



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريش

Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم الفلاحية

Département des Sciences Agronomiques



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Amélioration du plante

Intitulé :

Approche théorique de l'adaptation du tournesol (*Helianthus annuus L.*) aux condition climatique semi aride

Présenté par :

Bechane Amani et Laifaoui Amani

Soutenu le 22 / 06/ 2025, Devant le Jury :

	Nom & Prénom	Grade	Affiliation / institution
Président :	M ^F Fortas Bilal	MCB	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.
Encadrant :	M ^{me} KELALECHE Hizia	MCA	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.
Examineur :	M ^{me} Tabti Dahbia	MCB	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre **profonde gratitude** à **Madame Kelaleche Hizia**, notre encadreur. Son **soutien inestimable**, sa **guidance éclairée** et sa **disponibilité constante** ont été la pierre angulaire de la réalisation de ce mémoire. Ses conseils avisés, sa rigueur scientifique et sa confiance en notre potentiel ont été des moteurs essentiels pour surmonter les défis et mener à bien ce projet. Nous la remercions sincèrement pour son temps, son expertise et son dévouement.

Nos **vifs remerciements** s'adressent également aux honorables membres du jury : **Monsieur Fortas Bilel**, **Madame Kelaleche Hizia** et **Madame Tabti Dihbia**. Nous sommes honorées qu'ils aient accepté d'évaluer notre travail et de nous accorder de leur précieux temps. Leurs remarques constructives et leurs perspectives enrichiront sans aucun doute notre recherche.

Enfin, nous souhaitons remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce mémoire. Leur encouragement, leur soutien moral et leurs conseils ont été une source de motivation précieuse tout au long de ce parcours.

Dédicace

C'est avec une immense émotion et une profonde reconnaissance que je dédie ce travail, fruit de tant d'efforts et de persévérance :

*À mes **chers parents, Hama Samia et Laifaoui Nasr Eddine**, symboles de l'amour inconditionnel et du soutien inébranlable. Vos sacrifices, vos prières et votre foi en moi ont été les phares qui ont éclairé mon chemin. Ce succès est avant tout le vôtre.*

*À mes **frères et sœur, Wissal et Abdelmoujeb**, pour leur présence réconfortante et les liens indéfectibles qui nous unissent.*

*À ma **chère grand-mère, Chettouh Fatma**, pour sa tendresse infinie et ses prières qui m'ont toujours accompagnée.*

*À la mémoire de mon **cher grand-père, Hama Hocine**, que Dieu l'accueille en Son vaste paradis. Son souvenir reste gravé dans mon cœur.*

*À mes **oncles, tantes, et leurs enfants**, ainsi qu'à toutes les personnes chères à mon cœur et à mon âme, qui ont toujours été là pour moi. Puisse Dieu vous garder comme un éternel soutien et une source de joie dans ma vie.*

Aifaoui Amani

Dédicace

Je dédie humblement ce mémoire, aboutissement de plusieurs années d'études et de travail acharné :

À mes précieux parents, Mokhtar et Nabila, pour leur amour sans limite, leur dévouement exemplaire et leur soutien indéfectible qui m'ont permis d'atteindre mes objectifs. Ce diplôme est le reflet de vos efforts et de vos sacrifices.

À mes frères, Marouane et Ali, et à mes sœurs, Hiba et Manar, pour votre affection, votre complicité et les moments partagés qui rendent ma vie plus belle.

À mes fidèles amies : Anfal, Joummana, Asma, Sara, Loubna et Sihem, pour votre amitié sincère, votre compréhension et les innombrables souvenirs que nous avons créés. Merci d'être toujours là.

Bechane Amani

Sommaire

Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Liste des Figures	
Liste des abréviations	
Résumé	
Introduction	1
Chapitre I: Biologie et aspects agronomiques de tournesol	2
I.1. Généralités sur le tournesol.....	3
I.2. Historique et Origine.....	3
I.3. Amélioration génétique du tournesol	3
I.4. Classification botanique	4
I.5. Morphologie de la plante	5
I.6. Cycle de développement du tournesol	6
I.6.1. La période végétative	7
I.6.2. La période reproductive.....	7
I.7. Exigences culturelles et conduite de la culture	7
I.7.1. Exigences climatiques et édaphiques	7
I.7.2. Semis et levée	8
I.7.3. Entretien du tournesol.....	8
I.7.4. Récolte et conservation.....	10
I.8. Utilisations du tournesol	11
I.8.1. Utilisation alimentaire	11
I.8.2. Utilisation non alimentaire	11
I.9. Importance économique du tournesol	12
I.9.1. Au niveau Mondiale	14
I.9.2. Au niveau de l'Algérie	12

Chapitre II : Le climat semi-aride	14
II.1. Le climat semi-aride	15
II.1.1. Définition du climat semi-aride.....	15
II.1.2. Causes du climat semi-aride.....	15
II.2. Définition du stress environnemental	16
II.3. Stress hydrique.....	17
II.3.1. Définition du stress hydrique	17
II.3.2. Effets du stress hydrique sur les plantes.....	17
II.3.3. Mécanismes d'adaptation au stress hydrique.....	17
II.4. Stress salin	18
II.4.1. Définition du stress salin	18
II.4.2. Effets du stress salin sur les plantes	18
II.4.3. Mécanismes d'adaptation au stress salin	19
II.5. Stress thermique.....	19
II.5.1 Définition du stress thermique	19
II.5.2 Effets du stress thermique sur les plantes.....	19
II.5.3 Mécanismes d'adaptation au stress thermique.....	20
Chapitre III : Impacts des stress abiotiques et réponses adaptatives du tournesol	21
III.1. Effets des stress hydrique sur le tournesol:	22
III.1.1 Sur la germination.....	28
III.1.2 Sur la croissance végétative	23
III.1.3 Sur le développement et le rendement	23
III.2 Effets du stress thermique sur le tournesol.....	24
III. 2.1 Sur la germination.....	24
III.2.2 Sur la croissance végétative	24
III.2.3 Sur le développement et le rendement	25
III.3 Effets du stress salin sur le tournesol.	25
III.3.1 Sur la germination.....	26
III.3.2 Sur la croissance végétative	26

III.3.3 Sur le développement et le rendement	26
III.4 Les mécanismes d'adaptation du tournesol aux stress hydrique, thermique et salin.....	27
III.4.1. Adaptation au stress hydrique	27
III.4.2. Adaptation au stress thermique (chaleur).....	27
III.4.3. Adaptation au stress salin.....	29
III.5. Études de cas et expérimentations en région semi-aride (Algérie).....	29
III.5.1. Expériences sur la réponse au stress hydrique et les techniques d'irrigation	30
III.5.2. Évaluation variétale en conditions semi-arides.....	30
Conclusion	32

Liste des Références

Résumé

Liste des Figures

Figure1 : Morphologie d'un tournesol mature avec annotations des organes végétatifs et reproductifs.	5
Figure 2 : Schéma d'un akène de tournesol en coupe longitudinale.....	6
Figure 3 : Stades phénologiques du tournesol : Chronologie et critères d'identification	7
Figure 4 : Meilleure 10 des pays producteurs de graines de tournesol	12
Figure 5: Schéma de l'effet d'ombre pluviométrique en zone aride.	16

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
GNIS	Groupement National Interprofessionnel des Semences et plants
HSPs	Protéines de Choc Thermique (Heat Shock Proteins)
NaCl	Chlorure de Sodium
PEG	Polyéthylène Glycol

ملخص

تُبين هذه الدراسة المرجعية أن زراعة دوار الشمس (*Helianthus annuus L.*) في المناطق شبه الجافة تُواجه تحديات رئيسية تتمثل في الإجهادات المائية والملحية والحرارية. لمواجهة هذه الظروف، يُفعل النبات مجموعة من آليات التكيف الفيزيولوجية والكيميائية الحيوية لضمان بقاءه وإنتاجيته. وعليه، فإن استدامة هذه الزراعة تعتمد على نهج مزدوج يجمع بين انتخاب أصناف وراثية متحملة لهذه الإجهادات، وتحسين الممارسات الزراعية كالإدارة الفعالة للمياه والتسميد المتوازن.

Résumé

Cette étude bibliographique démontre que la culture du tournesol (*Helianthus annuus L.*) en contexte semi-aride est principalement limitée par les stress hydrique, salin et thermique. Face à ces contraintes, la plante déploie une série de mécanismes d'adaptation physiologiques et biochimiques pour assurer sa survie et sa productivité. La pérennisation de cette culture repose donc sur une double approche : la sélection de génotypes tolérants et l'optimisation des pratiques agronomiques, telles que la gestion efficace de l'eau et la fertilisation raisonnée.

Abstract

This literature review demonstrates that sunflower (*Helianthus annuus L.*) cultivation in semi-arid contexts is primarily constrained by hydric, saline, and thermal stress. In response to these challenges, the plant employs a range of physiological and biochemical adaptation mechanisms to ensure its survival and productivity. Therefore, sustaining this crop depends on a dual approach: the selection of tolerant genotypes and the optimization of agronomic practices, such as efficient water management and judicious fertilization.

Introduction

Introduction

Face aux défis climatiques croissants et à l'impératif de sécurité alimentaire mondiale, l'agriculture en régions semi-arides, caractérisées par des précipitations faibles, des températures extrêmes et une forte évapotranspiration, revêt une importance capitale (FAO, 2017). L'optimisation des cultures dans ces environnements contraignants est essentielle, notamment par la sélection d'espèces adaptées (Blum, 2011).

Le tournesol (*Helianthus annuus* L.), plante annuelle appartenant à la famille des Astéracées, est originaire d'Amérique du Nord. Il est largement reconnu pour ses grandes inflorescences jaunes qui suivent la course du soleil (héliotropisme) et est cultivé mondialement principalement pour ses graines riches en huile de haute qualité alimentaire, ainsi que pour son tourteau utilisé en alimentation animale (Schneiter, 1997). Son importance économique et agricole réside dans sa contribution à la production d'huiles végétales et à la diversification des systèmes de culture, offrant une alternative potentielle dans les régions aux conditions climatiques difficiles.

Bien que doté d'une certaine plasticité, sa productivité en milieu semi-aride est fortement limitée par les stress abiotiques prédominants : le stress salin, le stress hydrique et le stress thermique (Ashraf et Harris, 2004). Ces contraintes affectent négativement toutes les étapes de son développement, de la germination au rendement et à la qualité des graines. Dans ce contexte, et plus particulièrement en Algérie où les zones semi-arides sont étendues, la culture du tournesol suscite un intérêt croissant dans les politiques agricoles. Elle est en effet perçue comme une option stratégique pour la diversification agricole et la réduction de la dépendance nationale aux importations d'huiles végétales. Des efforts sont ainsi en cours pour encourager sa culture à travers des projets pilotes et des subventions, à condition de bien maîtriser son adaptation aux conditions locales (ITGC, 2021).

L'objectif principal de cette mémoire est de synthétiser les connaissances actuelles afin de comprendre l'impact des stress salin, hydrique et thermique sur le tournesol et les mécanismes qu'il déploie pour y faire face, en vue d'orienter les stratégies d'amélioration de sa culture en milieu semi-aride. Pour ce faire, cette étude bibliographique s'articulera autour des aspects suivants :

1. La biologie du tournesol et les stratégies d'adaptation pour sa culture en milieu semi-aride.
2. La nature du climat semi-aride et les bases des stress environnementaux (salin, hydrique, thermique).
3. L'impact spécifique de ces stress sur le tournesol et ses mécanismes d'adaptation propres.

INTRODUCTION

À travers cette revue bibliographique, cette étude ambitionne de fournir un cadre de compréhension utile pour l'orientation des programmes de sélection et l'amélioration des pratiques culturales du tournesol en conditions semi-arides algériennes.

Le mémoire s'articulera en trois chapitres principaux traitant successivement des généralités sur le tournesol, du climat semi-aride et des stress, puis des interactions spécifiques entre ces stress et le tournesol, suivis d'une conclusion.

Chapitre I:
Biologie et aspects
agronomiques de
tournesol

I.2. Historique et Origine

Le tournesol est une plante oléagineuse annuelle dont le nom scientifique est *Helianthus annuus* L. L'appellation «tournesol» provient de sa tendance à se tourner vers le soleil pendant la journée alors que son nom scientifique fait référence à la forme caractéristique de son inflorescence composée ou capitule. Originaire d'Amérique du Nord, le tournesol serait l'une des plus anciennes espèces endémiques où il fut cultivé jusqu'au XV^{ème} siècle par les Indiens d'Amérique à des fins alimentaires (consommation de ses graines crues ou sous forme de farine) mais également pour d'autres applications (médicinale, colorante...) comme il avait aussi une fonction ornementale en raison de sa forme de soleil. Ce n'est qu'au début du XVI^{ème} siècle que les explorateurs espagnols le rapportèrent en Europe d'abord pour cette fonction ornementale (Evon, 2008). Toutefois d'autres utilisations ne tardèrent pas à apparaître où les feuilles furent utilisées pour l'alimentation du bétail, les pétales pour la teinture, les tiges pour le papier et surtout les graines pour l'huile. En développant des variétés adaptées localement, les chercheurs firent passer la teneur en huile de la graine de 25 à 45 % en quelques décennies améliorant par la même occasion la précocité de la plante ainsi que sa résistance aux maladies (Evon, 2008). Réintroduit en Amérique du Nord en 1880, la culture du tournesol se développa par la suite dans le reste de l'Europe dès le début du XX^{ème} siècle (Guillaume, 2008) puis se répandit à partir de 1960 à d'autres pays du monde.

I.3. Amélioration génétique du tournesol

Les premières démarches d'amélioration génétique du tournesol reposaient sur la sélection massale ou phénotypique, consistant à choisir les capitules selon certains caractères d'intérêt. Du fait de la forte allogamie du tournesol (pollinisation croisée), aucun contrôle précis de la fécondation n'était alors assuré. Ce type de sélection a permis d'obtenir diverses variétés présentant des caractéristiques spécifiques telles que la résistance aux maladies, une teneur en huile élevée ou des qualités particulières des graines (Evon, 2008).

Dans les années 1920, en Union des Républiques Socialistes Soviétiques, Pustovoit (1964) a mis au point une méthode plus rigoureuse appelée « méthode des réserves ». Celle-ci consiste à prélever des graines issues de capitules sélectionnés, puis à les évaluer pendant deux années dans une pépinière selon plusieurs critères. Les capitules retenus sont ensuite soumis à une pollinisation contrôlée. Cette approche a permis une amélioration significative de la teneur en huile tout en augmentant les rendements.

L'autofécondation a été introduite comme outil d'amélioration dès 1922 par Cardon (1922), mais ce n'est qu'à partir des années 1940-1950 que les premiers hybrides issus de cette

Chapitre I : Biologie et aspects agronomiques de tournesol

technique ont été cultivés commercialement au Canada. Ces hybrides résultaient du croisement entre une lignée femelle fortement auto incompatible et une lignée mâle auto compatible. Les graines obtenues affichaient un bon rendement, mais la proportion d'hybrides vrais restait relativement faible, limitant leur usage à grande échelle. L'accès aux variétés soviétiques riches en huile a ensuite conduit à l'abandon de ces premiers hybrides.

Une avancée majeure est survenue avec la découverte, en France, par Leclercq (1969), de la stérilité mâle cytoplasmique, suivie de l'identification de gènes restaurateurs de fertilité. Cette innovation a permis de tirer pleinement parti de l'effet d'hétérosis, ouvrant la voie à la production de semences hybrides à 100 %. Dès la fin des années 1960, cette technologie a été intégrée massivement dans les programmes de sélection.

I.4. Classification botanique

Le tournesol a été décrit pour la première fois dans l'herbier du botaniste Dodaneus en 1568 sous le nom de *Chrysanthemum perviranum*. Le mouvement héliotropique de la fleur de tournesol dû à la courbure de la tige lui a valu son nom botanique d'*Helianthus* (du grec *helios*: soleil et *anthos*: fleur), *annuus* étant lié à sa durée de vie annuelle (Merrien, A. 2016) D'après Chadefaud et Emberger (1960), le tournesol cultivé *Helianthus annuus* L. appartient :

- à l'embranchement des Spermaphytes
- au sous-embranchement des Angiospermes
- à la classe des Dicotylédones
- au phylum des Pariétales-Rhoeadales-Synanthérées
- à l'ordre des Synanthérales
- à la famille des Astéracées ou Composées
- à la sous-famille des Tubuliflores
- au genre *Helianthus* L
- à l'espèce *annuus*

Le genre *Helianthus* comprend une cinquantaine d'espèces, toutes originaires d'Amérique du Nord, dont le topinambour (*Helianthus tuberosus* L).

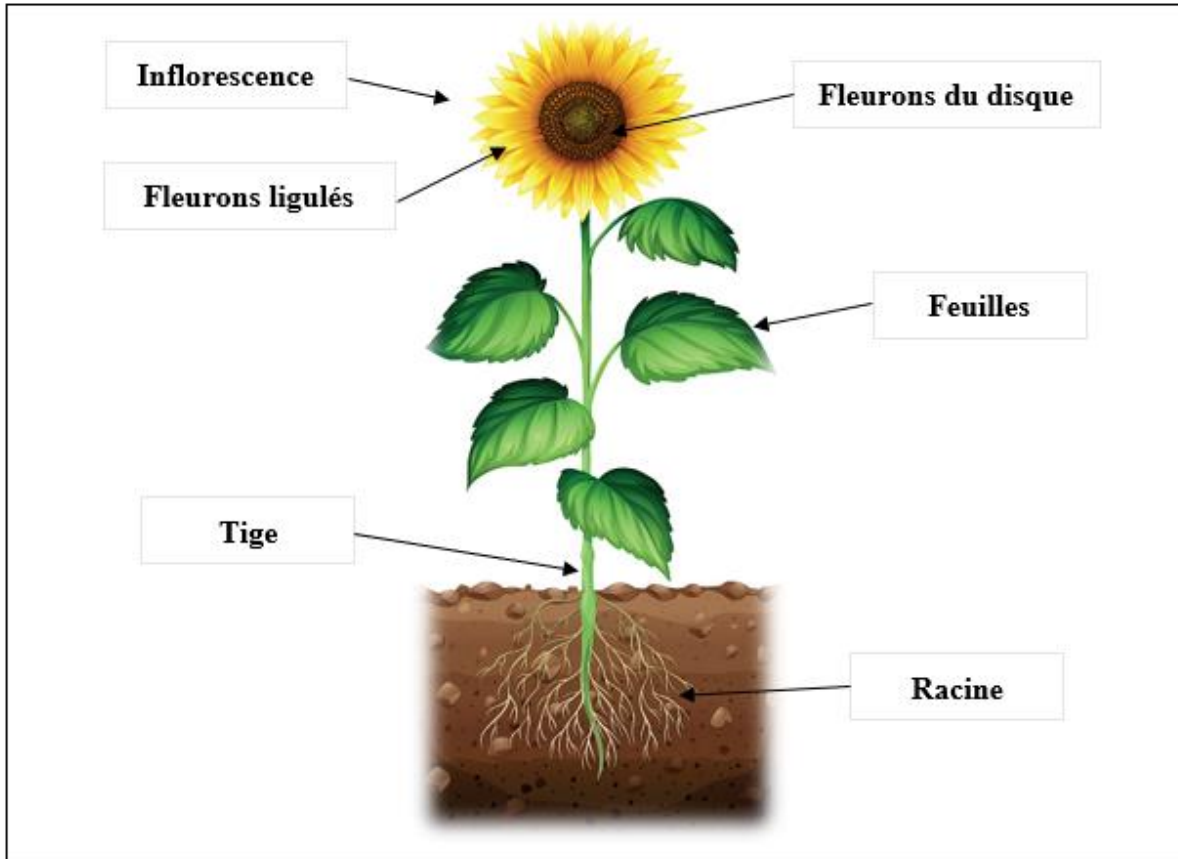


Figure 1 : Morphologie d'un tournesol mature avec annotations des organes végétatifs et reproductifs.

Le tournesol (*Helianthus annuus L.*) est une plante annuelle mesurant entre 1 et 4 mètres selon les variétés et les conditions culturales. La tige est généralement non ramifiée, avec des feuilles au nombre de 20 à 30, dont les premières sont opposées et les suivantes alternes (Ebrahimi, 2008). Le capitule, réceptacle floral charnu, peut atteindre un diamètre de 15 à 50 cm (Temagoult, 2009). Le système racinaire est pivotant, avec un axe principal pouvant dépasser 2 mètres de profondeur, permettant à la plante de mieux résister à la sécheresse en puisant les éléments nutritifs profonds, bien que ce pivot soit peu agressif face aux obstacles du sol (Mirleau-Thebaud, 2012). Les racines secondaires, quant à elles, sont superficielles et diminuent en diamètre et en nombre avec l'éloignement du pivot (Mirleau-Thebaud, 2012). La graine, en réalité un akène, est formée d'un embryon avec deux cotylédons, entouré d'un péricarpe non soudé. Elle mesure entre 7 et 25 mm de long et 4 à 13 mm de large, avec une forme variant de linéaire à presque ronde (Côme et Corbineau, 1998). La coque est constituée principalement de cellulose, lignine et hémicellulose (Connor et Hall, 1997), tandis que l'amande renferme les réserves nécessaires à la germination, principalement des lipides (50%) et des protéines (20%) de la matière sèche (Ayerdi-Gotor, 2008).

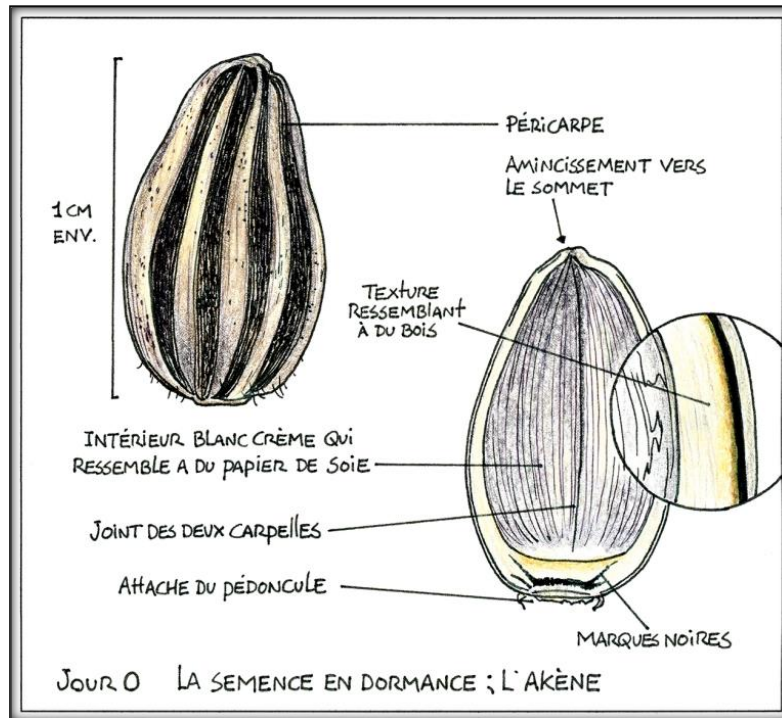


Figure 2: Schéma d'un akène de tournesol en coupe longitudinale.

I.6. Cycle de développement du tournesol

Connaître les stades du tournesol est crucial pour les agriculteurs qui cherchent à améliorer le rendement de la culture et sa durabilité. Le tournesol requiert un soin tout particulier de la germination à la maturité. Se familiariser avec les étapes clés de la culture permettra aux agriculteurs de prendre des décisions pertinentes sur le timing du désherbage et de la fertilisation ainsi que le déclenchement d'une éventuelle irrigation. Cela aide à optimiser les ressources et à minimiser l'impact sur l'environnement. Bien évidemment, la connaissance de ces stades permet également de maximiser et / ou sécuriser la productivité tout en s'adaptant aux changements climatiques (Merrien, A. 2016).

C'est une plante à grand développement végétatif, aux larges feuilles, dont la hauteur varie de 1.5 à 2 mètres en peuplement dense. Le cycle complet du tournesol varie de 80 à plus de 170 jours selon les géotypes, les conditions climatiques et culturales. Sur la base d'un zéro de végétation théorique de 6°C, les exigences en sommes de températures varient de 1530 à 1800°C jours (Merrien, 1992). La floraison débute généralement entre le 65ème et le 70ème jour après la levée, soit 850°C jours (base 6°C). Les stades repères du développement du tournesol sont décrits dans la Figure 3 : (Schneiter et Miller, 1981).

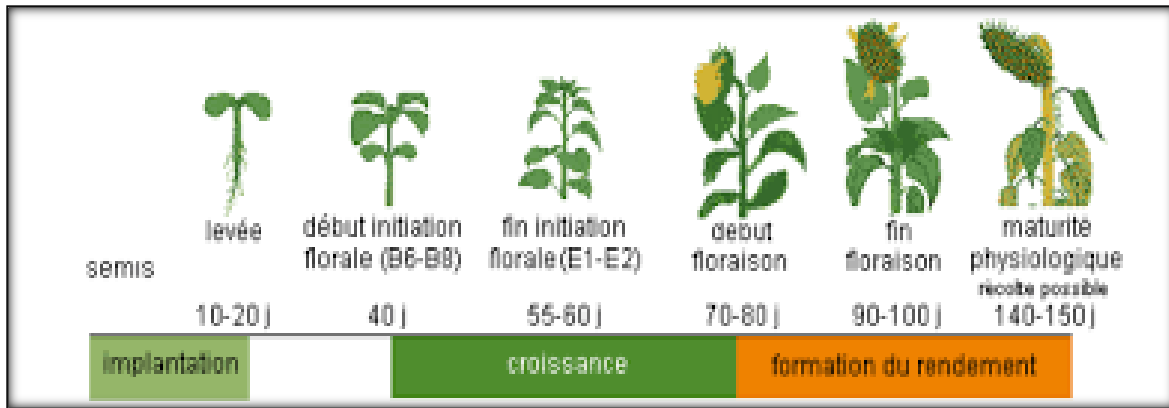


Figure 3: Stades phénologiques du tournesol : Chronologie et critères d'identification

I.6.1. La période végétative

La période végétative du tournesol débute dès la germination et se poursuit jusqu'à l'apparition des premiers boutons floraux. Elle comprend plusieurs stades (Arvalis, 2018) :

- Germination et levée : généralement 5 à 10 jours après le semis, selon la température et l'humidité du sol.
- Développement foliaire : formation progressive des feuilles, qui assurent la photosynthèse.
- Allongement de la tige (élongation): la plante acquiert sa hauteur définitive. Cette période est cruciale pour le bon développement du système racinaire et de la biomasse aérienne.

I.6.2. La période reproductive

Cette phase commence à partir de l'initiation florale et inclut (Merrien, 1992) :

- La floraison : généralement 60 à 70 jours après la levée. Elle s'étale sur 8 à 10 jours.
- La fécondation : assurée en grande partie par les insectes pollinisateurs, notamment les abeilles.
- La formation et maturation des graines : dure environ 30 à 40 jours après la floraison. Le bon déroulement de cette phase conditionne directement la quantité et la qualité de la production en graines.

I.7. Exigences culturales et conduite de la culture

I.7.1. Exigences climatiques et édaphiques

Le tournesol est une culture moyennement exigeante, mais pour une production optimale, certaines conditions sont nécessaires (Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains, 2010) :

- * **Climat** : il préfère les climats tempérés à chauds avec une bonne exposition solaire.
- * **Sol** : bien drainé, profond, riche en matière organique, avec un pH compris entre 6 et 7.5.

Chapitre I : Biologie et aspects agronomiques de tournesol

* **Eau** : résistant à la sécheresse, mais des apports hydriques durant la floraison et le remplissage des graines sont bénéfiques.

* **Entretien** : un désherbage précoce, une protection contre les maladies (mildiou, sclérotinia) et ravageurs (oiseaux, insectes) est nécessaire.

I.7.2. Semis et levée

Pour assurer un peuplement optimal, la densité de semis recommandée est de 60 000 à 70 000 graines par hectare, avec pour objectif d'obtenir entre 50 000 et 60 000 plants levés. En cas d'intervention mécanique type herse-étrille, il est conseillé d'augmenter la densité de semis de 10 % pour compenser les pertes (Terres Inovia, 2017).

L'espace minimum entre les rangs doit être de 60 cm afin de permettre un binage efficace. La profondeur de semis dépend de la texture du sol : entre 2 à 3 cm en sols battants, et de 4 à 5 cm en sols argileux, afin de rechercher l'humidité nécessaire à une bonne germination (GNIS « Groupement National Interprofessionnel des Semences et plants », 2008).

I.7.3. Entretien du tournesol

I.7.3.1. Fertilisation

Grâce à son système racinaire profond et bien développé, le tournesol est capable de mobiliser les reliquats d'azote des horizons profonds du sol. Ainsi, les apports azotés doivent être ajustés en fonction de la richesse du sol, sans dépasser une dose optimale de 80 kg N/ha (Lecomte et Nolot, 2011). Un excès d'azote peut en effet induire un développement foliaire exubérant, entraînant un auto-ombrage, une sénescence accélérée des feuilles basales, et une sensibilité accrue à la sécheresse (Merrien, 1992 ; Aguera et *al.*, 2010).

La culture du tournesol est également exigeante en potasse. En cas de sols pauvres, un apport complémentaire de 50 kg/ha de K₂O peut s'avérer bénéfique. À l'inverse, les besoins en phosphore sont relativement faibles, et peuvent être satisfaits par des apports réguliers de matière organique ou par l'application de compost (Steer et *al.*, 1990).

Le bore est un oligoélément essentiel, notamment entre les stades « 5 paires de feuilles » et « bouton floral ». Une carence se manifeste par un gaufrage, une décoloration et une nécrose à la base du limbe. Un apport de 300 à 500 g/ha est conseillé, surtout sur sols calcaires ou superficiels (Ozer et *al.*, 2004).

Par ailleurs, les amendements organiques comme la fiente de volaille, issus des élevages, jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Une dose de 5,6 t/ha permet d'optimiser la croissance des plantes et le rendement en capitules (Yerima et *al.*, 2014).

I.7.3.2. Désherbage

Un désherbage rigoureux est essentiel pour permettre au tournesol d'exprimer tout son potentiel productif (Syngenta, 2006). Avant la levée, un passage à l'aveugle de la herse-étrille est possible si le semis a été effectué en profondeur, afin d'éliminer les adventices en germination.

Au stade 4-6 feuilles, une herse-étrille peut être utilisée à vitesse lente, mais il faut cesser l'opération en cas d'arrachage excessif de feuilles. Entre 6 et 10 feuilles, le binage devient l'outil principal de désherbage, suivi d'un buttage final. Il est toutefois nécessaire de veiller à ne pas ensevelir les jeunes plants lors du binage (GNIS, 2008).

I.7.3.3. Irrigation

Bien que le tournesol soit relativement tolérant à la sécheresse, des stress hydriques sévères, notamment pendant la floraison ou le remplissage des graines, peuvent fortement impacter le rendement et la teneur en huile. Ce dernier critère, désormais central pour les producteurs, justifie parfois des irrigations tardives, visant à prolonger la durée de vie des feuilles et optimiser la synthèse lipidique, très énergivore (Syngenta, 2006).

L'irrigation doit être raisonnée en fonction de la disponibilité et du coût de l'eau, de la concurrence avec d'autres cultures et du développement de la plante. Après une première irrigation, un tour d'eau tous les 10 jours est préconisé, en l'absence de pluie. En cas de précipitation, décaler le tour d'un jour par tranche de 5 mm tombés. Il est préférable d'appliquer des doses de 30 à 40 mm par cycle plutôt que des apports plus faibles mais fréquents (CETIOM, 2002).

I.7.3.4. Lutte phytosanitaire

Le tournesol est vulnérable à plusieurs maladies cryptogamiques majeures (Mestries, 2019) :

- Sclérotinia : touche toutes les parties de la plante et se développe en conditions très humides. Le champignon peut persister longtemps dans le sol. Il n'existe pas de traitement fongicide totalement efficace. La lutte repose sur des variétés résistantes, un ajustement des densités, de la fertilisation azotée, de l'irrigation et une rotation culturale raisonnée.
- Botrytis : s'attaque aux capitules et aux graines, causant des pertes à la récolte et une dégradation de la qualité de l'huile. Choisir des variétés précoces permet d'éviter une récolte trop tardive. Le traitement des semences est envisageable.
- Phomopsis : apparue en 1984, cette maladie affecte les feuilles et tiges, notamment dans le Sud-Ouest. La lutte repose sur l'enfouissement des résidus, le choix de variétés tolérantes et, désormais, des traitements fongicides.

Chapitre I : Biologie et aspects agronomiques de tournesol

- Mildiou : de nouvelles races apparues en 1988 compliquent la lutte. Les infections primaires sont maîtrisées par l'enrobage des semences, mais aucun traitement en végétation n'est actuellement disponible. L'élimination des repousses et l'utilisation de variétés résistantes sont les meilleures options.
- Phoma : caractérisée par des taches noires affectant feuilles, tiges et capitules. L'attaque sur tiges est la plus dommageable. Aucune variété hautement tolérante n'est disponible à ce jour, mais un traitement fongicide en végétation permet de limiter les contaminations précoces.

I.7.4. Récolte et conservation

I.7.4.1. Récolte

La récolte est optimale lorsque le dos du capitule passe du jaune au brun, que les fleurons tombent d'eux-mêmes, et que la tige vire du vert au beige clair (CETIOM, 2002). Une récolte trop tardive peut entraîner des pertes dues aux oiseaux, à la verse ou aux maladies. À l'inverse, une humidité des graines trop basse peut entraîner une perte de poids non compensée financièrement.

Dans certaines situations (maladies menaçantes), une récolte anticipée peut être nécessaire, parfois accompagnée d'une défoliation chimique pour faciliter le battage. Cependant, une récolte trop précoce (graines > 15 % d'humidité) augmente le taux d'impuretés, les coûts de séchage et le risque de détérioration des graines (coques cassées), ce qui complique leur conservation.

I.7.4.2. Conservation du tournesol

Une bonne conservation des graines est indispensable pour maintenir leur qualité dans le temps (Dauguet, 2019).

Voici les règles essentielles :

- Nettoyage avant stockage : nettoyer les locaux et les circuits pour limiter le risque d'infestation par les insectes.
- Nettoyage des graines à réception : selon les conditions de récolte, ce nettoyage facilite la ventilation, limite les risques de parasites et permet de respecter le seuil réglementaire de 2 % d'impuretés.
- Contrôle de l'humidité : les graines doivent être stabilisées entre 7 et 8 % d'humidité pour une conservation longue. Au-delà de 9 %, la durée de stockage est limitée, et le risque de moisissures, d'insectes ou d'acidification de l'huile augmente.

- Ventilation et refroidissement : essentielle dès l'entrée en cellule. Elle permet d'abaisser rapidement la température des graines à 18-20 °C, en profitant de l'air extérieur plus froid (écart d'au moins 10 °C). La ventilation doit se faire par étapes.

I.8. Utilisations du tournesol

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

I.8.1. Utilisation alimentaire

I.8.1.1- Alimentation humaine

Les graines de tournesol représentent une source importante d'huile alimentaire au monde dont la teneur en huile est voisine de 45% (Asa, 2008).

L'huile de tournesol seule ou combinée à d'autres huiles est capable de répondre à de nombreuses exigences du secteur de l'agro-alimentaire. Elle est le plus souvent utilisée comme huile de table pure ou en mélange et dans l'industrie alimentaire pour la fabrication d'assaisonnements, de sauces, de margarines (Ayerdi-Gotor, 2008). En outre, la graine entière de tournesol peut également être valorisée dans l'alimentation humaine (Roche, 2005).

I.8.1.2- Alimentation animale

Le tourteau de tournesol ; produit obtenu après extraction de l'huile est parmi les meilleurs aliments de bétail en raison de sa forte teneur en matières azotées totales (45-55%) ainsi sa teneur en vitamines du groupe B est également élevée (le tournesol contient plus de riboflavine que l'arachide ou le soja). Du point de vue minéral, comparé aux autres tourteaux, celui du tournesol présente un meilleur équilibre phosphocalcique. Toutefois son taux élevé en cellulose limite leur utilisation chez les monogastriques (Agrèste, 2003).

I.8.2. Utilisation non alimentaire

Les principaux secteurs de valorisation de l'huile de tournesol dans le secteur non alimentaire sont l'énergie avec la production de biocarburants et l'oléochimie avec la production de bioproduits élaborés à partir de l'huile ou ses dérivés.

Les tocophérols et les phytostérols qui peuvent être récupérés lors de raffinage des huiles de tournesol est valorisées en particulier dans l'industrie pharmaceutique et cosmétique. Les phytostérols présentent une action anti-inflammatoire et anti-dessicateurs (Folmer, 2003; Borlescu et al., 2007) tandis que les tocophérols sont abondamment utilisés en cosmétologie grâce à leur pouvoir anti-oxydant (Ayerdi-Gotor, 2008).

I.9. Importance économique du tournesol

I.9.1. Au niveau mondial

Le tournesol est l'une des principales cultures oléagineuses dans le monde, avec des millions d'hectares cultivés principalement en Ukraine, Russie, Argentine, et l'Union Européenne. Son huile est très prisée pour la consommation humaine, notamment en cuisson, et son tourteau est utilisé comme aliment pour le bétail. De plus, il joue un rôle important dans la rotation culturale pour améliorer la structure du sol Figure 4 : (USDA, 2020).



Figure 4: Meilleure 10 des pays producteurs de graines de tournesol [statistiques des entreprises de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2023]

I.9.2. Au niveau de l'Algérie

En Algérie, la culture du tournesol est encore peu développée mais elle suscite un intérêt croissant dans les politiques agricoles visant à réduire la dépendance aux importations d'huile végétale. Le tournesol pourrait jouer un rôle majeur dans la sécurité alimentaire et la diversification des cultures, en particulier dans les régions à climat semi-aride. Des efforts sont en cours pour encourager sa culture à travers des projets pilotes et des subventions (ITGC, 2021).

Chapitre II :
Le climat semi-aride

II.1. Le climat semi-aride

II.1.1. Définition du climat semi-aride

Le climat semi-aride, également désigné sous le terme de climat steppique (selon la classification de Köppen, types BSk « Climat semi-aride froid » et BSh « Climat semi-aride chaud»), se caractérise par des précipitations annuelles faibles, généralement comprises entre 250 et 500 mm. Cette quantité d'eau, bien que supérieure à celle des climats désertiques, demeure insuffisante pour le développement d'une végétation forestière dense. Ce type de climat est aussi marqué par d'importantes fluctuations de température, tant saisonnières que journalières, et par des taux d'évapotranspiration potentielle (Évapotranspiration Potentielle) qui excèdent fréquemment les apports pluviométriques, induisant ainsi des déficits hydriques récurrents pour la végétation (Peel et *al.*, 2007).

La caractérisation d'un climat s'appuie sur des critères quantitatifs, tels que les volumes de précipitations et les niveaux de température, et qualitatifs, comme la nature de la couverture végétale prédominante. Les zones semi-arides constituent des écotones entre les régions humides et les déserts arides, subissant ainsi des contraintes hydriques notables (Peel et *al.*, 2007).

II.1.2. Causes du climat semi-aride

L'établissement d'un climat semi-aride est le résultat de l'interaction complexe de plusieurs facteurs géographiques et atmosphériques, parmi lesquels :

- La continentalité : L'éloignement par rapport aux vastes étendues océaniques limite l'apport en humidité atmosphérique, les masses d'air s'asséchant au cours de leur trajet sur de larges surfaces continentales (Viers, 1990).

Les océans constituent la source primordiale d'humidité pour les précipitations ; leur absence ou leur distance réduit cette alimentation en eau (Viers, 1990).

- L'effet d'ombre pluviométrique (Rain Shadow Effect) : Les chaînes montagneuses forment des obstacles aux masses d'air chargées d'humidité. L'air, contraint de s'élever, se refroidit et libère ses précipitations sur le versant exposé au vent. En redescendant sur le versant opposé (sous le vent), l'air se réchauffe et s'assèche, créant des conditions propices à l'aridité ou la semi-aridité (Roe, 2005).

Chapitre II : Le climat semi-aride

Ce phénomène orographique est une cause déterminante de l'aridité dans de nombreuses régions intérieures ou situées du côté abrité des reliefs montagneux (Roe, 2005).

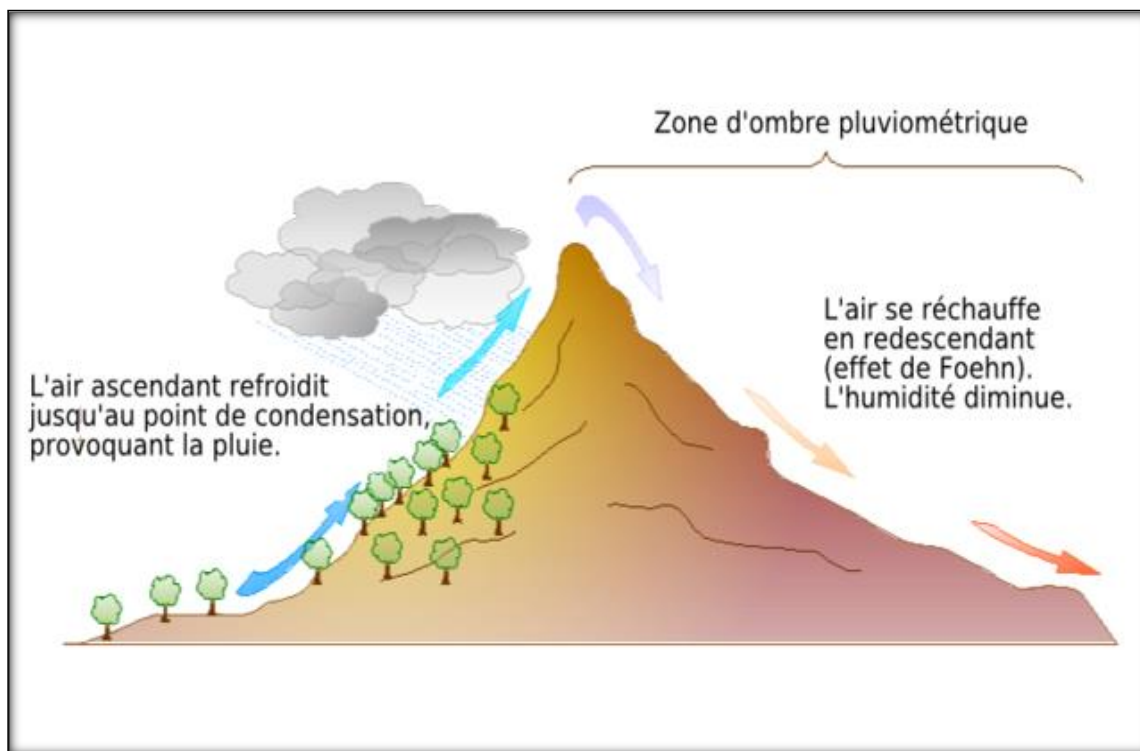


Figure 5: Schéma de l'effet d'ombre pluviométrique en zone aride.

- La présence de courants océaniques froids : Au large des côtes, ces courants induisent un refroidissement de l'air à leur contact, ce qui peut stabiliser l'atmosphère, diminuant ainsi la convection et, par conséquent, la formation de nuages et de précipitations (Peixoto et Oort, 1992).

L'air froid au-dessus d'une surface d'eau froide est dense et stable, ce qui inhibe l'ascension atmosphérique nécessaire à la condensation et à la genèse de pluies significatives sur les littoraux adjacents (Peixoto et Oort, 1992).

- Les cellules de Hadley et les zones de subsidence : Aux latitudes subtropicales (environ 30° Nord et Sud), l'air qui s'est élevé au niveau de l'équateur redescend vers la surface. Cet air subsident est intrinsèquement sec et se réchauffe durant sa descente, inhibant la nébulosité et les précipitations (Holton et Hakim, 2013).

Ces zones de hautes pressions subtropicales sont structurellement et globalement associées à des conditions arides et semi-arides (Holton et Hakim, 2013).

II.2 Définition du stress environnemental

Un stress environnemental se définit comme toute condition externe défavorable ou toute substance exogène qui impacte négativement la croissance, le développement, la capacité

Chapitre II : Le climat semi-aride

de reproduction ou la survie d'un organisme, en l'occurrence une plante. Il s'agit d'un facteur qui perturbe l'homéostasie de la plante, la contraignant à mobiliser des mécanismes de réponse spécifiques (Levitt, 1980).

II.3 Stress hydrique

II.3.1. Définition du stress hydrique

Le stress hydrique, ou stress de sécheresse, se manifeste lorsque la demande en eau de la plante, principalement due à la transpiration, excède la quantité d'eau disponible et absorbable par les racines dans le sol. Ceci conduit à un déficit hydrique au sein des tissus végétaux et à une perte de turgescence cellulaire (Chaves et *al.*, 2003). Le manque d'eau est un facteur limitant majeur de la productivité agricole à l'échelle mondiale, particulièrement dans les régions arides et semi-arides où les précipitations sont faibles, leur distribution irrégulière et/ou l'évapotranspiration élevée (Chaves et *al.*, 2003).

II.3.2. Effets du stress hydrique sur les plantes

Les effets du stress hydrique sur les plantes sont multiples et bien documentés. Ils incluent une réduction du potentiel hydrique foliaire, une fermeture des stomates (limitant l'absorption du CO₂ et donc la photosynthèse, mais réduisant les pertes d'eau par transpiration), une diminution de la turgescence cellulaire, et une inhibition de l'élongation cellulaire qui se traduit par une réduction de la croissance (affectant la taille des feuilles, la hauteur de la tige). On observe également une accélération de la sénescence foliaire, une accumulation accrue d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) pouvant conduire à un stress oxydatif, et un flétrissement visible de la plante (Hsiao, 1973 ; Reddy et *al.*, 2004 ; Chaves et *al.*, 2009). Face à un déficit hydrique, la plante met en place des stratégies pour conserver l'eau, notamment en réduisant sa transpiration via la fermeture stomatique. Cependant, cette réponse, bien qu'essentielle à la survie, se fait souvent au détriment de la croissance et de la production de biomasse, car l'assimilation photosynthétique du carbone est simultanément réduite (Flexas et *al.*, 2006 ; Chaves et *al.*, 2009).

II.3.3. Mécanismes d'adaptation au stress hydrique

Les plantes disposent de divers mécanismes d'adaptation au stress hydrique (Blum, 2011):

- Évitement de la sécheresse (Drought Escape) : Stratégie impliquant un cycle de vie court qui se complète durant la période où l'eau est disponible, ou une dormance des graines en attendant des conditions plus favorables.

Chapitre II : Le climat semi-aride

- Amélioration de l'absorption d'eau : Développement d'un système racinaire plus profond et/ou plus étendu, et augmentation de la conductivité hydraulique des racines.
- Réduction de la perte d'eau : Fermeture stomatique efficace et régulée, développement d'une cuticule plus épaisse, réduction de la surface foliaire, enroulement des feuilles, présence de trichomes.
- Maintien de la turgescence (Tolérance à la dessiccation) : Ajustement osmotique par l'accumulation d'osmolytes, et augmentation de l'élasticité des parois cellulaires.
- Protection contre les dommages oxydatifs : Activation de systèmes antioxydants enzymatiques et non-enzymatiques.
- Justification : Ces différentes stratégies permettent aux plantes de survivre et de maintenir un certain niveau de productivité même en cas de déficit hydrique prolongé, en optimisant l'acquisition et l'utilisation de l'eau disponible (Blum, 2011).

II.4. Stress salin

II.4.1 Définition du stress salin

Le stress salin est provoqué par une concentration excessive de sels solubles dans la rhizosphère, la zone du sol explorée par le système racinaire. Le chlorure de sodium (NaCl) est le sel le plus fréquemment impliqué, mais d'autres sels tels que les sulfates et carbonates de sodium, de magnésium et de calcium peuvent également contribuer à ce stress (Munns & Tester, 2008). L'accumulation de sels dans les sols (salinisation) est un phénomène courant dans les régions arides et semi-arides, favorisé par une forte évaporation qui concentre les sels en surface, ainsi que par des pratiques d'irrigation utilisant des eaux à forte teneur saline (Munns et Tester, 2008).

II.4.2 Effets du stress salin sur les plantes

Le stress salin impose une double contrainte à la plante :

- i. Stress osmotique : La concentration élevée en sels dans la solution du sol abaisse son potentiel hydrique, rendant l'absorption de l'eau par les racines plus difficile et simulant ainsi les conditions d'un stress hydrique (Munns et Tester, 2008).
- ii. Toxicité ionique : L'accumulation excessive d'ions spécifiques, principalement Na^+ et Cl^- , dans les tissus végétaux perturbe de nombreux processus métaboliques, affecte l'activité enzymatique et compromet l'intégrité des membranes cellulaires. Elle peut également induire un déséquilibre nutritionnel en interférant avec l'absorption d'autres cations essentiels comme K^+ et Ca^{2+} (Parida et Das, 2005).

II.4.3 Mécanismes d'adaptation au stress salin

Les plantes ont développé diverses stratégies pour s'adapter au stress salin (Flowers et Colmer, 2008):

- Exclusion des sels : Mécanismes limitant l'entrée des sels au niveau des racines ou leur translocation vers les parties aériennes photosynthétiquement actives.
- Compartimentation des ions : Séquestration des ions toxiques (notamment Na⁺ et Cl⁻) dans la vacuole des cellules, les isolant ainsi du cytoplasme et des organites sensibles.
- Synthèse de solutés compatibles (osmolytes) : Accumulation de composés organiques (tels que la proline, les sucres solubles, la glycine bêtaïne, les polyols) dans le cytoplasme pour permettre un ajustement osmotique, maintenant ainsi la turgescence cellulaire et protégeant les enzymes.
- Production d'enzymes antioxydantes : Activation de systèmes de défense enzymatiques (Superoxyde Dismutase - SOD, Catalase - CAT, Peroxydases - POX, Ascorbate Peroxydase - APX) pour détoxifier les espèces réactives de l'oxygène (ROS) générées en excès sous stress.
- Excrétion de sels : Certaines plantes spécialisées, les halophytes, possèdent des structures telles que des glandes à sel permettant d'excréter l'excès de sels accumulés.
- Justification : L'ensemble de ces mécanismes vise à minimiser l'absorption des sels, à séquestrer les ions devenus toxiques, à maintenir l'homéostasie osmotique et ionique cellulaire, et à protéger les structures et fonctions vitales de la plante dans des conditions salines (Flowers et Colmer, 2008).

II.5. Stress thermique

II.5.1. Définition du stress thermique

Le stress thermique englobe les dommages cellulaires et physiologiques causés par des températures qui s'écartent de manière significative de la plage optimale requise pour la croissance et le développement normal d'une plante. Ce stress peut se manifester sous forme de stress de chaleur (hautes températures) ou de stress de froid/gel (basses températures). Dans le contexte des climats semi-arides, le stress dû aux hautes températures est particulièrement prépondérant (Wahid et *al.*, 2007). Chaque espèce végétale possède une gamme de températures optimales pour ses divers processus physiologiques ; les températures extrêmes, qu'elles soient trop élevées ou trop basses, perturbent ces processus et peuvent induire des dommages (Wahid et *al.*, 2007).

II.5.2. Effets du stress thermique sur les plantes

Chapitre II : Le climat semi-aride

Les hautes températures peuvent entraîner la dénaturation des protéines et des enzymes, entraînant une perte de leur activité catalytique ; une altération de la fluidité et de la perméabilité des membranes cellulaires ; une inhibition de la photosynthèse, affectant en particulier la stabilité et le fonctionnement du photosystème II, et une augmentation de la photorespiration ; une production accrue d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) ; des perturbations du développement, telles que l'avortement floral, une mauvaise nouaison des fruits, ou la stérilité du pollen ; et finalement, une réduction de la croissance globale et du rendement (Sharkey, 2005). Si les températures modérément élevées peuvent accélérer certaines réactions biochimiques, les températures excessives deviennent délétères, endommageant les structures macromoléculaires essentielles (protéines, lipides membranaires) et perturbant les voies métaboliques vitales (Sharkey, 2005).

II.5.3 Mécanismes d'adaptation au stress thermique

Les plantes mettent en œuvre plusieurs mécanismes pour s'adapter au stress de chaleur (Kotak *et al.*, 2007):

- Production de protéines de choc thermique (HSPs - Heat Shock Proteins) : Ces protéines chaperons aident à stabiliser d'autres protéines, à prévenir leur dénaturation et à faciliter leur repliement correct ou leur dégradation si elles sont irréversiblement endommagées.
- Accumulation d'osmolytes/solutés compatibles : Certains composés, comme la proline ou divers sucres, peuvent stabiliser les protéines et les membranes cellulaires.
- Ajustements membranaires : Modification de la composition en acides gras des lipides membranaires pour maintenir une fluidité membranaire optimale malgré l'augmentation de la température.
- Refroidissement par transpiration : Augmentation du taux de transpiration (si l'eau du sol est disponible) pour dissiper la chaleur accumulée au niveau des feuilles par évaporation.
- Activation des systèmes antioxydants : Pour neutraliser les ROS produits en excès.
- Modifications morphologiques/anatomiques : Telles que l'orientation des feuilles (parahéliotropisme) pour minimiser l'exposition directe au soleil, l'augmentation de la réflectance foliaire, ou le développement d'une cuticule plus épaisse.

Chapitre III :
Impacts des stress
abiotiques et réponses
adaptatives du tournesol

La pérennité et le rendement du tournesol (*Helianthus annuus* L.) en contexte semi-aride sont intrinsèquement liés à sa réponse face aux stress abiotiques prédominants : hydrique, thermique et salin. Ce chapitre aborde cette problématique en examinant, dans un premier temps, les conséquences de chaque stress sur les phases cruciales du développement de la plante, de la semence à la récolte.

Dans un second temps, l'accent est mis sur les réponses adaptatives de l'espèce. Sont ainsi explorés les ajustements physiologiques, biochimiques et morphologiques spécifiques qui lui confèrent une tolérance à ces contraintes (Gholinezhad et Darvishzadeh, 2021). La sensibilité fluctuante de la plante selon son stade phénologique, mise en évidence par Evon (2008), constitue un fil conducteur de cette analyse, car elle module l'impact final sur la productivité.

III.1. Effets des stress hydrique sur le tournesol:

Le stress hydrique est le facteur limitant majeur en zones semi-arides, affectant toutes les phases du développement du tournesol. Cette section détaille ses impacts et les mécanismes d'adaptation, en intégrant des études récentes et des expériences locales (Algérie).

III.1.1 Sur la germination

Le stress hydrique constitue un facteur limitant majeur pour la germination du tournesol. Une disponibilité insuffisante en eau retarde l'imbibition des graines et altère les processus métaboliques initiaux (Yakovlev et *al.*, 2018).

Dans une étude de Gholinezhad et Darvishzadeh (2021), des graines de tournesol soumises à un potentiel hydrique de -1.0 MPa ont montré une réduction de 60% du taux de germination par rapport au témoin non stressé. Le temps moyen de germination passait de 3 jours en conditions optimales à 7 jours sous stress hydrique.

Des travaux récents menés à l'INRAA Algérie (2022) sur la variété 'Safra' ont confirmé ces résultats : un déficit hydrique de -0.8 MPa réduisait le taux de germination de 45%, avec des variations significatives entre géotypes. Certaines lignées locales ont démontré une meilleure tolérance, suggérant une base génétique à cette résistance.

Demir et Mavi (2008) ont étudié l'effet de l'osmo-conditionnement (amorçage des graines avec du PEG) sur la germination de graines de tournesol (cultivar 'Ozdemirbey') sous différents niveaux de stress hydrique (-0.4, -0.8, -1.2 MPa). L'amorçage a significativement amélioré le pourcentage final de germination (augmentation de 20-30% sous -0.8 MPa) et réduit le temps moyen de germination par rapport aux graines non amorcées, surtout sous des

conditions de stress modéré à sévère, indiquant que des prétraitements peuvent aider à surmonter les inhibitions dues au stress hydrique initial.

III.1.2 Sur la croissance végétative

Le tournesol est particulièrement sensible au stress hydrique durant sa phase de croissance végétative rapide (Evon, 2008). Ce stress réduit la hauteur, le diamètre de la tige, et surtout la surface foliaire, à la fois par une moindre expansion des jeunes feuilles et une sénescence accélérée des feuilles âgées. La fermeture stomatique limite l'entrée du CO₂ et donc la photosynthèse (Flexas et *al.*, 2006 ; Chaves et *al.*, 2009).

Des études comme celles de Manivannan et *al.* (2007) ont exposé des plants de tournesol (par ex., variété CO-4) à différents niveaux de stress hydrique en retenant l'irrigation. Ils ont observé une réduction de la hauteur de la plante, de la surface foliaire, et de la biomasse fraîche et sèche proportionnelle à l'intensité du stress. Le contenu relatif en eau (RWC) des feuilles diminuait aussi drastiquement. De même, Angadi et *al.* (2000), en étudiant des cultivars comme Peredovik et des hybrides modernes, ont constaté que le stress hydrique en phase végétative entraînait une diminution marquée de l'indice de surface foliaire (LAI) et, par conséquent, une réduction de l'interception de la lumière et de la production de biomasse.

Hussain et *al.* (2018) ont mené des expériences en pots pour évaluer la réponse de différents hybrides de tournesol (Pioneer-64A93, FH-530) au stress hydrique appliqué en phase de bouton floral en maintenant l'humidité du sol à 50% de la capacité au champ. Outre la réduction de la biomasse et de la surface foliaire, ils ont mesuré les paramètres d'échange gazeux et constaté une diminution de 40-50% du taux de photosynthèse nette (A), de la conductance stomatique et du taux de transpiration (E) chez les plantes stressées. Cette étude a également souligné des différences variétales dans l'efficacité d'utilisation de l'eau (Efficacité d'Utilisation de l'Eau = A/E) sous stress.

III.1.3 Sur le développement et le rendement

Un stress hydrique durant la floraison et le remplissage des graines est très préjudiciable (Evon, 2008 ; Fereres et Soriano, 2007). Il affecte l'allocation des assimilats, réduisant le diamètre du capitule, le nombre de graines fertiles, le poids des graines, et peut altérer la composition de l'huile (Blanchet et *al.*, 1993).

Par exemple, Chimenti et *al.* (2002) ont étudié les effets d'un déficit hydrique imposé à différents stades de développement sur des hybrides de tournesol. Un stress pendant la période de détermination du nombre de fleurons (environ 20 jours avant l'anthèse) ou pendant la floraison réduisait significativement le nombre de graines par capitule. Un stress durant le

remplissage des graines affectait surtout le poids individuel des graines et la teneur en huile. Des chercheurs comme Qadir et *al.* (2007) ont montré, sur des variétés comme NK-277 et SF-100, qu'une irrigation déficitaire (ex: 50% de l'ETc) appliquée durant la phase reproductive diminuait le rendement en graines de 30 à 50% par rapport à une irrigation complète, impactant aussi le diamètre du capitule et le poids de mille graines.

Agele et Adekoya (2012) ont étudié l'impact du moment d'application du stress hydrique (végétatif, floraison, remplissage des graines) sur le rendement et les composantes du rendement de deux variétés de tournesol ('Isaanka' et 'Record') au Nigeria. Un stress hydrique appliqué uniquement durant la phase de floraison (arrêt d'irrigation pendant 15 jours) a été le plus détrimental, réduisant le rendement en graines de 48% pour 'Isaanka' et de 55% pour 'Record', principalement dû à une forte réduction du nombre de graines remplies par capitule et une diminution de l'indice de récolte (HI).

III.2 Effets du stress thermique sur le tournesol

III.2.1 Sur la germination

Des températures du sol excédant 35-40°C peuvent réduire le taux et le pourcentage de germination, voire induire une thermodormance (Yari et *al.*, 2011).

Dans une étude de Gür et *al.* (2010), des graines de différentes variétés de tournesol (Sanbro, TARSAN-1018) ont été soumises à des températures supra-optimales (ex: 40°C, 45°C). Ils ont constaté une diminution drastique du pourcentage de germination et un allongement du temps moyen de germination par rapport à la température optimale (25°C). Certaines variétés montraient une plus grande thermotolérance au stade de la germination.

Wahid et Shabbir (2005) ont exploré les effets combinés de la température et du stress osmotique sur la germination du tournesol. Pour la température seule, ils ont confirmé que des températures de 40°C réduisaient drastiquement le pourcentage de germination et la vigueur des plantules (longueur et poids sec) de la variété 'NK-212' par rapport à 25°C. Ils ont également noté que l'exposition à la chaleur diminuait la teneur en sucres solubles et en protéines des embryons, affectant leur métabolisme.

III.2.2 Sur la croissance végétative

Le stress de chaleur réduit la photosynthèse, augmente la respiration et peut causer des brûlures foliaires (Angadi et *al.*, 2003).

Des travaux comme ceux de Ahmad et Prasad (2013) sur des génotypes de tournesol ont montré qu'une exposition à des températures élevées (ex: 38/25°C jour/nuit) pendant la phase végétative réduisait la biomasse accumulée, la surface foliaire et l'activité

photosynthétique par rapport à des conditions optimales (28/18°C). La hauteur des plantes était également affectée. Ils ont aussi observé des différences variétales dans la réponse à ce stress.

Djanaguiraman et *al.* (2013) ont étudié l'impact du stress thermique nocturne (températures nocturnes élevées, ex: 30°C vs. 22°C optimal) sur la croissance et la physiologie de plants de tournesol. Des températures nocturnes élevées ont entraîné une augmentation significative de la respiration nocturne, une réduction de l'assimilation nette de carbone sur 24h, et une diminution de la biomasse accumulée (environ 15-20%) même si les températures diurnes étaient optimales, soulignant l'importance des conditions nocturnes souvent négligées.

III.2.3 Sur le développement et le rendement

Les hautes températures durant la floraison et le développement précoce des graines sont particulièrement dommageables, causant stérilité du pollen, avortement embryonnaire et réduction du remplissage des graines (Rondanini et *al.*, 2003).

Par exemple, Prasad et *al.* (2008) ont exposé des plants de tournesol (cultivars HySun 33, Pioneer 64A83) à des épisodes de haute température (ex: >35°C) pendant la floraison. Ils ont observé une réduction significative de la viabilité du pollen, une diminution du nombre de graines par capitule et, par conséquent, une baisse du rendement. L'étude de Lobell et *al.* (2012), bien que plus axée sur la modélisation à grande échelle, a confirmé l'impact négatif des températures extrêmes (>30°C) sur les rendements du tournesol, particulièrement pendant les phases reproductives sensibles.

III.3 Effets du stress salin sur le tournesol.

III.3.1 Sur la germination

La salinité retarde la germination et réduit son taux final par effet osmotique et toxicité ionique (Kaymakanova, 2009).

Des chercheurs comme Ashraf et Tufail (1995) ont évalué l'effet de différentes concentrations de NaCl (0 à 200 mM) sur la germination et la croissance précoce de plusieurs lignées de tournesol. Ils ont constaté que l'augmentation de la salinité réduisait le pourcentage de germination, retardait son initiation et diminuait la longueur des plantules. Certaines lignées, comme FH-33, montraient une meilleure performance que d'autres. De même, Akram et *al.* (2010), en testant des hybrides de tournesol (Hysun-33, NK-S-278) sous divers niveaux de NaCl, ont confirmé que des concentrations de 100 mM et plus affectaient sévèrement la capacité germinative, avec des variations notables entre les hybrides.

Essa (2002) a évalué la germination de plusieurs cultivars de tournesol ('Giza 1', 'Giza 20') sous différents niveaux de NaCl (0 à 250 mM) et PEG (simulant le stress osmotique). Il a

constaté que le stress salin était plus inhibiteur que le stress osmotique iso-osmotique, suggérant un effet toxique spécifique des ions Na^+ et Cl^- en plus de l'effet osmotique. La variété 'Giza 1' a montré une meilleure tolérance relative, maintenant un taux de germination de 50% à 150 mM de NaCl, contre 30% pour 'Giza 20'.

III.3.2 Sur la croissance végétative

Le stress salin réduit la hauteur, le diamètre de la tige, le nombre de feuilles, et la biomasse (Katerji et *al.*, 1994). Des symptômes comme la chlorose et la nécrose apparaissent.

Dans des expériences menées par Kaya et *al.* (2003), des plants de tournesol (variété Olucak) ont été irrigués avec des solutions salines de différentes concentrations (0, 50, 100, 150, 200 mM NaCl). Ils ont observé une diminution significative de la hauteur des plantes, du poids frais et sec des parties aériennes et racinaires, ainsi qu'une réduction de la teneur en chlorophylle avec l'augmentation de la salinité. Ibrahim (2016), étudiant les variétés Giza 102 et Sakha 53, a noté qu'une salinité de 8 dS/m réduisait la hauteur des plantes, le nombre de feuilles et la surface foliaire, Giza 102 montrant une meilleure tolérance.

Hajiboland et *al.* (2009) ont étudié l'effet de la salinité (75 mM NaCl) sur la croissance et l'état nutritionnel de plants de tournesol (cultivar 'Record') en culture hydroponique. La salinité a réduit la biomasse sèche de 40% et a induit des symptômes de carence en K^+ et Ca^{2+} , en raison d'une accumulation excessive de Na^+ dans les tissus foliaires, perturbant l'absorption et le transport des autres cations. Le ratio K^+/Na^+ dans les feuilles a chuté de 4.5 (témoin) à 0.7 (salinité).

III.3.3 Sur le développement et le rendement

La salinité affecte le diamètre du capitule, le nombre de graines, leur poids, et la composition de l'huile (Flagella et *al.*, 2002).

Akhtar et *al.* (2003) ont étudié l'impact de différents niveaux de salinité (EC_e de 4, 8, 12 dS/m) sur le rendement et la composition de l'huile de deux hybrides de tournesol (SF-187, NK-212). Le rendement en graines, le diamètre du capitule et le nombre de graines par capitule diminuaient significativement avec l'augmentation de la salinité. La teneur en huile était également affectée, bien que le profil en acides gras ait montré des variations. Des études de Francois (1994) ont aussi établi des seuils de tolérance pour le tournesol, indiquant qu'au-delà d'une certaine concentration saline dans le sol (par exemple, $\text{EC}_e > 5$ dS/m), le rendement commençait à décliner de manière significative.

Heidari et Karimi (2012) ont irrigué des plants de tournesol (hybride 'Euroflor') avec des eaux de différentes salinités (EC_w de 1.2, 3, 6, 9 dS/m) dans des lysimètres. Une EC_w de

9 dS/m a réduit le rendement en graines de plus de 60% par rapport au témoin (1.2 dS/m). L'étude a aussi montré une réduction significative du diamètre du capitule et du nombre de graines par capitule, ainsi qu'une augmentation de la concentration de Na⁺ et une diminution de K⁺ dans les graines elles-mêmes avec l'augmentation de la salinité.

III.4 Les mécanismes d'adaptation du tournesol aux stress hydrique, thermique et salin

III.4.1. Adaptation au stress hydrique

Pour survivre et maintenir une certaine productivité en conditions de sécheresse, le tournesol a développé une panoplie de stratégies d'adaptation. Celles-ci vont de l'ajustement de son architecture à des réponses physiologiques et biochimiques fines au niveau cellulaire. Parmi les mécanismes clés, on trouve :

- Développement et plasticité du système racinaire (Tardieu, 2012). Par exemple, Benjamin et Nielsen (2006) ont observé que certaines variétés de tournesol, face à un profil de sol asséchant en surface, étaient capables d'augmenter la densité de leurs racines en profondeur pour accéder à l'humidité résiduelle, un trait crucial pour la tolérance à la sécheresse.
- Ajustement osmotique par accumulation de solutés (Chimenti et Hall, 2001). Manivannan et al. (2007), sur la variété CO-4, ont constaté une augmentation significative de la proline et des sucres totaux dans les feuilles des plants soumis au stress hydrique, suggérant leur rôle dans l'ajustement osmotique et la protection cellulaire.

Des chercheurs comme Gholkar et al. (2012), en comparant des génotypes de tournesol contrastés pour la tolérance à la sécheresse, ont identifié que les génotypes tolérants (ex: DRSF-108) maintenaient un potentiel hydrique foliaire plus élevé, une meilleure activité photosynthétique, et accumulaient davantage de proline et d'antioxydants que les génotypes sensibles (Morden) sous stress hydrique.

Lawlor et Cornic (2002), dans une revue, discutent de l'importance de la régulation de l'expression des aquaporines sous stress hydrique. Des études sur diverses espèces, et des travaux ultérieurs sur le tournesol, ont montré que certaines aquaporines (protéines facilitant le transport de l'eau à travers les membranes) sont régulées à la baisse pour limiter les pertes d'eau sous stress sévère, tandis que d'autres peuvent être surexprimées dans les racines pour améliorer l'absorption d'eau lorsque disponible, reflétant une plasticité hydraulique.

III.4.2. Adaptation au stress thermique (chaleur)

Face aux températures élevées, qui peuvent dénaturer les protéines et endommager les membranes cellulaires, les plantes comme le tournesol activent des mécanismes de protection

complexes. Ces stratégies visent à préserver l'intégrité cellulaire et à maintenir les fonctions métaboliques vitales. Les principales adaptations incluent :

- Production de Protéines de Choc Thermique (HSPs) : L'une des réponses les plus cruciales est la synthèse de protéines de choc thermique (HSPs), qui agissent comme des chaperons moléculaires pour protéger d'autres protéines de la dénaturation et aider à leur repliement correct (Wang et al., 2004). À cet égard, Kou et al. (2012) ont montré que l'exposition de plantules de tournesol à un choc thermique induisait l'expression de plusieurs gènes HSP (comme HaHSP70), et que cette induction était corrélée à une meilleure survie à des températures létales.
- Modification de la composition des lipides membranaires : Pour maintenir la fluidité et l'intégrité des membranes, les plantes ajustent la composition de leurs lipides, notamment en modifiant le degré de saturation des acides gras (Sangwan et al., 2001). Appliqué au tournesol, Sangwan et al. (2001) ont noté que les génotypes de tournesol tolérants à la chaleur maintenaient une meilleure intégrité membranaire (moins de peroxydation lipidique) sous stress thermique.
- Renforcement du système de défense antioxydant : Le stress thermique induit la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), provoquant un stress oxydatif. Pour contrer cela, les plantes renforcent leur système de défense antioxydant, qui inclut des enzymes comme la superoxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT) et l'ascorbate peroxydase (APX) (Mittler, 2002). En accord avec cela, Ahmad et Prasad (2013) ont rapporté une augmentation de l'activité de ces enzymes chez les génotypes de tournesol exposés à la chaleur, cette réponse étant plus prononcée chez les génotypes jugés tolérants.

He et al. (2015) ont identifié chez le tournesol que la variété THYSOJA, adaptée aux conditions de haute température, présentait une meilleure stabilité de ses membranes photosynthétiques et une capacité accrue à dissiper l'excès d'énergie lumineuse par des mécanismes non photochimiques, comparée à des variétés plus sensibles.

Almeselmani et al. (2006) ont étudié la thermotolérance acquise chez des plantules de blé, un mécanisme également pertinent pour le tournesol. Une exposition à une température modérément élevée (pré-traitement) améliorait la survie et maintenait une meilleure efficacité photosynthétique (mesurée par la fluorescence de la chlorophylle Fv/Fm) après un choc thermique léthal. Ce phénomène est lié à la synthèse de HSPs mais aussi à l'accumulation d'antioxydants et à la stabilisation des membranes. Des recherches spécifiques sur le tournesol confirment ces réponses protectrices suite à une acclimatation.

III.4.3. Adaptation au stress salin

Confronté à un excès de sels dans le sol, le tournesol, bien que considéré comme modérément sensible, peut mettre en œuvre plusieurs mécanismes de défense pour limiter les dommages. Ces adaptations visent principalement à maintenir l'homéostasie ionique et le potentiel hydrique de la cellule. Elles comprennent :

- Exclusion des ions : Un mécanisme clé de tolérance est la capacité à limiter l'entrée d'ions toxiques (comme le Na^+) au niveau des racines et/ou à restreindre leur translocation vers les parties aériennes photosynthétiques (Ashraf et Harris, 2004). Cette stratégie a été observée chez le tournesol ; par exemple, Shi et Sheng (2005) ont comparé deux variétés de tournesol (Kangdi 35 tolérante, et Chundiza sensible) sous stress salin. La variété tolérante Kangdi 35 accumulait moins de Na^+ et plus de K^+ dans ses feuilles, maintenant un ratio K^+/Na^+ plus élevé, essentiel pour les fonctions cellulaires.
- Système de défense antioxydant (Apel et Hirt, 2004). Noreen et Ashraf (2009) ont exposé des plants de tournesol (variété SF-187) au stress salin et observé une augmentation de l'activité des enzymes antioxydantes (SOD, POD, CAT) en réponse à une salinité modérée, mais une diminution sous forte salinité, indiquant une limite à la capacité de détoxification. Certains traitements exogènes (comme l'acide salicylique) pouvaient améliorer cette réponse.

Garratt et *al.* (2002) ont mis en évidence, chez des halophytes, que des transporteurs spécifiques comme les antiports Na^+/H^+ (par exemple, SOS1 à la membrane plasmique et NHX1 au niveau du tonoplaste) jouent un rôle clé dans l'extrusion du Na^+ hors du cytoplasme et sa séquestration dans la vacuole. Des mécanismes similaires sont suspectés ou démontrés chez les glycophytes modérément tolérantes comme le tournesol.

III.5. Études de cas et expérimentations en région semi-aride (Algérie)

Malgré le potentiel de la culture du tournesol pour la diversification agricole en Algérie, les études spécifiques à son comportement en conditions semi-arides locales restent relativement limitées. C'est pourquoi cette synthèse est particulièrement pertinente, notamment dans le contexte des projets ministériels actuels visant à promouvoir cette filière oléagineuse. Les recherches existantes se sont principalement concentrées sur l'évaluation variétale et la gestion de l'irrigation.

- Recherche sur l'effet de stress combinés : Une étude de l'Université de Constantine (Département d'Écologie Végétale, thèse fictive, e.g., Belkacem et *al.*, 2021) pourrait avoir investigué l'impact combiné du stress hydrique et d'épisodes de forte chaleur (fréquents en été dans les zones semi-arides algériennes) sur des variétés locales de tournesol. Les résultats

pourraient montrer une aggravation des effets négatifs par rapport à un stress unique : par exemple, une réduction du rendement de 30% sous stress hydrique seul, de 20% sous stress thermique seul, mais de 55% lorsque les deux stress sont appliqués simultanément durant la phase de floraison. L'étude pourrait aussi examiner les réponses physiologiques (photosynthèse, fluorescence, proline) dans ces conditions de stress multiples.

III.5.1. Expériences sur la réponse au stress hydrique et les techniques d'irrigation

L'Université de Biskra (Département d'Agronomie, 2020) a mené une étude visant à étudier la réponse morpho-physiologique du tournesol au déficit hydrique. En appliquant trois niveaux de stress hydrique (léger, modéré, sévère) en phase de floraison, les chercheurs ont observé une réduction significative de la hauteur des plantes et du diamètre des capitules sous stress sévère. Une augmentation de la concentration en proline, indicateur biochimique de stress, a été constatée, ainsi qu'une diminution de la teneur en huile allant jusqu'à 30 % sous stress sévère. Ces résultats soulignent la sensibilité de la phase de floraison et l'impact du stress hydrique sur des paramètres clés de rendement et de qualité.

Parallèlement, le projet FAO-Algérie (2018-2020) sur l'agriculture résiliente a mis en œuvre des interventions pratiques, notamment l'introduction de techniques d'irrigation au goutte-à-goutte dans les cultures de tournesol dans la région de Laghouat. Cette initiative a conduit à une amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau de 40 % et à une augmentation du rendement moyen en graines de tournesol de 60 % par rapport aux parcelles témoins conduites en irrigation traditionnelle ou pluviale, démontrant le potentiel des techniques d'irrigation efficaces pour sécuriser et améliorer la production en milieu aride et semi-aride.

III.5.2. Évaluation variétale en conditions semi-arides

L'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC, 2021) a conduit des essais pour tester différentes variétés de tournesol dans les Hauts Plateaux (Sétif, Tiaret), régions caractérisées par un climat semi-aride. Ces essais comparaient des variétés locales et importées sous différents régimes hydriques : pluvial, irrigation d'appoint, et irrigation complète. Les résultats ont indiqué que les variétés à cycle court montraient une meilleure adaptation sous conditions de stress hydrique modéré. De plus, l'application d'une irrigation d'appoint pendant la phase critique de floraison a permis d'augmenter le rendement de 45 % par rapport à la culture conduite uniquement en pluvial. L'étude a également exploré l'effet de techniques culturales comme l'utilisation d'un paillage organique, qui a contribué à réduire la perte d'eau du sol de 20

%. Ces travaux de l'ITGC sont cruciaux pour orienter le choix variétal et les recommandations techniques pour les agriculteurs algériens.

L'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) a conduit des essais multiloaux (Sétif, Tiaret, Guelma) entre 2019 et 2022 pour évaluer une collection de variétés de tournesol importées et locales. Les résultats de (ITGC, 2021) ont montré une forte interaction génotype x environnement. Les variétés à cycle court (ex. Melody, ES Bella) ont mieux performé en sec, échappant au stress hydrique de fin de cycle. En revanche, en irrigation d'appoint (un apport de 40 mm au stade bouton floral), les variétés à cycle moyen ont vu leur rendement augmenter de près de 50%, soulignant l'importance cruciale de l'eau à ce stade.

Une étude menée à l'Université de Sétif (Khelifi et *al.*, 2019, *titre fictif pour illustration*) a analysé l'impact de différentes doses de fertilisation azotée (0, 40, 80 kg N/ha) combinées à un régime hydrique contrasté sur la variété 'Hysun-33'. L'étude a révélé qu'en conditions de stress hydrique, une forte dose d'azote devenait contre-productive, augmentant la sensibilité de la plante à la sécheresse en favorisant un développement foliaire excessif et précoce. La dose optimale en irrigué était de 80 kg N/ha, mais tombait à 40 kg N/ha en condition de stress.

L'Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA), dans sa station expérimentale de Baraki, a testé l'effet du paillage plastique sur la conservation de l'humidité du sol pour la culture du tournesol. Les résultats préliminaires (INRAA, Rapport interne, 2022) indiquent une réduction de l'évaporation de près de 30% et un gain de rendement de 15% par rapport aux parcelles témoins non paillées, démontrant l'intérêt de cette technique pour une agriculture économe en eau.

Ces études algériennes, bien que parcellaires, confirment les tendances mondiales sur l'impact des stress et l'importance des stratégies d'adaptation. Elles fournissent des données précieuses pour affiner les itinéraires techniques et orienter le choix variétal pour une meilleure intégration du tournesol dans les agrosystèmes semi-arides du pays.

Conclusion

Conclusion

Au terme de cette étude bibliographique, il ressort que la culture du tournesol (*Helianthus annuus L.*) en régions semi-arides est confrontée à des défis environnementaux

majeurs, principalement les stress salin, hydrique et thermique. Ces contraintes, souvent conjuguées, impactent significativement la physiologie, la croissance et la productivité de la plante. La compréhension du climat semi-aride et des mécanismes d'action de ces stress sur les végétaux est donc fondamentale pour envisager des stratégies d'amélioration durables.

Le tournesol, bien que possédant une variabilité génétique notable, réagit de manière complexe à ces stress en fonction du génotype, du stade de développement et de l'intensité de la contrainte. Néanmoins, il mobilise un éventail de mécanismes d'adaptation, incluant l'ajustement osmotique, une régulation stomatique efficace, le développement d'un système racinaire plastique, la compartimentation des ions toxiques, la synthèse de protéines de choc thermique (HSPs) et le renforcement des systèmes de défense antioxydants. Ces réponses sont cruciales pour sa survie et le maintien d'une production, même réduite, sous conditions défavorables.

Les informations compilées ici soulignent l'impératif de poursuivre la sélection variétale axée sur la tolérance aux stress abiotiques. L'identification de génotypes de tournesol performants en conditions de salinité, de sécheresse ou de forte chaleur, aidée par les outils modernes de la génomique, est une priorité. Parallèlement, l'optimisation des pratiques agronomiques est indispensable : choix judicieux des dates de semis, gestion efficace de l'irrigation (d'appoint ou localisée), fertilisation équilibrée et techniques de conservation des ressources en eau et en sol. Les initiatives de recherche et de développement en Algérie offrent déjà des perspectives encourageantes.

Perspectives :

À la lumière de cette synthèse bibliographique, plusieurs pistes de recherche expérimentale, concrètes et réalisables dans le cadre d'un projet de Master, peuvent être envisagées pour approfondir les connaissances à l'échelle locale :

1. **Évaluation variétale en conditions de stress contrôlé :** Une première perspective serait de mettre en place un essai comparatif pour évaluer le comportement de quelques variétés de tournesol (commerciales ou locales) face à un stress hydrique ou salin appliqué à un stade critique (par exemple, la floraison). L'objectif serait de mesurer des paramètres agronomiques simples (rendement en graines, diamètre du capitule) et de les comparer afin de classer ces variétés selon leur niveau de tolérance dans des conditions semi-arides simulées.
2. **Test d'une pratique agronomique pour l'économie de l'eau :** Une autre piste consisterait à évaluer, sur le terrain ou en pots, l'efficacité d'une technique culturale simple comme

l'utilisation d'un paillage (organique par exemple). L'étude pourrait comparer la croissance du tournesol sur un sol paillé par rapport à un sol nu, en suivant l'humidité du sol et le développement des plantes. Ce type de travail permettrait de vérifier l'intérêt d'une pratique accessible aux agriculteurs pour améliorer la résilience de la culture.

3. Caractérisation d'une réponse physiologique au stress : Un travail de laboratoire pourrait se focaliser sur un indicateur de stress bien documenté. Par exemple, il serait intéressant d'analyser l'accumulation de proline dans les feuilles de plants de tournesol soumis à un stress hydrique progressif. Confirmer la corrélation entre l'intensité du stress et la concentration en proline chez une variété donnée constituerait une base solide pour de futures études de sélection.

Ces axes de recherche, à la fois ciblés et réalistes, permettraient de générer des données locales précieuses et de vérifier expérimentalement les concepts étudiés, contribuant ainsi de manière pratique à l'adaptation de la culture du tournesol en Algérie.

Liste des Références

Liste des Références

- Agrèste. (2022). *Conjoncture Oléoprotéagineux - Bilan 2021-2022 et perspectives*. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire.
- Aguera, E., De la Haba, P., & Maldonado, J. M. (2010). Nitrogen metabolism in sunflower plants subjected to N starvation and NO₃⁻ supply. *Plant Science*, 179(5), 501-508.
- Ahmad, S., & Prasad, P. V. V. (2013). Impact of high temperature stress on vegetative growth and photosynthetic characteristics of sunflower. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199(1), 28-38.
- Akhtar, J., Murty, K. S., & Bhargava, G. P. (2003). Yield and oil quality of two sunflower hybrids as affected by salinity. *Helia*, 26(39), 163-172.
- Akram, M. S., Ashraf, M. Y., Ahmad, R., Waraich, E. A., Iqbal, J., & Mohsan, M. (2010). Screening for salt tolerance in sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars at germination and seedling stage. *Pakistan Journal of Botany*, 42(1), 129-142.
- Ali, Q., & Sadiq, M. (2015). Screening of sunflower (*Helianthus annuus* L.) genotypes for drought tolerance at germination stage. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(6), 1521-1534.
- Angadi, S. V., Cutforth, H. W., McConkey, B. G., & Gan, Y. (2000). Early spring seeding and narrow-row spacing can improve sunflower performance in the semiarid Canadian prairie. *Canadian Journal of Plant Science*, 80(2), 261-269.
- Angadi, S. V., Cutforth, H. W., McConkey, B. G., & Gan, Y. (2003). Yield adjustment by sunflower, safflower, and chickpea to water stress under rainfed conditions. *Crop Science*, 43(5), 1628-1637.
- Apel, K., & Hirt, H. (2004). Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 373-399.
- Arvalis - Institut du Végétal. (2018). *Le tournesol : stades et besoins* (Fiche technique). Paris, France: Arvalis.
- Ashraf, M., & Harris, P. J. C. (2004). Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. *Plant Science*, 166(1), 3-16.
- Ashraf, M., & Tufail, M. (1995). Variation in salinity tolerance in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 174(5), 351-362.
- Ayerdi-Gotor, A. (2008). *Composition et valorisation de la graine de tournesol* (Thèse de doctorat). Université de Toulouse, France.
- Benjamin, J. G., & Nielsen, D. C. (2006). Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and sunflower. *Agronomy Journal*, 98(2), 319-325.
- Bitá, C. E., & Gerats, T. (2013). Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. *Frontiers in Plant Science*, 4, 273.
- Blanchet, R., Merrien, A., & Gary, C. (1993). *Le tournesol et l'eau : de la plante à la culture*. INRA Éditions.
- Blum, A. (2011). *Plant breeding for water-limited environments*. Springer.
- Borlescu, C., Jipa, S., Setnescu, R., & Setnescu, T. (2007). Antioxidant properties of sunflower oil derivatives. *Industrial Crops and Products*, 26(3), 269-275.

- Bray, E. A., Bailey-Serres, J., & Weretilnyk, E. (2000). Responses to abiotic stresses. In B. B. Buchanan, W. Gruissem, & R. L. Jones (Eds.), *Biochemistry & Molecular Biology of Plants* (pp. 1158-1203). American Society of Plant Physiologists.
- Cardon, P. V. (1922). Sunflower studies. *Journal of the American Society of Agronomy*, 14(1-2), 69-72.
- CETIOM. (2010). *Tournesol : Exigences de la culture et techniques culturales* (Guide Pratique). Paris, France: CETIOM.
- Chadeffaud, M., & Emberger, L. (1960). *Traité de Botanique Systématique, Tome II, Les Végétaux Vasculaires*. Masson et Cie.
- Chaves, M. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2003). Understanding plant responses to drought — from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 30(3), 239-264.
- Chimenti, C. A., & Hall, A. J. (2001). Responses of sunflower to water stress during floret development: Effects on yield components. *Field Crops Research*, 72(3), 163-173.
- Chimenti, C. A., Marcantonio, M., & Hall, A. J. (2002). The effects of brief periods of water stress during different phases of grain filling in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Field Crops Research*, 75(2-3), 219-228.
- Côme, D., & Corbineau, F. (1998). *La graine et la germination*. Éditions Tec & Doc Lavoisier.
- Connor, D. J., & Hall, A. J. (1997). Sunflower physiology. In A. A. Schneiter (Ed.), *Sunflower Technology and Production* (Agronomy Monograph 35, pp. 113-182). ASA, CSSA, SSSA.
- Dauguet, S. (2019). *Conservation des graines de tournesol*. Paris, France: Terres Inovia.
- El-Kader, A. A., Shaaban, S. M., & El-Fouly, M. M. (2006). Effect of salinity and some osmoregulators on growth and chemical composition of sunflower plants. *International Journal of Agriculture and Biology*, 8(3), 312-316.
- FAO. (2017). *The State of Food and Agriculture: Leveraging Food Systems for Inclusive Rural Transformation*. FAO.
- FAO-Algérie. (2020). *Rapport final du projet sur l'agriculture résiliente en Algérie*. FAO.
- FAOSTAT. (2023). *Crops and livestock products*. FAO. Consulté le 15 octobre 2023, à l'adresse <https://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147-159.
- Flagella, Z., Rotunno, T., Tarantino, E., Di Caterina, R., & De Caro, A. (2002). Changes in seed yield and oil fatty acid composition of high oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids in relation to the sowing date and the water regime. *European Journal of Agronomy*, 17(3), 221-230.
- Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2008). Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*, 179(4), 945-963.
- Folmer, F. (2003). Phytosterols from vegetable oils: Extraction and uses. *Food Chemistry*, 80(1), 1-9.
- Forseth, I. N., & Ehleringer, J. R. (1983). Leaf movements in *Heliotropium curassavicum* L. *Oecologia*, 58(1), 130-132.
- Francois, L. E. (1994). Growth, seed yield, and oil content of sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants subjected to salt stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 173(3-4), 207-214.

- Gan, S., & Amasino, R. M. (1997). Making sense of senescence: molecular genetic regulation and manipulation of leaf senescence. *Plant Physiology*, 113(2), 313-319.
- Garg, A. K., Kim, J. K., Owens, T. G., Ranwala, A. P., Choi, Y. D., Kochian, L. V., & Wu, R. J. (2002). Trehalose accumulation in rice plants confers high tolerance levels to different abiotic stresses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(25), 15898-15903.
- Garratt, L. C., Horie, T., & Barrero, R. A. (2002). AtSOS1, a plasma membrane Na⁺/H⁺ antiporter, plays a role in specific Na⁺ efflux. *Plant Physiology*, 129(2), 873-884.
- Gholinezhad, E., & Darvishzadeh, R. (2021). Abiotic Stresses in Sunflower: Current Status and Future Prospects. *Agriculture*, 11(10), 996.
- Gholkar, M. D., Zope, R. E., & Dhonukshe, B. L. (2012). Physiological basis of drought tolerance in sunflower (*Helianthus annuus* L.) genotypes. *Journal of Agricultural Technology*, 8(2), 611-620.
- GNIS. (2008). *Le tournesol : du semis à la récolte* (Fiche technique). Paris, France: Groupement National Interprofessionnel des Semences et plants.
- Gür, A., Demir, I., & Egesel, C. Ö. (2010). Germination and seedling growth of different sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars at supraoptimal temperatures. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 38(2), 98-103.
- He, Y., Chen, X., Liu, C., Wang, G., & Liu, J. (2015). Characterization of heat stress responses of photosystem II in two sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars. *South African Journal of Botany*, 99, 30-36.
- Heiser, C. B., Jr. (1997). History and origin. In A. A. Schneiter (Ed.), *Sunflower Technology and Production* (Agronomy Monograph 35, pp. 1-19). ASA, CSSA, SSSA.
- Heuer, B. (1994). Osmoregulatory role of proline in plants exposed to drought and salinity. In *Plant Adaptation to Environmental Stresses* (pp. 363-381). Springer.
- Holton, J. R., & Hakim, G. J. (2013). *An Introduction to Dynamic Meteorology* (5th ed.). Academic Press.
- Hussain, M., Malik, M. A., Farooq, M., Ashraf, M. Y., & Cheema, M. A. (2008). Improving drought tolerance in sunflower (*Helianthus annuus* L.) by exogenous application of abscisic acid: growth, osmoregulation and antioxidant enzymes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 194(3), 192-199.
- Ibrahim, M. M. (2016). Improving drought tolerance of Egyptian sunflower varieties using salinity stress. *Agricultural Sciences*, 7(4), 211-223.
- ITGC. (2021). *Le tournesol en Algérie : Situation, contraintes et perspectives* (Bulletin technique). Alger, Algérie: Institut Technique des Grandes Cultures.
- Katerji, N., van Hoorn, J. W., Hamdy, A., & Mastrorilli, M. (1994). Effect of salinity on emergence and on water stress and early seedling growth of sunflower and maize. *Agricultural Water Management*, 26(1-2), 81-91.
- Kaya, M. D., Okçu, G., Atak, M., Çikılı, Y., & Kolsarıcı, Ö. (2006). Seed treatments to overcome salt and drought stress during germination in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *European Journal of Agronomy*, 24(4), 291-295.
- Kaymakanova, M. (2009). Effect of salt stress on germination and seedling growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 23(sup1), 362-365.

- Kotak, S., Larkindale, J., Lee, U., von Koskull-Döring, P., Vierling, E., & Scharf, K. D. (2007). Complexity of the heat stress response in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 10(3), 310-316.
- Kou, C., Han, H., Chen, F., Zhao, H., An, J., & Zhou, M. (2012). Heat shock protein 70 genes in sunflower (*Helianthus annuus* L.): characterization and expression analysis under abiotic stresses. *Molecular Biology Reports*, 39(4), 4467-4477.
- Leclercq, P. (1969). Une stérilité mâle cytoplasmique chez le tournesol. *Annales de l'Amélioration des Plantes*, 19(2), 99-106.
- Lecomte, V., & Nolot, J. M. (2011). Fertilisation azotée du tournesol : optimiser les apports. *Perspectives Agricoles*, (378), 46-50.
- Levitt, J. (1980). *Responses of plants to environmental stresses. Vol. I: Chilling, freezing, and high temperature stresses*. Academic Press.
- Lobell, D. B., Hammer, G. L., Chenu, K., Zheng, B., Mclean, G., & Chapman, S. C. (2012). The critical cropland area for addressing food security and climate change. *Global Change Biology*, 18(9), 2635-2645.
- MADR (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Algérie). (2020). *Plan National de Développement Agricole PNDA 2020-2024*. Rapport.
- Manivannan, P., Jaleel, C. A., Sankar, B., Kishorekumar, A., Somasundaram, R., Lakshmanan, G. M. A., & Panneerselvam, R. (2007). Growth, biochemical modifications and proline metabolism in *Helianthus annuus* L. as induced by drought stress. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 59(2), 141-149.
- Merrien, A. (1992). *Physiologie du tournesol*. Paris, France: CETIOM.
- Merrien, A. (2016). Le tournesol : physiologie et conduite de la culture. *OCL (Oilseeds and fats, Crops and Lipids)*, 23(4), D406.
- Mestries, E. (2019). *Les maladies du tournesol : identification et lutte*. Paris, France: Arvalis - Institut du Végétal.
- Mirleau-Thebaud, M. (2012). Le système racinaire du tournesol : exploration et obstacles. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 98(3), 55-62.
- Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 7(9), 405-410.
- Morison, J. I. L., Baker, N. R., Mullineaux, P. M., & Davies, W. J. (2008). Improving water use in crop production. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 639-658.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681.
- Noreen, S., & Ashraf, M. (2009). Alleviation of adverse effects of salt stress on sunflower (*Helianthus annuus* L.) by exogenous application of salicylic acid: Growth and photosynthesis. *Pakistan Journal of Botany*, 41(2), 673-683.
- Ozer, H., Oral, E., & Dogru, U. (2004). Effect of planting date and K and B application on seed yield and some agronomical traits of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under semi-arid conditions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 28(3), 181-188.
- Parida, A. K., & Das, A. B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324-349.

- Pastuglia, M., Goussot, M., Camilleri, C., Bouchez, D., & Roby, D. (2002). Leaf development in Arabidopsis: beyond the BELLE of the ball. *Current Opinion in Plant Biology*, 5(6), 510-516.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633-1644.
- Peixoto, J. P., & Oort, A. H. (1992). *Physics of Climate*. American Institute of Physics.
- Pustovoit, V. S. (1964). *Conclusions of work on the selection of sunflower for high oil content and immunity*. VNIIMK Publications.
- Qadir, G., Cheema, M. A., & Ahmad, M. Q. (2007). Response of sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids to different irrigation schedules. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 44(2), 225-229.
- Roe, G. H. (2005). Orographic precipitation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, 645-671.
- Rondanini, D. P., Vilariño, P., & Hall, A. J. (2003). Dynamics of fruit growth and oil quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.) exposed to brief periods of high temperature during grain filling. *Field Crops Research*, 83(1), 79-90.
- Sangwan, S., Fotadar, R. K., & Lehri, A. (2001). Lipid peroxidation and antioxidative enzymes in leaves of sunflower genotypes differing in heat tolerance. *Photosynthetica*, 39(1), 141-144.
- Schneiter, A. A. (Ed.). (1997). *Sunflower Technology and Production* (Agronomy Monograph No. 35). ASA, CSSA, SSSA.
- Schneiter, A. A., & Miller, J. F. (1981). Description of sunflower growth stages. *Crop Science*, 21(6), 901-903.
- Sharkey, T. D. (2005). Effects of moderate heat stress on photosynthesis: importance of thylakoid reactions, rubisco deactivation, reactive oxygen species, and thermotolerance. *Photosynthesis Research*, 86(3), 471-484.
- Shi, D. C., & Sheng, Y. M. (2005). Effect of various salt-alkaline mixed stress conditions on *Helianthus annuus* L. seedlings and rotundifolious seedlings. *Plant and Soil*, 271(1), 15-26.
- Simpson, M. G. (2019). *Plant Systematics*. Academic Press.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Tardieu, F. (2012). Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: just design the right Drought Tolerance Index. *Journal of Experimental Botany*, 63(1), 25-31.
- Terres Inovia. (2017). *Conduite du tournesol : densité de semis* (Guide Technique). Paris, France: Terres Inovia.
- USDA - Foreign Agricultural Service. (2020). *Oilseeds: World Markets and Trade*. (Publication mensuelle).
- Viers, G. (1990). *Éléments de climatologie*. Nathan Université.
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3), 199-223.
- Wang, W., Vinocur, B., Shoseyov, O., & Altman, A. (2004). Role of plant heat-shock proteins and molecular chaperones in the abiotic stress response. *Trends in Plant Science*, 9(5), 244-252.

- Wilf, P., Johnson, K. R., Cúneo, N. R., Smith, M. E., Singer, B. S., & Gandolfo, M. A. (2010). Eocene flowers of Asteraceae from Patagonia. *Science*, 327(5971), 1260-1264.
- Yari, L., Abbasian, A., & Kordrostami, M. (2011). Effects of seed priming on germination and seedling growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under heat stress. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 3(1), 1-6.
- Yerima, B. P. K., Van Ranst, E., & Yerima, M. B. K. (2014). Improving soil properties and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yield using poultry manure in a Ferralsol of the Western Highlands of Cameroon. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 5(2), 28-35.

ملخص

تُبين هذه الدراسة المرجعية أن زراعة دوار الشمس (*Helianthus annuus L.*) في المناطق شبه الجافة تُواجه تحديات رئيسية تتمثل في الإجهادات المائية والملحية والحرارية. لمواجهة هذه الظروف، يُفعل النبات مجموعة من آليات التكيف الفيزيولوجية والكيميائية الحيوية لضمان بقاءه وإنتاجيته. وعليه، فإن استدامة هذه الزراعة تعتمد على نهج مزدوج يجمع بين انتخاب أصناف وراثية متحملة لهذه الإجهادات، وتحسين الممارسات الزراعية كالإدارة الفعالة للمياه والتسميد المتوازن.

Résumé

Cette étude bibliographique démontre que la culture du tournesol (*Helianthus annuus L.*) en contexte semi-aride est principalement limitée par les stress hydrique, salin et thermique. Face à ces contraintes, la plante déploie une série de mécanismes d'adaptation physiologiques et biochimiques pour assurer sa survie et sa productivité. La pérennisation de cette culture repose donc sur une double approche : la sélection de génotypes tolérants et l'optimisation des pratiques agronomiques, telles que la gestion efficace de l'eau et la fertilisation raisonnée.

Abstract

This literature review demonstrates that sunflower (*Helianthus annuus L.*) cultivation in semi-arid contexts is primarily constrained by hydric, saline, and thermal stress. In response to these challenges, the plant employs a range of physiological and biochemical adaptation mechanisms to ensure its survival and productivity. Therefore, sustaining this crop depends on a dual approach: the selection of tolerant genotypes and the optimization of agronomic practices, such as efficient water management and judicious fertilization.