

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Ferhat Abbas Sétif 1

Faculté des Sciences de la
nature et la vie



جامعة فرحات عباس سطيف 1

كلية علوم الطبيعة والحياة

Department Des Sciences Agronomiques

N°...../SNV/2025

THÈSE

Présentée par :

KHEMMOULI Abdelmounaim

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT LMD

FILIÈRE : SCIENCES AGRONOMIQUE

SPÉCIALITÉ : AMENAGEMENT HYDRO-AGRICOLE

THÈME

**Monitoring de l'apport d'eau limité sur des cultures en environnement
semi-aride**

Soutenue publiquement le **30/04/2025**

Devant le Jury

| | | |
|------------------|-----------------------|------------------------------|
| Président | BEN MOHAMMED Amar. | Pr. UFA Sétif 1 |
| Directeur | CHENNAFI Houria. | Pr. UFA Sétif 1 |
| Examineur | HAFSI Miloud. | Pr. UFA Sétif 1 |
| Examineur | BENDERRADJI Laid. | Pr. UMB M'Sila |
| Examineur | HANNACHI Abderrahmane | Maitre de rech A. INRA Sétif |
| Examineur | BELAGROUZ Abdenour. | MCA ENSF Khenchela |

Laboratoire de valorisation des ressources biologiques naturelles (LVRBN)

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse.

*Tout d'abord, Je remercie du fond du cœur ma directrice de thèse **Pr. Chennafi** pour ses conseils avisés et ses encouragements tout au long de cette aventure scientifique.*

*Ainsi que , je souhaite remercier la direction du CCLS Batna pour m'avoir autorisé à poursuivre mes études de doctorat. Un grand merci au directeur **Baasou Riad** et au DRH **Rajai Mourad** pour leur soutien et leur compréhension tout au long de ce parcours.*

*Mes remerciements vont également à **Dr :Samir Merdaci**, qui m'a accompagné dès les premières démarches du concours, ainsi qu'à **Walid et Samir Abdelaziz** pour leur aide précieuse dans la mise en place des essais.*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance à **Dr Beghami Yacine, Dr Siham, et Dr Amior** pour leur soutien logistique inestimable.*

*Un remerciement particulier au **Pr Dif,Abdesalem** directeur de l'université Batna 1, pour avoir assuré l'approvisionnement en eau de la station expérimentale, condition indispensable à la réalisation de ce travail.*

*Je suis profondément reconnaissant envers mon ami **Youcef**, qui a pris en charge l'ensemble de l'équipement d'irrigation avec dévouement, et à **Dr Yamina Haider** pour les échanges académiques enrichissants qui ont grandement contribué à l'avancement de mes recherches. Mon ami **Lotfi** mérite également des remerciements spéciaux pour sa contribution efficace à l'acquisition et à l'analyse des données climatiques.*

*Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude infinie à **ma femme**, mon soutien absolu, pour sa patience, son amour, et son appui indéfectible durant ces années de travail, ainsi qu'à mes parents, pour leur amour, leurs prières, et leur soutien constant qui m'ont permis de surmonter les défis rencontrés tout au long de ce parcours.*

Merci à tous.

Dédicace

À mes parents,

Pour leur amour inconditionnel, leurs prières incessantes, et leur soutien sans faille, qui ont été ma source de force et de persévérance tout au long de ce parcours.

À ma femme,

Pour sa patience, son dévouement, et son soutien inébranlable. Tu as été mon pilier dans les moments les plus difficiles.

À ma famille,

Pour leur encouragement constant et leur présence bienveillante, qui m'ont aidé à réaliser ce rêve.

À tous ceux qui m'ont inspiré et soutenu de près ou de loin dans ce cheminement académique.

ملخص:

في الجزائر، يعدُّ الأمن الغذائي قضية رئيسية في إطار التنمية المستدامة، خاصةً في ظل النمو السكاني السريع. ووفقاً لمنظمة الأغذية والزراعة التابعة للأمم المتحدة، تحتل الجزائر الصدارة بين الدول الإفريقية من حيث الأمن الغذائي، إلا أن هذه الاستقلالية تظل هشة أمام التحديات المترابطة المرتبطة بالتغيرات المناخية وتذبذب التساقطات. يؤدي العجز المناخي الشديد وأثار التغير المناخي إلى انخفاض مردود المحاصيل الزراعية، مما يبرر تبني ممارسات مبتكرة في الإدارة المائية الزراعية. في هذا السياق، تم اختيار نوع نباتي جديد، وهو الكاميلينا (*Camelina sativa L. Crantz*)، وهو محصول زيتي معروف بتحملة للظروف الجافة، لتقييم استجابته للري المقنن. يتمثل الهدف الرئيسي للدراسة في تعديل الإمدادات المائية لتحديد الاستراتيجيات المثلى التي تتيح الحفاظ على الأداء الزراعي مع تقليل استهلاك المياه. أجريت هذه الدراسة في منطقة الأوراس، وهي بيئة شبه جافة تتميز بتساقط أمطار غير منتظم وأقل بكثير من المتوسط السنوي العالمي، تم تجريب الصنف "ألبا" من الكاميلينا على مدى موسمين زراعيين متتاليين (2022/2021 و 2023/2022)، التجارب أجريت في حقل البرهنة لمعهد العلوم البيطرية والزراعية بجامعة باتنة 1. ابنى اعتمد البروتوكول التجريبي على أربعة أنظمة ري مختلفة T1: يتمثل 100% من المتطلبات المائية، النمط الثاني للري بتطبيق نظام تقنين مائي معتدل (T2): بنسبة 75% من الاحتياجات المائية، والنمط الثالث للري بنظام تقنين مائي مشدد (T3) بنسبة 35% من المتطلبات المائية للمحصول، والنمط الرابع كشاهد يعتمد كلياً على مياه الأمطار (T0) مطري. و تم تصميم التجربة وفق مخطط عشوائي بالكامل مكرر أربعة مرات، الزراعة السابقة كانت لمحصول قمح صلب. ولتحديد الاحتياجات المائية بدقة، تم تركيب ثلاثة مقاييس للصراف في موقع التجربة لتجنب التقديرات وتحديد التبخر والنتج بشكل تجريبي، تتيح هذه المنهجية فحص السلوك الزراعي للكاميلينا تحت الري المقنن، مع إبراز إمكانياتها كمحصول ملائم للمناطق شبه الجافة. أظهرت الكاميلينا استجابة واضحة للري المحدود، حيث تم تقييمها من خلال ستة معايير رئيسية 1- الخصائص المورفولوجية والإنتاجية والخصوبة 2- كفاءة استخدام مياه الري. (EUEI) 3- الجودة الغذائية (محتوى الزيت والبروتين). 4- جودة الأعلاف للمنتجات الثانوية (القش والكسبيات المستخلصة). 5- استهلاك الطاقة. 6- الإمكانيات الطاقوية (إنتاج الوقود الحيوي). أظهرت النتائج أن النمط (T2) قللت من إنتاجية الحبوب ومحتوى الزيت بنسبة 20.77% و 5.28% على التوالي، في المتوسط على مدار موسمين زراعيين، مقارنة بالنمط (T1) في المقابل، حسن ((T2) كفاءة استخدام مياه الري (+8.20%) وإنتاجية المياه في وحدات الأعلاف للكسبيات (+21.96%) دون التأثير على القيمة الطاقوية للقش. بالإضافة إلى ذلك، رفع (T2) محتوى البروتين للمحصول (+6.75%) وقلل استهلاك الكهرباء بنسبة تتجاوز 30% مقارنة بـ (T1). تشير النتائج إلى أهمية تحقيق استغلال فعال للموارد المائية والطاقة، مما يتيح التوازن بين كفاءة الري، والاستدامة، والجوى الاقتصادية. وفي ظل الحاجة الملحة لإيجاد توازن بين توفر المياه، والإنتاج الزراعي، والحلول البديلة لتغذية الحيوان في المناطق شبه الجافة، يوصى بتفضيل الري المقنن المعتدل (T2 = 75% ETC) على التقنين المشدد (T3 = 35% ETC). يعزز هذا النهج العلاقة المتوازنة بين الأمن الغذائي وإدارة المياه الزراعية.

الكلمات المفتاحية: كاميلينا ساتيفا، الري المقنن، جودة العلف، كفاءة استخدام المياه، إنتاجية المياه في وحدات العلف، التنمية المستدامة.

Résumé :

En Algérie, la sécurité alimentaire constitue un enjeu majeur dans le cadre du développement durable, notamment face à une croissance démographique exponentielle. Selon les Nations Unies, l'Algérie se positionne en tête des pays africains en matière de sécurité alimentaire, mais cette indépendance reste fragile face aux défis croissants liés aux changements climatiques et à la variabilité des ressources hydriques. Les déficits climatiques sévères et les impacts du changement climatique entraînent une baisse des rendements agricoles, justifiant l'adoption de pratiques innovantes en aménagement hydro-agricole. Dans ce contexte, l'introduction de nouvelles espèces végétales adaptées aux conditions semi arides représente une piste prometteuse pour optimiser l'utilisation de l'eau. Parmi ces espèces, la caméline (*Camelina sativa* L. Crantz), une culture oléagineuse réputée pour sa résistance à la sécheresse, a été sélectionnée dans cette étude afin d'évaluer sa réponse à un régime d'irrigation déficitaire continue. L'objectif principal est de moduler les apports en eau afin d'identifier les stratégies optimales permettant de maintenir des performances agronomiques tout en réduisant la consommation hydrique. Cette étude a été conduite dans la région des Aurès, un environnement semi-aride marqué par des précipitations irrégulières et bien inférieures à la moyenne annuelle mondiale, ainsi que par des événements climatiques extrêmes. Le génotype Alba de caméline a été étudié sur deux saisons agricoles consécutives (2021/2022 et 2022/2023) dans le cadre d'expérimentations réalisées sur le site de l'Institut des Sciences Vétérinaires et des Sciences Agronomiques de l'Université de Batna 1. Le protocole expérimental repose sur quatre régimes hydriques distincts : (T0 = pluvial), (T1 = irrigation complète), (T2 = 75 % ETc) et (T3 = 35 % ETc). Le dispositif expérimental, structuré en blocs complètement randomisés avec quatre répétitions, intègre également trois lysimètres à drainage pour une mesure précise de l'évapotranspiration Potentielle (ETP). Ces approches méthodologiques permettent d'examiner le comportement agronomique et environnemental de la caméline sous irrigation limitée, en mettant en évidence son potentiel en tant que culture adaptée aux zones semi-arides. La caméline a montré une réponse significative à l'irrigation limitée, évaluée à travers six paramètres principaux : (1) caractéristiques morphologiques, de fertilité et de productivité, (2) efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation (EUEI), (3) qualité nutritionnelle (teneur en huile et en protéines), (4) qualité fourragère des sous-produits (paille et tourteaux), (5) consommation énergétique, et (6) potentiel énergétique (production de biocarburants). Les résultats montrent que le traitement T2 a réduit le rendement en grains et la teneur en huile de 20.77% et 5.28% respectivement, en moyenne sur deux saisons agricoles, par rapport au traitement T1. En revanche, T2 a amélioré l'EUEI (+8.20 %) et la productivité de l'eau en unités fourragères pour les tourteaux (+21.96 %), sans affecter la valeur énergétique de la paille. De plus, T2 a augmenté la teneur en protéines des graines (+6,75 %) tout en réduisant la consommation électrique de plus de 30 % par rapport à T1. Toutefois, une fiabilité fonctionnelle pour optimiser la valorisation des ressources hydrique et énergétique, permettant de concilier l'efficacité de l'irrigation, la durabilité et la rentabilité économique dans un contexte où il est urgent de trouver un équilibre entre la disponibilité de l'eau, les rendements agricoles et la recherche de solutions alternatives fiables pour l'alimentation animale dans les régions semi-arides. Il est recommandé de privilégier les restrictions d'irrigation modérées (T2 = 75 % ETc) plutôt que les restrictions sévères (T3 = 35 % ETc). Cette approche renforce le nexus entre la sécurité alimentaire et la gestion de l'eau agricole.

Mots clés : *Camelina sativa*, irrigation déficitaire, productivité de l'eau d'irrigation en unité fourragère, efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation (EUEI), développement durable.

Summary:

In Algeria, food security is a crucial priority for sustainable development, particularly in the context of rapid population growth. According to the United Nations, Algeria is among the leading African countries in terms of food security; however, this status remains fragile due to mounting challenges posed by climate change and variability in water resources. Severe climatic deficits and the impacts of global warming are causing significant declines in agricultural productivity, underscoring the need for innovative hydro-agricultural practices. In this context, introducing new crop species adapted to arid conditions becomes essential. Camelina (*Camelina sativa* L. Crantz), an oilseed crop renowned for its drought tolerance, was selected for this study to evaluate its response to sustained deficit irrigation. The main objective was to optimize water management strategies to maintain agronomic performance while reducing water consumption. This research was conducted in the semi-arid Aurès region, characterized by irregular and significantly low annual precipitation compared to the global average, along with frequent extreme climatic events. The study focused on the Alba genotype of camelina, evaluated over two successive agricultural seasons (2021/2022 and 2022/2023) through experiments carried out at the Institute of Veterinary and Agronomic Sciences, University of Batna 1. The experimental setup included four distinct irrigation treatments: (T0 = rainfed), (T1 = full irrigation), (T2 = 75% ETc), and (T3 = 35% ETc). A randomized complete block design with four replications was implemented, integrating three drainage lysimeters for accurate measurement of potential evapotranspiration (ETP). These methodological approaches enabled a comprehensive evaluation of camelina's agronomic and environmental performance under limited irrigation, showcasing its potential as a crop suitable for semi-arid regions. Camelina displayed significant responses to deficit irrigation, assessed across six key parameters: (1) morphological, fertility, and productivity characteristics; (2) irrigation water use efficiency (IWUE); (3) nutritional quality (oil and protein content); (4) forage quality of by-products (straw and oilcakes); (5) energy consumption; and (6) energy potential for biofuel production. The findings revealed that the T2 treatment resulted in average reductions of 20.77% in grain yield and 5.28% in oil content across two agricultural seasons compared to T1. However, T2 enhanced IWUE (+8.20%) and water productivity for forage units in oilcakes (+21.96%), without affecting the energy value of straw. Furthermore, T2 increased seed protein content (+6.75%) and reduced electricity consumption by over 30% compared to T1. This research highlights the feasibility of optimizing water and energy resource utilization while achieving a balance between irrigation efficiency, sustainability, and economic viability. In the face of urgent demands to reconcile water availability, agricultural productivity, and reliable animal feed solutions in semi-arid areas, moderate irrigation restrictions (T2 = 75% ETc) are recommended over severe ones (T3 = 35% ETc). This approach reinforces the crucial nexus between food security and agricultural water management

Keywords: *Camelina sativa*, Deficit irrigation, Sustainable development, Irrigation water productivity in forage units, Irrigation water use efficiency (IWUE).

Sommaire

Dédicace

Remerciements

ملخص

Résumé

Abstract

Liste des tableaux

Liste des figures

Acronymes

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I . Synthèse bibliographique | 6 |
| 1. Sécurité alimentaire et développement durable :..... | 6 |
| 2. Etat des lieux pour les huiles végétales en Algérie | 8 |
| 3. Etat des lieux de la situation agro climatique de la zone des Aurès | 10 |
| 4. Le concept de l'irrigation déficitaire | 12 |
| 4.1. Irrigation déficitaire soutenue | 13 |
| 4.2. Irrigation déficitaire régulée..... | 14 |
| 4.3. Analyse SWOT de l'irrigation déficitaire | 14 |
| 5. La Cameline : Une Approche Durable pour les Régions Semi-arides | 15 |
| 5.1. <i>Camelina sativa</i> : Une Culture Polyvalente aux Multiples Bienfaits | 17 |
| 5.1.1. Agricole | 17 |
| 5.1.2. Environnement | 17 |
| 5.1.3. Alimentaire | 18 |
| 5.1.4. Economique | 19 |
| 5.2 <i>Camelina sativa</i> en système de culture..... | 19 |
| Conclusion : | 21 |

| | |
|---|----|
| 6. La productivité de la Caméline sous apports d'eau limités | 22 |
| Recommandations | 25 |
| Chapitre II. Matériels et méthodes | 26 |
| 1. Caractéristiques du site expérimental : | 26 |
| 2. Mise en place de l'essai et conduite de la culture : | 27 |
| 2.1. Matériel végétal et dispositif expérimental. | 27 |
| 2.2. Gestion et conduite de la culture | 28 |
| 2.2.1. Gestion d'irrigation | 28 |
| 2.2.2. Gestion des prédateurs et adventices | 30 |
| 2.2.3. Gestion des intrants | 30 |
| 3. Les paramètres étudiés | 31 |
| 3.1 Le GDD (degrés-jours de croissance) | 31 |
| 3.2. Caractéristiques morphologiques | 32 |
| 3.2.1. La hauteur des plantes (HP) | 32 |
| 3.2.2. Le nombre de branches pour chaque plante (NBP) | 32 |
| 3.3. Variable de fertilité | 32 |
| 3.3.1. Poids de Mille grains (PMG) | 33 |
| 3.3.2. Nombre de graines par silique (NGS) | 33 |
| 3.4. Paramètres de productivité de la culture : | 33 |
| 3.4.1. Rendement en biomasse : (qx/ha) | 33 |
| 3.4.2. Rendement en grains (qx/ha) | 34 |
| 3.4.3. Rendement en paille (qx/ha) | 34 |
| 3.4.4. Indice de récolte (%) | 34 |
| 3.5. Variables de qualité des composants nutritifs | 34 |
| 3.5.1. Teneur en protéine (%) | 34 |
| 3.5.2. Teneur en huile (%) | 34 |
| 3.6. Variables de potentiel énergétique et huileux | 35 |
| 3.6.1. Rendement en huile (Kg/ha) | 35 |
| 3.6.2. La composante de la productivité en biodiesel de la cameline (L/ha) | 35 |
| 3.7. Les composantes de rendement fourragères | 35 |
| 3.7.1. Composition chimique de la paille et les tourteaux de la cameline | 35 |
| Matière sèche (MS) (%) | 36 |
| Matière minérale et organique (MO) (%) | 36 |
| Matière azotée totale (MAT) (%) | 36 |

| | |
|--|----|
| La cellulose brute (CB) (%) | 36 |
| 3.7.2. La digestibilité enzymatique | 37 |
| 3.7.3. Calcule de la valeur fourragère | 37 |
| 3.8. Les composantes liées à l'efficacité d'utilisation de l'eau | 38 |
| 3.8.1. Efficacité de l'utilisation de l'eau totale (Kg/m ³)..... | 38 |
| 3.8.2. Efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation (Kg/m ³) | 38 |
| 3.9 Efficacité de l'utilisation de l'eau en unité fourragère (UF/mm) | 38 |
| 3.9.1. Efficacité de l'utilisation de l'eau totale en unité fourragère (UF/mm)..... | 38 |
| 3.9.2. Efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation en unité fourragère (UF/mm) | 38 |
| Chapitre III . Résultats et discussion | 39 |
| 1. Impact des Facteurs Climatiques sur la Croissance de la <i>Camelina sativa</i> : Analyse des Campagnes 2021-2022 et 2022-2023 | 39 |
| 1.1. Introduction..... | 39 |
| 1.2. Influence des Facteurs Climatiques sur les Campagnes Agricoles de <i>Camelina sativa</i> | 39 |
| 1.2.1 . Première Campagne (2021-2022) | 39 |
| 1.2.2. Deuxième Campagne (2022-2023) | 40 |
| 1.2.3. Synthèse climatique | 41 |
| 1.3. Le degrés-jours de croissance (GDD)..... | 42 |
| 2. Réponse de la culture Oléagineuse <i>Camelina sativa</i> au système de Monitoring des Apports d'Eau Limités, Conduite en Milieu Semi-Aride des Aurès..... | 45 |
| 2.1. L'effet des traitements d'irrigation déficitaire sur les paramètres étudiés de la culture | 45 |
| 2.1.1. Caractéristiques morphologiques : La hauteur des plantes (HP), nombre de branche par plant (NBP) et le nombre de plant par mètre carré (NPM). | 46 |
| 2.1.2. Variables de Fertilité : nombre de graines par silique (NGS) le poids de mille graines (PMG)..... | 48 |
| 2.1.2.1. L'effet sur le nombre de graines par silique (NGS)..... | 48 |
| 2.1.2.2. L'effet sur le poids de mille graines (PMG)..... | 49 |
| 2.1.3. Variables de productivité : Rendement en grains (RDTG), Rendement en biomasse (RDT bio) et l'indice de récolte (IR)..... | 50 |
| 2.1.3.1. L'effet sur le rendement en grains (RDTG), biomasse (RDT bio) et paille (RDT PII) . | 51 |
| 2.1.3.2. L'effet sur l'indice de récolte (IR) | 53 |
| 2.1.4. Variables de Qualité des Composés Nutritifs : Teneur en protéine (Tprot) et Teneur en huile (Thuile) | 54 |
| 2.1.4.1. L'effet sur la teneur en protéine de la graine (Tprot)..... | 54 |
| 2.1.4.2. L'effet sur la teneur en huile (Thuile%) | 55 |
| 2.1.5. Les composantes liées à l'efficacité d'utilisation de l'eau | 56 |

| | |
|--|----|
| 2.1.6. Variables de Potentiel Énergétique et Huileux : Rendement en huile (RH) et estimation en biodiesel (EB)..... | 62 |
| 2.1.7. Paramètres d'efficience économique et d'électricité..... | 63 |
| 2.1.7.1. Analyse Énergétique Comparative de l'Irrigation Complète et Déficitaires pour la Caméline sous Pivot de 40 ha..... | 64 |
| 2.1.7.2. Évaluation Économique et Environnementale de l'Irrigation Complète et Déficitaires de la Caméline sous Pivot sur 40 ha | 66 |
| 2.1.7.3. Analyse Coût-Bénéfice et Environnementale de l'Irrigation Complète et Déficitaires... | 69 |
| 2.2. Analyse des relations complexes : Une approche multidimensionnelle par matrice de corrélation, analyse ACP et arbre hiérarchique | 69 |
| 2.2.1. Matrice de corrélation | 69 |
| 2.2.2. Analyse en composantes principale (ACP) | 71 |
| 2.2.3. Arbre hiérarchique | 73 |
| Conclusion | 75 |
| 3. Analyse de l'Efficacité Hydrique et de la Qualité Fourragère de <i>Camelina sativa</i> en Réponse à l'Irrigation Déficitaires | 78 |
| Introduction..... | 78 |
| 3.1. L'effet des régimes d'irrigations sur la composition chimique..... | 80 |
| Paille..... | 80 |
| Tourteaux..... | 82 |
| 3.2. L'effet des régimes d'irrigation sur la digestibilité enzymatique et la valeur énergétiques.... | 86 |
| Paille..... | 87 |
| Tourteaux..... | 88 |
| 3.3 L'effet des régimes d'irrigation sur la productivité de l'eau en unité fourragère | 91 |
| 3.4. Analyse des relations complexes : matrice de corrélation, analyse en composantes principales et dendrogramme des paramètres étudiés | 93 |
| 3.4.1. Matrice de corrélation | 93 |
| 3.4.2. Analyse ACP (Analyse en Composantes Principales)..... | 95 |
| 3.4.3. L'arbre hiérarchique (Dendrogramme) | 96 |
| Conclusion | 97 |
| Conclusion générale..... | 99 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----------|
| 1. Évolution des Prix des Produits Alimentaires selon l'Indice FAO | 06 |
| 2. Synthèse des Études (2008-2021) sur l'Impact de Différents Régimes d'Irrigation sur les Différents Composants du Rendement dans Divers Environnements. | 22 |
| 3. Les valeurs des caractéristiques et propriétés du sol | 27 |
| 4. Phases de Croissance de la Cameline :Codes BBCH, JAS, et GDD pour les campagnes agricoles 2021-2022 et 2022-2023 | 43 |
| 5. Carrés moyens des écarts de l'analyse de variance des caractéristiques morphologique de la cameline au cours des deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023). | 46 |
| 6. Carrés moyens des écarts de l'analyse de variance des paramètres de fertilité de la cameline au cours des deux campagnes agricoles (2021-2022) et (2022-2023). | 49 |
| 7. Carrés moyens des écarts de l'analyse de variance des paramètres de productivité cameline au cours des deux campagnes agricoles (2021-2022) et (2022-2023) | 50 |
| 8. Carrés moyens des écarts d'ANOVA des variables de qualité des Composés Nutritifs de la cameline au cours des deux campagnes agricoles (2021-2022) et (2022-2023). | 55 |
| 9. Quantité d'eau appliquée (mm) et économies d'eau sous différents traitements au cours des deux campagnes agricoles (2021-2022) et (2022-2023). | 57 |
| 10. Carrés moyens des écarts d'ANOVA des paramètres d'utilisation de l'eau de la cameline au cours des deux campagnes agricoles (2021-2022) et (2022-2023). | 60 |
| 11. Carrés moyens des écarts d'ANOVA des Variables de Potentiel Énergétique et Huileux de la cameline au cours des deux campagnes agricoles (2021-2022) et (2022-2023). | 62 |
| 12. Données de Fonctionnement pour un Pivot d'Irrigation de 40 Hectares Source : Catalogue de fonctionnement du constructeur ANABIB. | 65 |
| 13. Consommation Électrique pour l'Irrigation Complète (T1) du Cycle de la Cameline sous Pivot (40 ha) | 66 |

| | |
|--|----|
| 14. Consommation Électrique pour l'irrigation déficitaire (T2) du Cycle de la Cameline sous Pivot (40 ha) | 66 |
| 15. Devis financier de la consommation Électrique pour l'Irrigation Complète (T1) du Cycle de la Cameline sous Pivot (40 ha) | 68 |
| 16. Devis financier de la consommation Électrique pour l'Irrigation déficitaire (T2) du Cycle de la Cameline sous Pivot (40 ha) | 68 |
| 17. L'effet des traitements sur la composition chimique de la paille de la cameline | 80 |
| 18. L'effet des traitements sur la composition chimique des tourteaux de la cameline | 83 |
| 19. L'effet des traitements sur la digestibilité enzymatique et la valeur énergétique de la paille de la cameline | 87 |
| 20. L'effet des traitements sur la digestibilité enzymatique et la valeur énergétique des tourteaux de la cameline | 89 |
| 21. Calcul de la productivité de l'eau en unité fourragère pour la paille | 91 |
| 22. Calcul de la productivité de l'eau en unité fourragère pour les tourteaux | 92 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| 1. Production mondiale d'huiles végétales, principaux produits | 07 |
| 2. Production mondiale des principales huiles végétales par principaux producteurs (2019) | 08 |
| 3. Procédure de trituration des oléagineuses | 09 |
| 4. Les principales stratégies d'irrigation déficitaire | 13 |
| 5. Analyse SWOT de l'irrigation déficitaire en Algérie | 15 |
| 6. Phase de développement de la cameline | 16 |
| 7. Analyse SWOT de la Cameline | 21 |
| 8. Localisation géographique de la zone d'étude | 26 |
| 9. Dispositif expérimental adopté | 28 |
| 10. Récolte de la cameline | 31 |
| 11. Compteur grains NUMIGRAL | 33 |
| 12. Balance de précision SARTORIUS MA 30 | 33 |
| 13. La pesée d'une biomasse d'un mètre carré | 34 |
| 14. Extraction de l'huile de cameline | 35 |
| 15. Précipitations et températures durant la campagne agricole 2021 – 2022 | 40 |
| 16. Précipitations et températures durant la campagne agricole 2022 – 2023 | 41 |
| 17. L'effet des régimes d'irrigations sur la hauteur de la cameline (HP) durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023) | 47 |
| 18. L'effet des régimes d'irrigations sur le NBP durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023) | 47 |
| 19. L'effet des régimes d'irrigations sur le NPM durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023) | 48 |

| | |
|--|----|
| 20. L'effet des régimes d'irrigations sur le NGS durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023) | 49 |
| 21. L'effet des régimes d'irrigations sur le PMG durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023) | 50 |
| 22. L'effet des régimes d'irrigations sur RDTG durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023) | 52 |
| 23. L'effet des régimes d'irrigations sur RDT PII et RDT Bio durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023) | 52 |
| 24. L'effet des régimes d'irrigations sur le IR durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023) | 53 |
| 25. L'effet des régimes d'irrigations sur la teneur en protéine durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023) | 54 |
| 26. L'effet des régimes d'irrigations sur la teneur en huile durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023) | 56 |
| 27. L'effet des régimes d'irrigations sur l'EUE grains et EUE bio durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023) | 58 |
| 28. L'effet des régimes d'irrigations sur le EUEI grains et EUEI bio durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023) | 59 |
| 29. L'effet des régimes d'irrigations sur le RH et EB durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023) | 63 |
| 30. Matrice de corrélation des différentes variables étudiées | 71 |
| 31. Analyse en Composantes Principales (ACP) des Relations entre les Variables étudiées | 73 |
| 32. L'arbre hiérarchique. | 75 |
| 33. La MS et MO de la paille pour chaque régime d'irrigation | 83 |
| 34. La composition chimique de la paille issue des différents traitements en secteurs éclatés | 83 |

| | |
|--|----|
| 35. La MS et MO des tourteaux pour chaque régime d'irrigation | 86 |
| 36. La composition chimique des tourteaux issue des différents traitements en secteurs éclatés | 87 |
| 37. Les paramètres de digestibilité enzymatique et la valeur énergétique de la paille issue des différents traitements | 89 |
| 38. Les paramètres de digestibilité enzymatique et la valeur énergétique des tourteaux issue des différents traitements | 92 |
| 39A Matrice de corrélation Paille | 95 |
| 39B Matrice de corrélation Tourteaux | 95 |
| 40A Présentation graphique PCA des Variables étudiées paille | 96 |
| 40B Présentation graphique PCA des Variables étudiées tourteaux | 96 |
| 41A L'arbre hiérarchique des variables étudiées paille | 98 |
| 42B L'arbre hiérarchique des variables étudiées tourteaux | 97 |

ACRONYMES

ACP : Analyse en Composantes Principales

ASTM : American Society for Testing and Materials

BBCH : Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie

CB : Cellulose Brute

CNCC : Centre National de Certification des Semences

DcellMO : Digestibilité de la Cellulase de la Matière Organique

DMO : Digestibilité de la Matière Organique

EUE : Efficience de l'Utilisation de l'Eau

EUEF : Efficience de l'Utilisation de l'Eau en Unité Fourragère

EUEI : Efficience de l'Utilisation de l'Eau d'Irrigation

ETc : Evapotranspiration de la culture

ET_o : Evapotranspiration Potentielle

ETP : Evapotranspiration Potentielle

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

GDD : Degrés-Jours de Croissance

HP : Hauteur des Plantes

INRAA : Institut National de la Recherche Agronomique Algérien .

ISRIC : International Soil Reference and Information Centre

JAS : Jour après semis

JORA : Journal Officiel de la République Algérienne

Kc : Coefficient Cultural

MAT : Matière Azotée Totale

MM : Matière Minérale

MO : Matière Organique

MOD : Matière Organique Digestible

MOND : Matière Organique Non Digestible

MS : Matière Sèche

NBP : Nombre de Branches par Plante

NGS : Nombre de Graines par Silique

NPM : Nombre de Plantes par Mètre Carré

ONM : Office national de météorologie

OMD : Organic Matter Digestibility (Digestibilité de la Matière Organique)

PEF : Productivité de l'Eau Totale en Unité Fourragère

PEIF : Productivité de l'Eau d'Irrigation en Unité Fourragère

PMG : Poids de Mille Grains

RDTG : Rendement en grains

RDT bio : Rendement en biomasse.

RDT PII : Rendement en paille

RH : Rendement en Huile

T1, T2, T3, T0 : Différents régimes d'irrigation

Tprot : Teneur en Protéine

TH : Teneur en Huile

UF : Unité Fourragère

VE : Valeur Énergétique

Introduction générale

L'Algérie, située sur la rive sud de la Méditerranée, fait face à des défis croissants pour maintenir l'équilibre de sa balance commerciale agricole, une problématique partagée avec d'autres pays de la région. Ces défis s'intensifient au fil des années (Nadhira & Ouahiba, 2018).

La dépendance accrue de l'Algérie aux importations agroalimentaires la rend vulnérable aux fluctuations des marchés internationaux et aux crises externes imprévues, telles que la crise économique mondiale et la pandémie de COVID-19.

La pandémie de COVID-19 a exacerbé cette vulnérabilité, révélant la faiblesse des chaînes d'approvisionnement mondiales, aggravée par le conflit en Ukraine. La perturbation logistique, la fermeture des frontières et la volatilité des prix ont directement affecté la disponibilité des produits alimentaires.

La vulnérabilité alimentaire en Algérie ne se limite pas seulement aux céréales ; c'est un phénomène complexe qui s'étend également au secteur oléagineux et à ses coproduits. En effet, l'Algérie est un importateur net d'oléagineux, que ce soit en huile brute ou en tourteaux de soja, de tournesol et de colza, ce qui reflète un déficit significatif en huile alimentaire et en fourrage pour l'élevage au sein de l'économie nationale. Malgré les efforts déployés, la production d'huile d'olive demeure insuffisante pour pallier ce déficit, même avec l'accélération des plantations au cours des dernières années.

Le coût d'importation des oléagineux et de leurs dérivés a atteint 1,4 milliard de dollars en 2011, se plaçant en troisième position après les céréales et les produits laitiers, avec 61% pour les huiles brutes et 36% pour les tourteaux (un facteur multiplicatif de six fois entre 2000 et 2011) (Rastoin & Benabderrazik, 2014). Selon la FAO, (2022), les prix des produits de large consommation dans le monde ont connu une hausse abrupte. L'augmentation la plus importante a été observée pour les oléagineuses et leurs coproduits, dont les prix ont grimpé de 125,9% au cours des trois dernières années.

L'Algérie s'est engagée dans la régulation systématique des prix et des marges bénéficiaires pour les huiles raffinées. Les marges sont plafonnées à 8% du coût de revient conformément à l'arrêté du 7 novembre 1996. Une compensation est accordée aux industriels pour absorber la

volatilité des prix sur le marché international et maintenir le prix d'un litre d'huile alimentaire à 120 DZD/L selon le décret n°11-108.

Une gestion lourde pèse sur le Trésor public, exacerbée par le mode d'importation des huiles brutes et des tourteaux séparément, au lieu d'importer des graines oléagineuses et de les triturer localement. Cela entraîne une double perte de devises d'une part, et une perte de création d'unités de trituration locale pour le développement économique local d'autre part.

De ce fait, le ministère de l'Agriculture et du Développement Rural a adopté une feuille de route pour la période quinquennale (2020-2024), comprenant des recommandations visant à introduire les cultures oléagineuses afin de réduire la lourde facture d'importation et de produire 30% des besoins nationaux d'ici 2024.

Dans ce contexte, il est crucial d'orienter la production d'huile et de fourrage vers de nouvelles perspectives, notamment en introduisant de nouvelles espèces adaptées aux différentes zones écologiques en Algérie. Cela vise à diversifier les ressources alimentaires et fourragères, tout en recherchant des alternatives pour combler ce déficit, qui semble être l'une des priorités du secteur agricole dans les milieux semi-arides.

En effet, avant 2021, les cultures oléagineuses sont pratiquement inexistantes avant 2021 dans le système agricole algérien, et leur mise en place est particulièrement difficile en raison de la prédominance du mode pluvial dans l'agriculture locale et du climat qui tend à devenir de plus en plus aride. McDermid et *al.*, (2023) ont souligné que les besoins en eau des cultures augmenteront de 5% d'ici 2050 pour maintenir les niveaux actuels de productivité, exacerbés par des tendances alarmantes, notamment une réduction des précipitations de 10% à 30% d'ici 2080 (UNEP/MAAP - UN, n.d.). Ce défi devient encore plus ardu face aux effets combinés du changement climatique, de la croissance démographique et de la concurrence d'autres secteurs économiques tels que l'industrie et le développement urbain.

La situation s'aggrave, où l'irrigation devient incontournable pour compenser le déficit pluviométrique et renforcer la résilience du système agricole en milieu semi-aride, tout en s'adaptant aux zones vulnérables au changement climatique. Cette approche contribue de manière cruciale à la gestion intégrée du nexus sécurité alimentaire-management de l'eau. Une approche holistique consiste à soutenir les pratiques agricoles durables et des stratégies efficaces en matière

d'eau, assurant un accès équitable à l'eau et à la nourriture tout en préservant les ressources naturelles pour les générations futures.

Face à ces problèmes multifactoriels, la recherche scientifique en agronomie doit viser à développer une agriculture capable de produire des rendements optimaux même dans des conditions de développement difficiles.

Une deuxième révolution verte axée sur l'efficacité de l'utilisation des nutriments et de l'eau est proposée comme l'une des solutions pour répondre à la demande alimentaire croissante et lutter contre la pénurie alimentaire dans les décennies à venir (Blum, 2009).

Lopez et *al.*, (2017) ont constaté que les taux actuels d'utilisation de l'eau agricole ne sont pas durables dans de nombreux pays, y compris en Algérie, soulignant ainsi la nécessité pressante d'améliorer les stratégies de gestion de l'eau pour plus d'efficacité. Lopez-Gunn et *al.*, (2012) affirment qu'il est essentiel de mettre en œuvre des stratégies plus efficaces permettant une production alimentaire suffisante tout en préservant les ressources en eau. Cette approche est devenue cruciale depuis les années 2000, lorsque la gestion de l'eau en agriculture a commencé à se concentrer sur l'augmentation de la productivité de l'eau.

Il est crucial que la gestion de l'irrigation en milieu semi-aride passe de l'accent mis sur la production par unité de surface à la maximisation de la production par unité d'eau consommée, appelée productivité de l'eau (Rekaby et al., 2016). Parmi les pratiques efficaces pour maximiser la productivité de l'eau d'irrigation, l'irrigation déficitaire se distingue particulièrement.

Fernandes-Silva et *al.*, (2018) décrivent l'irrigation déficitaire soutenue comme une stratégie d'irrigation consistant à utiliser un volume d'eau réduit, contrôlé par des indicateurs de stress hydrique ou en fonction d'un pourcentage des besoins totaux en eau. Cette méthode accepte un certain niveau de diminution de rendement, mais permet également d'économiser une proportion d'eau d'irrigation et une fraction d'énergie électrique. L'eau et l'énergie économisées peuvent être utilisées pour irriguer de nouvelles surfaces, améliorant ainsi la diversification des cultures, compensant la perte de productivité et réduisant les charges financières de pompage ainsi que les impacts environnementaux et l'épuisement des réserves gazières. L'irrigation déficitaire s'impose comme un outil puissant pour renforcer l'équilibre du nexus eau-sécurité alimentaire. Elle sera encore plus efficace lorsqu'elle sera associée à l'introduction de nouvelles espèces moins

gourmandes en eau. Cette approche soutient et renforce l'utilisation durable de l'eau tout en améliorant la résilience des systèmes agricoles face aux changements climatiques.

Dans ce contexte, parmi les espèces les plus prometteuses de ces dernières années, l'espèce polyvalente *Camelina sativa* de la famille des Brassicaceae émerge comme une alternative fiable aux oléagineux conventionnels en région semi-aride. Ancienne culture disparue au profit d'espèces plus productives comme le colza, la cameline a suscité un intérêt croissant ces dernières années grâce à sa large adéquation aux diverses conditions climatiques et pédologiques (C. Zhang & Auer, 2020). Très résistante aux maladies et aux ravageurs, la cameline est la moins sensible de toutes les espèces crucifères aux pénuries d'eau. Elle attire l'attention de la communauté scientifique, comme en témoigne l'augmentation notable des publications consacrées à cette plante au cours de cette décennie (Sydor et al., 2022). En raison de son potentiel à prospérer sur des terres marginales disposant de ressources en eau limitées (Nithyapriya et al., 2021), avec des besoins approximatifs de 332-490 mm (French et al., 2009; D. J. Hunsaker et al., 2013), la cameline se révèle être une option précieuse pour l'agriculture en milieu semi-aride.

Malgré cet engouement croissant, la cameline reste méconnue en Algérie, ce qui représente une opportunité pour relever les défis majeurs non seulement de l'agriculture, mais aussi grâce à sa large gamme d'utilisations alimentaires et industrielles. Sa teneur élevée en huile, très riche en acides gras oméga-3 et oméga-6, contribue à l'industrie agroalimentaire (C. Zhang & Auer, 2020), pharmaceutique (Obour et al., 2017), cosmétique (Delmas et al., 2013) et bioénergétique par sa capacité à produire un biocarburant très respectueux de l'environnement (Agarwal et al., 2021).

Par ailleurs, outre ses atouts agronomiques et industriels, la cameline se démarque par sa grande variété d'utilisations en alimentation animale, notamment pour la pisciculture, l'aviculture et l'élevage bovin et ovin, que ce soit en grains ou en tourteaux (Singh et al., 2023). Ces qualités pourraient contribuer efficacement à la résilience du système agricole algérien ainsi qu'à la diversification des ressources fourragères en Algérie.

Notre étude visait à évaluer les divergences et les convergences de la réponse de la qualité du rendement et de la productivité de l'eau de la cameline face à des apports d'eau limités, ainsi que le comportement de la qualité fourragère de ses sous-produits (paille et tourteaux). De plus, l'évaluation de la productivité de l'eau en unités fourragères sur deux campagnes agricoles

successives a permis de comprendre comment les pratiques d'irrigation influencent les aspects généraux de la productivité de la culture et l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans la région des Aurès en environnement semi-aride.

Afin de fournir aux producteurs et aux décideurs des informations précieuses sur les conséquences économiques et productives des allocations d'eau dans un contexte de déclin permanent des ressources hydriques en Algérie, notre étude explore également des stratégies d'irrigation déficitaire pour optimiser l'utilisation de l'eau et renforcer la résilience face au changement climatique. Les résultats de cette recherche visent à offrir des recommandations pratiques pour améliorer la sécurité alimentaire et la durabilité agricole dans les régions confrontées à une diminution des ressources en eau.

Chapitre I . Synthèse bibliographique

1. Sécurité alimentaire et développement durable :

La sécurité alimentaire et le développement durable revêtent une importance capitale dans le contexte agricole, notamment dans les régions semi-arides où la rareté des ressources et la vulnérabilité aux variations climatiques peuvent impacter significativement la production agricole. Dans ce contexte, l'Algérie, tout comme de nombreux autres pays de la rive sud méditerranéenne, se trouve confrontée au défi complexe de nourrir une population en croissance tout en préservant la durabilité à long terme de son système agricole. Ce défi est intensifié par les schémas climatiques changeants et les phénomènes extrêmes, qui accroissent la vulnérabilité du secteur agricole.

Dans cette perspective, les politiques agricoles en Algérie doivent évoluer pour non seulement assurer la sécurité alimentaire, mais aussi renforcer la résilience globale du système agricole. Promouvoir des pratiques agricoles durables, qui permettent une utilisation judicieuse des ressources disponibles tout en limitant l'impact environnemental, afin de répondre aux besoins actuels tout en garantissant ceux des générations futures.

L'accroissement de la dépendance aux importations alimentaires expose l'Algérie à une série de défis majeurs, particulièrement en raison des fluctuations des marchés internationaux et des risques associés aux chocs externes tels que la crise Ukrainienne et la pandémie de Covid-19. Ces facteurs, susceptibles d'engendrer des hausses abruptes des coûts d'importation, mettent sérieusement à l'épreuve la stabilité des prix et les approvisionnements alimentaires, comme le montre clairement le tableau représentant l'indice des prix de la FAO :

Tableau 1 . Évolution des Prix des Produits Alimentaires selon l'Indice FAO

| Produits | Hausse des prix en (%) | Hausse des prix en indice FAO (Points) |
|-------------------|------------------------|--|
| Huile végétale | 125.9 | +144.0 |
| Céréales | 74.1 | +73.2 |
| Viandes | 45.0 | +45.2 |
| Produits laitiers | 52.5 | +53.3 |

(FAO, 2022)

La hausse des prix a été la plus importante pour les huiles végétales, qui ont augmenté de 125,9 %. Cette hausse est due à plusieurs facteurs, notamment la guerre en Ukraine, qui a perturbé la production et les exportations d'huile de tournesol, l'une des principales huiles végétales produites et exportées par l'Ukraine.

Les huiles végétales constituent la composante lipidique des cultures oléagineuses, incluant graines, noix, fruits de palmier à huile, olives et soja (FAO, 2022). Elles occupent une place essentielle dans l'alimentation humaine et animale, apportant des lipides, des vitamines, et des minéraux, et servent même, bien que modestement, à la production de biodiesel. L'importance croissante de cette filière a entraîné une expansion significative au cours des deux dernières décennies (Figure 1). La production des huiles végétales varie selon les régions géographiques, reflétant les particularités des habitudes alimentaires propres à ces zones. (Figure 2).

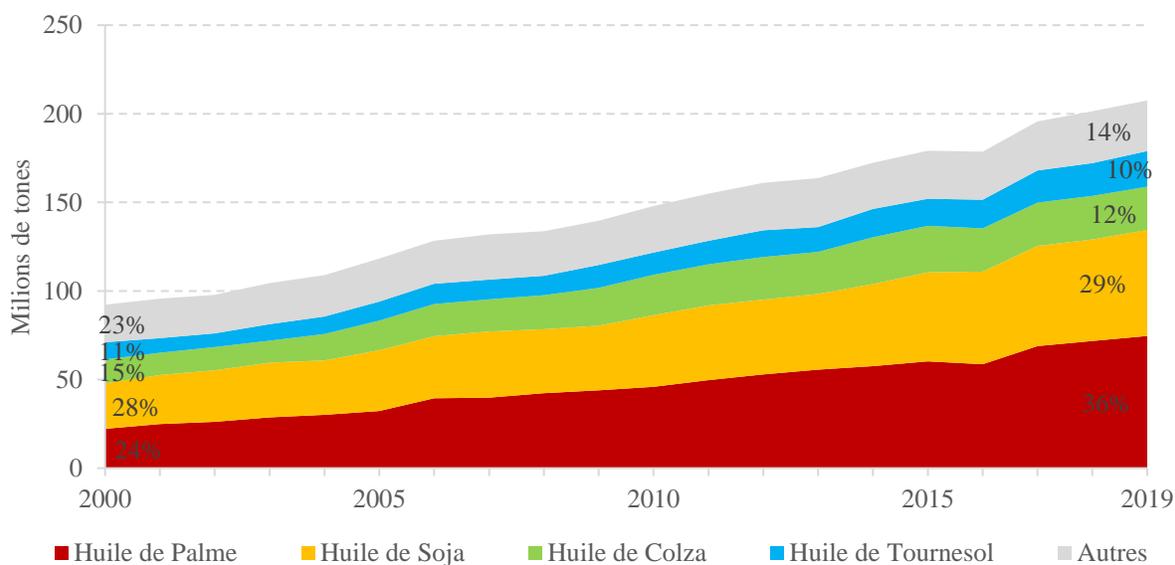


Figure 1. Production mondiale d'huiles végétales, principaux produits

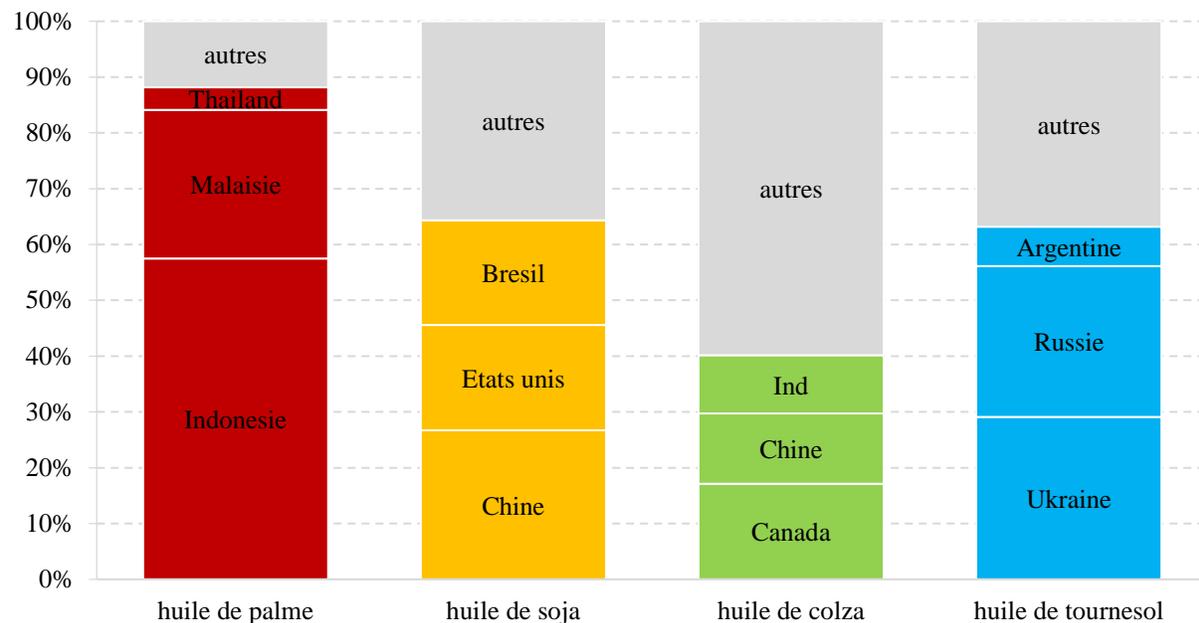


Figure 2. Production mondiale des principales huiles végétales par principaux producteurs (2019) (FAO, 2022)

Il existe une grande diversité des huiles végétales dans le monde, issues d'extraction de différentes espèces, les plus courantes :

Huile de palme : produite en Indonésie et en Malaisie.

Huile de soja : Principalement produite en Etats unis, le Brazil, l'Argentine et la Chine.

Huile de canola : les principaux producteurs sont le Canada, l'union européenne, l'Inde et la Chine.

Huile de tournesol : la Russie et l'Ukraine dominent la production mondiale avec l'Argentine.

Huile d'olive : un produit typique de la région méditerranéenne (Espagne, Grèce et la Tunisie...).

Cependant, il est important de noter que la production peut varier d'une région à l'autre selon l'influence des divers facteurs y compris les conditions climatiques, les politiques commerciales et les tendances en matière de l'huile de cuisson pour chaque région.

2. Etat des lieux pour les huiles végétales en Algérie

L'Algérie, ne cultivant pratiquement pas des oléagineuses avant 2021, s'est trouvée dans une dépendance quasi totale vis-à-vis des importations pour répondre aux besoins nationaux en huiles végétales, entraînant une augmentation progressive et significative des coûts d'importation. Cette situation a récemment conduit le gouvernement à lancer des initiatives pour promouvoir la culture de colza et de tournesol, dans l'objectif de renforcer la sécurité alimentaire. Bien que l'huile d'olive représente 13% de la consommation, elle est surpassée par l'huile de soja (49%), le tournesol (13%), le colza (7%) et l'arachide (5%), dont 90% sont importées, avec une demande intérieure estimée à 430 000 tonnes .(Rastoin & Benabderrazik, 2014).

L'objectif de l'industrie des oléagineux est de presser les graines pour en extraire de l'huile, produisant simultanément des tourteaux destinés à l'alimentation animale (première transformation). Ensuite, elle procède au raffinage des huiles brutes afin de les rendre aptes à la consommation (deuxième transformation) (Figure 3).

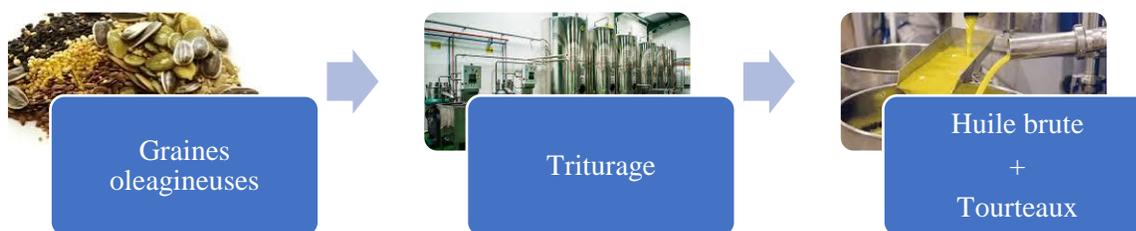


Figure 3 . Procédure de trituration des oléagineuses

L'absence de centres industriels opérationnels de trituration des graines oléagineuses, et l'importation sous forme d'huiles brutes qui sont ensuite raffinées localement, engendre une perte du coproduit de valeur, les tourteaux. Ces derniers doivent alors être importés séparément pour répondre aux besoins alimentaires des animaux d'élevage.

Face à cette situation, où le manque d'infrastructures locales pour la trituration des graines oléagineuses et l'importation d'huiles brutes entraînent une perte de coproduits précieux comme les tourteaux, le ministère de l'Agriculture et du Développement Rural a élaboré une feuille de route sectorielle (2020-2024). Celle-ci propose des recommandations pour intégrer les cultures oléagineuses dans les pratiques agricoles locales, afin de réduire la dépendance aux importations et de couvrir 30 % des besoins nationaux d'ici 2024.

Dans cette optique, la mise en service prochaine des unités de trituration des oléagineux à Jijel et Béjaïa par le groupe Cevital, prévue d'ici fin 2024, ainsi que le développement de la production locale, représentent une opportunité stratégique pour établir une véritable filière nationale d'oléagineux. Ce projet pourrait réduire la dépendance alimentaire de l'Algérie, soutenir l'emploi rural, et s'appuyer sur une organisation interprofessionnelle intégrant la recherche et la formation en semences, agronomie et technologies de transformation adaptées aux petites unités.

Pour atteindre ces objectifs, l'introduction de cultures oléagineuses adaptées au contexte algérien, telles que le canola, le carthame, le tournesol et les arachides, est envisagée en fonction des conditions régionales. Cependant, cette mise en place se heurte à des défis importants liés à la prépondérance de l'agriculture pluviale et à un climat de plus en plus aride, avec des précipitations annuelles moyennes de seulement 89 mm, bien en dessous de la moyenne mondiale (FAO, 2015), et une période sèche de neuf mois accompagnée d'une grande variabilité pluviométrique (Chennafi et al., 2006).

3. Etat des lieux de la situation agro climatique de la zone des Aurès

La région méditerranéenne est de plus en plus vulnérable aux changements climatiques, exacerbée par des tendances alarmantes, notamment une hausse prévue de 1,54 °C d'ici 2040, et une réduction des précipitations de 10% à 30% d'ici 2080 (Gan et al., 2013; UNEPMAP - UN, n.d.). avec La surexploitation des nappes d'eau et le gaspillage des eaux qui sévit depuis de longues années, ont eu comme effet désastreux la chute inquiétante du niveau des nappes d'eau dans la région de Batna qui connaît un sérieux problème, du fait que le pompage selon un communication personnelle s'effectue anarchiquement à travers 4.000 forages autorisés, 300 châteaux d'eau, des milliers de forages illicites dont certains dépassent 1500 mètres, au moins 13.000 puits traditionnels exploités en milieu rural, 400 puits collectifs et 13.000 puits individuels implantés en général en milieu urbain. (DRE Batna , 2023) ,la rareté de cette ressource se fait de plus en plus ressentir, et pose des sérieux défis pour l'optimisation de l'eau, en particuliers sa gestion est devenue un enjeu majeur pour assurer la sécurité alimentaire dans le milieu semi-aride.

La situation actuelle est devenue de plus en plus critique, où l'irrigation est devenue incontournable pour compenser le déficit pluviométrique. Cela est nécessaire pour répondre à la demande croissante en produits alimentaires estimée par la FAO, qui devrait doubler dans les 40

prochaines années dans les pays en développement. Ainsi, les agriculteurs devront produire deux fois plus dans la même surface afin de satisfaire leurs besoins alimentaires. (FAO, 2011).

En Algérie, la pression sur les ressources hydriques nécessite d'optimiser les stratégies de gestion de l'eau pour garantir la durabilité de l'agriculture. Cela passe par une amélioration de l'efficacité de l'eau agricole, essentielle dans les régions aux faibles précipitations, et par des pratiques visant à améliorer la productivité de l'eau, qui est devenue un enjeu crucial dans un contexte de disponibilité limitée.

Le concept de gestion durable de l'eau fait référence à toutes les pratiques qui améliorent le rendement des cultures et minimisent les pertes d'eau non bénéfiques (Johnson et al., 2001). Ainsi l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation, à savoir le rapport entre l'eau appliquée et le rendement des cultures (Stanhill, 1986), et la productivité de l'eau, à savoir le rapport entre l'eau consommée et le rendement des cultures (Kumar et al., 2010), ces deux paramètres sont importants pour atteindre la durabilité des ressources en eau.

Pour les zones semi-arides où l'agriculture est dominée par le mode pluvial qui entièrement dépend de l'eau de précipitation stockées dans le sol. Qui sont caractérisées par l'irrégularité spatio-temporelle des pluies en quantité, 38% des pluies enregistrées à l'installation de la culture, 24,6% des pluies enregistrées au cours d'hivers donc 63% des précipitations tombe en période où la végétation n'est pas active dû à la baisse des températures enregistrées. (Chennafi et al., 2006).

. Cette répartition temporelle inadaptée des pluies rend l'irrigation indispensable pour combler le déficit hydrique et répondre à la demande alimentaire croissante dans ces régions. Cependant, une gestion optimisée de l'eau d'irrigation, ajustée aux besoins réels des cultures, reste difficile à atteindre, limitant l'efficacité des ressources et la productivité de l'eau..

Face à ces problèmes multifactoriels les recherches scientifiques en agronomie doivent viser la mise en point d'une agriculture qui affronte un meilleur rendement dans des conditions de développement difficile pour la plante en conservant tout type de ressources naturelles que ce soit hydrique, édaphique et végétale dans le contexte de l'agriculture durable et de conservation.

Il est nécessaire que la gestion de l'irrigation dans ces zones passe de l'accent mis sur la production par unité de surface à la maximisation de la production par unité d'eau consommée,

appelée productivité de l'eau (Rekaby et al., 2016). Parmi les pratiques efficaces pour maximiser la productivité de l'eau c'est l'irrigation déficitaire .

4. Le concept de l'irrigation déficitaire .

L'application de l'irrigation déficitaire peut être très utile pour réduire la demande en eau dans le secteur agricole. L'irrigation déficitaire est l'application d'eau en dessous des besoins complets en eau des cultures à des moments sélectionnés (Forey et al.2016), autre terminologie Musick et al. (1994)ont déduit que l'irrigation déficitaire est de l'application de moins d'eau que nécessaire pour et le rendement maximal, ce qui entraîne la conservation d'une quantité limitée d'eau d'irrigation.

Alors que Chai et al.(2016) ont développé le concept d'irrigation déficitaire et le définissent comme la pratique d'irrigation caractérisée par l'application d'eau d'irrigation en dessous des quantités totales requises pour une croissance et un rendement optimal, visant à améliorer de manière positive la réponse des plantes à certain degré de déficit hydrique , et améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau par culture. L'adoption des principes d'irrigation déficitaire implique d'accepter une certaine réduction du rendement (Hamdy et al., 2005). En contrepartie, cette réduction permet d'économiser une part de l'eau d'irrigation, laquelle peut être utilisée pour irriguer de nouvelles surfaces, augmentant ainsi les surfaces cultivées et compensant la perte de productivité.

Les relations plante-sol-eau doivent être bien comprises pour permettre une utilisation efficace de l'eau et une gestion efficace de l'agriculture. C'est pourquoi des approches d'irrigation déficitaire ont été développées pour répondre à d'éventuels changements dans les ressources en eau. Il existe un effort continu pour comprendre les relations entre le bilan hydrique du sol, le rendement des cultures et l'efficacité de l'utilisation de l'eau afin de développer de meilleures cultures semi-arides et des pratiques de gestion de l'eau (Musick et al., 1994)

Ya deux principales stratégies d'irrigation déficitaire :

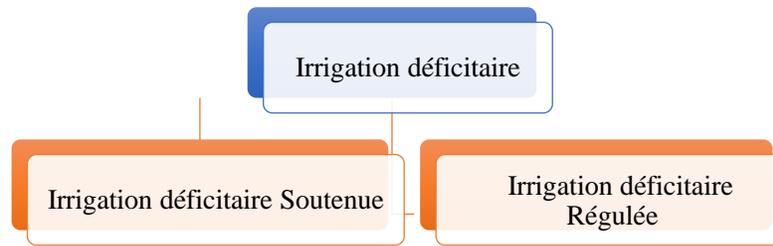


Figure 4. Les principales stratégies d'irrigation déficitaire

4.1. Irrigation déficitaire soutenue .

Fernandes-Silva et al.(2018) définissent l'irrigation déficitaire soutenue comme une stratégie qui implique la distribution contrôlée d'un volume d'eau réduit, ajusté en fonction d'un indicateur de stress hydrique ou en pourcentage des besoins totaux en eau de la culture tout au long de la saison d'irrigation. L'objectif est d'uniformiser le déficit hydrique sur l'ensemble du cycle de culture afin d'éviter l'apparition de stress hydrique sévère à un moment donné, ce qui pourrait avoir des conséquences néfastes. Sofo et *al.* (2012) , quant à eux, ont décrit l'irrigation déficitaire soutenue comme une pratique qui consiste à fournir un volume d'eau réduit, exprimé en pourcentage de l'évapotranspiration des cultures, tout au long de la saison d'irrigation. Plusieurs études ont examiné les effets de cette méthode sur les cultures.

Dans une étude menée par Ramadan et *al.* (2014) , l'application de 75% des besoins en eau du blé sous irrigation par aspersion dans un sol sableux a entraîné une réduction de seulement 3% du rendement du blé. De manière similaire, Taha et *al.* (2015) ont constaté qu'une réduction de 11% de l'eau appliquée lors de l'irrigation déficitaire du blé n'a entraîné qu'une perte de rendement de 2%. Une expérience menée par Noreldin et *al.* (2015) ont testé les effets de la réduction de l'eau d'irrigation appliquée au blé de 25% et 20% sous des systèmes de goutte à goutte et d'aspersion, respectivement. Ils ont observé une réduction du rendement du blé de 20% et 18%, respectivement. D'autres études ont comparé les régimes d'irrigation à différentes restitutions d'apport d'eau par rapport au régime entièrement irrigué des oliviers. Berenguer et *al.* (2006) ont conclu qu'une restitution comprise entre 66% et 75% de l'évapotranspiration des cultures était suffisante pour obtenir des rendements similaires à ceux des oliviers entièrement irrigués. Ont rapporté une diminution significative des composés phénoliques dans les huiles sous les niveaux d'irrigation les plus élevés.

4.2. Irrigation déficitaire régulée.

L'irrigation déficitaire régulée a été proposée pour la première fois par Chalmers et *al.*(1981). Cette stratégie d'irrigation réduit les apports en eau pendant des périodes spécifiques caractérisées par une moindre sensibilité des plantes au stress hydrique avec des effets minimes sur le rendement (Capra et al., 2008). En appliquant des quantités suffisantes d'eau pendant la période où les plantes sont sensibles au déficit hydrique et en appliquant des déficits hydriques pendant les périodes où les plantes sont plus résistantes aux carences hydriques(Blum, 2009; Geerts & Raes, 2009). D'autres paramètres de production que la biomasse, peut se comporter mieux avec la restriction hydrique appliquée à certain stade comme il est souligner par Tari.(2016) que les déficit hydrique appliqués au stade montaison et épiaison des blé augmente le ratio de protéine et le taux de gluten malgré la réduction significative du rendement en grain et biomasse au sein de cette restriction hydrique.L'irrigation déficitaire régulée a été adoptée avec succès pour certaines cultures pour déterminer le stade développement le plus sensible au stress, permettant la bonne conduite des irrigations pour éviter la chute du rendement avec une application d'apport d'eau minimum et au moment clé, appliquée avec succès à diverses cultures, telles que l'orge Orge(Kessai et *al.*, 2018),Blé dur (Chennafi et *al.*, 2006) ,Arbustives (Girona et *al.*, 2005) , Betterave sucrière (Fabeiro et *al.*, 2003), La tomate (Mukherjee et *al.*, 2023) et au coton (Guedes et *al.*, 2023).

4.3. Analyse SWOT de l'irrigation déficitaire .

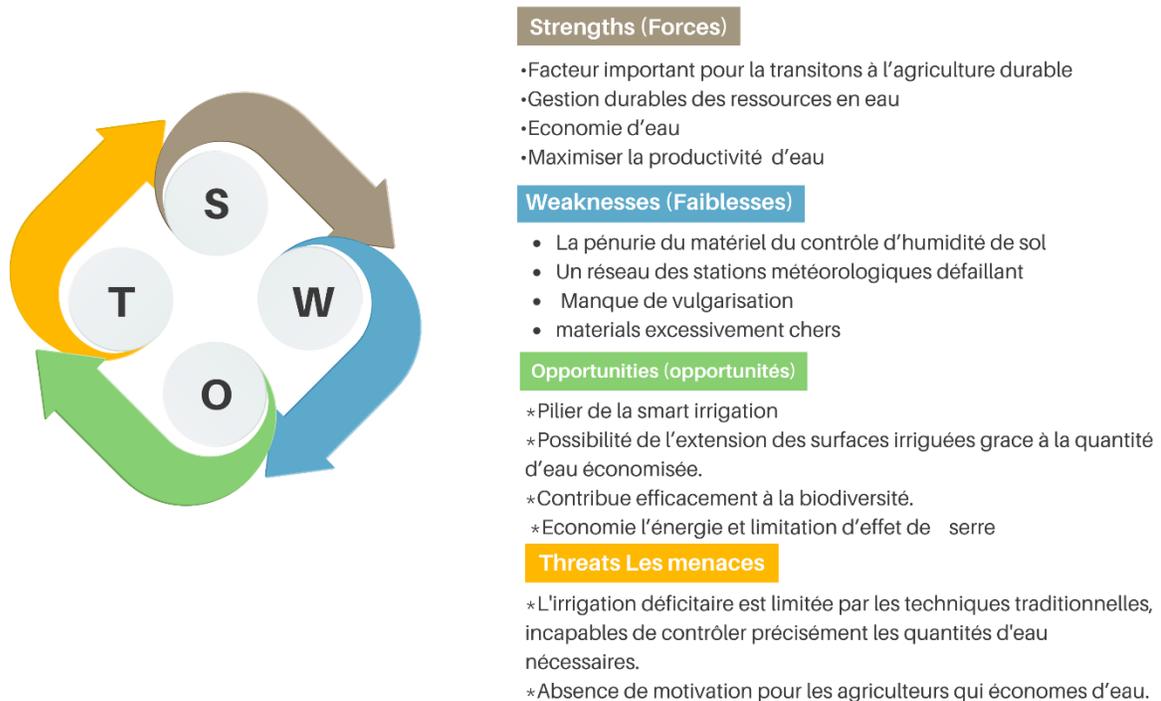


Figure 5 . Analyse SWOT de l'irrigation déficitaire en Algérie

5. La Cameline : Une Approche Durable pour les Régions Semi-arides

Confronter les effets combinés du changement climatique, de la croissance démographique et de la concurrence des autres secteurs économiques, tels que l'industrie et l'urbanisme, sur les ressources hydriques représente un défi quasi difficile. Dans cette configuration complexe, l'introduction d'espèces moins gourmandes en eau apparaît comme une solution pour relever ce défi multifactoriel, notamment face à un climat en évolution rapide. Cependant, cette approche peut être encore plus efficace lorsqu'elle est associée à des stratégies d'économie d'eau qui contribuent à limiter l'utilisation non durable de l'eau tout en améliorant la résilience de l'eau et en favorisant l'adaptation aux changements climatiques. Dans ce contexte l'espèce oléagineuse cameline émerge comme une alternative prometteuse dans les régions semi-aride , adaptée aux conditions environnementales extrêmes.

La cameline est une culture herbacée annuelle avec des biotypes hivernal et printanier présentant différents génotypes pour chacun (Masella et *al.*, 2014). Le cycle de vie varie de 90 à 250 jours (Royo-Esnal & Valencia-Gredilla, 2018; Zanetti, Alberghini, Jérômela, et *al.*, 2021) et en degrés-jours de croissance (GDD), la moyenne est de 1200 GDD selon la saison de semis et les

variétés adoptées. La hauteur susceptible d'être atteinte est entre 0,65 et 1,05 m (Jankowski, 2019; Martinelli & Galasso, 2011). Pendant la période de floraison, les fleurs prennent un aspect de couleur jaune pâle avec quatre pétales (Figure 6A) qui vont se reproduire en gousses appelées des siliques mesurées de (4-5 mm) et au nombre de 60-115 siliques par plante (Figure 6B), lesquelles enveloppent de 10 à 20 petites graines de cameline (5 fois plus petites que les graines d'arachides) (Figure 6C) (Martinelli & Galasso, 2011; Załuski et al., 2020; Zanetti et al., 2017) avec un poids de mille graines dépassant à peine 1g (Czarnik et al., 2018; Jankowski, 2019; Righini et al., 2019; Załuski et al., 2020; Zanetti et al., 2017), traduisant ainsi sa faible productivité par rapport au canola comprise entre 13 et 33 qx/ha (Krzyżaniak et al., 2019; Royo-Esnal & Valencia-Gredilla, 2018; Załuski et al., 2020; Zubr, 1997). Malgré cette faible productivité, la graine de cameline développe un taux d'extraction important compris entre 36 et 43% de l'huile trois fois plus que la teneur en huile d'olive (Kirkhus et al., 2013; Krzyżaniak et al., 2019; Załuski et al., 2020; Zanetti et al., 2017; Zubr, 1997), largement utilisée dans l'alimentation en raison de sa richesse en oméga-3 et oméga-6, convenant à la vinaigrette, la cuisson, la pâtisserie et la friture (Zubr, 2010), et non alimentaire dans le domaine cosmétique (Hélène, 2020; Zubr, 1997). De plus, les tourteaux représentent une source importante de protéines pour l'alimentation animale (Singh et al., 2023).



Figure 6 . Phase de développement de la cameline

L'huile de cameline ne se limite pas à des utilisations alimentaires telles que la fabrication de savon, de cosmétiques et la production de peinture (Zubr, 1997). L'utilisation non alimentaire la plus intéressante est celle du biodiesel, avec des propriétés conformes aux normes de l'American Society for Testing and Materials (ASTM) (Martinelli & Galasso, 2011).

5.1. *Camelina sativa* : Une Culture Polyvalente aux Multiples Bienfaits

5.1.1. Agricole

La Caméline (*Camelina sativa*), plante rustique, incarne une précieuse ressource agricole grâce à ses multiples bienfaits et son adaptabilité à des conditions de croissance difficiles. Cette culture nécessite peu d'eau et de pesticides (D. J. Hunsaker et al., 2011), même sur des sols marginaux (C. Zhang & Auer, 2020), offrant ainsi une option durable et respectueuse de l'environnement. Sa capacité à prospérer dans des environnements arides et semi-arides en fait une alliée précieuse pour la préservation des ressources naturelles.

La courte période de croissance de la Caméline la rend idéale pour la rotation des cultures (Royo-Esnal & Valencia-Gredilla, 2018), contribuant ainsi à diversifier les pratiques agricoles et à préserver la santé du sol. En tant que culture de couverture, elle joue un rôle essentiel dans la réduction de l'érosion, renforçant la durabilité des pratiques agricoles, notamment dans les régions arides et semi-arides confrontées à des contraintes hydriques.,

L'allélopathie de la Caméline, caractérisée par la production de composés chimiques allelopathiques, présente une approche novatrice pour la gestion des mauvaises herbes en agriculture. Son utilisation peut contribuer à réduire la dépendance aux herbicides chimiques, favorisant ainsi des pratiques agricoles plus durables (Carton et al., 2020).

De plus, la résistance de la Caméline aux maladies et aux ravageurs en fait une culture robuste, nécessitant moins de traitements phytosanitaires. Cela en fait une espèce attrayante pour l'agriculture biologique, renforçant ainsi son rôle dans le contexte agricole.

5.1.2. Environnement

La Caméline (*Camelina sativa*) se positionne comme une culture durable, respectueuse de l'environnement, offrant une panoplie d'avantages écologiques. L'opportunité de transformer l'huile de cette plante en biocarburant durable présente une alternative écologique, avec des

émissions de gaz à effet de serre moindres par rapport au biodiesel dérivé du soja ou du canola (Krohn & Fripp, 2012), contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique.

Les sous-produits de l'extraction d'huile, tels que les tourteaux, trouvent une utilité significative en tant qu'alimentation animale, favorisant une utilisation plus efficace des ressources. La faible empreinte carbone de la culture, combinée à son besoin minimal d'intrants tels que les engrais et les pesticides, renforce son profil respectueux de l'environnement (Righini et al., 2019).

La Caméline se distingue également par sa polyvalence, offrant diverses opportunités pour le développement de produits respectueux de l'environnement. Avec une empreinte carbone réduite. De plus, l'allélopathie de la Caméline offre une stratégie écologique en limitant les impacts négatifs des herbicides sur l'environnement et la santé humaine, tout en contribuant à contrer la résistance croissante des mauvaises herbes aux herbicides conventionnels (Uremis et al., 2009).

5.1.3. Alimentaire

L'huile de Caméline (*Camelina sativa*) se distingue par une composition nutritionnelle exceptionnelle, faisant d'elle un ingrédient de choix dans diverses applications alimentaires, tout en offrant des bienfaits significatifs pour la santé. Avec sa teneur élevée en acides gras polyinsaturés oméga-3, en vitamines, l'huile de Caméline présente une stabilité oxydative remarquable, en faisant un excellent ingrédient pour l'industrie.

L'acide gras alpha-linolénique (ALA), un élément essentiel de la famille oméga-3 présent en abondance dans l'huile de Caméline, joue un rôle crucial dans la fonction cérébrale, la santé cardiaque et la réduction des inflammations (Guendouz et al., 2022). La faible teneur en acide érucique constitue un avantage, évitant les risques potentiels de troubles cardiaques et de lipidose associés à des acides gras spécifiques (Vollmann & Eynck, 2015).

La composition équilibrée en acides gras, avec une faible teneur en acides gras saturés par rapport à d'autres huiles végétales, en fait un choix plus sain pour la cuisine et la production d'aliments transformés. Les résidus de la Caméline, tels que les tourteaux, trouvent une utilité précieuse en tant qu'alimentation animale, contribuant ainsi à réduire les dépendances aux protéines animales importées et à renforcer l'indépendance alimentaire des pays.

L'ajout de la Caméline dans l'alimentation humaine contribue à diversifier les sources de nutriments, favorisant une alimentation équilibrée. Sa teneur élevée en tocophérols, y compris la vitamine E, confère à l'huile une stabilité accrue face à l'oxydation par rapport à d'autres huiles riches en oméga-3 (Hrastar et *al.*, 2009). Des études soulignent également les effets positifs de l'huile de Caméline sur la santé, notamment la réduction du taux de cholestérol total dans le sérum sanguin et la diminution du LDL (Low-Density Lipoprotein) chez les individus présentant une hypercholestérolémie légère à modérée (Dobrzyńska & Przysławski, 2020). Ces résultats renforcent l'idée que l'intégration de l'huile de Caméline dans l'alimentation peut contribuer de manière significative à l'amélioration de la santé globale.

5.1.4. Economique

L'intérêt croissant pour les produits durables, avec une demande accentuée pour l'huile riche en oméga 3 provenant de *Camelina sativa*, ouvre des perspectives prometteuses. La demande croissante de cette culture dans diverses industries offre une opportunité de diversification des revenus et de développement d'une nouvelle filière économique. *Camelina sativa* se présente comme une matière première idéale pour la production de produits biosourcés, tels que des plastiques biodégradables et des lubrifiants biologiques, contribuant ainsi à la transition vers une économie circulaire et durable.

La croissance de la demande pour des produits durables et respectueux de l'environnement crée de nouvelles opportunités pour les agriculteurs et les entreprises impliqués dans la culture de *Camelina sativa*. Cette culture nécessite moins d'eau et de produits chimiques par rapport à d'autres cultures conventionnelles, réduisant ainsi les coûts de production. Sa capacité à pousser dans des conditions difficiles et marginales en fait une culture attrayante pour les régions arides et peu fertiles, offrant des opportunités économiques à ces régions.

5.2 *Camelina sativa* en système de culture

La caméline est une plante polyvalente qui offre plusieurs possibilités d'utilisation dans les systèmes de culture (Katarzyna et *al.*, 2018). Tout d'abord, la caméline peut être utilisée comme culture principale sur des terres marginales (C. Zhang & Auer, 2020). Cela permet non seulement l'utilisation de terres non exploitées, mais améliore également la qualité globale du sol (Zanetti, Alberghini, Marjanović Jeromela, et *al.*, 2021). De plus, la caméline peut également être utilisée

comme culture de couverture dans les systèmes de double culture. Dans ce système, la caméline est plantée comme culture de couverture entre les cultures principales pour assurer un couvert végétal au sol, réduire la croissance des mauvaises herbes et prévenir l'érosion pendant la saison non cultivée, en améliorant l'infiltration d'eau (Gaba et al., 2015; Meyer et al., 2019). De plus, la caméline peut être intercalée avec d'autres plantes telles que des légumineuses ou des graminées (Zanetti, Alberghini, Marjanović Jeromela, et al., 2021). Ce système d'association offre plusieurs avantages, tels qu'une amélioration de la fertilité du sol grâce à la fixation de l'azote par les légumineuses, une augmentation de la biodiversité et la possibilité de diversifier les revenus grâce à la vente de plusieurs cultures. De plus, la caméline peut également être utilisée comme culture relais dans les systèmes de culture (Berti et al., 2015). Dans le relais de cultures, la caméline est plantée dans le même champ après la récolte de la culture principale. Cela permet une utilisation efficace des ressources et prolonge la saison de croissance, maximisant la productivité sur la même terre. Ces diverses utilisations de la caméline offrent aux agriculteurs des opportunités d'améliorer la santé du sol, d'augmenter la biodiversité et de diversifier les sources de revenus, (Sindelar et al., 2017; Struik & Kuyper, 2017).

La plasticité agronomique remarquable de la caméline lui permet de s'intégrer facilement dans divers systèmes de culture, aussi bien en agriculture conventionnelle qu'en agriculture biologique (Bilalis et al., 2017; Royo-Esnal & Valencia-Gredilla, 2018). La culture mixte, où plusieurs cultures sont cultivées simultanément dans le même champ, est devenue une pratique courante, notamment en agriculture biologique, où elle permet de lutter efficacement contre la pression des adventices (Gollner et al., 2010; M. Leclère et al., 2019; SAUCKE & ACKERMANN, 2006). La caméline est également largement utilisée comme culture de couverture, une tendance en pleine expansion en raison de ses avantages environnementaux indéniables (Petit et al., 2018), offrant ainsi à la caméline l'opportunité de passer d'une culture de niche à une culture rentable (Zanetti, Alberghini, Marjanović Jeromela, et al., 2021). Plusieurs études ont démontré les résultats prometteurs de la caméline en tant que culture en association, par exemple en l'associant à des fraises en culture hivernale (Groeneveld & Klein, 2014) ou à du maïs en culture estivale (Zanetti et al., 2017). La culture mixte revêt une importance cruciale pour les producteurs dans les régions confrontées à des contraintes de pénurie d'eau (Gaba et al., 2015), offrant une opportunité significative d'exploiter au maximum les ressources en cultivant deux espèces en même temps.

Des recherches récentes ont montré le succès de la caméline en association avec des lentilles ou des pois (M. Leclère et al., 2019; Paulsen, 2011), sans perte significative de rendement et sans nécessité d'intervention herbicide. Des essais prometteurs en Autriche Gollner et al., (2010) ont également été réalisés en associant la caméline au soja et aux lentilles. Cependant, la forte concurrence avec les graminées, principalement le blé et l'orge, peut entraîner une réduction significative du rendement de la caméline (M. Leclère et al., 2019; Paulsen, 2011).

5.3. Analyse SWOT de la Caméline (*Camelina sativa*) :

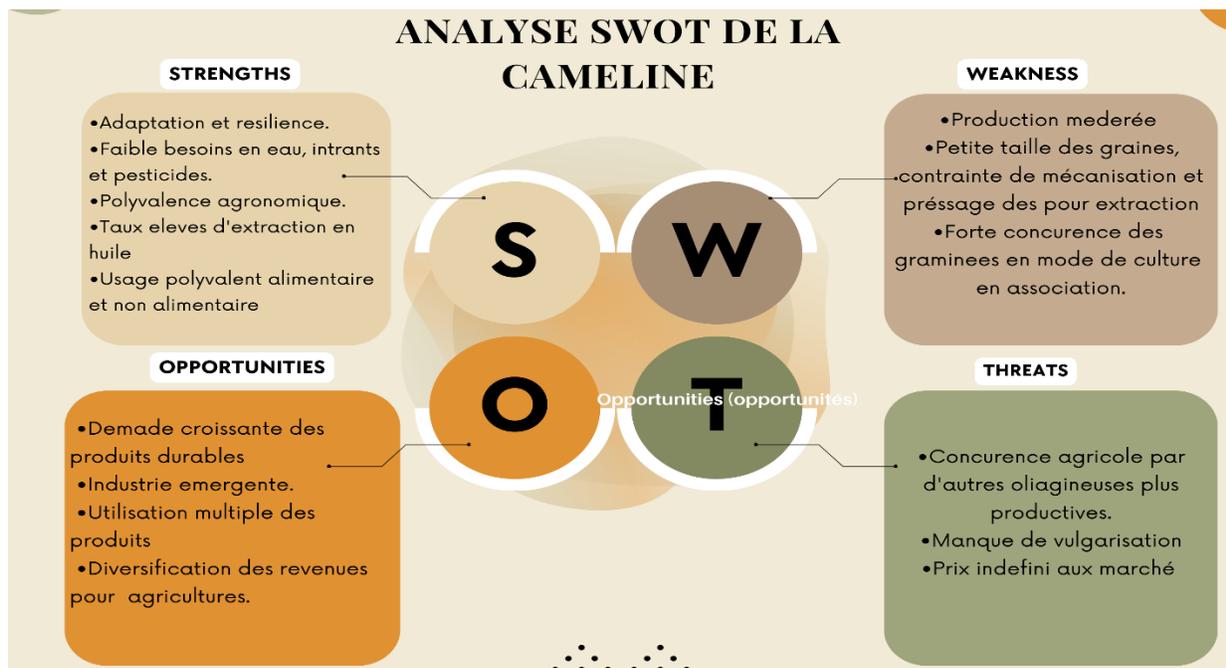


Figure 7. Analyse SWOT de la Caméline

Conclusion :

L'analyse SWOT de la caméline met en évidence ses forces en termes d'adaptabilité, de faible consommation d'eau et de polyvalence agronomique. Cependant, des défis tels que la productivité modérée et la concurrence avec d'autres cultures doivent être pris en compte. Les opportunités offertes par la demande croissante de produits durables et les industries émergentes peuvent compenser ces faiblesses. Les agriculteurs et les acteurs de l'industrie doivent rester attentifs aux menaces telles que la concurrence agricole et les fluctuations des prix. En adoptant des pratiques agricoles durables et en explorant diverses applications, la caméline peut jouer un rôle significatif dans la promotion de la durabilité environnementale et économique en Algérie.

6. La productivité de la Caméline sous apports d'eau limités

L'impact de l'irrigation déficitaire sur la productivité de la Caméline a été étudié dans plusieurs travaux de recherche. Ces études ont exploré les effets de différents niveaux d'apports en eau sur la croissance, le développement et le rendement de la Caméline. Voici un aperçu des principales recherches menées dans ce domaine :

Tableau 2 . Synthèse des Études (2008-2021) sur l'Impact de Différents Régimes d'Irrigation sur les Différents Composants du Rendement dans Divers Environnements.

| Année | Lieu | Auteurs | Régimes d'Irrigation | Rendement en graines (kg/ha) |
|-----------|-----------------------------------|---|---|------------------------------|
| 2008-2010 | Maricopa, Arizona, États-Unis | D. J. Hunsaker, A. N. French, K. R. Thorp | 45 % vs 60 % de la capacité au champ | 1500 vs 1200 |
| 2011 | Klamath Falls, Oregon, États-Unis | R. S. B. Smith, W. C. Johnson, J. L. Hatfield | Une fois par semaine vs une fois toutes les deux semaines vs une fois toutes les trois semaines | 1500 vs 1200 vs 1000 |
| 2012 | Reno, Nevada, États-Unis | J. E. Thomas, R. D. Miller, D. M. Anderson | 45 % vs 60 % de la capacité au champ | 1500 vs 1200 |
| 2013-2017 | Plusieurs sites aux États-Unis | M. A. E. B. Silva, J. Thomas, D. M. Anderson | Une fois par semaine vs une fois toutes les deux semaines vs une fois toutes les trois semaines | 1500 vs 1200 vs 1000 |
| 2014 | Maricopa, Arizona, États-Unis | G. W. Hergert | 0, 100, 200 et 300 mm | 1000, 1200, 1500 et 1800 |
| 2015 | Reno, Nevada, États-Unis | D. Neupane, R. H. Lohaus, K. F. Bronson | 10, 20 et 30 cm | 1000, 1200 et 1500 |
| 2016 | Reno, Nevada, États-Unis | A. D. Pavlista | 0, 10, 20 et 30 cm | 1000, 1200 et 1500 |
| 2018 | California, États-Unis | Nicholas George | 100 et 200 mm | 1000 et 1500 |
| 2019 | Maricopa, Arizona, États-Unis | K. F. Bronson | 0,5-1,1 fraction d'irrigation | 1000-1800 |
| 2020 | Iran | Safoora Borzoo | 100, 75 et 50 % de la capacité au champ | 1500, 1200 et 1000 |
| 2020 | Pakistan | Muhammad Aown Sammar Raza | 0, 1, 2 et 3 irrigations | 1000, 1200, 1500 et 1800 |
| 2021 | Nevada, États-Unis | Zeeshan Ahmed | 0, 1, 2 et 3 irrigations | 1000, 1200, 1500 et 1800 |

La répartition des 12 études sélectionnées sur une période s'étendant de 2008 à 2021 met en évidence l'intérêt croissant et l'essor de la recherche sur la caméline au cours de la dernière décennie. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette tendance. Tout d'abord, il y a une quête de cultures alternatives, notamment dans les régions confrontées à des défis liés à la disponibilité de l'eau. La caméline présente l'avantage d'avoir une empreinte environnementale réduite et un intérêt économique notable, ce qui contribue à réduire la dépendance aux combustibles fossiles tout en offrant une alternative agricole rentable, en particulier dans les régions où l'eau est rare.

Répartition géographique :

En analysant la répartition géographique des 12 études sur l'effet de l'irrigation sur le rendement du Camelina, on observe une nette concentration aux États-Unis. La majorité des études (10 sur 12) ont été menées aux États-Unis,. Cette concentration s'explique probablement par plusieurs facteurs, notamment :

Le fort intérêt des chercheurs américains pour les cultures alternatives et potentiellement durables. La présence de zones arides et semi-arides aux États-Unis, où la Cameline pourrait jouer un rôle important dans la production agricole durable.

Seulement 2 études ont été menées en dehors des États-Unis :Pakistan (1 études), et l'Iran (1 étude)

La diversité géographique est donc limitée pour le moment, mais avec l'intérêt croissant pour la Cameline, on peut s'attendre à voir davantage d'études dans d'autres régions du monde, notamment dans les zones arides et semi-arides. L'absence de pays européens dans les études est également cohérente avec cette hypothèse. En effet, l'Europe est une région où le climat est généralement plus tempéré, avec des précipitations plus abondantes. Dans ces conditions, la Cameline est moins susceptible de subir des stress hydriques, et l'irrigation peut donc être moins nécessaire.

Les aspects cultureux de la cameline Sous irrigation déficitaire :

En plus des informations résumées ci-dessus, les études que nous avons fournies contiennent également des données plus spécifiques sur différents aspects de la culture de la cameline sous irrigation déficitaire. Par exemple :

L'effet de différents taux d'irrigation sur le rendement, la teneur en huile et la composition des acides gras des graines de cameline (études N°1, N°4, N°6, N°8, N°9, N°10, N°11, N°12)

L'effet de la fertilisation azotée sur le rendement et la teneur en huile de la cameline (étude N°6).

La comparaison de la performance de la cameline et du canola sous irrigation déficitaire (études N°2, N°8)

L'utilisation de modèles de simulation pour étudier la consommation d'eau de la cameline (étude N°9).

Les recherches sur la Caméline sous irrigation déficitaire met en lumière sa capacité à tolérer des conditions de stress hydrique tout en maintenant un certain niveau de productivité. Les études ont montré que la Caméline présente des mécanismes physiologiques et morphologiques qui lui permettent de s'adapter à des niveaux d'eau limités, en modifiant ses schémas de transpiration et d'utilisation de l'eau pour optimiser son rendement en conditions de stress.

Les travaux de recherche ont également examiné l'effet de différents régimes d'irrigation déficitaire sur la croissance et le développement de la Caméline. Les résultats indiquent que des niveaux réduits d'apports en eau pendant certaines phases de croissance peuvent entraîner une diminution du rendement en graines. Cependant, la Caméline montre une certaine résilience face à ces conditions, avec des ajustements dans son métabolisme et sa physiologie pour maintenir sa productivité dans des environnements où l'eau est limitée.

Les chercheurs ont également examiné les pratiques agronomiques qui pourraient améliorer la performance de la Caméline sous irrigation déficitaire. Des stratégies telles que la gestion de fertilisants, la sélection de variétés résistantes au stress hydrique pour atténuer les effets négatifs du manque d'eau sur la culture.

En résumé, les études disponibles suggèrent que la Caméline présente une certaine capacité à prospérer sous des conditions d'irrigation déficitaire. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à cette tolérance au stress hydrique et pour développer des stratégies de gestion appropriées afin d'optimiser la productivité de la Caméline dans des environnements où les ressources en eau sont limitées.

Recommandations

Il est certain que la recherche supplémentaire dans le domaine des nouvelles cultures oléagineuses, en particulier en ce qui concerne les besoins en eau et la gestion du stress hydrique, est cruciale pour rendre ces cultures économiquement viables dans des environnements semi-arides comme l'Algérie. La compréhension précise des besoins en eau de ces cultures et de leur capacité à résister au stress hydrique est essentielle pour optimiser leur rendement et leur efficacité dans de telles conditions.

L'un des domaines moins explorés dans la recherche sur les oléagineuses est en effet l'irrigation et son impact sur différents paramètres de production. Les études sur l'utilisation efficace de l'irrigation, y compris les techniques d'irrigation et les stratégies d'irrigation adoptées, peuvent fournir des informations précieuses sur la manière d'optimiser la croissance et le rendement des oléagineuses tout en utilisant efficacement les ressources en eau disponibles.

De plus, des recherches approfondies sur les effets de l'irrigation sur la qualité des cultures oléagineuses, telles que la teneur en huile, la composition en acides gras et la qualité des graines, sont également nécessaires pour garantir la rentabilité et la valeur commerciale des cultures.

En investissant dans la recherche sur l'irrigation et son impact sur les oléagineuses, l'Algérie et d'autres régions semi-arides peuvent développer des pratiques agricoles plus durables et rentables, réduire leur dépendance aux précipitations et maximiser leur production agricole dans des conditions climatiques difficiles.

Chapitre II. Matériels et méthodes

1. Caractéristiques du site expérimental :

L'expérimentation a été menée au cours de deux campagnes agricoles, à savoir de 2021 - 2022 et de 2022 - 2023, sur le site de la station expérimentale de l'Institut des Sciences Agronomiques et Sciences Vétérinaires de l'Université de Batna 1, située dans le centre-est de l'Algérie (Figure 8.). Les coordonnées géographiques de la station sont de 35° 32' 41" N et 6° 8' 56" E, avec une altitude de 1050 mètres. La région appartient à l'étage bioclimatique semi-aride. La zone d'étude se caractérise par un été chaud et sec, ainsi que par des hivers froids et relativement humides.

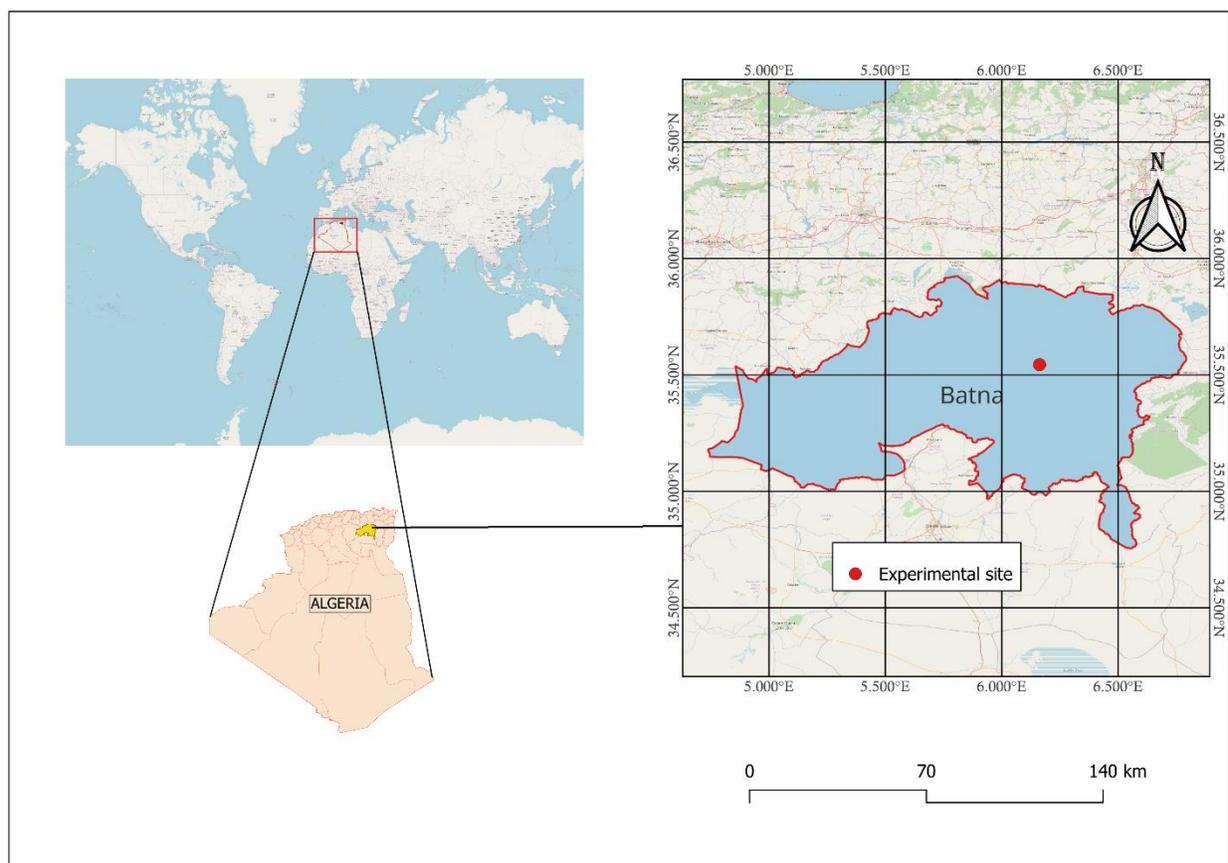


Figure 8 . Localisation géographique de la zone d'étude

Le sol présente une texture limoneuse fine, avec une teneur élevée en limon fin de 58% et une faible teneur en matière organique de 0,7%. Les analyses du sol ont été réalisées au laboratoire du Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA), conformément aux méthodes et procédures d'analyse du sol (Tableau 3) définies par (International Soil Reference and Information Centre ISRIC) suivant la méthodologie de Van Reeuwijk, (1995).

Tableau 3 . Les valeurs des caractéristiques et propriétés du sol

| Le paramètre | Profondeur de 0-60cm |
|---|----------------------|
| Conductivité électrique ds/cm | 0.21 |
| PH | 8.37 |
| Caco ₃ (Calcaire Total) (%) | 36.75 |
| Matière organique (%) | 0.74 |
| P ₂ O ₅ (meq/100g) | 17.16 |
| Ca ⁺⁺ (meq/100g) | 6.45 |
| Na ⁺ (meq/100g) | 3.83 |
| K ⁺ (meq/100g) | 0.368 |
| N azote (%) | 0.42 |
| Carbon (%) | 2.50 |
| Argile (%) | 20 |
| Limon fin (%) | 58 |
| Sable grossier (%) | 05 |
| Sable fin (%) | 10 |
| Limon grossier (%) | 07 |
| Humidité au point de flétrissement PF (%) | 34.5 |
| Humidité à la capacité au champ cc (%) | 18.7 |
| Densité apparente (g/cm ³) | 1.30 |
| Texture | Limoneuse fine |
| Indice de battance | 3.16 |

Le sol affiche un indice de battance élevé, calculé selon la formule de Rémy and Marin-Lafleche (1974), ce qui équivaut à un risque important d'imperméabilité de l'eau et de l'air. Pour remédier à cette situation, nous avons recommandé l'ajout de matière organique sous forme de fumier bovin, à raison de 3 kg par mètre carré respectivement. Cette correction a permis d'obtenir une réduction satisfaisante de l'indice de battance, ramené à une valeur satisfaisante de 1,38, tandis que la teneur en matière organique est passée à 2,3%.

2. Mise en place de l'essai et conduite de la culture :

2.1. Matériel végétal et dispositif expérimental.

Le génotype Alba de *Camelina sativa* a été semé à la volée à une densité de 4 kg ha⁻¹, soit environ 400 graines par mètre carré. Le semis, effectué à une profondeur de 10 mm, a eu lieu le 2 janvier 2022, après une culture de blé dur la première année, suivie de colza la deuxième année. Le semis de la deuxième année a été réalisé le 25 novembre 2023. Les semences, fournies par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) de Sétif, présentaient un poids de mille grains (PMG) de 1,01 g. La faculté germinative (95 %) a été déterminée dix jours avant le semis

selon le protocole ISTA (International Seed Testing Association, 2021) au Centre National de Certification des Semences de Sétif (CNCC)..

Nous avons choisi un dispositif à randomisation totale avec quatre régimes d'irrigation répétés quatre fois, à savoir :

T0 : Traitement témoin (Pluvial)

T1 : Traitement avec irrigation complète couvrant la totalité des besoins en eau 100 % ETc

T2 : Traitement avec irrigation couvrant 75 % ETc

T3 : Traitement avec irrigation couvrant 35 % ETc

Les parcelles élémentaires, de forme carrée, mesuraient 6,25 m² de surface, avec une longueur et une largeur de 2,5 m, et un espacement d'un mètre entre elles.

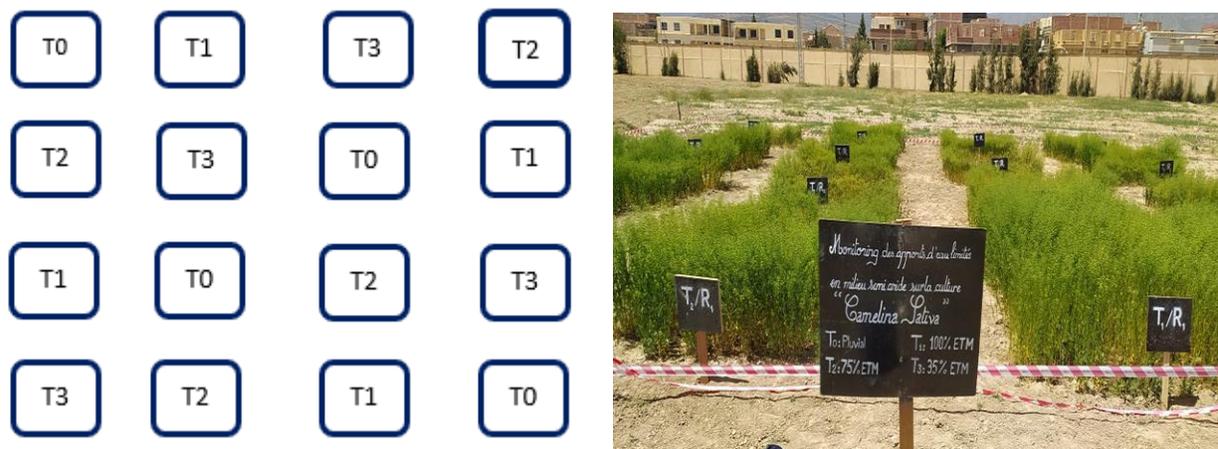


Figure 9 . Dispositif expérimental adopté

2. 2. Gestion et conduite de la culture

2.2.1. Gestion d'irrigation

Pour la gestion des apports en eau lors de notre étude, nous avons opté pour l'irrigation déficitaire soutenue plutôt que l'irrigation déficitaire régulière basée sur des restrictions d'eau durant des périodes courtes bien déterminées. Cette décision a été motivée par les avantages de

l'irrigation déficitaire soutenue en termes d'économie d'eau et de maintien des rendements. Contrairement au modèle phénologique basé sur les stades de croissance, l'irrigation déficitaire soutenue implique des restrictions d'eau tout au long du cycle de croissance. Une étude récente menée par Ouda et *al.*, (2021) a démontré que l'irrigation déficitaire soutenue était plus adaptée que le modèle phénologique en termes de diminution des pertes de rendement et d'économie d'eau d'irrigation. Une approche pertinente dans le contexte actuel de pressions croissantes sur les ressources hydriques et des tendances liées au changement climatique.

Le calcul des différents besoins en irrigation a été réalisé en utilisant trois cases lysimétriques équipés de systèmes de drainage, installés près des parcelles expérimentales.

L'estimation de l'évapotranspiration maximale des cultures (ET_c) et des quantités nettes d'irrigation a été réalisée comme suit :

$$ET_c = ET_0 \times K_c$$

ET_0 : L'évapotranspiration potentielle a été calculée expérimentalement en utilisant les cases lysimétriques avec drainage.

K_c : Le coefficient cultural a été déterminé en fonction des stades phénologiques (D. Hunsaker et *al.*, 2011).

L'évapotranspiration de référence (ET_0) a été mesurée sur un intervalle de temps donné en utilisant trois lysimètres de drainage, chacun ayant une surface de 1 mètre carré (1 m x 1 m) et une profondeur de 1 mètre, espacés de 0,5 mètre. Cette disposition en trois répétitions permet d'assurer une précision accrue des mesures. Le gazon à l'intérieur des lysimètres a été maintenu à une hauteur de 15 cm et régulièrement irrigué. L'eau de drainage a été collectée et mesurée dans un récipient calibré situé au fond de chaque lysimètre.

La mesure de l'évapotranspiration potentielle a été calculée en utilisant la méthode du bilan hydrique, telle que décrite par Allen et *al.*, 1998. Elle est basée sur la différence entre les flux d'eau entrants et sortants sur une période de temps donnée et est exprimée comme suit :

$$ET_0 = P + I - D \pm \Delta W$$

ET_0 : Evapotranspiration potentielle.

P : Précipitations.

I : Irrigation .

D : eau de drainage recueillie au fond de lysimetre.

ΔW : La variation de la teneur en eau du sol à l'intérieur du lysimètre isolé est restée constamment à la capacité au champ une fois que le drainage a cessé. ΔW devient négligeable, et la formule de calcul de l'évapotranspiration devient conforme à Aboukhaled et *al.*, (1982).

$$ET_0 = P + I - D$$

Les valeurs d'évapotranspiration obtenues sont des moyennes calculées sur les périodes entre les épisodes de drainage (Aboukhaled et al., 1982).

2.2.2. Gestion des prédateurs et adventices

Le désherbage a été fait manuellement en inspectant périodiquement l'apparition des adventices.

Contrairement au colza les oiseaux et les altises ne se sont pas considérés comme des ravageurs de caméline (Pavlista et al., 2011), mais l'expérimentation a porté une attention particulière à la présence d'autre ravageur de la caméline, notamment les fourmis (*Messor barbarus*). Cette espèce a été observée causant des dommages aux siliques de la caméline au stade de maturité, en découpant les pétioles et provoquant la chute prématurée des siliques. Afin de prévenir les pertes de rendement, une intervention chimique a été réalisée en utilisant un insecticide à base de (*Pirimiphos-methyl*) conformément aux réglementations locales et aux bonnes pratiques agricoles. Cette mesure de contrôle a permis de limiter les dommages causés par les fourmis et de préserver la qualité et le rendement des cultures de caméline.

2.2.3. Gestion des intrants

La quantité de fertilisation appliquée avant le semis comme un engrais de fond était 1 quintal/ha de *mono ammonium de phosphate* MAP (12.52), et comme engrais de couverture la quantité d'urée 46% utilisée était 50Kg/ha appliquée au stade de rosette.

2-2-4 La récolte :



Figure 10. Récolte de la cameline.

La récolte a été effectuée manuellement lorsque l'humidité des graines atteignait entre 8 et 10 % afin de réduire au minimum les pertes potentielles associées à une récolte tardive, telles que le fendillement des siliques sous l'effet du vent, de la pluie ou même de la grêle.

3. Les paramètres étudiés

3.1 Le GDD (degrés-jours de croissance)

Le paramètre GDD, ou degrés-jours de croissance, occupe une place centrale dans l'agriculture moderne en tant qu'outil essentiel pour évaluer le cycle de développement des cultures. En calculant la somme des températures au-dessus d'une certaine température de base, généralement exprimée en degrés Celsius (McMaster & Wilhelm, 1997), les GDD permettent de suivre l'évolution thermique nécessaire à la croissance des cultures. Cette surveillance de l'accumulation des GDD offre aux agriculteurs et aux chercheurs la possibilité de prédire avec précision les étapes critiques du développement des cultures, telles que la floraison, la nouaison et la récolte.

Grâce aux informations fournies par les GDD, les acteurs du secteur agricole peuvent planifier leurs activités agricoles de manière plus efficace et prendre des décisions éclairées. En effet, les GDD facilitent la planification des dates de semis, de la gestion des cultures et de la lutte contre les ravageurs, contribuant ainsi à une meilleure gestion des exploitations agricoles.

Outre son utilité pratique, le paramètre GDD joue un rôle crucial dans la sensibilisation aux défis posés par le changement climatique sur la production agricole. En surveillant l'accumulation des GDD au fil des saisons, il est possible d'identifier les effets des variations climatiques sur le développement des cultures et d'anticiper les besoins en cultivars résilients.

En somme, le paramètre GDD est un outil précieux et polyvalent dans l'arsenal des pratiques agricoles modernes. Il offre une compréhension approfondie du cycle de développement des cultures et constitue un atout majeur pour la prise de décision stratégique dans le domaine de l'agriculture. Le calcul de ce paramètre est effectué selon la formule de McMaster & Wilhelm, (1997).

$$GDD = \sum_i^j \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base}$$

TMax : La température maximale de la journée.

Tmin : La température minimale de la journée.

Tbase : Étant donné que 5 °C est la température de base appropriée pour la culture de la cameline, elle est utilisée pour calculer les GDD (Aiken et al., 2015).

3.2. Caractéristiques morphologiques

La mesure de différents paramètres physiologiques de croissance, pour chaque parcelle, est réalisée par un échantillonnage aléatoire de six plants de chaque parcelle. Cela comprend la détermination du rendement en grain, de la biomasse et de la teneur en huile. Un échantillon d'un mètre carré dans la partie centrale de chaque parcelle a été prélevé le jour de la récolte.

3.2.1. La hauteur des plantes (HP)

La hauteur (cm) est mesurée à la récolte, du sol jusqu'à la pointe de la plante.

3.2.2. Le nombre de branches pour chaque plante (NBP)

Le comptage du nombre de ramifications des plantes pour chaque traitement était réalisé au niveau de chaque parcelle élémentaire en échantillonnant aléatoirement dix plants.

3.3. Variable de fertilité

3.3.1. Poids de Mille grains (PMG)

En raison de la très petite taille des graines de caméline, il est indispensable d'utiliser un compteur de grains professionnel NUMEGRAL au niveau de la Coopérative des céréales et légumes secs (CCLS) de Batna. Les graines sont comptées à l'aide de cet équipement spécialisé répétés quatre fois pour assurer une pesé précise du nombre de grains. Ensuite, le poids total des grains est mesuré à l'aide d'une balance de précision SARTORIUS MA 30.



Figure11. Compteur grains NUMIGRAL **Figure12** .Balance de précision SARTORIUS MA 30

3.3.2. Nombre de graines par silique (NGS)

Le nombre de graines par silique est obtenu en battant 10 gousses par trois plantes, prélevées de manière aléatoire pour chaque parcelle élémentaire.

3.4. Paramètres de productivité de la culture :

3.4.1. Rendement en biomasse : (qx/ha)

La détermination du rendement en biomasse se fait par la pesée de la récolte d'un mètre carré de la partie centrale de la parcelle élémentaire, exprimée en grammes par mètre carré (g/m^2), puis convertie en quintal par hectare (qx/ha).



Figure 13 . La pesée d'une biomasse d'un mètre carré

3.4.2. Rendement en grains (qx/ha)

Pour déterminer le rendement en grains tout en séparant les graines de la paille et des enveloppes de gousse lors de la récolte d'un mètre carré. Exprimée en grammes par mètre carré (g/m^2), puis convertie en quintaux par hectare (qx/ha).

3.4.3. Rendement en paille (qx/ha)

On peut déterminer le rendement en paille (g/m^2) en soustrayant le rendement en grains du rendement en biomasse, puis convertie en quintal par hectare (qx/ha).

3.4.4. Indice de récolte (%)

Le (IR%) est déterminé comme le rapport entre le rendement en graines et le rendement en biomasse totale (Donald & Hamblin, 1976).

3.5. Variables de qualité des composants nutritifs

3.5.1. Teneur en protéine (%)

la matière azotée totale est déterminée par la méthode de Kjeldahl, qui comprend les étapes suivantes : digestion, neutralisation, distillation, dosage, et enfin le calcul de la quantité de protéines.

3.5.2. Teneur en huile (%)

En ce qui concerne la teneur en huile, elle est déterminée comme le pourcentage correspondant entre la masse d'huile obtenue et la masse totale des graines, conformément à la méthode décrite par Belayneh et *al.*, (2015). Il convient de noter que le pressage est réalisé à froid, une méthode

qui implique l'extraction de l'huile des graines sans l'application de chaleur, préservant ainsi au mieux la qualité et les propriétés de l'huile extraite.



Figure.14 Extraction de l'huile de cameline.

3.6. Variables de potentiel énergétique et huileux

3.6.1. Rendement en huile (Kg/ha)

Le rendement d'huile a été calculé comme le produit du rendement en graines de caméline multiplié par le pourcentage de teneur en huile des graines.

3.6.2. La composante de la productivité en biodiesel de la cameline (L/ha)

La méthodologie utilisée pour estimer la production de biodiesel s'est basée sur les directives décrites par Kemp, (2006), lesquelles impliquent l'utilisation d'un processus de pressage mécanique. Ce processus suppose un taux d'extraction de l'ordre de 80 %, par opposition à la méthode chimique d'extraction à l'hexane, qui rend les sous-produits trop secs pour être utilisés comme alimentation animale. En raison de la petite taille des graines de caméline et de leur susceptibilité aux pertes après la récolte, nous avons supposé un taux de pertes après récolte de 10 %. Les 90 % restants ont été utilisés pour estimer le rendement en huile en fonction de la teneur en huile (Neupane et al., 2020; Sintim et al., 2015). Ce rendement en huile a ensuite été converti en volume de biodiesel, à raison de 1 kg/ha équivalant à 0,439 L (Kemp, 2006).

3.7. Les composantes de rendement fourragères

3.7.1. Composition chimique de la paille et les tourteaux de la cameline

La détermination de la composition chimique de la paille et des tourteaux a été réalisée en prélevant plusieurs échantillons lors de la collecte de chaque parcelle élémentaire pour la paille, et lors de l'extraction de l'huile, les résidus ont été collectés à l'étape intermédiaire de l'extraction pour éviter le mélange entre les extractions des différents traitements. Dans le but de calculer la matière sèche (MS), les échantillons ont été placés dans une étuve à 104°C pendant 4 heures jusqu'à obtention d'un poids constant. Les échantillons ont ensuite été broyés pour déterminer les teneurs en cellulose (CB), en matière azotée totale (MAT), en matière minérale (MM) et en matière grasse (MG). Les analyses chimiques classiques ont été réalisées selon les méthodes officielles de l'AOAC (Association of Official Agricultural Chemists) (1990).

Matière sèche (MS) (%)

La matière sèche est calculée en soustrayant le poids initial de l'échantillon du poids final après le passage à l'étuve à 104°C pendant 4 heures. Ensuite, on divise ce résultat par le poids initial et on multiplie par 100 pour obtenir le pourcentage de matière sèche.

Matière minérale et organique (MO) (%)

La teneur en matière minérale dans un échantillon est déterminée par gravimétrie après calcination à 550°C pendant 6 à 7 heures. Ce processus élimine la matière organique, laissant derrière elle les composants minéraux sous forme de cendres. Les cendres obtenues, qui doivent être blanches ou grises sans particules charbonneuses, représentent la fraction de matière minérale dans l'échantillon.

Matière azotée totale (MAT) (%)

L'azote totale est dosé par la méthode de Kjeldahl qui se réalise en trois étapes : Minéralisation, distillation et finalement la titration.

La cellulose brute (CB) (%)

La cellulose brute a été déterminée en pourcentage du résidu organique à l'aide de la méthode classique de Weende. Cette méthode implique deux hydrolyses successives : d'abord en milieu acide avec de l'acide sulfurique (H_2SO_4 , 0,26 N), puis en milieu basique avec de l'hydroxyde de potassium (KOH, 0,23 N). La première hydrolyse permet d'éliminer les glucides solubles dans l'acide et les hémicelluloses, tandis que la seconde hydrolyse en milieu basique élimine les lignines

et les protéines. Le résidu final, principalement constitué de fibres de cellulose, est séché et pesé pour déterminer la teneur en cellulose brute, exprimée en pourcentage.

3.7.2. La digestibilité enzymatique

La digestibilité enzymatique a été déterminée selon la méthode enzymatique pepsine-cellulase proposée par Aufrere et Doreau (1983) et décrite par Demarquilly et Andrieu (1978). Cette méthode implique la dégradation des échantillons de 0,5 g de poudre par deux enzymes diluées dans des tampons appropriés. La première attaque est réalisée par la pepsine (50 ml) en mélange pendant 24 heures d'incubation dans un bain-marie à 40°C. Après filtration et rinçage à l'eau distillée, le résidu subit une attaque à la cellulase (50 ml) pendant 24 heures d'incubation à 40°C. Le résidu est ensuite filtré, rincé et placé dans une étuve à 104°C pendant 48 heures. On obtient ainsi la matière sèche indigestible. Après pesage, les résidus sont incinérés au four à moufle pendant 4 heures à 500°C, puis pesés. Les cendres obtenues, qui correspondent à la matière minérale, sont soustraites de la matière sèche indigestible, ce qui permet d'obtenir la matière organique indigestible.

Le calcul de différents paramètres, tels que la digestibilité cellulosique de la matière organique en % (D_{cellMO}) et la digestibilité de la matière organique (DMO), est estimé par les formules de Demarquilly et Andrien (1987).

$$DMO = 0.656.D_{cellMO} + 24.33$$

0.656 et 24.33 des constants établis par Aufrere et Dominique (1989) concernant les fourrage sec.

3.7.3. Calcul de la valeur fourragère

La valeur fourragère exprimée en unité fourragère est calculée par la formule de Breirem (INRA, 1978) qui est en fonction de la matière organique digestible (MOD) et la matière organique non digestible (MOND).

$$MOD = MO.DMO$$

$$MOND = MO - MOD$$

$$UF = 2.36MOD - 1.20 \frac{MOND}{1650}$$

UF : unité fourragère par Kg de matière sèche.

3.8. Les composantes liées à l'efficacité d'utilisation de l'eau

Pour évaluer l'efficacité de l'utilisation de l'eau totale, on se réfère à l'indice de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE). Cet indice mesure le rapport entre la production agricole, exprimée en rendement en grains ou en biomasse totale, et la quantité d'eau totale en mètres cubes ou en mm. Le calcul de cet indice est conforme à la méthodologie détaillée par Payero et *al.*, (2008).

3.8.1. Efficacité de l'utilisation de l'eau totale (Kg/m³)

$$EUE_{\text{grain}} = \frac{\text{Rendement en grains (Kg)}}{\text{Eau Total appliquée (m3)}}$$

$$EUE_{\text{Bio}} = \frac{\text{Rendement en biomasse (Kg)}}{\text{Eau Total appliquée (m3)}}$$

L'eau totale appliquée englobe à la fois les précipitations naturelles et l'eau d'irrigation.

3.8.2. Efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation (Kg/m³)

$$EUEI_{\text{grain}} = \frac{\text{Rendement en grains irrigué} - \text{Rendement en grains pluvial (Kg)}}{\text{Eau d'irrigation appliquée (m3)}}$$

$$EUEI_{\text{Bio}} = \frac{\text{Rendement en biomasse irrigué} - \text{Rendement en biomasse pluvial (Kg)}}{\text{Eau d'irrigation appliquée (m3)}}$$

Un autre indice important d'efficacité de l'utilisation de l'eau qui mesure la productivité de l'eau en unité fourragère (EUEF).

3.9 Efficacité de l'utilisation de l'eau en unité fourragère (UF/mm)

3.9.1. Efficacité de l'utilisation de l'eau totale en unité fourragère (UF/mm)

$$EUEF = \frac{\text{Valeur fourragère produite (UF)}}{\text{L'eau totale appliquée (mm)}}$$

L'eau totale appliquée englobe à la fois les précipitations naturelles et l'eau d'irrigation.

3.9.2. Efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation en unité fourragère (UF/mm)

$$EUEIF = \frac{\text{valeur fourragère en mode irrigué} - \text{valeur fourragère en mode pluvial (UF)}}{\text{L'eau d'irrigation appliquée (mm)}}$$

Chapitre III . Résultats et discussion

1. Impact des Facteurs Climatiques sur la Croissance de la *Camelina sativa* : Analyse des Campagnes 2021-2022 et 2022-2023

1.1. Introduction

Les variations climatiques jouent un rôle déterminant dans la production agricole, affectant tant la croissance des cultures que la viabilité économique des exploitations. Cette recherche se focalise sur la culture oléagineuse *Camelina sativa*, en examinant l'impact des facteurs climatiques sur deux campagnes agricoles distinctes (2021-2022 et 2022-2023).

Dans cette analyse, nous mettrons en lumière les fluctuations des températures minimales et maximales, ainsi que les précipitations, afin de déterminer comment ces facteurs ont influencé le cycle de croissance de la cameline. En utilisant des indicateurs tels que les degrés-jours de croissance (GDD), nous évaluerons les stades physiologiques de la culture et les impacts de la date de semis sur le développement des plantes. Enfin, cette section soulignera l'importance de l'adaptation de la cameline face aux défis posés par le changement climatique, en mettant en évidence les implications pour la durabilité des systèmes de culture dans les régions semi-arides.

1.2. Influence des Facteurs Climatiques sur les Campagnes Agricoles de *Camelina sativa*

1.2.1 . Première Campagne (2021-2022)

L'analyse de la première campagne agricole, qui s'est déroulée du 2 janvier jusqu'à la fin du mois de mai, met en évidence des variations significatives dans les conditions météorologiques observées tout au long de la période d'essai. Au cours de cette période, les températures minimales moyennes les plus basses ont été enregistrées en janvier (décade 3), atteignant un seuil de -4.14°C , susceptible d'influencer négativement la germination et le développement des cultures sensibles au froid, comme souligné dans des travaux antérieurs (Mortlock & Vanderlip, 1989). Parallèlement, les températures maximales moyennes ont culminé en mai, dépassant les 28°C , ce qui peut potentiellement induire un stress hydrique sur les cultures, particulièrement préjudiciable en cas de précipitations insuffisantes. Le mois de mai a été identifié comme la période la plus chaude de l'expérimentation, avec des températures moyennes maximales dépassant les 30°C , ce qui pourrait impacter négativement le remplissage des siliques et la teneur en huile de *Camelina sativa* (Righini et al., 2019). Concernant les précipitations, elles se sont révélées généralement

faibles durant les mois d'hiver, mais ont progressivement augmenté à partir d'avril pour atteindre un pic à 31,60 mm en mars (Figure 15).

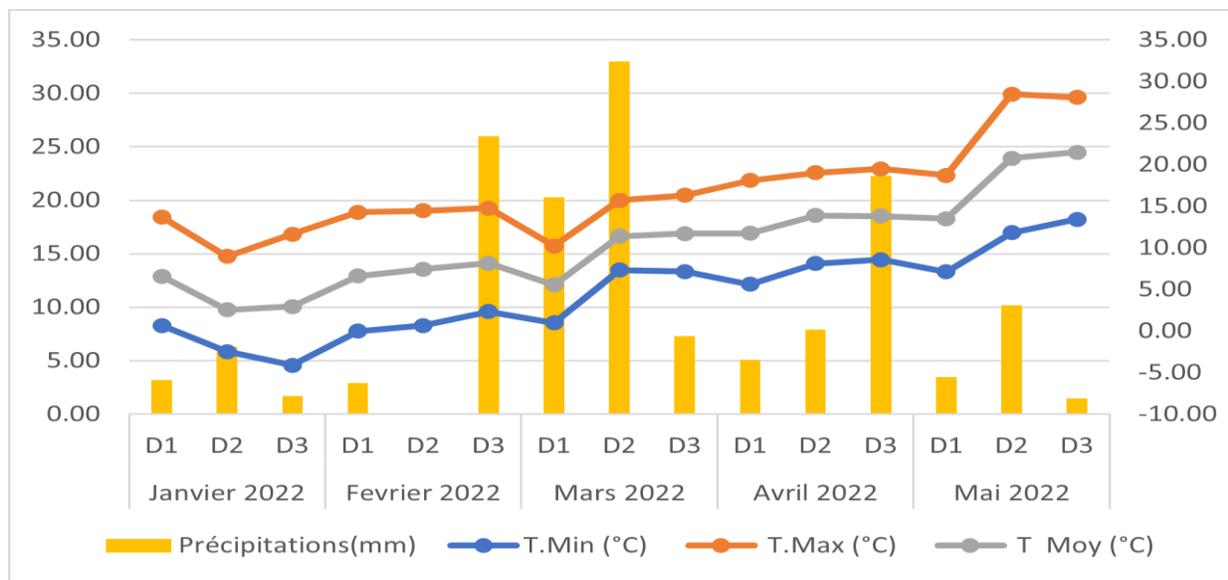


Figure 15 : Précipitations et températures durant la campagne agricole 2021 – 2022.

1.2.2 Deuxième Campagne (2022-2023)

La deuxième campagne agricole, s'étendant du 26 novembre au 12 mai, a été marquée par des variations significatives dans les conditions météorologiques observées au cours de cette période. Les températures minimales moyennes les plus basses ont été enregistrées à la même période que l'année passée en janvier (décade 3), avec une valeur de $-4,11^{\circ}\text{C}$, presque similaire à celle de la première campagne. Ces températures relativement basses pourraient avoir un impact sur la croissance des cultures, en particulier celles sensibles au froid. En revanche, les températures maximales moyennes les plus élevées ont été observées en avril (décade 3), dépassant les 26°C , soit $7,37^{\circ}\text{C}$ de plus par rapport à la même période de l'année précédente (Figure 16). Cette période de températures élevées a été associée à un manque de précipitations et à des vents exceptionnellement violents pour cette période d'essai, une combinaison de facteurs qui pourrait affecter la croissance et le remplissage des siliques de la cameline, et par conséquent, le rendement final.

En ce qui concerne les précipitations, elles ont été relativement faibles pendant la majeure partie de la période d'observation. Cependant, une augmentation notable a été observée en décembre (décade 1), avec des précipitations atteignant 16 mm. Cette variation dans les précipitations

pourrait avoir des implications importantes pour la gestion de l'irrigation et le développement des cultures.

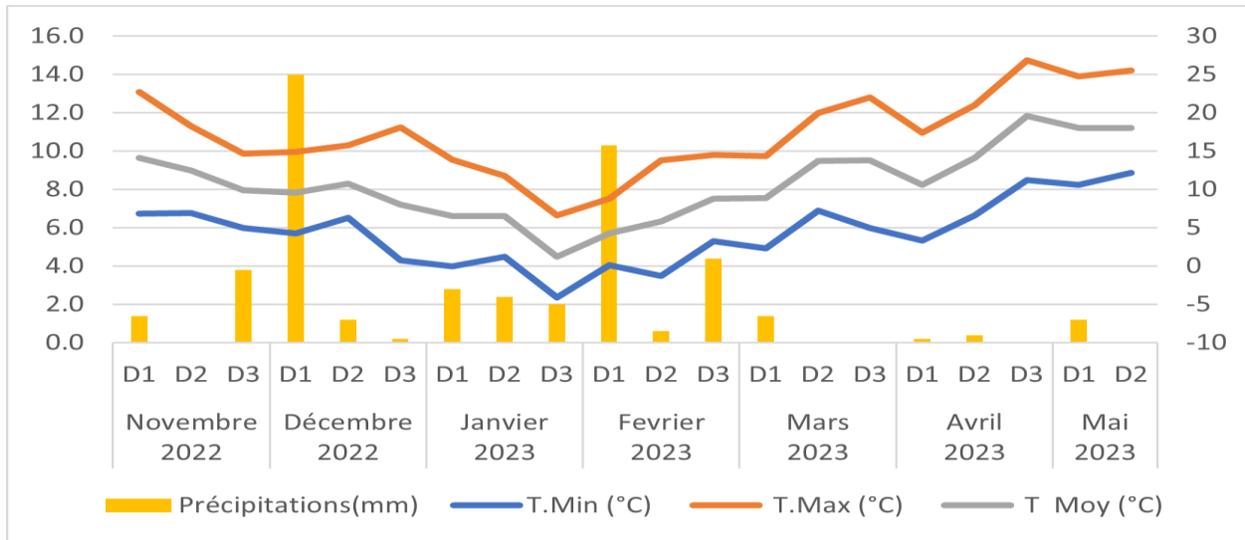


Figure 16 . Précipitations et températures durant la campagne agricole 2022 – 2023.

1.2.3. Synthèse climatique

La conduite de la culture durant les deux campagnes agricoles a été influencée par deux saisons distinctes. La première campagne (2021-2022) a été caractérisée par des conditions relativement pluvieuses et favorables, notamment pendant les phases critiques de la culture, où le climat était doux et humide avec 74% des précipitations reçues dans cette période par rapport au cumul de la saison. En revanche, la deuxième campagne (2022-2023) a été marquée par des conditions considérablement plus sèches et chaudes, la NASA la qualifiant même de l'année la plus chaude et la plus sèche de l'histoire (Roxana, 2024). Au cours de cette période, un total de 44,90 mm de précipitations a été enregistré entre le 26 novembre et le 12 mai 2023, dont 41,7 mm, soit 93 % du cumul, sont tombés entre la date des semis et le 1er mars. Le reste s'est réparti sur les mois de mars, avril et mai, qui ont été marqués par des températures extrêmes. Ces conditions ont conduit à une année exceptionnellement sèche, qualifiée d'année blanche pour les cultures pluviales dans la région de Batna. Le changement climatique perturbe la configuration des systèmes alimentaires en diminuant la production agricole. Il entraîne des sécheresses ou des inondations, et modifie la durée de la saison (Gregory et al., 2005). Par conséquent, le changement climatique est un facteur qui entraîne une diminution de la productivité des cultures (D. Leclère et al., 2014).

1.3. Le degrés-jours de croissance (GDD)

Le cycle de croissance de la cameline s'est étendu sur 148 jours pour la première campagne, du 2 janvier 2022 au 30 mai 2022, et sur 168 jours pour la deuxième campagne, du 25 novembre 2022 au 12 mai 2023. L'expression de la durée de développement du cycle peut être exprimée en degrés-jours de croissance (GDD) pour l'ensemble du cycle et pour chaque stade physiologique. Les principaux stades physiologiques ont été identifiés à l'aide du code BBCH à trois chiffres, une échelle qui permet de suivre de manière précise et uniforme l'évolution des plantes tout au long de leur cycle de croissance, de la germination à la maturation des fruits. Développée par l'Association allemande de recherche en agriculture (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie), cette échelle à trois chiffres est utilisée pour une description plus détaillée des différents stades de croissance de la culture.

Ces données illustrent le développement des stades de croissance de la cameline au fil du temps (tableau 4) et permettent de comparer les deux campagnes agricoles en termes de jours après semis (JAS) et de degrés-jours de croissance (GDD) calculé par la formule de McMaster & Wilhelm, (1997).

Tableau 4 . Phases de Croissance de la Cameline: Codes BBCH, JAS, et GDD pour les campagnes agricoles 2021-2022 et 2022-2023

| Stade de croissance | Code BBCH | Cumule JAS (jours après semis) | | GDD | |
|--|-----------|--------------------------------|------------------|---------------|------------------|
| | | 2021-2022 | 2022-2023 | 2021-2022 | 2022-2023 |
| Semis | 000 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| Emergence | 009 | 42 | 18 | 56.50 | 88.10 |
| Rosette | 202 | 69 | 37 | 59.65 | 97.60 |
| Début élongation | 301 | 78 | 105 | 64.30 | 94.70 |
| Fin élongation | 309 | 95 | 112 | 123.60 | 105.85 |
| Apparition des boutons floraux | 505 | 101 | 116 | 60.50 | 30.75 |
| 10% fleurs ouvertes | 601 | 106 | 119 | 36.20 | 24.10 |
| Nouaison | 609 | 118 | 133 | 112.35 | 104.15 |
| Toutes les siliques atteint la taille finale | 709 | 131 | 143 | 115.35 | 84.75 |
| Les siliques mûres pour la récolte | 809 | 142 | 161 | 192.85 | 233.10 |
| La récolte | 909 | 148 | 168 | 83.75 | 98.05 |
| Cumul | | 148 jours | 168 jours | 905 °C | 961.15 °C |

Selon les résultats, le temps nécessaire pour atteindre le stade d'émergence (009) a été de 42 jours JAS pour la première campagne, tandis qu'il n'a fallu que 18 jours pour la deuxième campagne. Cette différence peut être attribuée à la date de semis différente entre les deux campagnes. Pour la première campagne, le semis a eu lieu le 2 janvier, coïncidant avec des températures très basses en janvier et février atteignant (-6,10°C), ce qui a retardé la germination des graines de cameline. En revanche, pour la deuxième campagne, le semis a été effectué le 25 novembre 2022, dans des conditions de température plus favorables, ce qui a permis une émergence plus rapide. Cela souligne l'importance de la date de semis dans le développement des cultures. La cameline a bien présenté une résistance et une tolérance remarquables aux gelées et au froid.

Après le stade de rosette (202), les conditions climatiques de la première campagne étaient favorables, avec des températures fraîches (12°C) et des précipitations suffisantes, surtout entre le stade de début d'élongation et de nouaison, où la culture a bénéficié d'un cumul de précipitations de 83,1 mm, soit 55 % du total des précipitations. En revanche, lors de la deuxième campagne, la culture a souffert d'une sécheresse sévère, associée à une hausse exceptionnelle des températures atteignant 31°C et un cumul de précipitations très réduit de 1,6 mm, ce qui a gravement affecté la floraison, le nombre de siliques et, par conséquent, le rendement final et la teneur en huile pour le traitement pluvial. Les effets anticipés du changement climatique pourraient entraîner une baisse de production agricole supérieure à 57 % (Asseng et al., 2015).

Les valeurs de GDD calculée pour les deux campagnes sont inférieures à celles rapportées dans d'autres études menées par Righini et *al.*, (2019) en Italie ,avec un GDD de 982 °C, et par Zanetti et *al.*, (2017) en Pologne avec un GDD de 930 °C. En effet, le fait que la cameline ait un cycle de croissance court (un peu plus de 900 °C) la rend potentiellement intéressante comme culture de remplacement pour les cultures d'hiver ratées. Ses avantages incluent une rotation rapide des cultures, ce qui permet aux agriculteurs d'adapter plus rapidement leurs pratiques agricoles et de diversifier leurs sources de revenus De plus, le cycle court de croissance permet une plus grande flexibilité dans la rotation des cultures, ce qui peut contribuer à la durabilité et à la diversification des systèmes agricoles.

2. Réponse de la culture Oléagineuse *Camelina sativa* au système de Monitoring des Apports d'Eau Limités, Conduite en Milieu Semi-Aride des Aurès

Dans cette partie, nous examinerons les effets des différents traitements d'irrigation sur la culture de la cameline au cours des deux campagnes agricoles successives 2021-2022 et 2022-2023. L'objectif principal de cette étude est de comprendre comment la pratique d'irrigation déficitaire influence l'efficacité de l'utilisation de l'eau, la croissance des plantes, la qualité des récoltes, la consommation électrique, la teneur en huile et l'estimation du potentiel de biocarburant. En outre, nous analyserons l'effet de la variabilité annuelle des conditions climatiques sur ces paramètres.

Nous nous intéressons particulièrement à l'impact des niveaux de stress hydrique sur la productivité et la qualité des graines de cameline, en comparant différents paramètres de croissance et de rendement sous des régimes d'irrigation variés. Cette analyse est essentielle pour développer des stratégies de gestion de l'irrigation qui maximisent la productivité agricole tout en préservant les ressources en eau et en optimisant l'efficacité énergétique, ce qui est crucial pour la durabilité des systèmes agricoles dans des environnements semi-arides.

De plus, nous avons exploré les relations entre les différentes variables étudiées et comment elles interagissent entre elles en utilisant des outils statistiques puissants, tels que la matrice de corrélation, l'analyse en composantes principales (ACP) et l'arbre hiérarchique. Ces méthodes nous permettent de démêler les liens complexes entre les variables et d'identifier les facteurs clés influençant la croissance et le rendement des cultures.

En explorant ces divers aspects, nous visons à offrir des informations précieuses qui permettront aux agriculteurs et aux décideurs de mieux comprendre et gérer l'irrigation pour une production agricole durable et de haute qualité. Cette étude promet de révéler des insights fascinants sur l'optimisation de la culture de la cameline et la gestion de l'eau.

2.1. L'effet des traitements d'irrigation déficitaire sur les paramètres étudiés de la culture .

Les résultats obtenus de notre expérimentation issue des traitements de restrictions hydriques croissantes sur deux campagnes agricole (2021-2022) et (2022-2023) ont été traités par l'analyse de la variance ANOVA à deux facteurs (régimes d'irrigation) et année expérimentale (Année).

2.1.1. Caractéristiques morphologiques : La hauteur des plantes (HP), nombre de branche par plant (NBP) et le nombre de plant par mètre carré (NPM).

L'analyse de la variance à deux facteurs a révélé des résultats significatifs concernant l'effet de l'irrigation déficitaire et de l'année sur plusieurs mesures morphologiques de la caméline. En ce qui concerne la hauteur des plantes (HP), les différents traitements ont montré des effets significatifs ($p < 0.01$) (Figure 17), tandis que l'année n'a pas eu un effet significatif. De même, le nombre de branches par plante (NBP) a été significativement influencé par les traitements ($p < 0.01$) (Figure 18). Cependant, l'effet de l'année était non significatif. le nombre de plantes par mètre carré (NPM) était significativement influencé par les traitements ($p < 0.01$), tandis que l'année n'a pas montré d'effet significatif (Figure 19). Ces résultats mettent en évidence l'impact significatif du traitement sur les variables morphologiques de la caméline, tandis que l'effet de l'année était non remarquable, (Tableau 5).

Tableau 5. Carrés moyens des écarts de l'analyse de variance des caractéristiques morphologique de la cameline au cours des deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023).

| Source | Traitement (T) | Année (A) | T x A | Groupes |
|---------|--------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| Ddl | 3 | 1 | 3 | |
| HP (cm) | 1219.826 ^{**} | 21.288 ^{NS} | 21.519 ^{NS} | A(T1),B(T2),C(T3 et T0) |
| NBP | 26.681 ^{**} | 0.011 ^{NS} | 0.371 ^{NS} | A(T1 et T2),B(T3 et T3) |
| NPM | 145297.083 ^{**} | 16020.50 ^{NS} | 1145.583 ^{NS} | A(T1 et T2), B(T3),C(T0) |

HP : Hauteur des plantes ;NBP :Nombre de branche par plante ;NPM : Nombre de plant par mètre carré ;Ddl :degré de liberté ;NS :non significatif ;** signification($p < 0.01$) ;*signification($p < 0.05$),

Dans le contexte des circonstances agro climatiques de déroulement de l'expérimentation, il est important de noter que l'effet du traitement était prédominant sur les paramètres de croissance pendant les deux campagnes. Cependant, l'effet de l'année expérimentale était très limité, bien que la deuxième campagne ait été plus sèche, car les conditions climatiques de cette année-là étaient relativement favorables à l'installation et au démarrage de la culture durant la première moitié du cycle de développement. Contrairement avec la deuxième moitié du cycle de développement, ce qui est expliqué par la non signification de l'effet (année) pour HP,NPB et NPM,. Cela suggère que les variations observées dans les paramètres de croissance sont principalement attribuables aux différences dans les traitements appliqués plutôt qu'aux variations saisonnières entre les deux années. A cet égard, Les plantes ont montré une réponse adaptative en réduisant la hauteur et le

nombre de ramifications pour compenser la perte de biomasse due à la contrainte hydrique. Les résultats de Ahmed *et al.*, (2019, 2020); Mesbah, (2009) ont soutenu nos conclusions

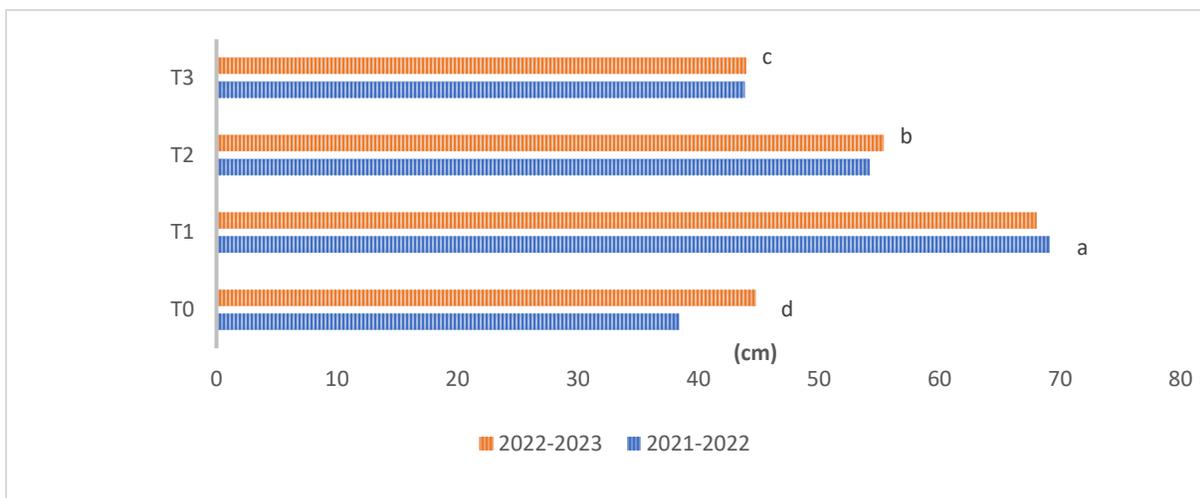


Figure 17 . Effet des régimes d'irrigations sur la hauteur de la cameline (HP) durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023)

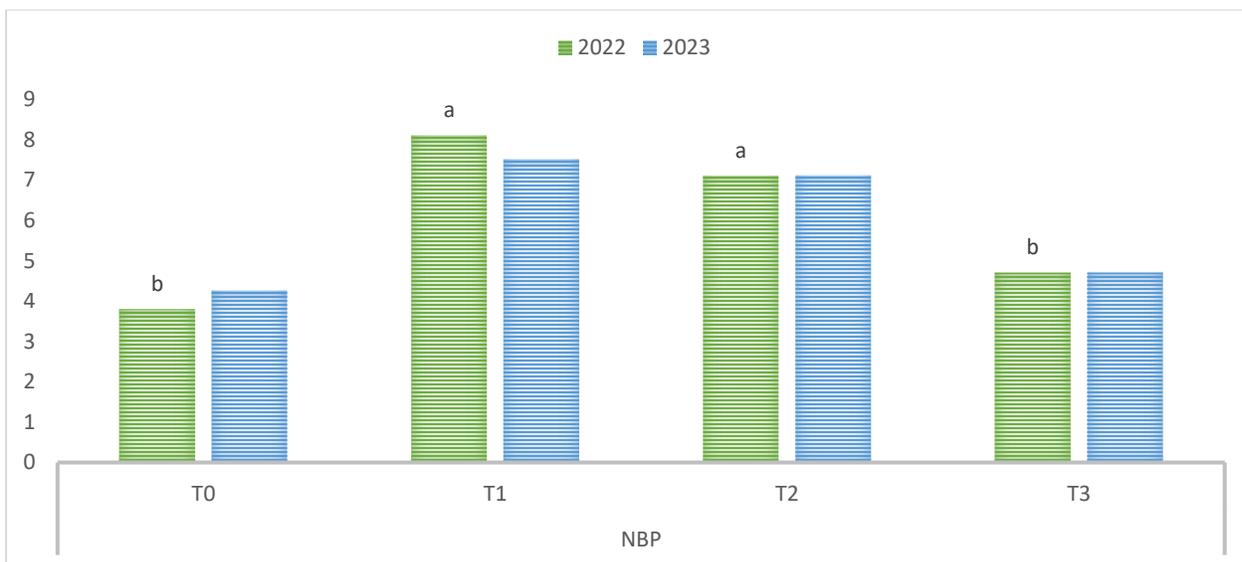


Figure 18 . Effet des régimes d'irrigations sur le NBP durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023)

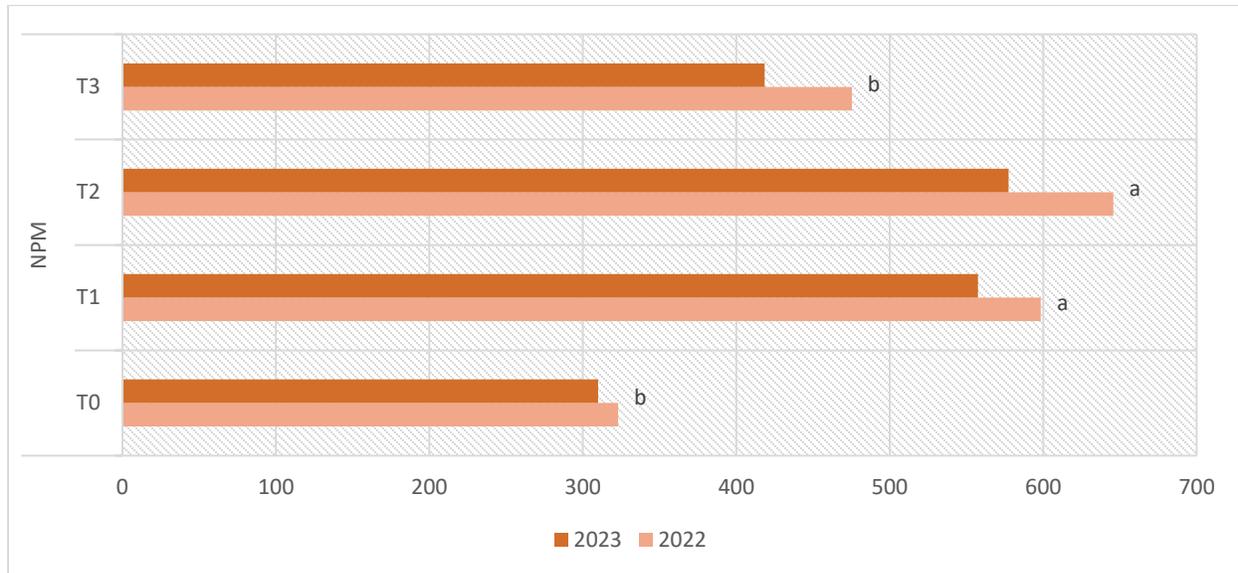


Figure 19 .Effet des régimes d'irrigations sur le NPM durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023)

2.1.2. Variables de Fertilité : nombre de graines par silique (NGS) le poids de mille graines (PMG)

2.1.2.1. L'effet sur le nombre de graines par silique (NGS)

L'analyse de la variance (ANOVA) a révélé que, contrairement aux caractéristiques morphologiques, le nombre de graines par silique (NGS) a été significativement affecté par les traitements d'irrigation, l'année, ainsi que par leur interaction ($p < 0.01$) (Tableau 6). Plus précisément, les résultats montrent que le NGS a connu une diminution marquée au cours de la deuxième campagne agricole (2022-2023) en comparaison avec la première année (Figure 20).

Cette baisse du NGS lors de la deuxième campagne s'explique principalement par les conditions climatiques défavorables, notamment les températures élevées et la sécheresse sévère enregistrées pendant la deuxième moitié du cycle de développement de la caméline. Ces conditions ont particulièrement impacté les phases de floraison et de remplissage des graines, réduisant ainsi la capacité de la plante à produire un nombre optimal de graines par silique.

L'interaction significative entre l'année et le traitement d'irrigation met en lumière l'importance des conditions climatiques dans la fertilité des plantes.

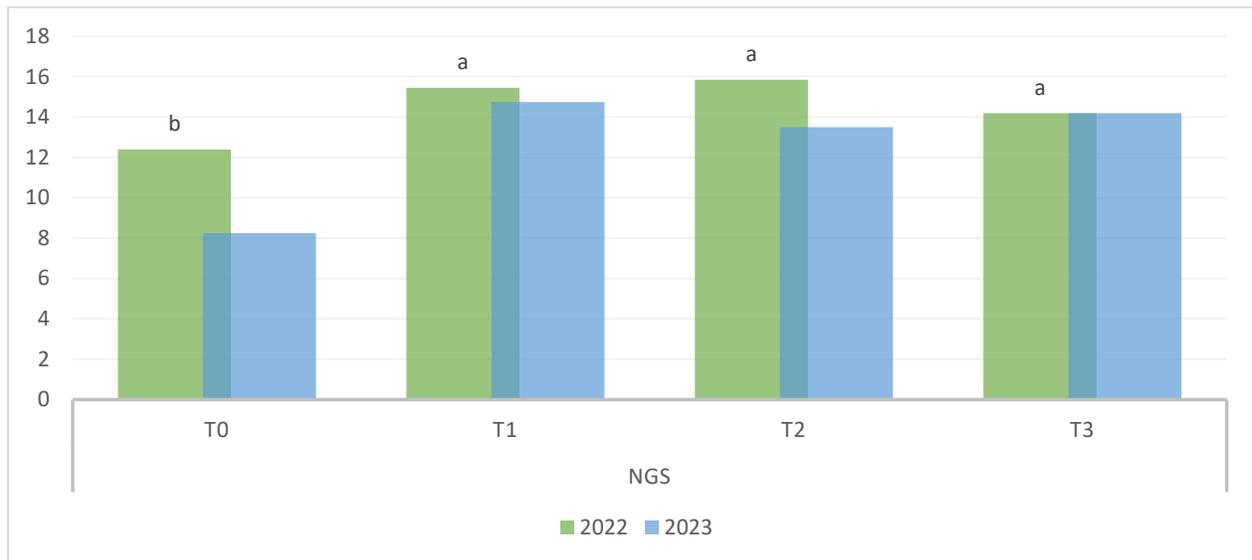


Figure 20 . Effet des régimes d'irrigations sur le NGS durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023)

Tableau 6 . Carrés moyens des écarts de l'analyse de variance des paramètres de fertilité de la cameline au cours des deux campagnes agricoles (2021-2022) et (2022-2023).

| Source | Traitement | Année | T x A | Groupes |
|---------|------------|----------|---------------------|---------------------------|
| Ddl | 3 | 1 | 3 | |
| NGS | 38.637** | 25.920** | 6.850** | A(T1,T2 et T3), B(T0) |
| PMG (g) | 0.024** | 0.047** | 0.005 ^{NS} | A(T1),AB(T2),BC(T3),C(T0) |

NGS :Nombre de graines par silique ;PMG :Poids de mille grains ; Ddl :degré de liberté ;NS :non significatif ;**signification($p < 0.01$) ;*signification($p < 0.05$),

2.1.2.2. L'effet sur le poids de mille graines (PMG)

Le poids de mille grains (PMG) est un paramètre fondamental dans l'évaluation du rendement et de la qualité de la cameline, fournissant ainsi une indication précise de la densité et de la taille des graines, qui sont des facteurs déterminants pour la productivité globale de la culture(X. Cheng et al., 2017).

L'impact de l'irrigation déficitaire sur le PMG s'avère moins évident que pour d'autres paramètres étudiés (Figure 21). Bien qu'une légère tendance à la diminution soit observée avec la restriction des apports en eau, les variations demeurent significatives en termes d'effet des traitements et des années, bien que sans interaction significative entre eux (Tableau 6).

Notamment, la valeur la plus élevée est enregistrée avec le traitement T1, suivi des traitements T2, T3 et T0.

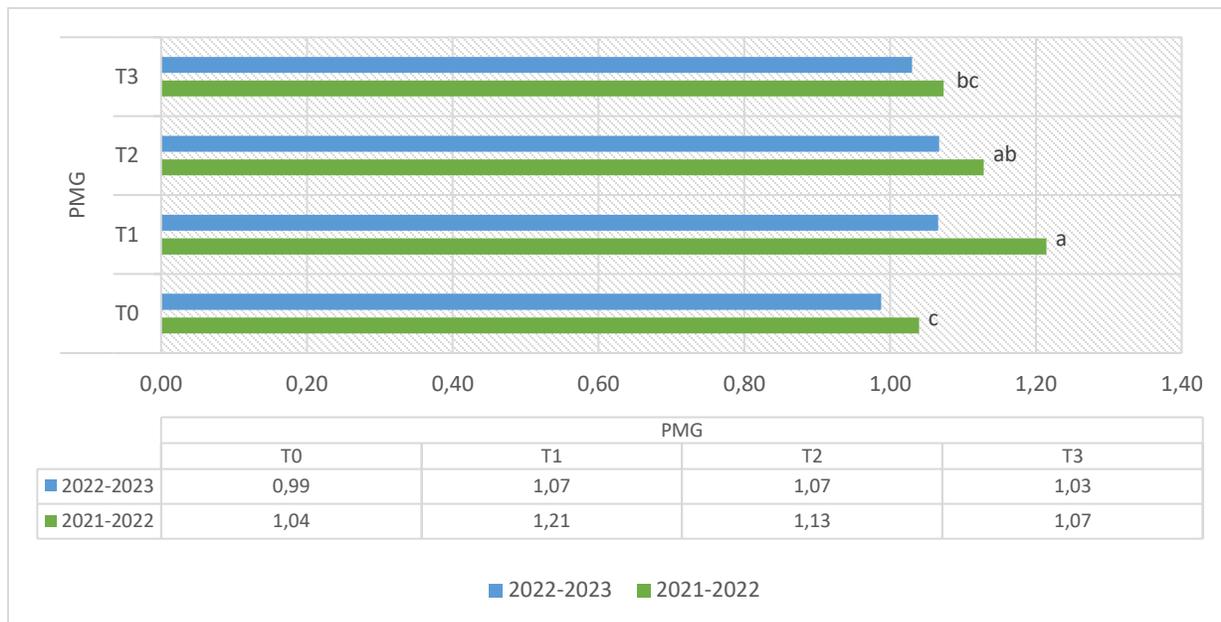


Figure 21. Effet des régimes d'irrigations sur le PMG durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023)

Cette observation suggère que la caméline est capable de maintenir une certaine qualité de grains malgré le stress hydrique induit par les différents traitements d'irrigation. Des études antérieures Ahmed et *al.*, (2019, 2020) ont signalé que la restriction en eau peut perturber et entraîner une diminution du poids des graines. La petite taille des graines de caméline est souvent considérée comme la principale contrainte limitant son rendement par rapport aux autres cultures oléagineuses conventionnelles. Ainsi, l'amélioration du PMG de la caméline constitue un enjeu majeur pour les programmes d'amélioration génétique, afin de positionner cette culture non seulement comme une culture de niche, mais également comme une culture à fort potentiel.

2.1.3. Variables de productivité : Rendement en grains (RDTG), Rendement en biomasse (RDT bio) et l'indice de récolte (IR)

La réponse des composantes de productivité (rendement en grains, biomasse, paille, et l'indice de récolte) issus des traitements T0, T1, T2 et T3 sont résumés dans le tableau 7.

Tableau 7 . Carrés moyens des écarts de l'analyse de variance des paramètres de productivité cameline au cours des deux campagnes agricoles (2021-2022) et (2022-2023).

| Source | Traitement | Année | T x A | Groupes |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Ddl | 3 | 1 | 3 | |
| RDT Bio (qx.ha ⁻¹) | 813811.46 ^{**} | 1653.125 ^{NS} | 2461.46 ^{NS} | A(T1),B(T2),C(T3),D(T0) |
| RDTG (qx.ha ⁻¹) | 26300.42 ^{**} | 25088.000 ^{**} | 617.250 [*] | A(T1),B(T2),C(T3),D(T0) |
| RDT Pll (qx.ha ⁻¹) | 5485.002 ^{**} | 138.611 ^{NS} | 34.287 ^{NS} | A(T1),B(T2),C(T3),D(T0) |
| IR (%) | .001 ^{NS} | 0.063 ^{**} | 0.000 ^{NS} | A(T0,T1,T2 et T3) |

RDT Bio :Rendement en biomasse ;RDTG :Rendement en grain ;RDT Pll :Rendement en paille ; ;IR :indice de récolte ; Ddl :degré de liberté ;NS :non significatif ;** signification(p < 0.01) ;*signification(p < 0.05),

2.1.3.1. L'effet sur le rendement en grains (RDTG), biomasse (RDT bio) et paille (RDT Pll) .

L'analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs révèle des résultats significatifs concernant l'effet du traitement d'irrigation et de l'année sur les rendements en grains (RDTG), en biomasse (RDTBio) et en paille (RDT Pll) de la caméline. Premièrement, l'effet du traitement d'irrigation est clairement démontré par les différences significatives observées entre les différents traitements (Figure 22 et 23). Le traitement T1, bénéficiant d'une irrigation complète couvrant 100% des besoins en eau, a donné les rendements les plus élevés en grains et en biomasse. Une diminution significative du rendement en grains et en biomasse avec l'augmentation de la restriction des apports en eau pour les deux campagnes agricoles., les traitements T2 et T3 montrant des rendements intermédiaires entre T1 et T0 le traitement témoin, cette tendance est confirmée par les groupes significatifs formés pour ces traitements (Figure 22et 23). Des résultats similaires ont également été reporté par Ahmed *et al.*, (2020); Amiri-Darban *et al.*, (2020); Pavlista *et al.*, (2016); Raza *et al.*, (2015) qui valident nos résultats.

De plus, l'effet de l'année est également significatif, comme en témoigne l'interaction entre l'année et le traitement (T x A) pour le rendement en grain. Les variations observées d'une année à l'autre peuvent être attribuées aux conditions climatiques changeantes, qui influencent directement les rendements de la culture. En effet, les années 2022 et 2023 présentent des conditions climatiques différentes, ce qui se reflète dans les rendements obtenus. Notamment , les

rendements en 2023 sont généralement inférieurs à ceux de 2022, ce qui pourrait être attribué à des conditions climatiques moins favorables pendant la période de croissance de la caméline.

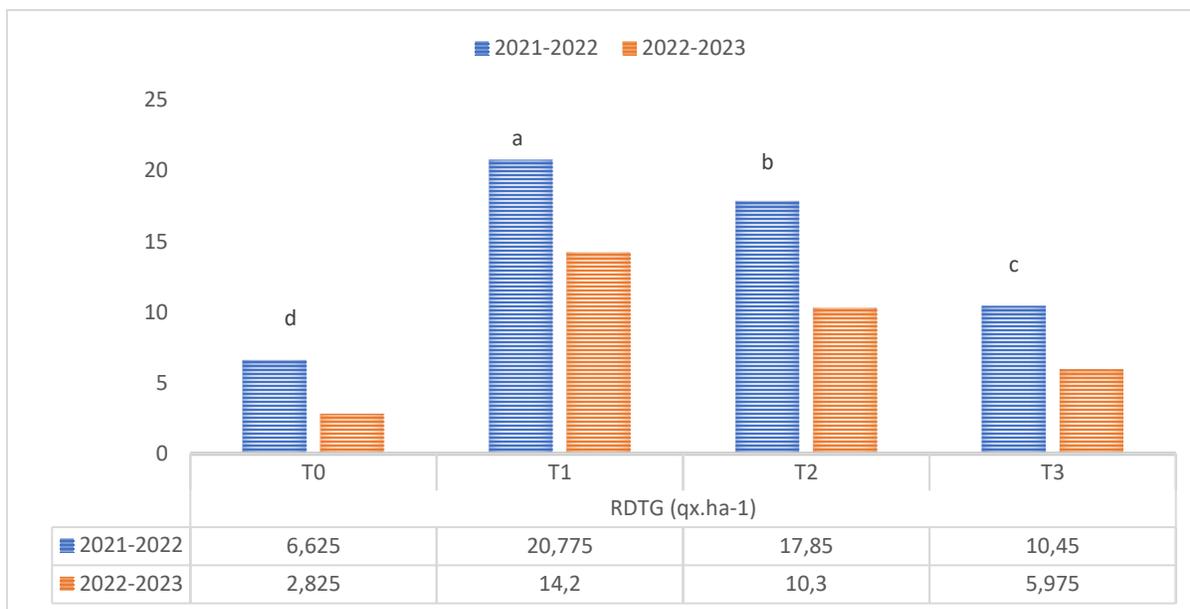


Figure 22 . L'effet des régimes d'irrigations sur RDTG durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023)

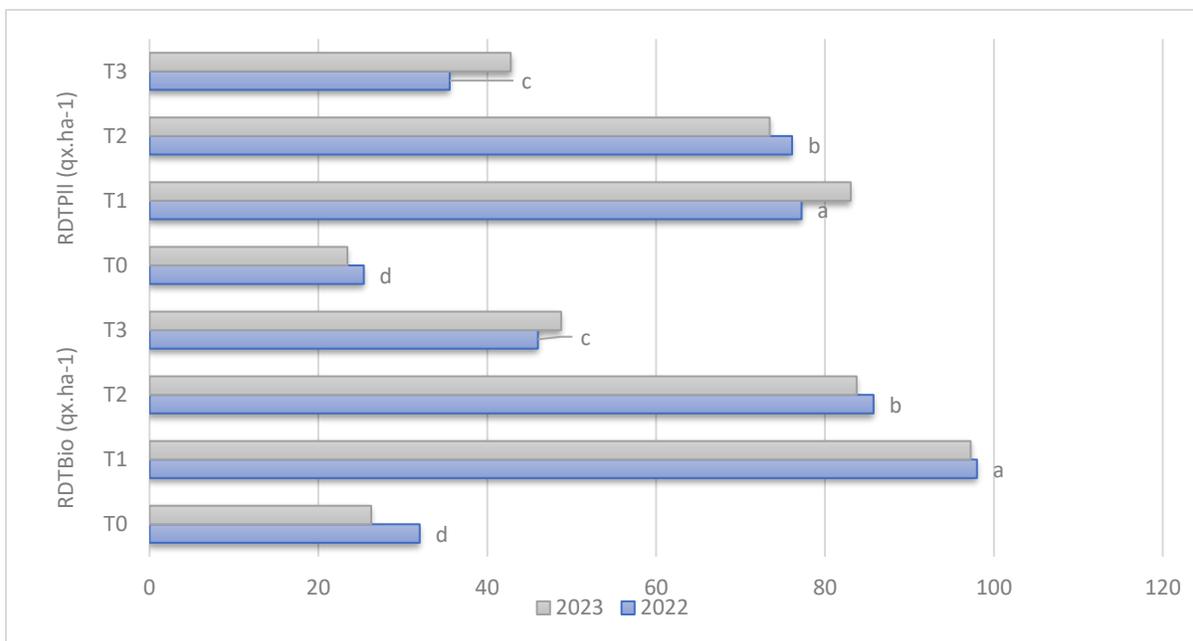


Figure 23. Effet des régimes d'irrigations sur RDT PII et RDT Bio durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023)

2.1.3.2. L'effet sur l'indice de récolte (IR)

L'indice de récolte, défini comme le rapport entre le rendement en grain et le poids de la biomasse totale (Donald & Hamblin, 1976), est un indicateur crucial de la productivité agricole, et revêt une importance particulière pour évaluer l'efficacité des pratiques agricoles. Il est logique de penser que toute diminution du rendement en biomasse due à l'irrigation déficitaire aura également un impact sur le rendement en grain, car ces deux paramètres sont souvent corrélés. De plus, la petite taille des graines de caméline peut poser des défis supplémentaires pour la mesure de l'indice de récolte.

Bien que des différences entre les traitements existent, elles ne sont pas statistiquement significatives et appartiennent au même groupe homogène (Figure 24). Cependant, il est intéressant de noter que le traitement T3 a montré le meilleur indice de récolte (17.83%), suivi de près par le traitement T1 avec un léger écart (16.86%), tandis que le traitement pluvial T0 a enregistré le résultat le plus bas (15.75%). Cette observation suggère que même avec une irrigation plus restreinte, la caméline peut maintenir un rapport de IR satisfaisant.

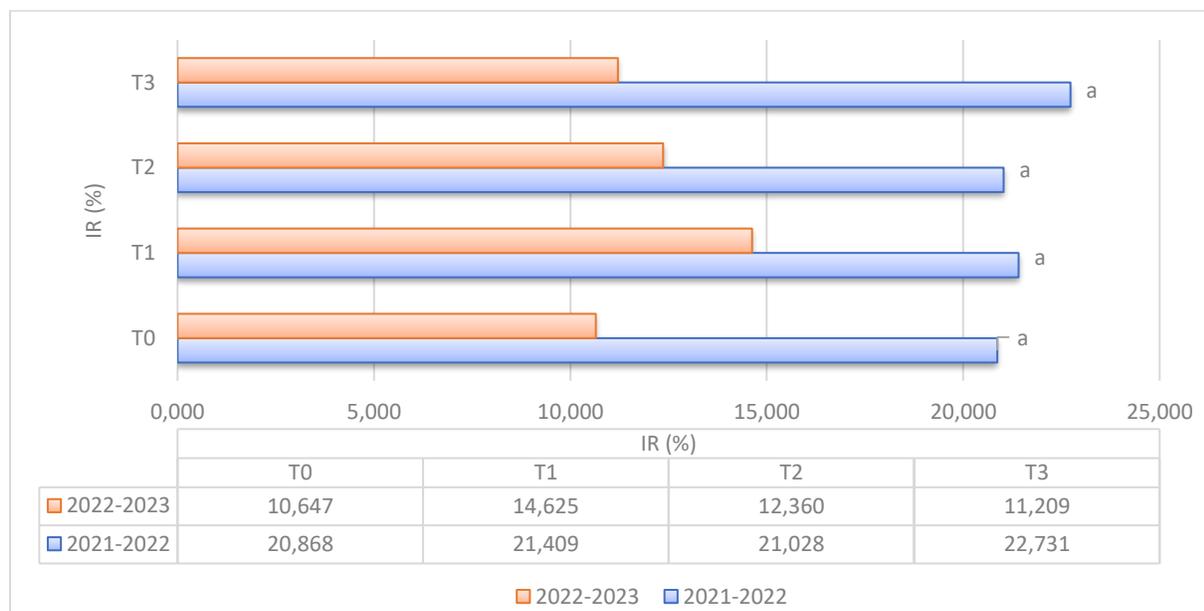


Figure 24. Effet des régimes d'irrigations sur le IR durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023)

En revanche, l'effet de l'année était significatif ($p > 0.01$) sans effet d'interaction (T x A), avec une baisse notable des rendements en grains observée lors de la deuxième moitié au cours de la phase floraison et remplissage durant la campagne 2022-2023, par rapport à la première moitié,

qui était relativement favorable et assurait une biomasse relativement acceptable. Nos résultats sont cohérents avec ceux de Neupane *et al.*, (2020), mais contredisent ceux d'Ahmed *et al.*, (2019), soulignant ainsi la complexité des interactions entre les pratiques agricoles, les conditions environnementales et les rendements des cultures.

2.1.4. Variables de Qualité des Composés Nutritifs : Teneur en protéine (T_{prot}) et Teneur en huile (Thuille)

2.1.4.1. L'effet sur la teneur en protéine de la graine (T_{prot})

La caméline est une culture oléagineuse dont la production de graines est la principale source d'intérêt économique. Tandis que la teneur en protéine est un autre paramètre important à considérer, ces paramètres peuvent nous donner une idée de la capacité de la caméline à s'adapter aux conditions d'irrigation limitées. Selon le dosage par la méthode de Kjeldahl, les taux de protéine de la graine de la caméline obtenus sont compris entre 27.98% (T1, 2022) et 37.51% (T0, 2023) pour les deux campagnes (Figure 25), des valeurs souvent citées dans la littérature scientifique Krzyżaniak *et al.*, (2019); Zajac *et al.*, (2020); Zubr, (2010). Les facteurs statistiques (Traitement) et (Année) ont affecté significativement la teneur en protéine sans effet significatif d'interaction entre eux (Tableau 8).

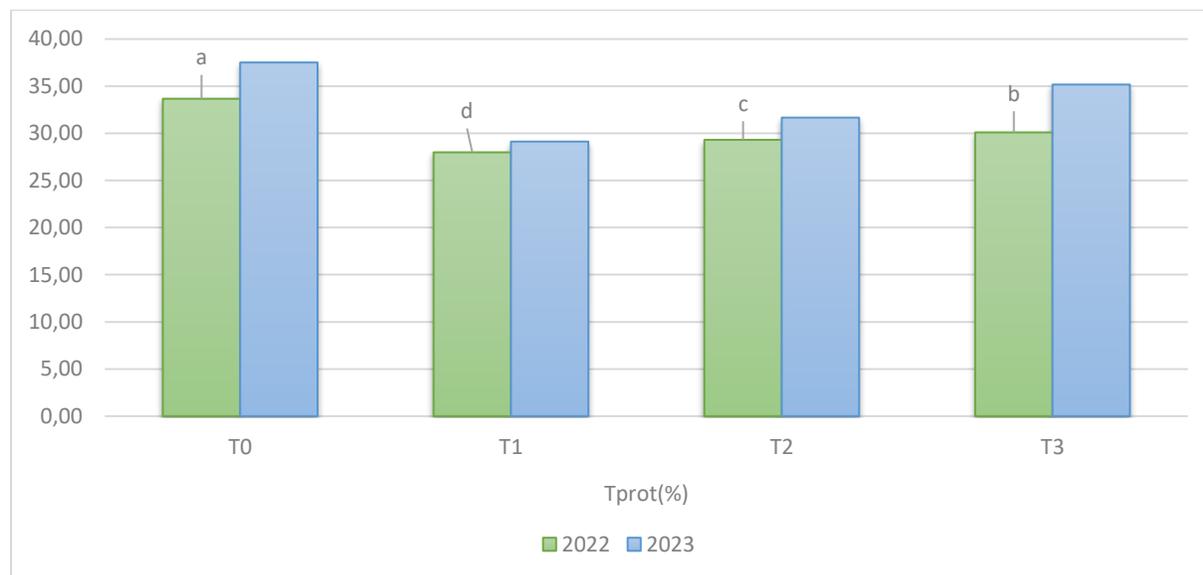


Figure 25 .Effet des régimes d'irrigations sur la teneur en protéine durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023)

Tableau 8 . Carrés moyens des écarts d'ANOVA des variables de qualité des Composés Nutritifs de la cameline au cours des deux campagnes agricoles (2021-2022) et (2022-2023).

| Source | Traitement | Annee | T x A | Groupes |
|-----------|------------|----------|---------------------|-------------------------------|
| Ddl | 3 | 1 | 3 | |
| Tprot (%) | 72.872** | 77.221** | 5.908 ^{NS} | A(T0),B(T3),C(T2), D(T1) |
| Thuil (%) | 35.781** | 52.531** | 4.781 ^{NS} | A(T1),AB(T2), BC(T3),C(T0) |

*TH : Teneur en huile ; Tprot : Teneur en protéine ; degré de liberté ; NS : non significatif ; ** signification ($p < 0.01$) ; *signification ($p < 0.05$),*

Les valeurs montrent une tendance inverse par rapport aux autres paramètres de productivité. La valeur protéique augmente de plus en plus avec la restriction hydrique, se traduisant par le comportement adaptatif de la culture aux conditions de pénurie d'eau. Elles peuvent réduire leur activité métabolique et leur développement physiologique, ce qui se traduit par un nombre moins élevé de siliques par plante, moins de ramifications, un poids de mille grains réduit et une teneur en huile également réduite. En conséquence, une plus grande fraction des ressources disponibles est allouée à la production de protéines, ce qui peut entraîner une augmentation de la teneur en protéine des grains dans les cultures cultivées en conditions de stress hydrique (Richard et al., 2000). Les résultats de cette étude corroborent avec les conclusions de Ahmed et al., (2020); Macedo et al., (2016); Tari, (2016), renforçant ainsi nos conclusions. À l'avenir, l'irrigation déficitaire pourrait entraîner des avantages importants sur la valeur du rendement grâce à son amélioration de la qualité protéique de la graine (Intrigliolo, 2020).

2.1.4.2. L'effet sur la teneur en huile (Thuile%)

La teneur en huile constitue un paramètre fondamental pour évaluer le potentiel d'une culture oléagineuse. Après le pressage à froid des graines de caméline, les résultats obtenus varient entre 23.25% (T0, 2023) et 31.75% (T1, 2022). Notamment, les traitements T1 et T2 se distinguent par des valeurs maximales pour les deux campagnes agricoles (Figure 26), affichant en moyenne respectivement 30.50% et 28.87%. En contraste, le traitement pluvial T0 démontre une teneur en huile significativement plus faible, avec une moyenne de 27.12% pour l'ensemble des campagnes. Cette tendance met en évidence une corrélation positive entre la teneur en huile et les apports hydriques, un constat soutenu par les études de Ahmed et al., (2020); Hergert et al., (2016).

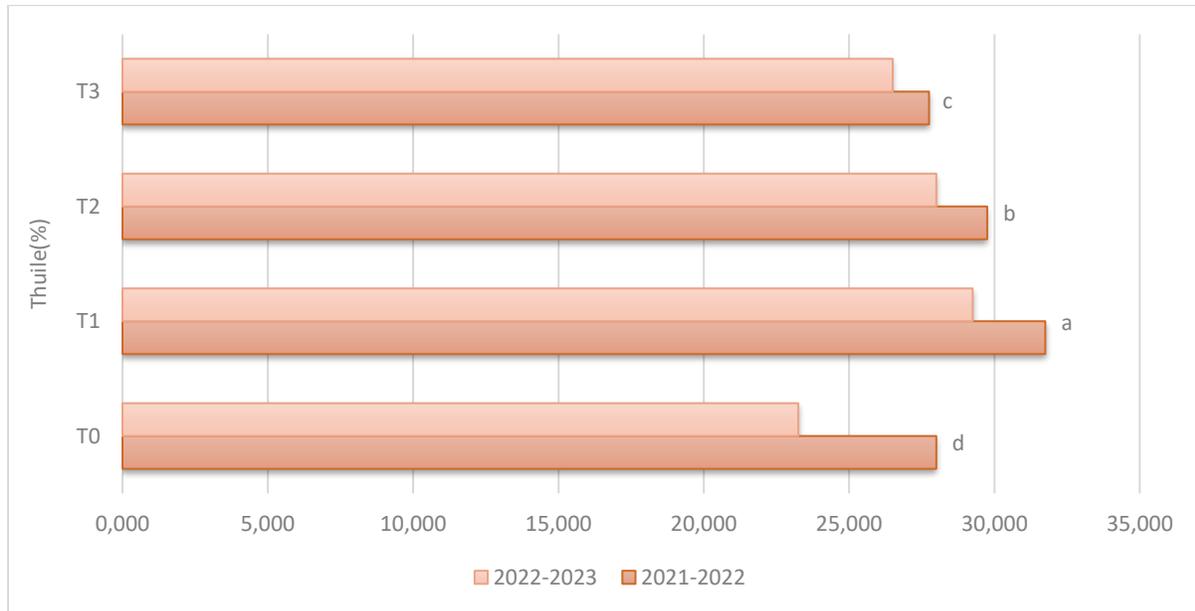


Figure 26 . L'effet des régimes d'irrigations sur la teneur en huile durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023)

De plus, l'effet significatif notable du facteur statistique (Année) (Tableau 8) se traduit par une diminution des taux d'huile lors de la saison 2022-2023, marquée par une sécheresse et des températures élevées. Cette situation impacte de manière proportionnelle la teneur en huile pour tous les traitements, entraînant une perte minimale de 8% pour T1 et maximale de 17% pour T0 (traitement pluvial). Ces résultats soulignent l'importance capitale des apports hydriques sur le rendement en huile, ainsi que l'impact significatif des conditions climatiques défavorables pendant la floraison et le remplissage des graines. Il est également pertinent de noter qu'une teneur en huile acceptée peut-être obtenue (T2) même en dessous des valeurs maximales observées pour le traitement T1 (irrigation complète), avec une réduction de seulement 5 %, tout en permettant une économie considérable de 25 % de la consommation d'eau.

2.1.5. Les composantes liées à l'efficacité d'utilisation de l'eau

L'efficacité d'utilisation de l'eau joue un rôle crucial dans l'agriculture durable et la stabilité des systèmes agroenvironnementaux. En effet, dans un contexte où les ressources en eau sont de plus en plus limitées et où les pressions sur les écosystèmes sont croissantes, une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau permet aux agriculteurs de réduire leur dépendance à l'irrigation intensive. Cela les rend moins vulnérables aux pénuries d'eau et aux fluctuations climatiques, tout en

contribuant à réduire les impacts environnementaux tels que l'épuisement des ressources en eau, la dégradation des sols et la pollution.

Les enjeux de l'efficacité d'utilisation de l'eau se concrétisent dans les résultats expérimentaux présentés ci-dessous. En effet, les rendements en grains moyens pour les traitements pluviaux des deux campagnes n'étaient que de 4.73 qx. ha⁻¹, avec des quantités moyennes d'irrigation appliquées pour les deux campagnes : 52.12 mm pour T3, 111.69 mm pour T2 et 148.92 mm pour T1 (irrigation complète),. Pour augmenter le rendement moyen des deux campagnes à 8.21 qx. ha⁻¹ (T3), 14.08 qx.ha⁻¹ (T2) et 17.49 qx.ha⁻¹ (irrigation complète T1)(Tableau 9). En pourcentage, la réduction du rendement en grains par rapport au traitement T1 était de 72.75% pour le traitement pluvial, 53.06% pour T3 et 20.77% pour T2. Étant donné que les précipitations moyennes pendant les saisons de croissance (2022 et 2023) étaient de 98.05 mm, cela représentait seulement 39.70% des besoins en eau moyens des deux campagnes.

Tableau 9 . Quantité d'eau appliquée (mm) et économies d'eau sous différents traitements au cours des deux campagnes agricoles (2021-2022) et (2022-2023).

| Saison | Traitement | Irrigation (mm/saison) | Précipitation efficace (mm/Saison) | Eau totale (mm/Saison) | Rendement en grains relatif (%) | Rendement biomasse relatif (%) | Economie de l'eau (%) |
|-------------|----------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| (2021-2022) | T ₁ | 136.65 | 151.20 | 287.85 | 100 | 100 | - |
| | T ₂ | 102.488 | 151.20 | 253.688 | 85.92 | 87.50 | 25.00 |
| | T ₃ | 47.828 | 151.20 | 199.028 | 50.30 | 46.94 | 65.00 |
| | T ₀ | - | 151.20 | 151.20 | 31.89 | 32.65 | 100 |
| (2022-2023) | T ₁ | 161.20 | 44.90 | 206.10 | 100 | 100 | - |
| | T ₂ | 120.90 | 44.90 | 165.80 | 72.53 | 86.11 | 25.00 |
| | T ₃ | 56.42 | 44.90 | 101.32 | 42.07 | 50.12 | 65.00 |
| | T ₀ | - | 44.90 | 44.90 | 19.89 | 26.99 | 100 |

Cependant, les valeurs moyennes de l'EUE rendement grains variaient entre 0,43 kg.m⁻³ (traitement pluvial de la campagne 2022) et 0,73 kg.m⁻³ (traitement T2 de la campagne 2023). Le traitement T2 maintient la valeur maximale pour l'EUEI (qui tient compte la différence de

rendement entre le rendement grains irrigué et le rendement grain pluvial pour la quantité d'eau d'irrigation appliquée) à $1,095 \text{ kg.m}^{-3}$, tandis que la valeur minimale a été enregistrée pour le T3, représentant une restriction hydrique très sévère de 35 %, impactant gravement le rendement en grain (Figure 28). Cela n'a entraîné qu'une augmentation de 57,65 % et 111,5 % par rapport au T0 pour les saisons 2022 et 2023 respectivement.

Pour ce qui est des valeurs d'efficience d'utilisation de l'eau pour le rendement en biomasse, les valeurs de l'année 2023 se démarquent nettement et sont supérieures à celles de 2022 pour tous les traitements (Figure 27). Le traitement T0 arrive en tête du classement avec $5,85 \text{ kg.m}^{-3}$ en 2023, soit deux fois plus que l'année précédente ($2,08 \text{ kg.m}^{-3}$). Cependant, il est notable que les valeurs de l'EUEI pour la biomasse restent relativement constantes d'une année à l'autre pour chaque traitement.

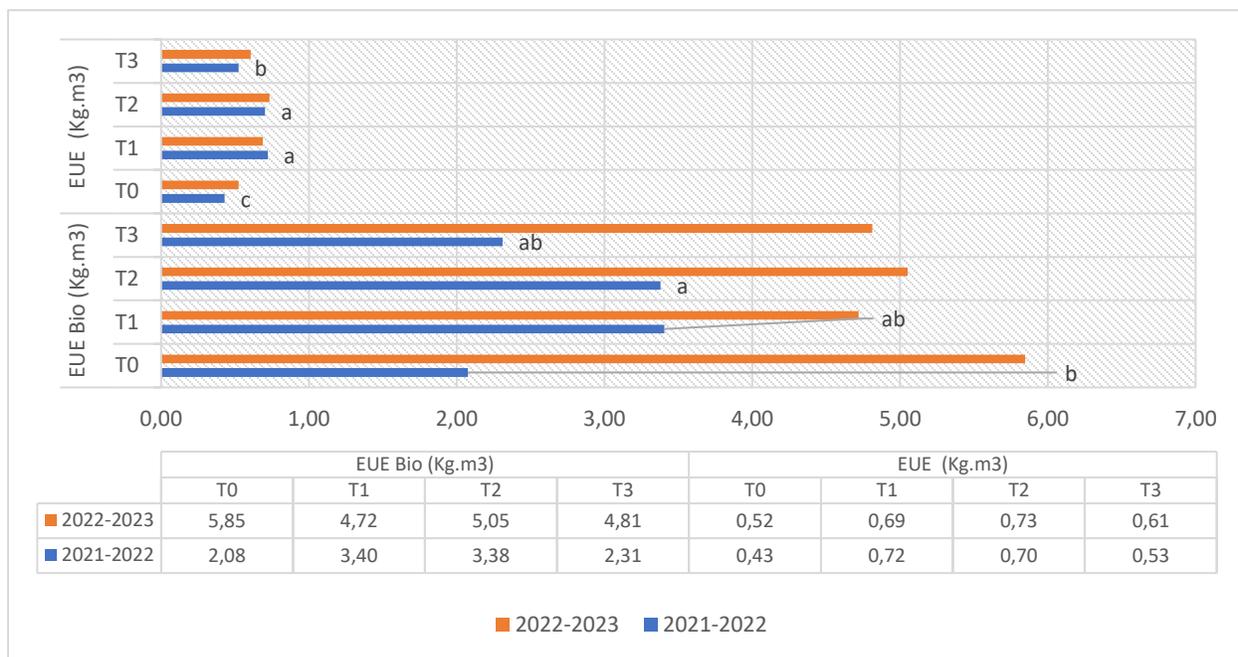


Figure 27. L'effet des régimes d'irrigations sur l'EUE grains et EUE bio durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023)

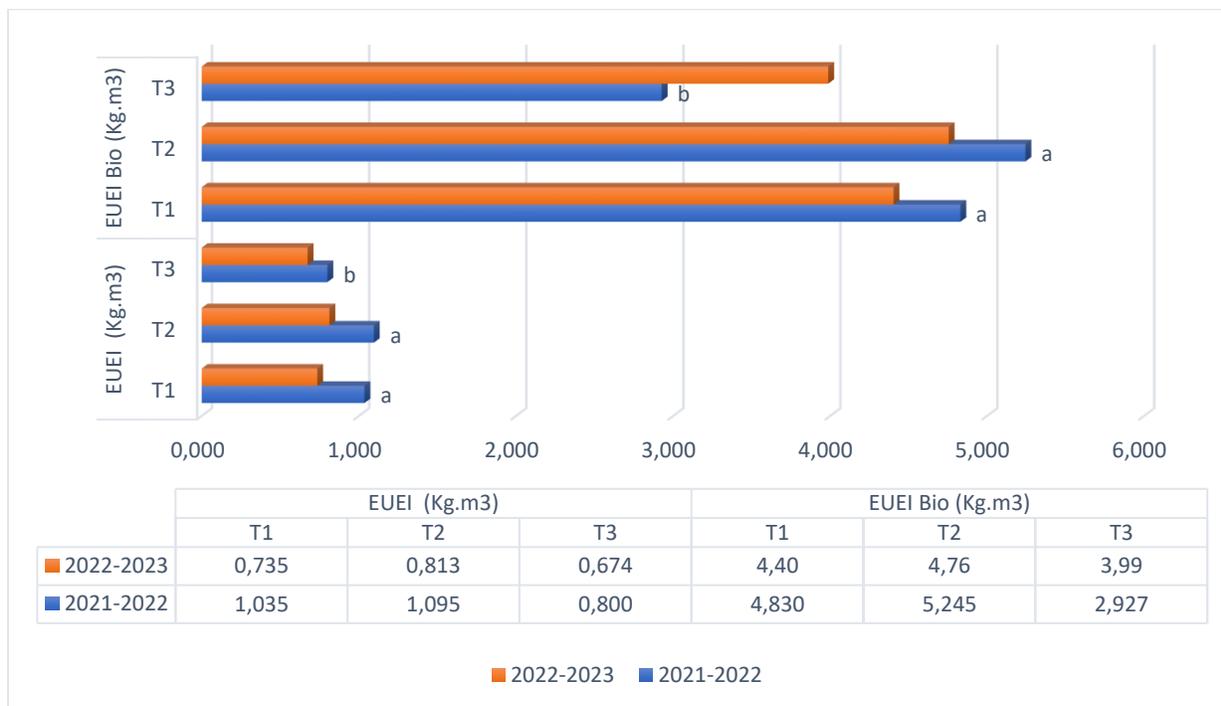


Figure 28 . L'effet des régimes d'irrigations sur le EUEI grains et EUEI bio durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023)

L'analyse de la variance des effets des traitements d'irrigation sur l'efficacité d'utilisation de l'eau de la culture pendant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023) a révélé des effets significatifs ($P < 0.01$) des traitements sur EUE et EUEI, avec un effet moins significatif ($P < 0.05$) pour EUEBio et EUEIBio (Tableau 10). De plus, l'effet de la saison agricole (Année) était significatif ($P < 0.01$) pour EUEI et EUEBio, mais n'a pas affecté les deux autres variables, EUE et EUEIBio. Enfin, l'interaction des deux facteurs (TxA) n'était significative que pour EUEBio. ($P < 0.01$)

Les rendements en grains moyens pour les traitements pluviaux des deux campagnes n'étaient que de 4.73 qx. ha⁻¹, avec des quantités moyennes d'irrigation appliquées pour les deux campagnes : 52.12 mm pour T3, 111.69 mm pour T2 et 148.92 mm pour T1 (irrigation complète). Pour augmenter le rendement moyen des deux campagnes à 8.21 qx. ha⁻¹ (T3), 14.08 qx.ha⁻¹ (T2) et 17.49 qx.ha⁻¹ (irrigation complète T1) (Tableau 9). En pourcentage, la réduction du rendement en grains par rapport au traitement T1 était de 74.11% pour le traitement pluvial, 53.81% pour T3 et 20.77% pour T2. Étant donné que les précipitations moyennes pendant les saisons de croissance

(2022 et 2023) étaient de 98.05 mm, cela représentait seulement 39.70% des besoins en eau moyens des deux campagnes.

Tableau 10. Carrés moyens des écarts d'ANOVA des paramètres d'utilisation de l'eau de la cameline au cours des deux campagnes agricoles (2021-2022) et (2022-2023).

| Source | Traitement | Année | T x A | Groupes |
|--|------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| Ddl | 3 | 1 | 3 | |
| EUE grains (Kg.m ⁻³ .ha ⁻¹) | 0.324** | 0.15 ^{NS} | 0.20 ^{NS} | A(T1,T2),B(T3),C(T0) |
| EUEI gains (Kg.m ⁻³ .ha ⁻¹) | 0.197** | 0.336** | 0.037 ^{NS} | A(T1,T2) B(T3) |
| EUEBio(Kg.m ⁻³ .ha ⁻¹) | 0.951* | 59.105** | 4.874** | A(T2),AB(T1 et T0),B(T3) |
| EUEIBio(Kg.m ⁻³ .ha ⁻¹) | 5.100* | 0.025 ^{NS} | 1.569 ^{NS} | A(T1 et T2),B(T3) |

*EUE : efficacité d'utilisation d'eau totale grains; EUEI : efficacité d'utilisation d'eau d'irrigation grain ;EUEBio : efficacité d'utilisation d'eau totale biomasse ;EUEIBio : efficacité d'utilisation d'eau d'irrigation biomasse. liberté ;NS :non significatif ;** signification(p < 0.01) ;*signification(p < 0.05),*

Ces observations sont cohérentes avec d'autres études ayant examiné les liens entre rendement, biomasse, et efficacité hydrique., Zhang et al., (2006), ont mis en évidence, dans le cas du blé, que le rendement en grains le plus élevé était associé à une biomasse maximale et un indice de récolte élevé, et une efficacité totale d'utilisation de l'eau optimale, mais pas nécessairement à une grande efficacité d'utilisation de l'eau de l'irrigation.. Ces résultats mettent en lumière l'importance de repenser la gestion de l'irrigation, notamment dans les zones semi-arides. En effet, comme le soulignent Rekaby et al., (2016) qu'il est essentiel, en particulier dans les zones semi-arides, de déplacer l'attention de la simple production par unité de surface vers la maximisation de la productivité par unité d'eau consommée, afin d'améliorer la gestion des ressources hydriques.

Ces résultats confirment cette nécessité, en montrant que l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation est plus élevée que celle de l'utilisation totale de l'eau. Notamment, le T2, avec une réduction modérée de l'irrigation, a montré les valeurs maximales de l'EUEI grains et biomasse (0,96 kg/m³ et 5,00 kg/m³ respectivement), tandis que le T3, avec une restriction plus sévère, a montré les valeurs les plus faibles (0,73 kg/m³ et 3,45 kg/m³). Cela illustre clairement l'importance d'une gestion équilibrée de l'irrigation pour optimiser la productivité de l'eau sans compromettre excessivement les rendements, tout en permettant aux plantes de développer une résilience à la sécheresse en réponse aux niveaux progressifs de stress hydrique. Ces résultats sont en accord avec

celle de Hergert et *al.*, (2016) qui ont révélé que les apports d'eau supplémentaire de 210 à 250 mm, soit 60 à 70 % des conditions d'irrigation complète, a produit des rendements de 78 % et 87 % du maximum.

Il est également intéressant de noter que T1 et T2 ont montré des efficacités statistiquement similaires en termes d'utilisation totale de l'eau, tandis que T1 ait reçu 25 % d'eau en plus. Cela suggère qu'une augmentation de l'apport en eau ne se traduit pas nécessairement par une amélioration significative de la production de matière sèche, mais peut, au contraire, entraîner une perte d'eau supplémentaire.

Ces observations sont particulièrement pertinentes dans le contexte actuel de la région d'étude où la gestion de l'eau est devenue un enjeu crucial pour les agriculteurs. La quasi-totalité des agriculteurs des Aurès, confrontés à la baisse progressive des rendements agricoles due au stress hydrique, ont tendance à recourir à la sur irrigation. Grassini et *al.*, (2011) ont estimé que 55% des exploitations agricoles pratiquent une irrigation excédant les besoins en eau, ce qui soulève la nécessité de passer à des systèmes d'irrigation modernes et d'améliorer la planification et la programmation de l'irrigation. En se basant sur des outils de contrôle de l'humidité du sol et des paramètres agro climatiques, il est possible de réduire les prélèvements d'irrigation jusqu'à 32%, tout en minimisant les pertes de rendement (Grassini et al., 2011).

La région des Aurès, est confrontée à l'irrégularité des pompages d'eau d'irrigation en raison des arrêts répétitifs causés par la surcharge du réseau électrique. Sur le plan collectif, l'irrigation déficitaire apparaît comme une solution pour accroître l'efficacité de l'eau d'irrigation et atténuer la surcharge du réseau électrique.

Dans cette étude, l'application du traitement T2, visant à économiser 25% de l'eau d'irrigation, a entraîné une augmentation de l'EUEI de 7.80%. Cependant, cette économie d'eau s'est accompagnée d'une perte de rendement de 20.77% en moyenne sur les deux années expérimentales. Afin de minimiser ces pertes de rendement sous irrigation déficitaire, les agriculteurs doivent acquérir une meilleure connaissance de l'adaptation de la culture au stress hydrique et de l'effet combiné de la variabilité interannuelle des facteurs climatiques, pédologiques et de la gestion des systèmes de cultures sur l'EUEI (Geerts & Raes, 2009). Dans un contexte très large, cette étude avait pour objectif d'évaluer la réponse de différentes composantes liées à la

culture dans des conditions agro climatiques variables au cours de deux saisons dans un environnement semi-arides, sous différents traitements d'irrigation. Son but était d'aider les producteurs et les autres intervenants de la chaîne de valeur à évaluer les conséquences économiques et de production des allocations d'eau dans les régions où les ressources hydriques sont en déclin permanent.

2.1.6. Variables de Potentiel Énergétique et Huileux : Rendement en huile (RH) et estimation en biodiesel (EB)

Les paramètres d'estimation des biocarburants des cultures oléagineuses revêtent une importance cruciale pour la durabilité environnementale et l'agriculture moderne. Ces données permettent d'évaluer l'efficacité énergétique des cultures, de promouvoir une utilisation durable des ressources et de contribuer à la transition vers des pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement. L'estimation du biocarburant et le rendement en huile sont étroitement liés à la teneur en huile et au rendement en grain exprimé en litres par hectare (L. ha⁻¹) et en kilogrammes par hectare (Kg. ha⁻¹) respectivement. Le calcul du rendement en huile et du biocarburant a montré une tendance similaire à celui du rendement en grain et du taux d'huile vis-à-vis des apports en eau. Les productions de biocarburant et d'huile augmentent progressivement avec l'augmentation des apports en eau des différents régimes d'irrigation appliqués. De plus, l'effet significatif de l'année et traitement sur les rendements en huile et en biocarburant a été mis en évidence par une analyse de variance (ANOVA) (Tableau 11).

Tableau 11 . Carrés moyens des écarts d'ANOVA des Variables de Potentiel Énergétique et Huileux de la cameline au cours des deux campagnes agricoles (2021-2022) et (2022-2023).

| Source | Traitement | Année | T x A | Groupes |
|----------------------------|------------------|------------------|---------------------|-------------------------------|
| Ddl | 3 | 1 | 3 | |
| Thuil (%) | 35.781** | 52.531** | 4.781 ^{NS} | A(T1),AB(T2), BC(T3),C(T0) |
| RH (Kg. ha ⁻¹) | 177835.957* * | 173167.891* * | 6036.091* | A(T1),B(T2),C(T3),D(T0) |
| EB (L. ha ⁻¹) | 34273.190** | 33372.361** | 1162.999* | A(T1),B(T2),C(T3),D(T0) |

*TH : Teneur en huile ;RH ;Rendement en huile ;EB : Estimation en biodiesel ;Ddl :degré de liberté liberté ;NS :non significatif ;** signification(p < 0.01) ;*signification(p < 0.05),*

Le traitement T0 (traitement pluvial) a enregistré les valeurs les plus faibles de production en moyenne sur les deux campagnes, avec 101.50 Kg. ha⁻¹ de rendement en huile et 44.56 L.ha⁻¹ de

biodiesel (Figure 29). Ces valeurs ont augmenté de manière linéaire avec la croissance des apports en eau, atteignant les meilleures valeurs correspondant au traitement T1 (irrigation complète) avec 533.12 Kg. ha⁻¹ de rendement en 2022 et 234.04 L.ha⁻¹ de biodiesel en 2023, dépassant le traitement T2 de 23.3 %. De plus, la production de biodiesel était plus faible en 2023 qu'en 2022, ce qui souligne que les différences observées d'une années a autre pour les principaux paramètres évolues souligne l'impact de la variation des conditions environnementale sur la productivité de la cameline.(Obour et al., 2017; Wysocki et al., 2013).

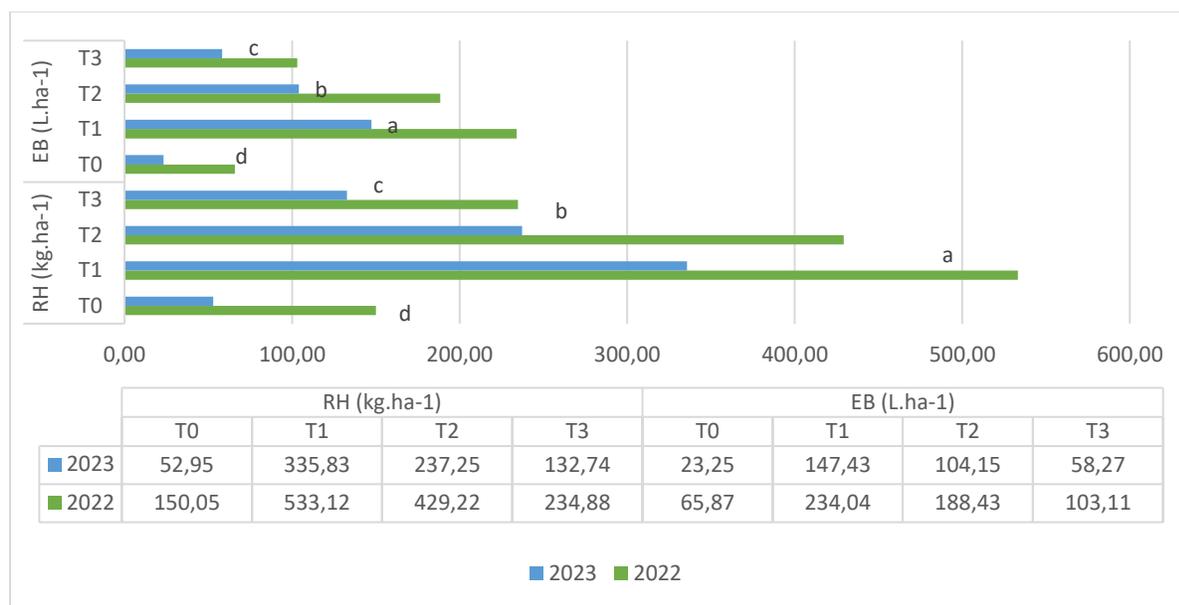


Figure 29 . L'effet des régimes d'irrigations sur le RH et EB durant les deux campagnes (2021-2022) et (2022-2023)

2.1.7. Paramètres d'efficacité économique et d'électricité

Étant donné la raréfaction de l'eau et la hausse des prix de l'énergie, l'efficacité économique des stratégies d'irrigation devient un enjeu central pour l'agriculture durable. Toutefois, au-delà de la gestion de l'eau, la dimension énergétique de l'irrigation devient un enjeu de plus en plus crucial pour les agriculteurs, car elle affecte directement les coûts de production, notamment dans le cas de systèmes intensifs comme les pivots centralisés, acquiert une importance croissante. En effet, la consommation énergétique de ces systèmes, souvent alimentés par des pompes immergées, représente une part non négligeable des coûts de production. En Algérie, où la tarification de l'électricité subventionnée par SONELGAS (Société nationale de distribution de

l'électricité et du gaz) varie en fonction des heures de consommation, la gestion efficace de l'énergie dans l'irrigation est primordiale pour réduire les charges financières liées à l'irrigation.

Cette section se propose d'analyser les paramètres d'efficacité économique et d'électricité liés à l'irrigation déficitaire (T2) et complète (T1) dans le cadre de la culture de la cameline sous pivot, sur une surface de 40 hectares, Nous nous pencherons plus spécifiquement sur l'impact de la consommation électrique des pompes et des pivots, ainsi que sur les économies potentielles réalisées grâce à la réduction de l'eau utilisée en comparant les deux traitements T1 et T2 .

L'objectif est double : 1-Évaluer l'impact des deux traitements sur la consommation d'énergie électrique, en prenant en compte les variations horaires de tarification appliquées par SONELGAZ.

2- Analyser les compromis entre les économies d'eau et d'électricité réalisées grâce à l'irrigation déficitaire et la perte de rendement en grains qu'elle engendre, et de comprendre comment les choix de stratégies d'irrigation influencent non seulement la consommation énergétique, mais aussi la rentabilité globale pour les agriculteurs.

2.1.7.1. Analyse Énergétique Comparative de l'Irrigation Complète et Déficitaire pour la Caméline sous Pivot de 40 ha

Ce travail s'inscrit dans une réflexion plus large sur la durabilité des systèmes d'irrigation et leur impact économique à long terme, tant pour les agriculteurs que pour les décideurs politiques.

Prenons l'exemple du coût de pompage pour un système d'irrigation en pivot couvrant 40 ha, alimenté par un forage équipé d'une pompe immergée à 150 mètres de profondeur. La pompe, avec un débit de 56 l/s, garantit le bon fonctionnement du pivot, conformément aux spécifications du constructeur.

L'estimation du bilan électrique repose sur la consommation de la pompe immergée et du pivot, qui fonctionne avec 7 moteurs électriques de 0,75 kWh chacun. Selon les courbes de fonctionnement du catalogue de la pompe, avec un débit de 56 l/s et une hauteur manométrique de 150 m, la puissance du moteur de la pompe, ayant un rendement optimal supérieur à 80 %, est de 110 kWh, déterminée à partir des caractéristiques électriques et dimensionnelles fournies.

Donc le bilan électrique est défini comme suite :

E bilan= E pompe+E pivot.

E pompe ; La consommation d'énergie de la pompe (kWh)

E pivot ; La consommation d'énergie du pivot (kWh).

Pour élaborer ce bilan énergétique, il est indispensable de tracer un calendrier d'irrigation pour chaque traitement pour tous le cycle de croissance de la cameline afin de savoir le nombre d'heures de fonctionnement du pivot qui s'est basé sur la pluviométrie appliquée pour chaque irrigation selon le catalogue de fonctionnement fourni par le constructeur du pivot ANABIB (Tableau 12).

La consommation électrique nécessaire pour irriguer la cameline sur un pivot de 40 ha a été calculée pour les deux traitements : T1 (irrigation complète) (Tableau 13) et T2 (irrigation déficitaire à 75 % d'ETc) (Tableau 14). À titre d'illustration, nous avons utilisé le calendrier d'irrigation de la deuxième campagne (2022-2023).

Tableau 12. Données de Fonctionnement pour un Pivot d'Irrigation de 40 Hectares Source :
Catalogue de fonctionnement du constructeur ANABIB.

| Eau appliquée (mm) | Réglage du minuteur (%) | Vitesse au sol de la dernière toure (m/min) | Temps écoulé par tour (heures) |
|--------------------|-------------------------|---|--------------------------------|
| 7.84 | 100 | 2.49 | 14.78 |
| 8.31 | 90 | 2.24 | 16.42 |
| 9.35 | 80 | 1.99 | 18.47 |
| 10.69 | 70 | 1.74 | 21.11 |
| 11.51 | 65 | 1.62 | 22.74 |
| 12.47 | 60 | 1.49 | 24.63 |
| 13.60 | 55 | 1.37 | 26.67 |
| 14.96 | 50 | 1.25 | 29.56 |
| 16.62 | 45 | 1.12 | 32.84 |
| 18.7 | 40 | 1.00 | 36.95 |
| 21.37 | 35 | 0.87 | 42.22 |
| 24.93 | 30 | 0.75 | 49.26 |
| 29.92 | 25 | 0.62 | 59.31 |
| 37.4 | 20 | 0.50 | 73.89 |
| 49.86 | 15 | 0.37 | 98.52 |
| 62.33 | 12 | 0.30 | 123.15 |
| 83.11 | 9 | 0.22 | 164.21 |
| 124.66 | 6 | 0.15 | 246.31 |
| 249.32 | 3 | 0.07 | 492.62 |

Tableau 13 . Consommation Électrique pour l'Irrigation Complète (T1) du Cycle de la Cameline sous Pivot (40 ha)

| Irrigation | Dose d'irrigation (mm) | Heurs de fonctionnement | Consommation Pompe (kWh) | Consommation Pivot (kWh) | Total |
|------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|
| 1 | 11.09 | 22.74 | 2501.40 | 17.055 | 2518.455 |
| 2 | 13.89 | 28.00 | 3080. | 21.00 | 3101 |
| 3 | 9.97 | 21.00 | 2310. | 15.75 | 2325.75 |
| 4 | 13.89 | 25.00 | 2750 | 18.75 | 2768.75 |
| 5 | 18.88 | 37.00 | 4070 | 27.75 | 4097.75 |
| 6 | 30.69 | 59.00 | 6490 | 44.25 | 6534.25 |
| 7 | 16.69 | 32.84 | 3612.40 | 24.63 | 3637.03 |
| 8 | 24.49 | 49.00 | 5390 | 36.75 | 5426.75 |
| 9 | 13.65 | 26.67 | 2933.70 | 20.0025 | 2953.7025 |
| 10 | 7.99 | 16.42 | 1806.20 | 12.315 | 1818.515 |
| Somme | 161.20 | 317.67 | 34943.70 | 238.2525 | 35181.953 |

Tableau 14 . Consommation Électrique pour l'irrigation déficitaire (T2) du Cycle de la Cameline sous Pivot (40 ha)

| Irrigation | Dose d'irrigation (mm) | Heurs de fonctionnement | Consommation Pompe (kWh) | Consommation Pivot (kWh) | Total (kWh) |
|------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|
| 1 | 8.32 | 16.42 | 1806.2 | 12.315 | 1818.515 |
| 2 | 10.42 | 21.11 | 2322.1 | 15.8325 | 2337.9325 |
| 3 | 7.48 | 14.78 | 1625.8 | 11.085 | 1636.885 |
| 4 | 10.42 | 21.11 | 2322.1 | 15.8325 | 2337.9325 |
| 5 | 14.16 | 27.67 | 3043.7 | 20.7525 | 3064.4525 |
| 6 | 23.02 | 45.48 | 5002.8 | 34.11 | 5036.91 |
| 7 | 12.52 | 24.72 | 2719.2 | 18.54 | 2737.74 |
| 8 | 18.37 | 38.29 | 4211.9 | 28.7175 | 4240.6175 |
| 9 | 10.24 | 20.22 | 2224.2 | 15.165 | 2239.365 |
| 10 | 5.99 | 11.83 | 1301.3 | 8.8725 | 1310.1725 |
| Somme | 120.92 | 241.63 | 26579.3 | 181.22 | 26760.523 |

2.1.7.2. Évaluation Économique et Environnementale de l'Irrigation Complète et Déficitaire de la Caméline sous Pivot sur 40 ha

SONELGAZ, a adopté une tarification de l'électricité basée sur les heures de consommation à titre de subvention pour les agriculteurs. Les consommations électriques durant les heures de pointe, entre 17 heures et 21 heures, sont facturées à 8,1147 DZD/ kWh. Pour le reste de la journée,

la tarification est de 1,7807 DZD/ kWh . Cette différence de 4,56 fois souligne l'importance de réduire la durée de l'irrigation au maximum en heures de pointe.

L'irrigation déficitaire (T2) à 75% des besoins de culture (ETc) a permis de réduire la consommation d'eau de 25%, démontrant une efficacité accrue de l'utilisation de l'eau d'irrigation. Cette stratégie a également entraîné une économie substantielle d'électricité de 24%, soit un gain de 8421.43 kWh par rapport à celui de l'irrigation complète durant le cycle de croissance de la cameline sous irrigation en pivot sur 40 ha. En particulier, la consommation électrique en heures de pointe (de 17h à 21h) a été réduite de 41% par rapport à T1, ce qui contribue à atténuer la chute de tension du réseau électrique pendant la période des heures de pointe. Ce gain d'énergie permettrait d'assurer un fonctionnement continu de 70 jours d'une chambre froide de taille moyenne de 20 m³ d'une puissance de 5 kW.

La satisfaction de cet écart de consommation électrique (8421,43 kWh) requiert, un volume de gaz naturel de 2105,36 m³, compte tenu d'un facteur de conversion selon Gülen, (2011) de 0,25 m³/kWh et d'une efficacité thermique de 35% pour une turbine à gaz. Cette consommation entraînerait des émissions de 4,27 tonnes de CO₂, en utilisant le facteur d'émission de 2,03 kg CO₂/m³, comme le souligne Sterligov, (2020). En adoptant le T2, il est possible de préserver des volumes importants de gaz naturel, une ressource fossile précieuse, tout en réduisant les émissions de CO₂ liées à la production d'électricité. Contribuant ainsi à la fois à l'efficacité énergétique et à la protection de l'environnement.

En revanche, le devis financier des deux traitements, conforme au barème de SONELGAZ, a révélé un gain financier de 26 796 DZD (Tableau 15 et 16), ce qui représente une économie de 29,37 % par rapport au traitement d'irrigation complète (T1). Cependant, la réduction du rendement en grains associée à la restriction hydrique du traitement T2 a entraîné une perte de 117 quintaux de cameline, soit une perte financière de 819 000 DZD sur 40 ha. Cette évaluation se base sur le prix du colza fixé à 7 000 DZD par quintal par le Ministère de l'Agriculture algérien, en raison de l'absence de prix défini pour la cameline.

Tableau 15 . Devis financier de la consommation Électrique pour l'Irrigation Complète (T1) du Cycle de la Cameline sous Pivot (40 ha)

| N Irrigation | Heurs de fonctionnement | | Consommation Pompe (Kw) | | Consommation Pivot (Kw) | | Prix HT (DZD) | | Total (DZD) |
|--------------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|-------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|-------------|
| | Du 17h-21h | Le reste | Du 17h-21h | Le reste | Du 17h-21h | Hors heures de pointe | Du 17h-21h | Hors heures de pointe | |
| 1 | 2.74 | 20 | 301.4 | 2200 | 2.055 | 15 | 2462 | 3944 | 6407 |
| 2 | 4 | 24 | 440 | 2640 | 3 | 18 | 3595 | 4733 | 8328 |
| 3 | 1 | 20 | 110 | 2200 | 0.75 | 15 | 899 | 3944 | 4843 |
| 4 | 4 | 21 | 440 | 2310 | 3 | 15.75 | 3595 | 4141 | 7736 |
| 5 | 4 | 33 | 440 | 3630 | 3 | 24.75 | 3595 | 6508 | 10103 |
| 6 | 8 | 51 | 880 | 5610 | 6 | 38.25 | 7190 | 10058 | 17247 |
| 7 | 4 | 28.84 | 440 | 3172.4 | 3 | 21.63 | 3595 | 5688 | 9282 |
| 8 | 8 | 41 | 880 | 4510 | 6 | 30.75 | 7190 | 8086 | 15275 |
| 9 | 4 | 22.67 | 440 | 2493.7 | 3 | 17.0025 | 3595 | 4471 | 8066 |
| 10 | 1 | 15.42 | 110 | 1696.2 | 0.75 | 11.565 | 899 | 3041 | 3940 |
| Total | 40.74 | 276.93 | 4481.4 | 30462.3 | 30.55 | 207.69 | 36613 | 54614 | 91227.23 |

Tableau 16. Devis financier de la consommation Électrique pour l'Irrigation déficitaire (T2) du Cycle de la Cameline sous Pivot (40 ha)

| N Irrigation | Heurs de fonctionnement | | Consommation Pompe (Kw) | | Consommation Pivot (Kw) | | Prix HT (DZD) | | Total (DZD) |
|--------------|-------------------------|----------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|-------------|
| | Du 17h-21h | Le reste | Du 17h-21h | Hors heures de pointe | Du 17h-21h | Hors heures de pointe | Du 17h-21h | Hors heures de pointe | |
| 1 | 0.00 | 16.42 | 0.00 | 1806.20 | 0.00 | 12.32 | 0 | 3238 | 3238.23 |
| 2 | 1.11 | 20.00 | 122.10 | 2200.00 | 0.83 | 15.00 | 998 | 3944 | 4941.81 |
| 3 | 0.00 | 14.78 | 0.00 | 1625.80 | 0.00 | 11.09 | 0 | 2915 | 2914.80 |
| 4 | 1.11 | 20.00 | 122.10 | 2200.00 | 0.83 | 15.00 | 998 | 3944 | 4941.81 |
| 5 | 4.00 | 23.67 | 440.00 | 2603.70 | 3.00 | 17.75 | 3595 | 4668 | 8262.83 |
| 6 | 5.48 | 40.00 | 602.80 | 4400.00 | 4.11 | 30.00 | 4925 | 7889 | 12813.39 |
| 7 | 4.00 | 20.72 | 440.00 | 2279.20 | 3.00 | 15.54 | 3595 | 4086 | 7681.06 |
| 8 | 4.00 | 34.29 | 440.00 | 3771.90 | 3.00 | 25.72 | 3595 | 6762 | 10357.23 |
| 9 | 4.00 | 16.22 | 440.00 | 1784.20 | 3.00 | 12.17 | 3595 | 3199 | 6793.60 |
| 10 | 0.22 | 11.61 | 24.20 | 1277.10 | 0.17 | 8.71 | 198 | 2290 | 2487.35 |
| Total | 23.92 | 217.71 | 2631.20 | 23948.10 | 17.94 | 163.28 | 21497 | 42935 | 64432.12 |

2.1.7.3. Analyse Coût-Bénéfice et Environnementale de l'Irrigation Complète et Déficitaire

La valeur financière de la perte de rendement dépasse largement le gain financier en électricité pour les agriculteurs. Ce constat suggère que l'irrigation complète est une stratégie plus rentable, en particulier dans les régions où l'eau n'est pas une contrainte. Ces constats sont appuyés par les travaux de Daran et *al.*, (2016); Kisekka et *al.*, (2016); Payero et *al.*, (2008) qui ont mis en évidence que malgré les économies d'eau réalisées avec des pratiques d'irrigation déficitaire, les pertes de rendement associées peuvent entraîner une baisse de la rentabilité globale. Ces chercheurs ont préféré l'irrigation complète, notamment dans les régions où l'eau n'est pas une contrainte.

Cependant, en région semi-aride et du point de vue de la gestion des ressources et de la durabilité, l'irrigation déficitaire présente un avantage considérable pour les pouvoirs publics et les décideurs. Ces derniers sont engagés dans une politique de subvention énergétique allouée au secteur agricole Algérien, atteignant 65 %, ce qui représente une charge supplémentaire pour le trésor public par rapport au coût de revient de la production énergétique par les centrales électriques à turbine à gaz. Ces centrales épuisent le gaz naturel fossile et ont un impact environnemental négatif.

En résumant, bien que l'irrigation déficitaire permette des économies significatives d'eau et d'électricité, la perte de rendement et la baisse de rentabilité associée peuvent ne pas être justifiées pour les agriculteurs. Cependant, pour les décideurs et les pouvoirs publics, l'irrigation déficitaire peut être une stratégie viable pour améliorer la gestion des ressources, réduire les subventions énergétiques, promouvoir la performance des réseaux électriques et atténuer les impacts environnementaux négatifs liés à la production d'énergie fossile.

2.2. Analyse des relations complexes : Une approche multidimensionnelle par matrice de corrélation, analyse ACP et arbre hiérarchique

2.2.1. Matrice de corrélation

L'exploration des relations entre différentes variables est une étape fondamentale pour comprendre les phénomènes étudiés. L'analyse statistique, en particulier l'utilisation de la matrice de corrélation, offre un outil précieux pour démêler les liens complexes entre les variables et en extraire des informations essentielles. En quantifiant la force et la direction des relations entre les

variables, cette analyse permet d'identifier les facteurs clés influençant le phénomène étudié. Elle aide à comprendre comment les différentes variables interagissent, fournissant une vision holistique du système. De plus, elle révèle des liens qui pourraient autrement passer inaperçus à l'œil nu, enrichissant ainsi notre compréhension globale du sujet.

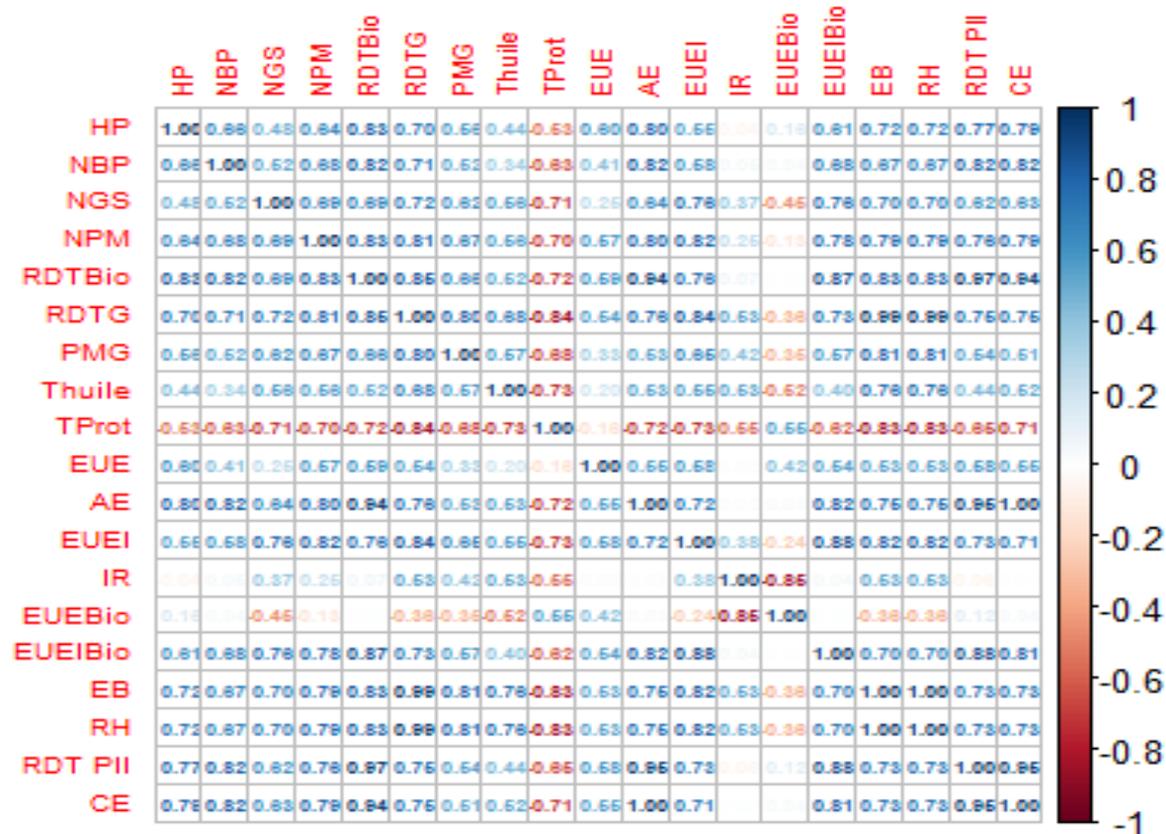


Figure 30. Matrice de corrélation des différentes variables étudiées

HP:hauteur des plantes ;NBP: nombre de branches par plante ;NGS:nombre de graines par silique de cameline ;NPM:nombre de plant par metre carre ;RDTBio:rendement en biomasse ;RDTG:rendement grains ;PMG: poids de mille grains ;Thuile:teneur en huile ;TProt: teneur en protein ;EUE :efficacité utilisation de leau totale ;AE: apport deau ;EUEI :efficacité utilisation de leau dirrigation rendement grains ;IR: indice de recolte ;EUEBio :efficacité utilisation de leau totale rendement biomasse ;EUEIBio : efficacité utilisation de leau dirrigation rendement biomasse ;EB:estimation en bio carburant ;RH: redement en huile ;RDT PII: rendement en paille ;CE; consommation électrique

Une plus grande hauteur des plantes (HP) est associée à un plus grand nombre de branches par plante (NBP) ($r = 0,76^{**}$), ainsi qu'à un meilleur rendement en grains (RDTG) ($r = 0,70^{**}$), une plus grande teneur en huile ($r = 0,44^{**}$) et à une estimation de biocarburant plus élevée (EB) ($r = 0,72^{**}$). De plus, ces relations positives augmentent avec des apports d'eau croissants (AE) et une consommation d'électricité plus élevée (CE) ($r = 0,78^{**}$) (Figure 30).

En revanche, ces paramètres montrent une tendance inverse avec la teneur en protéines (TProt). En effet, la teneur en protéines augmente avec la restriction hydrique (AE) ($r = -0,72^{**}$) et la consommation électrique (CE) ($r = -0,71^{**}$). Une meilleure teneur en protéines est liée à des plantes moins hautes, moins ramifiées ($r = 0,63^{**}$) et à une productivité en rendement (grain ou huile) plus faible ($r = -0,84^{**}$ et $r = -0,83^{**}$ respectivement), ainsi qu'à une consommation électrique plus faible (CE) ($r = -0,71^{**}$) (Figure 30).

En utilisant une corrélation linéaire simple entre le rendement en graines et d'autres paramètres de production ($p \leq 0,05$), les résultats indiquent des corrélations significatives. Le rendement en graines (RDTG) montre une forte corrélation positive avec la hauteur des plantes ($r = 0,70^{**}$) et le poids des mille graines (PMG, $r = 0,80^{**}$), soulignant l'importance de ces facteurs dans l'amélioration de la croissance et du rendement. D'un autre côté, on observe une corrélation moins significative entre le rendement en graines et la teneur en huile ($r = 0,68^*$). En revanche, aucune corrélation significative n'a été observée entre le rendement en graines et l'indice de récolte (HI). Cependant, il est important de noter qu'une forte corrélation négative a été rapportée entre le rendement en graines et la teneur en protéines ($r = -0,84^{**}$). Ces résultats soulignent l'importance d'obtenir des rendements de meilleure qualité sous irrigation déficitaire, en utilisant moins d'eau, avec une perte acceptable de la quantité de rendement.

2.2.2. Analyse en composantes principale (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) présentée ci-dessous (Figure 31) est un outil puissant pour visualiser les relations entre les variables et simplifier la complexité des données tout en conservant leur variance la plus significative, ce qui permet de comprendre les principaux axes de variation des données.

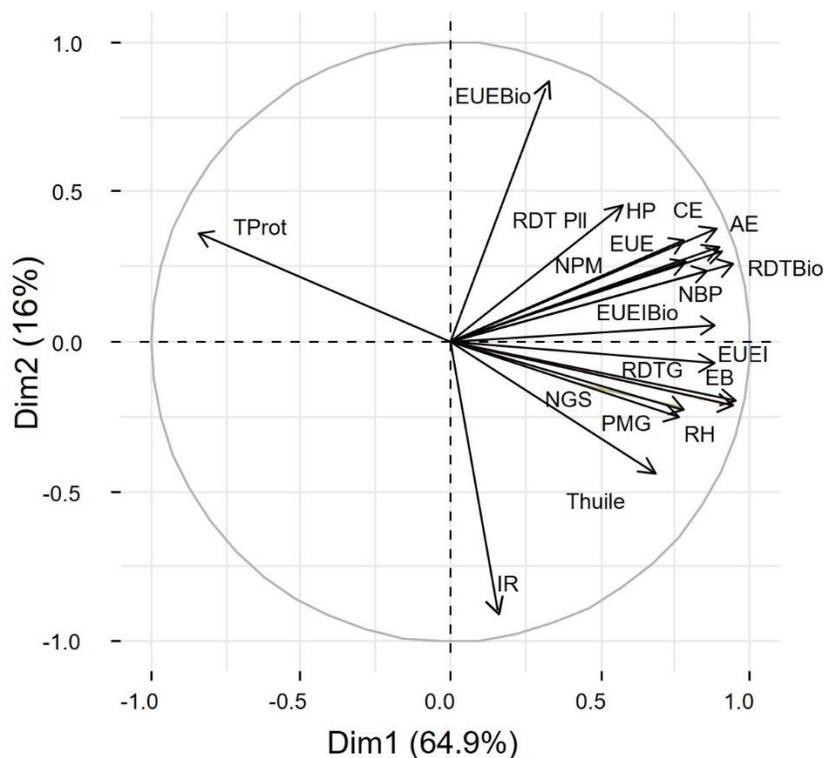


Figure 31. Analyse en Composantes Principales (ACP) des Relations entre les Variables étudiées

HP:hauteur des plantes ;NBP: nombre de branches par plante ;NGS:nombre de graines par silique de cameline ;NPM:nombre de plant par metre carre ;RDTBio:rendement en biomasse ;RDTG:rendement grains ;PMG: poids de mille grains ;Thuile:teneur en huile ;TProt: teneur en protein ;EUE efficacité utilisation de leau totale ;AE: apport deau ;EUEI efficacité utilisation de leau dirrigation rendement grains ;IR: indice de recolte ;EUEBio ;efficacité utilisation de leau totale rendement biomasse ;EUEIBio : efficacité utilisation de leau dirrigation rendement biomasse ;EB:estimation en bio carburant ;RH: redement en huile ;RDT PII: rendement en paille ;CE; consommation électrique

Le graphique de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) révèle des tendances claires parmi les variables étudiées. Les deux dimensions expliquent ensemble 80.9% de la variance totale des données, avec Dim1 représentant 64.9% et Dim2 16%. Ces deux axes fournissent donc une vision assez complète de la variabilité des données.

Dim1 (64.9%): Cette dimension est fortement corrélée avec des variables telles que le rendement en grains (RDTG), la hauteur des plantes (HP), le nombre de branches par plante (NBP), , et la consommation d'électricité (CE). Une valeur élevée de Dim1 indique donc une tendance à avoir des plantes plus hautes, un plus grand nombre de branches, un rendement en grains plus élevé, et une consommation d'eau et d'électricité plus importante. Ces variables se regroupent autour de la première composante principale, indiquant une forte corrélation entre elles et suggérant qu'elles partagent des influences communes et des tendances similaires.

En revanche, la teneur en protéines (TProt) est située à l'opposé sur cette dimension. Cela indique qu'une teneur élevée en protéines est associée à des valeurs plus faibles des autres variables mentionnées. Cette tendance opposée par rapport aux variables regroupées autour de Dim1 montre que l'augmentation de la teneur en protéines est associée à une diminution de la croissance des plantes, de la biomasse, à une faible productivité en rendement de grains et d'huile, à des plantes moins ramifiées, et à une plus faible consommation d'eau et d'électricité et de l'eau ainsi qu'à une estimation réduite de la production de biocarburant.

Dim2 (16%) : L'indice de récolte (IR) se détache près de la deuxième composante principale, ce qui montre son indépendance par rapport aux autres variables. Il présente des tendances uniques et une faible corrélation avec les variables regroupées autour de la première composante. Cela indique que l'indice de récolte a des caractéristiques distinctes qui ne sont pas partagées avec les autres variables étudiées, ajoutant une dimension supplémentaire à l'analyse.

En résumant, le graphique de l'ACP met en évidence les relations complexes entre les différentes variables. Tandis que la première dimension capture les principales variations associées à la croissance et au rendement des plantes, la deuxième dimension souligne l'indépendance de l'indice de récolte. La teneur en protéines montre une tendance inverse par rapport aux variables de croissance, soulignant les compromis potentiels entre la qualité et la quantité de rendement. Ces résultats, en ligne avec les conclusions de la matrice de corrélation, offrent une vision holistique des interactions entre les variables agronomiques étudiées.

2.2.3. Arbre hiérarchique

Le dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique est un outil puissant pour renforcer nos conclusions qui révèle des regroupements distincts de variables, suggérant des relations et des influences communes au sein de chaque cluster, et offrant une représentation visuelle claire des relations entre les variables.

Cette analyse révèle clairement que nos variables se sont regroupées en six ensembles distincts de clusters basés sur leurs similarités. Les variables incluses dans chaque cluster partagent des caractéristiques communes et présentent des similitudes dans leurs comportements ou tendances (Figure 32)

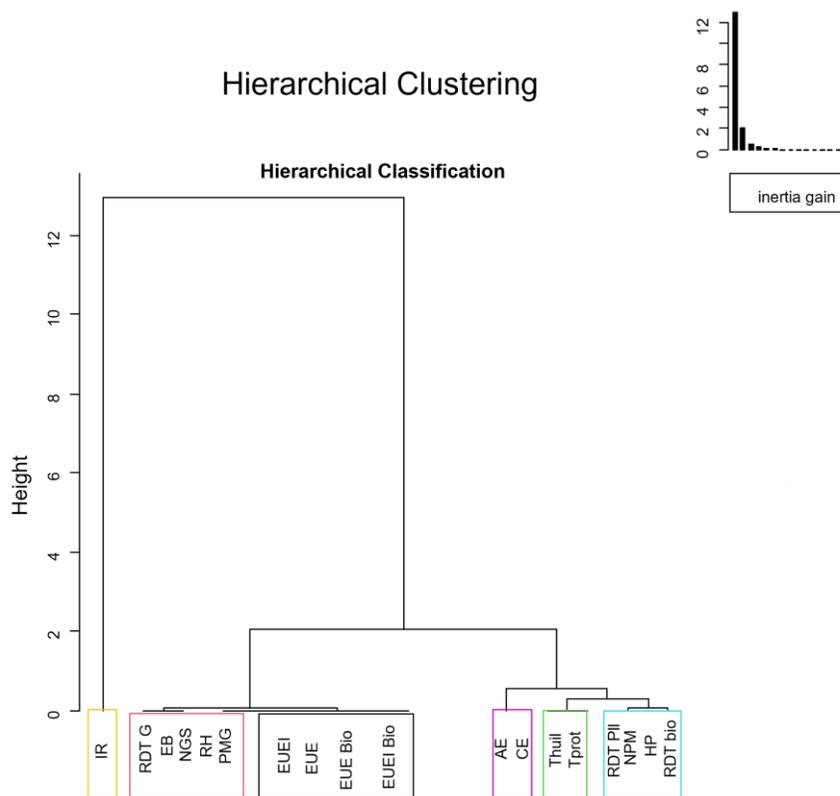


Figure 32 . L'arbre hiérarchique.

HP:hauteur des plantes ;NBP: nombre de branches par plante ;NGS:nombre de graines par silique de cameline ;NPM:nombre de plant par metre carre ;RDTBio:rendement en biomasse ;RDTG:rendement grains ;PMG: poids de mille grains ;Thuile:teneur en huile ;TProt: teneur en protein ;EUE efficacité utilisation de leau totale ;AE: apport deau ;EUEI efficacité utilisation de leau dirrigation rendement grains ;IR: indice de recolte ;EUEBio ;efficacité utilisation de leau totale rendement biomasse ;EUEIBio : efficacité utilisation de leau dirrigation rendement biomasse ;EB:estimation en bio carburant ;RH: redement en huile ;RDT PII: rendement en paille ;CE; consommation électrique

Le cluster N04 regroupe les variables liées à l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour le rendement en grains et en biomasse. Cela suggère une forte interconnexion entre ces variables, partageant des tendances similaires en réponse à la disponibilité de l'eau (Figure 32).

Le cluster N05 regroupe des variables liées à la productivité de la culture telles que le rendement en grains (RDTG), le poids de mille graines (PMG) et le nombre de graines par silique (NGS). Ces variables sont fortement corrélées car elles mesurent différents aspects de la production de graines, ainsi que les paramètres de productivité en huile (RH)et en biocarburant EB.

Le cluster N6, représenté par l'indice de récolte (HI), forme son propre cluster distinct, suggérant son indépendance relative par rapport aux autres variables étudiées, comme l'indique sa faible corrélation avec les autres.

Le cluster N2 regroupe deux variables essentielles influençant la qualité et la composition des graines : la teneur en huile (Thuile) et la teneur en protéines (Tprot). Bien que ces variables montrent des tendances opposées, elles sont fortement corrélées négativement entre elles.

Le cluster N01 regroupe des variables liées au rendement biologique (RDT bio), à la hauteur des plantes (HP) et au nombre de branches par plante (NBP), indiquant leur interconnexion et leur réponse similaire aux conditions de croissance.

Le cluster N3 regroupe les données sur les apports d'eau disponibles (AE), et la consommation électrique. Ces variables sont étroitement liées et partagent une tendance similaire en réponse aux restrictions hydriques.

Conclusion

Dans cette section d'étude, nous avons exploré les effets des différents traitements d'irrigation sur la culture de la cameline au cours des campagnes agricoles 2021-2022 et 2022-2023. Les résultats montrent que les traitements d'irrigation ont un impact significatif sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau, tant pour la production de grains que pour la biomasse. Les valeurs maximales de l'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation (EUEI) ont été obtenues sous le traitement T2, tandis que les restrictions sévères d'eau sous le traitement T3 ont conduit à des valeurs minimales. Ces observations confirment l'hypothèse selon laquelle des niveaux modérés de stress hydrique peuvent favoriser une utilisation plus efficace de l'eau par les plantes en stimulant des mécanismes de résilience.

Après avoir évalué l'efficacité de l'utilisation de l'eau sous différents traitements d'irrigation, il est crucial de comprendre l'impact global de la variabilité des conditions climatiques sur les rendements et les paramètres de croissance. Les températures extrêmes et les faibles précipitations observées pendant la deuxième campagne (2022-2023) ont gravement affecté le développement et le rendement de la cameline. Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'une gestion optimisée de l'irrigation pour maximiser la productivité de la cameline dans des environnements semi-arides.

En plus des rendements en termes de quantité, la qualité des récoltes est un aspect essentiel à considérer, surtout sous des conditions de stress hydrique. Il est également important de souligner que des apports d'eau limités ne conduisent pas nécessairement à une baisse proportionnelle des rendements. En effet, sur le plan qualité, les récoltes obtenues sous des restrictions hydriques

affichent des taux de protéines nettement plus élevés que celles issues d'une irrigation complète. Cela démontre que des conditions de stress hydrique peuvent produire des cultures de meilleure qualité, bien que cela soit souvent au prix d'une diminution de la productivité globale et d'un faible taux d'extraction de l'huile. Ainsi, il est possible d'atteindre une qualité supérieure en termes de teneur en protéines malgré des rendements de productivité réduits.

Pour conclure, les résultats de cette étude fournissent des orientations pratiques pour optimiser la gestion de l'irrigation dans les environnements semi-arides. Les conclusions de cette partie d'étude offrent des informations précieuses aux agriculteurs et aux décideurs, leur permettant de mieux comprendre la gestion efficace de l'eau dans les régions semi-arides pour une production agricole durable et de haute qualité tout en préservant les ressources en eau. Le regain d'intérêt pour le *Camelina sativa* dans l'agriculture contemporaine marque un tournant prometteur vers des pratiques durables. La culture du Camelina, caractérisée par un cycle de croissance relativement court (158 jours en moyenne sur les deux campagnes) et des besoins en eau faibles (246.98 mm en moyenne sur les deux campagnes), se présente comme une alternative viable à la jachère entre deux cultures céréalières. Cette approche permet d'éviter la monoculture et d'engendrer des avantages socio-économiques, tels que l'amélioration des revenus des agriculteurs.

La mise en œuvre de la culture du Camelina sous irrigation déficitaire peut contribuer de manière significative à la conservation et à la gestion de l'eau, permettant d'étendre les surfaces irriguées en Algérie en utilisant l'eau économisée de l'irrigation déficitaire. Cependant, il est important de reconnaître que le rendement potentiel en graines du *Camelina sativa* reste encore bien inférieur à celui du colza et les oléagineuses conventionnelles, soulignant la nécessité d'une amélioration génétique pour augmenter la taille des graines afin d'améliorer les conditions d'extraction de l'huile et de l'adapter à la mécanisation agricole disponible et dominante en Algérie. Cela constitue une orientation possible pour les recherches futures.

Nous recommandons l'adoption du traitement T2, qui implique une irrigation déficitaire continue à 75 % de l'ETc (besoins en eau de la culture), permettant d'économiser 25 % d'eau avec une perte de rendement acceptable. Bien que cette perte puisse sembler injustifiable sur le plan financier pour les agriculteurs, elle représente une alternative viable pour les décideurs et les pouvoirs publics en matière de gestion durable des ressources hydriques en milieu semi-aride, où ces ressources sont en déclin permanent. De plus, cette stratégie permettrait de réduire les montants

colossaux alloués à la subvention de l'électricité agricole en réduisant la consommation électrique de 24 % et de 41 % pendant les heures de pointe, atténuant ainsi la surcharge des réseaux électriques tout en protégeant les équipements électriques du forage.

Ces résultats sont particulièrement pertinents pour les stratégies agricoles dans les régions confrontées à des ressources en eau limitées et à des coûts énergétiques élevés.

3. Analyse de l'Efficacité Hydrique et de la Qualité Fourragère de *Camelina sativa* en Réponse à l'Irrigation Déficitaire

Dans la section précédente, nous avons exploré les effets des restrictions hydriques et climatiques sur la productivité de *Camelina sativa* et les facteurs liés à l'utilisation de l'eau. Cette analyse comprenait une évaluation détaillée des campagnes agricoles de 2021-2022 et 2022-2023, en se concentrant sur les paramètres d'estimation de biocarburant, de croissance, de la productivité en huile, en grains, biomasse et paille, ainsi que l'efficacité d'utilisation de l'eau et l'impact économique. Ces recherches ont révélé des informations cruciales sur la façon dont différentes conditions climatiques et traitements d'irrigation influencent les performances globales de la cameline.

En prolongeant cette analyse, cette section d'étude se concentre spécifiquement sur l'impact de l'irrigation déficitaire sur les sous-produits de la cameline au cours de la première campagne (2021-2022), à savoir la paille et les tourteaux, en tant que fourrage. Alors que la première partie a établi des bases solides en termes de rendement et de résilience de la culture face aux stress, il est essentiel de comprendre comment ces pratiques d'irrigation affectent la qualité des sous-produits utilisés dans l'alimentation animale.

Introduction

En Algérie, le secteur de l'élevage est confronté à des défis significatifs dus à la limitation de la production fourragère, exacerbée par des conditions pédoclimatiques défavorables. La dégradation des sols, le manque de précipitations et la variabilité climatique entraînent une diminution de la disponibilité en fourrage, essentiel pour le bétail. Cette situation oblige le pays à dépendre largement des importations de fourrage pour subvenir aux besoins croissants du secteur de l'élevage. La gestion actuelle de la filière représente une charge financière considérable pour les finances publiques, impactant directement la sécurité alimentaire.

Dans ce contexte, il est essentiel d'orienter la production fourragère vers de nouvelles perspectives, notamment par l'introduction de nouvelles espèces fourragères adaptées aux différentes zones écologiques. Cette démarche vise à diversifier les ressources fourragères et à rechercher des alternatives susceptibles de combler ce déficit, ce qui semble être l'une des priorités du secteur. L'agriculture moderne privilégie les pratiques durables en intégrant de

nouvelles espèces moins gourmandes en intrants, associées à des stratégies d'économie d'eau. *Camelina sativa*, une culture polyvalente émergente, grâce à ses qualités prometteuses, peut répondre aux nouvelles orientations de la production fourragère.

L'irrigation en zone semi-aride est fondamentale pour les cultures, assurant ainsi une croissance et une productivité optimales des plantes en palliant les insuffisances des précipitations naturelles. Cependant, dans de nombreux pays, les ressources en eau sont limitées, ce qui impose la nécessité de pratiquer une gestion optimisée de l'irrigation. L'irrigation déficitaire est une pratique de gestion de l'eau qui permet d'économiser cette ressource précieuse tout en maintenant des niveaux de rendement acceptables. (Howell et al., 2010). Il est crucial de comprendre comment cette technique affecte non seulement le rendement principal mais aussi la qualité des sous-produits tels que la paille et les tourteaux de cameline.

Une connaissance approfondie de ces effets peut guider les agriculteurs dans la gestion de l'irrigation pour optimiser la qualité du fourrage, ce qui est essentiel pour le bien-être animal et la rentabilité économique. Les sous-produits de la cameline, notamment la paille et les tourteaux, sont d'une grande importance en tant que fourrage pour les animaux. La paille peut être utilisée comme complément grossier, tandis que les tourteaux, riches en protéines (Paula et al., 2019), sont utilisés comme un complément alimentaire de haute valeur pour le bétail. L'utilisation de ces sous-produits contribue à une agriculture plus durable en réduisant le gaspillage et en maximisant l'utilisation des ressources disponibles.

Cette étude vise à offrir des informations précieuses pour les producteurs de cameline et les gestionnaires de ressources hydriques, contribuant ainsi à une agriculture plus durable et efficace. En intégrant les résultats obtenus sur la productivité de la cameline et les facteurs liés à l'utilisation de l'eau, cette partie d'étude vise à offrir une perspective complète sur la gestion de l'irrigation déficitaire. Il contribuera ainsi à une agriculture plus durable et résiliente, permettant aux producteurs de maximiser la valeur des sous-produits tout en préservant les ressources hydriques. De cette manière, l'Algérie pourrait améliorer son autosuffisance fourragère et réduire sa dépendance aux importations, renforçant ainsi la sécurité alimentaire et la durabilité du secteur de l'élevage.

Notre étude visait à évaluer la réponse de la paille et des tourteaux de caméline à des apports d'eau limités, en termes de composition chimique, de digestibilité et de valeur fourragère. De plus, nous avons examiné la productivité de l'eau en unités fourragères dans un environnement semi-aride de la région de Batna.

Cette section présente et analyse les résultats obtenus concernant l'effet de la restriction hydrique imposée par les différents traitements d'irrigation adoptés. Les analyses se concentrent sur plusieurs aspects clés : la qualité fourragère de la paille et des tourteaux de caméline, leur composition chimique, leur digestibilité, leur valeur énergétique, et la productivité de l'eau en unités fourragères. L'objectif est de comprendre comment la gestion de l'irrigation déficitaire affecte ces paramètres dans un environnement semi-aride, tel que celui de la région de Batna.

3.1. L'effet des régimes d'irrigations sur la composition chimique

Paille

Les analyses de la composition chimique des aliments pour bétail sont cruciales pour optimiser la nutrition, améliorer la santé animale, et garantir une efficacité économique. Elles permettent de formuler des rations équilibrées, de vérifier la qualité des aliments, et de répondre aux besoins nutritionnels spécifiques des animaux. Ces analyses sont également indispensables pour le développement de nouveaux aliments. En somme, elles sont essentielles pour assurer une alimentation de qualité, la santé et la productivité des animaux, tout en optimisant les ressources et les coûts pour les éleveurs.

Tableau 17. L'effet des traitements sur la composition chimique de la paille de la caméline

| Traitements | MS% | En % de MS | | | |
|-------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|
| | | MM % | MO % | CB % | MAT % |
| T0 | 96.17 a ±0.29 | 6.55 a ±0,06 | 93.44 c ±0,06 | 70.18 b ±3,88 | 4.37 a ±0,22 |
| T1 | 92,25 c ±0,25 | 5.30 c ±0,05 | 94.70 a ±0,05 | 78.00 a ±2,82 | 3.55 b ±0,19 |
| T2 | 92,25 c ±0.32 | 5.40 c ±0,03 | 94.59 a ±0,03 | 76.59 ab ±4,14 | 3.84 b ±0,12 |
| T3 | 94.40 b ±0,14 | 5.78 b ±0.27 | 94.22 b ±0,27 | 73.19 ab ±1,66 | 3.69 b ±0,40 |

Les valeurs suivies de la même lettre ne présentent pas de différence statistiquement significative à un seuil de $p < 0,05$.
MS: matière sèche, MM :matière minérale, MO :matière organique, CB ;cellulose brute, MAT :matière azotée totale.

Les résultats montrent des variations significatives dans les différentes composantes chimiques de la paille de cameline selon les traitements. Par exemple, le traitement T0 présente la plus haute teneur en matière sèche (MS), tandis que les traitements T1 et T2 montrent des valeurs similaires et plus faibles en matière minérale (MM) et matière sèche (MS). Les différences observées en cellulose brute (CB) et matière azotée totale (MAT) entre les traitements suggèrent des impacts potentiels sur la digestibilité et la valeur nutritionnelle pour le bétail (Figure 33 et 34).

D'après les résultats et l'analyse statistique ANOVA (Tableau 17) , révèlent une nette augmentation de la teneur en MO du T1 (94.70%) et T2 par rapport au traitement pluvial (93.44%) et T3. Cela suggère Le stress hydrique peut limiter l'absorption des nutriments par la plante et l'accumulation de la matière organique par la plante. La différence de MO entre T1 et T2 est minime mais n'est pas statistiquement significative (p -valeur $> 0,05$), indiquant que la restriction modérée d'eau n'a pas eu d'impact majeur sur la teneur en matière organique. De plus Les résultats montrent des variations significatives dans la cellulose brute (CB) avec une tendance similaire à celle de MO en augmentation avec le confort hydrique. En revanche, l'ANOVA montre une tendance opposée pour la MM, MS et MAT avec une nette hausse significative de ces composantes lorsque la restriction d'eau s'intensifie (Akkaya, 1994). Ce qui est expliqué par le comportement adaptatif de la plante en situation de stress hydrique. En période de pénurie d'eau, les plantes ont tendance à réduire leur métabolisme et leur croissance, ce qui conduit à une allocation préférentielle des ressources disponibles vers la production de protéines. Par conséquent, une plus grande proportion des ressources de la plante est utilisée pour synthétiser des protéines, ce qui peut entraîner une augmentation de la teneur en protéines dans les tissus végétaux, y compris la paille.(Richard et al., 2000).

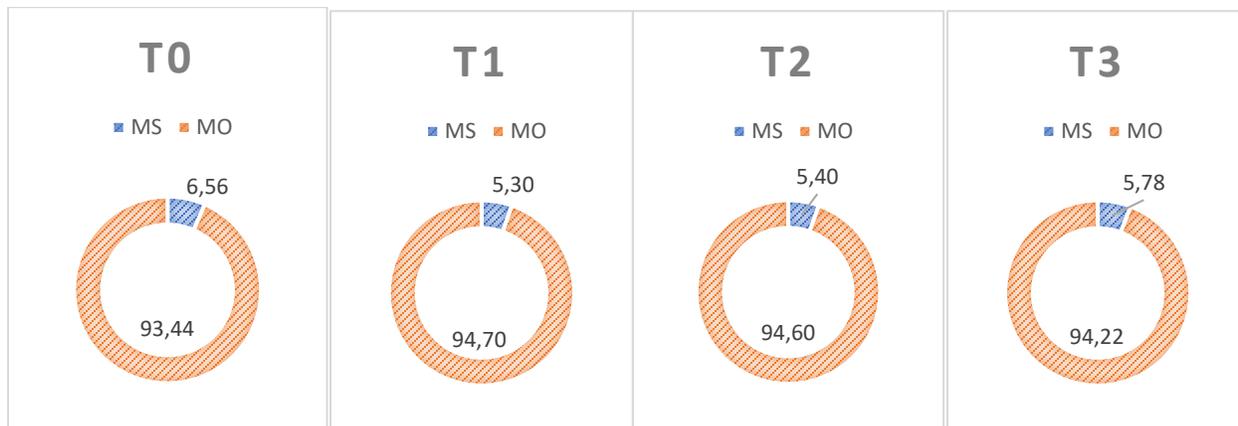


Figure 33 . La MS et MO de la paille pour chaque régime d'irrigation

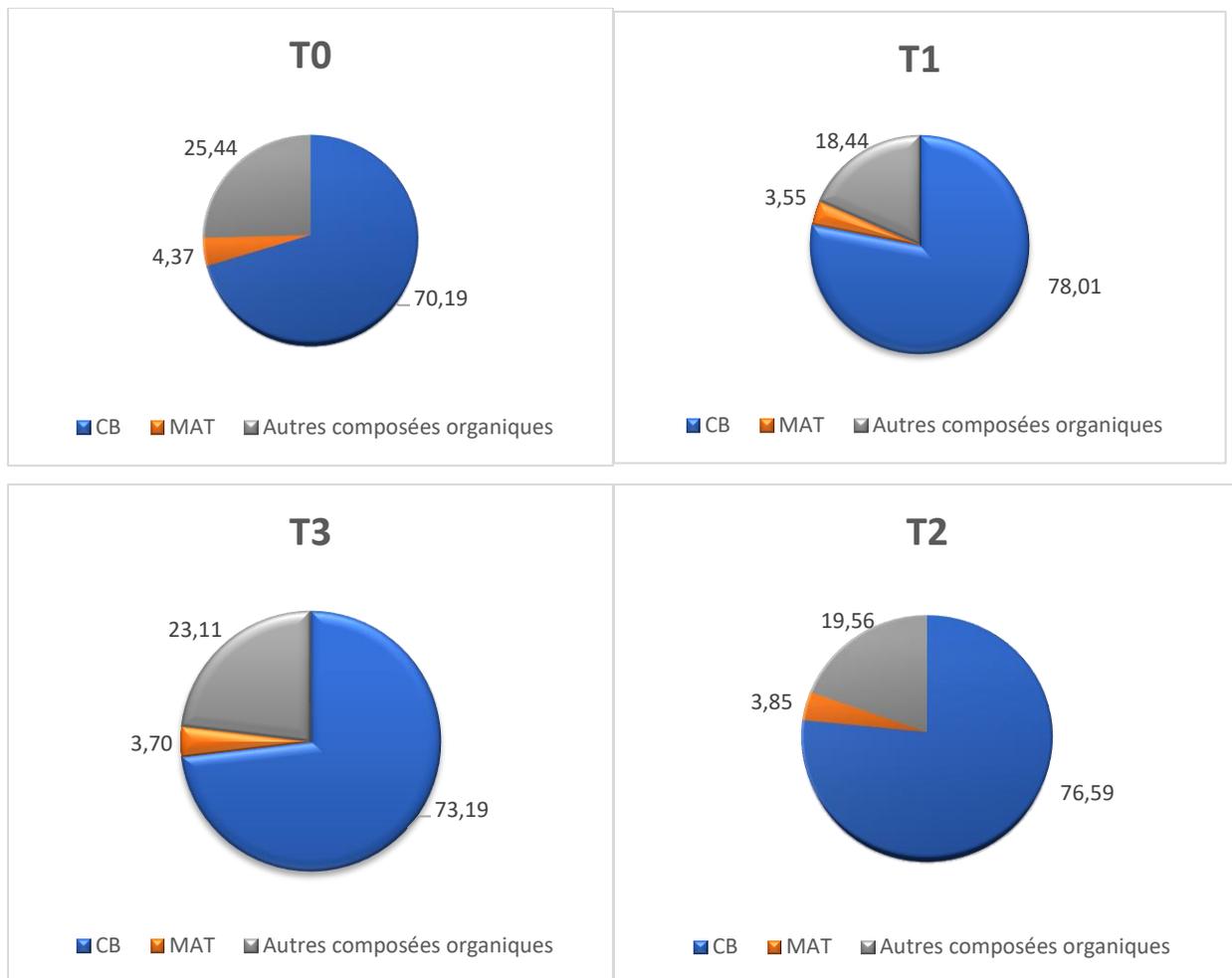


Figure 34 . La composition chimique de la paille issue des différents traitements en secteurs éclatés

Les tourteaux de cameline, sous-produits obtenus après l'extraction de l'huile des graines de cameline (*Camelina sativa*), présentent une composition chimique intéressante qui les rend polyvalents dans divers domaines, tant alimentaires que non alimentaires (Evrard, 2005). En alimentation animale, ils sont utilisés comme complément nutritionnel pour les ruminants, la volaille (Juodka et al., 2022) grâce à leur teneur élevée en protéines et en acides gras essentiels, améliorant ainsi la croissance et la santé des animaux. En aquaculture, ils enrichissent les régimes des poissons d'élevage, favorisant leur croissance et leur santé grâce à la richesse en protéines et en acides gras oméga-3 (Hixson et al., 2014). Les tourteaux de cameline trouvent également des applications non alimentaires : en cosmétique, ils sont utilisés pour leurs propriétés hydratantes et anti-âge (Delmas et al., 2013) ; dans le secteur de la bioénergie, ils servent de biomasse pour la production de biogaz ou de biodiesel (Agarwal et al., 2021) ; en agriculture, ils enrichissent les sols en nutriments, améliorant la fertilité et la rétention d'eau (Evrard, 2005) ; et dans l'industrie chimique, ils fournissent des matières premières pour la production de bioplastiques et de lubrifiants (Sydor et al., 2022). Ainsi, les tourteaux de cameline valorisent les sous-produits de l'extraction d'huile et soutiennent des pratiques durables et économiques dans divers secteurs.

Les résultats obtenus lors des analyses liés à l'effet des régimes d'irrigation sur la composition chimique des tourteaux sont reportés sur le tableau 18

Tableau 18 . L'effet des traitements sur la composition chimique des tourteaux de la cameline

| | MS% | En % de MS | | | |
|----|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| | | MM % | MO % | CB % | MAT % |
| T0 | 94.00 a ±0.03 | 7.32 a ±0,06 | 92.68 c ±0,04 | 33.33 a ±0.27 | 40.47 a ±0,02 |
| T1 | 93.32 b ±0,06 | 5.86 c ±0,05 | 94.13 a ±0,05 | 31.63 d ±0.26 | 38.94 c ±0,06 |
| T2 | 93.77 b ±0.06 | 5.82 c ±0,03 | 94.18 a ±0,04 | 32.01 c ±0.54 | 39.81 b ±0,04 |
| T3 | 94.04 a ±0,14 | 6.03 b ±0.27 | 93.96 b ±0,03 | 32.99 b ±0.43 | 40.16 b ±0,04 |

Les valeurs suivies de la même lettre ne présentent pas de différence statistiquement significative à un seuil de $p < 0,05$. MS: matière sèche, MM :matière minérale, MO :matière organique, CB ;cellulose brute, MAT :matière azotée totale.

Il semble que l'effet des régimes d'irrigation sur la composition chimique des tourteaux suive une tendance similaire à celle observée pour la paille. Les valeurs de la matière sèche (MS) varient légèrement entre les traitements, avec les valeurs les plus élevées observées pour T0

(94.00%) et T3 (94.04%), tandis que T1 et T2 affichent des valeurs légèrement plus basses (93.32% et 93.77% respectivement) (Figure 35 et 36). Ces différences, bien que mineures, sont statistiquement significatives, indiquant des variations notables dans la teneur en matière sèche entre les traitements.

La teneur en matière minérale (MM) est la plus élevée pour le traitement T0 (7.32%) et la plus faible pour les traitements T1 (5.86%) et T2 (5.82%), avec T3 ayant une valeur intermédiaire (6.03%). Les différences significatives entre les traitements suggèrent une variation dans la teneur en minéraux des tourteaux en fonction des régimes d'irrigation appliqués.

Les valeurs de cellulose brute (CB) montrent également des différences significatives entre les traitements, T0 présentant la valeur la plus élevée (33.33%), suivi par T3 (32.99%), T2 (32.01%), et T1 ayant la valeur la plus basse (31.63%). De même, la teneur en matière azotée totale (MAT) varie entre les traitements, avec T0 ayant la valeur la plus élevée (40.47%), suivi par T3 (40.16%) et T2 (39.81%). T1 présente la valeur la plus basse (38.94%), toutes ces différences étant statistiquement significatives ($P < 0.05$). En revanche, la matière organique (MO) est la plus élevée pour les traitements T1 (94.13%) et T2 (94.18%), suivis de près par T3 (93.96%). Le traitement T0 affiche la valeur la plus faible (92.68%). Ces différences sont également significatives, indiquant une influence notable des traitements d'irrigation sur la teneur en matière organique des tourteaux.

Les résultats suggèrent une augmentation de la teneur en matière organique (MO) pour les traitements bénéficiant d'une irrigation plus abondante (T1 et T2), tandis que la cellulose brute (CB), la matière minérale (MM), la matière sèche (MS) et la matière azotée totale (MAT) semblent augmenter avec une réduction de l'apport en eau, indiquant ainsi une concentration plus élevée de ces composants protéiques dans les tourteaux produits sous des conditions de stress hydrique. Ces observations corroborent les résultats de Macedo et *al.*, (2016), renforçant ainsi nos conclusions. Cette tendance peut être expliquée par le fait que, sous des conditions de stress hydrique, les plantes peuvent allouer davantage de ressources à la production de protéines comme moyen d'adaptation à leur environnement. Cela se traduit par une augmentation de la teneur en protéines dans les cultures cultivées en conditions de stress hydrique, comme le suggèrent Cheng et *al.*, (2016).

En résumant, les régimes d'irrigation ont un impact significatif sur la composition chimique des tourteaux de cameline, avec des implications potentielles pour leur valeur nutritionnelle et leur utilisation dans l'alimentation animale.

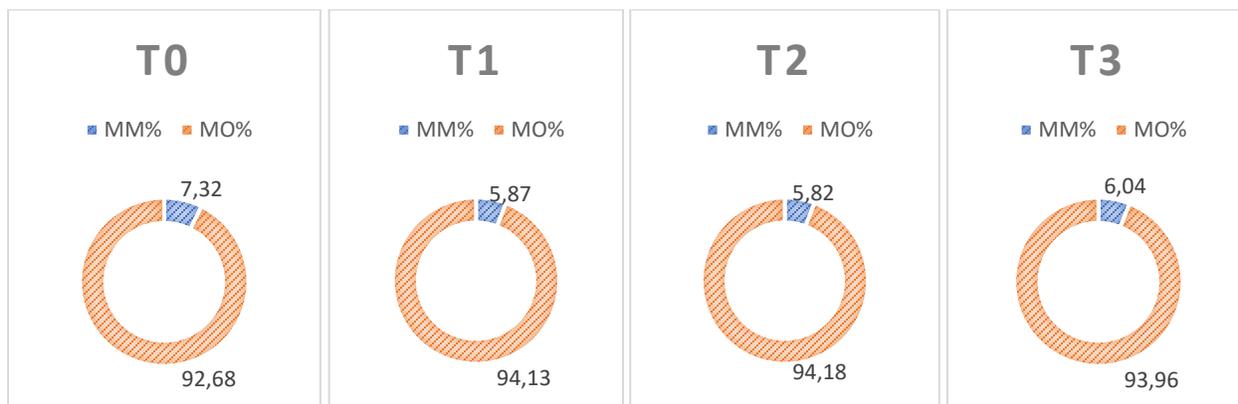
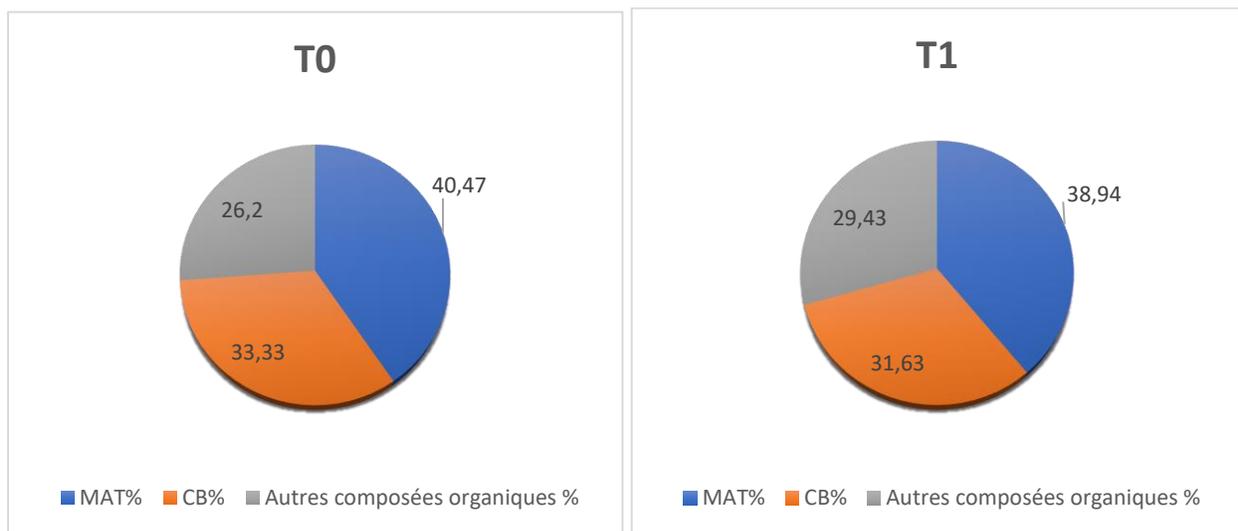


Figure 35. La MS et MO des tourteaux pour chaque régime d'irrigation



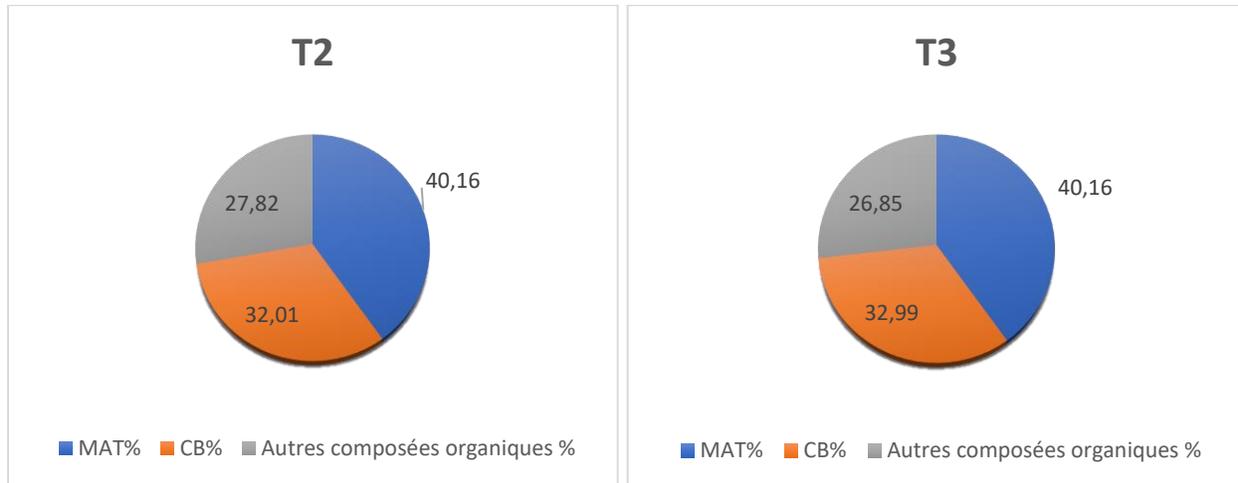


Figure 36. La composition chimique des tourteaux issue des différents traitements en secteurs éclatés

3.2. L'effet des régimes d'irrigation sur la digestibilité enzymatique et la valeur énergétiques.

Après avoir analysé et interprété les résultats de la composition chimique de la paille et des tourteaux de cameline, il est crucial d'évaluer plus en profondeur leur qualité fourragère en termes de digestibilité enzymatique et de valeur énergétique. Ces deux paramètres sont essentiels pour déterminer la valeur nutritive et l'efficacité d'utilisation des aliments pour l'animal.

La digestibilité enzymatique mesure la proportion de matière sèche qui est dégradée par les enzymes digestives, fournissant une indication directe de la qualité nutritive de fourrage. Une digestibilité élevée suggère que les nutriments présents dans l'aliment sont facilement accessibles par les animaux (Colburn et al., 1968), ce qui est essentiel pour leur production, leur croissance et leur bien-être.

La valeur énergétique, quant à elle, est une mesure de l'énergie que les animaux peuvent obtenir des aliments après digestion. Elle est généralement exprimée en termes d'Unités Fourragères (UF) par kilogramme de matière sèche (Shang, 2015).

Dans cette section, nous analyserons les résultats de la digestibilité enzymatique et de la valeur énergétique des échantillons de paille et de tourteaux de cameline soumis à différents traitements d'irrigation. Ces analyses nous permettront de mieux comprendre l'impact des régimes d'irrigation non seulement sur la composition chimique, mais aussi sur la qualité nutritionnelle et énergétique des fourrages. Les résultats de ces analyses fourniront des

informations précieuses pour l'optimisation des pratiques agricoles adoptées dans le domaine de l'alimentation animale,

Paille

Les résultats de l'analyse de la digestibilité enzymatique et la valeur énergétique de la paille issue de chaque traitement sont représentés dans le tableau 19.

Tableau 19 . L'effet des traitements sur la digestibilité enzymatique et la valeur énergétique de la paille de la cameline

| Traitements | En % de MS | | MOD (%) | MOND (%) | VE (UF/KgMS) |
|-------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|
| | DcellMO (%) | DMO (%) | | | |
| T0 | 25.27 a ±0,47 | 40.62 a ±0,41 | 38.20 a ±3,14 | 55.22 b ±2.49 | 0.14 a ±0,01 |
| T1 | 24.84 a ±0,63 | 40.90 a ±0,30 | 38.40 a ±3.78 | 56.20 a ±4.24 | 0.13 a ±0,01 |
| T2 | 25.20 a ±0,63 | 40.85 a ±0,41 | 38.60 a ±4,06 | 55.90 ab ±3.81 | 0.14 a ±0,01 |
| T3 | 24.94 a ±0.80 | 40.68 a ±0,53 | 38.30 a ±4.61 | 55.80 ab ±5.90 | 0.13 a ±0,01 |

Les valeurs suivies de la même lettre ne présentent pas de différence statistiquement significative à un seuil de $p < 0,05$.
DcellMO: digestibilité de la cellulase de la matière organique ,DMO :Digestibilité de la matière organique, MOD :matière organique digestible, MOND ; matière organique digestible, VE :Valeur énergétique.

Les résultats de l'analyse de la digestibilité enzymatique et de la valeur énergétique de la paille montrent des variations mineures entre les traitements d'irrigation, sans différences significatives ($P < 0.05$) pour la plupart des paramètres. Les valeurs de digestibilité de la cellulose en matière organique (DcellMO) oscillent entre 24.84% (T1) et 25.27% (T0), indiquant que les régimes d'irrigation n'ont pas d'impact majeur sur ce paramètre. De même, la digestibilité de la matière organique (DMO) reste relativement stable entre 40.62% (T0) et 40.90% (T1). Les valeurs de matière organique digestible (MOD) varient peu, de 38.20% (T0) à 38.60% (T2). La matière organique non digestible (MOND) montre une légère variation, avec la valeur la plus élevée pour T1 (56.20%) et la plus basse pour T0 (55.22%), les traitements T2 et T3 affichant des valeurs intermédiaires (55.90% et 55.80%) respectivement, les différences étant significatives entre T1 et T0. Enfin, les valeurs énergétiques en unités fourragères par kilogramme de matière sèche (UF/KgMS) sont pratiquement peu constantes de 0.13 (T1, T3) à 0.14 (T0, T2), sans différences significatives (Figure 37).

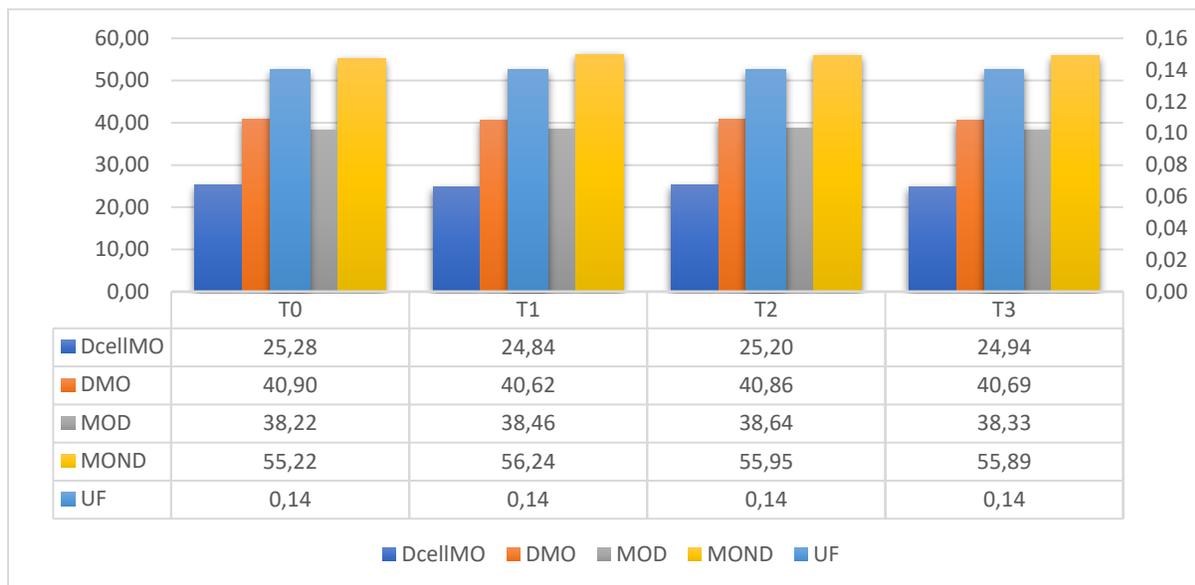


Figure 37 : Les paramètres de digestibilité enzymatique et la valeur énergétique de la paille issue des différents traitements

Ces résultats suggèrent que les différents régimes d'irrigation n'affectent pas de manière significative la digestibilité enzymatique et la valeur énergétique de la paille de cameline, à l'exception de la matière organique non digestible (MOND) qui a été influencée par les traitements appliqués. Cela indique que les paramètres (DcellMO, DMO, MOD, et UF) réagissent de manière relativement stable et ne sont pas fortement influencés par le régime d'irrigation. Les légères variations observées peuvent être attribuées à la réponse adaptative de la plante à la disponibilité d'eau.

Tourteaux

Les résultats de l'analyse de la digestibilité enzymatique et la valeur énergétique de la paille issue de chaque traitement sont représentés dans le tableau 20.

Tableau 20. L'effet des traitements sur la digestibilité enzymatique et la valeur énergétique des tourteaux de la cameline

| Traitements | En % de MS | | MOD (%) | MOND (%) | VE (UF/KgMS) |
|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| | DcellMO (%) | DMO (%) | | | |
| T0 | 65.16 b ±1.07 | 69.68 d ±0,04 | 66.61 b ±0.59 | 27.89 c ±0.02 | 0.72 c ±0,03 |
| T1 | 63.54 c ±0,08 | 72.16 a ±0,02 | 65.64 c ±0.06 | 28.47 a ±0.03 | 0.77 a ±0,03 |
| T2 | 63.40 c ±0,02 | 70.36 b ±0,04 | 64.54 d ±0.02 | 28.12 b ±0.02 | 0.74 b ±0,03 |
| T3 | 67.40 a ±0.03 | 69.75 c ±0,02 | 67.80 a ±0.02 | 26.16 d ±0.02 | 0.71 c ±0,03 |

Les valeurs suivies de la même lettre ne présentent pas de différence statistiquement significative à un seuil de $p < 0,05$.
DcellMO: digestibilité de la cellulase de la matière organique, DMO :Digestibilité de la matière organique, MOD :matière organique digestible, MOND ; matière organique digestible, VE :Valeur énergétique.

Les régimes d'irrigation aient un effet significatif sur la digestibilité enzymatique des tourteaux de cameline, ainsi que sur leur valeur énergétique. Contrairement aux paramètres de digestibilité enzymatique de la paille, où seuls la MOND a été affectés par les régimes d'irrigation, tous les paramètres semblent être influencés par les différents régimes d'irrigation dans le cas des tourteaux de cameline.

Les résultats de l'analyse de la digestibilité enzymatique et de la valeur énergétique des tourteaux de cameline révèlent des variations significatives entre les traitements. La digestibilité de la cellulose en matière organique (DcellMO) varie de 63.40% (T2) à 67.40% (T3), avec T0 et T1 affichant respectivement 65.16% et 63.54%, indiquant une digestibilité significativement plus élevée pour T3. La digestibilité de la matière organique (DMO) est la plus élevée pour T1 (72.16%), suivie de près par T2 (70.36%) , T3 (69.75%) et T0 (69.68%) , ces différences étant statistiquement significatives. Concernant la matière organique digestible (MOD), T3 présente la valeur la plus élevée (67.80%), tandis que T2 affiche la plus faible (64.54%), avec T0 et T1 montrant des valeurs intermédiaires de 66.61% et 65.64%. Pour la matière organique non digestible (MOND), les valeurs varient de 26.16% (T3) à 28.47% (T1), T0 et T2 affichant respectivement 27.89% et 28.12%, indiquant que T3 a la teneur en MOND la plus faible et T1 la plus élevée (Figure 38). Les résultats indiquent que les traitements avec une irrigation abondante (T1 et T2) augmentent les paramètres de digestibilité de la matière organique (DMO), la matière

organique non digestible (MOND), et la valeur énergétique (UF). En revanche, les conditions de restriction hydrique favorisent l'augmentation des autres variables de digestibilité enzymatique, à savoir la digestibilité de la cellulose en matière organique (DcellMO) et la matière organique digestible (MOD).

DMO, MOND et la valeur énergétique (UF) présentent une corrélation positive 0.86**,0.61*et 0.86** respectivement avec les apports en eau, montrant des valeurs maximales correspondant au traitement T1, qui offre une irrigation complète. En revanche, des valeurs minimales sont observées pour le traitement T3, qui présente une irrigation réduite. Ces résultats suggèrent que des niveaux plus élevés d'irrigation favorisent une meilleure digestibilité enzymatique et une valeur énergétique plus élevée des tourteaux de cameline.

En revanche, la digestibilité de la cellulase de la matière organique (DcellMO) et (MOD) montrent une corrélation négative -0.61* et -0.60*respectivement avec les apports en eau. Les valeurs maximales de ces paramètres sont observées pour le traitement T3, caractérisé par une irrigation réduite, tandis que les valeurs minimales sont observées pour le traitement T2, qui offre une irrigation à 75% des besoins en eau. Cela suggère que des niveaux plus faibles d'irrigation peuvent favoriser une meilleure DcellMO et une matière organique plus digestible dans les tourteaux de cameline.

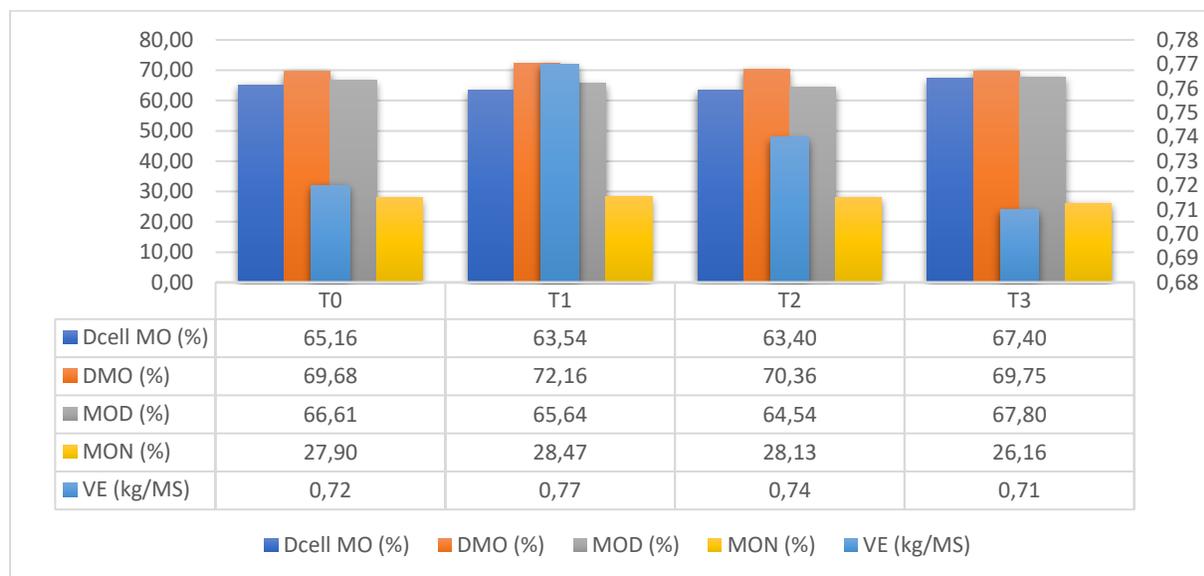


Figure 38 . Les paramètres de digestibilité enzymatique et la valeur énergétique des tourteaux issue des différents traitements

3.3 L'effet des régimes d'irrigation sur la productivité de l'eau en unité fourragère .

Après avoir terminé l'analyse et l'interprétation des résultats des effets des apports d'eau limités sur la composition chimique, la digestibilité enzymatique, et la valeur énergétique des sous-produits de la cameline, nous allons finalement examiner la productivité de l'eau en unité fourragère. Un paramètre clé et crucial pour la gestion de l'eau dans le domaine de la nutrition animale.

La productivité de l'eau en unité fourragère (PEF) est un paramètre essentiel dans l'évaluation de l'efficacité des stratégies d'irrigation et de la gestion de l'eau en agriculture. Elle représente la quantité de matière fourragère produite par unité d'eau utilisée, mesurée en termes de valeur énergétique (UF) par millimètre d'eau consommée . Ce paramètre est crucial, notamment dans les régions où les ressources en eau sont limitées, car il permet de maximiser la production de fourrage tout en optimisant l'utilisation de l'eau. Une meilleure productivité de l'eau signifie que les cultures peuvent fournir une valeur nutritive élevée avec une utilisation minimale de cette ressource précieuse, contribuant ainsi à la durabilité et à la rentabilité des systèmes de production animale. En évaluant la productivité de l'eau en unité fourragère pour les sous-produits de la cameline sous différents régimes d'irrigation, nous pouvons identifier les pratiques de gestion de l'eau les plus efficaces pour améliorer la production de fourrage tout en conservant les ressources hydriques.

Tableau 21 . Calcul de la productivité de l'eau en unité fourragère pour la paille .

| Traitements | T0 | T1 | T2 | T3 |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| RDT Paille (Kg /Ha) | 2537.50 | 7722.50 | 6790 | 3555.00 |
| MS (%) | 96.17 | 92.25 | 92.25 | 94.40 |
| RDT (Kg MS/ha) | 2440.31 | 7124.01 | 6263.78 | 3355.92 |
| Valeur Fourragère (UF/Kg de MS) | 0.14 | 0.13 | 0.14 | 0.13 |
| Contribution a l'hectare | 341.64 | 926.12 | 876.93 | 436.27 |
| Apport (mm) | - | 136.65 | 102.49 | 47.83 |
| ET (mm) | 151.2 | 287.85 | 253.69 | 199.03 |
| PEF (UF/mm) | 2.26 | 3.22 | 3.46 | 2.19 |
| PEIF (UF/mm) | - | 4.26 | 5.22 | 1.98 |

Tableau 22 : Calcul de la productivité de l'eau en unité fourragère pour les tourteaux

| Traitements | T0 | T1 | T2 | T3 |
|--------------------------------|--------|---------|---------|--------|
| RDT Grain (Kg / Ha) | 662.50 | 2077.50 | 1785.00 | 1045 |
| Tourteaux (%) | 72.00 | 68.00 | 70.25 | 72.25 |
| RDT Tourteaux (Kg /Ha) | 477.00 | 1417.89 | 1253.96 | 755.01 |
| MS (%) | 94.00 | 93.32 | 93.77 | 94.04 |
| Rendement Tourteaux (KgMS/Ha) | 448.38 | 1323.18 | 1175.84 | 710.01 |
| Valeur fourragere (UF/KgMS) | 0.72 | 0.77 | 0.74 | 0.71 |
| Contribution a l'hectare | 322.83 | 1018.85 | 870.12 | 504.11 |
| Apport (mm) | - | 136.65 | 102.49 | 47.83 |
| Eau Total (mm) | 151.20 | 287.85 | 253.69 | 199.03 |
| PEF (UF/mm) | 2.14 | 3.54 | 3.43 | 2.53 |
| PEIF(UF/mm) | - | 5.09 | 5.34 | 3.79 |

Les résultats des tableaux révèlent une variation notable de la productivité de l'eau en unités fourragères par millimètre d'eau consommée (UF/mm) entre les différents traitements d'irrigation pour la paille et les tourteaux. Le traitement T1 pour les tourteaux affiche une valeur élevée de la productivité de l'eau totale (PEF) (3.54 UF/mm), suivie de près par T2 (3.43 UF/mm)(Tableau 22). De même, T2 pour la paille se distingue par sa PEF la plus élevée (3.46 UF/mm), surpassant légèrement T1 (irrigation complète) qui affiche une productivité de 3.22 UF/mm (Tableau 21). Cette disparité est encore plus évidente lorsqu'on examine la productivité de l'eau d'irrigation (PEIF) pour la paille et les tourteaux, où le traitement T2 (paille) se démarque nettement avec 5.22 UF/mm par rapport à T1 (4.28 UF/mm), enregistrant une augmentation de 18%. La disparité est moins prononcée pour les tourteaux, avec une augmentation de la PEIF de T2 de 4.68%, affichant 5.09 UF/mm pour T1 et 5.34 UF/mm pour T2.

Les résultats mettent en évidence l'efficacité de l'irrigation déficitaire du traitement T2 dans la production d'unités fourragères par millimètre d'eau d'irrigation appliqué, comparativement au traitement T1 avec irrigation complète. Bien que T1 ait reçu 25% d'eau en plus que T2, une quantité d'eau accrue peut entraîner des pertes d'eau supplémentaires sans augmenter significativement la valeur énergétique. Cette constatation souligne ainsi la supériorité de l'utilisation efficace de l'eau

du traitement T2 dans le processus de production fourragère par millimètre d'eau d'irrigation appliqué, par rapport à l'irrigation complète T1.

En résumé, ces résultats indiquent que T2, malgré une réduction de l'irrigation de 25%, parvient à optimiser l'utilisation de l'eau pour produire des unités fourragères, démontrant ainsi une approche plus efficace et durable pour la culture de la cameline sous des conditions d'eau limitée.

3.4. Analyse des relations complexes : matrice de corrélation, analyse en composantes principales et dendrogramme des paramètres étudiés

Dans cette section, nous examinerons les relations complexes entre les différentes variables étudiées en utilisant des techniques statistiques avancées. La matrice de corrélation était utilisée pour identifier les relations linéaires entre les variables. Ensuite, une analyse en composantes principales (ACP) était effectuée pour réduire la dimensionnalité des données tout en conservant autant que possible la variance d'origine. Enfin, un dendrogramme construit pour visualiser les relations hiérarchiques entre les différents paramètres.

Ces méthodes offrent une vue d'ensemble des interrelations entre les paramètres, permettant d'identifier les regroupements de variables et de comprendre les facteurs sous-jacents influençant la composition chimique, la digestibilité enzymatique et la valeur énergétique des sous-produits de la cameline. Cette analyse approfondie fournira des insights supplémentaires et contribuera à la compréhension globale des effets des traitements d'irrigation sur les sous-produits de la cameline.

3.4.1. Matrice de corrélation

La matrice de corrélation permet de quantifier la force et la direction des relations linéaires entre les différentes variables.

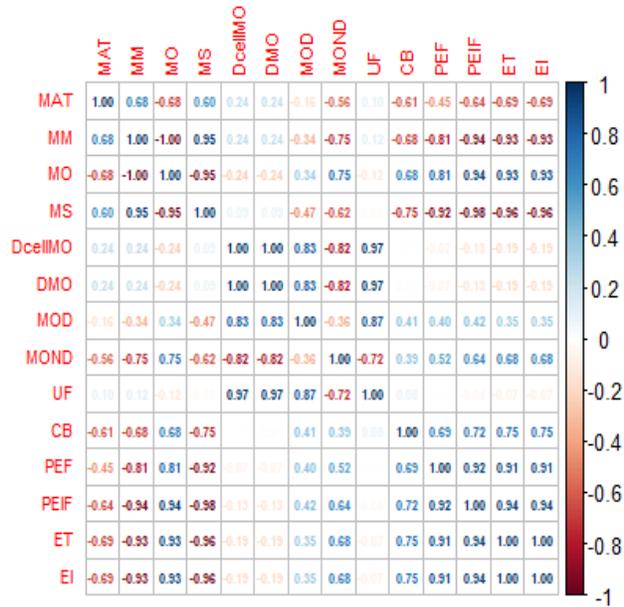


Figure 39A : Matrice de corrélation Paille

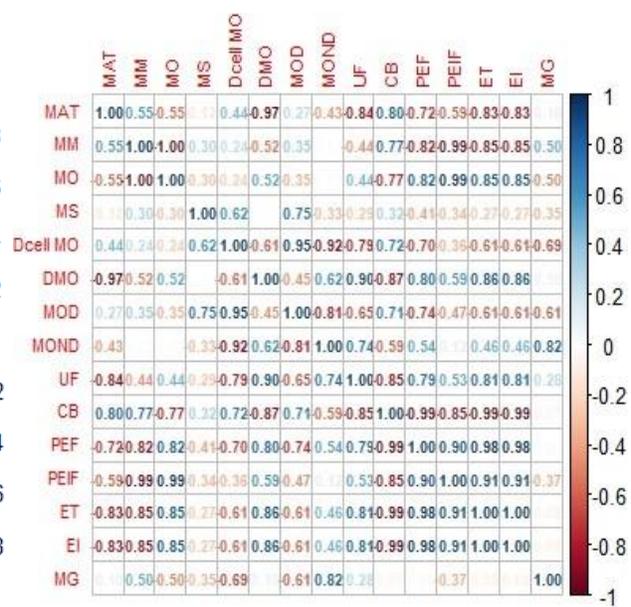


Figure 39B : Matrice de corrélation Tourteaux

MS: matière sèche, MM :matière minérale, MO :matière organique, CB ;cellulose brute, MAT :matière azotée totale, DcellMO: digestibilité de la cellulose de la matière organique ,DMO :Digestibilité de la matière organique, MOD :matière organique digestible, MOND ; matière organique digestible, VE :Valeur énergétique, PEF :productivité de l'eau totale en unité fourragère, PEIF : productivité de l'eau d'irrigation en unité fourragère ;ET :eau totale, EI :eau d'irrigation.

L'interprétation des matrices de corrélation pour la paille et les tourteaux de la cameline révèle des résultats intéressants. Concernant les tourteaux, une forte corrélation positive est observée entre les VE et les apports d'eau ($r=0.81^{**}$), mettant en évidence l'importance de ce facteur dans l'amélioration de la valeur énergétique des tourteaux. D'autre part, il est pertinent de noter qu'une corrélation négative significative est observée entre la valeur énergétique (UF) d'une part et (CB) et la (MAT), avec des coefficients de corrélation de -0.84^{**} pour les deux, suggérant que des rendements de meilleure qualité peuvent être obtenus avec l'utilisation de l'irrigation déficitaire (Figure 39B).

En revanche, pour la paille, les UF montrent des corrélations plus faibles avec les autres variables de la composition chimique. Ceci peut être expliqué et confirmé par les résultats de l'ANOVA qui montrent une absence de variation significative de la valeur énergétique, quel que soit le régime d'irrigation appliqué (Fig. 39A).

3.4.2. Analyse ACP (Analyse en Composantes Principales)

L'ACP est une technique de réduction de dimensionnalité qui transforme les variables d'origine en un nouveau jeu de variables non corrélées appelées composantes principales. Ces composantes principales expliquent la majeure partie de la variance des données, permettant de visualiser les relations complexes entre les variables dans un espace de dimension réduite.

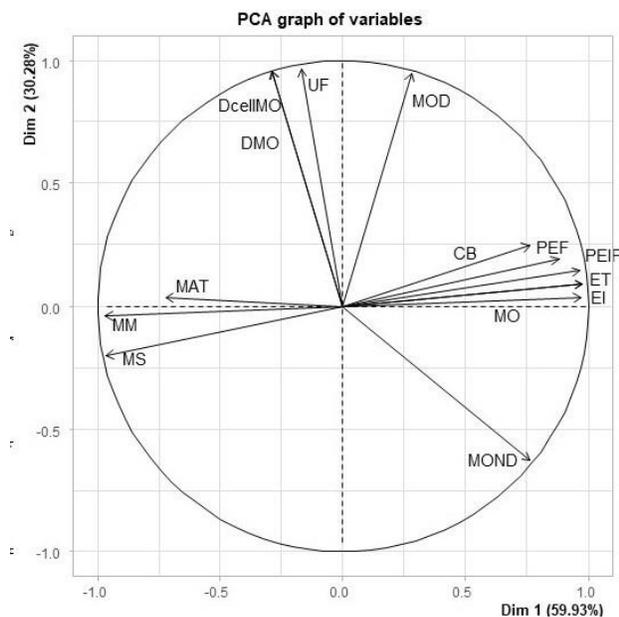


Fig.40A : présentation graphique PCA des Variables étudiées paille

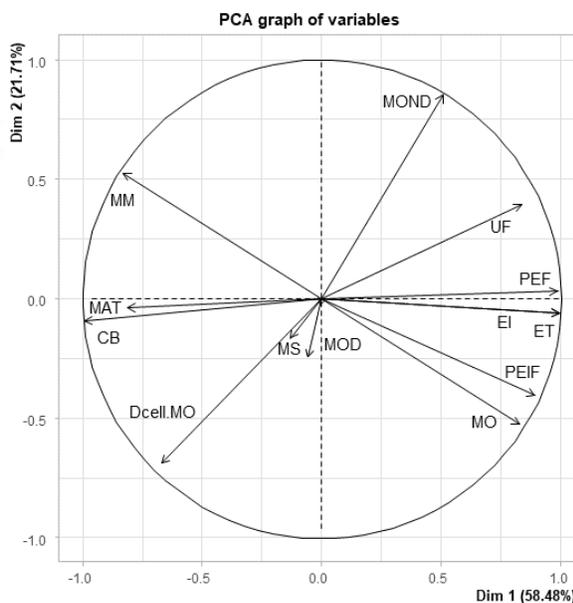


Figure 40B : présentation graphique PCA des Variables étudiées tourteaux

MS : matière sèche, MM : matière minérale, MO : matière organique, CB : cellulose brute, MAT : matière azotée totale, DcellMO : digestibilité de la cellulase de la matière organique, DMO : Digestibilité de la matière organique, MOD : matière organique digestible, MOND : matière organique digestible, VE : Valeur énergétique, PEF : productivité de l'eau totale en unité fourragère, PEIF : productivité de l'eau d'irrigation en unité fourragère ;ET : eau totale, EI : eau d'irrigation.

L'analyse en composantes principales (ACP) offre une perspective supplémentaire et complémentaire aux analyses statistiques précédentes. Pour l'ACP de la paille, les paramètres tels que la (MO), la (CB) et les apports en eau évoluent dans le même sens et sont regroupés à proximité sur la première composante principale. Cette proximité suggère une forte corrélation entre ces variables, indiquant qu'elles partagent des influences et des tendances communes (Figure 40A). D'autre part, de l'autre côté de l'axe de la première composante principale, se distinguent les paramètres qui ont une tendance inverse, tels que la (MM), la (MAT) et la (MS). Ces paramètres semblent évoluer dans une direction différente par rapport à ceux regroupés près de la première

composante principale. Quant aux paramètres de digestibilité enzymatique et de valeur énergétique de la paille, ils se distinguent près de la deuxième composante principale, ce qui suggère leur indépendance par rapport aux autres paramètres étudiés.

En revanche, l'ACP des résultats des tourteaux montre une nette dispersion des variables sur les deux axes des composantes principales (Figure 40B), avec une tendance opposée entre les paramètres MAT, MS et MM d'une part, et UF, MO, PEF et PEIF d'autre part, en raison du comportement de ces paramètres par rapport aux apports d'eau d'irrigation (EI).

3.4.3. L'arbre hiérarchique (Dendrogramme)

Le dendrogramme est une méthode de classification hiérarchique qui représente les relations entre les variables sous forme d'un arbre, permet de visualiser et identifier les groupes de variables ayant des comportements similaires, offrant ainsi une compréhension intuitive des interrelations complexes entre les paramètres étudiés.

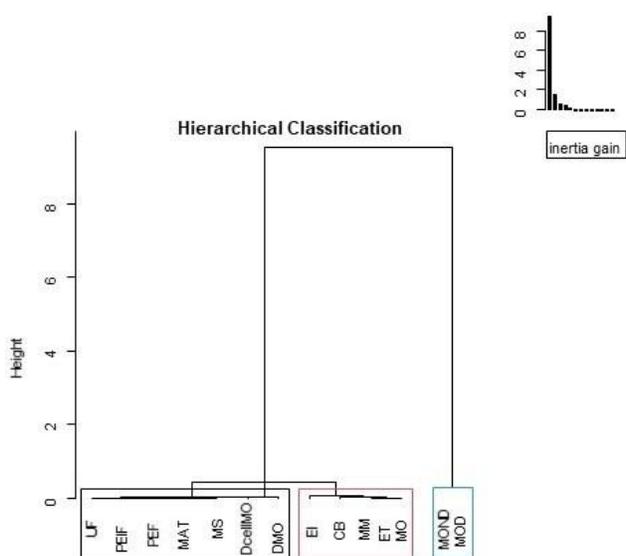


Figure 40A : L'arbre hiérarchique des variables étudiées paille

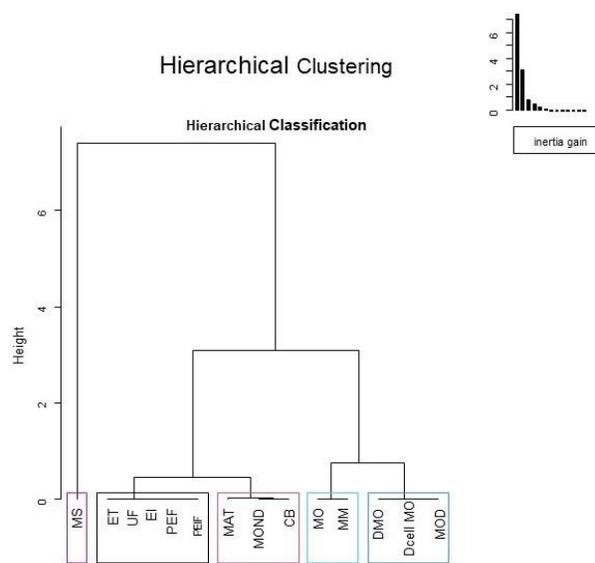


Figure 40B : L'arbre hiérarchique des variables étudiées tourteaux

MS: matière sèche, MM :matière minérale, MO :matière organique, CB :cellulose brute, MAT :matière azotée totale, DcellMO: digestibilité de la cellulase de la matière organique ,DMO :Digestibilité de la matière organique, MOD :matière organique digestible, MOND ; matière organique digestible, VE :Valeur énergétique, PEF :productivité de l'eau totale en unité fourragère, PEIF : productivité de l'eau d'irrigation en unité fourragère ;ET :eau totale, EI :eau d'irrigation.

L'analyse arborescente hiérarchique s'avère être un outil robuste pour consolider nos conclusions antérieures en regroupant les variables en clusters en fonction de leurs caractéristiques

similaires. Cette représentation graphique permet de distinguer clairement des regroupements en fonction des similitudes entre les variables, où les paramètres inclus dans chaque groupe partagent des caractéristiques communes ainsi que des tendances semblables dans leur comportement.

Les (UF) des tourteaux se retrouvent regroupées avec les paramètres hydriques, tels que l'eau totale (ET) et l'eau d'irrigation (EI), mettant en évidence l'impact significatif des régimes hydriques sur la valeur énergétique des tourteaux UF, les liant ainsi étroitement aux apports en eau (Fig.40B). En revanche, les UF des résultats relatifs à la paille se retrouvent associées aux variables de digestibilité enzymatique, telles que la (DcellMO) et la (DMO), mais pas aux variables hydriques ET et EI. Cette dissociation suggère l'absence de significativité des effets des apports en eau sur les UF de la paille. Par ailleurs, les variables hydriques ET et EI se regroupent avec la matière organique (MO), la matière minérale (MM) et la cellulose brute (CB), des paramètres qui sont eux fortement influencés par les régimes hydriques (Figure 40A).

Conclusion

Cette discussion met en évidence l'impact significatif de l'irrigation déficitaire sur la composition chimique, la digestibilité enzymatique et la valeur fourragère de la paille et des tourteaux de cameline. Les variations observées dans les différents paramètres de qualité fourragère reflètent les réponses adaptatives de la cameline aux conditions de stress hydrique induites par les régimes d'irrigation. Cela souligne la capacité de la cameline à ajuster sa physiologie pour faire face aux conditions environnementales changeantes.

Les résultats soulignent l'importance cruciale de la gestion de l'eau dans le processus de production fourragère et mettent en lumière le choix du traitement T2 plutôt que T1. Ce choix permettrait aux agriculteurs d'économiser jusqu'à 25 % d'eau tout en maintenant une qualité de paille et de tourteaux favorable à l'alimentation animale, caractérisée par une teneur protéique plus élevée que celle obtenue avec un régime d'irrigation complète .

Cette approche présente plusieurs avantages notables :

Optimisation des ressources en eau : Permet une utilisation plus efficace de cette ressource précieuse.

Durabilité environnementale : Aide à préserver les ressources en eau, ce qui est crucial dans les régions sujettes à la sécheresse ou à la rareté de l'eau.

Rentabilité économique : La réduction de la consommation d'eau se traduit par des économies de coûts pour les agriculteurs, en diminuant les dépenses liées à l'irrigation tout en maintenant des rendements agricoles satisfaisants.

L'absence de différence significative entre les traitements T1 et T2 en termes de plusieurs paramètres indique qu'il est possible de concilier efficacité de l'irrigation, durabilité environnementale et rentabilité économique en adoptant des pratiques d'irrigation déficitaire sur la culture de la Cameline. Cela est particulièrement pertinent dans le contexte de la nécessité de trouver un équilibre entre la disponibilité en eau, les rendements agricoles et la recherche de solutions alternatives fiables pour l'alimentation animale dans les régions semi-arides.

Les résultats de notre étude sont particulièrement importants pour l'introduction de nouvelles espèces résistantes à la sécheresse, surtout dans les zones vulnérables où les agriculteurs doivent prendre des décisions stratégiques concernant les cultures et les pratiques d'irrigation. Ces décisions sont cruciales pour maximiser la rentabilité agricole et de l'élevage tout en préservant la durabilité de l'agriculture. La cameline pourrait ainsi devenir une culture fourragère alternative majeure pour l'agriculture en zone semi-aride d'Afrique du Nord, offrant des perspectives favorables pour améliorer et diversifier le système d'alimentation en fourrage en Algérie.

Il est essentiel de poursuivre les recherches approfondies sur la cameline dans la région nord-africaine afin d'exploiter pleinement ses caractéristiques et de contribuer efficacement à la résilience des systèmes agricoles locaux. Cette démarche souligne également l'importance de poursuivre les études sur le comportement physiologique de la cameline afin de mieux maîtriser le choix du stade phénologique opportun pour son exploitation fourragère.

Conclusion générale

Cette étude a mis en évidence l'importance cruciale de la gestion de l'eau dans l'agriculture algérienne, en particulier dans les zones semi-arides où les ressources hydriques sont de plus en plus limitées. Ces résultats de cette étude offrent des connaissances précieuses aux agriculteurs et aux décideurs, leur permettant de mieux comprendre la gestion efficace de l'eau dans les régions semi-arides pour une production agricole durable et de haute qualité, tout en préservant les ressources en eau. En examinant la culture de la caméline (*Camelina sativa*) sous différents régimes d'irrigation, nous avons pu démontrer que l'irrigation déficitaire, notamment le traitement T2, offre un compromis viable entre l'économie d'eau et la réduction de rendement.

La réapparition de la caméline sativa dans l'agriculture contemporaine marque un tournant prometteur vers des pratiques durables. La culture de la caméline, caractérisée par un cycle végétatif court (158 jours) et de faibles besoins en eau (246,98 mm), se présente comme une alternative viable à la jachère entre deux cultures céréalières. Cette approche permet d'éviter la monoculture et de remplacer les cultures ratées en cas de pertes précoces des cultures d'hiver, ce qui entraîne des avantages socio-économiques tels que l'amélioration des revenus financiers des agriculteurs.

Les résultats obtenus montrent que la caméline est beaucoup plus prometteuse pour les systèmes agricoles des zones marginales lorsque elle est combinée avec la stratégie d'irrigation déficitaire en particulier, le traitement T2, à 75 % des besoins en eau, a permis une économie d'eau significative tout en maintenant des niveaux de rendement acceptables. Cela souligne l'efficacité potentielle de l'irrigation déficitaire pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUEI), tout en atténuant les impacts négatifs du stress hydrique sur la production agricole.

De plus, le traitement T2 a fait preuve d'une meilleure efficacité dans l'utilisation de l'eau d'irrigation. Il a également permis de réaliser une économie d'électricité substantielle de 24%, soit un gain de 8421.43 kWh durant le cycle de croissance de la caméline sous irrigation en pivot sur 40 ha. Ce gain énergétique équivaut à 70 jours de fonctionnement continu d'une chambre froide de taille moyenne, d'une capacité de 20 m³ et d'une puissance de 5 kW. En particulier, une réduction

notable de 41% de la consommation électrique en heures de pointe par rapport à l'irrigation complète T1 a été observée, ce qui contribue à atténuer la chute de tension du réseau électrique.

La production de 8421,43 kWh supplémentaires nécessite, l'extraction de 2105,36 m³ de gaz naturel, ce qui entraîne l'émission de 4,27 tonnes de CO₂. En adoptant le T2, il est possible de limiter considérablement le prélèvement de cette ressource fossile et de réduire les émissions de gaz à effet de serre associées à la production d'électricité. Cette stratégie constitue ainsi une avancée significative en matière d'efficacité énergétique et de transition écologique.

Les avantages du traitement T2 ne s'arrêtent pas là, les récoltes obtenues sous des restrictions hydriques modérées T2 affichent des taux de protéines plus élevés que celles issues d'une irrigation complète, bien que cela se traduise souvent par une diminution de la productivité globale et d'un faible taux d'extraction de l'huile.

En revanche, les restrictions hydriques sévères représentées par le traitement T3 (35 % des besoins en eau) ont entraîné des valeurs d'EUEI minimales associées à une grave altération des principales composantes de la productivité de la culture et de sa croissance. Les conséquences néfastes de cette restriction sévère se sont manifestées lors de la deuxième campagne agricole (2022-2023), où les températures extrêmes et les faibles précipitations observées ont remarquablement affecté le développement et le rendement de la cameline. Ces observations confirment l'hypothèse selon laquelle des niveaux modérés de stress hydrique peuvent favoriser une utilisation plus efficace de l'eau par les plantes en stimulant des mécanismes de résilience.

En termes de politiques agricoles, cette étude suggère l'adoption de stratégies d'irrigation durables et l'amélioration de la planification de l'irrigation, fondées sur une détermination précise des besoins en eau à l'aide de lysimètres. Ces mesures pourraient conduire à une réduction significative des prélèvements d'eau tout en maintenant la productivité agricole.

La partie de la valorisation des coproduits a mis en lumière l'impact significatif de l'irrigation déficitaire sur la composition chimique, la digestibilité enzymatique et la valeur fourragère de la paille et des tourteaux de la cameline, ainsi que sur la productivité de l'eau en unité fourragère issue de chaque traitement. Les résultats démontrent l'importance cruciale de la gestion de l'eau dans le processus de production de fourrage. Notamment, le traitement T2, par rapport au T1, permet aux agriculteurs d'économiser jusqu'à 25 % d'eau tout en maintenant une qualité favorable

de la paille et des tourteaux pour l'alimentation animale. La paille et les tourteaux issus du T2 présentent une teneur en protéines plus élevée que ceux du T1, et le traitement T2 se distingue également par une nette supériorité de la productivité de l'eau en unité fourragère, soulignant son efficacité. Cette approche renforce le nexus Eau-Sécurité alimentaire dans un contexte d'optimisation des ressources en eau, de durabilité environnementale et de rentabilité économique pour les agriculteurs.

Les résultats de cette étude revêtent une importance considérable pour l'introduction de nouvelles espèces résistantes à la sécheresse, notamment dans les zones vulnérables où les agriculteurs doivent prendre des décisions stratégiques concernant les cultures et les pratiques d'irrigation afin de maximiser la rentabilité de l'agriculture et de l'élevage tout en préservant la durabilité agricole. La *Camelina* pourrait en effet devenir une culture fourragère alternative importante pour l'agriculture dans les zones semi-arides d'Afrique du Nord, offrant des perspectives prometteuses pour l'amélioration et la diversification du système d'alimentation en Algérie.

Perspectives :

La culture de *Camelina sativa* se présente non seulement comme une solution viable pour diversifier l'agriculture en Algérie, mais aussi comme un modèle pour des pratiques agricoles plus durables et résilientes face au changement climatique. L'intégration de cette culture dans les systèmes agricoles pourrait contribuer à une meilleure valorisation des ressources hydriques limitées, tout en offrant des avantages économiques et environnementaux substantiels.

Les recherches futures devraient se concentrer sur l'amélioration génétique de la cameline pour augmenter ses rendements en augmentant la taille des graines et en éliminant les contraintes liées à la mécanisation et aux préoccupations des transformateurs. Parallèlement, il est crucial d'optimiser les techniques d'irrigation pour maximiser l'efficacité d'utilisation de l'eau. Il est également nécessaire de moderniser et d'étendre la couverture du réseau des stations météorologiques en Algérie afin de déterminer avec précision les doses d'irrigation et d'éviter toute forme de sur-irrigation.

De plus, il est crucial de sensibiliser et de former les agriculteurs aux techniques de calcul des besoins en eau et aux conséquences désastreuses du gaspillage d'eau et de la régression progressive des nappes souterraines.

Cependant, il est impératif de poursuivre des recherches approfondies sur la cameline dans la région nord-africaine afin d'exploiter pleinement ses caractéristiques intrinsèques et de faciliter sa contribution significative au renforcement de la résilience des systèmes agricoles locaux. Cet effort concerté est essentiel pour améliorer sa compétitivité par rapport aux autres cultures oléagineuses prévalentes, facilitant ainsi sa transition d'une culture de niche à une commodité agricole courante. Cette approche souligne l'importance de poursuivre les études sur le comportement physiologique de la cameline afin de mieux comprendre le choix du stade phénologique opportun pour son exploitation fourragère.

Références bibliographiques :

- Aboukhaled, A., Alfaro, J. F., & Smith, M. (1982). *Lysimeters. United Nations Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage Paper 39, Rome, 68 p.*
https://books.google.dz/books?hl=fr&lr=&id=OGTieeN5tT0C&oi=fnd&pg=PA9&dq=bulletin+FAO+39+Lysimeters&ots=r8hhNQfVZV&sig=R7gXsY0tL3ybeLqC5xbNVY0-8iA&redir_esc=y#v=onepage&q=bulletin FAO 39 Lysimeters&f=false
- Agarwal, A., Prakash, O., & Bala, M. (2021). Effect of irrigation schedule on growth and seed yield of camelina (*Camelina sativa* L.) in Tarai region of central Himalaya. *Oil Crop Science*, 6(1), 8–11. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2021.01.004>
- Ahmed, Z., Liu, J., Ahmad, E., Id, W., Yan, Y., & Qi, Z. (2020). *Differential physio-biochemical and yield responses of Camelina sativa L. under varying irrigation water regimes in semi-arid climatic conditions. PLoS ONE. Vol.15(12), 1–18.*
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242441>
- Ahmed, Z., Waraich, E. A., Qi, Z., Shareef, Muhammad Waraich, E., Gui, D., Shabbir, N., & Iqbal, H. (2019). Physio-biochemical and yield responses of two contrasting *Camelina sativa* L. breeding lines under drought stress Physio-Biochemical and Yield Responses of Two Contrasting *Camelina sativa* Breeding Lines under Drought Stress. *Intl. J. Agric. Biol.*, 22(5). *International Journal of Agriculture & Biology*, 22(5), 1186–1196.
<https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1186>
- Aiken, R., Baltensperger, D., Krall, J., Pavlista, A., & Johnson, J. (2015). Planting methods affect emergence, flowering and yield of spring oilseed crops in the U. S. central High Plains. *Industrial Crops & Products*, 69, 273–277.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.02.025>
- Akkaya, A. (1994). *Wheat Cultivation. Sütc, üimam University Textbooks Publication No.1, Kahramanmaras, (in Turkish).*
- Amiri-Darban, N., Nourmohammadi, G., Hosein, A., Rad, S., Mohammad, S., Mirhadi, J., & Majidi, I. (2020). Industrial Crops & Products Potassium sulfate and ammonium sulfate affect quality and quantity of camelina oil grown with different irrigation regimes. *Industrial Crops & Products*, 148, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112308>
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., Kimball, B. A., Ottman, M. J., Wall, G. W., White, J. W., Reynolds, M. P., Alderman, P. D., Prasad, P. V. V., Aggarwal, P. K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A. J., De Sanctis, G., ... Zhu, Y. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 5(2), 143–147. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>
- Belayneh, H. D., Wehling, R. L., Cahoon, E., & Ciftci, O. N. (2015). supercritical carbon

- dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, *104*, 153–159.
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.06.002>
- Berenguer, M., Vossen, P., Grattan, S., Connell, J., & Polito, V. (2006). Tree Irrigation Levels for Optimum Chemical and Sensory Properties of Olive Oil. *HortScience*, *41*, 427–432.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.2.427>
- Berti, M., Gesch, R., Johnson, B., Ji, Y., Seames, W., & Aponte, A. (2015). Double- and relay-cropping of energy crops in the northern Great Plains, USA. *Industrial Crops and Products*, *75*, 26–34. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.012>
- Bilalis, D., Roussis, I., Fuentes, F., Kakabouki, I., & Travlos, I. (2017). Organic Agriculture and Innovative Crops under Mediterranean Conditions. *Notulae Botanicae HortiCluj-Napoca*, *45*(2), 323–331. <https://doi.org/10.15835/nbha45210867>
- Blum, A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research*, *112*, 119–123. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.009>
- Capra, A., Consoli, S., & Scicolone, B. (2008). No Title. In A. Alonso & H. Iglesias (Eds.), *Agricultural Irrigation Research Progress*. Nova Scienc Nova Science Publishers, Inc.e.
- Carton, N., Carlsson, G., Jensen, E., & Corre-Hellou, G. (2020). *Intercropping of lupin for weed control and complementary grain production in organic farming*.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.3741486>
- Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H., Waskom, R., Niu, Y., & Siddique, K. (2016). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *36*. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0338-6>
- Chalmers, D., Mitchell, P., & Heek, L. (1981). Control of Peach Tree Growth and Productivity by Regulated Water Supply, Tree Density, and Summer Pruning1. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *106*, 307–312. <https://doi.org/10.21273/JASHS.106.3.307>
- Cheng, L., Wang, Y., He, Q., Li, H., Zhang, X., & Zhang, F. (2016). Comparative proteomics illustrates the complexity of drought resistance mechanisms in two wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under dehydration and rehydration. *BMC Plant Biology*, *16*, 1–23. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0871-8>
- Cheng, X., Zhang, Q., Shi, C., & Yan, X. (2017). Model for the prediction of grain density and pressure distribution in hopper-bottom silos. *Biosystems Engineering*, *163*, 159–166. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.006>
- Chennafi, H., Aidaoui, A., Bouzezour, H., & Sasi, A. (2006). Yield response of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Cultivar Waha to deficit Irrigation Under semi-Arid Growth Conditions. *Asian Journal of Plant Sciences*, *5*(5), 854–860.
<https://doi.org/10.3923/ajps.2006.854.860b>
- Colburn, M. W., Evans, J. L., & Ramage, C. H. (1968). Apparent and True Digestibility of Forage Nutrients by Ruminant Animals. *Journal of Dairy Science*, *51*(9), 1450–1457. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(68\)87211-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(68)87211-X)

- Czarnik, M., Jarecki, W., & Bobrecka-jamro, D. (2018). Reaction of winter varieties of false flax (*Camelina sativa* (L.) Crantz) to the varied sowing time. *Journal of Central European Agriculture*, 19(3), 571–586.
- Daran, R., Suat, I., Richard, F., Tim, S., Koffi, D., Glen, S., Aaron, B., Nicholas, W., Dennis, F., Marty, S., Brian, W., & Simon, V. D. (2016). Economic Return versus Crop Water Productivity of Maize for Various Nitrogen Rates under Full Irrigation, Limited Irrigation, and Rainfed Settings in South Central Nebraska. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(6), 4016017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001023](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001023)
- Delmas, T., Han, S., Kim, J., Bibette, J., Vauquelin, R., Sas, C., & C, H. B. (2013). *Skin cell targeting with self-assembled ligand addressed nanoemulsion droplets*. 310–318. <https://doi.org/10.1111/ics.12044>
- Dobrzyńska, M. A., & Przysławski, J. (2020). The effect of camelina oil (α -linolenic acid) and canola oil (oleic acid) on lipid profile , blood pressure , and anthropometric parameters in postmenopausal women. *Archives of Medical Science*, 17(06), 1566–1574. <https://doi.org/10.5114/aoms.2020.94033>
- Donald, C., & Hamblin, J. (1976). The biological yield and the harvest index of cereals as agronomic and plant selection criteria. *Advances in Agronomy.*, 28, 361–405. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60559-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60559-3)
- Evrard, J. (2005). Les tourteaux d' oléagineux , source de protéines en alimentation animale. *Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*, 12(03), 224–227. <http://www.lrrd.org/lrrd22/8/chab22153.htm>
- Fabeiro, C., Olalla, F., López-Urrea, R., & Domínguez, A. (2003). Production and quality of the sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivated under controlled deficit irrigation conditions in a semi-arid climate. *Agricultural Water Management*, 62, 215–227. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00097-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00097-0)
- FAO. (2011). *Produire plus avec moins* (FAO (ed.)). <https://www.fao.org/3/i2215f/i2215f.pdf>
- FAO. (2015). *Algérie*. 2019.
- FAO. (2022). *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022*. Rome. (FAO (ed.)). <https://doi.org/10.4060/cc2211en>
- Fernandes-Silva, A., Oliveira, M., Paço, T., & Ferreira, M. (2018). Deficit Irrigation in Mediterranean Fruit Trees and Grapevines: Water Stress Indicators and Crop Responses. In *Irrigation in Agroecosystems* (pp. 52–85). <https://doi.org/DOI: 10.5772/intechopen.80365>
- French, U. N., Hunsaker, D., Thorp, K., & Clarke, T. (2009). Evapotranspiration over a camelina crop at Maricopa, Arizona. *Industrial Crops and Products*, 29(2–3), 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.06.001>
- Gaba, S., Lescourret, F., Boudsocq, S., & Enjalbert, J. (2015). Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services : from concepts to design. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 607–623. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0272-z>
- Gan, Y., Siddique, K., Turner, N., X-G, L., Niu, J.-Y., Yang, C., Liu, L., & Chai, Q. (2013).

- Ridge-furrow mulching systems—an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments. *Adv Agron*, 118, 429–476.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11104-010-0312-7>
- Geerts, S., & Raes, D. (2009). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96(9), 1275–1284.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009>
- Girona, J., Gelly, M., Mata, M., Arbonès, A., Pascual, M., & Marsal, J. (2005). Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soils. *Agricultural Water Management*, 72, 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.011>
- Gollner, G., Gabler, C., Grausgruber-Gröger, S., Friedel, J., Grausgruber, H., & Freyer, B. (2010). Grain legumes in mixed stands with false flax (*camelina sativa*) in organic farming under Pannonian site conditions. *Journal Für Kulturpflanzen*, 62, 402–408.
- Grassini, P., Yang, H., Irmak, S., Thorburn, J., Burr, C., & Cassman, K. G. (2011). High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: II. Irrigation management and crop water productivity. *Field Crops Research*, 120(1), 133–141.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.09.013>
- Gregory, P. J., Ingram, J. S., & Brklacich, M. (2005). Climate change and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 360(1463), 2139–2148. <https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1745>
- Groeneveld, J. H., & Klein, A.-M. (2014). Pollination of two oil-producing plant species: Camelina (*Camelina sativa* L. Crantz) and pennycress (*Thlaspi arvense* L.) double-cropping in Germany. *GCB Bioenergy*, 6(3), 242–251.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcbb.12122>
- Guedes, W., Nobre, R., Soares, L., Lima, G., Gheyi, H., Fernandes, P., Ferreira, A., Rodrigues da Silva, A., Azevedo, C., Silva, D., & Medeiros, J. (2023). Irrigation Strategies with Controlled Water Deficit in Two Production Cycles of Cotton. *Plants*, 12, 2892.
<https://doi.org/10.3390/plants12162892>
- Guendouz, A., Hannachi, A., & Benidir, M. (2022). Agro-biochemical Characterisation of Camelina sativa : A Review. *Agricultural Reviews*, 43(3), 278–287. <https://doi.org/10.18805/ag.RF-230>
- Gülen, S. C. (2011). A simple parametric model for the analysis of cooled gas turbines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 133(1), 11801.
<https://doi.org/10.1115/1.4001829>
- Hamdy, A., Sardo, V., & Ghanem, K. (2005). Saline water in supplemental irrigation of wheat and barley under rain fed agriculture. *Agricultural Water Management*, 78, 122–127.
- Hélène, D. C. (2020). *Functional roles of lipids in make-up products*.
- Hergert, G. W., Margheim, J. F., Pavlista, A. D., Martin, D. L., Isbell, T. A., & Supalla, R. J. (2016). Irrigation response and water productivity of deficit to fully irrigated spring camelina. *Agricultural Water Management*, 177, 46–53.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.06.009>

- Hixson, S. M., Parrish, C. C., & Anderson, D. M. (2014). Full substitution of fish oil with camelina (*Camelina sativa*) oil, with partial substitution of fish meal with camelina meal, in diets for farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) and its effect on tissue lipids and sensory quality. *Food Chemistry*, *157*, 51–61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.026>
- Howell, T., Lamm, F., & Tolk, J. (2010). Deficit Irrigation Management: Concepts and Implementation. *5th National Decennial Irrigation Conference Proceedings, 5-8 December 2010, Phoenix Convention Center, Phoenix, Arizona USA*. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.35864>
- Hrastar, R., MARINKA G, P., NIVES, O., & IZTOK JO`ZE, K. (2009). Fatty Acid and Stable Carbon Isotope Characterization of Camelina sativa Oil : Implications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *57*(2), 579–585.
- Hunsaker, D., French, A., & Elshikha, D. E. M. (2011). Water use , crop coefficients , and irrigation management criteria for camelina production in arid regions. *Irrigation Science*, *29*(1), 27–43. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0213-9>
- Hunsaker, D. J., French, A. N., Clarke, T. R., & El-Shikha, D. M. (2011). Water use, crop coefficients, and irrigation management criteria for camelina production in arid regions. *Irrigation Science*, *29*(1), 27–43. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0213-9>
- Hunsaker, D. J., French, A. N., & Thorp, K. R. (2013). Camelina water use and seed yield response to irrigation scheduling in an arid environment. *Irrigation Science*, *31*, 911–929. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0368-7>
- Intrigliolo, D. S. (2020). DEFICIT IRRIGATION STRATEGIES AND KEY RESULTS IN REAL CASE STUDIES. *FAO*. <https://www.fao.org/3/cb5065fr/cb5065fr.pdf>
- Jankowski, K. J. (2019). Camelina : Yield and quality response to nitrogen and sulfur fertilization in Poland. *Industrial Crops & Products*, *141*(February), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111776>
- Johnson, N., C, R., & J, E. (2001). Managing water for people and nature. *Science*, *292*, 1071–1072.
- Juodka, R., Nainienė, R., Juškienė, V., Juška, R., Leikus, R., Kadžienė, G., & Stankevičienė, D. (2022). Camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) as Feedstuffs in Meat Type Poultry Diet: A Source of Protein and n-3 Fatty Acids. *Animals*, *12*(3). <https://doi.org/10.3390/ani12030295>
- Katarzyna, R., Edyta, S., Małgorzata, W., & Magdalena, R. ´nska. (2018). Bioactive Compounds , Nutritional Quality and Oxidative Stability of Cold-Pressed Camelina (*Camelina sativa* L .) Oils. *Applied Sciences*, *8*(12), 1–17. <https://doi.org/10.3390/app8122606>
- Kemp, W. H. (2006). *Biodiesel basics and beyond : a comprehensive guide to production and use for the home and farm*. Aztext press. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000796780723584.bib?lang=en>
- Kessai, A. K., Debabeche, M., & Pitacco, A. (2018). *application of deficit irrigation strategy for*

barley and wheat in the region of Biskra.

- Khemmouli, A., Houria, C., Abderrahmane, H., Samir, M., Yamina, H., Rekik, F., Asma, M., Cheli, R., & Ghougali, F. (2024). Effects of deficit irrigation on the composition of by-products of camelina sativa : towards sustainable water use in semi-arid agriculture. *Natural Resources and Sustainable Development Volume, 14*(1), 165–182. <https://doi.org/10.31924/nrsd.v14i1.158>
- Kirkhus, B., Lundon, A. R., Haugen, J., Vogt, G., Borge, G. I. A., & Henriksen, B. I. F. (2013). Effects of Environmental Factors on Edible Oil Quality of Organically Grown Camelina sativa. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 61*, 3179–3185.
- Kisekka, I., P. Aguilar, J., H. Rogers, D., Holman, J., M. O'Brien, D., & Klocke, N. (2016). Assessing Deficit Irrigation Strategies for Corn Using Simulation. *Transactions of the ASABE, 59*(1), 303–317. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/trans.59.11206>
- Krohn, B. J., & Fripp, M. (2012). A life cycle assessment of biodiesel derived from the “ niche filling ” energy crop camelina in the USA. *Applied Energy, 92*, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.025>
- Krzyżaniak, M., Stolarski, M. J., Tworkowski, J., Puttick, D., & Eynck, C. (2019). Industrial Crops & Products Yield and seed composition of 10 spring camelina genotypes cultivated in the temperate climate of Central Europe. *Industrial Crops & Products, 138*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.06.006>
- Kumar, A., Sharma, K., & Yadav, A. (2010). Enhancing yield and water productivity of wheat (Triticum aestivum) through furrow igated raised bed system in the indo Gangetic Plains of India. *Indian J Agric Sci, 80*(3), 198–202.
- Leclère, D., Havlík, P., Fuss, S., Schmid, E., Mosnier, A., Walsh, B., Valin, H., Herrero, M., Khabarov, N., & Obersteiner, M. (2014). Climate change induced transformations of agricultural systems: Insights from a global model. *Environmental Research Letters, 9*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124018>
- Leclère, M., Jeu, M., Butier, A., Chatain, C., & Loyce, C. (2019). Controlling weeds in camelina with innovative herbicide-free crop management routes across various environments. *Industrial Crops & Products Journal, 140*(July), 111605. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111605>
- Lopez-Gunn, E., Zorrilla, P., Prieto, F., & Llamas, M. R. (2012). Water efficiency in Spanish agriculture. *Agricultural Water Management, 108*, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.005>
- Lopez, J. R., Winter, J. M., Elliott, J., Ruane, A. C., & Porter, C. (2017). Agricultural and Forest Meteorology Integrating growth stage de fi cit irrigation into a process based crop model. *Agricultural and Forest Meteorology, 243*(December 2016), 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.05.001>
- Macedo, F. G. De, Bresolin, J. D., Santos, E. F., Furlan, F., Lopes, W. T., Polacco, J. C., Lavres, J., & Sperotto, R. A. (2016). Nickel Availability in Soil as Influenced by Liming and Its Role in Soybean Nitrogen Metabolism. *Frontiers in Plant Science, 7*(September), 1–12.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01358>

- Martinelli, T., & Galasso, I. (2011). Phenological growth stages of *Camelina sativa* according to the extended BBCH scale. *Annals of Applied Biology*, 158(1), 87–94. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2010.00444.x>
- Masella, P., Martinelli, T., & Galasso, I. (2014). Agronomic evaluation and phenotypic plasticity of *Camelina sativa* growing in Lombardia, Italy. *Crop and Pasture Science*, 65(5), 453–460. <https://doi.org/10.1071/CP14025>
- McDermid, S., Nocco, M., Lawston-Parker, P., Keune, J., Pokhrel, Y., Jain, M., Jägermeyr, J., Brocca, L., Massari, C., Jones, A. D., Vahmani, P., Thiery, W., Yao, Y., Bell, A., Chen, L., Dorigo, W., Hanasaki, N., Jasechko, S., Lo, M.-H., ... Yokohata, T. (2023). Irrigation in the Earth system. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(7), 435–453. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00438-5>
- McMaster, G. S., & Wilhelm, W. W. (1997). Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87, 291–300. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0)
- Mesbah, E. A. E. (2009). Effect of irrigation regimes and foliar spraying of potassium on yield, yield component and water use efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.) in sandy soils. *World Journal of Agricultural Sciences*, 5(6), 662–669. [https://www.idosi.org/wjas/wjas5\(6\)/1.pdf](https://www.idosi.org/wjas/wjas5(6)/1.pdf)
- Meyer, N., Jacques-Eric, B., Julie, C., & Eric, J. (2019). Cover crops reduce water drainage in temperate climates : A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 1–11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13593-018-0546-y>
- Mortlock, M. Y., & Vanderlip, R. L. (1989). Germination and establishment of pearl millet and sorghum of different seed qualities under controlled high-temperature environments. *Field Crops Research*, 22(3), 195–209. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-4290\(89\)90092-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-4290(89)90092-0)
- Mukherjee, S., Dash, P., Das, D., & Das, S. (2023). Growth, Yield and Water Productivity of Tomato as Influenced by Deficit Irrigation Water Management. *Environmental Processes*, 10. <https://doi.org/10.1007/s40710-023-00624-z>
- Musick, J., Jones, O., Stewart, B., & Dusek, D. (1994). Water-Yield Relationships for Irrigated and Dryland Wheat in the U.S. Southern Plains. *Agronomy Journal*, 86, 980–986. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600060010x>
- Nadhira, A., & Ouahiba, B. (2018). L'Algérie vers un Développement Agricole Durable. *Bulletin de La Société de Géographie d'Egypte*, 91(1), 49–66. <https://doi.org/10.21608/bsge.2018.90306>
- Neupane, D., Solomon, J. K. Q., McLennon, E., Davison, J., & Lawry, T. (2020). *Camelina* production parameters response to different irrigation regimes. *Industrial Crops and Products*, 148, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112286>
- Nithyapriya, S., Lalitha, S., Sayyed, R. Z., Reddy, M. S., Dailin, D. J., El Enshasy, H. A., Luh

- Suriani, N., & Herlambang, S. (2021). Production, Purification, and Characterization of Bacillibactin Siderophore of *Bacillus subtilis* and Its Application for Improvement in Plant Growth and Oil Content in Sesame. *Sustainability*, *13*(10).
<https://doi.org/10.3390/su13105394>
- Noreldin, T., Ouda, S., Mounzer, O., & Abdelhamid, M. (2015). CropSyst model for wheat under deficit irrigation using sprinkler and drip irrigation in sandy soil. *Journal of Water and Land Development*, *26*. <https://doi.org/10.1515/jwld-2015-0016>
- Obour, A. K., Obeng, E., Mohammed, Y. A., Ciampitti, I. A., Durrett, T. P., Aznar-Moreno, J. A., & Chen, C. (2017). Camelina Seed Yield and Fatty Acids as Influenced by Genotype and Environment. *Agronomy Journal*, *109*(3), 947–956.
<https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronj2016.05.0256>
- Ouda, S., Noreldin, T., Alarcón, J. J., Ragab, R., Caruso, G., Sekara, A., & Abdelhamid, M. T. (2021). Response of spring wheat (*Triticum aestivum*) to deficit irrigation management under the semi-arid environment of egypt: Field and modeling study. *Agriculture (Switzerland)*, *11*(2), 1–13. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020090>
- Paula, E. M., da Silva, L. G., Brandao, V. L. N., Dai, X., & Faciola, A. P. (2019). Feeding Canola, Camelina, and Carinata Meals to Ruminants. *Animals*, *9*(10), 1–19.
<https://doi.org/10.3390/ani9100704>
- Paulsen, H. (2011). Improving green-house gas balances of organic farms by the use of straight vegetable oil from mixed cropping as farm own fuel and its competition to food production. *Landbauforschung Volkenrode*, *61*, 209–216.
- Pavlista, A. D., Hergert, G. W., Margheim, J. M., & Isbell, T. A. (2016). Growth of spring camelina (*Camelina sativa*) under deficit irrigation in Western Nebraska. *Industrial Crops & Products*, *83*, 118–123. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.017>
- Pavlista, A. D., Isbell, T. A., Baltensperger, D. D., & Hergert, G. W. (2011). Planting date and development of spring-seeded irrigated canola, brown mustard and camelina. *Industrial Crops and Products*, *33*(2), 451–456. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2010.10.029>
- Payero, J. O., Tarkalson, D. D., Irmak, S., Davison, D., & Peterson, J. L. (2008). Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate . *Agricultural Water Management*, *95*(08), 895–908. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.02.015>
- Petit, S., Cordeau, S., Chauvel, B., Bohan, D., Guillemin, J.-P., & Steinberg, C. (2018). Biodiversity-based options for arable weed management. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *38*(5), 48. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0525-3>
- Ramadan, A., El Habbasha, E. S., Taha, M., & Refaie, K. (2014). Effect of Irrigation Water Requirements and Fertigation Levels on Growth, Yield and Water Use Efficiency in Wheat. *Middle East Journal of Scientific Research*, *16*, 441–450.
<https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2013.16.04.11733>
- Rastoin, J., & Benabderrazik, E. H. (2014). *et oléoprotéagineux au Maghreb Céréales*. 1–32.

- Raza, M. A. S., Shahid, A. M., Ijaz, M., Khan, I. H., Saleem, & Ahmad, S. (2015). Studies on canola (*Brassica napus* L.) and camelina (*Camelina sativa* L.) under different irrigation levels. *Journal of Agricultural and Biological Science*, *10*(4), 130–138. <https://doi.org/>
- Rekaby, S. A., Eissa, M. A., Hegab, S. A., & Ragheb, H. M. (2016). Effect of nitrogen fertilization rates on wheat grown under drip irrigation. *Assiut Journal of Agricultural Sciences*, *47*(3), 104–119. [https://doi.org/doi.org / 10.21608 / ajas.2016908](https://doi.org/10.21608/ajas.2016908).
- Richard, S., Morency, M. J., Drevet, C., Jouanin, L., & Séguin, A. (2000). Isolation and characterization of a dehydrin gene from white spruce induced upon wounding, drought and cold stresses. *Plant Molecular Biology*, *43*, 1–10. <https://doi.org/10.1023/A:1006453811911>
- Righini, D., Zanetti, F., Martínez-Force, E., Mandrioli, M., Gallina, T., & Monti, A. (2019). Shifting sowing of camelina from spring to autumn enhances the oil quality for bio-based applications in response to temperature and seed carbon stock. *Industrial Crops & Products*, *137*, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.009>
- Roxana, B. (2024). *NASA Analysis Confirms 2023 as Warmest Year on Record*. 12 Jan 2024. <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-analysis-confirms-2023-as-warmest-year-on-record/>
- Royo-Esnal, A., & Valencia-Gredilla, F. (2018). Camelina as a Rotation Crop for Weed Control in Organic Farming in a Semiarid Mediterranean Climate. *Agriculture*, *156*, 1–12. <https://doi.org/10.3390/agriculture8100156>
- SAUCKE, H., & ACKERMANN, K. (2006). Weed suppression in mixed cropped grain peas and false flax (*Camelina sativa*). *Weed Research*, *46*(6), 453–461. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2006.00530.x>
- Shang, H. Y. (2015). Emergy calculation and analysis of food crops in Zhangye city. *Advance Journal of Food Science and Technology*, *7*(12), 921–925. <https://doi.org/10.19026/ajfst.7.2534>
- Sindelar, A. J., Schmer, M. R., & Gesch, R. W. (2017). Winter oilseed production for biofuel in the US Corn Belt : opportunities and limitations. *GCB Bioenergy*, *9*, 508–524. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12297>
- Singh, Y., Cullere, M., Tůmová, E., & Zotte, A. D. (2023). Camelina sativa as a sustainable and feasible feedstuff for broiler poultry species: A review. *Czech Journal of Animal Science*, *68*(7), 277–295. <https://doi.org/10.17221/29/2023-CJAS>
- Sintim, H. Y., Zheljzkov, V. D., Obour, A. K., Garcia, A., & Foulke, T. K. (2015). Influence of nitrogen and sulfur application on camelina performance under dryland conditions. *Industrial Crops & Products*, *70*, 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.062>
- Sofo, A., Palese, A., Casacchia, T., Dichio, B., Xiloyannis, C, N. Y., & 34-1-6. (2012). Sustainable fruit production in Mediterranean orchards subjected to drought stress. In *Mediterranean orchards subjected to drought stress. In: Ahmad P, Prasad MNV (eds) Abiotic stress responses in plants metabolism, productivity and sustainability* (pp. 105–129.). Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0634-1-6>

- Stanhill, G. (1986). Water use efficiency. *Adv Agron. Adv Agron*, 39, 53–85.
- Sterligov, V. V. (2020). Prediction of carbon dioxide emissions from fuel combustion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 866(1), 12028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/866/1/012028>
- Struik, P. C., & Kuyper, T. . (2017). Sustainable intensification in agriculture : the richer shade of green . A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0445-7>
- Sydor, M., Kurasiak-Popowska, D., & Stuper-Szablewska, K. (2022). Industrial Crops & Products Camelina sativa . Status quo and future perspectives. *Industrial Crops & Products Journal*, 187, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115531>
- Taha, A., Ouda, S., & Zohry, A. E.-H. (2015). *High Water Consuming Crops Under Control: Case of Sugarcane Crop* (pp. 85–97). https://doi.org/10.1007/978-3-319-21771-0_6
- Tari, A. F. (2016). The effects of different deficit irrigation strategies on yield, quality, and water-use efficiencies of wheat under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 167, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.023>
- UNEP/WHO - UN. (n.d.). *Climate change in the Mediterranean*. <https://www.unep.org/unepmap/resources/factsheets/climate-change>
- Uremis, I., Arslan, M., Sangun, M. K., & Uygur, V. (2009). Allelopathic potential of rapeseed cultivars on germination and seedling growth of weeds Allelopathic Potential of Rapeseed Cultivars on Germination and Seedling Growth of Weeds. *Asian Journal of Chemistry* , 21(3), 2170–2184.
- Van Reeuwijk, L. P. (1995). *Procédures d'analyse des sols, Document technique 9, 5e édition, Centre international de référence et d'information sur les sols, FAO*. https://www.isric.org/sites/default/files/ISRIC_TechPap09.pdf
- Vollmann, J., & Eynck, C. (2015). Camelina as a sustainable oilseed crop : Contributions of plant breeding and genetic engineering. *Biotechnology Journal*, 10, 525–535. <https://doi.org/10.1002/biot.201400200>
- Wysocki, D. J., Chastain, T. G., Schillinger, W. F., Guy, S. O., & Karow, R. S. (2013). Camelina: Seed yield response to applied nitrogen and sulfur. *Field Crops Research*, 145, 60–66. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.02.009>
- Zajac, M., Bozena, K., Wioletta, S., & Renata, K. (2020). Inclusion of Camelina, Flax, and Sunflower Seeds in the Diets for Broiler Chickens: Apparent Digestibility of Nutrients, Growth Performance, Health Status, and Carcass and Meat Quality Traits. *Animals*, 10(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ani10020321>
- Załoski, D., Tworkowski, J., Krzyzaniak, M., Stolarski, M. J., & Kwiatkowski, J. (2020). The Characterization of 10 Spring Camelina Genotypes Grown in Environmental Conditions in. *Agronomy*, 10(1), 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agronomy10010064>
- Zanetti, F., Alberghini, B., Jérôme, A. M., Grahovac, N., Rajkovi, D., Kiprovski, B., & Monti, A. (2021). *La caméline , une ancienne culture oléagineuse contribuant activement à la*

renaissance rurale en Europe . Une critique 2 Description morphologique et principaux L ' intérêt pour la caméline est attesté par de cette espèce (c . à au moins 100 articles par. 1–18.

- Zanetti, F., Alberghini, B., Marjanović Jeromela, A., Graovac, N., Rajković, D., Kiprovska, B., & Monti, A. (2021). Camelina, an ancient oilseed crop actively contributing to the rural renaissance in Europe. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *41*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00663-y>
- Zanetti, F., Eynck, C., Christou, M., Krzyżaniak, M., Righini, D., Alexopoulou, E., Stolarski, M. J., Van Loo, E. N., Puttick, D., & Monti, A. (2017). Agronomic performance and seed quality attributes of Camelina (*Camelina sativa* L. crantz) in multi-environment trials across Europe and Canada. *Industrial Crops and Products*, *107*, 602–608. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.022>
- Zhang, B., Li, F., Huang, G., Cheng, Z., & Zhang, Y. (2006). Yield of spring wheat improved by regulated deficit irrigation in an arid zone. *Agricultural Water Management*, *79*, 28–42. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.02.007>
- Zhang, C., & Auer, C. (2020). Industrial Crops & Products Hybridization between Camelina sativa (L .) Crantz and common Brassica weeds. *Industrial Crops & Products*, *147*(September 2019), 112240. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112240>
- Zubr, J. (1997). *Oil-seed crop : Camelina sativa*. 6690(96).
- Zubr, J. (2010). Carbohydrates , vitamins and minerals of Camelina sativa seed. *Nutrition & Food Science*, *40*(5), 523–531. <https://doi.org/10.1108/00346651011077036>