

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ibn Khaldoun –Tiaret-

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département de Biologie



Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master académique

Domaine : "Sciences de la Nature et de la Vie"

Filière : Sciences biologiques

Spécialité : Génétique moléculaire et amélioration des plantes

Thème

**Effet du stress de salin sur la germination du tournesol
(*Helianthus annuus* L.).**

Soutenu le : 25/06/2025

Présenté par :

MERZOUGUI Farouk Souhail

LAKHDAR Abderezak

Jury :

Grade

Président : Dr. FETOUHI B.

MCA

Promoteur : Dr. BERRABAH H.

MCA

Examineur : Dr. BOUFARES K.

MCA

Invité :

Année universitaire : 2024 -2025

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir donné la force et la patience nécessaires pour accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements aux membres du jury, Monsieur FETOUHI Bekhaled et Monsieur BOUFARES Khaled, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail. Leurs remarques pertinentes et leur regard critique ont été d'une grande importance pour l'enrichissement de ce mémoire.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à Monsieur BERRABAH Hicham, notre encadrant, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son encadrement rigoureux et ses orientations scientifiques ont été d'une grande valeur pour mener à bien ce travail.

Nous remercions l'ensemble des membres du Laboratoire de Biotechnologie de notre université, pour l'accueil chaleureux qui nous a été réservé, ainsi que pour les moyens techniques et scientifiques mis à notre disposition. Leur soutien et leur expertise ont largement contribué à l'avancement de ce projet.

Enfin, nos remerciements vont à tous les enseignants de notre parcours universitaire, qui nous ont transmis les connaissances et les compétences nécessaires à la réalisation de ce mémoire.

Farouk et Abderezak

Dédicace

À mon père si cher, que Dieu lui accorde sa paix et
l'accueille dans sa lumière.

Ton souvenir ne me quitte jamais. Tu as été mon exemple,
mon appui, celui qui voyait en moi un avenir.

Ta présence continue de m'inspirer à avancer avec force et
dignité.

À ma mère, trésor d'amour, de patience et de prières,
ton soutien inconditionnel a été ma lumière dans les
moments d'ombre. Je te dois tant.

À mes frères : Rayane, Ameer, Abdelkader, Yacine,
Nadhir et Abdelatif,

À mes sœurs, à ma famille, à mes amis,

Et à toutes les personnes qui m'ont soutenu, de près ou de
loin, dans ce chemin.

Avec toute ma reconnaissance et mon amour sincère.

Farouk

Dédicace

Au nom d'Allah, le plus puissant et le plus grand merci lui revient de m'avoir aidé tout au long de mes années d'études.

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour :

À la plus merveilleuse des mamans et mon enseignante, qui m'as toujours soutenu et m'as bénie par ses prières, merci d'être plus qu'une mère pour moi, ma confidente, mon amie, ma sœur, ma boussole quand je perds le nord, merci maman.

À mon très cher père, de tous les pères tu as toujours été le meilleur, tu n'as pas cessé de me soutenir et de m'épauler durant toutes mes années d'études notamment lors de la réalisation des prélèvements de mon mémoire, merci papa.

Aux personnes les plus chères de mon cœur, mes frères et mes sœurs, Je vous aime et je vous souhaite un avenir plein d'essor et de réussite. À tous ma famille Lakhdar et Babou

À mon binôme et ami Merzougui Farouk.

Abderezak

Résumé

Le présent travail vise à étudier l'effet du stress salin sur la germination de deux variétés de tournesol (*Helianthus annuus L.*), à savoir 'Serina' et 'Suzuka'. L'objectif principal est d'évaluer l'impact de différentes concentrations en NaCl sur les paramètres de germinations, notamment le taux de germination, la vitesse de germination ainsi que la longueur de la radicule et de la tigelle de tournesol.

L'huile de tournesol est particulièrement appréciée par les consommateurs algériens cependant il existe une divergence entre la production locale et la consommation ce qui est comblé par le retour à l'importation. Dans ce cadre le gouvernement algérien suit une stratégie de réhabilitation et de développement des cultures oléagineuses y compris le tournesol.

La salinisation des terres constitue un problème majeur à l'expansion agricole en Algérie, surtout dans les régions arides et semi-arides où la situation ne fait que se détériorer.

Les résultats obtenus montrent une tolérance de tournesol à la salinité dans le stade de germination par rapport aux autres plantes oléagineuses. La variété Serina présente un taux et une vitesse de germination élevés aux concentrations croissantes de NaCl (0 mM-120 mM). Comme elle révèle un indice et un coefficient de vigueur de germination plus marqué que la variété Suzuka.

D'autre part, chez les deux variétés, les différentes concentrations de NaCl affectent significativement la longueur de la tigelle plus que celle de la radicule.

Mots clé : Tournesol, (*Helianthus annuus L.*), germination, stress salin, Algérie.

Abstract

The present work aims to study the effect of salt stress on the germination of two sunflower varieties (*Helianthus annuus* L.), namely 'Serina' and 'Suzuka'. The main objective is to evaluate the impact of different NaCl concentrations on germination parameters, specifically the germination rate, germination speed, and the length of the sunflower radicle and plumule. Sunflower oil is particularly appreciated by Algerian consumers; however, there is a discrepancy between local production and consumption, which is filled by returning to imports. In this context, the Algerian government is following a strategy of rehabilitation and development of oilseed crops, including sunflower.

Soil salinization is a major problem for agricultural expansion in Algeria, especially in arid and semi-arid regions where the situation is only getting worse.

The results obtained show sunflower tolerance to salinity at the germination stage compared to other oilseed plants. The Serina variety shows a high rate and speed of germination at increasing NaCl concentrations (0 mM-120 mM). As it reveals a more pronounced germination index and vigor coefficient than the Suzuka variety.

On the other hand, in both varieties, the different concentrations of NaCl significantly affect the hypocotyl length more than that of the radicle.

Keywords : Sunflower, (*Helianthus annuus* L.), germination, salt stress, Algeria.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير الإجهاد الملحي على إنتاش نوعين من دوار الشمس (*Helianthus annuus* L.) ، وهما 'Serina' و 'Suzuka'. الهدف الرئيسي هو تقييم تأثير تركيزات مختلفة من NaCl على معايير الإنبات، لا سيما معدل الإنبات، سرعة الإنبات وكذلك طول السويقة والجذير السفلي لدوار الشمس.

زيت دوار الشمس يحظى بتقدير خاص من قبل المستهلكين الجزائريين، ومع ذلك، هناك تباين بين الإنتاج المحلي والاستهلاك، مما يتم تعويضه بالعودة إلى الاستيراد. في هذا الإطار، تتبع الحكومة الجزائرية استراتيجية لإعادة تأهيل وتطوير المحاصيل الزيتية بما في ذلك دوار الشمس .

ملوحة الأراضي تشكل مشكلة رئيسية أمام التوسع الزراعي في الجزائر، خاصة في المناطق الجافة وشبه الجافة حيث تتدهور الوضعية باستمرار .

تُظهر النتائج التي تم الحصول عليها تحمل عباد الشمس للملوحة في مرحلة الإنبات مقارنةً بالنباتات الزيتية الأخرى. يظهر صنف سيرينا معدل وسرعة إنبات مرتفعين عند التركيزات المتزايدة من NaCl (0 مليمول-120 مليمول). حيث أنها تظهر مؤشرًا ومعاملًا لنشاط الإنبات أكثر وضوحًا من صنف سوزوكا .

من ناحية أخرى، في كلا الصنفين، تؤثر تركيزات مختلفة من NaCl بشكل كبير على طول السويقة أكثر من طول الجذير .

الكلمات المفتاحية: دوار الشمس، (*Helianthus annuus* L.)، الإنتاش، الإجهاد الملحي، الجزائر.

Liste des figures

Figure 01. Champs de tournesol	11
Figure 02. Traitement du tournesol et produits dérivés	12
Figure 03. L'effet de stress salin sur le tournesol	15
Figure 04. Tournesol en état de stress hydrique	17
Figure 05. La réponse de la plante au stress abiotique	18
Figure 06. Représentation schématique des réponses de défense de la plante aux différents stress biotiques et abiotiques.	18
Figure 07. Schéma descriptive de la pression osmotique et potentiel hydrique dans des sols salin et non salin	20
Figure 08. Les phases de germination de tournesol	23
Figure 09. Représentation schématique des voies de transport possibles pour l'absorption de Na^+ et Cl	25
Figure 10. Teneur en amidon des feuilles d'arabidopsis avant (NA) et après une acclimatation au froid de 14 jours (ACC) à 4°C	27
Figure 11. Les voies du métabolisme des glucides de phosphate de triose et d'hydrolyse de l'amidon	29
Figure 12. Diminution du pourcentage de germination avec l'augmentation de la salinité	32
Figure 13. Graines de tournesol variété 'Suzuka'	34
Figure 14. Graines de tournesol variété 'Serina'	34
Figure 15. Mise des boîtes de pétri en Gerموir	36
Figure 16. Le taux de germination (TG) de deux variétés du tournesol 'Serina' et 'Suzuka' en fonction de différentes concentrations de (NaCl)	39
Figure 17. L'Indice de Vigueur de Germination (IVG) de deux variétés du tournesol 'Serina' et 'Suzuka' en fonction de différentes concentrations de (NaCl)	40
Figure 18. Le Temps Moyen de Germination (TMG) de deux variétés du tournesol 'Serina' et 'Suzuka' en fonction de différentes concentrations de (NaCl)	42
Figure 19. La vitesse de Germination (VG) de deux variétés du tournesol 'Serina' et 'Suzuka' en fonction de différentes concentrations de (NaCl)	43
Figure 20. Le coefficient de vigueur de germination (CV) de deux variétés du tournesol 'Serina' et 'Suzuka' en fonction de différentes concentrations de (NaCl)	45
Figure 21. L'énergie germinative (EG) de deux variétés du tournesol 'Serina' et 'Suzuka' en fonction de différentes concentrations de (NaCl)	46

Figure 22. La longueur de la racine (LR) deux variétés du tournesol ‘Serina’ et ‘Suzuka’ en fonction de différentes concentrations de (NaCl) 48

Figure 23. La longueur de la tige (LT) deux variétés du tournesol ‘Serina’ et ‘Suzuka’ en fonction de différentes concentrations de (NaCl) 49

Liste des tableaux

Tableau 1. La classification taxonomique	7
Tableau 02. Effets du potentiel hydrique sur le pourcentage de germination	24
Tableau 03. Différentes concentrations des solutions salines	35

Liste des abréviations

NaCl : Chlorure de sodium

TG : Taux de germination

IVG : Indice de vigueur de germination

TMG : Temps moyenne de germination

VG : Vitesse de germination

CV : Coefficient de vigueur

EG : Energie germinative

ITGC : Institut technique des grandes cultures

Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Résumé	III
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Liste des abréviations	VI
Table des matières	VII
Introduction	1
 <i>Synthèse bibliographique</i>	
I. Généralités sur le tournesol	5
I.1. Origine et classification botanique	6
I.2. Morphologie et cycle de développement	7
I.3. Exigences agro-écologiques	9
I.4. Importance agronomique et économique	10
II. Contraintes de culture (abiotiques et biotiques)	13
II.1. Le stress salin chez la plante	16
II.2. Le stress biotique	16
II.3. Le stress abiotique	16
II.4. Le stress salin	18
II.5. La salinité	19
II.6. Impact du stress salin sur la culture de tournesol (<i>Helianthus annuus L.</i>)	20
III. La germination chez la plante	22
III.1. Définition de germination	22
III.2. la physiologie de germination	22
III.3. Germination et stress environnementaux	24
III.4. Stress à basse température	26
III.5. Stress à haute température	27
III.6. Comparaison et contrastes du métabolisme sous stress thermique	30
III.7. Effets du stress salin sur la germination	31
III.8. Cas du tournesol : germination en conditions salines	32

Matériels et Méthodes

1. Objectif	34
2. Choix de l'espèce	34
3. Conduite de l'expérimentation	35
4. Paramètres étudiés	36
4.1. Paramètres physiologiques	36
4.1.1. Taux final de germination	36
4.1.2. Indice de vigueur de germination	36
4.1.3. Vitesse de germination	37
4.1.4. Coefficient de vigueur de germination	37
4.1.5. Energie germinative	37
4.1.6. Indice de récupération de la germination (Germination recovery)	37
4.2. Paramètres morphologiques	38
4.2.1. Longueur de la tigelle et longueur de la radicule	38
5. Analyse statistique	38

Résultats et Discussion

1. Taux de Germination (TG)	39
2. Indice de Vigueur de Germination (IVG)	40
3. Temps Moyen de Germination (TMG)	42
4. Vitesse de Germination (VG)	43
5. Coefficient de Vigueur (CV)	45
6. Énergie Germinative (EG)	46
7. Longueur de la radicule	48
8. Longueur de la tigelle	49
9. Indice de Récupération	50

Conclusion

Conclusion et perspective	51
---------------------------	----

Références bibliographiques

Introduction

Introduction

Le tournesol (*Helianthus annuus* L.) est la cinquième culture d'huile comestible la plus répandue dans le monde. Sa superficie de culture dépasse 22,9 millions d'hectares répartis sur 60 pays, avec une valeur totale dépassant les 40 milliards de dollars par an **(Hu, J. et al. (2010).** La création et l'élevage de variétés de tournesols résistantes au sel sont indispensables et présentent un potentiel économique immense **(Rauf, S. et al. (2017), (Rauf, S., Shahzad, M., Teixeira da Silva, J. A., & Noorka, I. R. (2012).**

Actuellement, le croisement reste une technique d'élevage fréquemment utilisée ; toutefois, les méthodes traditionnelles privilégient l'examen des germoplasmes présentant des caractéristiques souhaitables, comme une forte tolérance à la salinité **(Guo, S. S., Ge, Y., & Jom, K. N. (2017).**

Le tournesol est une culture qui présente une tolérance modérée au sel. **(Shi, D. C. & Sheng, Y. M. (2005).** Toutefois, le stress salin demeure un obstacle majeur dans l'élevage de tournesols, en raison d'une précipitation insuffisante qui n'arrive pas à rincer le sel de la zone racinaire et d'une évapotranspiration élevée qui dépasse souvent les précipitations. En général, la capacité d'une culture à survivre et à se développer dans des conditions salines dépend de sa tolérance au sel, qui peut varier selon les différentes cultures et les phases de croissance **(Akbari, G., Sanavy, S. A., & Yousefzadeh, S. 2007).**

La germination des graines représente la première étape de la croissance et du développement des cultures tout au long du cycle de vie de la plante. Par conséquent, la capacité élevée de germination des cultures dans un sol salin est indispensable pour leur croissance et développement ultérieurs. On signale que le stress salin peut entraîner une diminution importante du taux de germination, car il limite la capacité des plantes à absorber l'eau du sol, entraînant ainsi une inhibition de la croissance et une perte de rendement. Par conséquent, afin de favoriser rapidement la sélection de tournesols tolérants au sel, une méthode efficace pour évaluer et obtenir des germoplasmes tolérants au sel durant la phase de germination ou d'autres phases de croissance du tournesol est indispensable. Dans le cadre de cette recherche, nous mettons en place une référence de qualité supérieure pour le dépistage et l'évaluation des germoplasmes de tournesol tolérant au sel lors de la phase de germination des graines **(Dimitrijevic, A. et al. 2017).**

Le tournesol est une culture qui présente une tolérance modérée au sel. Néanmoins, le stress salin reste un obstacle majeur dans la culture du tournesol en raison de la précipitation insuffisante qui ne parvient pas à rincer le sel de la zone racinaire et d'une évapotranspiration

élevée qui dépasse souvent les précipitations (Nolan, B. T. et al, 2007). Habituellement, la capacité d'une culture à survivre et à se développer dans des conditions salines dépend de sa tolérance au sel, qui peut varier selon les espèces de culture et les étapes de croissance (Akbari, G., Sanavy, S. A., & Yousefzadeh, S, 2007). La germination des graines constitue la première étape de la croissance et du développement des cultures au cours du cycle de vie de la plante. Par conséquent, une forte capacité de germination des cultures dans les sols salins est essentielle pour leur croissance et leur développement ultérieur (Akbari, G., Sanavy, S. A., & Yousefzadeh, S, 2007).

La salinité est un stress abiotique majeur qui impacte la croissance et le développement des plantes, entraînant ainsi une réduction du rendement des cultures. Un stress salin élevé perturbe l'homéostasie des potentiels hydriques et des distributions d'ions, entraînant des dommages moléculaires, une croissance diminuée et même la mort cellulaire (Zhu, J. K. (2001).

À l'échelle mondiale, plus de 800 millions d'hectares de terres sont touchés par la salinité, ce qui représente environ 6% de la superficie totale des terres et impacte plus de 20% de l'agriculture actuelle (Ding, T. L. et al. (2018), Mackelbert, M. V., Hasegawa, P. M. & Bailey-Serres, J. (2015), Sumner, M. E. (1998), Vinocur, B. & Altman, A. (2005), Song, J. & Wang, B. S. (2015), Yang, Z. & Wang, B. S. (2015).

Une méthode plus efficace d'utilisation des terres ayant un sol salin consiste à examiner les germoplasmes existants et à créer de nouvelles variétés de cultures avec une forte résistance au stress salin (Ashraf, M. Y., Awan, A. R., & Mahmood, K. (2012).

En Algérie, l'expansion de l'irrigation dans le secteur agricole a entraîné une progression notable dans la production de cultures. Au cours des dernières années, la croissance des cultures irriguées dans le sud du pays (qui est sous l'influence climatique du désert du Sahara) s'est principalement appuyée sur l'extraction d'eau souterraine (Kuper et al. 2016). Cette approche a permis d'augmenter le revenu des agriculteurs, mais elle est également à l'origine de la salinisation des sols, parfois accompagnée de phénomènes d'alcalinisation (Nezli et al. 2007), attribués à la mauvaise qualité de l'eau. Ainsi, une meilleure compréhension de ces problèmes de dégradation, le principal défi pour la communauté scientifique est de faire face aux menaces qui pèsent sur la durabilité dans d'importantes zones productives de l'Algérie (Bradai et Douaoui 2013).

Dans cette région, l'agencement géologique, l'irrigation à l'aide d'eaux souterraines de mauvaise qualité et les schémas d'utilisation du sol sont les éléments majeurs qui influencent la salinité du sol. Dans les zones arides, les caractéristiques naturelles ainsi que les interventions humaines

influencent la qualité du sol et la pérennité des ressources naturelles comme l'eau et le sol.

Dans les zones arides, de nombreux facteurs naturels peuvent contribuer à la salinité du sol, tels que les caractéristiques du matériau parent, l'existence de nappes phréatiques peu profondes et la dégradation des roches salines (**Gorji et al. 2015**). À cela s'ajoutent l'application de techniques d'irrigation anciennes, l'irrigation avec de l'eau salée, le défrichement des terres et l'utilisation d'engrais riches en sel. L'irrigation non maîtrisée utilisant de l'eau souterraine de mauvaise qualité et des méthodes inappropriées pose des problèmes pour la gestion et la préservation des sols et des ressources en eau, principalement en lien avec les dynamiques hydro-géochimiques. Effectivement, l'irrigation peut soit apporter des sels dans le sol, soit mobiliser ceux qui sont déjà présents dans le sol. Dans les deux scénarios, la dégradation du sol peut se produire.

En Algérie, la culture d'oléagineux n'a jamais été importante en raison des conditions climatiques et de l'accent mis sur la production céréalière avec jachères. De ce fait, la production de colza, d'arachides et de tournesol, les seules graines oléagineuses cultivées, a stagné à quelques milliers de tonnes pendant plusieurs décennies. Néanmoins, le tournesol, dont la production a atteint son apogée avec 1800 tonnes au milieu des années 1970, est aujourd'hui complètement disparu (**Rastoin et Benabderrazik, 2014**). D'autre part, selon **Hachemi (2007)**, après les céréales et le lait, les huiles comestibles se classent au troisième rang des aliments consommés en Algérie. L'huile de tournesol est particulièrement appréciée par les consommateurs algériens, avec une consommation d'environ 1.98 kg par personne par an (**Nouri, 2011 ; FAO, 2013**). Cette disparité entre la production locale et la consommation d'huile est comblée par l'importation de graines de tournesol et d'huile, entraînant des factures toujours croissantes.

Pour la réduction de la dépendance à l'importation de la matière première utilisée dans l'extraction des huiles alimentaires, le gouvernement algérien suit une stratégie de réhabilitation et de développement des cultures oléagineuses y compris le tournesol.

La salinisation des terres constitue un obstacle majeur à l'expansion agricole en Algérie, surtout dans les régions arides et semi-arides où la situation ne fait que se détériorer.

Peu d'études ont été réalisées sur l'adaptation de tournesol (*Helianthus annuus* L) au stress salin. Cela soulève de nombreuses interrogations : Quel est l'effet de la salinité sur la germination des graines de tournesol dans les conditions environnementales algériennes ? Est-il possible que certaines variétés soient plus résistantes à ce stress ? Et quelles méthodes pourraient être envisagées pour améliorer cette tolérance dès les premières étapes du développement de la

plante ?

Pour cela notre étude porte sur l'effet du stress salin sur la germination des graines de tournesol (*Helianthus annuus* L), ce qui consiste à évaluer la tolérance de tournesol à la salinité et contribuer à l'adaptation de cette culture au pédoclimat salin de l'Algérie. Ainsi notre étude vise à :

- L'évaluation des impacts de diverses concentrations en sel (NaCl) sur les indices de germination du tournesol (taux de germination, vitesse de germination, indice de vigueur, etc.).
- L'établissement des seuils de tolérance à la salinité lors de la phase de germination.
- L'étude de comportement de germination de différentes variétés de tournesol sous stress salin.
- Le choix de génotypes tolérants qui pourraient convenir aux régions salines de l'Algérie.

Synthèse bibliographique

Synthèse bibliographique

I. Généralité sur tournesol :

Le tournesol (*Helianthus annuus* L.) fait partie de la famille des Asteraceae. Le genre *Helianthus* comprend 65 espèces distinctes (**Andrew et al., 2013**). Le terme *Helianthus*, qui tire son nom du grec helios (le soleil) et anthos (une fleur), est synonyme de l'anglais Sunflower. Cette dénomination a été attribuée à ces fleurs en raison de la présomption qu'elles suivent le mouvement du soleil durant la journée, se tournant constamment vers ses rayons les plus directs. *Helianthus annuus* est généralement le type de tournesol auquel les gens font référence, c'est un tournesol annuel. Habituellement, c'est une plante annuelle qui a une grande inflorescence (tête fleurie) et son nom provient de la forme et de l'image de la fleur, fréquemment représentée comme le soleil. La plante présente une tige rugueuse et velue, de larges feuilles grossièrement dentées et des fleurs regroupées en têtes circulaires (**Khaleghizadeh, 2011**). Les têtes sont composées de multiples fleurs individuelles qui se transforment en graines sur une base réceptacle (**Seghatoleslami et al., 2012**). Le tournesol est la quatrième culture oléagineuse en termes de taille mondiale et ses graines servent d'alimentation tandis que sa tige séchée est utilisée comme combustible. Il a été utilisé comme plante ornementale et employé dans des cérémonies anciennes (**Harter et al., 2004 ; Muller et al., 2011**). De plus, on a signalé des applications médicales pour les affections pulmonaires. De plus, certaines parties de cette plante sont utilisées pour la fabrication de teintures destinées à l'industrie textile, la peinture corporelle et d'autres ornements. L'huile de tournesol est employée dans les vinaigrettes, pour la cuisson et dans la production de (**Kunduraci et al., 2010**). Le tournesol est utilisé dans l'industrie pour la production de margarine, de peintures, de shortening et de cosmétiques. Une sorte de café pourrait être préparée avec les graines torréfiées. Dans certains pays, le gâteau de graines résiduel après l'extraction de l'huile est utilisé comme aliment pour le bétail. Dans l'Union soviétique, les coques sont utilisées pour la production d'alcool éthylique, le revêtement de contreplaqué et la culture de levure. Les tiges séchées ont également été utilisées comme combustible. Les tiges renferment du phosphore et du potassium qui peuvent être compostés pour être réintroduits dans le sol en tant qu'engrais. Le tourteau de tournesol, grâce à sa valeur nutritive élevée et l'absence de facteurs anti-nutritionnels, représente une source potentielle de protéines (**Fozia et al., 2008**). Le tournesol était une culture fréquente parmi les tribus amérindiennes à travers toute l'Amérique du Nord. Des preuves indiquent que les habitants de l'époque de l'Arizona et du Nouveau-Mexique actuels ont cultivé cette plante vers 3900 avant notre ère. Certaines recherches archéologiques laissent à penser que la domestication du tournesol a pu se produire avant celle du maïs (**NSA, 2013**). Bien que le consensus scientifique

ait longtemps soutenu que le tournesol a été domestiqué une seule fois en Amérique du Nord de l'Est, la découverte de restes de tournesol précolombiens sur des sites archéologiques au Mexique a conduit à suggérer l'existence d'un second centre de domestication situé dans le sud du Mexique. Toutefois, des données provenant de plusieurs loci évolutifs importants et de marchés neutres soutiennent l'idée d'un unique événement de domestication pour le tournesol cultivé actuel en Amérique du Nord de l'est (**Blackman et al., 2011**).

I.1. Origine et classification botanique

Botaniquement, les tournesols sont classés sous le nom *Helianthus annuus* L. (Tableau 1). Ce sont des plantes imposantes qui sont cultivées à travers le monde en raison de leur période de croissance relativement courte.

Le tournesol est une plante herbacée annuelle, qui possède une tige robuste et velue, atteignant entre 3 et 12 pieds de hauteur (**Schneider, 1992**). Ses feuilles sont larges, grossièrement dentées et rugueuses, mesurant entre 3 et 12 pouces de long. Quant à ses fleurs, elles se regroupent en têtes circulaires d'une largeur allant de 3 à 6 pouces chez les spécimens sauvages, mais peuvent atteindre un pied ou plus lorsqu'elles sont cultivées (**National Sunflower Association, 2021**). Les inflorescences sont constituées de nombreuses petites fleurs tubulaires disposées de manière compacte sur un disque plat : celles de la rangée extérieure présentent des corolles en forme de bande, qui constituent les rayons de la fleur composite. Chaque capitule de tournesol, ou inflorescence, est en réalité constitué de deux catégories de fleurs. Ce qui semble être des pétales jaunes bordant la tête n'est en réalité que des fleurs de rayon individuelles. La surface de la tête est composée de centaines de fleurettes qui se transforment en graines (akènes) (**Inrae, 2020**). Le nombre de chromosomes de base pour le genre *Helianthus* est de 17. On connaît des espèces diploïdes, tétraploïdes et hexaploïdes (**Jan & Seiler, 2007**). On dénombre seulement 14 espèces annuelles de *Helianthus*. Les sélectionneurs de plantes ont réalisé des croisements interspécifiques au sein du genre et ont transféré des caractéristiques bénéfiques comme un pourcentage d'huile élevé, la stérilité cytoplasmique mâle pour la production d'hybrides, ainsi que la résistance aux maladies et aux insectes dans le tournesol commercial (**Agriréseau, 2021**).

Tableau 1. La classification taxonomique est en vigueur depuis 1753 (**Linnaeus, C. (1753)**).

Taxons	
Royaume	Plantae
Sous-règne	Viridiplantae
Règne	Streptophyta
Division	Tracheophyta
Subdivision	Spermatophytina
Infra-Division	Angiospermae
Classe	Magnoliopsida
Super-Ordre	Asteranae
Ordre	Asterles
Famille	Asteraceae
Sous-famille	Helianthoideae
Tribu	Heliantheae
Genre	Helianthus
Espèce	Annus

I.2. Morphologie et cycle de développement

Helianthus annuus L., communément appelé le tournesol, est une plante annuelle de la famille des Asteraceae, qui est principalement cultivée pour ses graines riches en huile. Il possède une morphologie distinctive qui est essentielle pour sa croissance, sa capacité à résister au stress et sa productivité (**Casale, A. et al, 2024**).

I.2.1. Système de racines

Le tournesol met en place un système de racines pivotantes, fort et profond, qui peut descendre jusqu'à 2 mètres de profondeur si les conditions sont propices. Ce mécanisme favorise une exploration efficace du sol pour trouver de l'eau et des nutriments, conférant ainsi au tournesol une tolérance notable à la sécheresse (**Connor, D. J et al (1993)**).

I.2.2. Tige

La tige du tournesol est érigée, solide et en règle générale sans branches, même si certaines espèces peuvent générer des ramifications latérales. Selon les conditions environnementales et la variété, elle peut se dresser de 1,5 à 3,5 mètres de hauteur. La tige est généralement tapissée de poils rêches et renferme une moelle centrale spongieuse (**Khan et al (2011)**).

I.2.3. Feuilles

Les feuilles du tournesol sont simples, disposées de manière alternée, larges et présentent une forme qui rappelle celle d'un cœur. Elles ont une texture rugueuse due à la présence de poils. Elles possèdent une nervation en forme de palme et sont attachées à la tige par un pétiole allongé. Durant la phase végétative, le tournesol est réputé pour son héliotropisme, avec ses jeunes feuilles qui suivent le parcours du soleil d'est en ouest (**Vear, F. (2016)**).

I.2.4. Inflorescence

L'inflorescence du tournesol se présente sous la forme d'un capitule, communément désigné comme « fleur », mais qui est en fait composé de deux variétés de fleurs : Les fleurs ligulées (stériles) situées sur le pourtour, qui attirent les pollinisateurs. Les fleurs à forme tubulaire (fertiles) situées au centre, qui produisent les graines. Le diamètre du capitule peut varier de 10 à 40 cm. La pollinisation s'effectue généralement par le biais des insectes, même si l'autopollinisation est aussi envisageable (**Seiler, G. J. et al (2004)**).

I.2.5. Graines et fruits

L'akène, souvent à tort désigné comme « graine », est ce que l'on trouve dans le fruit du tournesol. Chaque akène renferme une graine gorgée d'huile, dont la concentration peut varier entre 40 et 50 %. Les akènes sont défendus par une coque dure dont la couleur peut différer selon les espèces (noir, blanc, rayé...) (**Skoric, D. 2012**).

I.2.6. Phases phénologiques

L'établissement d'une culture se divise en trois sous-phases : de la semence à la germination, de la germination à l'émergence du plant, et de l'émergence du plant à la première compétition entre jeunes plants (**Aubertot, J.N. et al 2022**). La germination des graines se déroule en trois étapes. Au cours de la phase d'imbibition, les graines dormantes absorbent de l'eau et subissent une hydrolyse. Les variations dans les quantités de protéines, de glucides et de lipides peuvent affecter le processus d'imbibition, qui résulte de l'interaction de ces trois éléments. Les protéines et les corps huileux sont les principales réserves dans les cultures oléagineuses, fournissant énergie, carbone et azote aux semis lors de la germination (**Ali et al (2017)**). La deuxième phase de la régulation de la germination consiste à stimuler la production d'ATP dans la glycolyse, le cycle de Krebs, la chaîne respiratoire et la traduction de l'ARNm stocké. La germination est

considérée comme achevée lorsque la radicule perce la coque de la graine et développe une racine, tandis que les plumules mettent en place un système de tiges apte à capter des substances inorganiques, de l'eau et de l'énergie lumineuse pour une croissance saine. Le processus de germination affecte les taux de survie des plantules et l'établissement des cultures, influencé par le climat. Une germination inadéquate des graines peut entraîner une mise en place insuffisante des cultures, ce qui nuit au rendement et à la qualité des récoltes (**Gummerson, R.J, 1986**). De plus, une germination efficace des graines influence la densité des plantules par unité de surface (**Maraghni, M et al, 2010**), (**De Oliveira, A.K.M.et al, 2013**).

La température et l'humidité sont des régulateurs de germination particulièrement importants (**Gummerson, R.J. (1986)**). L'eau est indispensable à la germination des graines. C'est un milieu pour les processus enzymatiques, la solubilisation et le transport de métabolites, ainsi qu'un réactif dans l'hydrolyse des protéines, des lipides et des glucides présents dans les tissus de stockage des semences en germination (**Muscolo, A., et al, 2014**). Pour la germination, il est nécessaire d'avoir une quantité adéquate d'humidité du sol ou d'imprégnation des graines (**Khaeim, H.M., (2019)**).

I.3. Exigences agro-écologiques

L'évolution de la science agronomique démontre que l'analyse du territoire national en tant que zones climatiques et pédologiques ne suffit pas à répondre aux exigences de l'agriculture. C'est pour cette raison qu'une interprétation combinée de ces éléments est déjà nécessaire en tant que « complexes agro-écologiques » - conformément aux exigences des plantes agricoles présentes dans notre production (**Valev, Georgiev, 2004**). L'agroécologie est une branche appliquée de l'écologie générale qui facilite l'étude des agroécosystèmes malgré leur complexité extrême, ce qui en fait un élément crucial pour le progrès de l'agriculture moderne (**Hershkovich, 1970 ; 1984**).

En Algérie, l'évaluation de l'aptitude des terres cultivables du blé et du tournesol pluvial repose sur des bases de données agroclimatiques et pédologiques de régions géographiques complétées par des indicateurs de potentiel de production végétale. L'indicateur d'IPT pour la productivité des terres cultivées en l'absence d'irrigation, mesuré sur une échelle de 0 à 100, est basé sur des caractéristiques analytiques du sol – texture, profondeur, fertilité, salinité, position topographique et disponibilité en eau (**Benyoussef et al., 2003 ; Meddi et Mahé, 2009**).

Le développement de tournesol (*Helianthus annuus L*), reste encore limité, mais stratégique. En 2023, seulement 2 000 hectares étaient cultivés. Mais grâce au Plan national de développement des cultures oléagineuses du gouvernement, lancé en 2024, la superficie du tournesol est portée à 60 000 hectares et un objectif de 150 000 hectares est programmé à

l'horizon 2026. Les zones ciblées sont les wilayas des Hautes Plaines et du sud du Tell : Tébessa, Batna, M'Sila, Relizane, Mascara, Bouira, où le tournesol est une culture de sec, où cette plante est cultivée grâce à sa tolérance modérée de la sécheresse. Cependant, le rendement est affecté par le stress hydrique en fin de cycle : la floraison et le remplissage des graines. La variété, le calendrier de semis et la filière de trituration et de commercialisation devraient être améliorés pour cette plante **(Belhouchette et al., 2012 ; Ghezali, 2024)**.

Le tournesol (*Helianthus annuus*) présente un héliotropisme prononcé pendant sa phase de croissance végétative : sa tête florale se déplace d'est en ouest en fonction du soleil tout au long de la journée. Le phototropisme, qui est la réaction directionnelle à la lumière bleue régulée par des photorécepteurs dénommés phototropines, contrôle ce mouvement **(Vandenbrink et al., 2014 ; Atamian et al., 2016)**.

I.4. Importance agronomique et économique

À l'échelle mondiale, la culture du tournesol est notable en raison de son étendue importante. Elle est perçue comme une culture qui participe directement à l'alimentation des humains et des animaux. Un autre aspect majeur pour les cultures de tournesol est la productivité élevée, qui entraîne une augmentation constante des superficies cultivées. Au niveau mondial, les cultures de tournesol occupent la quatrième place après le maïs, le blé et le riz **(Pistalu, V.2011)**.

La culture du tournesol est une option séduisante pour les agriculteurs en raison de ses nombreux avantages qui contribuent directement à l'amélioration des résultats financiers obtenus. Parmi les bénéfices de cette culture, on note : des coûts réduits par unité de surface comparativement à d'autres cultures **(Sekhon, K. S, 2014)**.

En Algérie, la culture d'oléagineux n'a jamais revêtu une grande importance, du fait des conditions climatiques peu propices et de l'importance accordée à la production céréalière sur jachères. Ainsi, la production de colza, d'arachides et de tournesol, qui sont les seules graines oléagineuses cultivées, est restée à quelques milliers de tonnes au cours des nombreuses décennies. Cependant, le tournesol, dont la production a culminé à 1800 tonnes au milieu des années 1970, est désormais totalement éteint **(Rastoin et Benabderazzik, 2014)**. Par ailleurs, d'après **Hachemi, 2007** ; après les céréales et le lait, les huiles alimentaires occupent la troisième place parmi les aliments consommés en Algérie.



Figure 01. Champs de tournesol

Utilisations principales

L'huile de tournesol a acquis de l'importance en raison de sa teneur accrue en acides oléique et linoléique, qui pourraient contribuer à réduire le cholestérol et par conséquent, à diminuer les maladies cardiaques (**Chowdhury et al. 2007**). De plus, la teneur en cholestérol et le risque de cancer sont régulés par une forte concentration de phytostérols dans les graines de tournesol, soit environ 280 mg pour 100 g (**Phillips et al. 2005**). Les tocophérols présents dans l'huile de tournesol protègent l'organisme contre l'inflammation et les tumeurs en neutralisant les radicaux libres et en prévenant les lésions oxydatives aux cellules. Ils sont donc bénéfiques dans des maladies telles que l'arthrite rhumatoïde et l'asthme bronchique. La vitamine E a un effet bénéfique sur le système coronarien du corps et par conséquent diminue les risques d'accident vasculaire cérébral et d'athérosclérose (**Dutta et al. 2005**). L'huile de tournesol renferme du magnésium qui aide à traiter la migraine, l'hypertension et l'asthme bronchique tout en contribuant au maintien du tonus musculaire du corps. L'acide folique présent dans les graines contribue à la formation du sang et des acides nucléiques. Le stress mental et l'inquiétude peuvent être atténués par la choline et le tryptophane présents dans les graines de tournesol. Des minéraux tels que le zinc renforcent le système immunitaire, tandis que le sélénium, grâce à son action antioxydante, protège contre le cancer de la prostate. La présence de divers éléments dans l'huile de tournesol lui confère des propriétés thérapeutiques, anti-inflammatoires, antibactériennes, antifongiques anticancéreuses, cardioprotectrices et dermoprotectrices chez l'homme (**Nandha et al. 2014**). Le tourteau de tournesol est le principal sous-produit issu du

processus d'extraction de l'huile à partir des graines de tournesol dans l'industrie. C'est une source de protéines exceptionnelle pour la consommation humaine et comme alimentation complémentaire dans les rations pour ruminants et non-ruminants, favorisant la croissance animale et la production de lait, ainsi que l'augmentation de la biomasse. C'est une source riche en protéines, contenant des acides aminés soufrés (cystéine et méthionine) ainsi que d'autres acides aminés essentiels tels que la leucine, la valine, l'isoleucine, le tryptophane, l'alanine, la phénylalanine et la valine. Il contient également des minéraux et des vitamines comme le phosphore, la thiamine, l'acide nicotinique, l'acide pantothenique, la riboflavine et la biotine qui favorisent la croissance musculaire et le développement (**Laguna et al. 2018**).

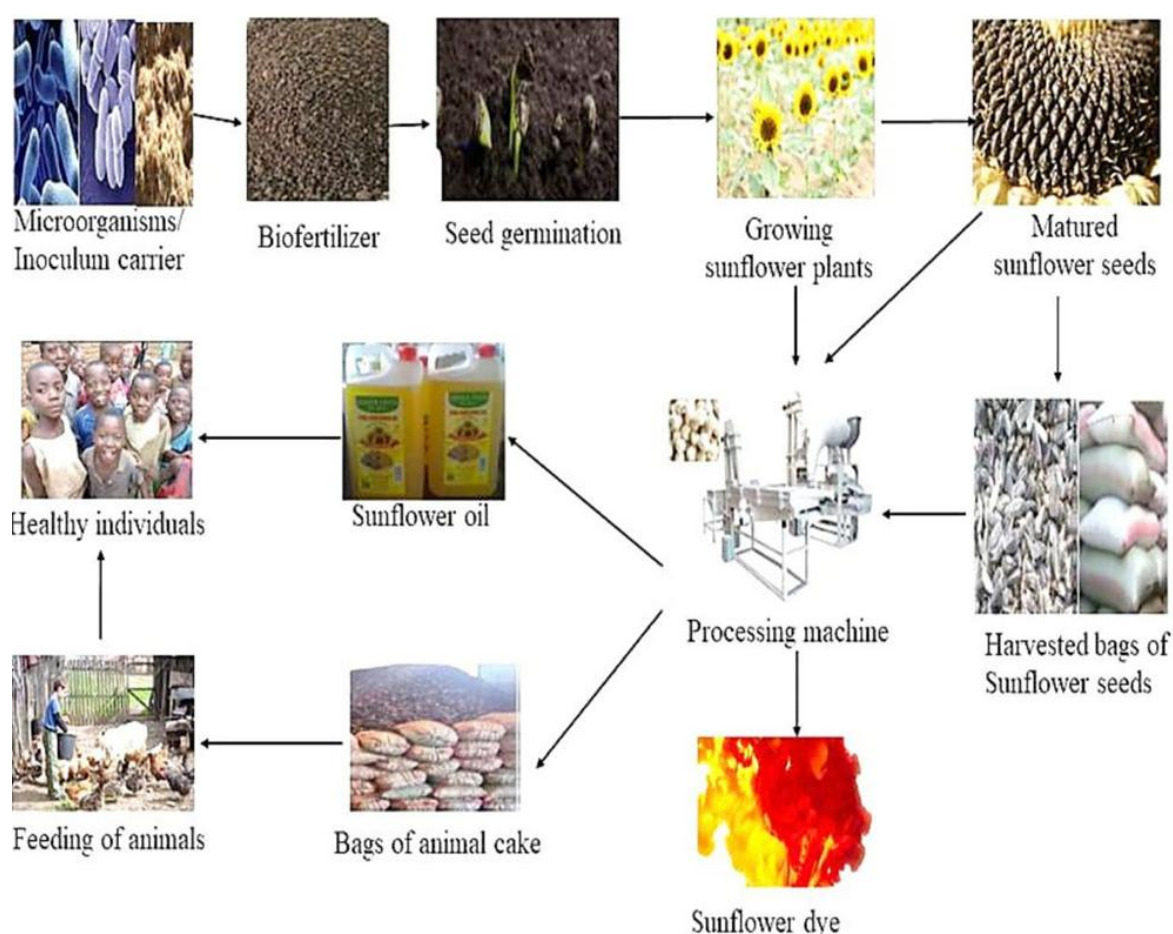


Figure 02. Traitement du tournesol et produits dérivés

Les pellets de tige de tournesol sont l'une des formes de biomasse les plus couramment utilisées pour la co-combustion dans les centrales à charbon. Les coques de tournesol, comparées à d'autres sources de biomasse, présentent une valeur calorifique élevée et une résistance à la biodégradation due à leur teneur élevée en lignine. (**Raclavska, H., Juchelkova, D., Roubicek, V. & Matysek, D. (2011)**). Cependant, certaines caractéristiques des coques de tournesol

entraînent des problèmes techniques lors de leur co-combustion avec le charbon, en particulier la présence élevée de potassium, considéré comme l'élément principal à l'origine du frittage et de l'encrassement dans les (Tokarski, S., Głod, K., Ściażko, M. & Zuwała, J., 2015), (Kalisz, S., Ciukaj, S., Tymoszuć, M. & Kubiczek, H., 2015).

6. Contraintes de culture

L'environnement est un ensemble de facteurs biotiques et abiotiques complexes qui influencent les plantes. L'impact des facteurs environnementaux dépend de leur intensité et de leur pertinence pour le développement des plantes. Pour certaines espèces végétales spécifiques, les facteurs environnementaux sont cruciaux pour leur survie et peuvent même nuire gravement à leur croissance, tandis que pour d'autres espèces, leur importance est moindre. Des facteurs environnementaux défavorables tels que la sécheresse (Šimunić et al., 2007 ; Viljevac et al., 2012), les températures extrêmes (Černý et al., 2011), les métaux lourds (Tuba et al; Mathur et al., 2016) et la salinité du sol (Yokoi et al., 2002 ; Dąbrowski et al., 2016) sont source de stress pour de nombreuses caractéristiques agronomiques.

Le tournesol est l'une des espèces végétales qui supporte particulièrement bien la combinaison d'un manque d'eau et de températures élevées dans le sol et l'air. Cela peut partiellement atténuer les effets négatifs de la sécheresse, mais cela réagira en diminuant le rendement des graines et la teneur en huile, étant donné que ces caractéristiques agronomiques sont fortement liées aux conditions météorologiques pendant la saison de croissance (Krizmanić et al. 2012).

La salinité provoque une double contrainte sur les plantes lorsqu'il s'accumule en excès dans la rhizosphère : un stress osmotique immédiat, qui limite la disponibilité de l'eau, et un stress ionique progressif lié à l'accumulation de Na^+ et Cl^- dans la plante parenchyme tissu. Pour le tournesol, une culture oléagineuse d'utilisation élargie, une exposition prolongée à des niveaux élevés ou modérément élevés de sel implique déjà une réduction drastique du pourcentage de germination de la vigueur des semis de contrôle total de la biomasse de la plante et un impact négatif sur la photosynthèse et le rendement dans un an naturel Le Na^+ concurrence le K^+ au niveau des sites d'absorption racinaire, en désorganisant leur métabolisme et leurs processus enzymatiques et membranaires. Si le Cl^- est moins toxique, il s'accumule dans les feuilles et participe à la croissance de la nécrose ainsi que à la réduction de la surface photosynthétique. (PMC, 2023).

En effet, des études effectuées dans des conditions contrôlées ont prouvé que la concentration croissante de salinité entraîne une forte diminution de la teneur en chlorophylle, de la conductance stomatique et de l'efficacité de la photosynthèse. Face à cela, certaines variétés de tournesol développent des stratégies d'adaptation, comme l'exclusion ionique, l'accumulation

de proline, la compartimentation vacuolaire des ions toxiques et la stimulation de l'activité antioxydante (**Hussain, S., et al. 2019, Khan, M. I. R., et al. 2015, Gulnaz, S., et al. 2021**).

Bien que le tournesol ait une tolérance relative, il est particulièrement sensible aux fortes concentrations de salinité lorsqu'il est cultivé dans ses conditions. La germination et la phase de floraison sont les principaux stades où des dommages importants sont causés. Par conséquent, une connaissance approfondie des mécanismes physiologiques de tolérance de la salinité, la sélection de cultivars tolérants et la sélection des meilleures pratiques culturales, y compris l'amélioration du sol, le drainage et le choix de la date de semis, pourraient assurer la viabilité de cette culture dans les zones touchées par la salinité sodique (**Gulnaz et al., 2021**).

En ce qui concerne les stress biotiques chez les tournesols, il est raisonnablement conclu que les maladies dues à divers champignons représentent le problème le plus grave. La Broomrape, une angiosperme parasitaire, occupe la seconde position, tandis que les virus et les bactéries se classent respectivement en troisième et quatrième positions (**Škorić, D. 2012**).



Figure 03. L'effet de stress salin sur le tournesol

Maladies du tournesol

La variabilité initiale du tournesol cultivé est très limitée et distincte sur le plan génétique, ce qui la rend applicable à la sélection visant à améliorer divers caractères agronomiques, en particulier ceux liés à la résistance aux maladies.

Les maladies constituent un facteur restrictif dans la culture du tournesol sur tous les continents où il est cultivé. Selon les conditions environnementales prédominantes, différentes maladies dominent dans différentes régions de culture (Aubert, G., Mira de Orduña, R., & Vear, F. 2021, Ma, J., & Yan, W. 2018, Seiler, G. J., & Jan, C. (2014).

II.1. Le stress salin chez la plante

Il n'est pas aisé de définir un stress biologique, mais il englobe les effets néfastes infligés à un organisme **(Hopkins, 2003)**. Un stress est défini à la fois comme l'intervention d'un agent perturbateur et les réponses qu'il déclenche dans l'organisme touché, une force qui vise à inhiber les systèmes normaux. Par ailleurs, les facteurs abiotiques tels que la sécheresse, la salinité et la température, qui sont des stress environnementaux, influencent les conditions de croissance, le développement et la productivité des plantes **(Madhava Rao et al., 2006)**. Le terme « stress » fait référence aux changements environnementaux qui peuvent être nuisibles, alors que le « stress » se réfère aux altérations physiologiques et biochimiques. Parmi les approches envisageables pour la plante : prévenir le stress, esquiver la « contrainte » ou supporter la « contrainte ». De manière plus générale, on peut affirmer qu'à l'échelle cellulaire, un stress est induit par la fluctuation d'un paramètre environnemental qui déclenche les mécanismes de régulation de l'homéostasie **(Zhu, 2002)**.

II.2. Le stress biotique

Les virus, les organismes phytophages et les pathogènes sont à l'origine de l'infiltration de divers agents pathogènes dans la plante. Pour y répondre, la plante établit un mécanisme de défense impliquant une série de réactions en chaîne. Les protéines végétales défensives produites servent de barrière contre les agents nuisibles. Ils s'introduisent soit par la voie mécanique en surmontant la résistance physique des barrières histologiques, soit par l'excrétion d'enzymes qui décomposent la cuticule **(Laval-Martin et Mazliak, 1995)**.

II.3. Le stress abiotique

Le stress abiotique est un élément environnemental capable d'engendrer des transformations chimiques ou physiques nuisibles. Ces changements constituent une contrainte (qui peut être de nature plastique ou élastique). Pour simplifier, on considère souvent aujourd'hui que le facteur environnemental est l'élément contraignant. Une plante peut être affectée par un stress alors qu'une autre ne le serait pas. Des éléments tels que l'âge revêtent une certaine importance **(Anonyme, 2004)**. Les stress abiotiques partagent des caractéristiques similaires tant en ce qui concerne les dégâts infligés qu'en termes de réaction de la plante **(Marie, 2009)**.



Figure 04. Tournesol en état de stress hydrique. (www.aladin.farm)

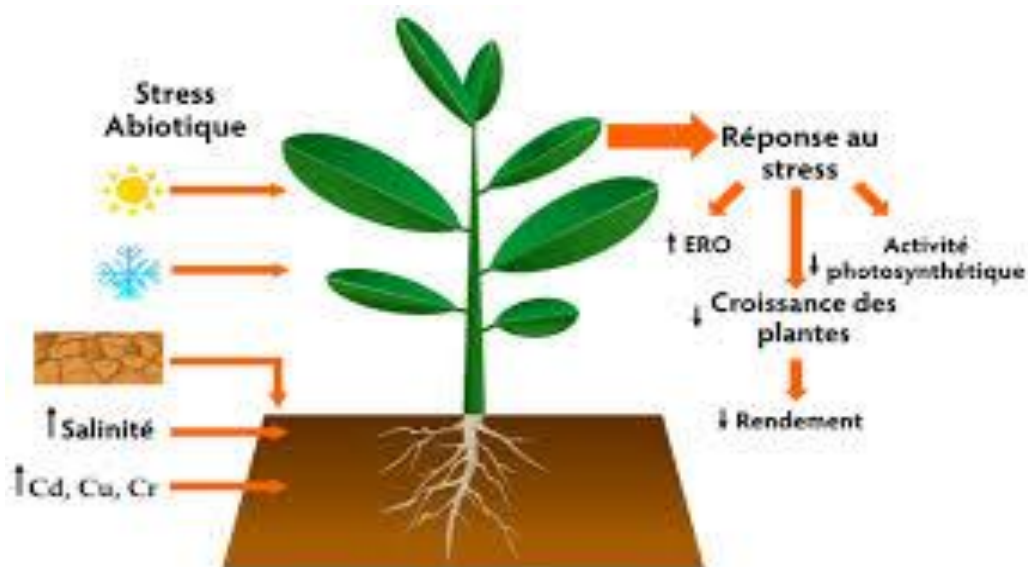


Figure 05. La réponse de la plante au stress abiotique

II.4. Le stress salin

Le stress salin est causé par la présence de volumes significatifs de sels susceptibles d'avoir un impact sur l'hydratation. Cela diminue considérablement la disponibilité de l'eau pour les végétaux, on décrit alors ce milieu comme étant « physiologiquement sec » (Trembun, 2000).

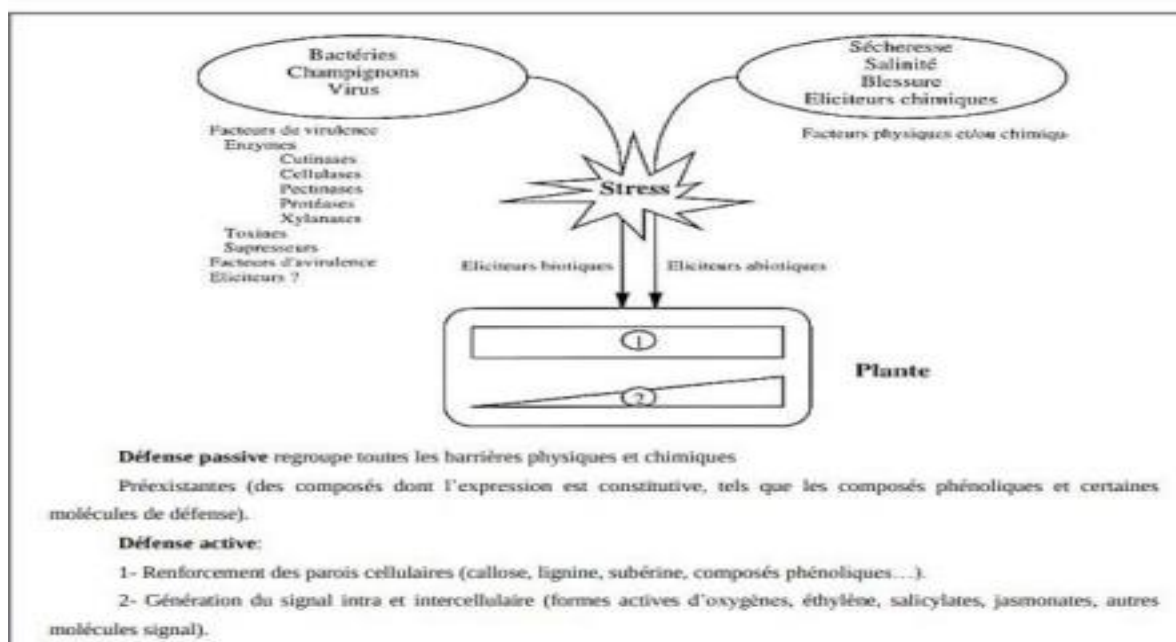


Figure 06. Représentation schématique des réponses de défense de la plante aux différents stress biotiques et abiotiques (Ziadi, 2001).

II.5. La salinité

La salinité est un facteur commun dans le stress environnemental affectant sérieusement la production végétale dans différentes régions, en particulier dans des régions arides et semi-arides. On l'estime que plus de 800 millions d'hectares de terre dans le monde sont affectés par la salinité (**Munns R., 2005**). Les données actuelles se résument dans le bassin méditerranéen à 16 millions d'hectares des sols salés, L'Algérie, dont une grande partie des régions agricoles se caractérise par un climat aride et semi-aride, est touchée par le processus de salinisation des sols, Actuellement près de 3,2 millions d'hectares affectés (**Hamdy A., 1999**).

Parmi les actions à entreprendre en vue de valoriser et de développer ces régions, les plantations à base d'espèces végétales adaptées, capables de résister à la sécheresse et de tolérer les sels constituent une priorité (**Benmghioul B., et al., 2009**).

II.6. Impacts de la salinité sur les plantes

La salinité constitue l'un des éléments qui entravent la croissance des végétaux. Les conséquences de la salinité incluent : l'interruption de la croissance, le flétrissement des tissus sous forme de nécroses périphériques, suivi d'une diminution de la turgescence, d'une défoliation et finalement du décès de la plante (**Zid, 1982**). La salinité entraîne généralement un retard dans le processus de développement (**Gill, 1979 ; ELMekkaoui, 1990 ; Boukhachabia, 1993**). En général, la croissance des tiges de différentes espèces ainsi que la taille des fruits tendent à diminuer considérablement avec l'augmentation de la salinité. Il s'agit d'un cas de riz (**Khan et al., 1997**).

II.6.1. Effet de stress salin sur les plantes

Le stress salin provoque des changements morphologiques chez les plantes et freine leur croissance. Dans ces agrandissements au stress salin, on observe une faible ramification, une réduction de la longueur du diamètre et du poids à sec des tiges et des racines. Un raccourcissement de l'entre-nœud et une réduction du nombre de nœuds, Diminution du nombre de feuilles et de la superficie foliaire (**Hamza., 1977 in Saada et al., 2017**).

La salinité a un impact défavorable sur le développement de la plante, surtout en diminuant l'expansion de la partie aérienne. Il a été observé que les feuilles sont les organes les plus vulnérables à une salinité trop élevée, alors que la croissance des racines est peu influencée (**Benmahioul et al., 2009 in Kouadria., 2019**). L'accroissement de la salinité entraîne aussi une diminution de la croissance, imputable à la toxicité des ions et à un déséquilibre nutritionnel. Cela conduit non seulement à une concentration accrue de Na⁺ et Cl⁻ dans les végétaux, mais perturbe également l'absorption d'éléments nutritifs antagonistes indispensables tels que K⁺, Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ (**Zörb et al., 2019**). Le stress salin altère les caractéristiques morphologiques,

physiologiques et biochimiques des végétaux. Cette influence pourrait être associée à des perturbations dans les niveaux de régulateurs de croissance : (hormonal imbalance). Les phytohormones sont les composés endogènes les plus essentiels dans la régulation des réponses physiologiques qui mènent finalement à une adaptation à un environnement hostile, tel que cela se produit en présence de salinité (Khan, 2013).

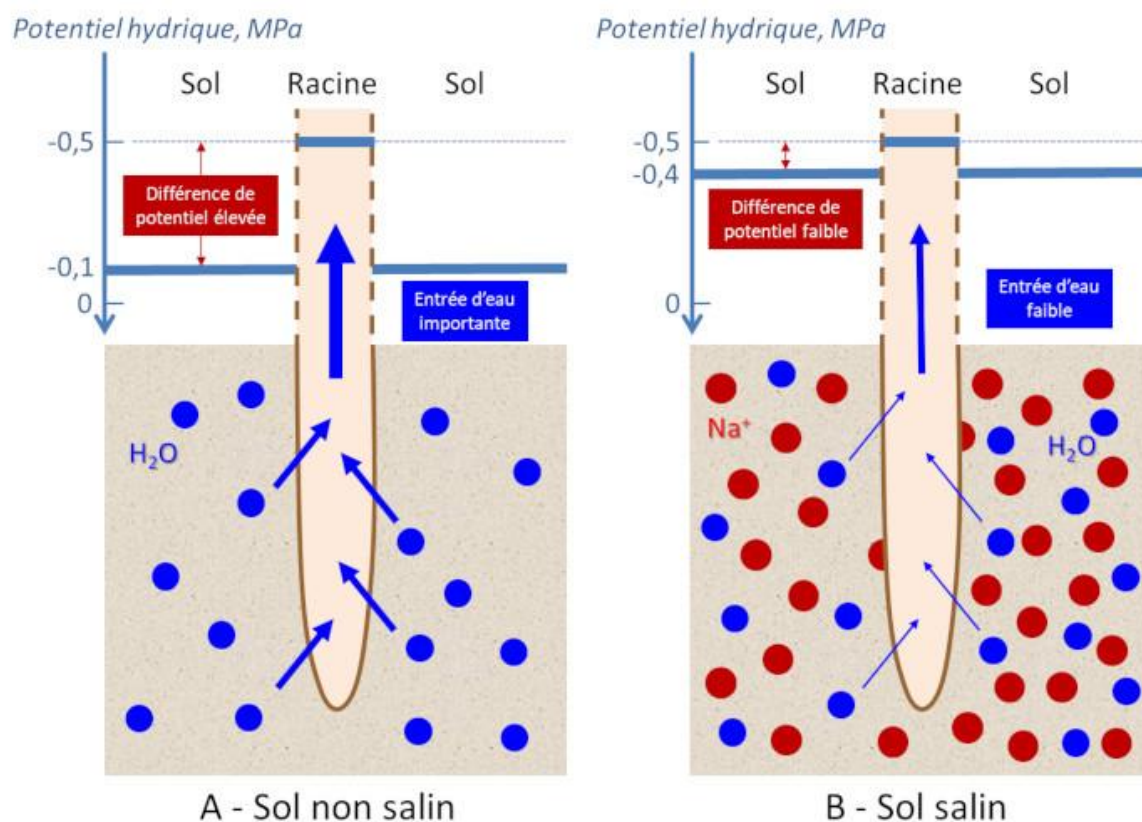


Figure 07. Schéma descriptif de la pression osmotique et le potentiel hydrique dans des sols salin et non salin (Encyclopedia of the environment).

II.6.2. Impact du stress salin sur la culture de tournesol (*Helianthus annuus L*)

Si la compétitivité dans la démarche de recherche poursuivie est largement dépendante de l'existence des ressources scientifiques disponibles, le choix des cibles d'une recherche finalisée résulte de la conjonction d'un besoin exprimé par la filière et d'une opportunité engendrée par l'état des connaissances sur l'espèce d'intérêt et sur les espèces modèles. À l'échelle de l'Europe géographique au sens large, la culture du tournesol souffre d'un déficit de productivité significatif (30 % environ) par rapport à son seul concurrent notable sur ce territoire, le colza d'hiver. Cette comparaison ne peut évidemment être faite « toutes choses égales par ailleurs », car les adaptations pédoclimatiques et les niveaux des intrants requis pour que cet écart s'exprime sont sensiblement différents. Cependant, pour les débouchés alimentaires ou non alimentaires, la viabilité économique de la filière du tournesol est

étroitement liée à une augmentation de la productivité et de sa régularité. Notre équipe a donc choisi de développer deux thématiques prioritaires de recherche : la tolérance aux stress abiotiques comme voie d'amélioration de la régularité de productivité de la culture et l'amélioration de la durabilité de la résistance au mildiou causé par l'oomycète obligatoire *Plasmopara halstedii*, qui est un enjeu durable pour la sécurisation de la culture. Les différents mécanismes mis en œuvre par la plante pour répondre aux stress abiotiques ont fait l'objet de nombreux travaux sur l'espèce modèle *Arabidopsis thaliana* (**Hirayama et Shinosaki, 2010**), mais également sur le tournesol (**Manavella et al., 2006 ;Dezar et al., 2005 ; Giacomelli et al., 2010**).

Ces résultats fournissent à la fois une référence pour la conception des expériences et une liste de « gènes candidats » dont l'implication a été démontrée dans les espèces modèles : mécanismes dépendant ou non de la signalisation par l'hormone ABA, effecteurs impliqués dans la régulation de l'ouverture stomatique ou du potentiel osmotique par l'accumulation des osmolytes, la protection des protéines membranaires, la réparation des dommages liés à l'oxydation consécutive aux stress (**Ramanjulu et Bartels, 2004**).

III. La germination chez la plante

III.1. Définition de germination :

La germination des graines est une étape vitale dans le cycle de vie des plantes (**Grime, J. P. & Campbell, B. D. (1991)**), qui conditionne l'établissement réussi des plantules et leur croissance ultérieure. À cette étape, la germination des graines se déroule en trois étapes. Au cours de la phase d'imbibition, les graines dormantes absorbent de l'eau et subissent une hydrolyse. Les variations dans les quantités de protéines, de glucides et de lipides peuvent affecter le processus d'imbibition, qui est le résultat de l'interaction de ces trois éléments. Les corps protéiques et les globules huileux constituent les principales réserves dans les cultures oléagineuses, fournissant énergie, carbone et azote aux plantules pendant la germination (**Ali, A.S. & Elozeiri, A.A., 2017**). La seconde phase de régulation de la germination consiste à stimuler la production d'ATP lors de la glycolyse, du cycle de Krebs, de la chaîne respiratoire et de la traduction de l'ARNm stocké. La germination est considérée comme terminée lorsque la radicule perce la coque de la graine et développe une racine, tandis que les plumules créent un système de tiges capable d'absorber des substances inorganiques, de l'eau et de l'énergie lumineuse pour une croissance saine.

III.2. La physiologie de germination

La germination, quant à elle, est l'émission de la radicule par l'embryon à travers les téguments (**Bewley, 1997**). Bien que le phénomène soit initié par des stimuli extérieurs appropriés, il suit une cascade physiologique comprenant trois phases majeures. Dès la graine en contact avec l'eau, la première ou l'imbibition commence son cheminement (**Bewley et al., 2013**). Il débute avec une période d'absorption d'eau sèche rapide et passive par l'embryon, qui rétrécit ensuite ses cellules, provoquant sa respiration et exacerbant la synthèse de son énergie. Néanmoins, aucun gonflement n'est encore observé (**Nonogaki et al., 2010 ; Bewley et al., 2013**). Cette phase n'implique encore aucun gonflement cellulaire (**Finch-Savage & Leubner-Metzger, 2006**). La deuxième phase, ou phase métabolique active, se traduit ensuite par une évidence de la teneur en eau de la graine après un certain point, bien que son métabolisme soit haussé (**Bewley et al., 2013**). Cette phase est en effet caractérisée par une accumulation de cellules divisées par un métabolisme intense, synthétique et hydrolytique d'enzymes spécifiques impliquées dans la démolition des réserves de l'endosperme ou du cotylédon (**Finch-Savage & Leubner-Metzger, 2006 ; Weitbrecht et al., 2011**). Cela fournit de l'énergie et les blocs de construction pour la biosynthèse de nouvelles structures cellulaires (**Weitbrecht et al., 2011**). En outre, la signalisation hormonale civile s'améliore par l'augmentation de GA et la baisse d'ABA pour fortifier la leur hormonale ; en d'autres termes, la suppression de GA2OX

renforce l'expression de ses gènes, tandis que la mutagenèse perturbe son expression ou son activité (Finkelstein et al., 2008).

Troisièmement, l'étape de croissance cellulaire active se produit lors de l'allongement des cellules parentes du germe ou des radicules parent. Il y a donc une pression mécanique qui se propage des radicules parentes en formation, provoquant la rupture des téguments. En règle générale, cette rupture coïncide avec l'apparition, et dans la plupart des cas avec la sortie de la radicule, signe la fin de la germination. Les plantules sont donc post-germinatives, où elles dépendent des accumulations qui ont été établies dans la graine pour la croissance et le développement. Il convient de mentionner que les phases de germination peuvent être influencées par divers facteurs au même titre que la température, la lumière, la salinité ainsi que le facteur génétique, qui affectent l'efficacité et la vitesse de cet événement. Troisièmement, l'étape de croissance cellulaire active se produit lors de l'allongement des cellules parentes du germe ou des radicules parent. Il y a donc une pression mécanique qui se propage des radicules parentes en formation, provoquant la rupture des téguments (Bewley, 1997). En règle générale, cette rupture coïncide avec l'apparition, et dans la plupart des cas avec la sortie de la radicule, signe la fin de la germination. Les plantules sont donc post-germinatives, où elles dépendent des accumulations qui ont été établies dans la graine pour la croissance et le développement. Il convient de mentionner que les phases de germination peuvent être influencées par divers facteurs au même titre que la température, la lumière, la salinité ainsi que le facteur génétique, qui affectent l'efficacité et la vitesse de cet événement (Rajjou et al., 2012).

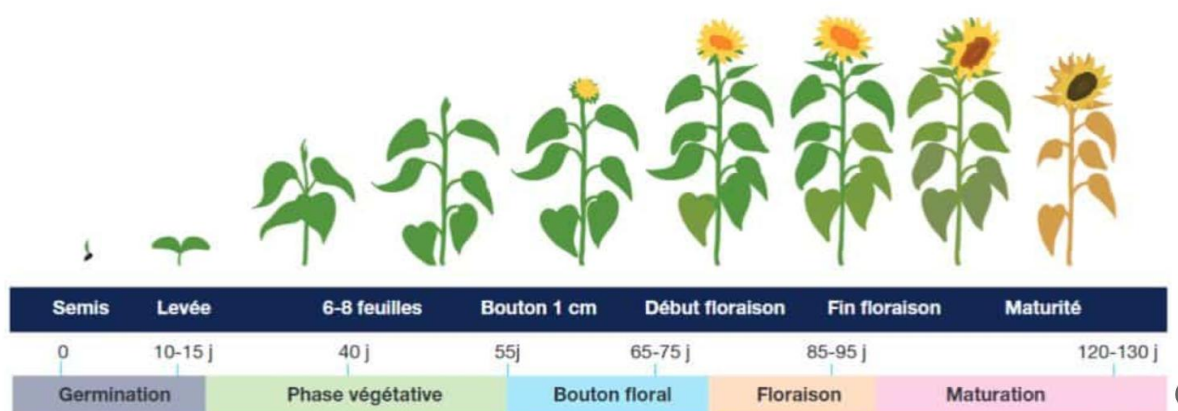


Figure 08. Les phases de germination de tournesol (Rajjou et al.,2021).

III.3. Germination et stress environnementaux

L'exposition des plantes à des facteurs de stress environnemental a un impact négatif sur celles-ci, entravant le bon fonctionnement d'un système biologique (Naz et al., 2015). En raison de la montée des facteurs de stress environnementaux et des problèmes climatiques au cours du dernier siècle, la dégradation des écosystèmes naturels a atteint des proportions considérables. Cette situation a entraîné d'importantes pertes de récoltes, une diminution de la productivité et de la qualité dans le secteur agricole et forestier (Guo et al., 2012).

Récemment, la question de l'eau et de l'aridité a commencé à représenter une menace sérieuse pour la végétation des zones en difficulté en raison du réchauffement climatique et des hausses marquées de la température estivale. L'une des solutions à ces problèmes est d'utiliser des plantes capables de survivre avec de très faibles quantités d'eau (Pulatkan & Var, 2010). L'emploi d'espèces végétales naturelles dans les projets paysagers exige une irrigation efficace ainsi que l'utilisation de phytothérapie et de fertilisation, ce qui permet de réduire considérablement les coûts d'entretien (Atik & Karaguzel, 2007). Les plantes destinées à être utilisées dans des projets paysagers sont censées résister à la sécheresse. Cet objectif est le critère le plus déterminant dans la sélection des plantes dans ces études (Yilmaz & Yilmaz, 2009).

Tableau 02. Effets du potentiel hydrique sur le pourcentage de germination.

Species	Control	-2 BAR	-4 BAR	-6 BAR	-8 BAR
<i>Pinus brutia</i>	64.4	47.2	36.3	25.7	22.1
<i>Pinus nigra</i>	72.8	59.1	57.06	48.38	47.32
<i>Koelreuteria paniculata</i>	23.5	8.3	6.5	4	3
<i>Cupressus sempervirens</i>	64.7	56	52.5	40.6	23.6
<i>Pyracantha coccinea</i>	30.7	17.5	14	4	3
<i>Thuja orientalis</i>	50.7	68.9	44.3	37	14.5
<i>Sophora japonica</i>	36	31.2	21.2	3	0
<i>Cupressus arizonica</i>	7.1	10.1	5	3	0
<i>Ailanthus altissima</i>	58.3	55.1	6	0	0

La salinité du sol figure parmi les problématiques mondiales majeures qui ont un impact négatif sur la productivité des cultures.

La salinité freine la croissance et le développement des plantes par le stress hydrique, la cytotoxicité causée par une absorption excessive d'ions tels que le sodium (Na^+) et le chlorure (Cl^-), ainsi que par un déséquilibre nutritionnel. De plus, la salinité est généralement associée à un stress oxydatif en raison de la production de species réactives de l'oxygène (SRO) (Tsugane et al., 1999 ; Hernandez et al., 2001 ; Isayenkov, 2012).

On distingue deux phases principales dans la réaction des plantes à la salinité. Une réduction de croissance non dépendante des ions, qui se manifeste en quelques minutes à jours, induit la fermeture des stomates et l'arrêt principalement de l'expansion cellulaire au niveau du bourgeon (Munns et Passioura, 1984 ; Munns et Termaat, 1986 ; Rajendran et al., 2009). Une deuxième phase se déroule sur plusieurs jours, voire des semaines, et concerne l'accumulation de niveaux d'ions cytotoxiques qui ralentissent les processus métaboliques, provoquent un vieillissement prématuré et finissent par entraîner la mort cellulaire (Munns et Tester, 2008 ; Roy et al., 2014). La tolérance à ces deux formes de stress est régie par une multitude de mécanismes physiologiques et moléculaires : la tolérance osmotique, la tolérance ionique et la tolérance des tissus (Rajendran et al., 2009 ; Roy et al., 2014). La tolérance osmotique commence assez rapidement et implique une diminution rapide de la conductance stomatique pour conserver l'eau. Il utilise des mécanismes de signalisation rapide à longue distance (de la racine à la feuille) (Ismail et al., 2007 ; Maischak et al., 2010 ; Roy et al., 2014), qui ne font pas vraiment la distinction entre les effets osmotiques créés par le NaCl, le KCl, le mannitol ou le polyéthylène glycol (Yeo et al., 1991 ; Chazen et al., 1995).

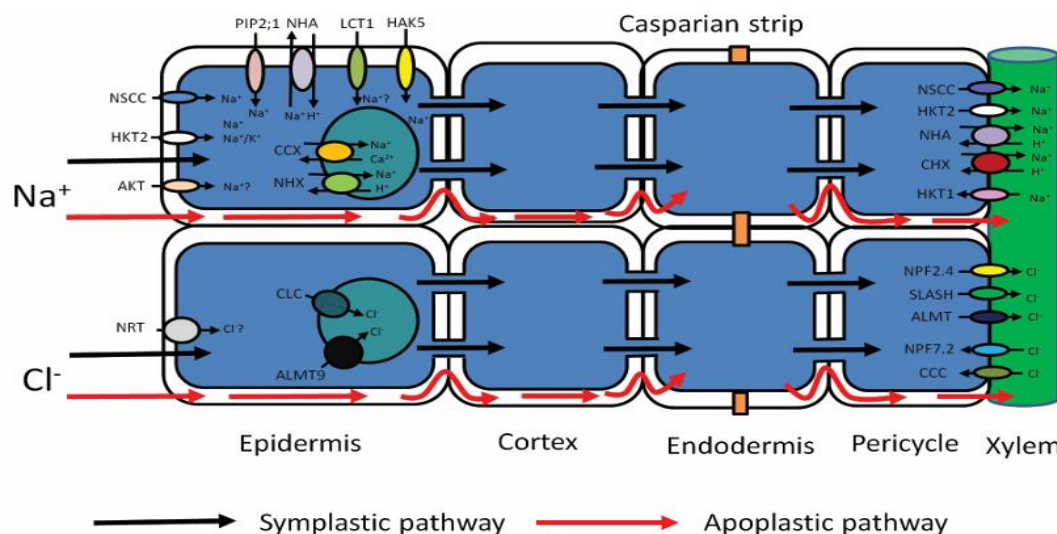


Figure 09. Représentation schématique des voies de transport possibles pour l'absorption de Na^+ et Cl^- , ainsi que leur distribution cellulaire et à longue distance (Isayenkov, S. V., & Maathuis, F. J. M. (2019).

Les flèches rouges indiquent les points d'entrée de Na^+ et Cl^- ainsi que leur chemin à travers les parois cellulaires - le flux de contournement apoplasmique. Des flèches noires indiquent les points d'entrée de Na^+ et Cl^- ainsi que le chemin cytoplasmique à travers la membrane plasmique-symplastique. Différents transporteurs (AKT, HKT2, NSCC, PIP2;1, NHA, LCT1, HAK5) pourraient être impliqués dans l'absorption et le déplacement du Na^+ à travers la membrane plasmique. Compartmentalization of Na^+ in vacuoles is mediated by tonoplast transporters (CCX, NHX). Il se peut que la redistribution du Na^+ sur de longues distances soit dépendante de plusieurs familles de transporteurs membranaires (NSCC, HKT, NHA, CHX). L'entrée de Cl^- dans les cellules racinaires via la membrane plasmique pourrait être facilitée par le co-transporteur NRT Cl^-/H^+ . Il est possible que deux transporteurs anioniques du tonoplaste (ALMT et CLC) soient impliqués dans le séquestrage du Cl^- dans la vacuole. Le transport de Cl^- sur de longues distances peut être assuré par des transporteurs membranaires issus de différentes familles de protéines (NPF, SLASH, ALMT, NPF, CCC). AKT, Transporteur de K^+ d'Arabidopsis ; HKT, Type de transporteur de K^+ à haute affinité ; NSCC, Canaux non sélectifs de cations ; PIP 2,1, Protéine intrinsèque de la membrane plasmique (Aquaporine) ; NHA, Na^+/H^+ antiporter (SOS1) ; LCT1, Low-affinity cation transporter ; HAK, High-affinity K^+ uptake transporter ; CHX, cation/ H^+ exchanger ; NHX, Na^+/H^+ exchanger ; NRT, Nitrate transporter ; ALMT, Aluminum activated malate transporter ; CLC, Chloride channel ; NPF, Nitrate transporter 1/peptide transporter ; CCC, Cation/chloride cotransporter ; SLASH, Anion channel associated homolog (Volkov, V. 2014), (Isayenkov, S. V. & Maathuis, F. J. M. 2019), (Leidi, E., Mendoza, I. & Tester, M. 2018).

Tout comme d'autres organismes, les plantes supérieures présentent un taux de croissance et de développement maximal à une température optimale ou sur une plage diurne de températures à laquelle elles se sont adaptées (Fitter et Hay 1981, Levitt 1972). À mesure que la température ambiante s'écarte de plus en plus de l'idéal, des changements physiologiques, biochimiques, métaboliques et moléculaires se produisent chez les plantes afin d'optimiser les processus de croissance et de développement tout en préservant leur homéostasie cellulaire.

III. 4. Stress à basse température

La capacité des plantes à préserver l'homéostasie à des températures fraîches (0–15°C) et/ou à développer une tolérance au gel nécessite une reprogrammation importante de l'expression génique et du métabolisme (Cook et al. 2004, Thomashow 1999).

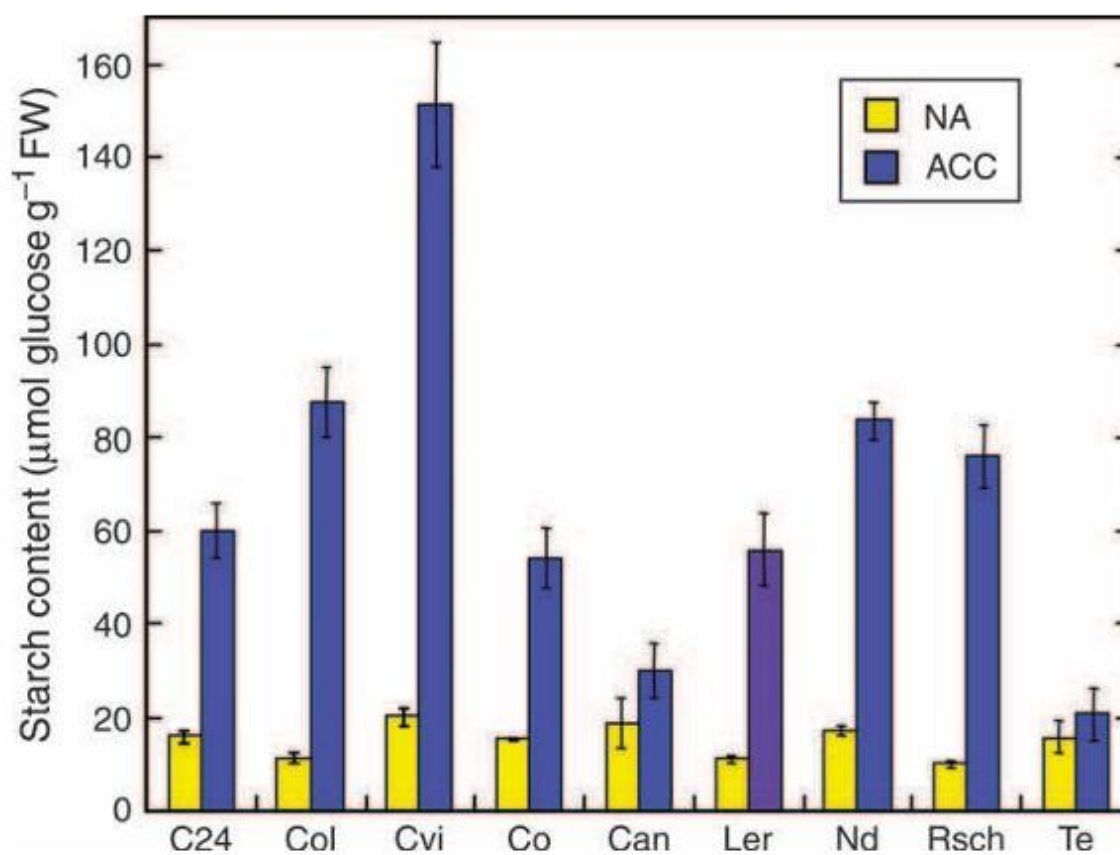


Figure 10. Teneur en amidon des feuilles d'*Arabidopsis* avant (NA) et après une acclimation au froid de 14 jours (ACC) à 4°C (M.A.Ayub, 2001).

Lors de l'acclimation au froid, les plantes ont été soumises à une photopériode de 16 heures avec un flux photonique de 90 mmol m² s⁻¹. Des échantillons ont été prélevés après 8 heures d'exposition à la lumière, et la teneur en amidon est indiquée en mmol de glucose par gramme de poids frais. Les accessions d'*Arabidopsis* étaient C24, Columbia-0 (Col), Îles du Cap-Vert (Cvi), Coimbra (Co), Îles Canaries (Can), Landsberg erecta (Ler), Niederzenz (Nd), Rschew (Rsch) et Tenela (Te). Les données pour cette figure ont été extraites du tableau complémentaire II dans (Hannah et al. 2006), où l'on peut également trouver plus de détails sur les plantes et les expériences. FW, poids frais.

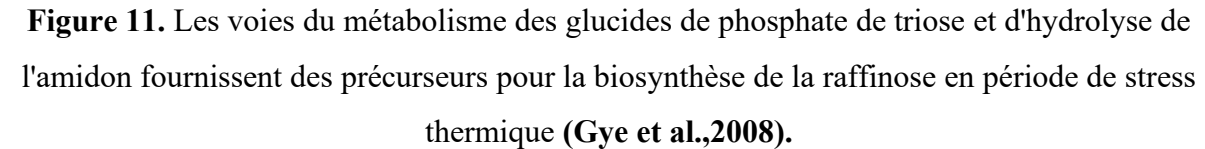
III.5. Stress à haute température

Il y a eu très peu d'études métabolomiques non ciblées réalisées sur des plantes soumises à un certain type de stress thermique (Kaplan et al. 2004, Rizhsky et al. 2004). Les plantes sont fréquemment exposées à la sécheresse et à la chaleur simultanément. Bien que la sécheresse et

le stress thermique aient été largement étudiés séparément, on sait peu de choses sur la réaction des plantes à leurs effets combinés (**Rizhsky et al. 2004**).

Donc, les réactions d'*Arabidopsis* à une conjonction de stress de sécheresse et de chaleur ont été examinées, et il a été établi que les réponses à ce stress combiné se différencient de celles des plantes exposées soit à la sécheresse, soit au stress thermique individuellement. Le profilage métabolique non ciblé a montré que les plantes exposées à une combinaison de stress par sécheresse et chaleur accumulaient plusieurs sucres solubles, y compris le saccharose, le maltose, le tréhalose, le fructose et le glucose. De nombreux sucres solubles accumulés sont des osmolytes/solutés compatibles connus qui peuvent être avantageux en période de stress thermique (**Diamant et al. 2001**).

En revanche, les plantes exposées uniquement à la sécheresse ont accumulé de la proline, tandis que celles soumises à un stress thermique ou à une combinaison de sécheresse et de stress thermique n'ont pas accumulé de proline. On a conclu que, à des températures élevées, la proline ou ses intermédiaires de biosynthèse/de dégradation, comme le pyrroline-5-carboxylate, sont toxiques. Par conséquent, la proline ne convient pas en tant qu'osmolyte/soluté compatible. Chez les plantes exposées à un stress combiné de sécheresse et de chaleur, il a été spécifiquement observé une élévation du taux de glutamine, ce qui suggère que lorsque la biosynthèse de la proline est inhibée, le glutamate est redirigé vers la production de glutamine.



Le diagramme illustre deux voies de dérivation des glucides provenant de la photosynthèse dans les rosettes d'*Arabidopsis*, menant à la synthèse des réactions individuelles des voies présentées sont limitées à celles qui sont localisées dans le cytosol. Les réponses des métabolites et de l'expression génique provenaient de jeux de données appariés issus des mêmes expériences. Les réponses des métabolites ont été extraites de l'ensemble de données précédemment publié par **(Kaplan et al. 2004)**. Les réponses d'expression génique ont été obtenues à partir d'un ensemble de données déposé à NASCArrays sous le numéro d'accès NASCARRAYS-404, comme décrit précédemment **(Kaplan et al. 2007)**. Des ensembles de données sur les métabolites et l'expression génique ont été examinés par le biais de l'ANOVA à un facteur. Les métabolites présents dans l'ensemble de données sont soulignés. Les gènes présentant une expression différentielle sont répertoriés par code AGI pour chaque enzyme indiquée. Les gènes qui ne sont pas exprimés ou qui ne sont pas exprimés de manière différentielle lors des réactions soit au choc thermique, soit à l'acclimatation au froid ne sont pas répertoriés. Le matériel complémentaire énumère tous les gènes correspondant aux réactions enzymatiques illustrées. L'ombre indique les voies qui relient la photosynthèse et l'amidon au raffinose. Les enzymes présentées sont les suivantes : DPE, enzyme démesurante ; FBPase, bisphosphatase 1,6 ; FK, fructokinase ; Fru-P2A, aldolase du fructose-bisphosphate ; GP, phosphorylase d'a-glucane ; GPI, isomérase de la phosphoglucose ; GS, synthétase du galactinol. IP, la myo-inositol-1-phosphatase monophosphatase ; MIPS, la myo-inositol-1-phosphate synthase ; PGM, le phosphoglucomutase ; RS, le raffinose synthase ; SPP, la sucrose phosphatase ; SS, le stachyose synthase ; SUS, le sucrose synthase ; UGE, l'UDP-glucose 4-épiémérase ; UGPase, l'UDP-glucose pyrophosphorylase.

III.6. Comparaison et contrastes du métabolisme sous stress thermique.

La première divergence remarquée entre les réponses à haute et basse température était quelque peu contre-intuitive : le métabolisme était influencé de manière beaucoup plus profonde par la basse température que par le choc thermique. Alors que les variations de métabolites étaient réparties uniformément sur des intervalles de temps précoces, intermédiaires et tardifs à basse température, la plupart des réactions de métabolites à haute température se produisaient dans les 30 premières minutes, période pendant laquelle la tolérance à la chaleur augmentait. Ensuite, la plupart des réactions métaboliques au choc thermique ont été partagées avec les réactions à basse température, une relation qui était inconnue avant l'étude de profilage de métabolites non ciblés de **(Kaplan et al. 2004)**.

III.7. Effets du stress salin sur la germination

Les graines de glycophytes et de halophytes réagissent de la même façon au stress salin, diminuant le nombre global de graines qui germent et retardant le commencement du processus germinatif (**Ismail, 1990 ; Lachihab et al., 2004**). Parmi les raisons de l'inhibition de la germination en présence de sel, il a été fait mention d'une modification de l'équilibre hormonal (**Ungar, 1978 ; Kabar, 1986 in Debez et al., 2001**). Par exemple, la présence de 12 g/l de chlorure de sodium (NaCl) fait descendre le taux de germination du cotonnier à 70%, tandis que la germination des tubercules de pomme de terre peut être retardée de 3 à 7 jours en fonction du niveau de salinité du sol (**Levigner et al., 1995**). La germination de la luzerne est défavorablement influencée par la présence du sel et peut être entièrement entravée à des concentrations dépassant 15 g/l de NaCl (**Chaibi, 1995**).

La salinité influence la germination des plantes, qu'elles soient halophytes ou glycophytes. L'effet dépressif peut être de type osmotique ou toxique, en fonction de l'espèce (**Intech Open, 2023**).

Les effets osmotiques se traduisent par l'inaptitude des graines à absorber des quantités suffisantes en eau pour les ramener à leur seuil critique d'hydratation, nécessaire au déclenchement du processus de germination, les effets toxiques sont liés à une accumulation cellulaire de sels qui provoquent des perturbations des enzymes impliquées dans la physiologie des graines en germination, empêchent la levée de dormance des embryons et conduisent à une diminution de la capacité de germination (**Rejili et al., 2006**). La salinité influence principalement la germination des graines, qui est le premier processus physiologique touché. La capacité d'une semence à produire un embryon viable est influencée par les conditions environnementales de germination, notamment sa teneur en sel. Un niveau élevé de salinité diminue la rapidité de germination et le potentiel germinatif (**Slama, 2004**). Selon (**Belkhodja & Bidai 2004**), (**Bliss et al. 1986**), (**Lachiheb et al. 2004**) ainsi que Mâalem & Rahmoune (2009), la diminution de la vitesse de germination expose davantage les semences aux dangers environnementaux. Cela réduit, au moins en partie, le taux de germination des graines, en fonction de la concentration en sel du milieu, même chez les plantes halophytes (**Debez et al., 2001 ; Baoji et al., 2002 ; Belkhodja & Bidai, 2004 ; Rahmoune et al., 2008**).

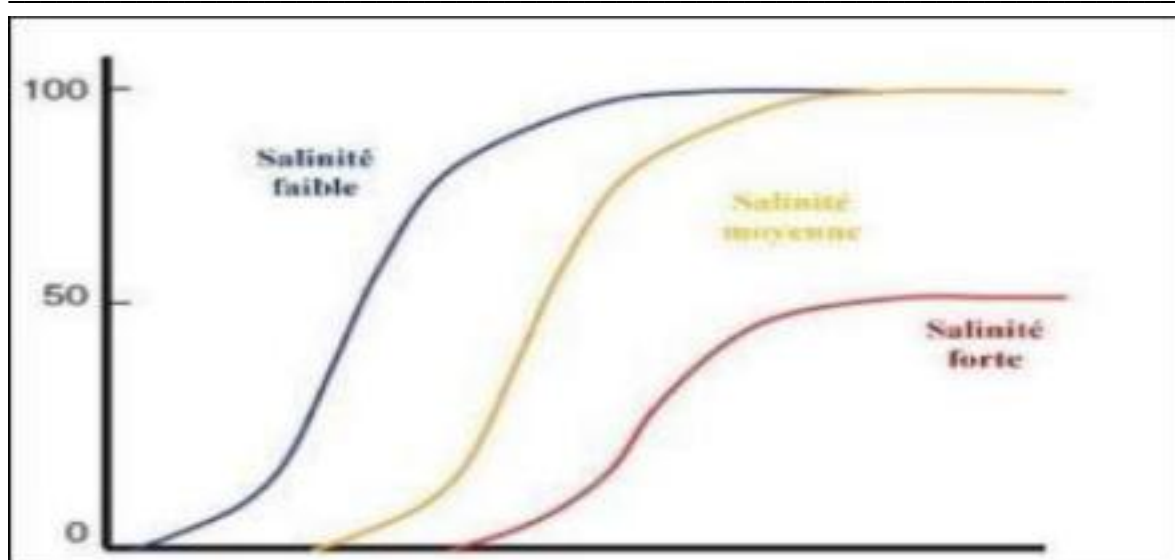


Figure 12. Diminution du pourcentage de germination avec l'augmentation de la salinité
(Lauchli & Grattan, 2007)

III.8. Cas du tournesol : germination en conditions salines

La germination des graines est la phase la plus cruciale du cycle de vie des plantes, sur laquelle repose l'établissement et le début de croissance des plantules. Plusieurs facteurs abiotiques tels que l'eau, la température, la lumière et la concentration en sels peuvent influencer la germination des graines (Jaleel et al., 2007). Parmi ces éléments, le sel est le facteur principal qui entrave la germination et l'établissement des plantules. (Almansouri et al., 2001 ; Ghoulam et Fares, 2001). La germination des graines peut être influencée soit par l'établissement d'un gradient osmotique externe, soit à cause des effets nocifs des ions. (Gulzar et Khan, 2001, Murillo-Amador et al., 2002, Hosseini et al., 2003). C'est principalement la présence élevée de sulfate ou de chlorure de sodium dans le sol qui est responsable de sa salinité (Dejampour et al., 2012). Le sodium est l'ion le plus crucial ayant un rôle indispensable dans la toxicité, car son absorption par les cellules racinaires des plantes se fait très rapidement (Hasegawa, 2013).

Le tournesol est une plante qui présente une tolérance modérée au sel. Néanmoins, le stress salin demeure un obstacle majeur dans la culture du tournesol en raison de la faible pluviométrie qui n'arrive pas à lessiver le sel de la zone racinaire et d'une évapotranspiration élevée souvent supérieure aux précipitations (Nolan, B. T. et al. 2007). En général, la capacité d'une culture à survivre et se développer dans des conditions salines dépend de sa tolérance au sel, qui peut varier en fonction des différentes cultures et des stades de croissance (Akbari, G., Sanavy, S. A. & Yousefzadeh, S. 2007). La germination des graines constitue la première phase de croissance et de développement des cultures au cours du cycle de vie de la plante (Li et al.,

2020). Il est donc essentiel que les cultures aient une capacité élevée de germination dans un sol salin pour leur croissance et développement ultérieur (**Mohammed et al., 2002**). Il a été signalé que le stress salin peut entraîner une diminution importante du taux de germination, car il réduit la capacité des plantes à absorber de l'eau du sol, ce qui inhibe leur croissance et entraîne une perte de rendement (**Zeng et al., 2014**).

Matériels et Méthodes

Matériels et Méthodes

1. Objectif

Le présent travail a pour objectif d'étudier l'effet du stress salin sur la germination de deux variétés de tournesol (*Helianthus annuus* L), face à différentes concentrations de NaCl.

2. Choix de l'espèce

Le choix de matériel végétal utilisé pour la réalisation de cette étude est porté sur deux variétés 'Serina' et 'Suzuka' introduites de tournesol (*Helianthus annuus* L). Qui ont été fourni par la station technique des grandes cultures ITGC de Sebain "Tiaret" 2024. Ces deux variétés inscrites dans un projet stratégique de gouvernement algérien de la réhabilitation et du développement des cultures oléagineuses y compris du tournesol, dans le cadre de ses efforts pour réduire la dépendance à l'importation de la matière première utilisée dans l'extraction des huiles alimentaires.



Figure 13. Graines de tournesol variété 'Suzuka'



Figure 14. Graines de tournesol variété 'Serina'

3. Conduite de l'expérimentation

Les essais ont été conduits dans le laboratoire de biotechnologie végétale à la faculté des sciences de la nature et de la vie, Université de Tiaret.

Les graines étaient sélectionnées au laboratoire selon leur morphologie, leur taille, leur couleur et leur aspect sanitaire (absence de contaminations). Celles-ci étaient trempées dans l'eau de javel à 8% pendant cinq minutes pour l'élimination éventuelle des champignons, puis elles étaient rincées à l'eau distillée. Ces opérations étaient répétées trois fois.

Les graines des deux variétés sont soumises à cinq traitements, par l'utilisation d'un seul type de sel (NaCl), dont les caractéristiques sont présentées dans les tableaux 03.

Tableau 03 : Différentes concentrations des solutions salines

	C1 Témoin	C2	C3	C4	C5
Concentration (mM/l)	0	30	60	120	240
Concentration (g/l)	0	1.75	3.5	7	14

Les graines sont mises à germer dans des boîtes de Pétri tapissées de papiers filtres, Dans chaque boîte de pétri, 10 graines sont semées en distance les unes des autres. Nous avons ajouté 4 ml de l'eau distillée pour le témoin, et 4 ml de solution préparée pour appliquer le stress salin.

Notre dispositif se répartit 2 blocs (selon les variétés) chaque bloc contient 5 traitements et chaque traitement est répété 5 fois. Les graines de chaque traitement sont imbibées chaque deux jours. L'expérimentation se déroule dans les conditions de laboratoire, le nombre de graines germées a été noté après chaque 24 heures jusqu'à 7ème jour.



Figure 15. Mise des boîtes de pétri en Gerموير

4. Paramètres étudiés

4.1. Paramètres physiologiques

4.1.1. Taux final de germination

Ce paramètre constitue le meilleur moyen d'identification de la concentration qui présente la limite physiologique de germination des graines. Il est exprimé par le rapport nombre de graines germées sur nombre total de graines (Côme, 1970).

$$\text{TG \%} = (N/N_t) * 100$$

N : est le nombre total des graines germées. N_t est le nombre total de graines mises à germer.

4.1.2. Indice de vigueur de germination

L'indice de vigueur de germination (IVG) est un paramètre qui permet d'évaluer la rapidité et l'homogénéité de la germination des graines. Il reflète la vigueur des graines en tenant compte à la fois du taux de germination et du temps nécessaire pour germer.

$$\text{IVG} = \sum (G_i/T_i)$$

- G_i = nombre de graines germées le jour i
- T_i = jour correspondant à la germination i

4.1.3. Vitesse de germination

C'est le temps moyen nécessaire à la germination de 50 % des graines. Elle permet d'exprimer l'énergie de germination responsable de l'épuisement des réserves de la graine (Benidire *et al*, 2015). Elle peut s'exprimer par un pourcentage, un temps ou un coefficient. Nous l'avons exprimée en taux selon la relation de (Kotowski, 1926)

$$VG = \Sigma Gi / \Sigma (Gi * Ti) \text{ où}$$

- Gi = nombre de graines germées le jour i
- Ti = jour correspondant à la germination i

4.1.4. Coefficient de vigueur de germination

Le coefficient de vigueur de germination (CVG) est un indice de rapidité et d'uniformité de la germination. Il permet d'évaluer la vigueur physiologique d'un lot de graines en mettant l'accent sur la vitesse de germination plutôt que seulement le pourcentage final.

$$CV = TG * IVG$$

4.1.5. Energie germinative

L'énergie germinative est le pourcentage de graines germées à un moment donné précoce (souvent au 3e ou 4e jour, selon les normes utilisées), par rapport au total de graines semées.

$$EG = (\text{Nombre de graines germées à un jour spécifique} / \text{Nombre total de graines semées}) \times 100$$

4. 1.6. Indice de récupération de la germination (Germination recovery)

C'est un paramètre qui permet de déterminer l'origine de l'effet dépressif (osmotique et/ou toxique). Dans ce cadre, les graines qui n'ayant pas pu germer sous différentes concentrations étudiées ont été bien lavées et mises dans un nouveau milieu ne contenant que l'eau distillée.

La germination de ces graines a été comptée de nouveau dans une durée de 7 jours, et exprimée par l'indice de récupération.

$$IR\% = (a - b / c - b) * 100$$

Où

a : nombre total des graines germées après transfert dans l'eau distillé ;

b : nombre total des graines germés dans la solution saline ;

c : nombre total des graines (El-Keblawy et Bhatt, 2015).

4.2. Paramètres morphologiques

4.2.1. Longueur de la tigelle et longueur de la radicule

Afin d'évaluer la croissance de la plante vis-à-vis du stress, la longueur de la racine primaire et de tigelle ont été mesurées après une période de 14 jours après avoir germé les graines, à l'aide d'une règle graduée et cela pour toutes les concentrations y compris le témoin à partir du T0.

5. Analyse statistique :

Les données relatives à chaque essai ont fait l'objet d'une analyse de variance (two way ANOVA) avec Deux facteur de classification (logiciel Co Stat version 6.4) puis, si nécessaire, un classement des moyennes a été effectué à l'aide du test de LSD. Les valeurs de $P < 0,05$ sont considérées significativement différentes.

Résultats et discussion

Résultats et discussion

1. Taux de Germination (TG) :

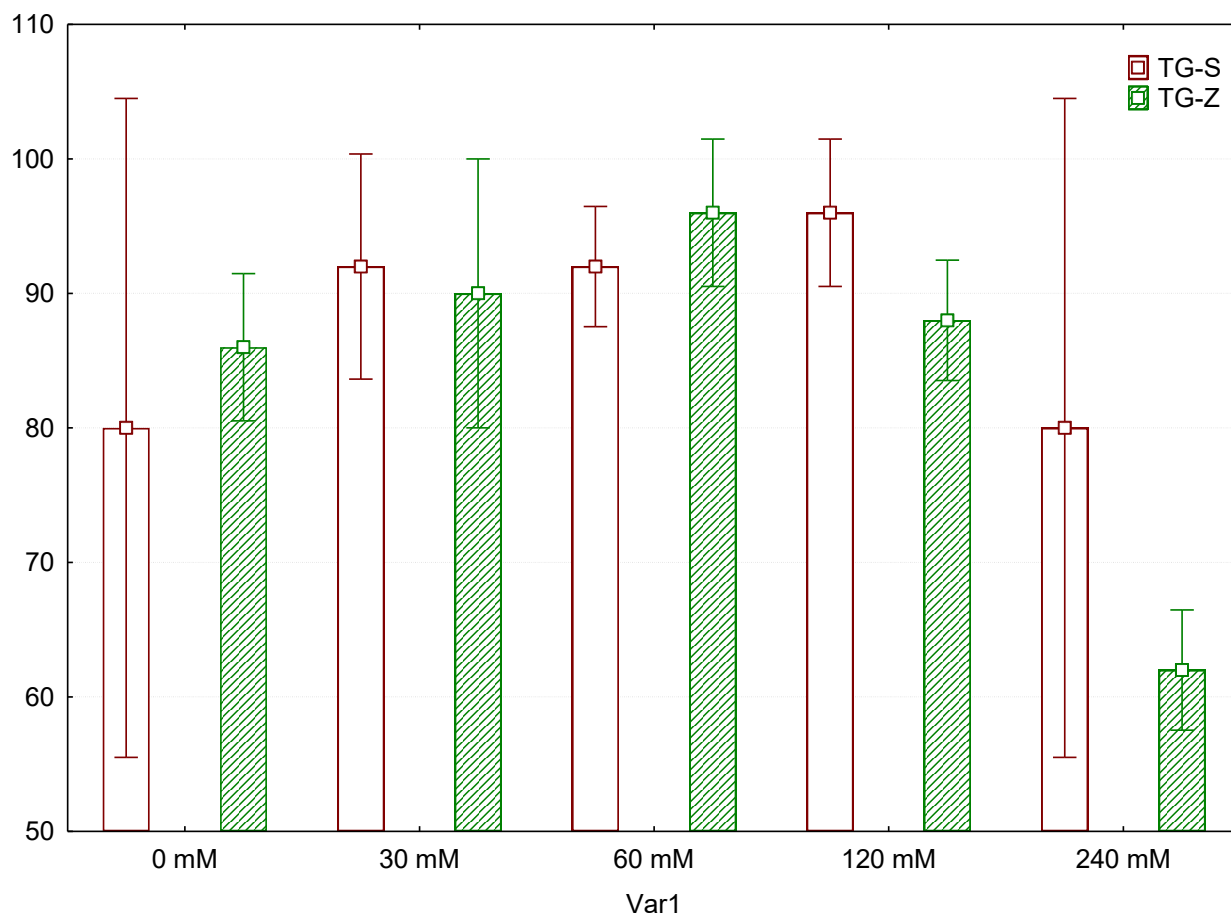


Figure 16. Le taux de germination (TG) de deux variétés du tournesol 'Serina' et 'Suzuka' en fonction de différentes concentrations de (NaCl).

À 0mM de NaCl ou le traitement témoin ; les deux variétés 'Serina' et 'Suzuka' présentent un taux de germination élevé et assez similaire (environ 80–85%), ce qui indique que les graines de notre expérimentation ont une bonne viabilité.

Les deux variétés montrent une augmentation des taux de germination à 30 et 60 mM de NaCl, atteignant plus de 90 %. Cela implique que de faibles concentrations de NaCl n'ont aucun effet néfaste sur la germination et peuvent même légèrement accélérer le processus. Le TG reste élevé pour la variété "Serina" à 120 mM (environ 90 %), mais il commence à diminuer pour la variété "Suzuka" (environ 85 %). Cela suggère que la variété "Serina" est plus tolérante à la haute salinité. Une baisse significative du TG a été observée pour les deux variétés à 240 mM de NaCl ; cependant la diminution était plus marquée pour la variété "Suzuka" (environ 65%) que pour la variété "Serina" (environ 80%). Cela indique que la germination est fortement inhibée à cette concentration, en particulier pour la variété "Suzuka".

Les résultats obtenus montrent que les deux variétés ‘Serina’ et ‘Suzuka’ présentent un taux de germination élevé avec la concentration de 120 mM de NaCl, ces résultats sont en accord avec ceux signalés par (Wenhui Li et al, 2020). Ainsi ils sont similaires avec celles notées par (Mahdjoubi S, 2019) pour les graines de *carthamus tinctorius*, ce qui suggère que les oléagineuses ont généralement une meilleure capacité d'adaptation aux conditions salines par rapport à d'autres familles de plantes comme les légumineuses ; *Vicia faba* avec un taux de germination 7,5% et 67,5% à 200 mM de NaCl selon les variétés (Benidire et al, 2015), (*Glycine max*) ne présente qu'un taux de germination de 40% à 15 g/L (environ 256 mM) de NaCl (Camara et al, 2018).

2. Indice de Vigueur de Germination (IVG) :

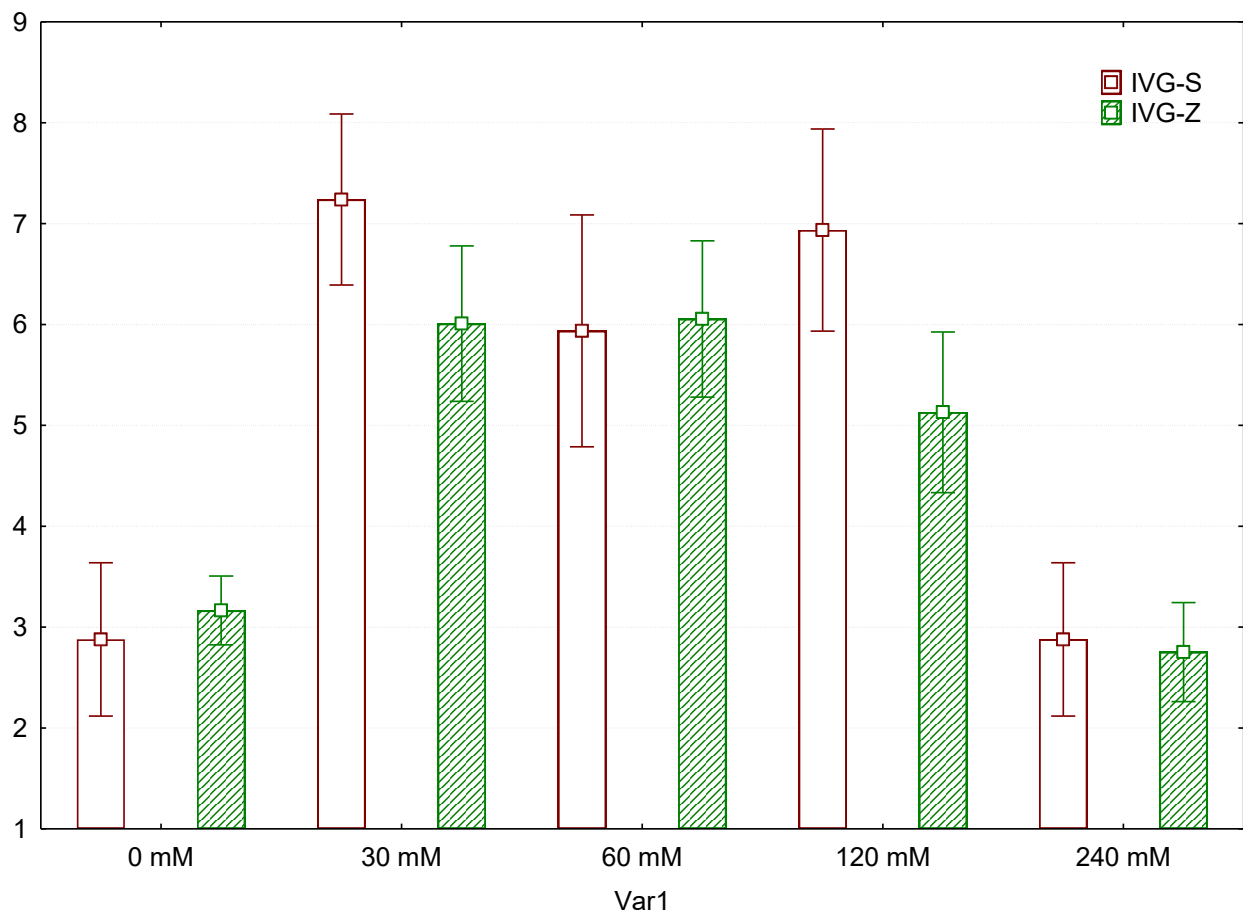


Figure 17. L'Indice de Vigueur de Germination (IVG) de deux variétés du tournesol ‘Serina’ et ‘Suzuka’ en fonction de différentes concentrations de (NaCl).

En absence de salinité, les deux variétés enregistrent un indice de vigueur germinative faible et semblable, ce qui suggère d'une vigueur germinative modérée sans stress salin.

À une concentration de 30 mM NaCl, les deux variétés montrent une augmentation significative de l'IVG cependant la variété « Serina » présente une valeur nettement plus haute (environ 7), alors que la variété « Suzuka » grimpe à environ 6. Cela indique un effet légèrement stimulant du sel à des doses faibles, notamment pour la variété « Serina ».

À 60 mM NaCl, les deux variétés conservent un indice de germination élevé où « Serina » affichant une légère diminution et « Suzuka » maintenant sa stabilité. Il semble que les deux types puissent répondre à cette exigence rigoureuse de germination.

Avec une concentration de 120 mM de NaCl, l'IVG de la variété « Serina » demeure élevé (environ 7), tandis que celui de la variété « Suzuka » commence à diminuer (environ 5). Ceci indique que la variété « Serina » manifeste une plus grande tolérance au stress salin à ce stade, alors que la variété « Suzuka » commence à démontrer des signes de susceptibilité.

On a observé une diminution notable de l'IVG pour les deux variantes qui affichent des valeurs semblables à celles du groupe témoin (environ 3). À ce stade, sans distinction notable entre les variétés, cette baisse considérable entraîne une limitation importante de la vigueur germinative à une salinité très élevée.

L'indice de vigueur de germination (IVG) des graines de tournesol des deux variétés 'Serina' et 'Suzuka' augmente à une faible salinité (30–60 mM NaCl), reste élevé jusqu'à 120 mM puis diminue fortement à 240 mM, ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par (G.-Q. Wu et al, 2015) et (Wenhui Li et al, 2020). Une tolérance similaire est observée chez le *Medicago sativa* (Farissi et al, 2016) et *Carthamus tinctorius* (Mahdjoubi S, 2019) où l'IVG reste élevé jusqu'à 100–150 mM NaCl, puis diminue fortement au-delà. Mais certains traitements pré-germinatifs peuvent améliorer la tolérance à la salinité (Farissi et al, 2016). Par contre chez les légumineuses, l'IVG réduit fortement dès la concentration de 100–150 mM NaCl (Camara et al, 2018).

3. Temps Moyenne de Germination (TMG) :

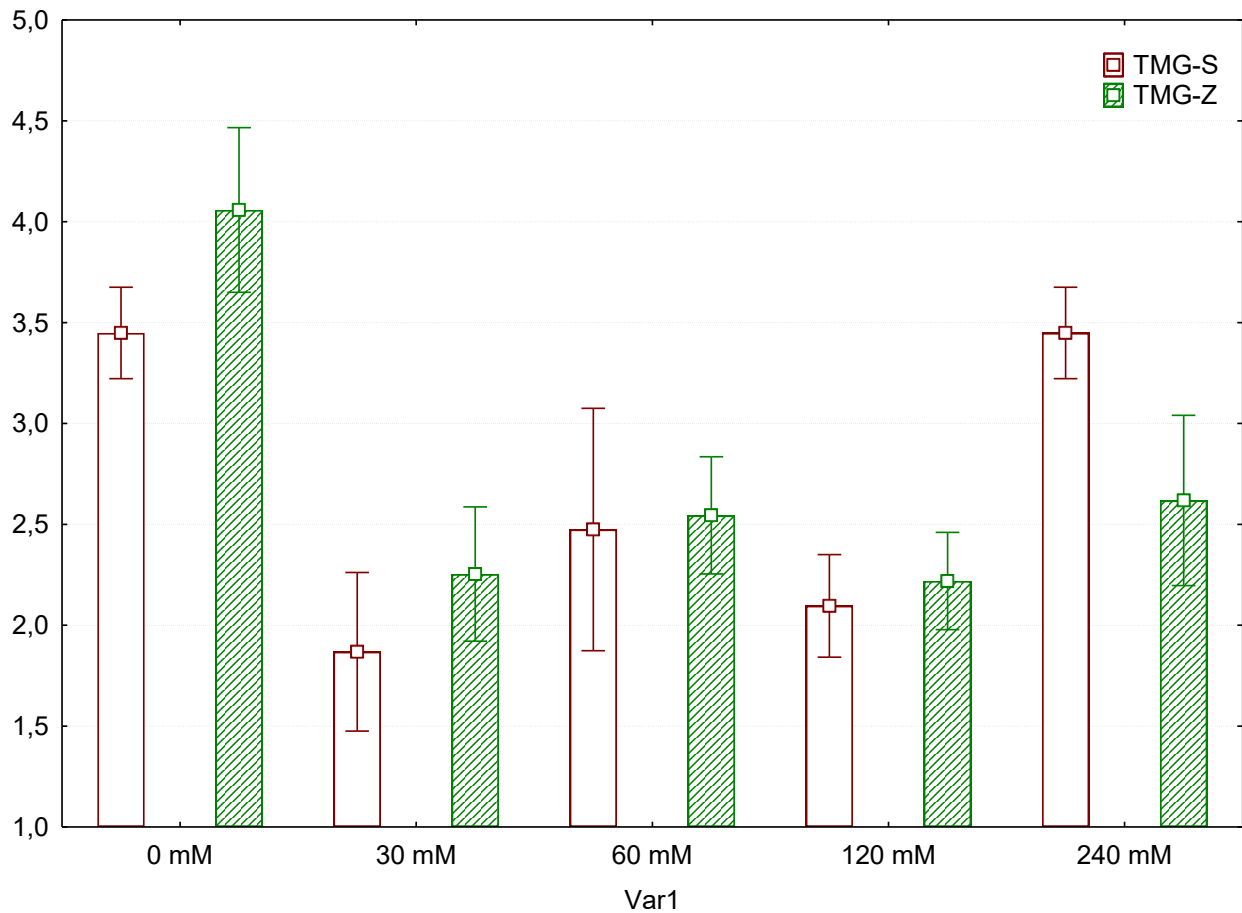


Figure 18. Le Temps Moyen de Germination (TMG) de deux variétés du tournesol ‘Serina’ et ‘Suzuka’ en fonction de différentes concentrations de (NaCl).

Le temps moyen de germination le plus élevé pour les deux variétés est marqué à un traitement sans sel, avec une valeur plus importante pour la variété « Suzuka » (4,1 jours) que pour la variété « Serina » (3,5 jours). Cela signifie que, sans stress salin, la variété « Serina » germe plus rapidement que la variété « Suzuka ».

A 30 mM NaCl, On a remarqué une forte diminution du TMG pour les deux variétés, qui varié à environ 1,9 jours chez la variété « Serina » et 2,2 jours chez la variété « Suzuka ». Cette baisse indique un effet stimulant de la faible salinité sur la rapidité de germination.

Le TMG augmente légèrement pour les deux variétés à 60 mM de NaCl, atteignant environ 2,5 jours pour la variété « Serina » et 2,6 jours pour la variété « Suzuka ». La germination reste cependant plus rapide qu’en absence de sel, mais l’effet stimulant s’atténue.

A 120 mM NaCl, Le TMG reste stable et faible (~2,1 jours pour S et ~2,2 jours pour Z). Cela suggère une bonne tolérance des deux variétés à cette concentration avec une germination rapide maintenue.

A 240 mM NaCl, le TMG remonte nettement pour la variété « Serina » (~3,5 jours), tandis que la variété « Suzuka » reste à un niveau intermédiaire (~2,6 jours). À cette concentration, la germination est ralentie, surtout pour la variété « Serina », traduisant une inhibition due à un stress salin très élevé.

Le temps moyenne de germination diminue fortement à faible salinité (30 mM NaCl) chez les deux variétés ‘Serina’ et ‘Suzuka’ et reste faible jusqu’à 120 mM, puis augmente à 240 mM notamment pour la variété ‘Serina’. Cela montre que la salinité faible à modérée accélère la germination, alors qu’une salinité très forte lui ralentit. Ces résultats sont comparables avec ceux de (Bouda et al, 2011), (Mahdjoubi S, 2019) et (Ansli R, 2019) qui ont prouvé que le TMG augmente avec l’augmentation de la concentration de NaCl. Cependant la salinité ne retarde pas le début de la germination, bien qu’il réduise le nombre de graines germées.

4. Vitesse de Germination (VG) :

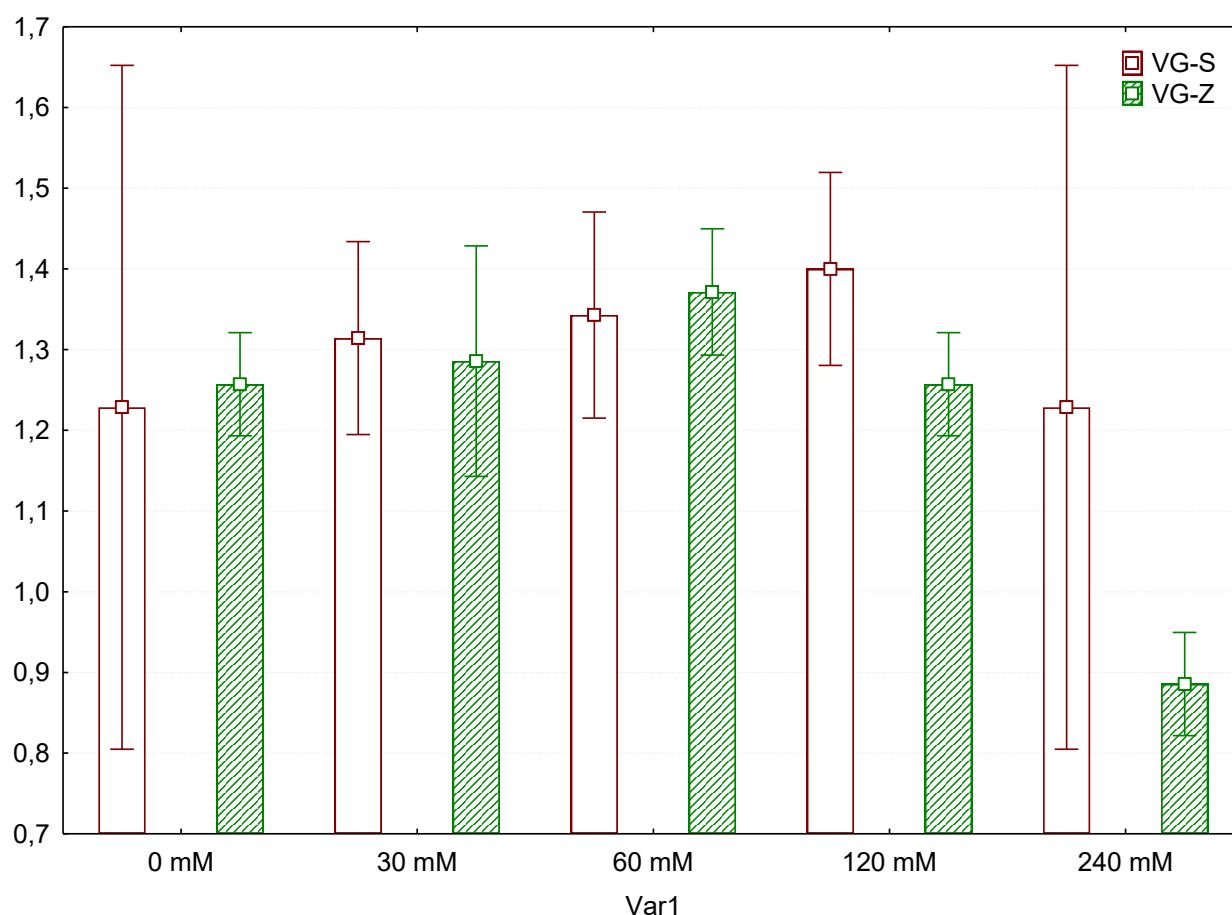


Figure 19. La vitesse de Germination (VG) de deux variétés du tournesol ‘Serina’ et ‘Suzuka’ en fonction de différentes concentrations de (NaCl).

La vitesse de germination (VG) est un indicateur clair de la rapidité de la germination des graines ; plus la valeur est élevée, plus la germination est rapide.

En absence de salinité, les deux variétés ont des vitesses de germination comparables, allant de 1,2 à 1,25. Cela suggère une germination relativement rapide sans différences discernables entre les deux variétés.

À une salinité modérée (30 mM et 60 mM NaCl), la VG augmente légèrement pour les deux variétés, atteignant environ 1,3 % à 1,35. La variété "Serina" montre une légère avance par rapport à "Suzuka," mais la différence reste minime. Cette augmentation suggère que la faible salinité a un effet légèrement stimulant sur le taux de germination.

La VG reste élevée et stable à 120 mM NaCl pour la variété "Serina" (~1,4), tandis qu'il diminue légèrement pour la variété "Suzuka" (~1,25). Cela se traduit par une tolérance plus élevée de la variété "Serina" à la forte salinité, qui maintient sa vitesse de germination lorsque la variété "Suzuka" commence à être affectée.

Une baisse significative de VG a été observée pour les deux variétés à 240 mM NaCl, en particulier pour la variété "Suzuka", qui est d'environ 0,9, tandis qu'elle est d'environ 1,2 pour la variété Serina mais très variable. À cette concentration, la germination est nettement ralentie, en particulier pour la variété 'Suzuka', indiquant un effet inhibiteur marqué du sel à dose très élevée.

La vitesse de germination des deux variétés 'Serina' et 'Suzuka' augmente légèrement avec la salinité faible à modérée (30-120 mM), puis diminue significativement à 240 mM particulièrement chez la variété 'Suzuka'. Nos résultats confirment ceux trouvés par (**Wenhui Li et al, 2020**) et (**J. LIU et al, 2010**) qui ont montré que sous les conditions salines, la vitesse de germination des graines de tournesol diminuait avec l'augmentation de la salinité. D'autre part nos résultats contraste partiellement avec ceux obtenus par (**Matias et al, 2018**) ou la salinité n'a pas causé de différence significative sur la vitesse de germination des graines de tournesol.

(**XU et al, 2011**) ont signalé une sensibilité plus marquée des graines de soja face à la salinité à une concentration de 120 mM qui induit une réduction sur la vitesse de germination.

Autres études sur différentes espèces comme *Brassica oleracea* et *Jatropha curcas* montrent que "la vitesse de germination diminue en condition saline" (**Matias et al, 2018**).

5. Coefficient de vigueur CV

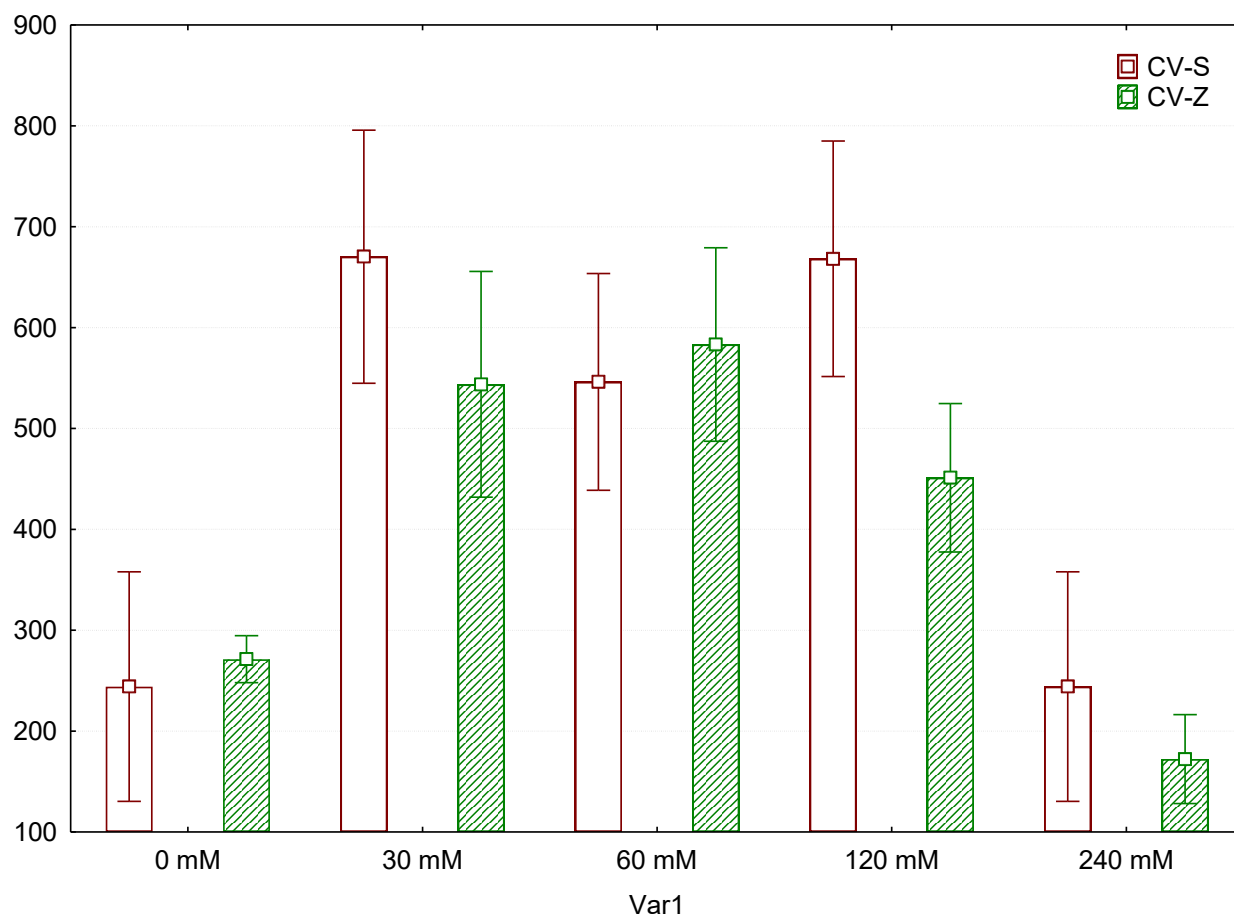


Figure 20. Le coefficient de vigueur de germination (CV) de deux variétés du tournesol 'Serina' et 'Suzuka' en fonction de différentes concentrations de (NaCl).

En absence de stress salin, les deux variétés présentent de faibles coefficients de vigueur de germination (CV).

Pour les deux variétés, particulièrement pour "Serina" (environ 700), le CV montre une forte augmentation à 30 mM de NaCl. Cette augmentation suggère que la faible salinité a un effet stimulant sur la vigueur de germination, notamment chez "Serina."

À 60 mM de NaCl, le CV diminue légèrement pour "Serina" (environ 600) et augmente pour "Suzuka" (environ 600), les deux variétés atteignant des valeurs proches l'une de l'autre. Cela indique que les deux variétés tolèrent bien cette concentration avec une vigueur comparable et élevée.

Le CV de "Serina" augmente (environ 700) à 120 mM NaCl, tandis que celui de "Suzuka" diminue (environ 480). Alors que la variété "Suzuka" commence à montrer une sensibilité accrue au stress salin, la variété "Serina" maintient une vigueur très élevée.

Il y a une diminution significative du CV pour les deux variétés à 240 mM NaCl (environ 250 pour "Serina" et 170 pour "Suzuka"). À cette concentration, la germination est fortement inhibée, en particulier pour Suzuka.

Le Coefficient de vigueur de germination des graines des deux variétés de tournesol 'Serina' et 'Suzuka' augmente fortement à faible salinité (30 mM), reste élevé jusqu'à 120 mM pour 'Serina', puis diminue drastiquement à 240 mM pour les deux variétés. Cependant la variété 'Suzuka' présente une sensibilité plus marquée que la variété Serina.

D'après (Bouda et al, 2010) « le tournesol, le trèfle et le maïs apparaissent plus tolérantes au sel pendant la phase de germination ». Cette observation est cohérente avec nos résultats. Contrairement le niébé a montré une faible tolérance avec un coefficient de vigueur faible dans les mêmes conditions de stress salin sévère (Camara et al, 2018). Cette différence souligne la supériorité des oléagineuses sur les légumineuses en termes de tolérance saline.

6. Energie Germinative EG

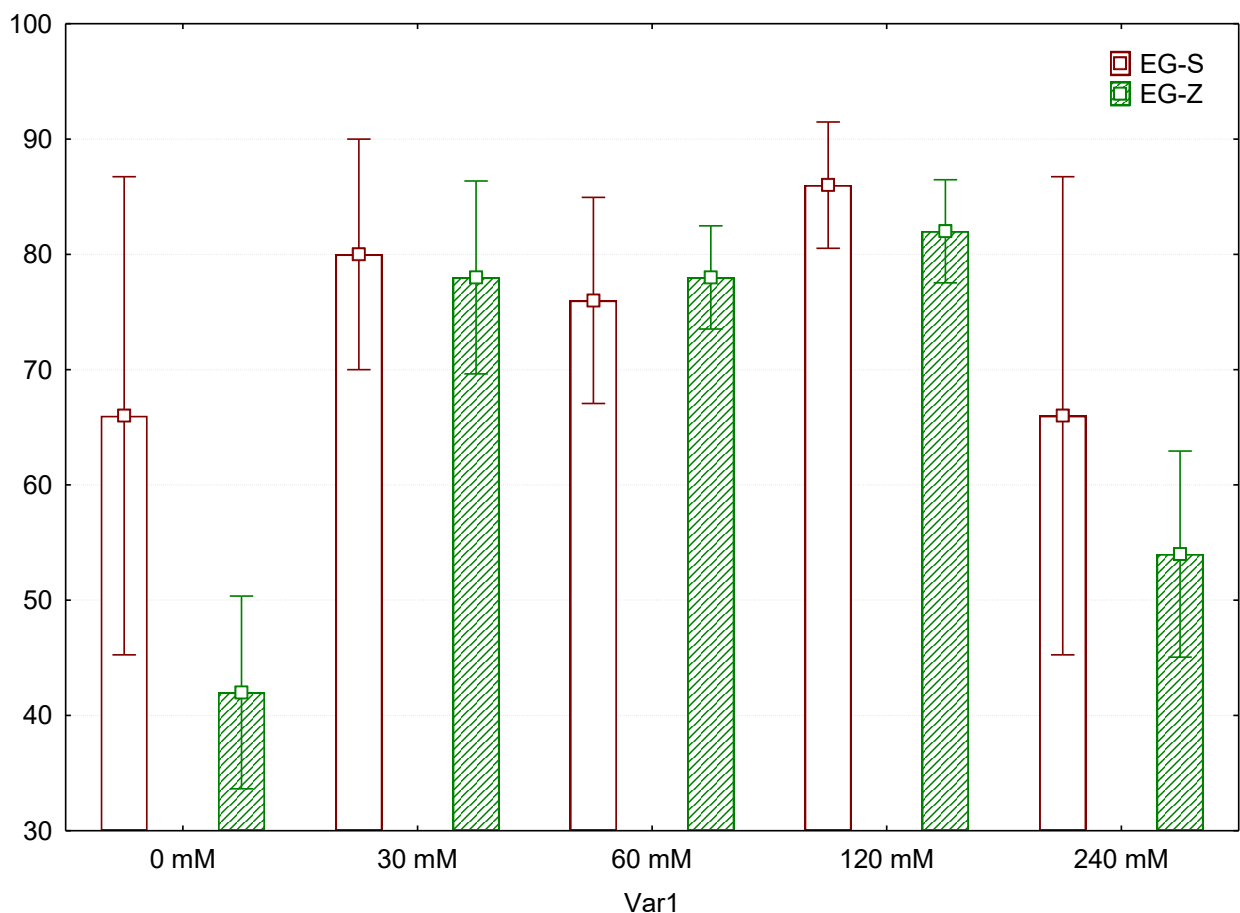


Figure 21. L'énergie germinative (EG) de deux variétés du tournesol 'Serina' et 'Suzuka' en fonction de différentes concentrations de (NaCl).

La variété 'Serina' affiche une énergie germinative (EG) d'environ 68 avec le traitement contrôle (0mM NaCl), tandis que la variété 'Suzuka' est nettement plus basse (environ 42). Cela indique que sans stress salin la variété 'Serina' a une capacité de germination rapide et homogène supérieure à 'Suzuka'.

A 30 mM, 60 mM et 120 mM NaCl, Pour les graines de la variété 'Serina', l'EG augmente nettement, atteignant un maximum d'environ 86 à une concentration de 120 mM de NaCl.

Pour les graines de la variété 'Suzuka', l'EG bondit dès 30 mM (~77), reste stable à 60 et 120 mM (~77-82). À ces concentrations, l'énergie germinative est optimale pour les deux variétés, avec 'Serina' toujours légèrement supérieure à 'Suzuka'. Cela suggère un effet stimulant de la salinité faible à modérée sur la vigueur de germination, particulièrement marqué pour 'Suzuka' qui rattrape 'Serina' à partir de 30 mM.

A 240 mM NaCl, L'EG diminue fortement pour les deux variétés : 'Serina' retombe à ~68, 'Suzuka' à ~52. À cette concentration, la germination rapide et homogène est nettement inhibée, surtout pour les graines de la variété 'Suzuka'.

L'énergie germinative des deux variétés de tournesol 'Serina' et 'Suzuka' augmente fortement sous salinité faible à modérée (30-120 mM), avec un effet particulièrement marqué pour la variété 'Suzuka'.

(Ouazzaniet Moustaghfir, 2020), dans une étude sur les variétés commerciales de tournesol français et marocains révèlent "des pourcentages de diminution comprises entre 0% et 38% et entre 0% et 60% respectivement dans des concentrations de NaCl 60 mM et 120 mM".

7. Longueur de la racicule (LR) :

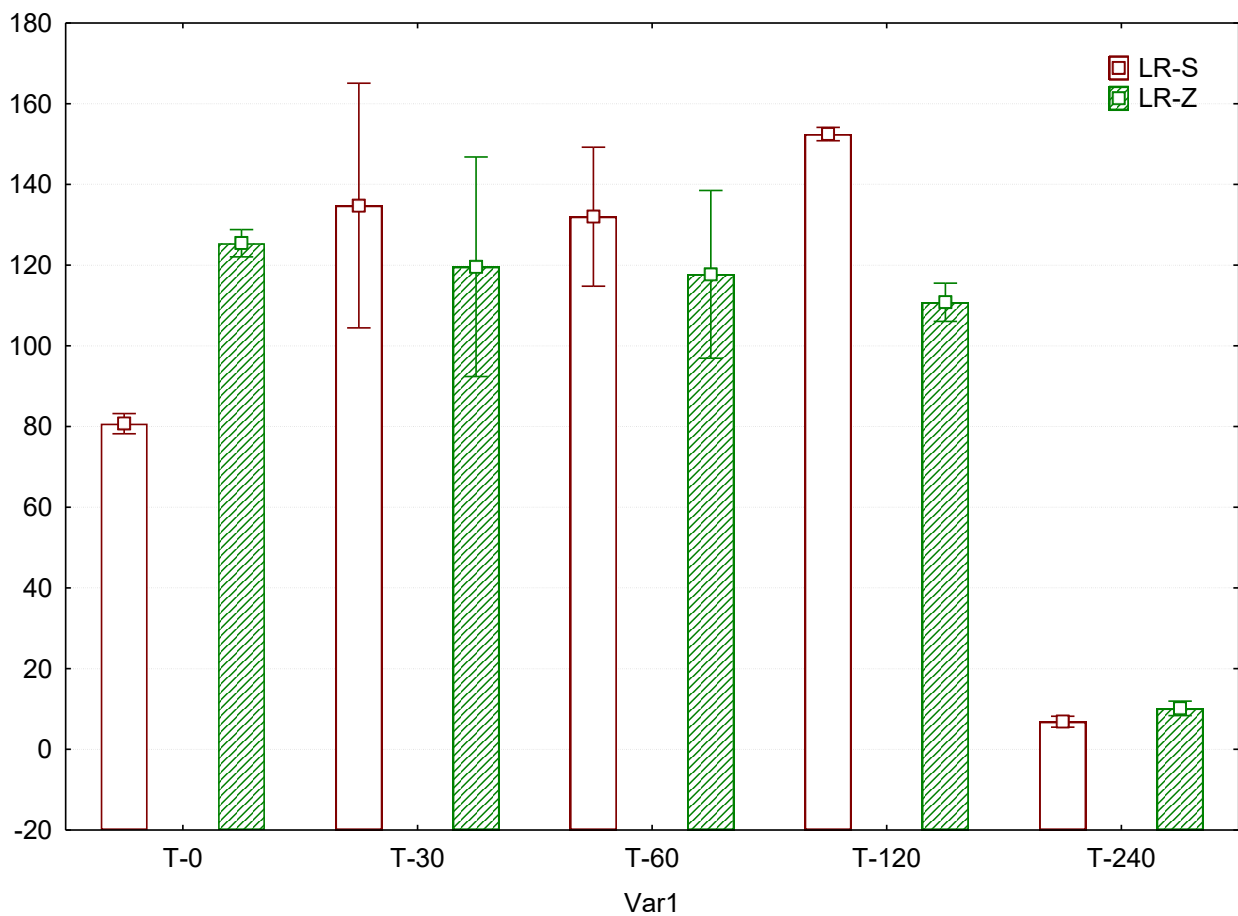


Figure 22. La longueur de la racicule (LR) deux variétés du tournesol ‘Serina’ et ‘Suzuka’ en fonction de différentes concentrations de (NaCl).

En absence de salinité, les graines de la variété ‘Suzuka’ donnent une racicule significativement plus longue que la variété ‘Serina’.

A 30 mM NaCl, 60 mM NaCl, 120 mM NaCl ; la longueur de la racicule de la variété ‘Serina’ augmente fortement, atteignant un maximum à 120 mM NaCl.

La longueur de la racicule des graines de la variété ‘Suzuka’ reste élevée et stable avec une légère baisse à T-120.

A 240 mM NaCl, forte chute a été marquée de la longueur de la racicule pour les deux variétés, alors que la variété ‘Serina’ conserve une valeur légèrement supérieure à la variété ‘Suzuka’.

Les résultats obtenus montrent que la variété ‘Serina’ présente une stimulation remarquable de la croissance racinaire jusqu’à 120 mM NaCl, tandis que la variété ‘Suzuka’ maintient une longueur stable jusqu’à 120 mM, avant une chute drastique à 240 mM pour les deux variétés.

(Bouda et al, 2011) a signalé qu'une stimulation de la croissance racinaire à faible salinité est marquée chez les six espèces d'*Atriplex* étudiées. Ces résultats confirment que certaines plantes peuvent bénéficier d'un stress salin modéré.

Une étude sur le mil (*Pennisetum glaucum*) montre que "plus la concentration en sel augmente, plus la racine est longue (Leila Radhouane, 2008). Ces résultats sont similaires à ceux de la variété 'Serina' qui montre une augmentation de 90% à 120 mM par rapport au contrôle.

Par contre, chez l'orge (Bouchene C et Dahmani A, 2019) et le colza (Frahtia Y, 2024) "la croissance des racines a été significativement réduite en raison de la réduction de la longueur et de la masse fraîche des racines sous stress salin".

8. Longueur de la tigelle (LT)

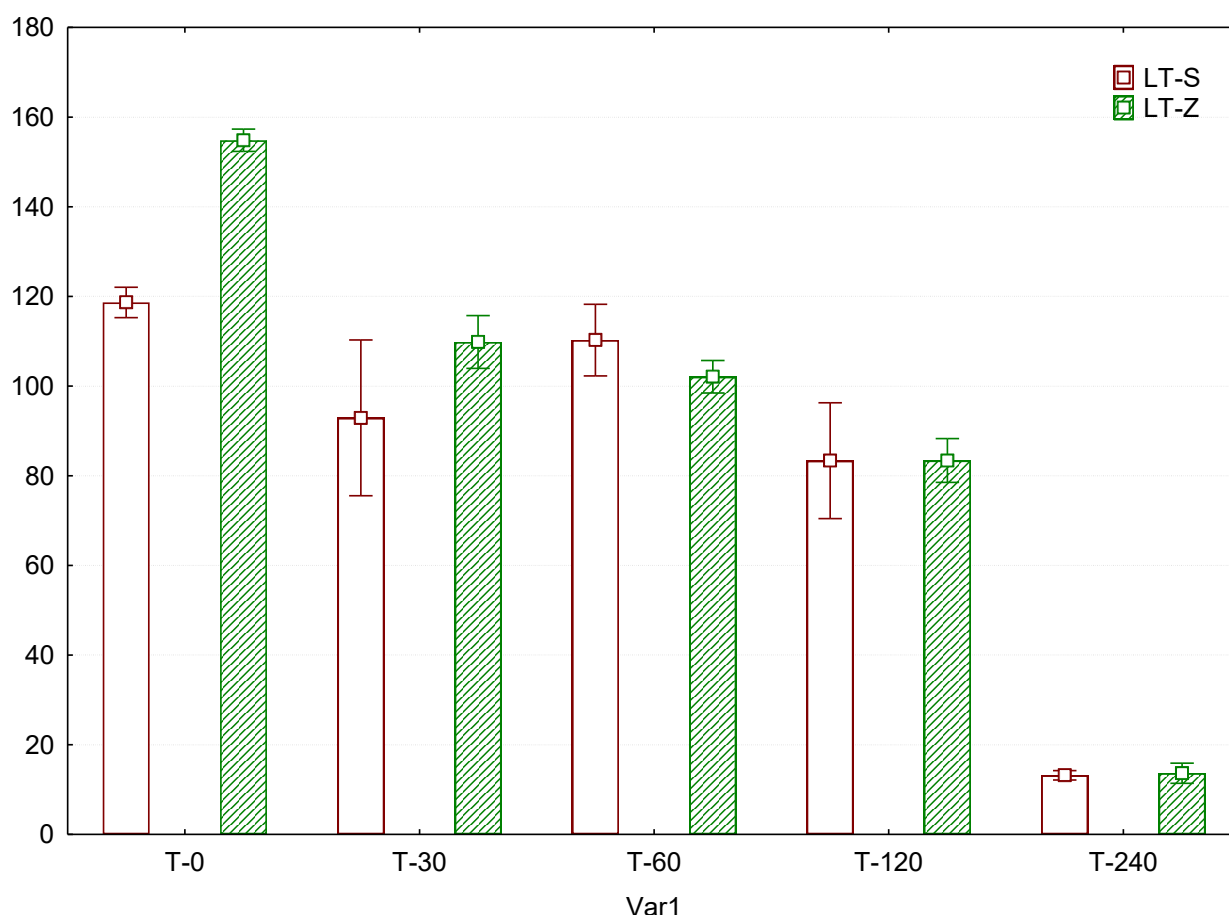


Figure 23. La longueur de la tigelle (LT) deux variétés du tournesol 'Serina' et 'Suzuka' en fonction de différentes concentrations de (NaCl).

Les graines de la variété 'Suzuka' présentent une tigelle nettement plus longue (~155 mm) que les graines de la variété 'Serina' (~120 mm) avec le traitement contrôle de 0 mM NaCl. Cela montre une vigueur initiale supérieure de la variété 'Suzuka' en absence de stress salin.

La longueur de la tigelle des deux variétés au traitements : 30 mM NaCl, 60 mM NaCl, 120 mM NaCl ; diminue progressivement avec l'augmentation de la concentration en NaCl.

À 30 mM, la LT réduit à ~90 mm pour les graines de la variété 'Serina' et ~110 pour les graines de la variété 'Suzuka'. À 60 mM, les deux variétés convergent autour de 110 (Serina) et 100 (Suzuka). À 120 mM, la LT poursuit sa baisse : 'Serina' atteint ~85, 'Suzuka' ~80. Cette diminution progressive traduit un effet inhibiteur de la salinité sur la croissance de la tigelle, plus marqué chez les graines de la variété 'Serina'.

A 240 mM NaCl, Les deux variétés montrent une chute drastique de la LT : les graines de la variété 'Serina' tombent à ~15, les graines de la variété 'Suzuka' à ~20. À ce niveau de stress, la croissance de la tigelle est très fortement compromise pour toutes les variétés.

La longueur de tigelle diminue progressivement avec l'augmentation de la salinité pour les deux variétés. La variété 'Suzuka' montre initialement une meilleure vigueur a une concentration faible et modérée de salinité mais une convergence vers des valeurs similaires à forte salinité. Nos résultats sont similaires avec ceux obtenu par (Ansli R, 2019), qui montre une réduction des longueurs des radicules et des tigelles comparativement aux celles des graines témoins de *Oudneya africana*. Notre plante présente une sensibilité de la croissance aérienne au stress salin, cette observation est confirmée par (Frahtia Y, 2024) qui a signalé que le stress salin affecte la longueur de coléoptile finale de colza, une plante oléagineuse comme le tournesol. Alors que (Amouri A, 2016) révèle que la longueur de tigelle est particulièrement affectée chez les légumineuses (*Medicago truncatula*), souvent plus que chez les oléagineuses.

9. Indice de récupération :

Après le transfert des graines non germées exposées à une concentration de 240 mM vers l'eau distillée, les résultats du test de l'indice de récupération montrent que les graines du tournesol ne possèdent pas une reprise de la germination chez les deux variétés.

Conclusion

Conclusion

Le présent travail a porté sur l'étude de l'effet du stress salin sur la germination de deux variétés de tournesol (*Helianthus annuus L.*), à savoir 'Serina' et 'Suzuka'. L'objectif principal est d'évaluer l'impact de différentes concentrations en NaCl sur les paramètres de germinations, notamment le taux de germination, la vitesse de germination ainsi que la longueur de la radicule et de la tigelle.

Les résultats obtenus ont révélé que le stress salin à des concentrations élevées a un effet inhibiteur global sur la germination des deux variétés. L'augmentation progressive de la salinité a provoqué une réduction significative du taux de germination et une diminution de la vitesse de germination traduisant une gêne dans l'absorption de l'eau, ainsi qu'une réduction de la longueur de la tigelle indiquant une limitation du développement caulinaire initial.

La variété 'Serina' a montré une meilleure tolérance à la salinité, en maintenant des valeurs plus élevées de taux germination, de la longueur radiculaire et de développement de la tigelle par rapport à 'Suzuka'. Cette différence suggère que *Serina* dispose de mécanismes physiologiques plus efficaces pour faire face à la contrainte saline dès les premiers stades du développement.

Ces résultats mettent en évidence la tolérance du tournesol à la salinité, en particulier au stade critique de la germination par rapport à d'autres espèces oléagineuses notamment le soja et le colza et soulignent l'importance de sélectionner des variétés adaptées aux conditions salines. Dans cette optique, *Serina* apparaît comme un génotype prometteur à valoriser en zones salinisées.

Pour approfondir ces observations et mieux comprendre les mécanismes de tolérance, il serait utile de :

- Élargir les études aux stades ultérieurs de croissance et de production,
- Mener des analyses biochimiques et moléculaires pour identifier les voies de réponse au stress,
- Élargir l'échantillonnage à d'autres variétés et régions,
- Étudier l'interaction de la salinité avec d'autres stress environnementaux (sécheresse, température),
- Explorer des approches complémentaires comme le traitement des semences ou l'amélioration génétique.

Ce travail contribue à une meilleure connaissance des effets de la salinité sur la germination du tournesol et constitue une base pour des stratégies agronomiques adaptées aux sols affectés par la salinisation.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Ali, M. B., & Elozeiri, A. (2017). Metabolic processes during seed germination. In *Advances in Seed Biology*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70653>.
2. Amouri, A. A. (2016, 14 décembre). *Caractérisation moléculaire et biochimique en condition de stress salin de Medicago truncatula* Gaertner [Thèse de doctorat, Université Ahmed Ben Bella – Oran 1].
3. Benidire, L., Daoui, K., Fatemi, Z. A., Achouak, W., Bouarab, L., & Oufdou, K. (2015). *Effect of salt stress on germination and seedling of Vicia faba L.* Journal of Materials and Environmental Sciences, 6(3), 840–851.
4. Bewley, J. D. (1997). Seed germination and dormancy. *The Plant Cell*, 9(7), 1055–1066.
5. Bewley, J. D., Bradford, K., Hilhorst, H., & Nonogaki, H. (2013). *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy* (3rd ed.). Springer.
6. Bouda, S., & Haddioui, A. (2011). *Effet du stress salin sur la germination de quelques espèces du genre Atriplex*. *Revue Nature et Technologie*, 3(2), 72–79.
7. Camara, B., Sanogo, S., Chérif, M., & Koné, D. (2018). *Effect of saline stress on seed germination of three leguminous species (Phaseolus vulgaris L., Glycine max L., and Vigna unguiculata L.)*. *Asian Journal of Advances in Agricultural Research*, 8(1), 1–8.
8. Cook, D., Fowler, S., Fiehn, O., & Thomashow, M. F. (2004). A prominent role for the CBF cold response pathway in configuring the low-temperature metabolome of Arabidopsis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(42), 15243–15248.
9. Diamant, S., Eliahu, N., Rosenthal, D., & Goloubinoff, P. (2001). Chemical chaperones regulate molecular chaperones in vitro and in cells under combined salt and heat stresses. *Journal of Biological Chemistry*, 276(43), 39586–39591.
10. Farissi, M., Mouradi, M., Bouizgaren, A., & Ghoulam, C. (2016). *Amélioration de la germination de la luzerne (Medicago sativa L.) sous stress salin par traitement pré-germinatif*. *Fourrages*, (228), 261–264.
11. Finkelstein, R., Reeves, W., Ariizumi, T., & Steber, C. (2008). Molecular aspects of seed dormancy. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 387–415.
12. Grime, J. P., & Campbell, B. D. (1991). Growth rate, habitat productivity, and plant strategy as predictors of stress response. In H. A. Mooney, W. E. Winner, & E. J. Pell (Eds.), *Response of Plants to Multiple Stresses* (pp. 143–159). Academic Press.
13. Guo, R., Shi, L. X., Yang, Y., & Bai, Y. (2012). Effect of different salt stress on

- germination and early seedling growth of sunflower. *Journal of Agricultural Science*, 4(10), 222–231.
14. **Hannah, M. A., Heyer, A. G., & Hinch, D. K. (2006).** A global survey of gene regulation during cold acclimation in *Arabidopsis thaliana*. *PLoS Genetics*, 2(12), e219.
15. **Isayenkov, S. V. (2012).** Physiological and molecular aspects of salt stress in plants. *Cytology and Genetics*, 46(5), 302–318.
16. **Munns, R., & Tester, M. (2008).** Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–681.
17. **Naz, M., Khan, S. H., Iqbal, A., & Shah, M. (2015).** Effect of salinity on seed germination and seedling growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Science International*, 27(5), 4445–4448.
18. **Pulatkan, M., & Var, M. (2010).** The effects of different drought stress levels on seed germination and early seedling growth of some sunflower cultivars (*Helianthus annuus* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 38(3), 149–153.
19. **Rajjou, L., Gallardo, K., Debeaujon, I., Vandekerckhove, J., Job, C., & Job, D. (2012).** The seed germination process: A complex developmental program. In J. D. Bewley et al. (Eds.), *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy* (pp. 1–29). Springer.
20. **Rizhsky, L., Liang, H., & Mittler, R. (2004).** The combined effect of drought stress and heat shock on gene expression in tobacco. *Plant Physiology*, 134(4), 1683–1696.
21. **Thomashow, M. F. (1999).** Plant cold acclimation: Freezing tolerance genes and regulatory mechanisms. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 50, 571–599.
22. **Tsugane, K., Kobayashi, K., Niwa, Y., Ohba, Y., Wada, K., & Kobayashi, H. (1999).** A recessive *Arabidopsis* mutant that grows normally under high salinity stress shows enhanced expression of DREB2A and RD29A. *The Plant Cell*, 11(7), 1193–1204.
23. **Yilmaz, H. I., & Yilmaz, M. (2009).** Effect of different salinity levels on seed germination and seedling growth of some sunflower cultivars (*Helianthus annuus* L.). *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 59(2), 161–167.
24. **Akbari, G., Sanavy, S. A., & Yousefzadeh, S. (2007).** Effect of different priming treatments on germination and growth of sunflower under salinity stress. *World Journal of Agricultural Sciences*, 3(3), 301–308.
25. **Almansouri, M., Kinet, J. M., & Lutts, S. (2001).** Effect of salt and osmotic stresses on germination in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Plant and Soil*, 231(2), 243–254.

26. **Baoji, C., Chunsheng, H., & Zhongyuan, L. (2002).** *Effects of salt stress on seed germination and seedling growth of halophytes and non-halophytes.* Chinese Journal of Applied Ecology, 13(8), 1001–1006.
27. **Belkhodja, M., & Bidai, Y. (2004).** *Réponses physiologiques du pois chiche (Cicer arietinum L.) à la salinité.* Sécheresse, 15(4), 331-335.
28. **Bliss, R. D., Platt-Aloia, K. A., & Thomson, W. W. (1986).** *The inhibitory effect of salinity on seed germination and seedling growth of tomato: A cytological approach.* Journal of Experimental Botany, 37(8), 1201–1211.
29. **Chaïbi, W. (1995).** *Effets du stress salin sur la germination et la croissance de la luzerne (Medicago sativa L.).* Cahiers Agricultures, 4(4), 247–253.
30. **Debez, A., Grignon, C., Abdelly, C., & Aid, F. (2001).** *Effet de la salinité sur la germination de graines de plantes halophytes et glycophytes.* Revue d'écologie (Terre Vie), 56(3), 329–338.
31. **Dejampour, J., Ebadi, A., & Jafari, A. (2012).** *Effect of salinity stress on seed germination of sunflower cultivars.* International Research Journal of Applied and Basic Sciences, 3(1), 77-82.
32. **Ghoulam, C., & Fares, K. (2001).** *Effect of salinity on seed germination and early seedling growth of sugar beet (Beta vulgaris L.).* Seed Science and Technology, 29(2), 357–364.
33. **Gulzar, S., & Khan, M. A. (2001).** *Seed germination of a halophytic grass Aeluropus lagopoides.* Annals of Botany, 87(3), 319–324.
34. **Hasegawa, P. M. (2013).** *Sodium transport and salt tolerance in plants.* Plant Cell and Environment, 36(9), 1673–1688.
35. **Hosseini, S. M., Kafi, M., & Majidi, M. M. (2003).** *Effect of salinity on seed germination of canola (Brassica napus L.) cultivars.* Iranian Journal of Agricultural Sciences, 34(1), 47-55.
36. **Ismail, A. M. (1990).** *Effect of salinity on seed germination and early seedling growth of four halophyte species.* Pakistan Journal of Botany, 22(2), 153–160.
37. **Jaleel, C. A., Manivannan, P., Sankar, B., Kishorekumar, A., Gopi, R., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2007).** *Induction of drought stress tolerance by ketoconazole in Catharanthus roseus is mediated by enhanced antioxidant potentials and secondary metabolite accumulation.* Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 60(2), 201–206.

38. Kaplan, F., Kopka, J., Sung, D. Y., Zhao, W., Popp, M., Porat, R., & Guy, C. L. (2004). *Transcript and metabolite profiling during cold acclimation of Arabidopsis reveals an intricate relationship of cold-regulated gene expression with modifications in metabolite content*. Plant Journal, 38(4), 661–677.
39. Kaplan, F., Guy, C. L., & Kopka, J. (2007). *The complexity of metabolic response to cold temperature in Arabidopsis*. Plant Physiology, 143(1), 61–73.
40. Kabar, K. (1986). *Effects of gibberellic acid and kinetin on seed germination under salinity stress*. Journal of Plant Physiology, 125(1), 59–63.
41. Lachiheb, K., Neffati, M., & Zid, E. (2004). Aptitudes germinatives de certaines graminées halophytes spontanées de la Tunisie méridionale. In Ferchichi, A. (Comp.), *Réhabilitation des pâturages et des parcours en milieux méditerranéens* (pp. 89–93). Zaragoza : CIHEAM. (Cahiers Options Méditerranéennes, n° 62).
42. Lachihab, N., El Hadrami, A., El Idrissi-Tourane, A., M'Rabet, R., & Daayf, F. (2004). *Effets du stress salin sur la germination, la croissance et l'accumulation de proline chez quatre génotypes de pois chiche (Cicer arietinum L.)*. Phytoprotection, 85(1), 9-19.
43. Lachiheb, B., & Ayadi, H. (2004). *Effet du stress salin sur la germination de quelques espèces fourragères*. Revue de l'Institut National Agronomique de Tunisie, 19, 55– 62.
44. Lauchli, A., & Grattan, S. R. (2007). *Plant growth and development under salinity stress*. In: M.A. Jenks, P.M. Hasegawa, & S.M. Jain (Eds.), *Advances in Molecular Breeding Toward Drought and Salt Tolerant Crops* (pp. 1–32). Springer.
45. Levigneron, A., Lopez, F., Vansuyt, G., Berthomieu, P., Vavasseur, A., & Forestier, C. (1995). *Les plantes face au stress salin*. Cahiers Agricultures, 4(4), 263–273.
46. Liu, J., Guo, W. Q., & Shi, D. C. (2010). *Seed germination, seedling survival, and physiological response of sunflowers under saline and alkaline conditions*. Photosynthetica, 48(2), 278–286.
47. Mâalem, S., & Rahmoune, C. (2009). *Effet de la salinité sur la germination de graines de quelques espèces végétales*. Revue des Sciences et Technologie, 14, 91–98.
48. Matias, J. R., Torres, S. B., Leal, C. C. P., Leite, M. S., & Carvalho, S. M. C. (2018). *Hydropriming as inducer of salinity tolerance in sunflower seeds*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 22(4), 255–260.
49. Murillo-Amador, B., Lopez-Aguilar, R., Kaya, C., Larrinaga-Mayoral, J., & Flores- Hernandez, A. (2002). *Comparative effects of NaCl and polyethylene glycol on germination, emergence and seedling growth of cowpea*. Journal of Agronomy and Crop Science, 188(4), 235–247.

50. Nolan, B. T., Ruddy, B. C., Hitt, K. J., & Helsel, D. R. (2007). *Risk of nitrate in groundwaters of the United States—A national perspective*. Environmental Science & Technology, 41(10), 3297–3303.
51. Radhouane, L. (2008). *Effet du stress salin sur la germination, la croissance et la production en grains chez quelques écotypes de mil (Pennisetum glaucum (L.) R. Br.) autochtones de Tunisie*. Comptes Rendus de Biologies, 331(4), 278–286.
52. Rahmoune, C., Mâalem, S., & Adda, A. (2008). *Effets du stress salin sur la germination de trois espèces halophytes*. Revue des Régions Arides, 21(2), 162–169.
53. Rejili, M., Missaoui, H., & Mahdhi, M. (2006). *Salinity effects on germination and seedling growth of Medicago sativa L.* Agronomy for Sustainable Development, 26(2), 139–144.
54. Slama, I. (2004). *Effet de la salinité sur la croissance, l'activité photosynthétique et la productivité chez le pois chiche (Cicer arietinum L.)*. Thèse de doctorat, Université de Tunis El Manar.
55. Ungar, I. A. (1978). *Halophyte seed germination*. The Botanical Review, 44(2), 233–264.
56. Wu, G.-Q., Jiao, Q., & Shui, Q.-Z. (2015). *Effect of salinity on seed germination, seedling growth, and inorganic and organic solutes accumulation in sunflower (Helianthus annuus L.)*. Plant, Soil and Environment, 61(5), 220–226.
57. Xu, X.-Y., Fan, R., Zheng, R., Li, C.-M., & Yu, D.-Y. (2011). *Proteomic analysis of seed germination under salt stress in soybeans*. Journal of Zhejiang University Science B, 12(7), 507–517.