'inscrivent dans les normes obtenus par les différentes conduites de cette espèce.

Les conditions climatiques de la zone d'étude étaient favorables pour l'obtention d'une huile de hautes qualités nutritionnelles. Ainsi, l'huile produite était très riche en acides gras insaturés. Les résultats ont prouvé qu'elle contenait en moyenne environ 90% de cette catégorie, constituée essentiellement par l'acide linoléique. Cette particularité se réserve à l'huile de carthame et qu'elle est accentuée par la sécheresse et les hautes températures qui augmentent la fraction de l'acide oléique. A l'opposé, la teneur de l'huile en acide gras saturés était faible et dont les teneurs étaient limitées à environ 9% et qui était constituée en majorité par les acides palmitique et stéarique.

Une autre particularité de l'huile produite se rapporte à sa richesse en polyphénols ayant contribué à une nette amélioration de ses activités antioxydantes et anti-âge. Cette particularité confère à l'huile de carthame cultivée sous ces conditions, une forte valeur médicinale et cosmétique. On a constaté également que l'huile produite était relativement riche en phytostérols, dont les teneurs augmentent avec l'augmentation de la température et la sécheresse ayant sévis durant la période de culture de l'espèce. Un intérêt doit être accordé à la culture du carthame et qui concerne la richesse des tourteaux de ses graines en protéines dont les utilisations sont diverses dans l'alimentation animale et humaine.

Enfin l'huile extraite se distingue également par des faibles indices d'oxydation et d'acidité contribuant ainsi à l'augmentation de sa durée de stockage.

La présente étude constitue certes une ébauche pour le développement futur de cette spéculacation dans l'agriculture aux niveaux des zones sèches, mais son aboutissement nécessite encore des travaux plus approfondis pour évaluer sa rentabilité. Les résultats obtenus au cours de notre étude pourraient être complétés par l'utilisation d'une approche de l'analyse des interactions géotype*milieu dans d'autres zones d'études notamment au centre et l'Est du

Conclusion générale

pays. En outre, une étude sous conditions contrôlées tout en observant l'effet de la variation de la température nocturne et diurne serait recommandée. D'autres facteurs comme l'effet de la pratique agricole méritent d'être étudiés. Enfin, un objectif d'évaluation de l'effet de l'installation de culture de carthame sur l'aspect physique, chimique et biologique du sol et de caractérisation approfondie de tourteau des graines pourraient être tenu en considération.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abou-Dahab M.A., Habib A.M. et Saleh S.M.** 2014. Effect of sowing dates, organic and chemical fertilization on growth, flowering and the chemical composition of *Carthamus tinctorius* L. Plants. *Journal of Horticultural Science Ornamental Plants*, 6 (2): 71-81.
- Achaya K.** 1993. Ghani, the Indian oilpress: An ancient technology. *Current Science-Bangalore*, 64, 693.
- Ada R.** 2014. Dimension, geometric, agricultural and quality characteristics of safflower seeds. *Turkish Journal of Field Crops*, 19(1):7-12.
- Adrian J., Potus J., Poiffat A. et Dauvillier P.** 1998. Introduction à l'analyse nutritionnelle des denrées alimentaires, p38.
- Ahmadi, M.R. et Omid, A.H.,** 1997. Study and determination of natural outcrossing in winter safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Sesame safflower newslet*, 12:94-97.
- Aiken R. et Lamm F.** 2006. Irrigation of oilseed crops. *Proc Central Plains Irrigation Conference, CPIA*, pp. 162-172.
- Akinci S. et Lösel D.M.** 2012. Plant water-stress response mechanisms. In *Environmental Sciences-Water Stress*; Rahman, I.M.M., Hasegawa, H., Eds.; InTech: Rijeka, Croatia, 15-42.
- Akkaya M.R., Çila A., Çil A.N., Yücel H. et Kola O.** 2018. The influence of sowing dates on the oil content and fatty acid composition of standard, mid-oleic and high-oleic types of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Food Sci. Technol*, 6P.
- Alagawany, M., Farag, M.R. Abd El-Hack, M.E. et Dhama K.** 2015. The practical application of sunflower meal in poultry nutrition. *Advances in animal and veterinary sciences*, 3(12):634-648.
- Ali Q., Ashraf M. et Anwar F.** 2009. Physico-chemical attributes of seed oil from drought stressed sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. *GRASAS Y ACEITES*, 60 (5): 475-481.
- Ali Q., Ashraf M. et Anwar F.** 2010. Seed composition and seed oil antioxidant activity of maize under water stress. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 87:1179-1187.
- Ali Q., Anwar F., Ashraf M., Saari N. et Perveen R.** 2013. Ameliorating effects of exogenously applied proline on seed composition, seed oil quality and oil antioxidant activity of maize (*Zea mays* L.) under drought stress. *Int. J. Mol. Sci.* 14: 818-835.
- Alignan M., Roche J., Bouniols A., Cerny M., Mouloungui Z. et Merah O.** 2009. Effects of genotype and sowing date on phytostanole phytosterol content and agronomic traits in wheat under organic agriculture. *Food Chem.* 117 (2): 219-225.
- Alizadeh K. et Carapetian J.** 2006. Genetic variation in a safflower germplasm grown in rainfed cold Drylands. *Journal of agronomy* 5(1):50-52.
- Alpaslan M. et Gunduz H.** 2000. The effects of growing conditions on oil content, fatty acid composition and tocopherol content of some sunflower varieties produced in Turkey. *Nahrung-Food*, 44: 434-7.

Références bibliographiques

- Al Surmi N., El Dengawy R. et Khalifa A.** 2016. Chemical and nutritional aspects of some safflower seed varieties. *J Food Process Technol.* 7(5): 1-5.
- Al Surmi N., El Dengawi R., Khalefa A. et Yahia N.** 2015. Characteristics and oxidative stability of some safflower (*Carthamus Tinctorius* L.). *Journal of Nutritional and Food Sciences*, 14, 2.
- Amawi H., Ashby C., Samuel T., Peraman R., Tiwari A.** 2017. Polyphenolic Nutrients in Cancer Chemoprevention and Metastasis: Role of the Epithelial-to-Mesenchymal (EMT) Pathway. *Nutrients*, 9(8): 911.
- Amini H., Arzani A. et Karami M.** 2014. Effect of water deficiency on seed quality and physiological traits of different safflower genotypes. *Turk. J. Biol.* 38:271-282.
- Angelova V., Akova V. et Ivanov K.** 2014. The effect of organic amendments on the chemical composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) meal. *J Int Sci Publ: Ecol Saf.* 8: 441-453.
- Angra S., Kaur S., Singh K., Pathania D., Kaur N., Sharma S. et Nayyar H.** 2010. Water-deficit stress during seed filling in contrasting soybean genotypes: Association of stress sensitivity with profiles of osmolytes and antioxidants. *Int. J. Agric. Res.* 5: 328-345.
- Anjanasree K.N., Hanh T.M.N., Rajesh K., Lam-Son P.T., Satish K.G., Truyen N.Q., Donovan L.A., W. David N. and Henry T.N.** 2010. Molecular characterization and functional analysis of Glycine max sterol methyl transferase 2genes involved in plant membrane sterol biosynthesis. *Plant Molecular Biology*, 74(4-5): 503–518.
- Anjani K. et Yadav P.** 2017. High yielding-high oleic non-genetically modified Indian safflower cultivars. *Industrial Crops Products*, 104: 7-12.
- Anwar F., Zafar S.N. et Rashid U.** 2006. Characterization of *Moringa oleifera* seed oil from drought and irrigated regions of Punjab, Pakistan. *Grasas Aceites*, 57: 160-168.
- Aripionnammal S.** 2012. A novel method of using refractive index as a tool for finding the adulteration of oils. *Research Journal of Recent Sciences.* 1(7): 77-79.
- Arshad A., Qamar H., Siti-Sundari R., Yue Z., Zubair M., Ali Raza M., Habib-ur-Rehman M. and Zhang L.** 2020. Phenotypic plasticity of spineless safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars in response to exogenous application of salicylic acid under rainfed climate conditions. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 33(4): 729-743.
- Arslan B.** 2007. The determination of oil content and fatty acid compositions of dosmetic and exotic safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes and their interactions. *J agro.* 3:415–420.
- Arslan B. et Culpan E.** 2018. Identification of suitable safflower genotypes for the development of new cultivars with high seed yield, oil content and oil quality. *Azarian J. Agric.* 5 (5): 133-141.
- Asami T. et Yoshida S.** 1999. Brassinosteroid biosynthesis inhibitors. *Trends in Plant Science*, 4(9): 348-353.

Références bibliographiques

- Asgarpanah J. et Kazemivash N.** 2013. Phytochemistry, pharmacology and medicinal properties of *carthamus tinctorius* L. *Chin. J. Integr. Med.* 19 (2):153-159.
- Asgary S., Rahimi P., Madani H., Mahzoni P. et Kabiri N.** 2010. Effects of hydroalcoholic extract of *Carthamus tinctorius* on activity of hepatic transaminases in alloxan-induced diabetic rats. *J Shahrekord Univ Med Sci.* 12(1): 46-52.
- Ash M. et Dohlman E.** 2006. Oil crops situation and outlook yearbook. Electronic outlook report from the economic research service. United States Department of Agriculture.
- Ashraf M.** 2009. Biotechnological approach of improving plant salt tolerance using antioxidants as markers. *Biotechnology Advances*, 27: 84-93.
- Ashrafi E. et Razmjoo K.** 2010. Effect of irrigation regimes on oil content and composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 87 (5):499-506.
- Ashri A. et Knowles P.F.** 1960. Cytogenetics of safflower (*Carthamus* L.) species and their hybrids. *Agronomy Journal*, 52: 11-17.
- Ashri A.** 1975 . Evaluation of germplasm collection of safflower, *Carthamus tinctorius* L. V. Distribution and regional divergence for morphological characters. *Euphytica*, 24: 651- 659.
- Atabani A.E., Silitonga A.S., Badruddin I.A. et al.** 2012. A comprehensive review on biodiesel production as an alternative energy resource and its characteristics. *Renew Sustain Energy Rev.* 16: 2070-2093.
- Aumeeruddy-Elalfi Z., Lall N., Fibrich B., Blom Van Staden A., Hosenally M. et Mahomoodally M.F.** 2018. Selected essential oils inhibit key physiological enzymes and possess intracellular and extracellular antimelanogenic properties in vitro. *J. Food Drug Anal.* 26: 232-243.
- Ayas N. et Yilmaz O.** 2014. A shrinking core model and empirical kinetic approaches in supercritical CO₂ extraction of safflower seed oil. *The Journal of Supercritical Fluids*, 94: 81-90.
- Ayerdi Gotor A., Berger M., Labalette F., Centis S., Daydé J. et Calmon A.** 2006. Étude de la variation des teneurs et compositions des composés mineurs dans l'huile de tournesol au cours du développement du capitule : Partie I-Tocophérols. *OCL.* 13: 206-212.
- Ayerdi-Gotor A., Berger M., Labalette F. et al.** 2008. Variabilité des teneurs et compositions des composés mineurs dans l'huile de tournesol au cours du développement du capitule. *OCL.* 15: 400-6.
- Ayerdi Gotor A., Berger M., Labalette F., Centis S., Daydé J. et Calmon A.** 2015. Variability and relationships between fatty acids, tocopherols and phytosterols content in sunflower cultivars (*Helianthus annuus*) from a three years multi-local study. *Int. J. Exp. Bot.* 84: 14-25.
- Azócar L., Scheuermann E., Hidalgo P., Betancourt R. et Navia R.** 2007. Biodiesel production from rapeseed oil with waste frying oils. Paper presented at ISWA/NVDR World Congress, Sep. 24-27, Amsterdam (Oral).
- Bagheri H., Sam Daliri M. et Redaei A.** 2011. Grain and oil yield in safflower cultivars: Under of water stress effect (*Carthamus tinctorius* L.). *Res. J. Fish and Hydrobiol.* 6(4): 611-613.

Références bibliographiques

- Baghiani A., Boumerfeg S., Belkhiri F., Khennouf S., Charef N., Daoud Harzallah D., Arrar L. et Abdel-Wahhab M.A.** 2010. Antioxidant and radical scavenging properties of *Carthamus caeruleus* L. extracts grow wild in Algeria flora. *Commun. Sci.* 1: 128-136.
- Bai Y., Ping L., Han C., Yu C., Chen M., He F. et Yi D.** 2012. Hydroxysafflor yellow A (HSYA) from flowers of *Carthamus tinctorius* L. and its vasodilatation effects on pulmonary artery. *Molecules*, 17: 14918-14927.
- Baker J.T., Boote K.J. et Allen L.H.J.** 1995. Potential climate change effects on rice: carbon dioxide and temperature. In: Rosenzweig, C. (Ed.), *Climate Change and Agriculture: Analysis of Potential Interantional Impacts*. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, p. 59 (ASA, CSSA, and SSSA).
- Balla K., Rakszegi M., Li Z., Bekes F., Bencze S. et Veisz O.** 2011. Quality of winter wheat in relation to heat and drought shock after anthesis. *Czech J Food Sci.* 2: 117-128.
- Balz M., Schulte E. et Thier H.P.** 1993. Simultaneous determination of α -tocopheryl acetate, tocopherols and tocotrienols by HPLC with fluorescence detection in foods. *Fat Sci. Technol.* 95: 215-220.
- Barlow K.M., Christy B.P., O'Leary G.J., Riffkin P.A. et Nuttall J.G.** 2015. Simulating the impact of extreme heat and frost events on wheat crop production: a review. *Field Crops Res.* 17:109-119.
- Barnabás B., Jäger K. et Fehér A.** 2008. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant Cell Environ.* 31: 11-38.
- Bassil E.S., Kaffka S. R. et Hutmacher R.A.** 2002. Response of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) to residual soil N following cotton (*Gossypium* spp.) in rotation in the San Joaquin Valley of California. *Journal of Agricultural Science*, 138: 395-402.
- Bates P.D., Stymne S. et Ohlrogge J.** 2013. Biochemical pathways in seed oil synthesis. *Current Opinion in Plant Biology*, 16(3): 358-364.
- Baud S. et Lepiniec L.** 2010. Physiological and developmental regulation of seed oil production. *Prog Lipid Res.* 49(3): 235-249.
- Benassi J.L. et Labonne M.** 2004. Perspectives pour les oléagineux dans les pays du Maghreb : Algérie, Maroc et Tunisie 2000-2015. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 11 (2): 92-6.
- Ben Moumen A., Mansouri F., Fauconnier M.L., Sindic M., Mihalou A., Elamrani A. et Serghini-Caid H.** Effet du stress hydrique sur la composition biochimique des huiles de quatre variétés de carthame (*Carthamus tinctorius*) produites dans la région orientale du Maroc. 6^{èmes} Journées Internationales d'Etude des Lipides: 5 - 7 décembre 2013 Casablanca, Maroc.
- Ben Moumen A., Mansouri F., Richard G., Abid M., Fauconnier M.L., Sindic M., El Amrani A. et Caid H.S.** 2014. Biochemical characterisation of the seed oils of four safflower (*Carthamus tinctorius*) varieties grown in north-eastern of Morocco. *Int. J. Food Sci. Technol.* 50: 804-810.

Références bibliographiques

- Ben Moumen A., Mansouri F., Richard G., Fauconnier M.L., Sindic M., Nabloussi A., Elamrani A. et Caid H.S.** 2015. Variations in the phytosterol and tocopherol compositions and the oxidative stability in seed oils from four safflower (*Carthamus tinctorius* L) varieties grown in north-eastern Morocco. *International Journal of Food Science and Technology*, 50: 2264-2270.
- Bentekaya I. et Hassouna M.** 2005. Étude de la stabilité oxydative de l'huile d'olive vierge extra tunisienne au cours de son stockage. *OCL*. 12: 447.
- Berger M., Ayerdi-Gotor A., Sarrafi A., Maury P., Daydé J. et Calmon A. 2010. Que sait-on du déterminisme de la qualité des huiles du tournesol face aux nouvelles attentes?. *OCL*. 17 (3): 171-184.
- Blanchard M.G. et Runkle E.S.** 2011. The influence of day and night temperature fluctuations on growth and flowering of annual bedding plants and greenhouse heating cost predictions. *Hort science*, 46(4):599-603.
- Bouchereau A., Clossais-Besnard N., Bensaoud A., Leport L. et Renard M.** 1996. Water stress effects on rapeseed quality. *Eur J Agron*. 5:19-30.
- Bozan B. et Temelli F.** 2008. Chemical composition and oxidative stability of flax, safflower and poppy seed and seed oils. *Bioresource Technology*, 99(14): 6354-6359.
- Bulbul T., Bulbul A., Ulutas E., Ozdemir V. et Rahman A.** 2015. Effects of Combined Safflower and Sunflower Meals on Performance and Egg Quality Parameters in Quail. *Journal of Bahri Dagdas Animal Research*. 3(1):16-25.
- Burch R.** 2011. The stability and shelf life of vitamin-fortified foods. In: Kilcast D., Subramaniam P. (eds): Food and Beverage Stability and Shelf-Life. Part III. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge: 743-754.
- Caliskan S. et Caliskan M.E.** 2018. Row and plant spacing effects on the yield and yield components of safflower in a mediterranean-type environment. *Turk J Field Crops*, 23(2): 85-92.
- Carré P. et Pouzet A.** 2014. Rapeseed market, worldwide and in Europe. *OCL*. 21(1) D102.
- Chakradhari S., Perkons I., Mišina I., Sipeniec E., Radziejewska-Kubzdela E., Grygier A., Rudzińska M., Patel K.S., Radzimirska-Graczyk M. et Górna's P.** 2019. Profiling of the bioactive components of safflower seeds and seed oil: Cultivated (*Carthamus tinctorius* L.) vs. wild (*Carthamus oxyacantha* M. Bieb.). *Eur. Food Res. Technol.* 246: 449-459.
- Chapman M.A., Hvala J., Strever J. et Burke J.M.** 2010. Population genetic analysis of safflower (*carthamus tinctorius*; asteraceae) reveals a near eastern origin and five centers of diversity. *American Journal of Botany*, 97(5): 831-840.
- Chemat F., Grondin I., Costes P., Moutoussamy L., Sing A.S. et Smadja J.** 2004. High power ultrasound effects on lipid oxidation of refined sunflower oil. *Ultrason Sonochem*. 11: 281-285.
- Chen Z.J., Wu J.Q., Ma Y., Wang P., Gu Z.X. et Yang R.Q.** 2018. Advances in biosynthesis, regulation and bioactivity of phenolic acids in plant food raw materials. *Food Sci*. 39: 321-328.

Références bibliographiques

- Cherfaoui M., Cecchi T., Keciri S. et Boudriche L.** 2017. Volatile compounds of Algerian extra-virgin olive oils: Effects of cultivar and ripening stage. *International Journal of Food Properties*, 21 (1): 36-46.
- Chernova A., Gubaev R., Mazin P., Goryunova S., Demurin Y., Gorlova L. et al.** 2019. UPLC–MS triglyceride profiling in sunflower and rapeseed seeds. *Biomolecules*, 9(1): 9.
- Chimenti C.A. et Hall A.J.** 2001. Grain number responses to temperature during floret differentiation. *Field Crops Res.* 72: 177-185.
- Chimi H.** 2001. Qualité des huiles d'olive au Maroc, enquête national et analyses au laboratoire, Transfert de technologie en agriculture-bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA, 79, 4.
- Cho S.H., Lee H.R., Kim T.B., Choi S.W., Lee W.J. and Choi, Y.** 2004. Effects of defatted safflower seed extract and phenolic compounds in diet on plasma and liver lipid in ovariectomized rats fed highcholesterol diets. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, 50: 32-37.
- Conseil Oléicole International.** 2011. Norme commerciale applicable aux huiles d'olive et aux l'huiles de grignons d'olive. T. 15/NC n° 3/Rév. 6.
- Cooper M., Woodruff D.R., Phillips I.G., Basford K.E. et Gilmour A.R.** 2001. Genotype-by-management interactions for grain yield and grain protein concentration of wheat. *Field Crops Res.* 69:47-67.
- Crampon C., Nikitine C., Zaier M., Lepine O., Tanzi C.D., Vian M.A. et Badens E.** 2017. Oil extraction from enriched *Spirulina platensis* microalgae using supercritical carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, 119: 289-296.
- Dajue L. et Mundel H.H.** 1996. Safflower. 7. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy. p83.
- Dauguet S., Labalette F., Fine F., Carré P., Merrien A. et Palleau J.P.** 2016. Genetic impact on protein content and hullability of sunflower seeds, and on the quality of sunflower meal; *OCL*, 23(2) D205.
- Dawodu M.O., Olutona G.O. et Obimakinde S.O.** 2015. Effect of Temperature on the Chemical Characteristics of Vegetable Oils Consumed in Ibadan, Nigeria. *Pakistan Journal of Nutrition*, 14 (10): 698-707.
- Dawood M.G. et Sadak M.S.** 2014. Physiological role of glycinebetaine in alleviating the deleterious effects of drought stress on canola plants (*Brassica napus* L.). *Middle East Journal of Agriculture Research* 3(3): 638-644.
- Dehariya R. et Dixit A.K.** 2015. A review on potential pharmacological uses of *Carthamus tinctorius* L. *World J Pharm Sci*, 3(8): 1741-1746.
- De Leonardis A.M., Fragasso M., Beleggia R., Ficco D.B.M., De Vita P. et Mastrangelo A.M.** 2015. Effects of heat stress on metabolite accumulation and composition, and nutritional properties of Durum Wheat grain. *Int. J. Mol. Sci.* 16: 30382-30404.

Références bibliographiques

- Del-Toro-Sánchez C.L., Rodríguez-Félix F., Cinco-Moroyoqui F.J., Juárez J., Ruiz-Cruz S., Wong-Corral F.J., Borboa-Flores J., Castro-Enríquez D.D., Barreras-Urbina C.G. and Tapia-Hernández J.A.** 2021. Recovery of phytochemical from three safflower (*Carthamus tinctorius* L.) by-products: Antioxidant properties, protective effect of human erythrocytes and profile by UPLC-DAD-MS. *Journal of Food Processing and Preservation*. 45(9): e15765.
- De morais oliveira V.R., De Arruda A.M.V., Silva L.N.S., DE Souza J.B.F., DE Queiroz J.P.A.F., Da Silva Melo A. et Holanda J.S.** 2016. Sunflower meal as a nutritional and economically viable substitute for soybean meal in diets for free-range laying hens. *Animal Feed Science and Technology*, 220: 103-108.
- de Oliveira C.V.K., Santos R.F., Siqueira J.A.C., Bariccatti R.A., Lenz N.B.G., Cruz G.S. et al.** 2018. Chemical characterization of oil and biodiesel from four safflower genotypes. *Indust. Crops Prod.* 123: 192-196.
- Delshad E., Yousefi M., Sasannezhad P., Rakhshandeh H. et Ayati, Z.** 2018. Medical uses of *carthamus tinctorius* L. (Safflower): a comprehensive review from traditional medicine to modern medicine. *Electronic Physician*, 10 (4): 6672-6681.
- Djenni Z., Pingret D., Mason T.J. et Farid Chemat.** 2013. Sono-Soxhlet: In situ ultrasound-assisted extraction of food products. *Food Anal. Methods*, 6:1229-1233.
- Dmytryshyn S., Dalai A., Chaudhari S., Mishra H. et Reaney M.** 2004. Synthesis and characterization of vegetable oil derived esters: evaluation for their diesel additive properties. *Bioresource Technology*, 92: 55-64.
- Doorenbos J. et Kassam A.H.** 1987. Réponse des rendements à l'eau. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage. 33. Rome. 161-165.
- Douzane M. et Bellal M.M.** 2004. Etude des caractéristiques physico-chimiques des huiles de quelques variétés populations d'olive de la région de Bejaïa. *Sciences and Technologie*. 22: 86-93.
- Ebadi F., Mehran Mohseni M. et Alizadeh A.M.** 2014. Evaluation of antioxidant activity of Safflower florets (*Carthamus tinctorius* L.) as food coloring agents. *J. Chem. Pharm. Res.* 8:539-544.
- Ebrahimian E., Seyyedi S.M., Bybordi A. et Damalas C.A.** 2019. Seed yield and oil quality of sunflower, safflower, and sesame under different levels of irrigation water availability. *Agri wat manag* 218: 149-157.
- Elfadl E., Reinbrecht C., Frick C. et Claupein W.** 2009. Optimization of nitrogen rate and seed density for safflower (*Carthamus tinctorius* L.) production under low-input farming conditions in temperate climate. *Filed Crops Res* 114: 2-13.
- Elferjani R. et Soolanayakanahally R.** 2018. Canola Responses to Drought, Heat, and Combined Stress: Shared and Specific Effects on Carbon Assimilation, Seed Yield, and Oil Composition. *Frontiers in Plant Science*, 9.

Références bibliographiques

- El-Lattief E.A.** 2012. Evaluation of 25 safflower genotypes for seed and oil yields under arid environment in upper Egypt. *Asia J. Crop Sci.* 1-8.
- Emmami T., Naseri R., Falahi H. et Kazemi E.** 2011. Response of yield, yield component and oil content of safflower (*cv.Sina*) to planting date and plant spacing on row in rainfed conditions of wester Iran. *American-Eurasian J Agric Environ Sci* 10:947-953.
- Emongor V., Oarabil P., Phuduhudu D. et Oagile O.** 2017. Effects of genotype on vegetative growth, yield components and yield, oil content and oil yield of safflower. *Agricultural Science Research Journal*, 7(12): 381-392.
- Emongor V. et Oagile O.** 2017. Safflower production. Ed: The Botswana University of Agriculture and Natural Resources. P62.
- Ergönül P.G et Özbek Z.A.** 2018. Identification of bioactive compounds and total phenol contents of cold pressed oils from safflower and camelina seeds. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12: 2313-2323.
- Esmaeilian Y., Sirousmehr A.R., Asghripour M.R. et Amiri E.** 2012. Comparison of sole and combined nutrient application on yield and biochemical composition of sunflower under water stress. *Int J Appl Sci Tech.* 2: 131-137.
- Esteban A.B., Sicardo M.D., Mancha M. et Martinez-Rivas J.M.** 2004. Growth temperature control of the linoleic acid content in safflower (*Carthamus tinctorius*) seed oil. *J Agric Food Chem.* 52: 332-336.
- Fahad S., Bajwa A. A., Nazir U., Anjum S. A., Farooq A., Zohaib A. et al.** 2017. Crop Production under Drought and Heat Stress: Plant Responses and Management Options. *Frontiers in Plant Science*, 8.
- FAO.** 2018a. Oléagineux et produits oléagineux. Perspectives agricoles de L'OCDE et de la FAO 2018-2027. 145-158.
- FAO.** 2018b. FAOSTAT Statistical Database. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAOSTAT.** 2019. <http://www.fao.org/faostat/en/#search/safflower>
- Fernández-Cuesta Á., Velasco L. et Ruiz-Méndez M.V.** 2014. Novel safflower oil with high γ -tocopherol content has a high oxidative stability. *Eur J Lipid Sci Technol.* 116(7):832-836.
- Fernandes-Silva A.A., Gouveia J.B., Vasconcelos P., Ferreira T.C. et Villalobos F. J.** 2013. Effect of different irrigation regimes on the quality attributes of monovarietal virgin olive oil from cv. "Cobrançosa". *grasas y aceites*, 64 (1): 41-49.
- Ferreira-Santos R., Bassegio D., Pereira-Sartori M. M., Dutra-Zanotto M. et De Almeida-Silva M.** 2018. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) yield as affected by nitrogen fertilization and different water regimes. *Acta Agronómica*, 67(2): 264-269.
- Feussner I. et Wasternack C.** 2002. The lipoxygenase pathway. *Annu. Rev. Plant Biol.* 53: 275-297.

Références bibliographiques

- Flagella Z., Rotunno T., Tarantino R., Di Caterina R. et 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. *Eur J Agron.* 17: 221-230.
- Fox B.G., Shanklin J., Somerville C. et Munck E.** 1993. Stearoylacyl carrier protein D9 desaturase from *Ricinus communis* is a di-iron-oxo protein. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 90: 2486-2490.
- Franke S., Fröhlich K., Werner S., Böhm V. et Schöne F.** 2010. Analysis of carotenoids and vitamin E in selected oilseeds, press cakes and oils. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 112: 1122-1129.
- Gacek K., Bayer P.E., Bartkowiak-Broda I., Szala L., Bocianowski J., Edwards D. et Batley J.** 2016. Genome-Wide Association Study of Genetic Control of Seed Fatty Acid Biosynthesis in *Brassica napus*. *Front Plant Sci.* 7: 2062.
- Galicia-González A., Goytortua-Bores E., Palacios E. et al.** 2010. Chemical composition and digestibility of three mexican safflower meals used as ingredients in diets for whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *J World Aquac Soc.* 41: 191-202.
- Garcés R. et Mancha M.** 1991. *In vitro* oleate desaturase in developing sunflower seeds. *Phyto.* 30: 2127-2130.
- Gautam A., Bhagyawant S.S. et Srivastava N.** 2014. Detailed study on therapeutic properties, uses and pharmacological applications of safflower (*carthamus tinctorius* L.). *Int. J. Ayur. Pharma Research*, 2(3): 5-16.
- Gegel Ü., Demirci M., Esendal E. et Tasan M.** 2007. Fatty acid composition of the oil developing seeds of different varieties of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *J Am Oil Chem Soc.* 84(1): 47-54.
- Gediya S.K., Mistry R.B., Patel U.K., Blessy M. et Jain H.N.** 2011. Herbal plants: Used as a cosmetics. *Nat. Prod. Plant Resour.* 1(1): 24-32.
- Ghanbari-Odivi A., Hashemzade H., Bahrampour B. et Saeidi M.** 2013. Effect of sowing date on yield and its components, oil and protein concentration and some agronomical traits of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Tech. J. Engin. App. Sci.* 3 (14): 1405-1410.
- Ghareghani M., Zibara K., Azari H., Hejr H., Sadri F. et al.** 2017. Safflower seed oil, containing oleic acid and palmitic acid, enhances the stemness of cultured embryonic neural stem cells through notch1 and induces neuronal differentiation. *Front Neurosci.* 11: 446.
- Gharibi S., Sayed Tabatabaei B.E., Saeidi G., Talebi M. et Matkowski A.** 2019. The effect of drought stress on polyphenolic compounds and expression of flavonoid biosynthesis related genes in *Achillea pачycephala* Rech.f. *Phytochemistry*, 162: 90-98.
- Ghassemi-Golezani K. et Lotfi R.** 2013 Influence of water stress and pod position on oil and protein accumulation in soybean grains. *Int. J. Agron. Plant Prod.* 4: 2341-2345.
- Gibbins R.D., Aksoy H.A. et Ustun G.** 2012. Enzyme-assisted aqueous extraction of safflower oil: Optimisation by response surface methodology. *International Journal of Food Science and Technology*, 47 (5): 1055-1062.

Références bibliographiques

- Gibson S., Arondel V., Iba K. et Somerville C.** 1994. Cloning of a temperature-regulated gene encoding a chloroplast omega-3 desaturase from *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiol.* 106: 1615-21.
- Gilbert J.** 2008. International safflower production—an overview. 7th International Safflower Conference. Wagga Wagga, NSW, Australia.
- Golkar P., Arzani A., et Rezaei A.M.** 2011. Genetic analysis of oil content and fatty acid composition in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *J Am Oil Chem Soc.* 88: 975-982.
- Golkar P. and Taghizadeh M.** 2018. In vitro evaluation of phenolic and osmolite compounds, ionic content, and antioxidant activity in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under salinity stress. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 134(3): 357-368.
- Gouzy A., Paulhe-Massol A., Mouloungui Z. et Merah O.** 2016. Effects of technical management on the fatty-acid composition of high-oleic and high-linoleic sunflower cultivars. *OCL*. 23(5) D502.
- Graham I.A.** 2008. Seed storage oil mobilization. *Annu Rev Plant Biol.* 59: 115-142.
- Greven M., Neal S., Green S., Dichio B. et Clothier B.** 2009. The effects of drought on the water use, fruit development and oil yield from young olive trees. *Agric. Water Manag.* 96: 1525-1531.
- Gucci R., Caruso G., Gennai C., Esposto S., Urbani S. et Servili M.** 2019. Fruit growth, yield and oil quality changes induced by deficit irrigation at different stages of olive fruit development. *Agric. Water Manag.* 212: 88-98.
- Guillemin S.** 2006. Extraction aqueuse d'huile de colza assistée par hydrolyse enzymatique: optimisation de la réaction, caractérisation de l'émulsion et étude des procédés de destabilisation. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Guilioni L., W'ery J. et Lecoeur J.** 2003. High temperature and water deficit may reduce seed number in field pea purely by decreasing plant growth rate. *Funct. Plant Biol.* 30:1151-1164.
- Gündüz K. et Özdemir E.** 2014. The effects of genotype and growing conditions on antioxidant capacity, phenolic compounds, organic acid and individual sugars of strawberry. *Food Chem.* 155: 298-303.
- Gunstone F.D.** 2002. Vegetable oils in food technology, composition, properties, and uses. John Wiley and Sons, pp. 337.
- Gunstone F.D.** 2005. Vegetable oils. In Bailey's industrial oil and fat products; F. Shahidi, ed. Wiley-Interscience: New York, USA, 213–267.
- Gunstone F.D., Alander J., Erhan S.Z., Sharma B.K., McKeon T.A. et Lin J.T.** 2007. Nonfood Uses of Oils and Fats. The Lipid Handbook with CD-ROM, Third Edition, 591-635.
- Gupta S.K.** 2016. Breeding oilseed crops for sustainable production: Opportunities and Constraints. USA. P586.
- Guttieri M. J., McLean R., Stark J. C. Souza E.** 2005. Managing irrigation and nitrogen fertility of hard spring wheats for optimum bread and noodle quality. *Crop Science*, 45(5):2049-2059.

Références bibliographiques

- Hall C.III.** 2016. Overview of the Oilseed Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Reference Module in Food Sciences. 1-5.
- Hamdan Y.A.S., Garcia-Moreno M.J., Fernandez-Martinez J.M., Velasco L. et Perez-Vich B.** 2012. Mapping of major and modifying genes for high oleic acid content in safflower. *Mol. Breed.* 30: 1279-1293.
- Hamrouni I., Touati W., Dhifi W., Chahed T., Ayachi S. et al.** 2004. Glycerolipid evolution during safflower seed formation and ripening. *J Food Lipids*, 11(4): 297-311.
- Hamrouni-Sellami I., Ben Salah H., Kchouk M.E. et Marzouk B.** 2007. Variations in phytosterol composition during the ripening of Tunisian safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seeds. *Pak J Biol Sci.* 10 (21): 3829-3834.
- Han X.L., Cheng R. et Zhang J.B.** 2009. Extraction of safflower seed oil by supercritical CO₂. *J Food Eng.* 92: 370-376.
- Harrabi S., St-Amand A., Sakouhi F., Sebei K., Kallel H., Mayer P.M. et al.** 2008. Phytosterols and phytosterols distributions in corn kernel. *Food Chemistry*, 111(1): 115-120.
- Harwood J.L.** 1996. Recent advances in the biosynthesis of plant fatty acids. *Biochim Biophys Acta.* 1301:7-56.
- Hasan K., Hossain B., Dhar P.K. et Haque R.** 2019. Comparative Study on Cholesterol Content and Physicochemical Properties of Some Branded and Unbranded Commercial Edible Oils in Khulna, Bangladesh. *Journal of Chemical Health Risks.* 9(4): 321-329
- Hase Y., Fujioka S., Yoshida S., Sun G., Umeda M. et Tanaka A.** 2005. Ectopic endoreduplication caused by sterol alteration results in serrated petals in Arabidopsis. *J Exp Bot.* 56: 1263-1268.
- Hassanein M.M.M, El-Shami S.M. et El-Mallah M.H.** 2011. Investigation of lipids profiles of nigella, lupin and artichoke seed oils to be used as healthy oils. *Journal of Oleo science*, 60(3):99-107.
- Hatfield J.L., Boote K.J., Fay P., Hahn L., Izaurralde R.C. et al.** 2008. Agriculture In: The Effects of Climate Change on Agriculture, Land Resources, Water Resources, and Biodiversity in the United States.
- Hatfield J.L. et Prueger, J.H.** 2015. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10: 4-10.
- Hay J. et Schwender J.** 2011. Computational analysis of storage synthesis in developing Brassica napus L. (oilseed rape) embryos: flux variability analysis in relation to (1) (3)C metabolic flux analysis. *Plant J.* 67:513-525.
- Heim K.E., Tagliaferro A.R. et Bobilya D.J.** 2002. Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure-activity relationships. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 13 (10):572–584.
- Hill A.B. et Knowles P.F.** 1968. Fatty acid composition of the oil of developing seeds of different varieties of safflower. *Crop Sci.* 8(3): 275-277.

Références bibliographiques

- Hoag B.K., French E.W., Geiszler G.N. et Schneiter A.A.** 1969. Safflower in North Dakota. Bull. 477. North Dakota Ag. Fargo, ND: Exp. Sta. NDSU. p11-3
- Hopkins W.G.** 2003. Physiologie végétale. De Boeck Supérieur. P532.
- Hu A.J., Feng Q.Q., Zheng J.I.E., Hu X.H., Wu C. et Liu C.Y.** 2012. Kinetic model and technology of ultrasound extraction of safflower seed oil. *Journal of Food Process Engineering*, 35(2): 278-294.
- Huang Q., Sun M., Yuan T., Wang Y., Shi M., Lu S., Tang B., Pan J., Wang Y. et Kai G.** 2019. The AP2/ERF transcription factor SmERF1L1 regulates the biosynthesis of tanshinones and phenolic acids in *Salvia miltiorrhiza*. *Food Chem.* 274: 368-375.
- Hussain M.I., Lyra D.A., Farooq M., Nikoloudakis N. et Khalid N.** 2015. Salt and drought stresses in safflower: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 1-31.
- Hussanein M.M.M., El-Shami S.M. et El-Mallah M.H.** 2011. Investigation of lipids profiles of nigella, lupin and artichoke seed oils to be used as healthy oils. *Journal of oleo science*, 60 (3): 99-107.
- Ibeto C.N., Okoye C.O.B. et Ofoefule A.U.** 2012. Comparative study of the physicochemical characterization of some oils as potential feedstock for biodiesel production. *ISRN Renewable Energy*, 5.
- Istanbulluoglu A., Gocmen E., Gezer E., Pasa C. et Konukcu F.** 2009. Effects of water stress at different development stages on yield and water productivity of winter and summer safflower (*Carthamus tinctorius*L.). *Agric Water Manage.* 96:1429-1434.
- Iwata T., Hoshi S., Tsutsumi K., Furukawa Y. et Kimura S.** 1991. Effect of dietary safflower phospholipid on plasma and liver lipids in rats fed a hypercholesterolemic diet. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.* 37: 591-600.
- Iyer V.V., Sriram G., Fulton D.B., Zhou R., Westgate M.E. et Shanks J.** 2008. Metabolic flux maps comparing the effect of temperature on protein and oil biosynthesis in developing soybean cotyledons. *Plant Cell Environ.* 31: 506-517.
- Izquierdo N., Aguirrezabal L., Andrade F.H. et Pereya V.** 2002. Night temperature affects fatty acid composition in sunflower oil depending on the hybrid and the phenological stage. *Field Crops Res.* 77: 115-126.
- Izquierdo N., Aguirrezabal L., Andrade F.H. et Canatarero M.G.** 2006. Modeling the response of fatty acid composition to temperature in a traditional sunflower hybrid. *Agron J.* 98: 451-461.
- Jabbari M., Ebadi A., Tobeh A. et Mostafaii H.** 2010. Effects of supplemental irrigation on yield and yield components of spring safflower genotypes. *Recent Research in Science and Technology*, 2(1): 023-028.
- Jachula J., Konarska A. et Denisow B.** 2018. Micromorphological and histochemical attributes of flowers and floral reward in *Linaria vulgaris* (Plantaginaceae). *Protoplasma*, 255(6):1763-1776.

Références bibliographiques

- Jalili F., Jafari S.M., Emam-Djomeh Z., Malekjani N. et Farzaneh V.** 2017. Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction of Oil from Canola Seeds with the Use of Response Surface Methodology. *Food Anal. Methods*, 11: 598-612.
- Jana K., Mallick G.K. et Ghosh S.** 2013. Yield of aerobic rice affected by high temperature stress during summer season-A study from red and laterite zone of West Bengal, India. *J. Appl. Natl. Sci.* 5: 394-396.
- Jannat B., Oveisi M.R., Sadeghi N., Hajimahmoodi M., Behzad M., Choopankari E. et Behfar A.A.** 2010. Effects of roasting temperature and time on healthy nutraceuticals of antioxidants and total phenolic content in Iranian sesame seeds (*Sesamum indicum* L.). *J. Environ. Health Sci. Eng.* 7: 97-102.
- Jhajharia S., Choudhary P., Jhajharia A., Meena L. et Singh D.** 2013. Heterosis and combining ability in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) germplasm lines. *The bioscan*, 8(4): 1353-1360.
- Jiménez-Escrig A, Santos-Hidalgo AB, Saura-Calixto F.** 2006. Common sources and estimated intake of plant sterols in the Spanish diet. *J Agric Food Chem.* 54(9):3462-71.
- Jokić S., Sudar R., Svilović S., Vidović S., Bilić M., Velić D. et Jurković V.** 2013. Fatty Acid Composition of Oil Obtained from Soybeans by Extraction with Supercritical Carbon Dioxide. *Czech J. Food Sci.* 31 (2): 116-125.
- Judde A., Villeneuve P., Rossignol-Castera A. et Le Guillou A.** 2003. Antioxidant effect of soy lecithins on vegetable oil stability and their synergism with tocopherols. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 80(12): 1209-1215.
- Jun H.I., Wiesenborn D.P. et Kim Y.S.** 2014. Antioxidant activity of phenolic compounds from canola (*Brassica napus*) seed. *Food Sci. Biotechnol.* 23(6): 1753-1760.
- Kakde R.B. et Chavan A.M.** 2012. Nutritional changes in soybean and safflower oil due to storage fungi. *Current Botany*, 3(4): 18-23
- Kai-bo L., Jing W. et Xiang-xiang L.** 2015. The process of ultrasound technology assisted extraction of safflower seed oil. *Food Research and Development*, 20 (In Chinese).
- Kallscheuer N., Vogt M. et Marienhagen J.** 2017. A novel synthetic pathway enables microbial production of polyphenols independent from the endogenous aromatic amino acid metabolism. *ACS Synth. Biol.* 6: 410-415.
- Kar G., Kumar A. et Martha M.** 2007. Water use efficiency and crop coefficients of dry season oilseed crops. *agricultural water management*, 87: 73-82.
- Karim M.A., Fracheboud Y. et Stamp P.** 1997. Heat tolerance of maize with reference of some physiological characteristics. *Ann. Bangladesh Agri.* 7: 27-3.
- Katkade M.B., Syed H.M., Andhale R.R. et Sontakke M.D.** 2018. Fatty acid profile and quality assessment of safflower (*Carthamus tinctorius*) oil. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(2): 3581-3585.
- Kaufman A.J.** 1990. Oleochemicals - a look at world trends. *Inform* 1: 1034-1048.
- Kazemeini A. et Sadeghi H.** 2012. Reaction of the green bean-safflower intercropping patterns to different nitrogen fertilizer levels. *Iran Agric Res.* 31:13-22.

Références bibliographiques

- Khan Z.H., Khalil S.K., Ali F., Islam B., Iqbal A., Ullah I., Ali M. et Shah. F.** 2018. Variations in planting dates of sweet corn affect its agronomic traits via altering crop micro-environment. *Fresenius Environmental Bulletin* 27(7): 4822-4829.
- Khoufi S., Khamassi K., Da Silva J.A.T., Rezgui S. et Ben Jeddi F.** 2014. Watering regime affects oil content and fatty acid composition of six sunflower lines. *Journal of New Sciences*, 7(1): 9p.
- Killi D., Bussotti F., Raschi A. et Haworth M.** 2016. Adaptation to high temperature mitigates the impact of water deficit during combined heat and drought stress in C3 sunflower and C4 maize varieties with contrasting drought tolerance. *Physiol Plant*, 159(2):130-147.
- Kim J.H., Kim J.K., Kang W.W., Ha Y.S., Choi S.W. et Moon K.D.** 2003. Chemical compositions and DPPH radical scavenger activity in different sections of safflower. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 32, 733-738.
- Kim E.O., Lee J.Y. et Choi S.W.** 2006. Quantitative changes in phenolic compounds of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seeds during growth and processing. *J Food Sci Nutr.* 11: 311-317.
- Kizil S., Çakmak O., Kirici S. et İnan M.** 2008. A comprehensive study on safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in semi-arid conditions. *J Biote Biote.* 22: 947-953.
- Knowles P.F. et Hill A.B.** 1964. Inheritance of fatty acid content in the seed oil of a safflower introduction from Iran. *Crop Sci.* 4: 406-409.
- Knowles P.F.** 1969. Centers of plant diversity and conservation of crop germplasm: Safflower. *Econ. Botany.* 23: 324-329.
- Knowles P.F.** 1972. The plant geneticist's contribution towards changing lipid and amino acid composition of safflower. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 49: 27-29.
- Kollia E., Markaki P., Zoumpoulakis P. et Proestos C.** 2016. Antioxidant activity of *Cynara scolymus* L. and *Cynara cardunculus* L. extracts obtained by different extraction techniques. *Nat Prod Res.* 31(10):1163-1167.
- Konopka I., Roszkowska B., Czaplicki S. et Tanska M.** 2016. Optimization of pumpkin oil recovery by using aqueous enzymatic extraction and comparison of the quality of the obtained oil with the quality of cold-pressed oil. *Food Technology and Biotechnology*, 54(4): 413-420.
- Konuskan D.B., Arslan M. et Oksuz A.** 2018. Physicochemical properties of cold pressed sunflower, peanut, rapeseed, mustard and olive oils grown in the Eastern mediterranean region. *Saudi J. Bio. Sci.* 26 (2): 340-344.
- Koutroubas S.D., Papakosta D.K. et Doitsinis A.** 2009. Phenotypic variation in physiological determinants of yield in spring sown safflower under Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 112(2-3): 199-204.
- Koyama N., Kuribayashi K., Seki T., Kobayashi K., Furuhashi Y., Suzuki K., Arisaka H., Nakano T., Amino Y. et Ishii K.** 2006. Serotonin derivatives, major safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seed antioxidants, inhibit low-density lipoprotein (LDL) oxidation and atherosclerosis in apolipoprotein E-deficient mice. *J. Agric. Food Chem.* 54: 4970-4976.
- Kumar M.S., Ali K., Dahuja A. et Tyagi A.** 2015. Role of phytosterols in drought stress tolerance in rice. *Plant Physiology and Biochemistry*, 96: 83-89.

Références bibliographiques

- Kumar S., Ambreen H., Variath M. T., Rao A.R., Agarwal M., Kumar A., Goal S. et Jagannath A.** 2016. Utilization of molecular, phenotypic, and geographical diversity to develop compact composite core collection in the oilseed crop, safflower (*Carthamus tinctorius* L.) through maximization strategy. *Frontiers in Plant Science*, 7.
- Kumar S., Mawlong I., Ali K. et Tyagi A.** 2018. Regulation of phytosterol biosynthetic pathway during drought stress in rice. *Plant Physiology and Biochemistry*, 129: 11-20.
- La Bella S., Tuttolomondo T., Lazzeri L., Matteo R., Leto C. et Licata M.** 2019. An agronomic evaluation of new safflower (*Carthamus tinctorius* L.) germplasm for seed and oil yields under mediterranean climate conditions. *Agronomy*. 9(8): 468.
- Lako J., Trenerry V.C., Wahlqvist M., Wattanapenpaiboon N. et al.** 2007. Phytochemical flavonols, carotenoids and the antioxidant properties of a wide selection of Fijian fruit, vegetables and other readily available foods. *Food Chem.* 100: 1727-1741.
- Larmure A. et Munier-Jolain N.G.** 2019. High Temperatures During the Seed-Filling Period Decrease Seed Nitrogen Amount in Pea (*Pisum sativum* L.): Evidence for a Sink Limitation. *Front Plant Sci.* 10: 1608.
- Lee Y.C., Oh S.W., Chang J. et Kim I.H.** 2004. Chemical composition and oxidative stability of safflower oil prepared from safflower seed roasted with different temperatures. *Food Chem.* 84:1-6.
- Li F., He Z. and Ye, Y.** 2017. Isocartormin, a novel quinochalcone Cglycoside from *Carthamus tinctorius*. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 7: 527–531.
- Lin K.H., Chao P.Y., Yang C.M., Cheng W.C., Lo H.F. et Chang T.R.** 2006. The effects of flooding and drought stresses on the antioxidant constituents in sweet potato leaves. *Botanical Studies*, 47: 417-426.
- Lisa M. et Holčápek M.** 2008. Triacylglycerols profiling in plant oils important in food industry, dietetics and cosmetics using high-performance liquid chromatography–atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1198-1199, 115-130.
- Liu L., Waters, D.L.E., Rose T.J., Bao J., King G.J.** 2013. Phospholipids in rice: Significance in grain quality and health benefits: A review. *Food Chem.* 139 (1-4): 1133-1145.
- Ma X.H., Ma Y., Tang J.F., He Y.L., Liu Y.C., Ma X.J., Shen Y., Cui G.H., Lin H.X., Rong Q.X. et al.** 2015. The Biosynthetic Pathways of Tanshinones and Phenolic Acids in *Salvia miltiorrhiza*. *Molecules*, 20: 16235-16254.
- Macheroux P, Schmid J, Amrhein N, Schaller A.** 1999. A unique reaction in a common pathway: Mechanism and function of chorismate synthase in the shikimate pathway. *Planta*. 207: 325-334.
- Mailer R.J.** 2004. Oilseeds, Overview. Encyclopedia of grain science, Pp 380-386.
- Mailer R.J.** 2016. Oilseeds. Overview. Australian Oils Research, Lambton, NSW, Australia. 7p.

Références bibliographiques

- Mansouri F., Ben Moumen A., Richard G., Fauconnier M.L., Sindic M., Elamrani A. et Caid H.S.** 2018. Proximate composition, amino acid profile, carbohydrate and mineral content of seed meals from four safflower (*Carthamus tinctorius* L.) varieties grown in north-eastern Morocco. *OCL*. 25(2), A202.
- Masclaux-Daubresse C., Daniel-Vedele F., Dechorgnat J., Chardon F., Gauffichon L. et Suzuki A.** 2010. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: Challenges for sustainable and productive agriculture. *Ann. Bot.* 105: 1141-1157.
- Martínez-Rivas J.M., Sánchez-García A., Sicardo M.D., García-Díaz M.T. et Mancha M.** 2003. Oxygen-independent temperature regulation of the microsomal oleate desaturase (FAD2) activity in developing sunflower (*Helianthus annuus*) seeds. *Physiol. Plant.* 117: 179-185.
- Mat Yusoff M., Gordon M.H., Ezeh O. et Niranjan K.** 2017. High pressure pretreatment of *Moringa oleifera* seed kernels prior to aqueous enzymatic oil extraction. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 39, 129-136.
- Matthäus B. et Brühl L.** 2001. Comparison of different methods for the determination of the oil content in oilseeds. *JAOCS*. 78(1): 95-102.
- Maziero C.L., Santos R.F., Bassegio D., Lewandoski C.F., Bueno P.L., Benetoli T.R., Secco D., de Souza S.N.M., de Souza D.M. et Rosseto R.E.** 2019. Initial growth and agronomic performance of some important north American safflower cultivars. *AJCS*, 13(05):726-731.
- Meftah H., Latrache H., Hamadi F., Hanine H., Zahir H. et El louali M.** 2014. Comparaison des caractéristiques physicochimiques des huiles d'olives issus de différentes zones de la région Tadla Azilal (Maroc) [Comparison of the physico-chemical characteristics of the olive oil coming from different zones in Tadla Azilal area (Morocco)]. *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (2): 641-646.
- Merouane A., Noui A., Medjahed H., Nadjari Benhadj Ali K. et Saadi A.** 2014. Activité antioxydante des composés phénoliques d'huile d'olive extraite par méthode traditionnelle. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 8: 1865-1870.
- Merrien A. et Milan M.J.** 1992. Physiologie du tournesol. CETIOM ed. CETIOM, Paris.
- Mittler R.** 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 7: 405-410.
- Mohammadi M., Ghassemi-Golezani K., Chaichi M. R. et Safikhani S.** 2018. Seed oil accumulation and yield of safflower affected by water supply and harvest Time. *Agronomy Journal*. 110 (2):1-8.
- Morrison M.J., Gutknecht A., Chan J. et Miller S.S.** 2016. Characterising canola pollen germination across a temperature gradient. *Crop Pas. Sci.* 67: 317-322.
- Morteza E., Moaveni P., Morteza T., Saemi H. et Joorabloo A.** 2015. Effects of TiO₂ (nano and bulk) foliar application on physiological traits and grain yield of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Biological Forum –An International Journal*, 7(1): 1725-1731.
- Movahhedy-Dehnavy M., Modarres-Sanavy S.A.M. et Mokhtassi-Bidgoli A.** 2009. Foliar application of zinc and manganese improves seed yield and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown under water deficit stress. *Ind. Crops Prod.* 30:82–92.

Références bibliographiques

- Muhammad N., Bamishaiye E., Bamishaiye O., Usman L., Salawu M., Nafiu M. et Oloyede O.**, 2011. Physicochemical properties and fatty acid composition of *Cyperus esculentus* (Tiger Nut) Tuber Oil. *Biores Bull.* 5: 51-54.
- Mukherjee R., Chakraborty R. et Dutta A.** 2016. Role of fermentation in improving nutritional quality of soybean meal 6 A Review. *Asian Australas. J. Anim. Sci.* 29 (11): 1523-1529.
- Mündel H.H., Blackshaw R.E., Byers J.R., Huang H.C., Johnson D.L., Keon R. et al.** 2004. Safflower production on the canadian prairies. Agriculture and Agri-Food Canada. P37.
- Nabipour M., Meskarbashee M. et Yousefpour H.** 2007. The effect of water deficit on yield and yield components of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 10(3):421-426.
- Nadeem M., Anjum F. M., Arshad M. U. et Hussain S.** 2010. Chemical characteristics and antioxidant activity of different sunflower hybrids and their utilization in bread. *African Journal of Food Science.* 4(10): 618-626.
- Neelakandan A.K., Song Z., Wang J., Richards M.H., Wub X., Valliyodan B., Nguyen H.T. et Nes W.D.** 2009. Cloning, functional expression and phylogenetic analysis of plant sterol 24Cmethyltransferases involved in sitosterol biosynthesis. *Phytochemistry*, 70: 1982-1998.
- Nes W.D.** 2011. Biosynthesis of Cholesterol and Other Sterols. *Chem Rev.* 111 (10): 6423-6451.
- Nesaretnem K., Yew W.W. et Wahid M.B.** 2007. Tocotrienols and cancer: beyond antioxidant activity. *Eur J Lipid Sci Technol.* 109: 445-452.
- Neto A.R., de Oliveira Miguel A.M.R., Mourad A.L., Henriques E.A. et Alves R.M.V.** 2016. Environmental effect on sunflower oil quality. *Crop Breeding and Applied Biotechnology.* 16: 197-204.
- Nieves-Cordones M., García-Sánchez F., Pérez-Pérez J.G., Colmenero-Flores J.M., Rubio F. et Rosales M.A.** 2019. Coping With Water Shortage: An Update on the Role of K⁺, Cl⁻, and Water Membrane Transport Mechanisms on Drought Resistance. *Frontiers in Plant Science*, 10.
- Nogala-Kalucka M., Rudzinska M., Zadernowski R., Siger A. et Krzyzostaniak I.** 2010. Phytochemical content and antioxidant properties of seeds of unconventional oil plants. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 87: 1481-1487.
- Nosheen A., Bano A., Yasmin H., Keyani R., Habib R., Shah S.T.A. et Naz R.** 2016. Protein quantity and quality of safflower seed improved by np fertilizer and rhizobacteria (*Azospirillum* and *Azotobacter* spp.). *Frontiers in Plant Science*, 7 (104): 12p.
- Nosheen A., Naz R., Tahir A.T., Yasmin H., Keyani R., Mitrevski B., Bano A., Chin S.T., Marriott P.J. et Hussain I.** 2018. Improvement of safflower oil quality for biodiesel production by integrated application of PGPR under reduced amount of NP fertilizers. *Plos one*, 1-14.
- Nuttall J.G., Davies S.L., Armstrong R.A. et Peoples M.B.** 2008. Testing the primer-plant concept: wheat yields can be increased on alkaline sodic soils when an effective primer phase is used. *Austr. J. Agric. Res.* 59: 331-338.

Références bibliographiques

- Oh M.M., Trick H.N. et Rajashekar C.B.** 2009. Secondary metabolism and antioxidants are involved in environmental adaptation and stress tolerance in lettuce. *J. Plant Physiol.* 166: 180-191.
- Ohlogge J. et Browse J.** 1995. Lipid biosynthesis. *Plant Cell*, 7: 957-970.
- Olaniyan M.A.** 2010. Effect of extraction conditions on the yield and quality of oil from castor bean. *Journal of Cereals and Oilseeds*, 1(2):24-33.
- Omidi A.H., Khazaei H. et Hangbo S.** 2009. Variation for some important agronomic traits in 100 spring safflower (*Carthamus tinctorius* L.). American-Eurasian. *J. Agric Environ. Sci.* 5(6): 791-795.
- Omidi A.H. et Sharifmogadas M.R.** 2010. Evaluation of Iranian safflower cultivars reaction to different sowing dates and plant densities. *World Applied Sciences Journal*, 8 (8): 953-958.
- Onemli F.** 2004. The effects of soil organic matter on seedling emergence in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Plant Soil Environ.* 50:494-499.
- Oraki H., Alahdadi I. et Khajani FP.** 2011. Influence of water deficit and genotype on protein, oil contents and some physical characteristics of sunflower seeds. *Afr J Agr Res.* 6:1246-1250.
- Orsavova J., Misurcova L., Ambrozova J.V., Vicha R. et Mlcek J.** 2015. Fatty acids composition of vegetable oils and its contribution to dietary energy intake and dependence of cardiovascular mortality on dietary intake of fatty acids. *Int. J. Mol. Sci.* 16: 12871-12890.
- Ovesna Z., Vachalkova A. et Horvathova K.** 2004. Taraxasterol and beta-sitosterol: new naturally compounds with chemoprotective/chemopreventive effects. *Neoplasma*, 51:407-14.
- Ozcan M., Ayaz F.A., Ozogul Y., Glew R. et Ozogul F.** 2016. Fatty acid composition of achenes of *Cirsium taxa* (Asteraceae, Carduoideae) from Turkey. *Zeitschrift Für Naturforschung C*, 71(3-4): 45-54.
- Öztürk E., Özer H. et Polat T.** 2008. Growth and yield of safflower genotypes grown under irrigated and non-irrigated conditions in a highland environment. *Plant Soil Environ.* 54(10): 453-460.
- Palese A.M., Nuzzo V., Favati F. et al.** 2010. Effects of water deficit on the vegetative response, yield and oil quality of olive trees (*Olea europaea* L., cv Coratina) grown under intensive cultivation. *Sci Hort.* 125: 222-229.
- Palta J.P., Whitaker B.D., et Weiss L.S.** 1993. Plasma membrane lipids associated with genetic variability in freezing tolerance and cold acclimation of solanum species. *Plant Physiology*, 103: 793-803.
- Pandey A., Alok A., Lakhwani D., Singh J., Asif M.H. et Trivedi P.K.** 2016. Genome-wide expression analysis and metabolite profiling elucidate transcriptional regulation of flavonoid biosynthesis and modulation under abiotic stresses in banana. *Scientific Reports*, 6, 31361.
- Paredes-Lopez O. et Ordorica-Falomir C.** 1986. Production of safflower protein isolates: composition, yield and protein quality. *J. Sci. Food Agric.* 37: 1097-1103.

Références bibliographiques

- Park G.H., Hong S.C. et Jeong J.B.** 2016. Anticancer activity of the safflower seeds (*Carthamus tinctorius* L.) through inducing cyclin D1 proteasomal degradation in human colorectal cancer cells. *Korean J. Plant Res.* 29, 297-304.
- Parmentier M., Guillemin S., Barbar R., Linder M. et Fanni J.** 2004. De nouveaux procédés d'extraction des huiles pour des produits finis de haute qualité. *OCL.* 11 (6): 377-380.
- Parvaiz A.** 2017. Oilseed crops yield and adaptations under environmental stress. Edition1, UK. 295P.
- Peet M.M., Sato S. et Gardner R.G.** 1998. Comparing heat stress effects on male-fertile and male-sterile tomatoes. *Plant Cell Environ.* 21: 225-231.
- Perez-Perez L.M., García-Borbón L.L., González-Vega R.I., RodríguezFiguerola J.C., Rosas-Burgos E.C., Huerta-Ocampo J.Á., Ruiz-Cruz S., Wong-Corral F.J., Borboa-Flores J., Rueda-Puente E.O. and DelToro-Sánchez C.L.** 2018. Liberación de compuestos fenólicos ligados en el garbanzo (*Cicer arietinum* L.) utilizando microbiota humana intestinal. *Biotecnia*, 20: 146-154.
- Piironen V., Lindsay D.G., Miettinen T.A., Toivo J., Lampi A.M.** 2000. Plant sterols: biosynthesis, biological function and their importance to human nutrition. *J. Sci. Food Agric.* 80 (7): 939-966.
- Petropoulos S.A., Pereira C., Tzortzakis N., Barros L. et Ferreira I.C.F.R.** 2018. Nutritional Value and Bioactive Compounds Characterization of Plant Parts From *Cynara cardunculus* L. (Asteraceae) Cultivated in Central Greece. *Frontiers in Plant Science*, 9 (459): 1-12.
- Phillips K.M., Ruggio D.M., Toivo J.I., Swank M.A., Simpkins A.H.** 2002. Free and esterified sterol composition of edible oils and fats. *J. Food Compos. Anal.* 15:123-142.
- Poisson E., Trouverie J., Brunel-Muguet S., Akmouche Y., Pontet C., Pinochet X. et Avice J.C.** 2019. Seed yield components and seed quality of oilseed rape are impacted by sulfur fertilization and its interactions with nitrogen fertilization. *Frontiers in Plant Science.* 10 (458): 1-14.
- Quadir G., Ahmad S., Hassan F. et Cheema M.A.** 2006. Oil and fatty acid accumulation in sunflower as influenced by temperature variation. *Pak. J. Bot.* 38:1137-1147.
- Radfar M., Rogiewicz A. et Slominski B.A.** 2017. Chemical composition and nutritive value of canola-quality Brassica juncea meal for poultry and the effect of enzyme supplementation. *Animal Feed Science and Technology*, 225: 97-108.
- Rafalowski R., Zegarska Z., Kuncewicz A. et Borejszo Z.** 2008. Fatty acid composition, tocopherols and β -carotene content in polish commercial vegetable oil. *Pak. J. Nutr.* 7: 278-282.
- Rahamatalla A.B., Babiker E.E., Krishna A.G. et El Tinay A.H.** 1998. Changes in chemical composition, minerals and amino acids during seed growth and development of four safflower cultivars. *Plant Foods for Human Nutrition*, 52: 161-170.
- Rahimi Darabad G., Aghighi Shahverdi Kandi M., Barmaki M., Seyed Sharifi R., Hokmalipour S. and Asadi S.** 2011. Evaluation of yield and yield components in potato-safflower intercropping. *J Appl Sci Res.* 5:1423-1428.

Références bibliographiques

- Rai S.K., Charak D. et Bharat R.** 2016. Scenario of oilseed crops across the globe. *Plant Archives*, 16 (1): 125-132.
- Randhir R., Lin Y.T. et Shetty K.** 2004. Stimulation of phenolics, antioxidant and antimicrobial activities in dark germinated mung bean sprouts in response to peptide and phytochemical elicitors. *Process Biochem.* 39: 637-646.
- Rastoin J.L. et Benabderrazik E.H.** 2014. Céréales et oléoprotéagineux au Maghreb Pour un co-développement de filières territorialisées. IPAMED. P30.
- Rasul A. et Akhtar N.** 2012. Anti-aging potential of a cream containing milk thistle extract: formulation and in vivo evaluation. *African Journal of Biotechnology*, 11 (6):1509-1515.
- Rawsthorne S.** 2002. Carbon flux and fatty acid synthesis in plants. *Progress Lipid Res.* 41: 182-196.
- Redondo-Cuevas L., Castellano G., Torrens F. et Raikos V.** 2018. Revealing the relationship between vegetable oil composition and oxidative stability: a multifactorial approach. *J. Food Compos. Anal.* 66: 221-229.
- Regente M., Corti Monzón G. et de la Canal L.** 2008. Phospholipids are present in extracellular fluids of imbibing sunflower seeds and are modulated by hormonal treatments. *J Exp Bot.* 59(3):553-562.
- Rice-Evans C.A., Miller N.J. et Paganga G.** 1997. Antioxidant properties of phenolic compounds. *Trends in Plant Sci.* 2: 152-159.
- Rieu I., Twell D. et Firon N.** 2017. Pollen development at high temperature: from acclimation to collapse. *Plant Physiol.* 173:1967-1976.
- Robertson M.J., Holland J.F. et Bambach R.W.** 2004. Response of canola and Indian mustard to sowing date in the grain belt of north-eastern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 44: 43-52.
- Roche J., Essahat A., Bouniols A., El Asri M., Mouloungui Z., Mondières M. et Alghoum M.** 2004. Diversified composition of sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds within cultural practices and genotypes (hybrids and population). *Helia*, 27(40): 73-98.
- 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 Doct. INPT. France. 289P.
- Roche J., Bouniols A., Mouloungui Z., Barranco T. et Cerny M.** 2006. Management of environmental crop conditions to produce useful sunflower oil components. *Eur J Lipid Sci Technol.* 108: 287-97.
- Roche J., Alignan M., Bouniols A., Cerny M., Mouloungui Z. et Merah O.** 2010a. Sterol concentration and distribution in sunflower seeds (*Helianthus annuus* L.) during seed development. *Food Chemistry*, 119 (4): 1451-1456.
- Roche J., Alignan M., Bouniols A., Cerny M., Mouloungui Z., Vear F et Merah O.** 2010b. Sterol content in sunflower seeds (*Helianthus annuus* L.) as affected by genotypes and environmental conditions. *Food Chemistry*, 121: 990-995.

Références bibliographiques

- Roche J., Mouloungui Z., Cerny M., Merah O.** 2019. Effect of sowing dates on fatty acids and phytostérols patterns of *Carthamus tinctorius* L. *Applied Sciences*. 9: 2839.
- Rondanini D., Mantese A., Savin R. et Hall A.J.** 2006. Response of sunflower yield and grain quality to alternating day/night high temperature regimes during grain filling: effects of timing, duration and intensity of exposure to stress. *Field Crops Res* 96: 48-62.
- Rudolphi S., Becker H.C. et von Witzke-Ehbrecht S.** 2008. Outcrossing rate of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes under the agro climatic conditions of Northern Germany. 7th International safflower conference, Wagga Wagga Australia. 2P.
- Sabikhi L. et Sathish Kumar M.H.** 2012. Fatty acid profile of unconventional oilseeds. *Advances in Food and Nutrition Research*, 67:141-184.
- Sabzalian M.R., Saeidi G., Mirloh A.** 2008. Oil content and fatty acid composition in seeds of three safflower species. *J Am Oil Chem, Soc*, 85: 717-721.
- Saeidnia S., Manayi A., Gohari A.R. et Abdollahi M.** 2014. The Story of Beta-sitosterol- A Review. *European Journal of Medicinal Plants*, 4(5): 590-609.
- Saini H. et Aspinall D.** 1982. Abnormal sporogenesis in wheat (*Triticum aestivum* L.) induced by short periods of high temperature. *Ann. Bot.* 49: 835-846.
- Saini R.K., Nile S.H. et Park S.W.** 2015. Carotenoids from fruits and vegetables: Chemistry, analysis, occurrence, bioavailability and biological activities. *Food Res. Int.* 76(Pt3):735-750.
- Saleem M. et Ahmad N.** 2018. Characterization of canola oil extracted by different methods using fluorescence spectroscopy. *Plos one*. 13(12): 6p.
- Salem N., Msaada K., Hammami M., Selmi S., Limam F. et Marzouk B.** 2014a. Regional and phenological effects of Tunisian Safflower (*Carthamus tinctorius*) essential oil leaves. *Journal of New Sciences*. 9(1): 1-6.
- Salem N., Msaada K., Dhifi W., Sriti J., Houda Mejri1, Limam F. et Marzouk B.** 2014b. Effect of drought on safflower natural dyes and their biological activities. *EXCLI Journal*, 13: 1-18.
- Salgarolo P.**, 2003. Pratique des manipulations de chimie à l'usage des biologistes. *Techniques et documentation- Lavoisier*: 229-237.
- Samanci B. and Ozkaynak E.** 2003. Effect of planting date on seed yield, oil content and fatty acid composition of safflower (*Carthamus tinctorius*) cultivars grown in the Mediterranean region of Turkey. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 189: 359-360.
- Sarwar M.** 2013. The theatrical usefulness of olive *Olea europaea* L. (Oleaceae Family) nutrition in human health: A Review. *Sky Journal of Medicinal Plant Research*, 2 (1): 1-4.
- Sattler S.E., Gilliland L.U., Magallanes-Lundback M., Pollard M. et Dellapenna D.** 2004. Vitamin E is essential for seed longevity, and for preventing lipid peroxidation during germination. *Plant Cell*. 16: 1419-32.
- Savoire R., Lazouk M.A., Van-Hecke E., Roulard R., Tavernier R., Guillot X., Rhazi L., Petit E., Mesnard F. et Thomasset B.** 2015. Environmental and varietal impact on linseed composition and on oil unidirectional expression process. *OCL*. 22(6) D605.

Références bibliographiques

- Schaeffer A., Bronner R., Benveniste P. et Schaller H.** 2001. The ratio of campesterol to sitosterol that modulates growth in Arabidopsis is controlled by sterol methyltransferase 2;1. *Plant J* 25: 605-615.
- Schaller H., BouvierNave P. et Benveniste P.** 1998. Overexpression of an Arabidopsis cDNA encoding a sterolC24 (1) methyltransferase in tobacco modifies the ratio of 24methylcholesterol to sitosterol and is associated with growth reduction. *Plant Physiol* 118: 461-469.
- Sehgal D., Rajpal V.R., Raina S.N., Tsuneo Sasanuma T. et Sasakuma T.** 2009. Assaying polymorphism at DNA level for genetic diversity diagnostics of the safflower (*Carthamus tinctorius* L.) world germplasm resources. *Genetica*. 135:457-470.
- Serra J.L., Rodrigues A.M.C., Freitas R.A., Meirelles A.J.A., Darnet S.H. et Silva L.H.M.** 2019. Alternative sources of oils and fats from Amazonian plants: Fatty acids, methyl tocols, total carotenoids and chemical composition. *Food Res. Int.* 116: 12-19.
- Seppanen C., Song Q. et Saari Csallany A.** 2010. The antioxidant functions of tocopherol and tocotrienol homologues in oils, fats, and food systems. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 87: 469-481.
- Schaller H.** 2003. The role of sterols in plant growth and development. *Progress in Lipid Research*, 42(3):163-75.
- Shabana R., Abd El Mohsen A.A., Gouda H.A.H. et Hafez H.S.** 2013. Impact of temperature fluctuation on yield and quality traits of different safflower genotypes. *Sci. Res and Rew J.* 1 (3): 74-87.
- Shahidi F.** 2000. Antioxidants in food and food antioxidants. *Nahrung*. 44 (3): 158-163.
- Shim K.B., Bae S.B., Lim S.K. et Suh D.Y.** 2004 Analysis of morphological and genetic diversity of domestic and foreign safflower germplasm. *Sesame Safflower Newsl.* 19: 110-116.
- Shikano I., Shumaker K.L., Peiffer M., Felton G.W. and Hoover K.** 2017. Plant-mediated effects on an insect–pathogen interaction vary with intraspecific genetic variation in plant defences. *Oecologia*, 183, 1121–1134.
- Shirani Rad A.H. et Zandi P.** 2012. Comparison of winter and spring rapeseed cultivars considering their oil content and fatty acid composition. *American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 12 (6): 775-780.
- Shouchun W., Jianxiang F. et Rui Z.** 1993. The research and production of yellow pigment from safflower. Proceedings of the Third International Safflower Conference, Jun. 14-18, Beijing, China, 869-880.
- Sidorov R.A. et Tsydendambaev V.D.** 2014. Biosynthesis of Fatty Oils in Higher Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 61(1): 1-18.

Références bibliographiques

- Siger A., A., Gawrysiak-Witulska M. et Bartkowiak-Broda I.** 2017. Antioxidant (Tocopherol and Canolol) content in rapeseed oil obtained from roasted yellow-seeded *Brassica napus*. *J Am Oil Chem Soc.* 94(1): 37-46.
- Sims R.A., Mc Gregor W.G., Plessers A.G. et Mes J.C.** 1961. Lipid changes in maturing oil bearing plants. II. Changes in fatty acid composition of flax and safflower seed oils. *J Am Oil Chem Soc.* 38(6): 276-279.
- Singh S., Gupta A.K. et Kaur N.** 2012. Influence of Drought and Sowing Time on Protein Composition, Antinutrients, and Mineral Contents of Wheat. *The Scientific World Journal*, 2012. 1-9.
- Singhal G., Singh P., Bhagyawant S.S. et Srivastava N.** 2018. Anti-nutritional factors in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seeds and their pharmaceutical applications. *Int. J. Rec. Sci. Res.* 9: 28859-28864.
- Slabas A.R. et Fawcett T.** 1992. The biochemistry and molecular biology of plant lipid biosynthesis. *Plant Molecular Biology*, 19: 169-191.
- Slack C.R., Roughan J.A., Browse J.A. et Gardiner S.E.** 1985. some properties of cholinephosphotransferase from developinf safflower cotyledone. *Biochi. Biophy. Acta*, 833:438-448
- Smith J.R.** 1996a. Safflower. AOCS. P592.
- Smith J.R.** 1996b. Safflower. AOCS Press, Champaign, IL, USA. 624p.
- Song W., Yang R., Wu T., Wu C., Sun S., Zhang S., Jiang B., Tian S., Liu X. et Han T.** 2016. Analyzing the effects of climate factors on soybean protein, oil contents, and composition by extensive and high-density sampling in China. *J. Agric. Food Chem.* 64(20): 4121-4130.
- Stagnari F., Galieni A. et Pisante, M.** 2016. Drought stress effects on crop quality. *Water Stress and Crop Plants*, 375-392.
- Stefanoudaki E., Williams M., Chartzoulakis K. et Harwood J.** 2009. Olive oil qualitative parameters after orchard Irrigation with Saline Water. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(4):1421-1425
- Stumpf P.K. et Conn E.E.** (eds) The Biochemistry of Plants. Lipids: Structure and Rmction. vol 9, pp. 121-136. Academic Press (1987).
- Stymne S. et Stobart A.K.** 1987. Triacylglycerol biosynthesis. In PK Stumpf, ed, The Biochemistry of Plants: A Comprehensive Treatise, Vol 9, Lipids: Structure and Function. Academic Press, New York, pp 175-214.
- Sultan S.M., Dikshit N. et Umesh et Vaidya J.** 2015. Oil content and fatty acid composition of soybean (*Glysine max* L.) genotypes evaluated under rainfed conditions of Kashmir Himalayas in India. *Journal of Applied and Natural Science*, 7 (2): 910-915.
- Sung J., Jeong Y., Kim S., Luitel B.P., Ko H., Hur O., Yoon M., Rhee J., Baek H. et Ryu K.** 2016a. Fatty acid composition and antioxidant activity in safflower germplasm collected from south Asia and Africa. *J. Korean Soc. Int. Agric.* 28: 342-351.

Références bibliographiques

- Sung J.S., Ko H.C., Hur O.S., Kim S.G., Lee J.R., Luitel B.P., Lee Y.H. et al.** 2016b. Morphological and oil compositions in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) germplasm of different geographical groups. *J Korean Soc Int Agri* 28: 84-91.
- Surma M.A., Klose C., Peng D., Shales M., Mrejen C., Stefanko A., Braberg H., Gordon D.E., Vorkel D., Ejsing C.S., Farese R.J., Simons K., Krogan N.J. et Ernst R.** 2013. A lipid E-MAP identifies Ubx2 as a critical regulator of lipid saturation and lipid bilayer stress. *Mol Cell*.51(4):519-530.
- Taha E. et Matthäus B.** 2018. Study of safflower varieties cultivated under southern Egypt conditions for seeds and flowers. *J. Biol. Sci.* 18 (2): 74-83.
- Takayanagi K. et Mukai K.** 2014. Chapter 34-Beta-Cryptoxanthin, a novel carotenoid derived from satsuma mandarin, prevents abdominal obesity. In: Nutrition in the prevention and treatment of abdominal obesity. ed. R.R. Watson. Burlington: Elsevier Science.381-399.
- Takii T., Hayashi M., Hiroyuki H., Chiba S., Kawashima H., Zhang L. et al.** 1999. Serotonin derivative, N-(p-coumaryl) serotonin, isolated from safflower (*carthamus tinctorius* L.) oil cake augments the proliferation of normal human and mouse fibroblasts in synergy with basic fibroblast growth factor (FGF) or epidermal growth factor (EGF). *J. Biochem.* 125, 910.
- Talapatra S.K. et Talapatra B.** 2015. Shikimic acid pathway. Chemistry of plant natural: Stereochemistry, conformation, synthesis, biology and medicine. Springer Berlin Heidelberg. 625-678.
- Tan A.S. et Kaya Y.** 2019. Sunflower (*Helianthus annuus* L.) genetic resources, production and researches in Turkey. *OCL*, 26, 21.
- Tahmasebizadeh H., Khodabandeh N., Madani L. et Farahani A.** 2008. Surveying the analysis of spring safflower growth and its effect on the performance in Weathers conditions of Arak. *The new Findings Agriculture* 3 (2): 136-154.
- Tapia-Hernández J.A., Rodríguez-Felix F., Juárez-Onofre J.E., RuizCruz S., Robles-García M.A., Borboa-Flores J., Wong-Corral F.J., Cinco-Moroyoqui F.J., Castro-Enríquez D.D. and Del-Toro-Sánchez C.L.** 2018. Zein-polysaccharide nanoparticles as matrices for antioxidant compounds: A strategy for prevention of chronic degenerative diseases. *Food Research International*, 111: 451-471
- Thierfelder C., Cheesman S. et Rusinamhodzi, L.** 2013. Benefits and challenges of crop rotations in maize-based conservation agriculture (CA) cropping systems of southern Africa. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 11(2): 108-124.
- Thoday-Kennedy E., Joshi S., Daetwyler H.D., Hayden M., Hudson D., Spangenberg G. and Kant S.** 2021. Digital Phenotyping to Delineate Salinity Response in Safflower Genotypes. *Frontiers in Plant Science*.12, 662498.
- Thomas T.P., Birney D.M. et Auld D.L.** 2012. Viscosity reduction of castor oil esters by the addition of diesel, safflower oil esters and additives. *Industrial Crops and Products*, 36(1), 267-270.
- Tiril S.U. et Kerim M.** 2015. Evaluation of safflower meal as a protein source in diets of rainbow trout [*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum, 1792]. *J. Appl. Ichthyol.* 31: 895-899.

Références bibliographiques

- Tomar S.S.** 1995. Effect of soil hydrothermal regimes on the performance of safflower planted in different dates. *J Agron Crop Sci*, 175: 141-152.
- Tonguç M. et Erbaş S.** 2012. Evaluation of fatty acid compositions and some seed characters of common wild plant species of Turkey. *Turk. J. Agric. For.* 36(6): 673-679.
- Toosi A.F. et Azizi M.** 2015. Study of safflower cultivars yield and yield components under different supplementary irrigation conditions. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, LVIII : 198-200.
- Traber M.G. et Atkinson J.** 2007. Vitamin E, antioxidant and nothing more. *Free Radic. Biol. Med.* 43: 4-15.
- Tripathi R. et Agrawal S.B.** 2013. Interactive effect of supplemented ultraviolet B and elevated ozone on seed yield and oil quality of two cultivars of linseed (*Linum usitatissimum* L.) carried out in open top chambers. *J. Sci. Food Agric.* 93: 1016-1025.
- Uitterhaegen E., Sampaio K.A., Delbeke E.I.P., De Greyt W., Cerny M., Evon P., Merah O., Talou T. et Stevens C.V.** 2016. Characterization of french coriander oil as source of petroselinic acid. *Molecules*, 21, 1202.
- Ulloa J.A. Rosas-Ulloa P. et Ulloa-Rangel B.E.** 2011. Physicochemical and functional properties of a protein isolate produced from safflower (*Carthamus tinctorius* L.) meal by ultrafiltration. *J. Sci. Food Agric.* 91: 572-577.
- Valsta L.M., Lemstrom A., Ovaskainen M.L., Lampi A.M., Toivo J., Korhonen T. et Piironen V.** 2004. Estimation of plant sterol and cholesterol intake in Finland: quality of new values and their effect on intake. *British Journal of Nutrition*, 92(4): 671-678.
- Vanegas J.L., Carro M.D., Alvir M.R. et González J.** 2016. Protection of sunflower seed and sunflower meal protein with malic acid and heat: effects on in vitro ruminal fermentation and methane production. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(1): 350-356.
- Vavilov N.I.** 1951. The Origin, variation, immunity and breeding of cultivated plants. Ronald Press Company, New York, 364 p.
- Velasco L. et Fernández-Martínez J.** Breeding for oil quality in Safflower. In Proceedings of the 5th International Safflower Conference, Williston, ND, USA, 23–27 July 2001; North Dakota State University: Fargo, ND, USA, 2001; pp. 133-137.
- Velasco J. et Dobarganes C.** 2002. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 104 (9-10): 661-676.
- Velasco L. et Fernandez-Martinez J.M.** 2002. Breeding oilseed crops for improved oil quality. *J. Crop Prod.* 5: 309-344.

Références bibliographiques

- Velasco L., Fernández-Martínez J.M., García-Ruíz R. et Domínguez J.** 2002. Genetic and environmental variation for tocopherol content and composition in sunflower commercial hybrids. *The Journal of Agricultural Science*, 139 (4): 425-429.
- Velasco L, Fernández-Cuesta Á et Fernández-Martínez J.M.** 2014. New sunflower seeds with high contents of phytostérols. Varietal selection of oilseeds: the prospective nutritional and technological benefits. *OCL*. 21(6) D604.
- Vlahakis C. et Hazebroek J.** 2000. Phytosterol accumulation in canola, sunflower, and soybean oils: Effects of genetics, planting location, and temperature. *J Amer Oil Chem Soc.* 77: 49-53.
- Vorpsi V., Harizaj F., Bardhi N., Vladi V. et Dodona E.** 2010. *Carthamus tinctorius* L., the quality of safflower seeds cultivated in albania. *Res J of Agri Sci.* 42 (1): 326-331.
- Vosoughkia M., Ghavamib M., Gharachorloo M., Sharrifmoghaddasi M et Omidi A.H.** 2011. Lipid Composition and Oxidative Stability of Oils in Safflower (*Carthamus Tinctorius* L.) Seed Varieties Grown in Iran. *Advances in Environmental Biology*, 5(5): 897-902.
- Waha K., Krummenauer L., Adams S., Aich V., Baarsch F., Coumou D., Fader, M., Hoff, H. et al.** 2017. Climate change impacts in the Middle East and Northern Africa (MENA) region and their implications for vulnerable population groups. *Reg Environ Change.* 17:1623-1638.
- Wang J., Yuan B. et Huang B.** 2019. Differential heat-induced changes in phenolic acids associated with genotypic variations in heat tolerance for hard fescue. *Crop Sci.* 59: 667-674.
- Waseem S., Imadi S.R., Gul A. et Ahmad, P.** 2017. Oilseed crops: Present scenario and future prospects. Yield and adaptations under environmental stress, First Edition. P18.
- Wei H., Xu C., Movahedi A., Sun W., Li D. and Zhuge Q.** 2019. Characterization and Function of 3-Hydroxy-3-Methylglutaryl-CoA Reductase in *Populus trichocarpa*: Overexpression of PtHMGR Enhances Terpenoids in Transgenic Poplar. *Front. Plant Sci.* 10:1476.
- Weiss E.A.** 1983. Oilseed Crops. Chapter 6. Safflower. Longman Group Limited, Longman House, London, UK. Pp. 216-281.
- Weiss E.A.** 2000. Safflower. In: Oilseed crops. Blackwell Science, Oxford, 93-129.
- Weselake R.J., Taylor D.C., Rahman M.H. et al.** 2009. Increasing the flow of carbon into seed oil. *Biotechnol Adv.* 27 : 866-78.
- Winkel-Shirley B.** 2002. Biosynthesis of flavonoids and effects of stress. *Current Opinion in Plant Biology*, 5: 218-223.
- Wittenauer J., Mäckle S., Sußmann D., Schweiggert-Weisz U. et Carle R.** 2015. Inhibitory effects of polyphenols from grape pomace extract on collagenase and elastase activity. *Fitoterapia*, 101: 179-187.
- Wood C.C., Okada S., Taylor M.C., Menon A., Mathew A., Cullerne D. et al.** 2018. Seed-specific RNAi in safflower generates a superhigh oleic oil with extended oxidative stability. *Plant Biotechnology Journal*, 16(10).

Références bibliographiques

- Wouters J., Grzywacz C.M. and Claro A.** 2010. Markers for identification of faded Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) colorants by HPLC-PDA-MS - Ancient fibres, pigments, paints and cosmetics derived from antique recipes. *Stud. Conserv.* 55: 186-203.
- Wrigley C., Corke H., Seetharaman K. et Faubion J.** 2016. Encyclopedia of food grains. Ed2. The world of food grains. Vol 1. UK.
- Wu S., Yu Y., Tian H., Li Z., Li X., He W. et Ding H.** 2013. Carthamus red from *Carthamus tinctorius* L. exerts antioxidant and hepatoprotective effect against CCl₄-induced liver damage in rats via the Nrf2 pathway. *J Ethnopharmacol.* 148(2): 570-578.
- Xuan T.D., Gangqiang G., Minh T.N., Quy T.N. et Khanh T.D.** 2018. An Overview of chemical profiles, antioxidant and antimicrobial activities of commercial vegetable edible oils marketed in Japan. *Foods*, 7, 21.
- Yadava R. et Chakravarti N.** 2008. Anti-Inflammatory activity of a new triterpenoid saponin from *carthamus tinctorius* linn. *J. Enzym. Inhib. Med. Chem.* 23, 543–548.
- Yaginuma S., Shiraishi T., Ohya H. et Igarashi K.** 2002. Polyphenol increases in safflower and cucumber seedlings exposed to strong visible light with limited water. *Biosci. Biotech. Biochem.* 66(1):65-72.
- Yau S.K.** 2007. Winter versus spring sowing of rain-fed safflower in a semi-arid, high-elevation Mediterranean environment. *Eur. J. Agron.* 26: 249-256.
- Yeilaghi H., Arzani A., Ghaderian M., Fotovat R., Feizi M. et Pourdard S.S.** 2012. Effect of salinity on seed oil content and fatty acid composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes. *Food Chem.* 130: 618-625.
- Yeloojeh A.K., Saeidi G. et Sabzalian M.R.** 2020. Drought stress improves the composition of secondary metabolites in safflower flower at the expense of reduction in seed yield and oil content. *Industrial Crops and Products*, 154, 112496.
- Yesilyurt M.K., Cesur C., Aslan V. et Yilbasi Z.** 2019. The production of biodiesel from safflower (*Carthamus tinctorius* L.) oil as a potential feedstock and its usage in compression ignition engine: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109574
- Youle R.J. et Huang A.H.C.** 1978. Album in storage proteins in the protein bodies of castor bean. *Plant Physiol.* 61: 13-16.
- Yu S.Y., LeeY.J., Kim J.D., Kang S.N., Lee, S.K., Jang J.Y., Lee H.K., Lim J.H. et Lee O.H.** 2013. Phenolic composition, antioxidant activity and anti-adipogenic effect of hot water extract from safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seed. *Nutrients*, 5: 4894-4907.
- Zanetta C.U., Waluyo B., Rachmadi M. et Karuniawan A.** 2015. Oil content and potential region for cultivation black soybean in java as biofuel alternative. *Energy Procedia* 65: 29-35.
- Zangenberg M., Hansen H.B., Jorgensen J.R. et Hellgren L.I.** 2004. Cultivar and year-to-year variation of phytostérols content in rye (*Secale cereale* L.). *J Agric Food Chem.* 52 : 2593-7.

Références bibliographiques

- Zengin G., Locatelli M., Carradori S., Mocan A.M. et Aktumsek A.** 2016. Total phenolics, flavonoids, condensed tannins content of eight centaurea species and their broad inhibitory activities against cholinesterase, tyrosinase, α -amylase and α -glucosidase. *Not Bot Horti Agrobo.* 44(1):195-200.
- Zhang J.H., Huang W.D., Liu Y.P. et Pan Q.H.** 2005. Effects of temperature acclimation pretreatment on the ultrastructure of mesophyll cells in young grape plants (*Vitis vinifera* L. cv. Jingxiu) under cross-temperature stresses. *J. Integr. Plant Biol.* 47, 959-970.
- Zhang Y., Maximova S.N. et Gultinan M.J.** 2015. Characterization of a stearyl-acyl carrier protein désaturase gene family from chocolate tree, *Theobroma cacao* L. *Frontiers in Plant Science*, 6: 239.
- Zhang L., Zhou C., Wang B., Yagoub A.E.G.A., Ma H., Zhang X. et al.** 2017. Study of ultrasonic cavitation during extraction of the peanut oil at varying frequencies. *Ultrasonics Sonochemistry*, 37, 106-113.
- Zhaomu W. et Lijie D.** 2001. Current situation and prospects of safflower products development in China. In: Proceedings of the 5th International Safflower Conference, Williston, ND, and Sidney, MT, July 23-27, 2001. Bergman, J.W. and Mündel, H. H. (Eds.), pp. 315-319.
- Žilić S., Maksimović Dragišić J., Maksimović V., Maksimović, M., Basić Z., Crevar M. et Stanković, G.** 2010. The content of antioxidants in sunflower seed and kernel. *HELIA*, 33 (52): 75-84.
- Zlatanov M.D., Antova G.A., Angelova-Romova M.J., Momchilova S.M., Dimitrova R.D. et Marcheva M.** 2015. Detailed characterization of lipids in safflower varieties grown in Bulgaria. *La rivista italiana delle sostanze grasse*, 92 :10 p.
- Zohary D. et Hopf M.** 2000. Domestication of plants in the old world: The origin and spread of cultivated plants in West Asia, Europe and the Nile Valley. Oxford University Press, Oxford, UK.

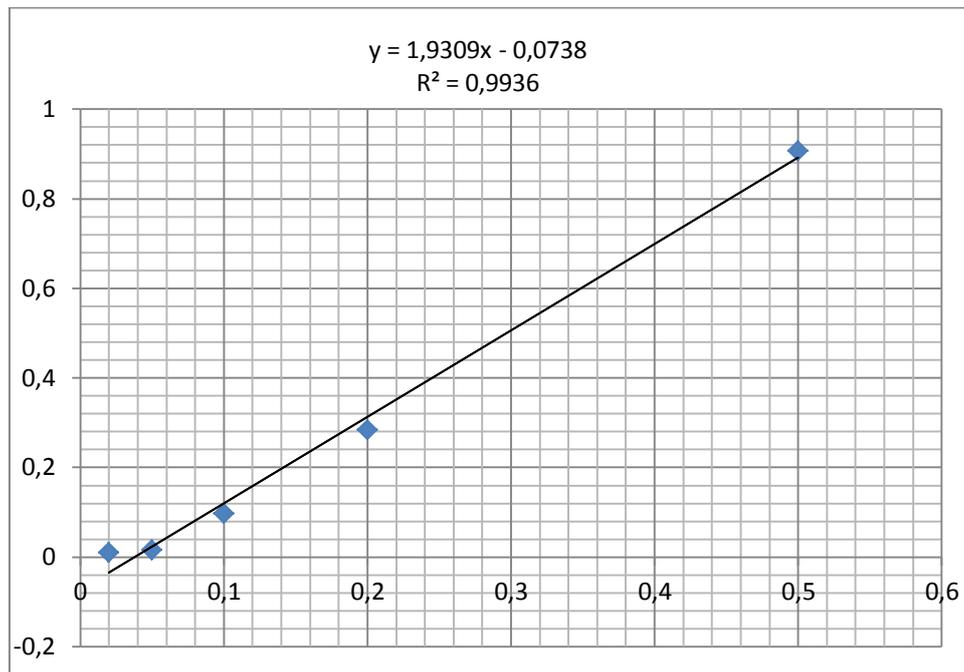


Figure.1a. Courbe d'étalonnage des polyphénols

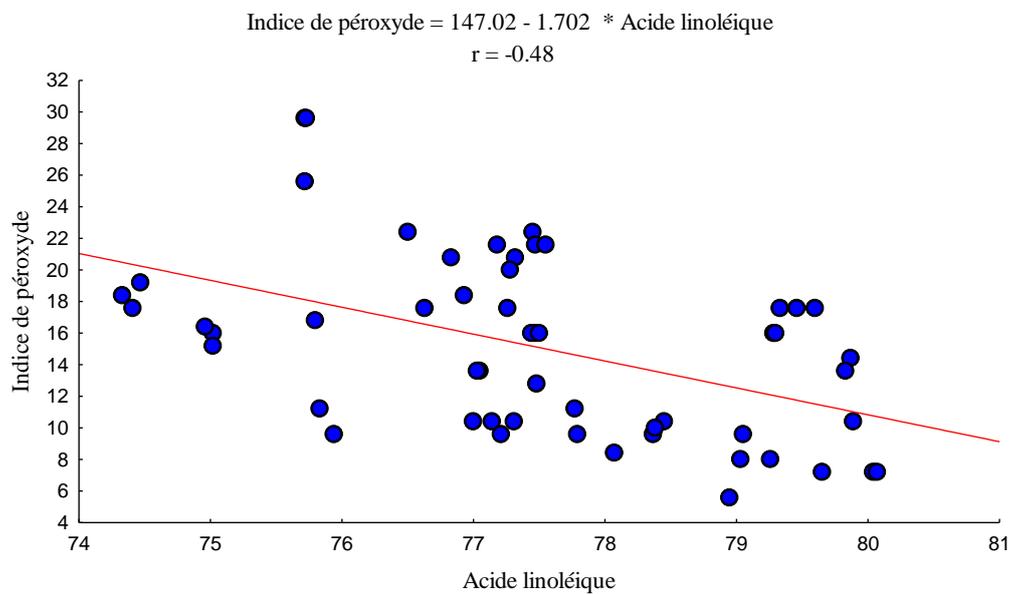


Figure.2a. Corrélation entre l'indice de peroxyde et l'acide linoléique.

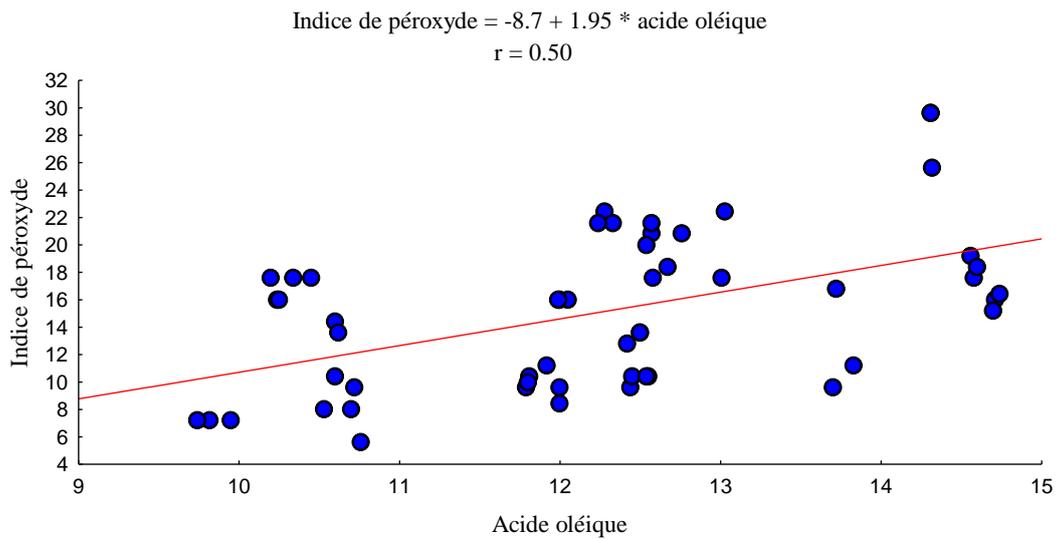


Figure.3a. Corrélation entre l'indice de peroxyde et l'acide oléique.

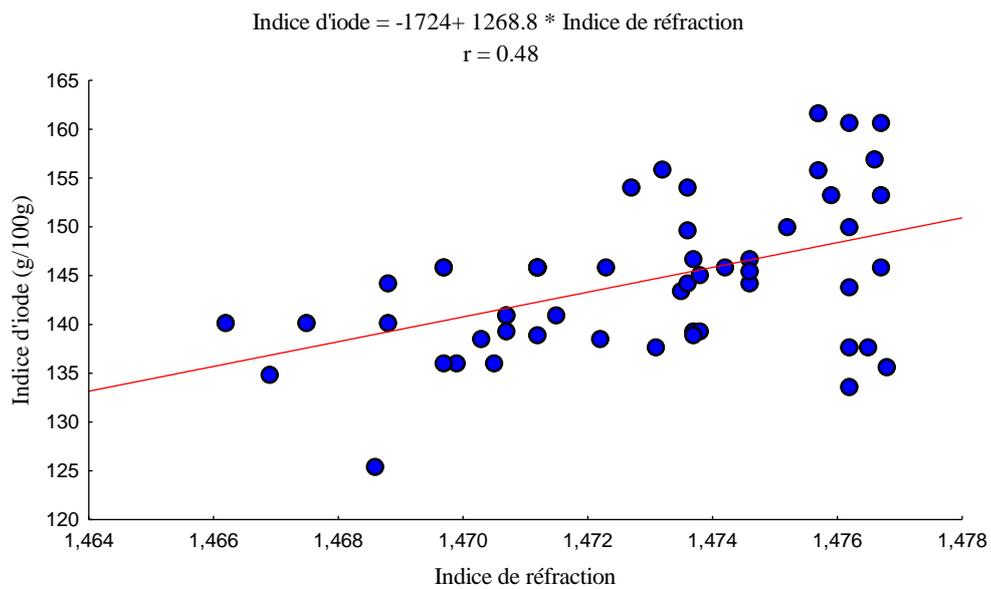


Figure.4a. Corrélation entre l'indice d'iode et l'indice de réfraction.

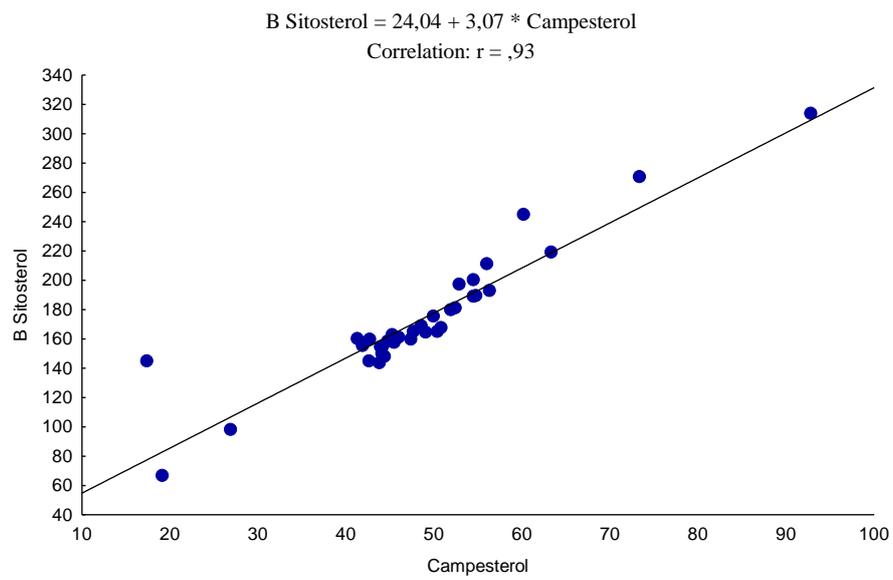


Figure.7a. Corrélation entre β -Sitostérol et campestérol.

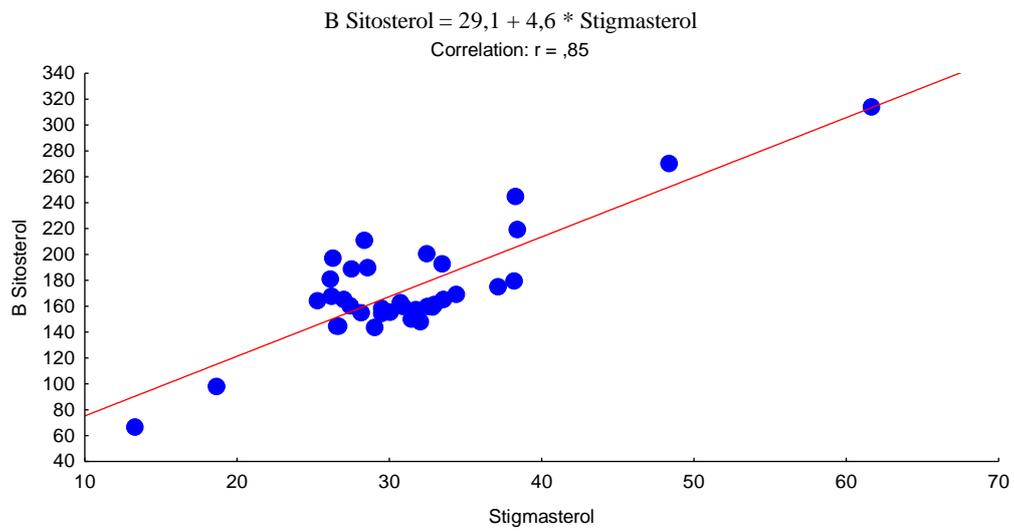


Figure.8a. Corrélation entre β -Sitostérol et stigmasterol.

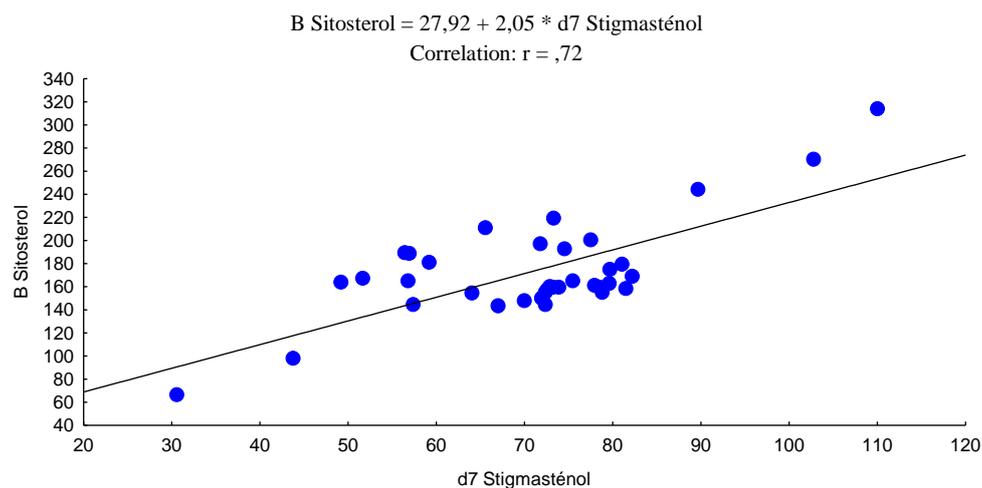


Figure.9a. Corrélation entre β -Sitostérol et $\Delta 7$ stigmastérol.

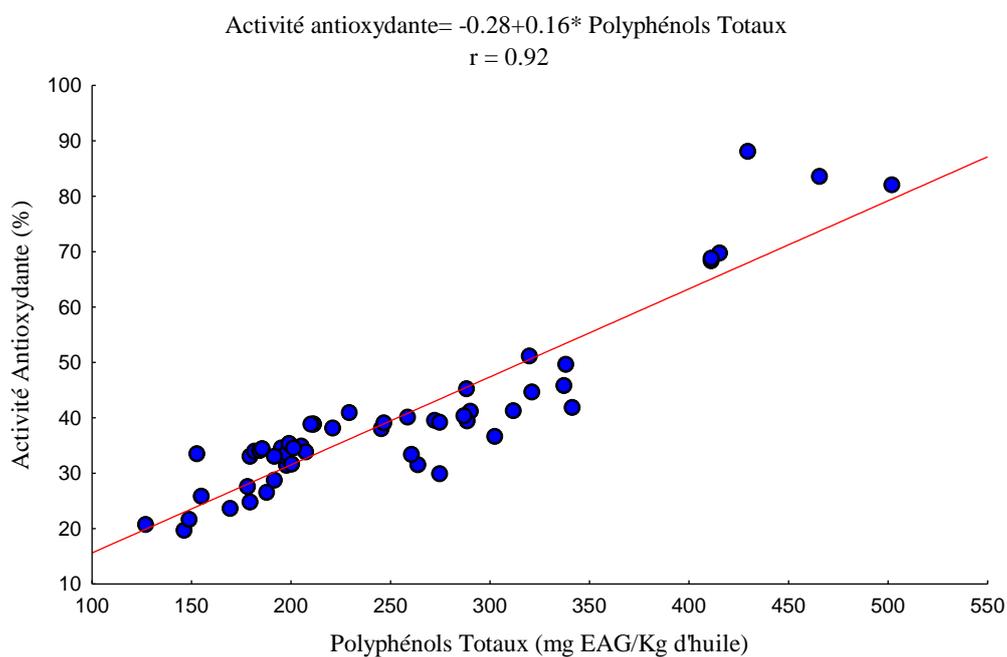


Figure.10a. Corrélation entre les polyphénols totaux et l'activité antioxydante de trois génotypes et au cours de trois années de culture (2015, 2016, 2017) sous deux régimes hydriques (Irrigué, Sec).

Préparation de solutions pour le dosage des protéines du tourteau

➤ **Préparation de l'acide borique**

Dissoudre 10g acide borique dans environ 700ml d'eau distillée (sous agitation magnétique et en chauffant légèrement à ~50°C). Une fois l'acide borique dissout, et après refroidissement 10ml vert de bromocrésol et 7ml rouge de méthyle ont été y ajouté puis compléter jusqu'à 1L avec de l'eau distillée.

➤ **Solution de vert de bromocrésol**

Mélanger 100mg de vert de bromocrésol en poudre dans 100 ml de méthanol.

➤ **Solution de rouge de méthyle**

Mélanger 100mg de rouge de méthyle en poudre dans 100 ml méthanol.

➤ **Soude à 40%**

Dissoudre 800g de soude dans 1500ml d'eau distillé dans un bécher en plastique ou en verre. La réaction étant exothermique, penser à entourer le bécher de glace. Quand toute la soude est dissoute, transférer le mélange dans une fiole, et compléter jusqu'à 2l avec de l'eau distillée.

➤ **Solution d'acide chlorhydrique à 0.1 N**

Diluer 9ml d'acide chlorhydrique à 37% dans 1L d'eau distillée. Titrer exactement la solution à l'aide de borate de sodium décahydraté (ou borax) dissout dans 15 à 20ml d'eau distillée et coloré par du rouge de méthyle.

$$T_{\text{HCl}} = \frac{2 * M_{\text{borax}} * 1000}{M_{\text{borax}} * V_{\text{eq}}}$$

Article

Effects of Genotype and Climatic Conditions on the Oil Content and Its Fatty Acids Composition of *Carthamus tinctorius* L. Seeds

Kamel Zemour ^{1,2}, Ahmed Adda ², Amina Labdelli ^{2,3}, Abdelkader Dellal ², Muriel Cerny ¹ and Othmane Merah ^{1,4,*}

- ¹ Laboratoire de Chimie Agroindustrielle, Université de Toulouse, INRAE, 31030 Toulouse, France; kamel.zemour@ensiacet.fr (K.Z.); muriel.cerny@ensiacet.fr (M.C.)
- ² Laboratory of Agro-Biotechnology and Nutrition in Semi-Arid Areas, University of Ibn Khaldoun, Tiaret 14000, Algeria; addaZahmed@yahoo.fr (A.A.); aminalabdelli@yahoo.fr (A.L.); dellal05_aek@yahoo.fr (A.D.)
- ³ Scientific and Technical Research Centre for Arid Areas (CRSTRA), Biskra 07000, Algeria
- ⁴ Département Génie Biologique, Université Paul Sabatier, IUT A, 32000 Auch, France
- * Correspondence: othmane.merah@ensiacet.fr; Tel.: +33-53-432-3523

Citation: Zemour, K.; Adda, A.; Labdelli, A.; Dellal, A.; Cerny, M.; Merah, O. Effects of Genotype and Climatic Conditions on the Oil Content and Its Fatty Acids Composition of *Carthamus tinctorius* L. Seeds. *Agronomy* **2021**, *11*, 2048. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102048>

Academic Editor: Tahmina Islam

Received: 12 September 2021

Accepted: 9 October 2021

Published: 12 October 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Safflower seeds provide an oil rich in mono and polyunsaturated fatty acids. Its adaptation to drought and high temperatures makes it an alternative for the development of oleaginous crops in semi-arid areas. This study examines the oil content and the chemical composition of seed oil from three safflower accessions (Gila, Halab, Touggourt) cultivated over three years (2015, 2016, and 2017) in a semi-arid area in Tiaret (West of Algeria). Under these semi-arid conditions, characterized by low rainfall and high temperatures, seed oil content remained relatively high and was composed mainly of unsaturated fatty acids, with their ratio to saturated fatty acids reaching an average value of 9. Seed oil content varies between 22.8% and 28.4% among the genotypes and throughout the three years. The extracted oil consists essentially of unsaturated fatty acids, linoleic and oleic acids, poly and monounsaturated, respectively. Their contents over the three years vary between 75% and 79.3% for linoleic acid and between 10.2% and 14.7% for oleic acid. The saturated fatty acids content of the oil reached a maximum value of 9%. They consist mainly of palmitic acid, of which the average genotypic content varies between 6.6% and 7.15% depending on all grown years. The results obtained may assist in better understanding the response of cultivars under rain-fed conditions and could be helpful for breeders with regards to introduction into selection programs.

Keywords: safflower; achene; semi-arid; oil; fatty acids

1. Introduction

Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) is an asteracea, considered one of the oldest domesticated crops [1]. It originates from the Asian Fertile Crescent [2,3]. It presents an economic and medicinal interest for its seed oil and its flowers extract [4–6] and its place in the concept of biorefinery is undeniable [5,7]. Benefits of using safflower oil in food, pharmaceutical, and cosmetic applications have been demonstrated by several studies [8–11]. Its importance is mainly justified by its richness in unsaturated fatty acids, in particular oleic and linoleic acids [12]. Furthermore, linoleic acid represents a major unsaturated fatty acid in safflower oil, reaching a level of up to 88%. However, other cultivars of this species show a high acid oleic content of up to 90.60% [13]. Oleic acid is characterized by a high single point of unsaturation which represents an attractive characteristic for industry due to the large range of potential chemical products. Oleic-rich safflower oil can be

used in the production of varnishes, alcohols, paints, lubricants, cosmetics, detergents, and bio-based plastics [14]. Likewise, safflower oil is distinguished by its richness in polyphenols, phytosterols, and tocopherols [12,15,16].

Safflower is known for its high adaptation to drought and high temperatures [12,15,17,18]. Therefore, its introduction in semi-arid regions would constitute an alternative in the development of oilseed crops. The effectiveness of this strategy necessarily requires studies to evaluate the effects of this environment on the profitability of the crop and the quality of the oil supplied. The results of work carried out under some of these conditions show that drought, associated with high temperatures, during the filling of the safflower grain reduces its oil content and modifies its composition [12,19–23]. The latter effect is reflected in a reduction of unsaturated fatty acids, particularly linoleic acid [12,24–26] and enrichment of the oil in polyphenols and phytosterols [12,15]. However, these studies require further investigation and must focus on effects of interactions of safflower genetic variability and climatic conditions on the oil biochemical traits. In the present study, these effects were estimated in Tiaret, located in the semi-arid zones of Algeria. For this purpose, three safflower accessions of different origins were grown for three years under rainfed conditions and the oil content of the seeds and its biochemical characteristics were estimated. An evaluation of the variations of these parameters according to the climatic conditions during the years of culture was the concern of this work.

2. Materials and Methods

2.1. Plant Material and Experiments Conducting

Three safflower accessions from different geographic origins were used for this study (Table 1). Experiments were carried out in clay-loam soil during three consecutive years (2015, 2016, 2017) under rainfed conditions at the experimental farm of Ibn Khaldoun University of Tiaret (35°20'01" N, 1°18'48" E) at 300 Km in West of Algiers (Algeria). The design adopted is made up of three blocks. In each block the genotype is randomly arranged and occupies a microplot of 14 m². The sowing was carried out in mid-April in rows spaced 0.3 m apart, in 11 rows with 4 m of each row length. In order to avoid edge effects, we used only the nine internal rows for measurements.

Table 1. Origins and main characteristics of the used safflower accessions.

| Accession | Origin | Flower Colour | Leaf Aspect | Precocity of Maturity |
|-----------|---------|---------------|----------------|-----------------------|
| Touggourt | Algeria | Y,R | Without thorns | Late |
| Gila | France | W,Y,R | With thorns | Early |
| Halab | Syria | Y,R | With thorns | Early |

Y: yellow; W: white; R: red.

The climatic data relating to the monthly average temperature in °C and the monthly rainfall in mm were recorded by meteorological station.

2.2. Measurements Performed

The harvest was carried out at the beginning of September at the physiological maturity of the seeds according to the BBCH scale [27]. Seeds were stored away from moisture and light until the start of measurements.

2.2.1. Oil Extraction

The oil was extracted using a Soxhlet apparatus [15]. This operation consists in using an organic solvent (cyclohexane) on a ground seed (20 g) for 6 h with a ratio of 1:10 (P:V). The solvent containing the oil is removed using a rotary evaporator at a temperature of 45

°C. The extracted oil is recovered in flasks and stored in the dark at a temperature of 4 °C. The oil content is determined by:

$$\text{Oil content (\%)} = \frac{W_2 * 100}{W_1}$$

where:

W1 is the initial weight of ground seed

W2 is the weight of extracted oil.

2.2.2. Determination of Fatty Acid Composition (GC Analysis)

The method for analyzing the fatty acid composition is the same adopted by Roche et al. [28]. An aliquot of 20 mg of oil is solubilized in 1 mL of Terbutyl methyl ether (TBME). After slight agitation, 100 µL are taken and transferred to a suitable insert for transesterification by addition of 50 µL of Trimethylsulfonium hydroxide (TMSH). This transesterification reaction takes place at the time of injection. The analyses were carried out with a gas chromatograph (Varian3900, Palo Alto, Milpitas, CA, USA). The temperature is programmed at 185 °C for 40 min, then raised to 250 °C with a frequency of 15 °C/min and maintained there for 10.68 min. The temperature of the injector and detector is set at 250 °C. The pressure of the helium gas is 200 kPa.

2.3. Statistical Analysis

Statistical analyses were performed using Statistica software (version 8.0, USA). An analysis of variance and Fichier test were used to determine the effects of crop year, genotype, and the effect of their interaction on the content and fatty acids composition of the extracted oil. Means comparisons were performed using Newman–Keuls test at $p < 0.05$ probability.

3. Results

3.1. Climatic Parameters of the Experimentation Period

The climatic parameters recorded during the three years of experimentation are mentioned in Table 2. The rainfall and temperature recorded during the three seasons were variable (Table 2). The first year (2015) was rainier than the other two. In addition, rainfall during the seed filling phase (June–August) was higher in the second year with a total of 38.1 mm, while it was only 10.7 mm and 9.5 mm in 2016 and 2017, respectively. During this period of the year, the average temperature reached 24.12 °C (2015), 23.84 °C (2016), and 25.25 °C (2017).

Table 2. Climatic data for the three years (2015, 2016, 2017) in Tiaret.

| Month | 2014–2015 | | 2015–2016 | | 2016–2017 | |
|-----------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|
| | T °C Mean | Rainfall (mm) | T °C Mean | Rainfall (mm) | T °C Mean | Rainfall (mm) |
| September | 22.88 | 75 | 21.39 | 18.7 | 21.37 | 4 |
| October | 18.07 | 14 | 17.14 | 83.9 | 18.52 | 8 |
| November | 12.22 | 50.1 | 10.29 | 26.2 | 9.63 | 53.8 |
| December | 6.27 | 94.8 | 8.48 | 0 | 6.55 | 30.1 |
| January | 6.2 | 50.7 | 8.52 | 39.6 | 3.98 | 201.8 |
| February | 4.91 | 121.2 | 8.64 | 62.7 | 9.03 | 9.8 |
| March | 8.7 | 7.7 | 8 | 88.3 | 10.05 | 4 |
| April | 15.3 | 0.0 | 12.8 | 24.6 | 13.0 | 6.8 |
| May | 19.2 | 12.7 | 16.4 | 26.7 | 19.8 | 26.0 |
| June | 21.1 | 7.4 | 21.7 | 6.5 | 25.2 | 0.4 |
| July | 27.0 | 0.0 | 26.7 | 0.2 | 26.8 | 1.0 |
| August | 27.0 | 12.0 | 25.6 | 0.0 | 27.7 | 4.8 |
| Mean | 15.7 | -- | 15.5 | -- | 16 | -- |
| Total | -- | 445.6 | -- | 377.4 | -- | 350.5 |

3.2. Oil Content

The seeds oil content varies significantly depending on accessions (Table 3). The mean values were 28.4, 25.1, and 23.1% for Halab, Gila and Touggourt genotypes in 2015, respectively. For 2016, an increase in the oil content was recorded by Gila and Touggourt, while, for Halab oil content decreased slightly (Table 4). In contrast, in 2017, a marked decrease in oil content was registered in all genotypes (Table 4).

Table 3. Effect of accession, year and their interaction on the oil content and fatty acid composition of safflower seeds during 2015, 2016, and 2017 cultivated in Tiaret.

| Factor | Df | Oil Content | C18:2n6 | C18:1n9 | C18:0 | C16:0 | C18:1n7 | C20:0 | C22:0 | UFA | SFA | UFA/SFA |
|----------------|----|-------------|----------|------------|-----------|---------|----------|------------|------------|---------|--------|---------|
| Accession | 2 | 5.87 * | 267 *** | 497.5 *** | 24.0 *** | 17 *** | 11.5 *** | 41.44 *** | 7.00 *** | 29 *** | 23 *** | 25 *** |
| Year | 2 | 3.35 ns | 1293 *** | 2691.9 *** | 220.9 *** | 443 *** | 38.4 *** | 127.44 *** | 679.15 *** | 164 *** | 88 *** | 95 *** |
| Accession*Year | 4 | 0.68 ns | 641 *** | 971 *** | 145.6 *** | 31 *** | 38.1 *** | 22.11 *** | 7.92 *** | 36 *** | 25 *** | 27 *** |

C18:2n6 (Linoleic acid); C18:1n9 (Oleic acid); C18:0 (Stearic acid); C16:0 (Palmitic acid); C18:1n7 (Vaccenic acid); C20:0 (Arachidic acid); C22:0 (Behenic acid); UFA (Unsaturated Fatty acid); SFA (Saturated Fatty acid). * significant at $p < 0.05$; *** significant at $p < 0.001$; ns (not significant at $p > 0.05$).

Table 4. Oil content and its composition of saturated and polyunsaturated fatty acids in three safflower accessions during 2015, 2016, and 2017 in Tiaret.

| | Year | 2015 | | | 2016 | | | 2017 | | |
|---------------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Accession | Halab | Gila | Touggourt | Halab | Gila | Touggourt | Halab | Gila | Touggourt |
| | Oil Content (%) | 28.4 ± 0.17 a | 25.1 ± 3.02 a | 23.1 ± 1.81 a | 27.8 ± 0.90 a | 27.5 ± 0.26 a | 26.4 ± 1.13 a | 26.9 ± 0.09 b | 23.9 ± 0.12 a | 22.8 ± 0.60 a |
| Saturated Fatty Acids (%) | C16:0 | 6.9 ± 0.0 a | 7.0 ± 0.02 b | 7.15 ± 0.00 c | 7.0 ± 0.03 a | 7.0 ± 0.01 a | 7.0 ± 0.01 a | 6.7 ± 0.02 a | 6.6 ± 0.03 b | 6.7 ± 0.00 a |
| | C18:0 | 2.2 ± 0.01 c | 2.1 ± 0.02 b | 1.9 ± 0.00 a | 1.9 ± 0.02 a | 1.8 ± 0.01 b | 1.9 ± 0.01 a | 1.9 ± 0.00 a | 1.9 ± 0.00 a | 2.1 ± 0.00 b |
| | C20:0 | 0.33 ± 0.01 a | 0.32 ± 0.0 a | 0.28 ± 0.0 b | 0.33 ± 0.0 b | 0.32 ± 0.0 a | 0.31 ± 0.0 a | 0.36 ± 0.0 a | 0.33 ± 0.0 b | 0.36 ± 0.0 a |
| | C22:0 | 0.22 ± 0.0 a | 0.21 ± 0.0 a | 0.23 ± 0.0 a | 0.24 ± 0.0 a | 0.25 ± 0.0 a | 0.23 ± 0.0 a | 0.44 ± 0.0 b | 0.38 ± 0.0 a | 0.41 ± 0.0 a |
| | Total SFA | 9.58 ± 0.02 a | 9.63 ± 0.01 b | 9.56 ± 0.0 a | 9.49 ± 0.03 a | 9.35 ± 0.02 b | 9.43 ± 0.01 a | 9.4 ± 0.03 b | 9.2 ± 0.03 a | 9.5 ± 0.01 c |
| Monounsaturated Fatty Acids (%) | C18:1n9 | 12.5 ± 0.04 c | 12.0 ± 0.02 b | 10.2 ± 0.02 a | 12.9 ± 0.09 c | 12.3 ± 0.03 b | 10.7 ± 0.07 a | 12.6 ± 0.01 a | 14.3 ± 0.00 b | 14.7 ± 0.01 c |
| | C18:1n7 | 0.78 ± 0.0 a | 0.8 ± 0.0 b | 0.83 ± 0.0 c | 0.84 ± 0.0 c | 0.81 ± 0.0 b | 0.77 ± 0.0 a | 0.79 ± 0.0 c | 0.77 ± 0.0 b | 0.76 ± 0.0 a |
| Polyunsaturated Fatty Acids (%) | C18: 2n6 | 77.1 ± 0.06 a | 77.5 ± 0.02 b | 79.3 ± 0.01 c | 76.7 ± 0.1 a | 77.5 ± 0.03 b | 79.1 ± 0.09 c | 77.2 ± 0.03 c | 75.7 ± 0.00 b | 75.0 ± 0.02 a |
| | Total UFA | 90.38 ± 0.03 a | 90.29 ± 0.01 b | 90.36 ± 0.01 a | 90.42 ± 0.03 b | 90.58 ± 0.02 a | 90.51 ± 0.01 a | 90.59 ± 0.03 b | 90.81 ± 0.00 c | 90.47 ± 0.01 a |
| | UFA/SFA | 9.4 ± 0.02 a | 9.4 ± 0.01 b | 9.4 ± 0.0 a | 9.5 ± 0.03 a | 9.7 ± 0.02 b | 9.6 ± 0.01 a | 9.6 ± 0.03 b | 9.8 ± 0.04 a | 9.5 ± 0.01 c |

C16:0 (Palmitic acid); C18:0 (Stearic acid); C18:1n9 (Oleic acid); C18:2n6 (Linoleic acid); C18:1n7 (Vaccenic acid); C20:0 (Arachidic acid); C22:0 (Behenic acid); SFA (Saturated Fatty Acids); UFA (Unsaturated Fatty Acids). In the same column, for each year, means with the same letter were not significantly different using Newman–Keuls' test at $p > 0.05$ probability level.

3.3. Fatty Acids Composition Determined with GC Analysis

During the three years of experimentation, the extracted oil from the tested genotypes consists mainly of unsaturated fatty acids with an average content of 90.5%. In the same situations, saturated fatty acids have a low rate of 9% (Table 4).

The fraction of unsaturated fatty acids consists of linoleic acid, oleic acid, and vaccenic acid. For the three genotypes and during the three years of experimentation, polyunsaturated linoleic acid represents the main constituent of this category of fatty acid (Table 4). Its contents varied between 75 and 79.3% recorded by Touggourt genotype in 2017 and 2015, respectively. It can be seen that the highest levels of this acid were recorded in 2015 (Table 4).

The oleic acid contents ranged between 10.2 and 14.7% registered by Touggourt genotype in 2015 and 2017, respectively. Thus, the levels of this fatty acid increased over the three years to reach their maximum during 2017 (Table 4).

The saturated fatty acid is represented mainly by palmitic and stearic acid with respective average contents of 6.89% and 1.97%. Any variation in the levels of these fatty acids was noted among the genotypes and according to the year of experimentation (Table 3). Generally, the values of the palmitic acid and stearic acid were moderately lower in the latest year (2017) compared to 2015 and 2016 (Table 4). Thus, the results showed that the arachidic and behenic acid have mean values of 0.33 and 0.29%, respectively, over the three years of experimentation. It has been demonstrated that the total of saturated fatty acids revealed a low value in 2017 compared to 2015 and 2016 (Table 4).

4. Discussion

The importance given to safflower is mainly related to the oil produced from its seeds [5]. The oil content reached the rate of 28% (Table 4) and ranged from 22.8% registered for Touggourt in 2017 and 28.4% showed by Halab in 2015. The oil content variation has been shown to vary largely according to the environmental parameters [29,30]. In these studies, obtained values ranged between 15% and 40%. Consequently, our results showed that the safflower seeds produce an appreciable oil content under semi-arid area conditions.

The nature of cultivars appears also to be determining for the oil content of this species [31–35]. Some morphological traits of the tested genotypes present as indicators of seed oil richness. In fact, our study has demonstrated that the genotypes with spiny leaves (Halab, Gila) form seed richer in oil than Touggourt, a thornless genotype (Table 4). Similar results were reported by Kizil et al. [36] and Ashrafi and Razmjoo [25].

In our study, the lowest value of oil content had been recorded in 2017 (Table 4). This year was the warmest and the least rainy of the three years (Table 2). Indeed, during 2017, the beginning of the seed filling phase has coincided with low precipitation (0.4 mm) and high temperature in June (Table 2). Among the environmental parameters, drought, associated with high temperatures, reduced this content significantly at the end of the development cycle [25,37–41]. They affect photosynthetic activity and the availability of assimilates indispensable for reserves constitution during grain filling [42,43]. Also, the decrease in seed oil content is caused by alteration of the metabolic pathways essential to synthesis and accumulation of oil and by effectation of the enzymatic activities responsible for this process [44,45]. Seghal et al. [46] have indicated that under drought conditions the decrease in oil content is due to reduction in concentration of digestible carbohydrates and unloading of sugars from stem to developing seeds.

Safflower is an oleaginous species of significant interest due to its fatty acid variability content in the seed oil [47,48]. Our study indicates that extracted oil is very rich in unsaturated fatty acids, where their rate has reached a maximum value of 90.59% (Halab) and 90.81% (Gila). These results are confirmed by those obtained by Benmoumen et al. [16], Ergönül and Özbek [49], and Taha and Matthäus [50]. Among these compounds,

linoleic acid (polyunsaturated fatty acid) has the most important fraction and reaches a level of 70%. In contrast, a low presence of saturated fatty acids, mainly palmitic acid, has been reported [12,25]. These results divulge the high ratio of unsaturated fatty acids and saturated fatty acids in safflower oil which, according to Wood et al. [51], represents a determining criterion for evaluation of the nutritional quality of food oils.

Plant quality trait improvement has become a global necessity due to global overpopulation [52]. The study of plant metabolomics is important to improve crop yields and quality, and ensure nutritional and health factors that provide the opportunity to produce functional food [53].

The fatty acids composition is dependent on the nature of the cultivars and the prevailing climatic conditions during their crop cycle (Table 3). Indeed, this dependence has been previously proven by Uitterhaegen et al. [54], Roche et al. [12] and Nguyen et al. [55].

In 2017, the accessions recorded low values of linoleic acid. However, in the same year, oleic acid values were higher than those registered in 2015 and 2016 (Table 4). According to Flagella et al. [56], Kizil et al. [36] and Khoufi et al. [57], a drought accompanied by a rise in temperature leads to an increase in oleic acid levels and a decrease in linoleic acid. These abiotic stresses inhibit the function of the delta 12 desaturase enzyme which is responsible for conversion of oleic acid into linoleic acid [58]. In addition, an increase in temperature leads to a decrease in the activity of the microsomal oleate desaturase FAD2 in safflower and sunflower [59–61]. Allakhverdiev et al. [62] have realized that the augmentation of the polyunsaturated fatty acid in membrane lipids is able to conserve the plant's photosynthetic system. Other research has confirmed that abiotic stress such as saline stress leads to an increased proportion of unsaturated fatty acids [63]. In the biotechnology field, the study of the effect of these factors on seed oil quality gives an opportunity to develop tolerant safflowers genotypes having desirable fatty acid traits.

In this study, it has been demonstrated that for the saturated fatty acids palmitic and stearic acid, their rate has been decreased under conditions of drought and high temperature. Similar results have been confirmed by Ashrafi and Razmjoo [25]. These authors have found that drought stress decreased saturated fatty acid content which consequently reduced the oil content in the seeds of safflower. However, Gao et al. [64] have noticed that the fatty acid composition differed when soybean plant was subjected to drought stress, along with a decrease in palmitic and an increase of stearic acid. Generally, Lacombe et al. [65] have indicated that the composition of saturated fatty acids changed into unsaturated fatty acids under drought stress.

Drought is one of the most severe and unpredictable abiotic stresses, occurring at any growth stage and affecting crop yields [66]. It presents a substantial challenge to the sustainability of agriculture [67]. For this reason, studying the genetic diversity of safflower could provide valuable information on germplasm maintenance and utilization for breeders to improve breeding programs for semi-arid areas to ensure sustainable crop production [68,69].

5. Conclusions

This study showed that safflower achenes grown in a semi-arid area of Algeria provided an oil content rich in unsaturated fatty acids. Among these components, linoleic acid and oleic acid are the most present. These compounds may play an important role in pharmaceutical and nutritional utilisation. The environmental conditions of this region, i.e., low rainfall and high temperature, govern an interspecific variability in the expression of these parameters. They modified the quality of the examined oil by increasing the level of oleic acid and decreasing the level of linoleic acid. However, they decreased the seed oil content of all studied genotypes.

The adaptation of safflower in such areas requires a large real investment in order to take advantage of the economic and biochemical components provided by the oil

extracted from its seeds. Also, both halab and Gila accessions have the highest value of polyunsaturated fatty acids and oil content. Consequently, the introduction of these two genotypes in a breeding program could obtain a novel genotype having desirable traits, notably in limiting climatic conditions.

Author Contributions: Conceptualization, O.M., A.A.; methodology, K.Z., M.C. and A.L.; formal analysis, K.Z., M.C., A.L. and O.M., writing—original draft preparation, K.Z., A.L., A.A., A.D. and M.C.; writing—review and editing, O.M. and A.A.; supervision, O.M.; project administration, O.M., A.D. and A.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: The PhD of Kamel Zemour was partially supported by the Hubert Curien-Tasili program 16MDU953.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript or in the decision to publish the results.

References

- Hamdan, Y.A.S.; García-Moreno, M.J.; Redondo-Nevado, J.; Velasco, L.; Pérez-Vich, B. Development and characterization of genomic microsatellite markers in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Plant Breed.* **2011**, *130*, 237241, <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2010.01826.x>.
- Talebi, R.; Nosrati, S.; Etminan, A.; Naji, A.M. Genetic diversity and population structure analysis of landrace and improved safflower (*Carthamus tinctorios* L.) germplasm using arbitrary functional gene-based molecular markers. *Biotechnol. Biotechnol. Equip.* **2018**, *32*, 1183–1194, <https://doi.org/10.1080/13102818.2018.1499443>.
- Ren, C.X.; Wu, Y.Y.; Tang, X.H.; Hu, J.; Chen, J.; Wu, Q.H.; Pei, J. Safflower's origin and changes of producing areas. *China J. Chin. Mater. Med.* **2017**, *42*, 2219–2222, <https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcm.2017.0101>.
- Li, D.; Mündel, H.H. *Safflower (Carthamus tinctorius L.) Promoting the Conservation and Use of Underutilized and Neglected Crops*; Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/International Plant Genetic Resources Institute: Rome, Italy, 1996; 83p.
- Zemour, K.; Adda, A.; Zebib, B.; Merah, O. Le carthame (*Carthamus tinctorius* L.): Une oléagineuse qui n'a pas dit son dernier mot en Algérie. *Agrobiologia* **2020**, *10*, 2211–2219.
- Du, C.; Hou, J.; Wang, C.; Zhang, M.; Zheng, Y.; Yang, G.; Hu, Y. Effects of safflower yellow on cholesterol levels in serum and brain tissue of APP/PS1 mice. *Metab. Brain Dis.* **2021**, *36*, 557–569, <https://doi.org/10.1007/s11011-021-00680-0>.
- Hashemi, S.S.; Mirmohamadsadeghi, S.; Karimi, K. Biorefinery development based on whole safflower plant. *Renew. Energy* **2020**, *152*, 399–408, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.049>.
- Asgarpanah, J.; Kazemivash, N. Phytochemistry, pharmacology and medicinal properties of *Carthamus tinctorius* L. *Chin. J. Int. Med.* **2013**, *19*, 153–159, <https://doi.org/10.1007/s11655-013-1354-5>.
- Khalid, N.; Khan, R.S.; Hussain, M.I.; Farooq, M.; Ahmad, A.; Ahmed, I. Comprehensive characterisation of safflower oil for its potential applications as a bioactive food ingredient—A review. *Trends Food Sci. Technol.* **2017**, *66*, 176–186, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.009>.
- Labdelli, A.; Zemour, K.; Simon, V.; Cerny, M.; Adda, A.; Merah, O. *Pistacia atlantica* Desf., a Source of Healthy Vegetable Oil. *Appl. Sci.* **2019**, *12*, 2552, <https://doi.org/10.3390/app9122552>.
- Sayed Ahmad, B.; Talou, T.; Saad, Z.; Hijazi, A.; Cerny, M.; Kanaan, H.; Chokr, A.; Merah, O. Fennel seed oil and by-products characterization and their potential applications. *Ind. Crops Prod.* **2018**, *111*, 92–98, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.008>.
- Roche, J.; Mouloungui, Z.; Cerny, M.; Merah, O. Effect of sowing dates on fatty acids and phytostérols patterns of *Carthamus tinctorius* L. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 2839, <https://doi.org/10.3390/app9142839>.
- Fernández-Martínez, J.; Rio, M.D.; Haro, A.D. Survey of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) germplasm for variants in fatty acid composition and other seed characters. *Euphytica* **1993**, *69*, 115–122, <https://doi.org/10.1007/BF00021734>.
- Velasco, L.; Fernández-Martínez, J. Breeding for oil quality in Safflower. In Proceedings of the 5th International Safflower Conference, Williston, ND, USA, 23–27 July 2001; North Dakota State University: Fargo, ND, USA, 2001; pp. 133–137.
- Zemour, K.; Labdelli, A.; Adda, A.; Dellal, A.; Talou, T.; Merah, O. Phenol content and antioxidant and antiaging activity of safflower seed oil (*Carthamus tinctorius* L.). *Cosmetics* **2019**, *6*, 55, <https://doi.org/10.3390/cosmetics6030055>.
- Ben Moumen, A.; Mansouri, F.; Richard, G.; Abid, M.; Fauconnier, M.L.; Sindic, M.; ElAmrani, A.; Caid, H.S. Biochemical characterisation of the seed oils of four safflower (*Carthamus tinctorius*) varieties grown in north-eastern of Morocco. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2014**, *50*, 804–810, <https://doi.org/10.1111/ijfs.12714>.
- Lovelli, S.; Perniola, M.; Ferrara, A.; Di Tommaso, T. Yield response factor to water (Ky) and water use efficiency of *Carthamus tinctorius* L. and *Solanum melongena* L. *Agric. Water Manag.* **2007**, *92*, 73–80, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.05.005>.

18. Hussain, M.I.; Lyra, D.A.; Farooq, M.; Nikoloudakis, N.; Khalid, N. Salt and drought stresses in safflower: A review. *Agron. Sustain. Dev.* **2015**, *36*, 1–31, <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0344-8>.
19. Dwivedi, S.L.; Nigam, S.N.; Jambunathan, R.; Sahrawate, K.L.; Nagabhushanam, G.V.S.; Raghunath, K. Effects of genotypes and environments on oil content and oil quality parameters and their correlations in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Peanut Sci.* **1993**, *20*, 84–89, <https://doi.org/10.3146/i0095-3679-20-2-5>.
20. Izquierdo, N.G.; Aguirrezábal, L.A.N.; Andrade, F.H.; Cantarero, M.G. Modeling the response of fatty acid composition to temperature in a traditional sunflower hybrid. *J. Agron.* **2006**, *98*, 451–461, <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0083>.
21. Roche, J.; Alignan, M.; Bouniols, A.; Cerny, M.; Mouloungui, Z.; Merah, O. Sterol concentration and distribution in sunflower seeds (*Helianthus annuus* L.) during seed development. *Food Chem.* **2010**, *119*, 1451–1456, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.09.026>.
22. Whaley, R.; Eskandari, M. Genotypic main effect and genotype-by-environment interaction effect on seed protein concentration and yield in food-grade soybeans (*Glycine max* (L.) Merrill). *Euphytica* **2019**, *215*, 1–17, <https://doi.org/10.1007/s10681-019-2344-2>.
23. Navas-López, J.F.; Cano, J.; de la Rosa, R.; Velasco, L.; León, L. Genotype by environment interaction for oil quality components in olive tree. *Eur. J. Agric.* **2020**, *119*, 126115, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126115>.
24. Samanci, B.; Özkaynak, Q. Effect of planting date on seed yield, oil content and fatty acid composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars grown in the mediterranean region of Turkey. *J. Agric. Crop Sci.* **2003**, *189*, 359–360, <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2003.00053.x>.
25. Ashrafi, E.; Razmjoo, K. Effect of irrigation regimes on oil content and composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars. *J. Am. Oil Chem. Soc.* **2010**, *87*, 499–506, <https://doi.org/10.1007/s11746-009-1527-8>.
26. Zraibi, L.; Kajeiou, M.; Caid, H.S.; Nabloussi, A. Safflower evaluation under contrasted environment conditions and selection of promising genotypes. *J. Agric. Sci. Technol.* **2014**, *4*, 299–311, <https://doi.org/10.17265/2161-6264/2014.04B.008>.
27. Flemmer, A.C.; Franchini, M.C.; Lindström, L.I. Description of safflower (*Carthamus tinctorius*) phenological growth stages according to the extended BBCH scale. *Ann. Appl. Biol.* **2014**, *2*, 331–339, <https://doi.org/10.1111/aab.12186>.
28. Roche, J.; Mouloungui, Z.; Cerny, M.; Merah, O. Fatty acid and phytosterol accumulation during seed development in three oilseed species. *Int. J. Food. Sci. Technol.* **2016**, *51*, 1820–1826, <https://doi.org/10.1111/ijfs.13153>.
29. Sung, J.; Jeong, Y.; Kim, S.; Luitel, B.P.; Ko, H.; Hur, O.; Yoon, M.; Rhee, J.; Baek, H.; Ryu, K. Fatty acid composition and antioxidant activity in safflower germplasm collected from South Asia and Africa. *J. Korean Soc. Int. Agric.* **2016**, *28*, 342–351, <https://doi.org/10.12719/KSIA.2016.28.3.342>.
30. Dordas, C.A.; Sioulas, C. Safflower yield, chlorophyll content, photosynthesis, and water use efficiency response to nitrogen fertilization under rainfed conditions. *Ind. Crops Prod.* **2008**, *27*, 75–85, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.07.020>.
31. Roche, J.; Alignan, M.; Bouniols, A.; Jane Roche, J.; Alignan, M.; Bouniols, A.; Cerny, M.; Mouloungui, Z.; Vear, F.; Merah, O. Sterol content in sunflower seeds (*Helianthus annuus* L.) as affected by genotypes and environmental conditions. *Food Chem.* **2010**, *121*, 990–995, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.01.036>.
32. Anastasi, U.; Santonoceto, C.; Giuffrè, A.M.; Sortino, O.; Gresta, F.; Abbate, V. Yield performance and grain lipid composition of standard and oleic sunflower as affected by water supply. *Filed Crops Res.* **2010**, *119*, 145–153, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.001>.
33. Golkar, P.; Arzani, A.; Rezaei, A.M. Genetic analysis of oil content and fatty acid composition in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *J. Am. Oil Chem. Soc.* **2011**, *88*, 975–982, <https://doi.org/10.1007/s11746-011-1758-3>.
34. Sung, J.S.; Ko, H.C.; Hur, O.S.; Kim, S.G.; Lee, J.R.; Luitel, B.P.; Lee, Y.H.; Jang, Y.S.; Gwag, J.G.; Baek, H.J.; et al. Morphological and oil compositions in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) germplasm of different geographical groups. *J. Korean Soc. Int. Agric.* **2016**, *28*, 84–91, <https://doi.org/10.12719/KSIA.2016.28.1.84>.
35. El-Lattief, E.A. Evaluation of 25 safflower genotypes for seed and oil yields under arid environment in upper Egypt. *Asia J. Crop Sci.* **2012**, *4*, 72–79.
36. Kizil, S.; Çakmak, O.; Kirici, S.; İnan, M. A comprehensive study on safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in semi-arid conditions. *Biotechnol. Biotechnol. Equip.* **2008**, *22*, 947–953, <https://doi.org/10.1080/13102818.2008.10817585>.
37. Istanbuluoğlu, A.; Gocmen, E.; Gezer, E.; Pasa, C.; Konukcu, F. Effects of water stress at different development stages on yield and water productivity of winter and summer safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Agric. Water Manag.* **2009**, *96*, 1429–1434, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.004>.
38. Fernández-Cuesta, Á.; Velasco, L.; Ruiz-Méndez, M.V. Novel safflower oil with high γ -tocopherol content has a high oxidative stability. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* **2014**, *116*, 832–836, <https://doi.org/10.1002/ejlt.201300208>.
39. Pritchard, F.M.; Eagles, H.A.; Norton, R.M.; Salisbury, S.A.; Nicolas, M. Environmental effects on seed composition of Victorian canola. *Aust. J. Exp. Agric.* **2000**, *40*, 679–685, <https://doi.org/10.1071/EA99146>.
40. Qadir, G.; Ahmad, S.; Hassan, F.; Cheema, M.A. Oil and fatty acid accumulation in sunflower as influenced by temperature variation. *Pak. J. Bot.* **2006**, *38*, 1137–1147.
41. Oraki, H.; Alahdadi, I.; Khajani, F.P. Influence of water deficit and genotype on protein, oil contents and some physical characteristics of sunflower seeds. *Afr. J. Agric. Res.* **2011**, *6*, 1246–1250, <https://doi.org/10.5897/AJAR10.1112>.

42. Zahedi, H.; Noormohammadi, G.; Rad, A.H.S.; Habibi, D.; Boojar, M.M.A. The effects of zeolite and foliar application of Selenium on growth, yield and yield components of three canola cultivars under drought stress. *World Appl. Sci. J.* **2009**, *7*, 255–262, <https://doi.org/10.15835/nsb.1.1.3500>.
43. Kafi, M.; Rostami, M. Yield characteristics and oil content of three safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars under drought in reproductive stage and irrigation with saline water. *Iran Agron. Res.* **2008**, *5*, 121–131.
44. Koocheki, A.; Ebrahimian, E.; Seyyedi, S.M. How irrigation rounds and mother corm size control saffron yield, quality, daughter corms behavior and phosphorus uptake. *Sci. Hortic.* **2016**, *213*, 132–143, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.10.028>.
45. Fahad, S.; Bajwa, A.A.; Nazir, U.; Anjum, S.A.; Farooq, A.; Zohaib, A.; Sadia, S.; Nasim, W.; Adkins, S.; Saud, S.; et al. Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. *Front. Plant Sci.* **2017**, *8*, 1–16, <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>.
46. Sehgal, A.; Kumari, S.; Siddique, K.H.M.; Kumar, R.; Bhogireddy, S.; Varshney, R.K.; Hanumantharao, B.; Nair, M.R.; Vara Prasad, P.V.; Nayyar, H. Drought or/and Heat-stress Effects on Seed Filling in Food Crops: Impacts on Functional Biochemistry, Seed Yields and Nutritional Quality. *Front. Plant Sci.* **2018**, *9*, 1705, <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01705>.
47. La Bella, S.; Tuttolomondo, T.; Lazzeri, L.; Matteo, R.; Leto, C.; Licata, M. An Agronomic Evaluation of New Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Germplasm for Seed and Oil Yields under Mediterranean Climate Conditions. *Agronomy* **2019**, *9*, 468, <https://doi.org/10.3390/agronomy9080468>.
48. Yassein, A.A.M.; Khalaf, A.E.A.; Mohdaly, A.A.A.; Roby, M.H.H. Selections of donors depending on agronomic traits, seed yield components, and fatty acid profile for genetic improvement of *Carthamus* using stepwise multiple regression. *OCL* **2020**, *27*, 66, <https://doi.org/10.1051/ocl/2020063>.
49. Ergönül, P.G.; Özbek, Z.A. Identification of bioactive compounds and total phenol contents of cold pressed oils from safflower and camelina seeds. *J. Food Meas. Charact.* **2018**, *12*, 2313–2323, <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9848-7>.
50. Taha, E.; Matthäus, B. Study of safflower varieties cultivated under southern Egypt conditions for seeds and flowers. *J. Biol. Sci.* **2018**, *18*, 74–83, <https://doi.org/10.3923/jbs.2018.74.83>.
51. Wood, J.D.; Richardson, G.R.; Fisher, A.V. Effects of fatty acids on meat quality: A review. *Meat Sci.* **2003**, *66*, 21–32, [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(03\)00022-6](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(03)00022-6).
52. Pott, D.M.; Durán-Soria, S.; Osorio, S.; Vallarino, J.G. Combining metabolomic and transcriptomic approaches to assess and improve crop quality traits. *CABI Agric. Biosci.* **2021**, *2*, 1, <https://doi.org/10.1186/s43170-020-00021-8>.
53. Mani, V.; Lee, S.K.; Yeo, Y.; Hahn, B.S. A Metabolic Perspective and Opportunities in Pharmacologically Important Safflower. *Metabolites* **2020**, *10*, 253, <https://doi.org/10.3390/metabo10060253>.
54. Uitterhaegen, E.; Nguyen, Q.H.; Sampaio, K.A.; Stevens, C.V.; Merah, O.; Talou, T.; Evon, P. Extraction of vegetable oil from coriander seeds originating from France using a twin-screw extruder: Feasibility study and potential uses of the obtained press cakes. *J. Am. Oil Chem. Soc.* **2015**, *92*, 1219–1233, <http://dx.doi.org/10.1007/s11746-015-2678-4>.
55. Nguyen, Q.H.; Talou, T.; Evon, P.; Cerny, M.; Merah, O. Fatty acid composition and oil content during coriander fruit development. *Food Chem.* **2020**, *326*, 127034, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127034>.
56. Flagella, Z.; Rotunno, T.; Tarantino, Di Caterina, R.; De Caro, A. Changes in seed yield and oilfatty acid composition of high oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids in relation to the sowing date and the water regime. *Eur. J. Agron.* **2002**, *17*, 221–230, [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00012-6](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00012-6).
57. Khoufi, S.; Khamassi, K.; Da Silva, J.A.T.; Rezgui, S.; Ben Jeddi, F. Watering regime affects oil content and fatty acid composition of six sunflower lines. *J. New Sci.* **2014**, *7*, 1–9.
58. Garcés, R.; Mancha, M. In vitro oleatedesaturase in developing sunflower seeds. *Phytochemistry* **1991**, *30*, 2127–2130, [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(91\)83599-G](https://doi.org/10.1016/0031-9422(91)83599-G).
59. Esteban, A.B.; Sicardo, M.D.; Mancha, M.; Martínez-Rivas, J.M. Growth temperature control of the linoleic acid content in safflower (*Carthamus tinctorius*) seed oil. *J. Agric. Food Chem.* **2004**, *52*, 332–336, <https://doi.org/10.1021/jf030581m>.
60. Rolletschek, H.; Borisjuk, L.; Sanchez-Garcia, A.; Gotor, C.; Romero, L.C.; Martínez-Rivas, J.M.; Mancha, M. Temperature dependent endogenous oxygen concentration regulates microsomal oleatedesaturase in developing sunflower seeds. *J. Exp. Bot.* **2007**, *58*, 3171–3181, <https://doi.org/10.1093/jxb/erm154>.
61. Martínez-Rivas, J.M.; Sanchez-García, A.; Sicardo, M.D.; García-Díaz, M.T.; Mancha, M. Oxygen-independent temperature regulation of the microsomal oleatedesaturase (FAD2) activity in developing sunflower (*Helianthus annuus*) seeds. *Physiol. Plant.* **2003**, *117*, 179–185, <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2003.00039.x>.
62. Allakhverdiev, S.I.; Kinoshita, M.; Inaba, M.; Suzuki, I.; Murata, N. Unsaturated fatty acids in membrane lipids protect the photosynthetic machinery against salt-induced damage in *Synechococcus*. *Plant Physiol.* **2001**, *125*, 1842–1853, <https://doi.org/10.1104/pp.125.4.1842>.
63. Yang, W.; Wang, F.; Liu, L.N.; Sui, Na. Responses of Membranes and the Photosynthetic Apparatus to Salt Stress in Cyanobacteria. *Front. Plant Sci.* **2020**, *11*, 713, <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00713>.
64. Gao, J.; Hao, X.; Thelen, K.D.; Robertson, G.P. Agronomic management system and precipitation effects on soybean oil and fatty acid profiles. *Crop Sci.* **2009**, *49*, 1049–1057, <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.08.0497>.

65. Lacombe, S.; Souyris, I.; Bervillé, A.J. An insertion of oleatedesaturase homologous sequence silences via siRNA the functional gene leading to high oleic acid content in sunflower seed oil. *Mol. Genet. Genom.* **2009**, *281*, 43–54, <https://doi.org/10.1007/s00438-008-0391-9>.
66. Joshi, S.; Thoday-Kennedy, E.; Daetwyler, H.D.; Hayden, M.; Spangenberg, G.; Kant, S. High-throughput phenotyping to dissect genotypic differences in safflower for drought tolerance. *PLoS ONE* **2021**, *16*, e0254908, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254908>.
67. Kumari, V.V.; Roy, A.; Vijayan, R.; Banerjee, P.; Verma, V.C.; Nalia, A.; Pramanik, M.; Mukherjee, B.; Ghosh, A.; Reja, M.H.; et al. Drought and heat stress in cool-season food legumes in sub-tropical regions: Consequences, adaptation, and mitigation strategies. *Plants* **2021**, *10*, 1038, <https://doi.org/10.3390/plants10061038>.
68. Gholami, M.; Sabaghnia, N.; Nouraein, M.; Shekari, F.; Janmohammadi, M. Cluster analysis of some safflower genotypes using a number of agronomic characteristics. *J. Crop Breed.* **2018**, *10*, 159–166, <https://doi.org/10.29252/jcb.10.25.159>.
69. Mousavi Ojaq, S.M.; Mozafari, H.; Jabbari, H.; Sani, B. Evaluation of yield of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes under semi-arid conditions. *Plant Genet. Resour. Charact. Util.* **2020**, *18*, 270–277, <https://doi.org/10.1017/S1479262120000301>.

Article

Phenol Content and Antioxidant and Antiaging Activity of Safflower Seed Oil (*Carthamus Tinctorius* L.)

Kamel Zemour ^{1,2}, Amina Labdelli ^{2,3}, Ahmed Adda ², Abdelkader Dellal ², Thierry Talou ¹ and Othmane Merah ^{1,4,*} 

¹ Laboratoire de Chimie Agroindustrielle, LCA, Université de Toulouse, INRA, 31030 Toulouse, France; kamel.zemour@ensiacet.fr (K.Z.); thierry.talou@ensiacet.fr (T.T.)

² Laboratory of Agro-Biotechnology and Nutrition in Semi-Arid Areas, Ibn Khaldoun University, Tiaret 14000, Algeria; aminalabdelli@yahoo.fr (A.L.); adda2ahmed@yahoo.fr (A.A.); dellal05_aek@yahoo.fr (A.D.)

³ Scientific and Technical Research Centre for Arid Areas (CRSTRA), Biskra 07000, Algeria

⁴ Université Paul Sabatier, IUT A, Département Génie Biologique, 32000 Auch, France

* Correspondence: othmane.merah@ensiacet.fr; Tel.: +33-5343-23523

Received: 29 August 2019; Accepted: 12 September 2019; Published: 14 September 2019



Abstract: The phenol content of vegetable oil and its antioxidant activity are of primary interest for human health. Oilseed species are considered important sources of these compounds with medicinal effects on a large scale. Total phenol content (TPC) and antioxidant activity (AA) of safflower oil were previously studied. Nevertheless, there is no report on genotypic differences and antiaging activity of safflower oil. The aim of this study was to determine the TPC, diphenyl-picrylhydrazyl (DPPH), and antiaging activity on three respective accessions from Syria, France, and Algeria of seed oil of safflower grown under semi-arid conditions during 3 consecutive years (2015, 2016, and 2017). The results showed that phenol content as well as antioxidant and antiaging activity varied according to both genotype and years. In 2017, the mean value of TPC in oil seed was two times higher than in 2015 and 2016. Moreover, accessions presented different TPC values depending on the year. The highest antioxidant activity was observed among accessions in 2017 compared to 2015 and 2016. As expected, a positive correlation was found between TPC and antioxidant activity. The inhibition in the collagenase assay was between 47% and 72.1% compared to the positive control (83.1%), while inhibition in the elastase assay of TPC ranged from 32.2% to 70.3%, with the positive control being 75.8%. These results highlight the interest of safflower oil as a source of phenols with valuable antioxidant and antiaging activity, and uses for cosmetics.

Keywords: Safflower (*Carthamus tinctorius* L.); oil; phenol; antioxidant activity; anti-collagenase activity; anti-elastase activity; methanolic extract; genotypic variability; year effect

1. Introduction

Safflower, *Carthamus tinctorius* L., an Asteraceae, is cultivated in semi-arid regions mainly for its seed that contains a high level of oil. Safflower oil contains saturated and unsaturated fatty acids coupled by its tocopherol content [1]. Other compounds are also present in safflower oil. Among them, phenolic compounds are in the unsaponifiable phase of oil and are responsible for its stability and important nutritional value. The phenolic compounds have great biological activity mostly due to their antioxidant activity. Moreover, the primary role of antioxidants is to prevent or delay oxidative lipid damage produced in proteins and nucleic acids by reactive oxygen species, including reactive free radicals [2]. In recent years, the food industry has spent time and resources on finding natural antioxidants to replace synthetic compounds in applications and obtain a profit in the growing trend

in consumer preferences for natural antioxidants. Koyama et al. [3] confirmed the effects of safflower seed extract and its phenolic constituents on atherosclerosis. Several studies have been carried out to evaluate the phenolic compounds and antioxidant activity of Asteraceae seeds including safflower [4,5], sunflower [6], and artichoke [7]. Moreover, recent research has reported that the root of *Carthamus caeruleus* L. growing wild in Mediterranean regions and especially in Algeria has a potent antioxidant activity [8]. Furthermore, collagen, a major component of skin, plays an important role in its firmness, and elastin fibres lend elasticity and ensure tissue adhesion. Many enzymes are activated when the skin is exposed to UV radiation, indirectly leading to the production of reactive oxygen species (ROS), which generate oxidative stress [9]. The degradation of collagen is caused by enzyme collagenase [10]. Another type of skin degradation is caused by proteolytic enzymes present in the dermis such as elastase. It has been suggested that the degradation of elastin by elastase rises with age and/or repeated UV radiation [11]. Recently, phenolic compounds have been found to inhibit the activity of proteinases, which induce the degradation of skin proteins, such as collagen and elastin. Total phenol content (TPC) and antioxidant activity (AA) of safflower oil were already reported. However, there has been no study on the antiaging activity of oil from safflower.

The aims of the present study were thus to evaluate the total phenol content (TPC) and diphenyl-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging activity (%) of safflower seed oil (*Carthamus tinctorius* L.) cultivated under semi-arid conditions and to investigate the anti-enzymatic activity of the methanolic extract of safflower oil against collagenase and elastase activity.

2. Materials and Methods

Three accessions of *Carthamus tinctorius* L., namely Alep (Syrie), Gila (France), and Toughourt (Algeria), were used in this study. The morphological characteristics of these accessions are presented in Table 1. Field experiments were conducted at the experimental station of Ibn Khaldoun University of Tiaret (Algeria) (35°20'01" North, 1°18'48" East) during 3 successive years: 2015, 2016, and 2017. A complete randomized block design was used with three replicates.

Table 1. Morphological characteristics of the three studied accessions.

| Accession | Country | Flower Color | Absence/Presence of Thorns | Precocity |
|-----------|---------|--------------|----------------------------|-----------|
| Toughourt | Algeria | y,r | - | Late |
| Gila | France | w,y,r | + | Early |
| Alep | Syria | y,r | + | Early |

y: Yellow; w: White; r: Red; (+) present; (-) absent.

Table 2 presents rainfall and temperatures during the three plant cycles. The effects of rainfall and temperature on the TPC and antioxidant and antiaging activity of safflower oil were studied across contrasted growing seasons. In 2017, the climatic conditions were characterized by low rainfall amounts and high temperatures (Table 2). Whatever the year, the flowering stage for all genotypes was in July, while maturity took place in August. During maturation, plants were subjected to higher temperatures in 2017 than in the other years (Table 2). Therefore, 2017 could be considered as the hottest year; 2016, in contrast, was the more favorable year, and 2015 was considered intermediate.

Table 2. Rainfall (mm) and temperature (°C, mean, maximum, and minimum values) during the growing season of three safflower accessions during 3 successive years.

| Month | Temperature (°C) | | | | | | | | | Rainfall (mm) | | |
|-------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------|------|------|
| | 2015 | | | 2016 | | | 2017 | | | 2015 | 2016 | 2017 |
| | Mean | Max | Min | Mean | Max | Min | Mean | Max | Min | | | |
| April | 15.3 | 23.5 | 7.1 | 12.8 | 19.9 | 5.6 | 13.0 | 20.1 | 6.0 | 0.0 | 24.6 | 6.8 |
| May | 19.2 | 28.3 | 10.1 | 16.4 | 24.3 | 8.6 | 19.8 | 29.0 | 10.6 | 12.7 | 26.7 | 26 |
| June | 21.1 | 29.3 | 12.9 | 21.7 | 30.4 | 12.9 | 25.2 | 34.0 | 16.5 | 7.4 | 6.5 | 0.4 |

| Month | Temperature (°C) | | | | | | | | | Rainfall (mm) | | |
|--------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | 2015 | | | 2016 | | | 2017 | | | 2015 | 2016 | 2017 |
| | Mean | Max | Min | Mean | Max | Min | Mean | Max | Min | | | |
| July | 27.0 | 36.2 | 17.8 | 26.7 | 35.7 | 17.7 | 26.8 | 35.1 | 18.5 | 0.0 | 0.2 | 1.0 |
| August | 27.0 | 34.6 | 19.3 | 25.6 | 34.7 | 16.4 | 27.7 | 36 | 19.5 | 12.0 | 0 | 4.8 |
| Mean | 21.9 | 30.4 | 13.4 | 20.6 | 29.0 | 12.2 | 22.5 | 30.4 | 16.3 | | | |
| Total | | | | | | | | | | 32.1 | 58.0 | 39.0 |

2.1. Oil Extraction

Safflower oil was extracted with the Soxhlet apparatus (NF EN ISO 659) from seeds harvested from the matured heads (browning of leaves and bracts heads), healthy and without impurities. This method consists of oil extraction with an organic solvent (cyclohexane) on 20 g of solid matrix (seed crushed) for 6 h with a ratio of 1:10 w:v. The solvent containing oil was removed using a rotary evaporator at a temperature of 45 °C. The extracted oil was recovered in suitable vials and stored in the dark in a cold room at 4 °C until analysis.

2.2. Polyphenol Extraction

The total phenolic compounds were extracted according to the method described by Ollivier et al. [12] with few modifications. A 0.5-mL aliquot of a methanol/water solution (80/20 v/v) was added to 0.5 g of safflower oil in a centrifuge tube. After 10 min of vigorous mixing, the tubes were centrifuged for 15 min at 500 g, and the methanolic phase was recovered. Generally, this operation was repeated two times (three times in total) to ensure a good extraction of TPC, and the volume was brought to 1.5 mL using the methanol/water solution (80/20 v/v).

2.3. Total Phenol Content

The total phenol content was determined according to the method described by Merouane et al. [13], using Folin-Ciocalteu reagent and gallic acid as the standard. In brief, 500 µL of Folin-Ciocalteu reagent and 450 µL of distilled water were added to a tube containing 50 µL of extract with vigorous stirring. After 3 min, 400 µL of Na₂CO₃ (75 g·L⁻¹) were added. The tubes were incubated at 25 °C in the dark for 40 min.

The absorbance was determined at 725 nm against a blank that contained methanol instead of the extract. The phenol content of the extract was determined from the gallic acid calibration curve, and the results were expressed in mg of gallic acid equivalent per kg of safflower oil (mg GAE/kg of oil).

2.4. Antioxidant Activity Determination

The antioxidant activity was determined according to the method recommended by Nogala-Kalucka et al. [14]. The method involves the spectrophotometric measurement of the intensity of the color change in solution depending on the amount of DPPH. The reaction was initiated by mixing 1 mL of the methanolic extract with 3 mL methanol, and then adding 1 mL of DPPH (0.012 g/100 mL). Absorbance at a λ_{max} of 517 nm was checked after 15 min. The activity of the extract in scavenging DPPH was calculated as follows:

$$\% \text{ DPPH scavenging} = [(\text{Absorbance of control} - \text{Absorbance of sample}) / \text{Absorbance of control}] * 100$$

2.5. Determination of Collagenase and Elastase Inhibition

Collagenase from *Clostridium histolyticum* (Sigma Aldrich, Lyon, France) was used. The activity of collagenase was assessed using N-[3-(2-furyl) acryloyl]-Leu-Gly-Pro-Ala (Sigma Aldrich, Lyon, France) as a substrate following the protocol of Wittenauer et al. [15]. Absorbance decrease was surveyed at 335 nm during 20 min using a microplate reader (BioTek ELX800; BioTek Instruments, Colmar, France). The activity of collagenase in the presence of each genotype for each year was determined in

triplicate, and the anti-collagenase activity was expressed as the inhibition percentage relative to the corresponding control (phenol extraction by adding the same volume).

The elastase assay was carried out using porcine pancreatic elastase (Sigma Aldrich, Lyon, France). The elastase activity was evaluated using N-Succ-Ala-Ala-Ala-*p*-nitroanilide (AAAVPN; Sigma Aldrich) as a substrate [15]. The release of *p*-nitroaniline was done at 410 nm using a microplate reader (BioTek ELX800; BioTek Instruments). Measurements were performed in triplicate, and the anti-elastase activity was expressed, for each genotype and year, as the inhibition percentage relative to the corresponding control (phenol extraction by adding the same volume of the same solvent).

2.6. Statistical Analyses

Results are presented as the mean \pm standard deviation of three replicates for each parameter. A *p*-value of 0.05 was used to denote significant differences between mean values determined by the analysis of variance (ANOVA) using Statistica 8.0. Two-way ANOVAs were used in order to determine the effect of accession, year, and their interaction. A correlation analysis between antioxidant activity and TPC was also performed.

3. Results

The total phenol content of safflower oil and its antioxidant activity were strongly influenced by the used genotypes and growing conditions (Table 3). Same results were highlighted for both anti-collagenase activity and anti-elastase activity parameters. Significant interaction of year and genotype effects was observed on all measured parameters (Table 3).

Table 3. Effects of accession, year and their interaction on total phenol content, antioxidant and antiaging activity measured in three accessions of safflower grown during three years in Tiaret (semi-arid conditions), Algeria.

| Source of Variation | df | Phenol Content | Antioxidant Activity | Anti-Collagenase Activity | Anti-Elastase Activity |
|---------------------|----|----------------|----------------------|---------------------------|------------------------|
| Accession | 2 | 7.63 ** | 53.48 *** | 33.84 *** | 86.21 *** |
| Year | 2 | 407.69 *** | 744.44 *** | 79.6 *** | 102.3 *** |
| Accession Year | 4 | 43.25 *** | 281.72 *** | 124.2 *** | 187.9 *** |

** significant at $p < 0.01$; *** significant at $p < 0.001$.

3.1. Total Phenol Content

The highest phenol content was found for 2017 compared with 2015 and 2016. In 2017, the highest content was recorded for the Syrian genotype, while the French accession had the lowest content (Table 4). However, different results were recorded in 2015 and 2016, with the French genotype showing the highest phenol content. Furthermore, the Algerian accession showed intermediate values among the studied genotypes in all years (Table 4).

Table 4. Total polyphenol content and antioxidant activity of the three safflower accessions in 2015, 2016, and 2017.

| Year | Accession | Total Phenol Content (mgEAG/kg of oil) | Antioxidant Activity (%) |
|------|-------------|--|-----------------------------------|
| 2015 | Syria | 140.9 \pm 7.0a | 20.6 \pm 0.6a |
| | France | 199.5 \pm 2.9c | 33.1 \pm 1.0c |
| | Algeria | 168.1 \pm 7.1b | 24.7 \pm 0.7b |
| | Mean | 169.5 \pm 16.9 | 26.15 \pm 3.7 |
| 2016 | Syria | 186 \pm 4.0a | 27.6 \pm 0.6a |
| | France | 210.9 \pm 0.4b | 38.8 \pm 0.0c |
| | Algeria | 192.6 \pm 4.3a | 33 \pm 0.8b |
| | Mean | 196.5 \pm 7.4 | 33.13 \pm 3.2 |

Table 4. Cont.

| Year | Accession | Total Phenol Content (mgEAG/kg of oil) | Antioxidant Activity (%) |
|------|-------------|--|--------------------------|
| 2017 | Syria | 412.8 ± 1.3b | 68.9 ± 0.4b |
| | France | 289.2 ± 8.1a | 38.9 ± 1.3a |
| | Algeria | 305.8 ± 17.9a | 40.5 ± 0.7a |
| | Mean | 335.9 ± 38.7 | 49.4 ± 9.7 |

In the same column, for each year, means with the same letter were not significantly different at $p < 0.05$.

3.2. Antioxidant Activity

The methanolic extract from safflower oil revealed an antioxidant activity of 20% for all the used genotypes (Table 4). In addition, a similar profile to that of TPC was observed when evaluating antioxidant activity. This activity (%) showed higher values in 2017 compared to 2015 and 2016. In 2017, the highest antioxidant activity was reported for the Syrian accession. In contrary, in 2015 and 2016, this genotype exhibited the lowest antioxidant activity compared to the other genotypes (Table 4). Expectedly, a positive correlation was observed between the total phenol content of safflower oil and its antioxidant activity (Figure 1).

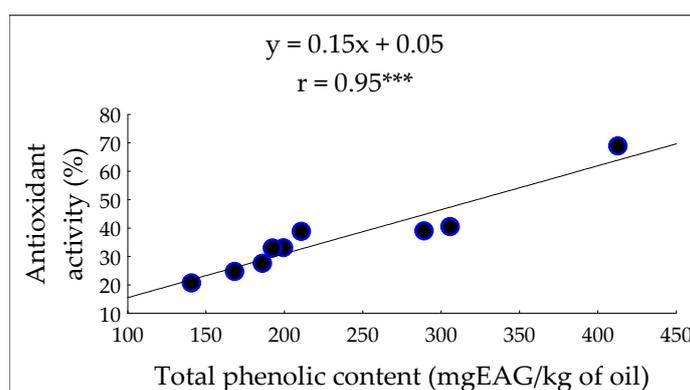


Figure 1. Correlation between total phenol content and antioxidant activity of the three safflower accessions in 2015, 2016, and 2017.

3.3. Antiaging Activity

Antiaging activity was assessed in safflower oil. The results indicated that this oil inhibited collagenase and elastase activity. Moreover, a wide diversity of antiaging activity was observed for all the used genotypes (Table 5).

Separately, a high anti-collagenase activity was found in 2016 and 2015, including a higher value recorded for the Syrian accession. Conversely, in 2017, the French accession showed higher activity compared to the other accessions (Table 5). For the second anti-enzymatic activity, as shown in Table 5, the highest anti-elastase activity was revealed in 2015 and 2017, which was approximately the same as the control. However, in 2016, the inhibition of anti-elastase activity decreased until it reached a minimum value; the lowest value was shown by the Algerian accession, which was half of the control value at 1000 µg/mL (Table 5).

Table 5. Anti-collagenase and anti-elastase activity of the three safflower accessions in 2015, 2016, and 2017.

| Year | Accession | Anti-Collagenase Activity | | Anti-Elastase Activity | |
|---------|-------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| | | IC ₅₀ (µg/mL) | Inhibition % at 500 µg/mL | IC ₅₀ (µg/mL) | Inhibition % at 1000 µg/mL |
| Control | Control | 38.7 ± 0.2b | 83.1 ± 0.2a | 32.3 ± 0.2c | 75.8 ± 0.1a |
| 2015 | Syria | 135.9 ± 0.3a | 65.2 ± 0.1b | 202.8 ± 0.4a | 66.7 ± 0.4b |
| | France | 132.7 ± 0.2a | 59.1 ± 0.2c | 180.7 ± 0.1b | 59.8 ± 0.3c |
| | Algeria | 133.8 ± 0.4a | 63.2 ± 0.3b | 198.4 ± 0.2a | 64.2 ± 0.5b |
| | Mean | 134.1 ± 0.9 | 62.5 ± 1.8 | 194 ± 6.7 | 63.6 ± 2.0 |
| 2016 | Syria | 130.1 ± 0.2a | 72.1 ± 0.6b | 178.6 ± 0.9a | 42.4 ± 0.4b |
| | France | 124.6 ± 0.2b | 61.6 ± 0.3c | 163.7 ± 0.8c | 49.1 ± 0.01b |
| | Algeria | 123.4 ± 0.2b | 64.9 ± 0.4c | 171.4 ± 0.9b | 32.2 ± 0.2b |
| | Mean | 126.03 ± 2.1 | 66.2 ± 3.1 | 171.2 ± 4.3 | 41.2 ± 4.9 |
| 2017 | Syria | 144.5 ± 0.2a | 47.0 ± 0.4b | 298.1 ± 1.2a | 70.3 ± 0.6ab |
| | France | 134.7 ± 0.2b | 52.8 ± 0.3b | 254.3 ± 0.9a | 63.2 ± 0.4b |
| | Algeria | 136.1 ± 0.2b | 49.9 ± 0.8b | 274.6 ± 1.1a | 67.2 ± 0.8b |
| | Mean | 138.4 ± 3.1 | 49.9 ± 1.7 | 275.7 ± 12.6 | 66.9 ± 2.0 |

In same column, for each year, means with the same letter are not significantly different at $p < 0.05$.

4. Discussion

Polyphenolic compounds are the most important groups of secondary metabolites in medicinal herbs and dietary plants. The results of phenol content observed in safflower oil ranged from 140.9–412.8 mg GAE/kg of oil (Table 4). The high amount of TPC confirmed that safflower oil presents an important source of these components. Similar results were observed in previous studies [4,16–19]. The results showed a high antioxidant activity for all accessions, which ranged from 20.6% to 68.9% (Table 4). This activity has been described by several works [5,19,20]. Shirvani et al. [21] reported that this activity had a rate of 50% at the beginning of safflower seed germination. Kim et al. [21] mentioned that the antioxidant activity of safflower seeds is lower than that of other botanical sections of the safflower plant. In detail, they reported 114.2%, 113.6%, 94.4%, and 86.1% of DPPH radical scavenging activity in petals, leaves, buds, and shoots, respectively.

Interestingly, great importance has been given to anti-inflammatory activity in pharmaceutical and cosmetic uses. Nevertheless, no study has been carried out to date to evaluate the effects of climatic conditions on the antiaging activity of safflower oil. Likewise, and for the first time, the anti-elastase and anti-collagenase properties of the phenol content of safflower oil were assessed in this study to identify a new source of antiaging agent. During the three years, the results suggest that safflower oil has important anti-collagenase activity with 72.1% inhibition at 500 µg/mL, a value corresponding to IC₅₀ = 130.1 µg/mL for the Syrian accession. This genotype showed an anti-elastase activity of 70.3% inhibition at 1000 µg/mL, a value corresponding to IC₅₀ = 298.1 µg/mL (Table 5). Using essential oils extracted from some medicinal herbs and food plants, Aumeeruddy-Elalfi et al. [22] demonstrated a minimal anti-collagenase activity and anti-elastase activity of 52.2% inhibition at 400 µg/mL and 32.23% inhibition at 800 mg/mL, respectively. A methanolic extract of water-pepper sprout inhibited collagenase activity in a concentration-dependent manner with an IC₅₀ value of 156.7 µg/mL [23].

Genotypic variability showed different responses to changes in weather conditions during the three years. Thus, these climatic variations, which were mainly due to variations in temperature and precipitation (Table 2), had significant effects on the studied parameters. Roche et al. [24] reported the effect of climatic conditions on the chemical composition of safflower seeds. In 2017, high temperatures and low rainfall were recorded during the growing season of safflower (Table 2). In the same year, the highest values of TPC (412.8 mg EAG/kg of oil) were reported for the Syrian accession (Table 4). In contrast, a decrease in temperature in 2015 and 2016 (Table 2) induced a decrease in the phenol

content and antioxidant activity for all the accessions. Therefore, it appears that these contents are influenced primarily by the increase in mean temperatures. Indeed, heat stress affected the accumulation of phenolic compounds in durum wheat seeds [25]. Another study confirmed that TPC increased significantly with the rise of temperature in sesame [26]. Unexpectedly, the total phenol content in 2016 was higher than 2015 (Table 4). This could be explained by the increase in rainfall, which led to an increase in the phenol content of safflower oil. These results are in accordance with those reported by Palese et al. [27] and in contradiction with those reported by Gucci et al. [28] regarding olive oil.

The influence of the growing conditions during the safflower plant cycle on its antioxidant activity was also investigated. A high antioxidant activity (Table 4) was found for all accessions with the rise of temperatures, confirming results already reported [26]. Taha and Matthäus [16] showed a significant increase in the antioxidant activity of safflower seeds caused by the roasting process. Britz and Kremer [29] reported that heat and drought influenced the tocopherol content in soybean during seed maturation. The content and quality of oil from plant material depends on the nature of the used solvents during its extraction. In our study, cyclohexane, an apolar solvent like hexane, may influence the oil content of safflower [30] and the extracted phenolic of the solid material [31,32]. Terpinc et al. [33] showed the effect of solvent type on the variation of total phenol content and antioxidant activity of different oil cake extracts. A higher percentage of unsaponifiable matter was demonstrated in safflower oil extracted by cyclohexane [34]. The use of a mixture of water and other organic solvents such as methanol in our study remains essential to ensure a perfect extraction of phenolic compounds from safflower seed oil.

The phenylpropanoid biosynthetic pathway is responsible for the synthesis of phenolic compounds [35]. However, biosynthesis stimulation of these compounds is mainly due to the regulation of many genes encoding the main enzymes of the phenylpropanoid pathway according to environmental conditions [36], such as drought stress [37] and high temperature [38,39]. The effect of genotype on phenolic compounds has been previously shown [40]. Moreover, as already seen in safflower and soybean [20,41], we found a positive correlation between TPC and antioxidant activity.

Furthermore, anti-elastase activity increased significantly with the increasing mean temperature recorded in 2017 (Table 5). In contrast, the anti-collagenase activity decreased with increasing temperature. However, the anti-collagenase activity remained higher than 47% inhibition at 500 µg/mL regardless of the temperature.

A great interest in the phenol content and antioxidant activity of the diet was reported among consumers and the scientific community. Phenols, antioxidant activity, and their impact on human health, even if not assessed in our study, have been reported broadly [42–49].

Today, many plants with high antioxidant activity are of interest for pharmaceutical and cosmetic applications. Indeed, a large range of oilseed has been used as skin products and hair cosmetics for a long time in several cultures, including sunflower and olive oil. The application of sunflower seed oil has been shown to preserve the stratum corneum integrity and improve hydration of the adult skin without inducing erythema [50]. Budiyanto et al. [51] reported that olive oil topically applied after UVB exposure can effectively reduce UVB-induced murine skin tumors, possibly via its antioxidant effects in reducing DNA damage by reactive oxygen species, and that the effective component may be labile to UVB. This antioxidant activity presents high potential as a UVB sunscreen agent [10,52]. Argan oil can improve skin elasticity [53] and skin hydration by restoring the barrier function and maintaining the water-holding capacity [54]. Moreover, a natural skin toning cream has been developed from safflower oil [55]. The oil body bound oleosin-rhFGF9 expressed in safflower seed stimulates hair growth and wound healing in mice [56]. Dakhil et al. [57] have reported that safflower oil characteristics can make it a main ingredient in the preparation of topical agents for the treatment of various skin problems. Abdul Karim et al. [52] recommended the possible use of cocoa pod extract as an ingredient in functional cosmetic products, specifically for anti-wrinkles as well as skin whitening or sunscreen products in combination with natural plant extracts to widen the spectrum of protection from sun rays.

Furthermore, many studies showed that skin aging and skin wrinkling may be reduced by the action of the antioxidant activity of various botanical extracts [58,59]. Aumeeruddy-Elalfi et al. [22] showed that the inhibitory potential of essential oils extracted from some medicinal plants make them potential candidates for the cosmetic (skin aging) and pharmaceutical industries.

In this study, the excellent anti-collagenase and anti-elastase activity of the phenolic compounds of safflower oil highlight its potential as a natural source of antiaging agents for cosmetic formulations. Besides the phenol content of safflower oil reported in our study, other research has confirmed that safflower oil contains also high proportions of polyunsaturated fatty acids and sterols [24]; the characteristics of all of these compounds could grant safflower oil high importance for pharmaceutical and industrial use.

5. Conclusions

Synthetic antioxidants are often associated with problems of carcinogenicity and toxicity; there is an increasing interest in oilseed as sources of natural antioxidants for cosmetic and pharmaceutical uses. This study focused on the quantitative profiling of methanol extractible (TPC) obtained from safflower seed oil grown in a semi-arid climate, and its antioxidant and antiaging activity. We revealed that safflower seed oil could be an important source of polyphenols with resulting antioxidant and antiaging activity. Genotype, year (climatic conditions), and their interaction significantly affected these properties. This was confirmed by the improvement in total phenol content and DPPH assay, and maintenance of appreciable antiaging activity of safflower oil with increasing temperature and drought. Recently, several studies reported that these compounds have an important role in human health. High levels of phenols as well as antioxidant and antiaging activity were reported for safflower oil seed. Their content and activity depend on both genotype and climatic conditions. Therefore, this highlights the potential interest of this source of valuable compounds for pharmaceutical and cosmetic applications. Moreover, these traits could be managed by modulations according to genotype and climatic conditions.

Author Contributions: Conceptualization, O.M., A.A.; methodology, K.Z., T.T., and A.L.; formal analysis, K.Z., A.L., and O.M., writing—original draft preparation, K.Z., A.L., A.A., A.D., T.T., and O.M.; writing—review and editing, O.M. and A.A.; supervision, O.M.; project administration, O.M., A.D., and A.A.

Funding: This research was supported financially by the Hubert Curien-Tassilli program 16MDU953.

Acknowledgments: This Ph.D. was supported by the Hubert Curien-Tassilli program 16MDU953.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

References

1. Mokhtari, N.; Rahimmalek, M.; Talebi, M.; Khorrami, M. Assessment of genetic diversity among and within carthamus species using sequence-related amplified polymorphism (SRAP) markers. *Plant Syst. Evol.* **2013**, *299*, 1285–1294. [[CrossRef](#)]
2. Isabelle, M.; Lee, B.L.; Lim, M.T.; Koh, W.P.; Huang, D.; Ong, C.N. Antioxidant activity and profiles of common fruits in Singapore. *Food Chem.* **2010**, *123*, 77–84. [[CrossRef](#)]
3. Koyama, N.; Kuribayashi, K.; Seki, T.; Kobayashi, K.; Furuhashi, Y.; Suzuki, K.; Arisaka, H.; Nakano, T.; Amino, Y.; Ishii, K. Serotonin derivatives, major safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seed antioxidants, inhibit low-density lipoprotein (LDL) oxidation and atherosclerosis in apolipoprotein E-deficient mice. *J. Agric. Food Chem.* **2006**, *54*, 4970–4976. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Ergönül, P.G.; Özbek, Z.A. Identification of bioactive compounds and total phenol contents of cold pressed oils from safflower and camelina seeds. *J. Food Meas. Charac.* **2018**, *12*, 2313–2323. [[CrossRef](#)]
5. Xuan, T.D.; Gangqiang, G.; Minh, T.N.; Quy, T.N.; Khanh, T.D. An Overview of chemical profiles, antioxidant and antimicrobial activities of commercial vegetable edible oils marketed in Japan. *Foods* **2018**, *7*, 21. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

6. Karamać, M.; Kosińska, A.; Estrella, I.; Hernández, T.; Dueñas, M. Antioxidant activity of phenolic compounds identified in sunflower seeds. *Eur. Food Res. Technol.* **2012**, *235*, 221–230. [[CrossRef](#)]
7. Soumaya, K.; Chaouachi, F.; Ksouri, R.; El Gazzah, M. Polyphenolic composition in different organs of Tunisia populations of *Cynara Cardunculus* L. and their antioxidant activity. *J. Food Nutr. Res.* **2013**, *1*, 1–6. [[CrossRef](#)]
8. Baghiani, A.; Boumerfeg, S.; Belkhiri, F.; Khennouf, S.; Charef, N.; Daoud Harzallah, D.; Arrar, L.; Abdel-Wahhab, M.A. Antioxidant and radical scavenging properties of *Carthamus caeruleus* L. extracts grow wild in Algeria flora. *Commun. Sci.* **2010**, *1*, 128–136. [[CrossRef](#)]
9. Silva, S.A.M.; Michniak-Kohn, B.; Leonardi, G.R. An overview about oxidation in clinical practice of skin aging. *Anais Brasileiros de Dermatologia* **2017**, *92*, 367–374. [[CrossRef](#)]
10. Mukherjee, P.K.; Maity, N.; Nema, N.K.; Sarkar, B.K. Bioactive compounds from natural resources against skin aging. *Phytomedicine* **2011**, *19*, 64–73. [[CrossRef](#)]
11. Kacem, R. Phenolic compounds from medicinal plants as natural anti-elastase products for the therapy of pulmonary emphysema. *J. Med. Plant Res.* **2013**, *7*, 3499–3507. [[CrossRef](#)]
12. Ollivier, D.; Boubault, E.; Pinatel, C.; Souillol, S.; Guérère, M.; Artaud, J. Analyse de la fraction phénoliques des huiles d'olive vierges. *Ann. Falsif. Exp. Chim. Toxicol.* **2004**, *965*, 169–196.
13. Merouane, A.; Noui, A.; Medjahed, H.; Nedjari Benhadj Ali, K.; Saadi, A. Activité antioxydante des composés phénoliques d'huile d'olive extraite par méthode traditionnelle. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* **2014**, *8*, 1865–1870. [[CrossRef](#)]
14. Nogala-Kalucka, M.; Rudzinska, M.; Zadernowski, R.; Siger, A.; Krzyzostaniak, I. Phytochemical content and antioxidant properties of seeds of unconventional oil plants. *J. Am. Oil Chem. Soc.* **2010**, *87*, 1481–1487. [[CrossRef](#)]
15. Wittenauer, J.; Mäckle, S.; Sußmann, D.; Schweiggert-Weisz, U.; Carle, R. Inhibitory effects of polyphenols from grape pomace extract on collagenase and elastase activity. *Fitoterapia* **2015**, *101*, 179–187. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Taha, E.; Matthäus, B. Effect of roasting temperature on safflower seeds and oil. *J. Food Dairy Sci.* **2018**, *9*, 103–109. [[CrossRef](#)]
17. Ben Moumen, A.; Mansouri, F.; Richard, G.; Abid, M.; Fauconnier, M.L.; Sindic, M.; El Amrani, A.; Caid, H.S. Biochemical characterisation of the seed oils of four safflower (*Carthamus tinctorius*) varieties grown in north-eastern of Morocco. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2014**, *50*, 804–810. [[CrossRef](#)]
18. Yu, S.Y.; Lee, Y.J.; Kim, J.D.; Kang, S.N.; Lee, S.K.; Jang, J.Y.; Lee, H.K.; Lim, J.H.; Lee, O.H. Phenolic composition, antioxidant activity and anti-adipogenic effect of hot water extract from safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seed. *Nutrients* **2013**, *5*, 4894–4907. [[CrossRef](#)]
19. Sung, J.; Jeong, Y.; Kim, S.; Luitel, B.P.; Ko, H.; Hur, O.; Yoon, M.; Rhee, J.; Baek, H.; Ryu, K. Fatty acid composition and antioxidant activity in safflower germplasm collected from south Asia and Africa. *J. Korean Soc. Int. Agric.* **2016**, *28*, 342–351. [[CrossRef](#)]
20. Kim, J.H.; Kim, J.K.; Kang, W.W.; Ha, Y.S.; Choi, S.W.; Moon, K.D. Chemical compositions and DPPH radical scavenger activity in different sections of safflower. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* **2003**, *32*, 733–738. [[CrossRef](#)]
21. Shirvani, A.; Jafari, M.; Goli, S.A.H.; Soltani Tehrani, N.; Rahimmalek, M. The changes in proximate composition, antioxidant activity and fatty acid profile of germinating safflower (*Carthamus tinctorius*) seed. *J. Agric. Sci. Technol.* **2016**, *18*, 1967–1974.
22. Aumeeruddy-Elalfi, Z.; Lall, N.; Fibrich, B.; Blom Van Staden, A.; Hosenally, M.; Mahomoodally, M.F. Selected essential oils inhibit key physiological enzymes and possess intracellular and extracellular antimelanogenic properties in vitro. *J. Food Drug Anal.* **2018**, *26*, 232–243. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
23. Kawaguchi, T.; Nagata, K. Collagenase inhibition by water-pepper (*Polygonum hydropiper* L.) sprout extract. *J. Herbmed. Pharmacol.* **2019**, *8*, 114–119. [[CrossRef](#)]
24. Roche, J.; Mouloungui, Z.; Cerny, M.; Merah, O. Effect of sowing dates on fatty acids and phytosterols patterns of *Carthamus tinctorius* L. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 2839. [[CrossRef](#)]
25. De Leonardis, A.M.; Fragasso, M.; Beleggia, R.; Ficco, D.B.M.; De Vita, P.; Mastrangelo, A.M. Effects of heat stress on metabolite accumulation and composition, and nutritional properties of Durum Wheat grain. *Int. J. Mol. Sci.* **2015**, *16*, 30382–30404. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. Jannat, B.; Oveisi, M.R.; Sadeghi, N.; Hajimahmoodi, M.; Behzad, M.; Choopankari, E.; Behfar, A.A. Effects of roasting temperature and time on healthy nutraceuticals of antioxidants and total phenolic content in iranian sesame seeds (*Sesamum indicum* L.). *J. Environ. Health Sci. Eng.* **2010**, *7*, 97–102.

27. Palese, A.M.; Nuzzo, V.; Favati, F.; Pietrafesa, A.; Celano, G.; Xiloyannis, C. Effects of water deficit on the vegetative response, yield and oil quality of olive trees (*Olea europaea* L., cv Coratina) grown under intensive cultivation. *Sci. Hort.* **2010**, *125*, 222–229. [[CrossRef](#)]
28. Gucci, R.; Caruso, G.; Gennai, C.; Esposto, S.; Urbani, S.; Servili, M. Fruit growth, yield and oil quality changes induced by deficit irrigation at different stages of olive fruit development. *Agric. Water Manag.* **2019**, *212*, 88–98. [[CrossRef](#)]
29. Britz, S.J.; Kremer, D.F. Warm temperatures or drought during seed maturation increase free α -tocopherol in seeds of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.). *J. Agric. Food Chem.* **2002**, *50*, 6058–6063. [[CrossRef](#)]
30. Takadas, F.; Doker, O. Extraction method and solvent effect on safflower seed oil production. *Chem. Proces. Eng. Res.* **2017**, *51*, 9–17.
31. Dobravalskytė, D.; Venskutonis, P.R.; Talou, T.; Zebib, B.; Merah, O.; Ragazinskienė, O. Antioxidant properties of deodorized extracts of *Tussilago farfara* L. *Rec. Nat. Prod.* **2013**, *7*, 201–209.
32. Salem, N.; Msaada, K.; Hamdaoui, G.; Limam, F.; Marzouk, B. Variation in phenolic composition and antioxidant activity during flower development of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *J. Agric. Food Chem.* **2011**, *59*, 4455–4463. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Terpinč, P.; Čeh, B.; Ulrih, N.P.; Abramovič, H. Studies of the correlation between antioxidant properties and the total phenolic content of different oil cake extracts. *Ind. Crops Prod.* **2012**, *39*, 210–217. [[CrossRef](#)]
34. Dasari, S.R.; Goud, V.V. Comparative extraction of castor seed oil using polar and non polar solvents. *Int. J. Curr. Eng. Technol.* **2013**, *3*, 121–123.
35. Kallscheuer, N.; Vogt, M.; Marienhagen, J. A novel synthetic pathway enables microbial production of polyphenols independent from the endogenous aromatic amino acid metabolism. *ACS Synth. Biol.* **2017**, *6*, 410–415. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
36. Oh, M.-M.; Trick, H.N.; Rajashekar, C.B. Secondary metabolism and antioxidants are involved in environmental adaptation and stress tolerance in lettuce. *J. Plant Physiol.* **2009**, *166*, 180–191. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
37. Gharibi, S.; Sayed Tabatabaei, B.E.; Saeidi, G.; Talebi, M.; Matkowski, A. The effect of drought stress on polyphenolic compounds and expression of flavonoid biosynthesis related genes in *Achillea pachycephala* Rech.f. *Phytochemistry* **2019**, *162*, 90–98. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
38. Wang, J.; Yuan, B.; Huang, B. Differential heat-induced changes in phenolic acids associated with genotypic variations in heat tolerance for hard fescue. *Crop Sci.* **2019**, *59*, 667–674. [[CrossRef](#)]
39. Commisso, M.; Toffali, K.; Strazzer, P.; Stocchero, M.; Ceoldo, S.; Baldan, B.; Levi, M.; Guzzo, F. Impact of phenylpropanoid compounds on heat stress tolerance in carrot cell cultures. *Front. Plant Sci.* **2016**, *7*, 1439. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
40. Gündüz, K.; Özdemir, E. The effects of genotype and growing conditions on antioxidant capacity, phenolic compounds, organic acid and individual sugars of strawberry. *Food Chem.* **2014**, *155*, 298–303. [[CrossRef](#)]
41. Zielińska-Dawidziak, M.; Siger, A. Effect of elevated accumulation of iron in ferritin on the antioxidants content in soybean sprouts. *Eur. Food Res. Technol.* **2012**, *234*, 1005–1012. [[CrossRef](#)]
42. Reboredo-Rodríguez, P.; Varela-López, A.; Forbes-Hernández, T.Y.; Gasparrini, M.; Afrin, S.; Cianciosi, D.; Zhang, J.; Manna, P.P.; Bompadre, S.; Quiles, J.L.; et al. Phenolic compounds isolated from olive oil as nutraceutical tools for the prevention and management of cancer and cardiovascular diseases. *Int. J. Mol. Sci.* **2018**, *19*, 2305. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
43. Singh, T.; Katiyar, S.K. Green tea polyphenol, (–)-epigallocatechin-3-gallate, induces toxicity in human skin cancer cells by targeting β -catenin signaling. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* **2013**, *273*, 418–424. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
44. Kim, H.J.; Bae, Y.C.; Park, R.W.; Choi, S.W.; Cho, S.H.; Choi, Y.S.; Lee, W.J. Bone-protecting effect of safflower seeds in ovariectomized rats. *Calcif. Tissue Int.* **2002**, *71*, 88–94. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
45. Cho, S.H.; Lee, H.R.; Kim, T.H.; Choi, S.W.; Lee, W.J.; Choi, Y. Effects of defatted safflower seed extract and phenolic compounds in diet on plasma and liver lipid in ovariectomized rats fed high-cholesterol diets. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.* **2004**, *50*, 32–37. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
46. Singhal, G.; Singh, P.; Bhagyawant, S.S.; Srivastava, N. Anti-nutritional factors in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seeds and their pharmaceutical applications. *Int. J. Rec. Sci. Res.* **2018**, *9*, 28859–28864. [[CrossRef](#)]

47. Kim, D.H.; Lee, J.H.; Ahn, E.M.; Lee, Y.H.; Baek, N.I.; Kim, I.H. Phenolic glycosides isolated from safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seeds increase the alkaline phosphatase (ALP) activity of human Osteoblast-like cells. *Food Sci. Biotechnol.* **2006**, *15*, 781–785.
48. Park, G.H.; Hong, S.C.; Jeong, J.B. Anticancer activity of the safflower seeds (*Carthamus tinctorius* L.) through inducing cyclin D1 proteasomal degradation in human colorectal cancer cells. *Korean J. Plant Res.* **2016**, *29*, 297–304. [[CrossRef](#)]
49. Kim, E.O.; Oh, J.H.; Lee, S.K.; Lee, J.Y.; Choi, S.W. Antioxidant properties and quantification of phenolic compounds from safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seeds. *Food Sci. Biotechnol.* **2007**, *16*, 71–77.
50. Danby, S.G.; AlEnezi, T.; Sultan, A.; Lavender, T.; Chittock, J.; Brown, K.; Cork, M.J. Effect of olive and sunflower seed oil on the adult skin barrier: Implications for neonatal skin care. *Pediatr. Dermatol.* **2013**, *30*, 42–50. [[CrossRef](#)]
51. Budiyanto, A.; Ahmed, N.U.; Wu, A.; Bito, T.; Nikaido, O.; Osawa, T.; Ueda, M.; Ichihashi, M. Protective effect of topically applied olive oil against photocarcinogenesis following UVB exposure of mice. *Carcinogenesis* **2000**, *21*, 2085–2090. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
52. Abdul Karim, A.; Azlan, A.; Ismail, A.; Hashim, P.; Abd Gani, S.S.; Zainudin, B.H.; Abdullah, N.A. Phenolic composition, antioxidant, anti-wrinkles and tyrosinase inhibitory activities of cocoa pod extract. *BMC Complement. Altern. Med.* **2014**, *14*, 381–393. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
53. Qirouani Boucetta, K.; Charrouf, Z.; Aguenau, H.; Derouiche, A.; Bensouda, Y. The effect of dietary and/or cosmetic argan oil on postmenopausal skin elasticity. *Clin. Interv. Aging* **2015**, *10*, 339–349. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
54. Qirouani Boucetta, K.; Charrouf, Z.; Derouiche, A.; Rahali, Y.; Bensouda, Y. Skin hydration in postmenopausal women: Argan oil benefit with oral and/or topical use. *Przegląd Menopauzalny* **2014**, *13*, 280–288. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
55. Zhaomu, W.; Lijie, D. Current situation and prospects of safflower products development in China. In Proceedings of the 5th International Safflower Conference, Williston, VT, USA, 23–27 July 2001.
56. Cai, J.; Wen, R.; Li, W.; Wang, X.; Tian, H.; Yi, S.; Zhang, L.; Li, X.; Jiang, C.; Li, H. Oil body bound oleosin-rhFGF9 fusion protein expressed in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) stimulates hair growth and wound healing in mice. *BMC Biotechnol.* **2018**, *18*, 51–61. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
57. Dakhil, I.A.; Abbas, I.S.; Marie, N.K. Preparation, evaluation, and clinical application of safflower cream as topical nutritive agent. *Asian J. Pharm. Clin. Res.* **2018**, *11*, 495–497. [[CrossRef](#)]
58. Garg, C.; Khurana, P.; Garg, M. Molecular mechanisms of skin photoaging and plant inhibitors. *Inter. J. Green Pharm.* **2017**, *11*, 217–232. [[CrossRef](#)]
59. Zhang, S.; Duan, E. Fighting against skin aging: The way from bench to bedside. *Cell Transplan.* **2018**, *27*, 729–738. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

