

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université de Blida  
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département de Biotechnologie et Agro-écologie  
Laboratoire de Recherche de Biotechnologie des Productions Végétales

# THESE

Pour l'obtention du Diplôme de  
Doctorat LMD

Filière : Sciences Agronomiques  
Spécialité : Eau, Environnement et Foresterie

**Effet de l'adjonction de l'acide salicylique dans une eau  
enrichie de  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$  sur la germination et la  
croissance de deux variétés de tomate cultivées en hors sol.**

Présentée par :  
**SEBAA Atika**

Soutenu le Février 2025  
Devant le jury composé de :

<b>Président :</b>	ZOUAOUI Ahmed	MCA	Université de Blida1
<b>Directeur de thèse :</b>	ABBAD Mohamed	MCA	Université de Blida1
<b>Examineur :</b>	LAZALI Mohamed	Professeur	Université khemis Meliana
<b>Examineur :</b>	HAMIDI Youcef	MCA	Université de Blida1

**Année Universitaire 2024/2025**

## Remerciements

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à mon directeur de thèse, **Dr. ABBAD Mohamed**, pour son encadrement précieux, sa patience et ses conseils avisés tout au long de ce travail. Sa disponibilité et son expertise ont été d'une grande aide, et je lui adresse toute ma gratitude pour son soutien constant.

Je ne saurais exprimer suffisamment ma reconnaissance à **Pr. SNOUSSI Sid Ahmed**, dont l'aide précieuse, la disponibilité constante, et les conseils éclairés m'ont permis d'avancer sereinement dans ce travail. Merci infiniment pour votre soutien indéfectible.

Je remercie également chaleureusement **l'équipe du laboratoire de Biotechnologie et Production Végétale** pour leur collaboration, leur soutien technique et leur assistance tout au long de mes expériences. Ce travail n'aurait pas été possible sans leur implication.

Mes sincères remerciements vont aussi à **Dr. ZOUAOUI Ahmed**, président du jury, pour avoir accepté de juger ce travail et pour ses observations pertinentes qui ont enrichi ce manuscrit.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à **Dr. HAMIDI Youcef**, membre du jury, pour ses critiques constructives et ses encouragements.

Un grand merci à **Pr. LAZALI**, membre du jury, pour son implication et ses remarques qui ont grandement contribué à l'amélioration de ce travail.

Un remerciement spécial et profondément ému à **Dr. BENZAHRA Soraya**, une personne très chère à mon cœur qui nous a malheureusement quittés cette année. Son aide inestimable et son soutien ont marqué ce travail et ma vie. **Que son âme repose en paix**, et qu'elle sache combien je lui suis reconnaissante pour tout ce qu'elle a fait pour moi.

Enfin, je remercie tous mes proches, amis et collègues, ainsi que toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette thèse. Leur soutien a été inestimable.

# DÉDICACE

Je dédie ce travail à **moi-même**, en reconnaissance de la force et de la persévérance que j'ai su puiser tout au long de ce parcours exigeant., et je suis fière de tout ce que j'ai accompli.

**"Dare to dream, and dare to turn those dreams into reality."**

🚩 À **mes parents**, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien sans faille, qui m'ont permis de me tenir ici aujourd'hui. Ce travail est autant le vôtre que le mien.

🚩 À **mon cher mari**, pour être à mes côtés, dans les moments de doute et de succès. Merci pour, ta patience et ta force qui m'ont porté tout au long de ce voyage., et je te dédie ce travail avec tout mon cœur.

🚩 À **mon fils**, mon trésor, ma fierté, **Joud**. Ton sourire et ta lumière ont illuminé chaque jour de ce chemin difficile. Je veux que tu saches que tout ce que je fais, je le fais pour toi.

🚩 À **mon frère Younes**, même si la distance nous sépare, tu as toujours été dans mon cœur. Ton soutien, bien que lointain, a été ressenti chaque jour, et je te suis profondément reconnaissante pour tes encouragements et ton amour. À **Yasmine**, ma sœur de cœur.

🚩 À **ma grande sœur Hadjer**, une véritable source de force et de sagesse. Ton amour, tes conseils et ta bienveillance ont été des ancrages essentiels tout au long de ce parcours. Merci à toi et à ton mari **Mehdi** pour votre soutien et votre présence rassurante

🚩 À **ma sœur Kawthar**, celle qui a été mon pilier, ma confidente, et ma plus grande source d'encouragement. Ton soutien indéfectible et ta présence aimante ont rendu tout cela possible. Je ne te remercierai jamais assez pour tout ce que tu as fait pour moi.

🚩 À **mes neveux Adam et Racim**, et à **ma nièce Aya**, qui m'apportent tant de joie et de motivation. Que ce travail soit une source d'inspiration pour vous tous.

🚩 À **Anissa**, mon amie et partenaire de travail. Tu as été bien plus qu'un simple soutien tout au long de ce parcours. Tu as travaillé avec moi, pour moi, et parfois plus que moi-même, partageant chaque étape, chaque moment de doute et de succès. Ton dévouement et ton engagement ont été inestimables. Je te dédie ce travail en reconnaissance de tout ce que tu as fait. Merci infiniment pour tout, du fond du cœur.

🚩 À **mes beaux-parents**, pour leur bienveillance et leur soutien moral constant. Votre gentillesse et vos encouragements m'ont donné la force d'avancer.

🚩 À **Rima, Meriem, et Bouchra**, mes chères belles-sœurs, pour votre soutien affectueux et vos attentions. À vos époux, pour leur bienveillance à vos enfants, **Mira, Mirou, et le petit Yazan**, dont la joie et l'énergie sont une source de bonheur.

## **Résumé**

Cette étude a examiné le comportement morphologique et physiologique de deux variétés de tomate (*Solanum lycopersicum*) : Saint-Pierre et Semillas de Alta Selección, dans un milieu salin enrichi en  $\text{MgCl}_2$  et  $\text{MgSO}_4$  à des concentrations de 50 et 100 mM, en présence d'acide salicylique (AS) appliqué à 0,25 et 0,5mM. Elle s'inscrit dans le cadre de la problématique suivante : dans quelle mesure les traitements combinés de  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$  et d'acide salicylique peuvent-ils atténuer les effets du stress salin sur la germination des graines et la croissance des plantules de tomate, et quelle concentration d'acide salicylique permettrait d'optimiser les réponses morphologiques, physiologiques et biochimiques ? L'objectif est d'évaluer l'effet de l'acide salicylique, seul ou combiné à des sels de magnésium, sur la tolérance au stress salin chez deux variétés de tomate, et d'identifier la concentration la plus efficace pour améliorer la germination ainsi que la croissance morphologique, physiologique et biochimique des plantules en conditions salines. Les expérimentations réalisées ont été menées dans des conditions contrôlées est semi contrôlées. Les résultats montrent que la germination des graines des deux variétés est presque similaire et que le taux de germination est significativement amélioré par l'application d'AS testé a 0,25mM par rapport à 0,50mM en particulier en présence de  $\text{MgSO}_4$  à 50mM. Le taux de germination atteint les 100% chez la variétés Semillas de Alta Selección par rapport au traitement salin  $\text{MgSO}_4$  qui donne un taux de germination de 73%. Tandis que chez la variétés Saint-Pierre le taux de germination atteint 70% par rapport au traitement salin qui donne une germination de 37%. En revanche, le taux de germination des grains en présence de  $\text{MgCl}_2$  a exercé une inhibition de la germination des grains la plus marquée. Cependant, la présence de 50mM de  $\text{MgCl}_2$  a révélé un taux de germination de 23% chez la variété Saint-Pierre et de 43% chez la variété Semillas de alta Selección alors que l'addition de 0,50mM d'AS a améliorée le taux de germination des grains de l'ordre de 63% chez la variété Saint pierre. L'application de l'acide salicylique combiné au  $\text{MgSO}_4$  a améliorée la longueur des hypocotyles, des radicules, la biomasse fraîche et sèche. En effet, la combinaison de 50mM de  $\text{MgSO}_4$  et 0,25mM d'AS a exercé une augmentation de 47.97% de la hauteur des plantules de la variété Saint -Pierre par rapport au traitement salin et de 46.41 chez la variété Semillas de alta Selección L'application d'AS a stimulé la production de proline et de la chlorophylle, deux indicateurs clés de la tolérance au stress salin. L'accumulation de proline a augmenté de 40% sous stress salin.

En revanche, l'addition de 0,25mM d'AS a réduit cette accumulation, signe d'une Réduction du stress. La teneur en chlorophylle a augmenté de 20% en présence de l'AS, soutenant ainsi la photosynthèse sous conditions de salinité accrue. Cette étude a également révélé qu'application de 0,25mM d'AS est plus efficace que celle de 0,50mM pour la majorité des paramètres étudiés en particulier en présence de 50mM de  $\text{MgSO}_4$ . Ce résultat suggère que l'application des faibles doses d'AS peut offrir une solution prometteuse pour

améliorer la tolérance au sel de la culture de tomate sans surcharger les mécanismes de défense de la plante. Cette recherche montre également que l'AS joue un rôle crucial dans l'atténuation du stress salin en améliorant à la fois les réponses physiologiques et biochimiques des plants de tomate. L'utilisation de cette phytohormone, combinée à une gestion précise des sels dans le sol, pourrait être une stratégie efficace pour optimiser la production agricole dans des environnements salins.

**Mots-clés** : tomate, salinité, acide salicylique, germination, biomasse, proline, chlorophylle.

## **Abstract**

### **Effect of the addition of salicylic acid in water enriched with MgSO<sub>4</sub> and MgCl<sub>2</sub> on the germination and growth of two tomato varieties grown in soilless conditions**

This study examined the morphological and physiological behavior of two tomato varieties (*Solanum lycopersicum*): Saint-Pierre and Semillas de Alta Selección, under saline conditions enriched with MgCl<sub>2</sub> and MgSO<sub>4</sub> at concentrations of 50 and 100 mM, in the presence of salicylic acid (SA) applied at 0.25 and 0.5 mM.

The research is framed by the following question: To what extent can combined treatments of MgCl<sub>2</sub>, MgSO<sub>4</sub>, and salicylic acid mitigate the effects of salt stress on seed germination and seedling growth in tomato, and which concentration of salicylic acid optimizes morphological, physiological, and biochemical responses?

The objective was to evaluate the effect of salicylic acid, alone or combined with magnesium salts, on salt stress tolerance in two tomato varieties and to identify the most effective concentration for improving germination and the morphological, physiological, and biochemical development of seedlings under saline conditions. The experiments were conducted under both controlled and semi-controlled conditions.

Results showed that seed germination in both varieties was almost similar and that germination rate significantly improved with SA application at 0.25 mM compared to 0.5 mM, especially in the presence of 50 mM MgSO<sub>4</sub>. The germination rate reached 100% in the Semillas de Alta Selección variety under the MgSO<sub>4</sub> treatment, compared to 73% with salt stress alone. For the Saint-Pierre variety, germination reached 70%, compared to 37% under saline conditions without SA. In contrast, MgCl<sub>2</sub> caused the strongest inhibition of germination. However, at 50 mM MgCl<sub>2</sub>, germination reached 23% in Saint-Pierre and 43% in Semillas de Alta Selección, while the addition of 0.5 mM SA improved germination to 63% in Saint-Pierre. The application of SA combined with MgSO<sub>4</sub> enhanced hypocotyl and radicle lengths as well as fresh and dry biomass. In fact, the combination of 50 mM MgSO<sub>4</sub> and 0.25 mM SA increased seedling height by 47.97% in Saint-Pierre and by 46.41% in Semillas de Alta Selección compared to the saline treatment alone. SA application stimulated proline and chlorophyll production, two key indicators of salt stress tolerance. Proline accumulation increased by 40% under salt stress; however, the addition of 0.25 mM SA reduced this accumulation, indicating a reduction in stress. Chlorophyll content increased by 20% in the presence of SA, thereby supporting photosynthesis under saline conditions. This study also found that the 0.25 mM SA treatment was more effective than 0.5 mM for most of the measured parameters, especially in combination with 50 mM MgSO<sub>4</sub>. These results suggest that low doses of SA may offer a promising strategy to enhance salt tolerance in tomato crops without overburdening the plant's defense mechanisms. This research highlights the crucial role of SA in mitigating salt stress by improving both the physiological and biochemical responses of tomato plants. The use of this

phytohormone, combined with precise salt management in the soil, could serve as an effective strategy for optimizing agricultural production in saline environments.

Keywords: tomato, salinity, salicylic acid, germination, biomass, proline, chlorophyll

## ملخص

تأثير إضافة حامض الساليسيليك إلى الماء المدعم بـ  $MgSO_4$  و  $MgCl_2$  في إنبات ونمو صنفين من الطماطم المزروعة.

تتناول هذه الدراسة السلوك المورفولوجي والفسولوجي لصنفين من الطماطم (*Solanum lycopersicum*) ، وهما :سان بيير (Saint-Pierre) وسميَّاس دي ألطا سيليكسيون (Semillas de Alta Selección) ، في وسط ملحي مدعم بـ كلوريد المغنيسيوم وكبريتات المغنيسيوم ( $MgCl_2$ ) و ( $MgSO_4$ ) بتركيزين 50 و 100 ملي مول، وبوجود حمض الساليسيليك (AS) بتركيز 0.25 و 0.5 ملي مول.

تندرج هذه الدراسة ضمن الإشكالية التالية :إلى أي مدى يمكن أن تُخفف المعالجات المشتركة بكلوريد وكبريتات المغنيسيوم وحمض الساليسيليك من تأثيرات الإجهاد الملحي على إنبات بذور الطماطم ونمو البادرات؟ وما هو التركيز الأمثل لحمض الساليسيليك لتحسين الاستجابات المورفولوجية والفسولوجية والبيوكيميائية؟

الهدف من الدراسة هو تقييم تأثير حمض الساليسيليك، منفردًا أو مشتركًا مع أملاح المغنيسيوم، على تحمل الإجهاد الملحي لدى صنفين من الطماطم، وتحديد التركيز الأكثر فعالية لتحسين الإنبات والنمو المورفولوجي والفسولوجي والبيوكيميائي للبادرات تحت ظروف الملوحة. وقد أُنجزت التجارب في ظروف مضبوطة ونصف مضبوطة.

أظهرت النتائج أن إنبات البذور كان متقاربًا بين الصنفين، وأن معدل الإنبات تحسن بشكل ملحوظ بتطبيق حمض الساليسيليك بتركيز 0.25 ملي مول مقارنة بـ 0.5 ملي مول، خصوصًا في وجود 50 ملي مول من  $MgSO_4$ . فقد بلغ معدل الإنبات 100% لدى صنف Semillas de Alta Selección ، مقارنة بـ 73% في الوسط الملحي فقط. أما صنف Saint-Pierre فقد حقق معدل إنبات بلغ 70% مقارنة بـ 37% في المعالجة المألحة. في المقابل، تسبب  $MgCl_2$  في تثبيط واضح للإنبات، حيث بلغ معدل الإنبات 23% لدى Saint-Pierre و 43% لدى Semillas de Alta Selección ، غير أن إضافة 0.5 ملي مول من حمض الساليسيليك رفعت معدل الإنبات لدى Saint-Pierre إلى 63%.

كما أدى تطبيق حمض الساليسيليك مع  $MgSO_4$  إلى تحسين في طول السويقة الجنينية والجذر، بالإضافة إلى الكتلة الحيوية الطازجة والجافة. فقد زادت المعالجة المزدوجة (50 ملي مول  $MgSO_4$  و 0.25 ملي مول AS) من طول البادرات بنسبة 47.97% لدى Saint-Pierre ، و 46.41% لدى Semillas de Alta Selección ، مقارنة بالمعالجة الملحية فقط.

حقّق حمض الساليسيليك إنتاج البرولين والكلوروفيل، وهما مؤشران رئيسيان لتحمل الإجهاد الملحي. ارتفع تراكم البرولين بنسبة 40% تحت تأثير الملوحة، ولكن إضافة 0.25 ملي مول من حمض الساليسيليك خفّضت هذا التراكم، مما يدل على انخفاض مستوى الإجهاد. كما زادت كمية الكلوروفيل بنسبة 20% بوجود حمض الساليسيليك، مما عزز من عملية التمثيل الضوئي في ظروف الملوحة.

أظهرت الدراسة أيضًا أن تركيز 0.25 ملي مول من حمض الساليسيليك كان أكثر فاعلية من 0.5 ملي مول بالنسبة لمعظم المؤشرات المدروسة، خاصةً عند دمجها مع 50 ملي مول من  $MgSO_4$ . وتشير هذه النتائج إلى أن الجرعات المنخفضة من حمض الساليسيليك قد تشكل استراتيجية واعدة لتعزيز تحمل نبات الطماطم للملوحة دون إثقال آليات الدفاع الخاصة بالنبات.

تُبرز هذه الدراسة الدور المحوري لحمض الساليسيليك في التخفيف من آثار الإجهاد الملحي، من خلال تحسين الاستجابات الفسيولوجية والبيوكيميائية للنبات. ويمكن أن يشكل استخدام هذا الهرمون النباتي، إلى جانب الإدارة الدقيقة للأملح في التربة، استراتيجية فعالة لتحسين الإنتاج الزراعي في البيئات المالحة.

الكلمات المفتاحية :طماطم، ملوحة، حمض الساليسيليك، إنبات، كتلة حيوية، برولين، كلوروفيل.



RÉSUMÉ  
ABSTRACT

ملخص

REMERCIEMENTS

DÉDICACES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>Partie 1 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	4
<b>Chapitre1 : Stress salin</b> .....	4
I.1.1. Généralité sur le phénomène de la salinité.....	4
I.1.2. La salinisation des sols .....	4
I.1.3. Source de la salinité dans le sol.....	5
I.1.3.1. Salinisation primaire des sols.....	5
I.1.3.2. Salinisation secondaire .....	5
I.1.4. Types de stress chez les plantes.....	6
I.1.4.1. Stress biotiques.....	6
I.1.4.2. Stress abiotiques.....	6
I.1.4.3. Types des stress abiotiques chez les plantes.....	6
I.1.5. Impact de la salinisation.....	6
I.1.5.1. Impact de la salinité sur l'agriculture.....	6
I.1.5.2. Impact de la salinité sur les plantes.....	7
I.1.5.3. Impact de la salinité sur la germination.....	8
I.1.5.4. Impact de la salinité sur l'anatomie de la feuille.....	8
I.1.6. Conséquences du stress salin sur les végétaux.....	9
I.1.6.1. Effets liés à la pression osmotique.....	9
I.1.6.2. Effet du stress salin sur le déséquilibre dans l'absorption et la nutrition minéral.....	10
I.1.6.3. Effet du stress salin sur la photosynthèse.....	10
I.1.6.5. Effets du stress salin sur la chlorophylle.....	11
I.1.7. Réponse des plantes au stress salin.....	12
I.1.7.1. Homéostasie ionique.....	12
I.1.7.1.1. Compartimentation vacuolaire.....	12
I.1.7.1.2. Exclusion des ions toxiques.....	12
I.1.7.1.3. Ajustement ionique.....	13
I.1.7.2. Stratégie osmotique.....	14
I.1.7.2.1. Osmorégulation et osmoprotection.....	14
I.1.7.2.2. Sucres totaux réducteurs.....	14
I.1.7.2.3. Proline.....	15
I.1.7.2.4. Glycine bêtaïne.....	15
I.1.7.2.5. Protéines.....	15
I.1.8. Métabolisme végétal primaire et secondaire face au stress.....	16
I.1.8.1. Métabolites primaires .....	16
I.1.8.2. Métabolites secondaires.....	16
I.1.8.2.1. Composés phénoliques.....	16
I.1.8.2.2. Phytohormones.....	17
I.1.8.2.3. Mode d'action des phytohormones.....	18
I.1.8.2.2. Acide salicylique (AS).....	18

I.1.8.2.3. Cytokinines (CK).....	18
I.1.8.2.4. Acide jasmonique (AJ).....	19
<b>Chapitre 2 : Généralité sur la tomate</b> .....	20
I.2.1. Origine et historique.....	20
I.2.2. Classification botanique.....	21
I.2.3. Description de la plante.....	21
I.2.4. Intérêt de la tomate.....	22
I.2.4.1. Intérêt sur le plan alimentaire.....	22
I.2.4. Importance économique.....	24
I.2.5. Culture hors sol de la tomate.....	25
I.2.6. Pathologie et ravageurs de la tomate.....	25
<b>Chapitre 3 : Acide salicylique</b> .....	27
I.3.1. Généralité.....	27
I.3.2. Effet de l'acide salicylique sur la plante.....	27
I.3.3. Effet de l'acide salicylique sur la croissance de la plante et la graine.....	28
I.3.4. Impact de l'acide salicylique sur les plantes exposées au stress.....	30
I.3.5. Mécanisme d'action de l'acide salicylique dans la tolérance au stress salin.....	31
I.3.5.1. Chez les graines.....	31
I.3.5.2. Chez les plantes.....	32
<b>Partie II : Matériels et méthodes</b> .....	34
II.1. Objectif de travail.....	34
II.2. Matériel végétal.....	34
III.3. Présentation globale des zones d'étude.....	34
II.4. Conduite des essais en conditions contrôlées.....	35
II.4.1. Stérilisation des graines.....	35
II.4.2. Protocole de germination.....	35
II.5. Conduite des essais en conditions semi-contrôlées (Croissance).....	36
II.6. Substrat et conteneurs.....	37
II.6.1. Substrat.....	37
II.6.2. Conteneurs.....	38
II.7. Dispositif expérimental.....	39
II.8. Description des différents traitements.....	39
II.9. Entretien de la culture.....	40
II.9.1. Irrigation.....	40
II.9.2. Aération.....	40
II.9.3. Lessivage.....	41
II.10. Paramètres mesurés en conditions contrôlées.....	41
II.10.1. Paramètres morphologiques pendant la phase de germination.....	41
II.10.1.1. Taux de germination (TG%).....	41
II.10.1.2. Longueur des radicules et hypocotyles (cm).....	41
II.10.1.3. Biomasse fraîche (g).....	41
II.10.2. Paramètres physiologiques mesurés.....	41
II.10.2.1. Dosage de la proline dans les feuilles (µg/g MF).....	41
II.10.2.2. Dosage de la chlorophylle (µg/g MF).....	43
II.10.2.3. Teneur en eau relative (TRE %).....	43
II.11. En conditions semi-contrôlées (expérience réalisée sous serre).....	44
II.11.1. Hauteur des plantes (cm).....	44
II.11.2. Nombre de feuilles.....	44

II.11.3. Nombre de fleurs.....	44
II.11.4. La surface foliaire (cm <sup>2</sup> ).....	44
II.11.5. Biomasse fraîche produite (g).....	44
II.11.6. Biomasse sèche produite (g).....	44
II.12. Analyse statistique.....	45
<b>PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSION</b> .....	46
<b>Chapitre 1 : Résultats</b> .....	46
III.1.1. Impact sur les paramètres de germination.....	46
III.1.1.1. Impact sur le pourcentage de germination (PG%).....	46
III.1.1.2. Hauteur des graines de tomate (cm).....	47
III.1.1.2.1. Hauteur des hypocotyles (cm).....	47
III.1.1.2.2. Hauteur des racicules (cm).....	48
III.1.1.3. Biomasse fraîche des graines de tomate (g).....	49
III.1.1.3.1. Biomasse fraîche des hypocotyles (g).....	49
III.1.1.3.2. Biomasse fraîche des racicules (g).....	51
III.1.2. Impact sur les paramètres morphologiques.....	52
III.1.2.1. Hauteur finale des plantes (cm).....	52
III.1.2.2. Longueur racinaire des plantes de tomate (cm).....	53
III.1.2.3. Nombre de feuilles par plante de tomate.....	54
III.1.2.4. Nombre de fleurs par plante de tomate.....	56
III.1.2.5. Surface foliaire de plante de tomate (cm <sup>2</sup> ) .....	57
III.1.2.6. Biomasse fraîche produite des plantes de tomate.....	58
III.1.2.6.1. Biomasse fraîche des feuilles de tomate.....	58
III.1.2.6.2. Biomasse fraîche des tiges de tomate (g).....	59
III.1.2.6.3. Biomasse fraîche racinaire (g).....	61
III.1.2.7. Biomasse sèche produite (g).....	62
III.1.2.7.1. Biomasse sèche aérienne (g).....	62
III.1.2.7.2. Biomasse sèche racinaire (g).....	64
III.1.3. Mesures de paramètre physiologique.....	65
III.1.3. 1. Teneur en eau relative (TER%) .....	65
III.1.4. Mesure des paramètres biochimiques.....	66
III.1.4.1. Teneur en chlorophylle a .....	66
III.1.4.2. Teneur en chlorophylle b.....	67
III.1.4.3. Teneur en caroténoïdes.....	69
III.1.4.4. Teneur en proline.....	70
<b>Chapitre 2 : Discussion</b> .....	72
III.2.1. Stade de germination.....	72
III.2.2. Stade de croissance.....	75
III.2.2.1. L'expression végétative.....	75
III.2.2.2. L'expression physiologique.....	77
III.2.2.3. Effet de dose de l'acide salicylique sur la tomate.....	78
III.2.2.4. Effet des types de Sels sur la tomate.....	79
III.2.2.5. Effet variétal de la tomate.....	79
<b>Conclusion</b> .....	81
<b>Conclusion générale</b> .....	83
<b>Références bibliographiques</b> .....	85
<b>Annexes</b>	

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Effet du stress salin sur la photosynthèse .....	11
<b>Figure 2</b> : Compartimentation et sélection des ions chez la plante en réponse au stress salin .....	13
<b>Figure 3</b> : Structures chimiques des différentes phytohormones .....	17
<b>Figure 4</b> : Origine de la tomate .....	20
<b>Figure 5</b> : Mécanismes du prétraitement à l'acide salicylique pour l'amélioration de la tolérance au stress abiotique .....	31
<b>Figure 6</b> : Impact de l'acide salicylique sur les cultures horticoles dans des conditions de stress abiotique .....	32
<b>Figure 7</b> : Localisation des sites d'expérimentation.....	35
<b>Figure 8</b> : Dispositif expérimental des essais en conditions contrôlées.....	36
<b>Figure 9</b> : Essais de germination des graines de deux variétés de tomate étudiée.....	36
<b>Figure 10</b> : repiquage en place définitive.....	37
<b>Figure 11</b> : Irrigations avec les différents traitements.....	37
<b>Figure 12</b> : Lavage du substrat à l'eau.....	38
<b>Figure 13</b> : Aspect générale des conteneurs utilisés pendant notre expérience.....	38
<b>Figure 14</b> : Schéma de dosage de la teneur des feuilles en chlorophylle.....	43

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1 :</b> Composition chimique de la tomate (%).....	23
<b>Tableau 2 :</b> Composition minérale de la tomate.....	24
<b>Tableau 3 :</b> Principaux ravageurs de la tomate.....	26
<b>Tableau 4 :</b> Amorçage des graines avec de l'acide salicylique (AS) et réponse des espèces végétales.....	29
<b>Tableau 5 :</b> Doses et fréquences d'irrigation nécessaires pour la culture de la tomate.....	40
<b>Tableau 6 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur le taux de germination des graines de tomate Saint-Pierre et Semillas de alta Selección en milieu salin enrichi en $MgSO_4$ et $MgCl_2$ .....	46
<b>Tableau 7 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la hauteur des hypocotyles des graines de tomate Saint pierre et Semillas de alta Selección en milieu salin enrichi en $MgSO_4$ et $MgCl_2$ .....	47
<b>Tableau 8 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la hauteur des radicules des graines de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en $MgSO_4$ et $MgCl_2$ .....	48
<b>Tableau 9 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la biomasse fraîche des hypocotyles des graines de tomate Saint pierre et Semillas de alta Selección en milieu salin enrichi en $MgSO_4$ et $MgCl_2$ .....	50
<b>Tableau 10 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la biomasse fraîche des radicules des graines de tomate Saint pierre et Semillas de alta Selección en milieu salin enrichi en $MgSO_4$ et $MgCl_2$ .....	51
<b>Tableau 11 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la hauteur finale des plantes de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en $MgSO_4$ et $MgCl_2$ .....	52
<b>Tableau 12 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la longueur racinaire des plantes de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección milieu salin enrichi en $MgSO_4$ et $MgCl_2$ .....	53
<b>Tableau 13 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur le nombre de feuilles par plante de tomate Saint-Pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en $MgSO_4$ et $MgCl_2$ .....	55
<b>Tableau 14 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur le nombre de fleurs par plante de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en $MgSO_4$ et $MgCl_2$ .....	56
<b>Tableau 15 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la surface foliaire de plante de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en $MgSO_4$ et $MgCl_2$ .....	57
<b>Tableau 16 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la biomasse fraîche des feuilles de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en $MgSO_4$ et $MgCl_2$ .....	58
<b>Tableau 17 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la biomasse fraîche des feuilles de tomate Saint-pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en $MgSO_4$ et $MgCl_2$ .....	60
<b>Tableau 18 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la biomasse fraîche racinaire de plante de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en $MgSO_4$ et $MgCl_2$ .....	61
<b>Tableau 19 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la biomasse sèche aérienne de plante de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en $MgSO_4$ et $MgCl_2$ .....	63
<b>Tableau 20 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la biomasse sèche racinaire de plante de tomate Saint-Pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en $MgSO_4$ et $MgCl_2$ .....	64

<b>Tableau 21 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la teneur en eau relative de plante de tomate Saint-Pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en $\text{MgSO}_4$ et $\text{MgCl}_2$ .....	65
<b>Tableau 22 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la teneur en chlorophylle a de plante de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en $\text{MgSO}_4$ et $\text{MgCl}_2$ .....	67
<b>Tableau 23 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la teneur en chlorophylle b de plante de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en $\text{MgSO}_4$ et $\text{MgCl}_2$ .....	68
<b>Tableau 24 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la teneur en caroténoïdes de plante de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección milieu salin enrichi en $\text{MgSO}_4$ et $\text{MgCl}_2$ .....	69
<b>Tableau 25 :</b> Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la teneur en proline de plante de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en $\text{MgSO}_4$ et $\text{MgCl}_2$ .....	70

## LISTE DES ABREVIATIONS

- **mM** : millimole
- **SS** : Stress salin
- **AS** : acide salicylique
- **TRE**: Teneur relative en eau
- **MgCl<sub>2</sub>** : chlorure de magnésium
- **MgSO<sub>4</sub>** : Sulfate de magnésium
- **PG** : pourcentage de germination
- **µg/g MF**: microgramme /gramme de matière fraîche

## Introduction

La salinisation des sols et des eaux est l'une des contraintes environnementales majeures auxquelles l'agriculture est confrontée à l'échelle mondiale, en particulier dans les régions arides et semi-arides. Dans l'eau, un facteur limitatif de la production végétale dans ces régions. Elle affecte près de 20% des terres irriguées dans le monde, ce qui limite considérablement la productivité agricole (FAO, 2020). Selon les projections récentes, environ 50% des terres arables mondiales pourraient être salinisées d'ici 2050 en raison des pratiques agricoles non durables, non raisonnables et du changement climatique (Hassanzadeh et *al.*, 2022). Selon Shrivastava et Kumar, (2015), ce phénomène est accéléré par des facteurs naturels tels que la sécheresse et l'évaporation accrue dans ces régions, ainsi que par l'utilisation d'eaux d'irrigation de qualité médiocre riches en sels solubles comme le chlorure de sodium (NaCl) et le sulfate de magnésium (MgSO<sub>4</sub>).

La salinité des sols et des eaux se traduit par une accumulation excessive de sels solubles, principalement le sodium (Na<sup>+</sup>) et le chlorure (Cl<sup>-</sup>), qui ont des effets néfastes sur les cultures en perturbant l'absorption hydrominérale. Cette contrainte affecte particulièrement les plantes glycophytes et moyennement tolérante comme la tomate, qui ne tolèrent que de faibles concentrations de sel dans leur environnement (Zandalinas et *al.*, 2020). En effet, le stress salin induit une série de réponses morphologiques, physiologiques, et biochimiques qui perturbent la croissance des plantes, réduisent leur capacité photosynthétique et compromettent leur rendement (Basu et *al.*, 2020).

À l'échelle de la plante, le stress salin agit sur plusieurs niveaux, entraînant à la fois des modifications osmotiques et des déséquilibres ioniques qui perturbent les fonctions vitales de la plante (Huang et Xu, 2021). Lorsqu'une plante est soumise à une concentration élevée en sels, l'absorption d'eau par les racines devient plus difficile, ce qui crée une sécheresse physiologique (Cramer et *al.*, 2011). De plus, l'accumulation d'ions toxiques tels que le sodium (Na<sup>+</sup>) et le chlorure (Cl<sup>-</sup>) dans les cellules végétales perturbe la stabilité des membranes cellulaires et des protéines, ce qui entraîne une dégradation des complexes photosynthétiques, notamment la chlorophylle et les caroténoïdes (Zörb et *al.*, 2019).

L'un des premiers effets visibles du stress salin est la réduction de la surface foliaire, qui affecte directement la capacité de la plante à capter l'énergie lumineuse pour la photosynthèse (Gupta et Huang, 2011). En réduisant l'efficacité de la photosynthèse, la plante produit moins d'énergie nécessaire à sa croissance, ce qui compromet la formation de biomasse et, par conséquent, le rendement agricole (Shabala, 2020). De plus, le stress salin induit une production excessive d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), telles que le



peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) et le radical superoxyde ( $O^{\cdot-}$ ), qui provoquent des dommages oxydatifs aux membranes cellulaires, aux protéines et à l'ADN des cellules végétales (Mittler, 2020). Huang et Xu, (2021) ajoutent que le stress oxydatif affectant également la viabilité des cellules et perturbant les processus métaboliques vitaux.

Face à ces contraintes, les plantes activent divers mécanismes de défense pour tolérer ou atténuer les effets du stress. Parmi ces mécanismes, on trouve la production de métabolites osmoprotecteurs, comme la proline, qui stabilisent les cellules et permettent de maintenir l'équilibre hydrique sous des conditions de stress (Ashraf et *al.*, 2007). Les plantes tolérantes au sel, quant à elles, possèdent des systèmes de compartimentation ionique dans les vacuoles, qui limitent l'accumulation des ions toxiques dans les tissus sensibles, comme les feuilles (Ruiz-Lozano et *al.*, 2022).

La tomate (*Solanum lycopersicum*) est une des cultures stratégiques les plus importantes à l'échelle mondiale, à la fois pour sa consommation fraîche et pour la transformation industrielle (FAO, 2020). Cependant, en tant que plante faiblement résistante, la tomate est particulièrement sensible à la salinité et souffre de réductions de rendement significatives lorsque les sols ou les eaux d'irrigation contiennent des concentrations élevées en sels (Maggio et *al.*, 2021).

Sous stress salin, les plants de tomates manifestent des réductions de la germination, de la croissance racinaire, et une diminution de la photosynthèse (Zörb et *al.*, 2022). Les études récentes ont mis en évidence que la tolérance au stress salin varie selon les variétés de tomate, certaines étant capables d'activer des mécanismes de défense plus efficaces que d'autres (Munns et Tester, 2020). Les chercheurs s'efforcent d'améliorer cette tolérance par la sélection de variétés résistantes et par l'utilisation de traitements exogènes pour atténuer les effets du sel sur les cultures.

L'acide salicylique (AS) est une phytohormone naturelle connue pour son rôle dans la réponse des plantes aux stress abiotiques et biotiques. Il joue un rôle central dans la régulation de la défense antioxydante des plantes, en stimulant la production d'enzymes antioxydantes comme la superoxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT), et l'ascorbate peroxydase (APX), qui détoxifient les espèces réactives de l'oxygène (Huang et Xu, 2021). Ces enzymes protègent les cellules végétales contre les dommages oxydatifs et stabilisent les membranes cellulaires sous stress salin. En outre, l'acide salicylique améliore la production de métabolites secondaires comme les caroténoïdes, qui agissent comme des antioxydants naturels pour protéger la plante contre le stress oxydatif (Rady et *al.*, 2020). Des études récentes ont montré que l'application d'acide salicylique exogène améliore la rétention d'eau chez les plantes

soumises à des conditions de stress en stabilisant les membranes et en réduisant la transpiration excessive (Basu et *al.*, 2020).

Dans cette étude, nous avons examiné l'effet exogène de l'acide salicylique appliqué à deux concentrations (0,25mM et 0,50mM) sur deux variétés de tomates : **Saint Pierre**, une variété demi-précoce modérément tolérante à la salinité, et **Semillas de Alta Selección**, un hybride présentant une meilleure résistance. Ces variétés ont été cultivées sous stress salin induit par deux sels courants : le chlorure de magnésium ( $MgCl_2$ ) et le sulfate de magnésium ( $MgSO_4$ ), connus pour leurs effets perturbateurs sur les processus physiologiques de la plante (Flowers et Yeo, 1995). L'objectif principal de cette étude était de déterminer si l'acide salicylique pouvait atténuer les effets néfastes du stress salin en améliorant les paramètres de germination, de croissance et de biomasse chez les deux variétés de tomates étudiées. Nous avons également évalué l'impact de l'AS sur des paramètres biochimiques clés tels que la teneur en proline, en chlorophylle, et en caroténoïdes, pour mieux comprendre les mécanismes de défense activés.

L'analyse porte ainsi sur plusieurs aspects :

1. Les traitements combinés de  $MgCl_2$  et  $MgSO_4$  avec l'acide salicylique peuvent-ils améliorer la germination des graines et la croissance des plantules de tomate sous stress salin ?
2. L'acide salicylique peut-il améliorer significativement les paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques des jeunes plantules soumises au stress salin ?
3. Quelle concentration d'acide salicylique sera la plus efficace pour atténuer les effets du stress salin aux stades de germination et de croissance végétative ?.

## **Chapitre 1 : Le stress salin**

### **I.1.1. Généralité sur le phénomène de la salinité**

La salinisation des terres arables est un problème ancien qui remonte à environ 6000 ans. L'histoire nous révèle qu'entre 2000 et 4000 avant notre ère, les Sumériens ont dégradé leurs terres et leur culture dans les vallées du Tigre et de l'Euphrate, situées en Mésopotamie, en raison de pratiques d'irrigation inadaptées. Ces pratiques ont entraîné la salinisation des sols et ont sérieusement compromis la production de cultures essentielles telles que le blé et l'orge. Cette situation a finalement conduit à l'effondrement de leur civilisation florissante.

Pour développer davantage cette histoire, il est important de comprendre les détails des pratiques agricoles employées par les Sumériens à l'époque. Ils utilisaient un système d'irrigation complexe basé sur des canaux d'irrigation qui prélevaient l'eau des rivières Tigre et Euphrate pour arroser leurs champs. Cependant, le problème est survenu lorsque l'eau d'irrigation, riche en sels naturels dissous, a commencé à s'accumuler dans les sols irrigués.

Au fil du temps, l'évaporation de l'eau dans les champs a laissé derrière elle des sels, notamment du chlorure de sodium, qui se sont accumulés dans les sols. Cette accumulation excessive de sel a rendu les terres de plus en plus stériles et inaptes à la culture de céréales essentielles comme le blé et l'orge. Les plantes ne pouvaient pas tolérer le niveau élevé de salinité, ce qui a entraîné des rendements agricoles en chute libre (Liabes et *al.*, 2021).

### **I.1.2. La salinisation des sols**

La salinisation des terres représente une préoccupation mondiale majeure. Selon la FAO, elle touche actuellement au moins 400 millions d'hectares de terres et met en péril une superficie équivalente (Legros, 2009). La salinisation du sol résulte de l'accumulation en surface de sels solubles dans l'eau, et cette accumulation est provoquée par un manque de précipitations annuelles suffisantes pour lessiver les sels vers les couches plus profondes du sol (Khosravichenar et *al.*, 2023).

En général, les sols salins présentent des concentrations élevées de sels tels que le sodium ( $\text{Na}^+$ ), le chlore ( $\text{Cl}^-$ ), le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ). En pratique, lorsqu'un échantillon de sol provenant de la zone sélectionnée présente une conductivité électrique (CE) supérieure à  $4 \text{ dS.m}^{-1}$  et que la teneur en sodium échangeable est de 15%, il peut être classé comme sol salin. À ce stade, le sol contient environ 40 millimoles de chlorure de sodium (Zhou et *al.*, 2023). Cette valeur de CE entraîne généralement une diminution significative des rendements pour la plupart des cultures bien que de nombreuses plantes soient affectées même à des valeurs de CE inférieures. Les sols dont la CE dépasse  $15 \text{ dS.m}^{-1}$  sont classés comme fortement salins (Liabes et *al.*, 2021).

### I.1.3. Source de la salinité dans le sol

Selon Shahid et *al.*, (2018), la salinisation des sols peut avoir des origines variées et peut survenir sous différentes conditions climatiques. Sa peut être catégorisée en deux types, en fonction de l'influence prédominante des processus naturels ou des activités humaines (Zhang et *al.*, 2023) :

**I.1.3.1. Salinisation primaire des sols** : est principalement liée au climat local, à la matière parentale, aux propriétés du sol et à la nappe phréatique. Un manque de précipitations pour compenser une évapotranspiration plus élevée ou une montée du niveau de la nappe phréatique peut également entraîner une augmentation de la salinité du sol (Daliakopoulos et *al.*, 2016). Lorsque l'eau de pluie traverse l'atmosphère, elle absorbe du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), ce qui entraîne les réactions suivantes :

- $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$  (acide carbonique)
- $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$  (ion bicarbonate et proton)
- $\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$  (ion carbonate et proton)

Ces réactions génèrent des protons  $\text{H}^+$ , ce qui signifie que l'eau devient légèrement acide. Cette acidité est renforcée par les protons libérés par les micro-organismes du sol lorsqu'ils respirent et rejettent du  $\text{CO}_2$ . La matière organique du sol joue également un rôle, mais cela dépasse la portée de cette explication. Dans l'ensemble, l'eau du sol devient légèrement acide et agressive au fil du temps. En conséquence, elle attaque les minéraux des roches dans un processus appelé hydrolyse. Par exemple, le feldspath albite, très courant dans les environnements granitiques, se transforme en argile dans le sol et libère le sodium qu'il contient :

- $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  (albite) +  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{argile} + \text{Na}^+ + \text{CO}_3^{2-}$  (ion carbonate)

Lorsqu'il y a très peu d'eau, le sodium précipite avec le carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) présent en solution pour former un sel, en l'occurrence un carbonate de sodium. C'est pourquoi l'on observe parfois des cristallisations de sel à la surface des terres, notamment dans les zones désertiques où il n'y a pas de pluie pour éliminer ce sel (Legros, 2009).

**I.1.3.2. Salinisation secondaire** : également appelée salinisation anthropique, est le résultat de l'usage inadéquat des sols par les activités humaines. L'irrigation avec de l'eau salée, couplée à une mauvaise gestion du drainage, peut facilement conduire à l'accumulation de sel en surface du sol. Dans les régions côtières, l'intrusion d'eau de mer, amplifiée par l'augmentation des températures et la croissance rapide de zones urbaines, devrait devenir plus prévalent à l'avenir en raison des tendances prévues dans les scénarios de changement climatique (Eslami et *al.*, 2021).

#### **I.1.4. Types de stress chez les plantes**

Les divers stress exercent une influence significative sur la répartition des plantes, altèrent leur croissance et leur expansion, et réduisent leur capacité à prospérer, ce qui se traduit par une diminution de la production végétale (Sarraf et al., 2023). Selon Pareek et al., (2009), les types de stress qui touchent les plantes cultivées peuvent être regroupés en :

**I.1.4.1. Stress biotiques :** Il fait référence aux effets nuisibles des organismes vivants tels que les pathogènes, les ravageurs et les adventices sur la croissance, le développement et la productivité des plantes. Les agents pathogènes, qui englobent les bactéries, les champignons, les virus et les nématodes, peuvent induire des maladies chez les plantes, entraînant ainsi une diminution des rendements et de la qualité. Les ravageurs, comme les insectes, les acariens et les mammifères, peuvent endommager les plantes en consommant leurs tissus et en propageant des infections. Quant aux adventices, elles rivalisent avec les cultures pour les ressources telles que l'eau, les nutriments et la lumière, ce qui peut entraver la croissance et la productivité de l'agriculture (Masri et Kiss, 2023)

**I.1.4.2. Stress abiotiques :** Dans les systèmes naturels et agroécologiques, les stress abiotiques sont des phénomènes qui surviennent naturellement, mais qui ont des conséquences imprévues et indirectes sur les plantes en raison des conditions environnementales. Cela a un impact défavorable sur divers aspects tels que le rendement des cultures, leur viabilité, la biomasse totale et la production (Azameti & Imoro, 2023).

#### **I.1.4.3. Types des stress abiotiques chez les plantes :**

Khan et al., (2021) montrent que les stress abiotiques qui causent des dégâts et dommages sur les plantes sont à cause de la sécheresse, la salinité, les métaux lourds et le stress thermique

#### **I.1.5. Impact de la salinisation**

##### **I.1.5.1. Impact de la salinité sur l'agriculture**

Le stress dû à la salinité constitue l'une des principales menaces environnementales qui ont un impact significatif sur la croissance des plantes et la production agricole (Astaneh et al., 2022). La salinité figure parmi les facteurs environnementaux majeurs qui restreignent la production agricole. Elle affecte significativement la croissance et le rendement des cultures, principalement en induisant du stress ionique, du stress osmotique et du stress oxydatif (Miao et al., 2020). C'est l'une des principales contraintes abiotiques, est principalement observée dans les régions côtières ainsi que dans les régions arides ou semi- arides, et elle a un impact sur les processus vitaux des plantes. Cela se traduit par une limitation de la productivité agricole et de la distribution des cultures à l'échelle mondiale

(Zhang et *al.*, 2019). Le stress salin est responsable de dommages significatifs aux plantes et représente une préoccupation majeure pour environ 932 millions d'hectares de terres à travers le monde, avec une proportion importante de ces terres, soit environ 100 millions d'hectares, située en Asie. Ce type de sol s'étend sur environ 6,2 % (soit 7,66 millions de kilomètres carrés) des terres dans la région nord-est de la Chine. Plus préoccupant encore, chaque année, environ 20 000 hectares de terres deviennent nouvellement salines (Anapati et *al.*, 2022). On prévoit que la superficie des sols touchés par la salinité en Inde augmentera, passant de 6,73 millions d'hectares à environ 16,2 millions d'hectares d'ici 2050 (Soni et *al.*, 2021). Il est probable que l'extension des zones affectées par la salinité puisse entraîner une réduction du taux global de production agricole. Cela représente une menace pour la sécurité alimentaire, car les besoins alimentaires devraient augmenter de 70 à 110 % en raison de la croissance démographique d'ici 2050 (Hossain et *al.*, 2017). En Algérie, la sécheresse prolongée a également entraîné une salinisation de 3,2 millions d'hectares de terres, ce qui montre que le pays n'est pas exempt de ce problème (Karoune et *al.*, 2017).

#### **I.1.5.2. Impact de la salinité sur les plantes**

Les dommages causés par le sel résultent à la fois d'effets osmotiques et d'effets ioniques spécifiques. Dans la plupart des cultures, les principaux composants salins nocifs sont le sodium ( $\text{Na}^+$ ) et le chlorure ( $\text{Cl}^-$ ). Ces ions toxiques perturbent les processus physiologiques normaux des plantes, ce qui se traduit par des dommages au niveau des membranes cellulaires, un déséquilibre dans la régulation de la croissance, une inhibition des enzymes, et des dysfonctionnements métaboliques, y compris des perturbations de la photosynthèse. Ces perturbations finissent par entraîner la mort de la plante (Soni et *al.*, 2021). Une concentration élevée de sel dans le sol induit un stress hyperosmotique, provoque un stress oxydatif, déséquilibre les ions, engendre une toxicité au sodium ( $\text{Na}^+$ ), et peut même entraîner la mortalité des plantes, le concept de stress peut être exprimé en termes de coûts énergétiques. On peut considérer qu'un stress survient lorsque les plantes rencontrent une diminution de l'énergie qu'elles peuvent acquérir, que ce soit en raison d'une baisse du taux de photosynthèse ou de la réduction de leur surface foliaire. De plus, dans ces situations, une partie de l'énergie est réallouée de la croissance vers la défense contre le stress (Munns et Gilliam, 2015). Ces effets indésirables incluent la perturbation de la fonction racinaire dans l'absorption de l'eau, ainsi que l'entrave aux processus physiologiques et biochimiques, notamment l'absorption et l'assimilation de nutriments tels que le calcium ( $\text{Ca}^{+2}$ ), le magnésium ( $\text{Mg}^{+2}$ ), et le potassium ( $\text{K}^+$ ) (Carillo et *al.*, 2011).

### **I.1.5.3. Impact de la salinité sur la germination**

La germination des graines correspond à la transition de la graine de la phase de vie latente à la phase de développement de la plantule (Baskin et Baskin 2001). Selon Bassel et Bewley (2010), ce processus se déroule pour la majorité des angiospermes de la manière suivante :

- L'eau est absorbée par les ouvertures naturelles de la graine, puis diffusée à travers ses tissus (Young et Young, 1986). Les cellules de la graine deviennent ensuite turgescentes.
- À la suite de l'hydratation, sous l'effet de la dilatation de la graine, les téguments s'ouvrent, et l'embryon subit des changements métaboliques qui réamorcent sa croissance.
- La synthèse de nouvelles molécules donne lieu à une augmentation en taille de l'embryon jusqu'à ce que ce dernier émerge de la graine. Le premier organe à émerger de la graine est généralement la radicule qui constitue la racine embryonnaire. L'émergence de la radicule constitue l'un des seuls signes visibles de la germination. Cependant, les stades de vie les plus sensibles, impliquant la régénération et le recrutement des plantes, tels que les graines peuvent avoir une tolérance encore plus limitée. Ces stades peuvent être particulièrement sensibles à de très légères variations de salinité (Dalziel et al., 2020). La phase de germination et d'établissement représente l'étape la plus critique du cycle de vie des plantes, jouant ainsi un rôle décisif dans la détermination de la répartition des espèces. Les graines de la grande majorité des espèces végétales sont les plus résistantes face aux conditions environnementales extrêmes. La littérature scientifique disponible a mis en lumière les effets de la salinité sur la germination des graines de différentes cultures, notamment *Oryza sativa*, *Triticum aestivum* et *Helianthus annuus*. Il est largement établi que le stress salin est corrélé négativement avec le processus de germination des graines. Des niveaux élevés de salinité inhibent la germination, tandis que des niveaux de salinité plus faibles peuvent induire un état de dormance chez les graines. L'augmentation de la salinité induit une diminution de la germination des plantes ainsi qu'un ralentissement, voire la mort des graines avant qu'elles ne puissent germer (Anaya et al., 2018). La salinité influe sur la germination en restreignant l'absorption d'eau par les graines, en diminuant la mobilisation des réserves stockées, ou en altérant directement l'organisation structurale, la synthèse des protéines, la réplication de l'ADN, ainsi que la division et l'allongement cellulaires dans les embryons en cours de germination (Benazzouk et al., 2019).

### **I.1.5.4. Impact de la salinité sur l'anatomie de la feuille**

En cas de stress salin, la plante éprouve une réduction globale d'énergie due à des baisses à la fois dans le taux de photosynthèse et dans la surface foliaire active (Liang et al.,

2022). La salinité provoque des changements dans la structure des feuilles de haricot, de coton et d'Atriplex, notamment une augmentation de l'épaisseur de l'épiderme, du mésophylle, de la longueur et du diamètre des cellules palissadiques, ainsi qu'une réduction de l'espace intercellulaire. De plus, dans les feuilles de mangrove exposées au NaCl, on observe une diminution significative de l'épaisseur du mésophylle et de l'épiderme, ainsi que de l'espace intercellulaire. Parida et Das (2005), montrent que ce stress entraîne plusieurs modifications au niveau cellulaire, notamment le développement de la vacuolisation et un gonflement partiel du réticulum endoplasmique, le gonflement des mitochondries, la vésiculation et la fragmentation du tonoplaste et la dégradation du cytoplasme, impliquant le mélange de la matrice cytoplasmique et vacuolaire dans les feuilles de patate douce.

Certaines halophytes, dont le quinoa en est un exemple, possèdent des structures externes sous forme de sphères situées à la surface de leurs feuilles. Ces structures, appelées cellules vésiculaires épidermiques (CVE), ont la capacité de piéger les ions toxiques comme le Na<sup>+</sup> et le Cl<sup>-</sup> en réponse au stress salin, et peuvent être assimilées à des "vacuoles inversées" (Kiani-Pouya *et al.*, 2022).

### **I.1.6. Conséquences du stress salin sur les végétaux**

#### **1.1.6.1. Effets liés à la pression osmotique**

Les stress osmotiques perturbent les réactions métaboliques et entravent la réparation des photosystèmes altérés, ce qui entraîne une surproduction d'espèces réactives de l'oxygène (Hossain *et al.*, 2017). Pour faire face au stress osmotique, les plantes réduisent les pertes d'eau en diminuant la conductance stomatique. Cependant, cela entraîne un manque de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) nécessaire au fonctionnement du cycle de Calvin (Katuwal *et al.*, 2020). En conséquence, l'absorption de lumière excède la demande pour la photosynthèse et la photorespiration, ce qui augmente la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS). De plus, l'accumulation toxique de sodium (Na<sup>+</sup>) et de chlore (Cl<sup>-</sup>) contribue également à la production de ROS en perturbant la réparation des dommages subis par le photosystème II sous l'effet d'une surexposition à la lumière (Bose *et al.*, 2014). Ces ions toxiques perturbent les processus physiologiques normaux, provoquant des altérations au niveau des membranes, un déséquilibre dans les régulateurs de croissance, une inhibition enzymatique, et un dysfonctionnement métabolique, y compris la photosynthèse, ce qui entraîne la mort de la plante (Soni *et al.*, 2021).

#### **1.1.6.2. Effet du stress salin sur le déséquilibre dans l'absorption et la nutrition minéral**

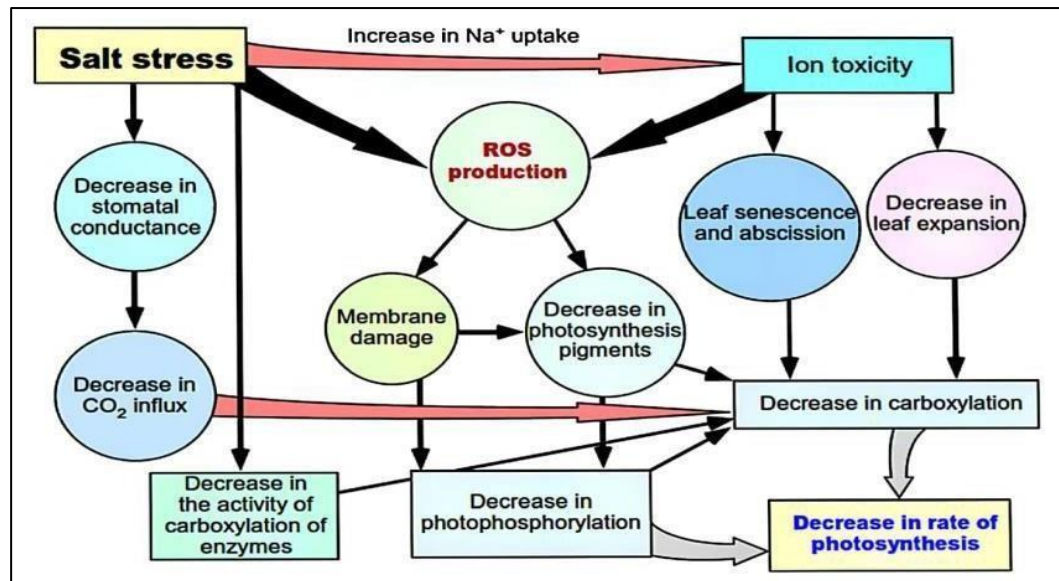


Le stress salin restreint la capacité de la plante à absorber de l'eau du sol, entraînant ainsi un stress osmotique et perturbant l'équilibre nutritionnel, en particulier en ce qui concerne les éléments potassium ( $K^+$ ) et calcium ( $Ca^{+2}$ ), en raison des niveaux élevés de sels potentiellement nuisibles présents dans le sol et les cellules de la plante (Lima et *al.*, 2020).

Une réduction des volumes dans les compartiments cytosoliques et vacuolaires survient en raison de la déshydratation cellulaire provoquée par le stress salin. Cette déshydratation se traduit par une perte de poids, en particulier lors de la phase de stress osmotique (Hou et *al.*, 2023). Les racines jouent un rôle primordial en supervisant l'absorption et la distribution des nutriments ainsi que des sels pendant l'ensemble du cycle de vie de la plante (Soni et *al.*, 2021). Le chlore ( $Cl^-$ ), lorsqu'il entre en compétition avec le nitrate ( $NO_3^-$ ), entrave chez les plantes sensibles aux sels, l'absorption et le transport à longue distance de cet anion vers les parties aériennes. Cela entraîne une carence nutritionnelle, qui peut être évaluée en comparant la concentration globale des cations majeurs tels que le calcium ( $Ca^{+2}$ ), le potassium ( $K^+$ ), le magnésium ( $Mg^{+2}$ ), et le sodium ( $Na^+$ ) avec la concentration en chlorure ( $Cl^-$ ). Le stress salin provoque une forte diminution de la fixation de l'azote ( $N_2$ ) ainsi que de l'activité de la nitrogénase au sein des nodosités chez les légumineuses herbacées (Hou et *al.*, 2023).

#### **I.1.6.3. Effet du stress salin sur la photosynthèse**

En situation de stress salin, la plante subit une réduction globale de son énergie due à une diminution à la fois du taux de photosynthèse et de la surface foliaire. Cette réduction d'énergie s'accompagne également d'une redistribution des ressources vers les mécanismes de défense et de tolérance (Liang et *al.*, 2022). De plus, les lésions induites par la salinité entraînent une diminution de la photosynthèse en réduisant la conductance stomatique ( $G_s$ ) et en entravant la synthèse des protéines dans les chloroplastes (Gunes et *al.*, 2007). Le stress salin peut altérer la structure lamellaire des granas présentes dans les chloroplastes, entraînant une réduction des niveaux de chlorophylle et de caroténoïdes dans les feuilles. De plus, le stress salin diminue l'utilisation du NADPH par le cycle de Calvin, inhibe l'activité de la Rubisco, et perturbe le transport des électrons dans le processus photosynthétique (Zhang et *al.*, 2021)



**Figure 1** : Effet du stress salin sur la photosynthèse (Hussain et *al.*, 2016)

#### I.1.6.5. Effets du stress salin sur la chlorophylle

L'exposition des plantes à la salinité entraîne une augmentation de la production de espèces réactives de l'oxygène (ROS) en tant que sous-produits, qui endommagent les composants cellulaires. Les ROS provoquent la dégradation de la chlorophylle et la peroxydation des lipides membranaires, ce qui réduit la fluidité et la sélectivité des membranes (Taïbi et *al.*, 2016). La salinité diminue la teneur totale en chlorophylle de la plante en augmentant l'activité de l'enzyme de dégradation de la chlorophylle, la chlorophyllase, induisant ainsi la destruction de la structure des chloroplastes et l'instabilité des complexes pigment-protéine. Il a été signalé que la teneur en chlorophylle diminue sous l'effet du stress salin dans des plantes telles que la tomate, le radis et le tournesol. Il a été noté également que la teneur en chlorophylle par unité de surface foliaire diminuait avec l'augmentation de la salinité, et les changements dans la teneur en chlorophylle des feuilles se produisaient après six semaines lorsque les feuilles intensifiaient leur couleur verte (Heidari et *al.*, 2014). Les conditions environnementales défavorables affectent directement ou indirectement le métabolisme des plantes, ce qui entraîne des modifications dans le rendement de la fluorescence de la chlorophylle. La fluorescence de la chlorophylle est un outil important pour évaluer les réponses physiologiques des plantes. Récemment, la mesure de la fluorescence de la chlorophylle a été réalisée en analysant la fluorescence rapide polyphasique transitoire, ce qui permet d'analyser les réponses des plantes en conditions de stress (Khatri & Rathore, 2022).

Les chloroplastes, qui servent de principal site à la photosynthèse, sont spécifiques aux plantes et représentent l'organelle la plus vulnérable aux influences de l'environnement. Ils constituent également la principale source de production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS). En général, en cas de stress abiotique, une quantité excessive d'énergie lumineuse peut entraîner la photo-inhibition et encourager l'accumulation des ROS (comme le superoxyde ( $O_2\cdot^-$ ), le peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) et l'oxygène singulet ( $^1O_2$ )) dans les chloroplastes, surtout lorsque la capacité antioxydante est insuffisante pour neutraliser ces ROS. L'accumulation des ROS provoque une augmentation de la peroxydation des lipides membranaires, ce qui entraîne des dommages significatifs à la structure de la membrane du chloroplaste. Ces dommages perturbent l'utilisation de l'énergie lumineuse et altèrent les activités des enzymes antioxydantes ainsi que la concentration en antioxydants. En fin de compte, cela conduit à la mort des cellules et, à terme, de la plante (Zhou et *al.*, 2018).

Les cellules végétales sont équipées d'un système de neutralisation des radicaux libres pour se défendre contre les dommages oxydatifs. Le métabolisme antioxydant, comprenant les enzymes antioxydantes et les composés non enzymatiques, joue un rôle essentiel dans la neutralisation des ROS induits par le stress salin. La tolérance à la salinité est étroitement liée à l'activité des enzymes antioxydantes telles que la superoxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT), la glutathion peroxydase (GPX), l'ascorbate peroxydase (APX) et la glutathion réductase (GR), ainsi qu'à l'accumulation de composés antioxydants non enzymatiques (Astaneh et *al.*, 2022).

### **I.1.7. Réponse des plantes au stress salin**

#### **I.1.7.1. Homéostasie ionique**

##### **I.1.7.1.1. Compartimentation vacuolaire**

Les plantes arrivent à se débarrasser du sel qui pénètre dans leurs cellules en le stockant à l'intérieur des vacuoles, le rendant ainsi inefficace. Lorsque les effets de la salinité sur les plantes sont dus à la sécheresse, ces dernières font face au stress osmotique en accumulant des solutés organiques tels que le citrate, le malate, l'osmotine et particulièrement la proline au sein de leurs cellules. Si le stress secondaire résultant perturbe l'équilibre nutritionnel de la plante, celle-ci peut contrer le stress salin en réduisant l'absorption de sodium ( $Na^+$ ) tout en augmentant celle de potassium ( $K^+$ ) (Astaneh et *al.*, 2022).

##### **I.1.7.1.2. Exclusion des ions toxiques**

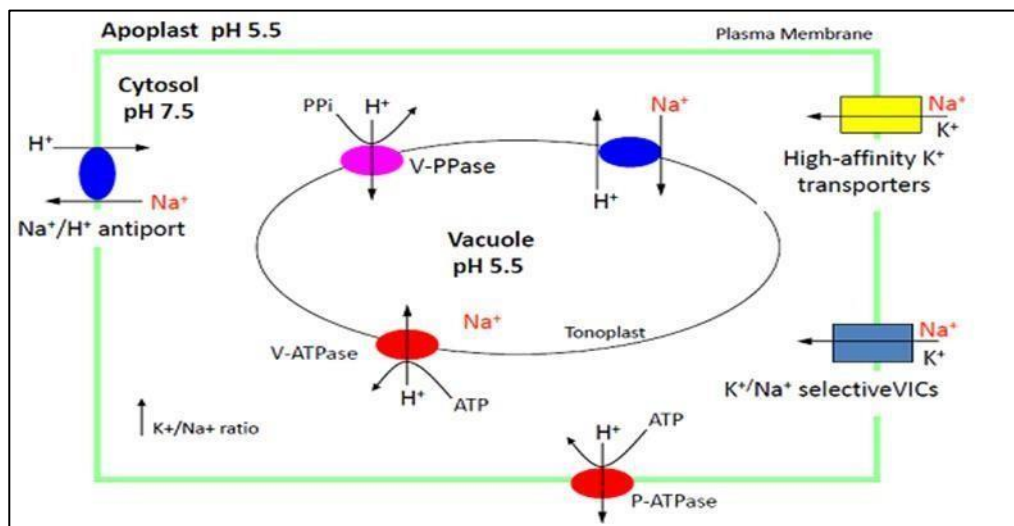
Les plantes absorbent ainsi une quantité significative de sodium ( $Na^+$ ), qui se déplace de manière séquentielle depuis la solution du sol vers les cellules situées à l'extérieur des racines, puis à travers les vaisseaux du xylème racinaire, il migre de la racine vers la partie

supérieure de la plante, atteignant ensuite l'interface de la vapeur au niveau des feuilles grâce à un flux important de transpiration (Anapati et *al.*, 2022).

Les halophytes, qui constituent la flore naturelle des sols très salins, sont en mesure de maintenir cette exclusion des ions à des niveaux de salinité supérieurs à ceux tolérés par les glycophytes. Par exemple, l'orge maritime (*Hordeum marinum*) parvient à exclure à la fois le sodium ( $\text{Na}^+$ ) et le chlore ( $\text{Cl}^-$ ) jusqu'à des concentrations d'au moins 450 millimoles de chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ). L'exclusion des  $\text{Na}^+$  des tissus foliaires est essentielle. Un dysfonctionnement de ce processus d'exclusion du  $\text{Na}^+$  se manifeste par un effet toxique qui peut se manifester après plusieurs jours ou semaines, selon l'espèce, et conduit à la prématurité de la mort des feuilles les plus anciennes (Munns et Tester, 2008).

### L1.7.1.3. Ajustement ionique

Le maintien de l'équilibre cellulaire entre le sodium ( $\text{Na}^+$ ) et le potassium ( $\text{K}^+$ ) est essentiel pour permettre à une plante de s'adapter au stress provenant de la salinité. Les mécanismes visant à prévenir l'accumulation de  $\text{Na}^+$  toxique dans le cytoplasme comprennent la limitation de l'absorption excessive de  $\text{Na}^+$ , l'augmentation du rejet de  $\text{Na}^+$  hors de la cellule, ainsi que la séquestration du  $\text{Na}^+$  dans les vacuoles. Dans le cas du riz, la régulation de l'exclusion du  $\text{Na}^+$  des pousses est gouvernée par le rapport  $\text{Na}^+/\text{H}^+$ , qui maintient un équilibre cellulaire inférieur en  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  et renforce la tolérance au sel. La gestion du  $\text{Na}^+$  dans les pousses par le biais de la régulation du rapport  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  dans les racines est également considérée comme un élément clé de la tolérance face à la salinité (Anapati et *al.*, 2022).



**Figure 2 :** Compartimentation et sélection des ions chez la plante en réponse au stress salin (Munns et *al.*, 2008).

### **I.1.7.2. Stratégie osmotique**

#### **I.1.7.2.1. Osmorégulation et osmoprotection**

La production et l'accumulation de solutés compatibles tels que la proline, la glycine bêtaïne, le tréhalose, les polyols, et d'autres, jouent un rôle essentiel dans la régulation de la pression osmotique lorsque la salinité est élevée. L'ajout externe de ces solutés compatibles ou la surexpression des gènes pertinents impliqués dans la production d'osmolytes pourraient augmenter la capacité à résister au stress salin (Chen et *al.*, 2021). Certaines plantes maintiennent leur pression osmotique interne en produisant des osmoprotecteurs, principalement des sucres solubles et des acides aminés multifonctionnels, dont la proline est un exemple significatif. Cette dernière est souvent utilisée comme indicateur biochimique précieux pour évaluer la capacité des plantes à résister au stress salin, d'autres plantes sont capables de maintenir un faible potentiel hydrique interne malgré le stress salin ambiant, assurant ainsi une turgescence adéquate pour leur croissance tout en préservant leur métabolisme intact (Chetouani et *al.*, 2019).

#### **I.1.7.2.2. Sucres totaux réducteurs**

Une autre caractéristique essentielle est l'ajustement adaptatif de la distribution du carbone et du métabolisme des sucres. Par exemple, chez des plants de tomates (*Solanum lycopersicon*), une réduction de l'attribution du carbone aux racines a été observée, même avant que l'activité photosynthétique des feuilles ne montre une diminution. Une conséquence de ces modifications dans la répartition du carbone est l'augmentation significative de l'accumulation de sucres dans les feuilles matures en présence de niveaux élevés de salinité. Cela est observé dans plusieurs cultures telles que le tabac, le riz, le peuplier et le coton (Sellami et *al.*, 2019). La quantité de sucres stockés varie en fonction de l'âge des feuilles (Peng et *al.*, 2016). Parmi les sucres solubles, on retrouve principalement le glucose, le saccharose, le tréhalose, et d'autres. Ils ont la capacité de stabiliser la membrane cellulaire et le protoplaste. De plus, ils agissent comme des osmoprotecteurs en préservant les enzymes solubles des effets néfastes des concentrations élevées d'ions inorganiques à l'intérieur de la cellule (Liang et *al.*, 2018). Les sucres solubles jouent un rôle crucial en fournissant du carbone et de l'énergie pour d'autres processus de synthèse organique. En situation de stress salin, l'augmentation du potentiel osmotique est à l'origine du stress osmotique, et les plantes réagissent en augmentant leur potentiel osmotique grâce à l'accumulation de petites molécules de sucres solubles pour résister à cette contrainte. Par conséquent, la concentration de sucres solubles peut servir d'indicateur physiologique pour évaluer la tolérance au sel des plantes (Kerepesi et Galiba, 2014).

### **I.1.7.2.3. Proline**

C'est une substance d'ajustement osmotique essentielle, présente sous forme libre dans les cellules végétales. Elle se caractérise par son faible poids moléculaire, une solubilité élevée dans l'eau, et une absence de charge nette dans la gamme des pH physiologiques. Les cellules végétales ont la tendance à accumuler de telles substances solubles d'ajustement osmotique pour contrer le stress osmotique provoqué par la salinité, et la biosynthèse de la proline est particulièrement stimulée dans ce contexte (Gomes Silveira et *al.*, 2003). La concentration de proline peut servir de paramètre physiologique pour évaluer la capacité des plantes à résister au stress (Sellami et *al.*, 2019).

### **I.1.7.2.4. Glycine bêtaïne**

Elle maintient la stabilité thermodynamique des protéines, ce qui prévient leur agrégation et permet de maintenir leurs fonctions normales. En conséquence, elle réduit la peroxydation des systèmes membranaires et contribue à maintenir la stabilité des membranes en présence de conditions salines (Zhu et *al.*, 2022). Les recherches effectuées au cours des 25 dernières années ont confirmé que la glycine bêtaïne (GB) protège la structure et le fonctionnement normaux du centre photosynthétique de l'oxygène (PSII) tout en améliorant l'activité de la Rubisco lors de périodes de sécheresse, ce qui permet de réduire l'impact de l'inhibition de la capacité photosynthétique due à la sécheresse (Huang et *al.*, 2020). Selon des études récentes, la glycine bêtaïne a la capacité de réguler l'activité des canaux ioniques de manière à réduire la perte de potassium ( $K^+$ ) à l'extérieur des cellules en réponse à la salinité. De plus, elle renforce l'activité des récepteurs  $H^+$ -ATPases de la membrane plasmique, favorise l'absorption de phosphate et régule l'équilibre du phosphate à l'intérieur de la cellule (Li et *al.*, 2019).

### **I.1.7.2.5. Protéines**

En réaction au stress salin, les plantes peuvent accumuler un ensemble de protéines spécifiques. Normalement, en réponse au stress salin, les tissus végétaux régulent la dégradation des protéines tout en augmentant la production de protéines associées au stress salin (Wang et *al.*, 2015). Les protéines exercent un rôle central dans la régulation de ces processus, qu'ils se déroulent dans des conditions normales ou en réponse au stress salin.

Elles jouent un rôle clé dans la régulation du métabolisme cellulaire, le transport des solutés organiques et inorganiques, la gestion de l'eau, l'osmorégulation, l'équilibre redox, la détection et la signalisation, l'équilibre hormonal, la division cellulaire, l'expansion cellulaire, la croissance et le développement. Certains chercheurs estiment que des protéines spécifiques pourraient être utilisées pour favoriser la tolérance, la prévention ou la

minimisation des effets du stress salin chez les plantes cultivées. Ces protéines pourraient être employées de manière traditionnelle ou par le biais de techniques transgéniques pour améliorer la croissance et le rendement des cultures sur des sols salins (Athar et *al.*, 2022).

### **I.1.8. Métabolisme végétal primaire et secondaire face au stress**

Les plantes doivent réajuster leurs processus physiologiques et biochimiques, ainsi que modifier leur croissance et leur développement, afin de restaurer l'équilibre osmotique et ionique tout en éliminant les dommages secondaires résultant de l'exposition au sel (Zhou et *al.*, 2023). D'une part, les plantes synthétisent deux types distincts de composés chimiques, à savoir les métabolites primaires et les métabolites secondaires :

**I.1.8.1. Métabolites primaires :** ont un rôle essentiel dans les processus vitaux de la plante, tels que la survie et la croissance cellulaires (Baharudin et Osman, 2023). Notamment la photosynthèse, la respiration et le métabolisme. Parmi les métabolites primaires essentiels, on trouve les glucides, les acides aminés, les protéines, les lipides et les hormones. Ces composés sont cruciaux pour orchestrer la réponse initiale de la plante à une infection par des agents pathogènes en régulant les biomolécules telles que les protéines, les lipides et les glucides (Anjali et *al.*, 2023).

**I.1.8.2. Métabolites secondaires :** remplissent une fonction cruciale en protégeant la plante contre les maladies et les parasites (Baharudin et Osman, 2023). Les terpénoïdes, les composés phénoliques, les alcaloïdes et les glucosinolates sont autant d'exemples de métabolites secondaires présents chez les plantes. Ils remplissent diverses fonctions en contribuant à la protection des plantes contre les attaques de champignons, de bactéries, de virus et d'animaux herbivores (Yousaf et *al.*, 2018). En situation de stress, les métabolites secondaires des plantes connaissent une augmentation significative et agissent comme des signaux moléculaires, stimulant ainsi l'activation des gènes impliqués dans la réponse de défense. Elles renforcent la capacité de résistance des plantes, améliorant leur survie dans des conditions adverses. Les plantes disposent clairement de divers mécanismes de défense au niveau génétique ou moléculaire, qui sont activés par une gamme variée de gènes ou de facteurs transcriptionnels (Acosta-Motos et *al.*, 2017).

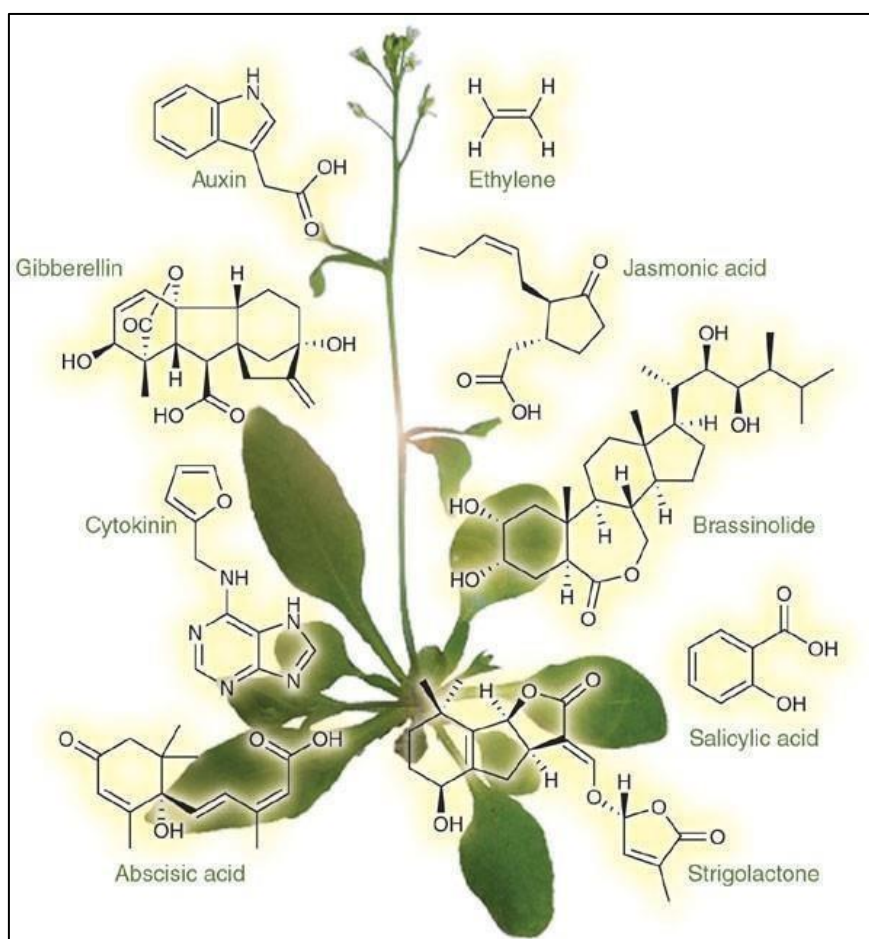
#### **I.1.8.2.1. Composés phénoliques**

Les plantes possèdent une compétence notable pour synthétiser un grand nombre de composés secondaires dotés de propriétés antimicrobiennes. Parmi ces composés, on retrouve les substances phénoliques, tels que les flavonoïdes et d'autres substances apparentées. Ces composés phytochimiques sont particulièrement abondants dans la peau et les feuilles des fruits (Anjali et *al.*, 2023). De plus, ces métabolites phénoliques sont réputés

pour altérer la perméabilité cellulaire, provoquant ainsi une désorganisation structurale et fonctionnelle au niveau des protéines de la membrane. Cette perturbation peut entraîner des changements dans le pH cellulaire, la production d'ATP, la consommation de substrats et l'activité des enzymes membranaires (El-Mogy et Alsanius, 2012).

#### I.1.8.2.2. Phytohormones

Ce sont de petites molécules chimiques qui jouent un rôle essentiel dans la régulation de la croissance des plantes ainsi que dans leur capacité à tolérer le stress comme l'acide abscissique (ABA), l'acide jasmonique (JA), l'acide salicylique (SA), l'acide indole-3-acétique (IAA), les brassinostéroïdes (BR), les cytokinines (CK), l'acide gibbérellique (GA), l'éthylène (ET) et les strigolactones (SLs). Ces composés présentent un fort potentiel pour atténuer les effets négatifs du stress environnemental sur les plantes, ouvrant ainsi la voie au développement de futures variétés de plantes résistantes au stress, offrant des rendements plus élevés et une meilleure qualité (Raza et *al.*, 2023).



**Figure 3** : Structures chimiques des différentes phytohormones (Santner et *al.*, 2009).



### **I.1.8.2.3. Mode d'action des phytohormones**

Les phytohormones fonctionnent en tant que médiateurs chimiques qui orchestrent des processus cellulaires et jouent un rôle fondamental en coordonnant différentes voies de signalisation. Elles régulent les réponses au stress et modifient les réactions des plantes aux facteurs de stress, tant au niveau interne qu'externe. À la lumière des réponses adaptatives des plantes face au stress, la régulation des sécrétions de phytohormones et des cascades de signalisation devient d'une importance capitale, surtout en conditions stressantes. En général, toute perturbation de l'équilibre hormonal au sein de la plante peut induire des modifications cellulaires significatives, lesquelles pourraient jouer un rôle crucial dans l'amélioration de la résilience des cultures envers les stress. Par conséquent, l'exploration des mécanismes de régulation, qu'ils soient négatifs ou positifs, des phytohormones par le biais de techniques d'édition du génome, offre une perspective prometteuse pour la création de variétés de plantes plus robustes face aux contraintes environnementales (Mubarik et *al.*, 2021).

#### **I.1.8.2.2. Acide salicylique (AS)**

L'acide salicylique, également connu sous le nom d'acide 2-hydroxybenzoïque, fait partie d'une catégorie diversifiée de composés phénoliques caractérisés par la présence d'un anneau aromatique auquel est attaché un groupe hydroxyle ou un dérivé fonctionnel. Ces composés sont synthétisés par les plantes. Il joue un rôle unique dans divers aspects de la croissance des plantes, tels que la thermogenèse, l'induction florale, et l'absorption d'ions. Il influe également sur la biosynthèse de l'éthylène, la régulation de l'ouverture et de la fermeture des stomates, et il peut inverser les effets de l'acide abscissique (ABA) sur la chute des feuilles. En outre, il est associé à une augmentation des niveaux de pigments photosynthétiques, une augmentation du taux de photosynthèse, et il modifie l'activité de certaines enzymes cruciales, qu'il s'agisse de conditions de stress ou de conditions normales (Khalil et *al.*, 2021).

#### **I.1.8.2.3. Cytokinines (CK)**

Ils jouent un rôle significatif dans tous les stades du développement des plantes, de la germination des graines jusqu'à la phase de sénescence (Riefler et *al.*, 2006). Les cytokinines exercent leur action au niveau cellulaire en stimulant l'expression de gènes spécifiques, en favorisant la mitose cellulaire ainsi que le développement des chloroplastes. À un niveau organique, elles influent sur la libération des bourgeons apicaux en levant la dominance apicale, tout en régulant la croissance des pousses et des racines par inhibition (Yaronskaya et *al.*, 2007). La kinétine est reconnue comme une hormone essentielle pour les plantes, bien que son rôle soit mieux compris chez les animaux. Cependant, son impact précis sur les

plantes nécessite encore une exploration plus poussée. Il est important de noter que, à de faibles concentrations, la kinétine a un effet bénéfique sur les plantes, mais des concentrations plus élevées peuvent devenir toxiques (Khalil et *al.*, 2021).

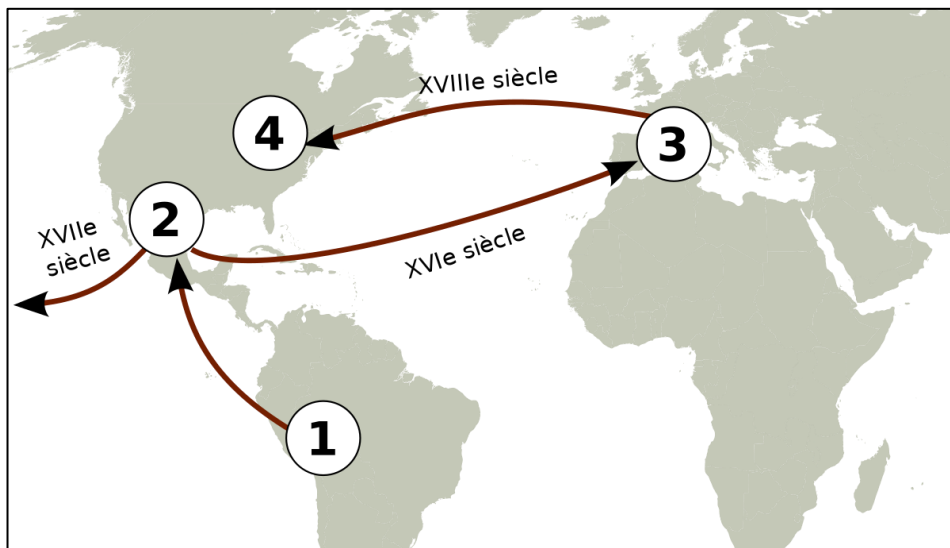
#### **L1.8.2.4. Acide jasmonique (AJ)**

Dans les plantes, la synthèse de l'acide jasmonique (AJ), une phytohormone dérivée des lipides, débute par l'ajout d'oxygène moléculaire à l'acide linolénique (18:3) ou à l'acide hexadécatriénoïque (16:3), conduisant à la formation de l'acide 12-oxo-phytodiénoïque (OPDA) dans les plastes. Cette réaction se poursuit jusqu'à la production finale de l'acide jasmonique dans le peroxyosome. L'acide jasmonique (JA) joue un rôle crucial dans divers aspects de la croissance et du développement des plantes, y compris la régulation de la croissance racinaire, la promotion de la sénescence des feuilles, ainsi que le développement des étamines, des embryons et des graines. De plus, il intervient dans le développement embryonnaire et la formation des graines par l'intermédiaire de la perception et de la signalisation du JA, impliquant des protéines telles que coronatine insensitive1 (COI1) et JA zimdomain protein (JAZ). Il joue également un rôle essentiel dans la capacité des plantes à résister aux stress d'origine abiotique et biotique (Li et *al.*, 2023).

## Chapitre 2 : Généralité sur la tomate

### I.2.1. Origine et historique

Les premières tomates sont originaires des régions andines de la côte nord-ouest de l'Amérique du Sud, où diverses espèces, notamment *Solanum lycopersicum cerasiforme* (la tomate cerise) et *Solanum pimpinellifolium*, poussent naturellement. Leur domestication semble avoir eu lieu au Mexique (1), où des variétés à gros fruits étaient déjà présentes lors de la conquête espagnole en 1519 (3). Les Espagnols ont rapidement introduit la tomate en Europe, mais initialement, elle était utilisée principalement comme plante ornementale pour les jardins et les tonnelles, car ses plants avaient une apparence arborescente. En raison de son apparentement avec la belladone (*Atropa belladonna*), connue pour sa toxicité suite au teneur élevés en solanine qui appartiennent au groupe des glycoalcaloïdes, la tomate a été considérée comme non comestible qui peuvent provoquer des nausées, des douleurs abdominales, des vomissements et des diarrhées.



**Figure 4 :** Origine de la tomate (Spedona,2009).

Par la suite, la tomate a été intégrée à la cuisine espagnole, notamment dans le gaspacho, une soupe andalouse de légumes crus consommée froide. Son introduction en Italie a suivi, puis elle a finalement conquis la cuisine française vers la fin du XVIIIe siècle. En 1760, elle était encore répertoriée comme plante ornementale dans le catalogue Vilmorin- Andrieux, témoignant de sa transition progressive vers un ingrédient culinaire courant (Gilgenkrantz, 2012)

En Algérie, l'introduction de cette culture a été réalisée par des agriculteurs originaires du sud de l'Espagne, attirés par des conditions environnementales favorables. La première consommation de ce produit a été enregistrée dans la région d'Oran en 1905, puis sa

popularité s'est progressivement étendue vers le centre du pays, notamment dans la région côtière d'Alger (Morsli, 2018)

### **I.2.2. Classification botanique**

La tomate fait partie de la famille des *Solanacées*, qui compte plus de 3000 espèces, incluant plusieurs plantes d'importance économique telles que les pommes de terre, les aubergines (*Solanum melongena*), le tabac (*Nicotiana tabacum*), les poivrons (*Capsicum annuum*) et les pommes de terre (*Solanum tuberosum*). Le genre *Solanum* est le plus grand de la famille des Solanacées, englobant entre 1250 et 1700 espèces qui se trouvent sur tous les continents tempérés et tropicaux et se distinguent par leur diversité morphologique et écologique. *Solanum* est le genre le plus important économiquement, contenant des espèces cultivées ainsi que de nombreuses autres espèces produisant des composés toxiques ou médicinaux (tels que physalis et les pétunias). Depuis son introduction en Europe au 16<sup>ème</sup> siècle, la tomate était considérée comme étroitement liée au genre *Solanum* et était identifiée comme *Solanum pomiferum*. En 1753, Linné a classé pour la première fois les tomates dans le genre *Solanum* sous le nom spécifique de *Solanum lycopersicum*. Néanmoins, le genre et la désignation de la tomate (Bergougnot, 2014). Selon (Morsli, 2018), la tomate est classée comme suit :

Régne : Plantae

Classe : Magnoliopsida

Ordre : Solanales

Famille : Solanaceae

Genre : *Solanum*

Espèce : *Solanum lycopersicum* Mill

### **I.2.3. Description de la plante**

La tomate est largement reconnue comme l'une des plantes dicotylédones cultivées, herbacée vivace les plus étudiées. La façon dont la plante se développe peut varier entre indéterminée et déterminée, atteignant parfois jusqu'à 3 mètres de hauteur. La racine principale peut s'étendre sur plusieurs mètres. La tige, angulaire, est revêtue de trichomes pileux et glandulaires qui lui confèrent une odeur distinctive. Les feuilles sont disposées de manière alternée le long de la tige, avec une phyllotaxie de 137.5 degrés. Leur forme peut aller du lobé au composé, avec des segments disposés de manière pennée. Les feuilles composées comptent généralement entre cinq et neuf folioles, toutes pétiolées et dentées, et recouvertes de trichomes glandulaires et pileux.

Le fruit de la tomate est soit globulaire, soit ovoïde. Il présente toutes les

caractéristiques typiques des baies : un fruit charnu simple qui renferme ses graines dans la pulpe. La peau extérieure constitue un tissu mince et charnu, formant le reste de la paroi du fruit et le placenta. La couleur du fruit est due aux cellules présentes à l'intérieur du tissu charnu. Les tomates peuvent avoir une structure à deux ou plusieurs loges. Chaque fruit peut contenir entre 50 et 200 graines logées dans des cavités et enveloppées dans des membranes gélatineuses. Les graines, généralement de petite taille (5 x 4 x 2 mm) et de forme lentille, contiennent l'embryon et l'endosperme, et sont recouvertes d'une enveloppe de graine résistante, appelée tégument. Le développement complet du fruit s'étale sur une période de sept à neuf semaines après la fécondation (Group et Oversight, 2017).

Pendant la phase verte, la surface de la tomate se caractérise par une teinte verte vibrante. En progressant vers le stade de rupture, des nuances subtiles de jaune, de rose et de rouge émergent, couvrant au maximum 10% de la surface. En passant au stade de transition, la tomate prend une apparence jaune ternie, accompagnée d'une augmentation progressive du rose et du rouge, qui s'étend désormais pour couvrir entre 10% et 30% de la surface. Au fur et à mesure que la tomate entre dans la phase rose, ces changements de couleur deviennent plus prononcés, et les agrégats commencent à présenter une coloration rose ou rouge distincte, couvrant une plage de 30% à 60% de la surface. En avançant vers le stade rouge clair, la surface de la tomate se transforme en une teinte rose rougeâtre délicate ou rouge riche, couvrant désormais plus de 60% de la surface de la tomate. Enfin, au stade rouge, la surface de la tomate est principalement ornée d'agréats de couleur rouge, s'étendant pour couvrir plus de 90% de sa surface (Abekoon et *al.*, 2024).

#### **I.2.4. Intérêt de la tomate**

##### **I.2.4.1. Intérêt sur le plan alimentaire**

Les tomates contiennent de nombreux composés bénéfiques pour la santé et peuvent être facilement intégrées en tant que composante nutritive d'un régime équilibré (Martí et *al.*, 2016). Il renferme une variété de composés favorables à la santé, tels que des vitamines, des caroténoïdes et des composés phénoliques, qui confèrent des avantages physiologiques incluant des effets anti-inflammatoires, anti-allergènes, antimicrobiens, vasodilatateurs, antithrombotiques, cardio-protecteurs et antioxydants (Liu et *al.*, 2016). Outre leur consommation sous forme de fruits frais, les tomates sont également employées dans une variété de produits transformés tels que les conserves de tomates, la pâte de tomates, le ketchup, le jus et les sauces pour pâtes (Li et *al.*, 2018).

**Tableau1** : Composition chimique de la tomate (%)

Paramètres	Valeurs	Variétés
Energie (kcal/100g)	34.67 ± 18.74	[18.00 – 75.00]
Cendres (%)	08.75 ± 01.69	[05.90 – 10.60]
Humidité (g/100g)	91.18 ± 06.83	[68.03 – 96.17]
Proteins totaux (g/100g)	17.71 ± 05.40	[10.50 – 25.03]
Lipides (g/100g)	04.96 ± 01.19	[03.62 – 05.39]
Glucides (g/100g)	05.96 ± 01.37	[03.92 – 08.00]
Sucres totaux (g/100g)	50.60 ± 03.69	[47.00 – 56.45]
Potentiel hydrogène (pH)	03.83 ± 00.21	[03.61 – 04.08]
Acidité (%)	00.48 ± 00.07	[00.39 – 00.55]
Sucres réducteurs (%)	35.84 ± 04.57	[30.03 – 41.21]
Fructose (%)	02.88 ± 00.49	[01.15 – 03.42]
Glucose(%)	02.45 ± 00.48	[01.74 – 03.18]
Saccharose (%)	00.02 ± 00.05	[00.01 – 00.02]
Fibres totaux (g/100g)	11.44 ± 09.31	[01.32 – 19.36]

(Aliet *al.*, 2021)

La tomate est également le légume le plus courant dans le régime méditerranéen, un régime reconnu pour être bénéfique pour la santé, notamment en ce qui concerne le développement des maladies dégénératives chroniques, la qualité du fruit de la tomate a été évaluée en fonction du contenu en composés chimiques tels que la matière sèche, le degré Brix, l'acidité, les sucres simples, les acides citrique et autres acides organiques, ainsi que les composés volatils (Herna, 2008).

**Tableau2** : Composition minérale de la tomate

Eléments	Unités	Concentrations	Variétés
Sodium (Na <sup>+</sup> )	mg/100g	70.38 ± 12.20	[56.90 – 80.65]
Potassium (K <sup>+</sup> )		403.02 ± 254.41	[16.63 – 1097.00]
Calcium (Ca <sup>+2</sup> )		105.21 ± 22.76	[48.47 – 162.07]
Magnésium (Mg <sup>+2</sup> )		172.58 ± 58.92	[76.87 – 265.93]
Phosphore (P)		300.99 ± 32.12	[173.00 – 379.31]
Iode (I)		2.65 ± 1.44	[00.18 – 03.97]
Nickel (Ni)		0.66 ± 0.00	00.66
Nitrate (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )		274.37 ± 156.75	[86.21 – 459.00]
Fer (Fe <sup>+3</sup> )		4.55 ± 2.18	[1.50 – 06.45]
Zinc (Zn <sup>+2</sup> )		2.48 ± 1.05	[00.17 – 03.17]
Cobalt (Co)	mg/100g	19.66 ± 9.66	[10.00 – 29.31]
Cuivre (Cu <sup>+2</sup> )		0.67 ± 0.15	[00.06 – 01.10]
Manganèse (Mn <sup>+2</sup> )		0.60 ± 0.12	[00.11 – 01.88]
Chrome (Cr)		193.80 ± 133.80	[60.00 – 327.59]
Chlore (Cl)		517.24 ± 0.00	517.24
Fluore (F)		413.79 ± 0.00	413.79
Aluminium (Al <sup>+3</sup> )		1241.38 ± 0.00	1241.38
Silicium (Si)		46.55 ± 0.00	46.55
Selenium (Se)		13.45 ± 3.45	[10.00 – 16.90]
Plomb (Pb <sup>+3</sup> )	µg/g	1.21 ± 0.06	[01.15 – 01.27]
Cadmium (Cd <sup>+3</sup> )		0.17 ± 0.06	[00.11 – 00.22]
Arsenic (As)		0.20 ± 0.005	[00.19 – 00.20]
Bore (B <sup>+1</sup> )		36.83 ± 3.27	[25.84 – 48.59]

(Ali et al., 2021)

#### I.2.4. Importance économique

La tomate, aussi appelée *Lycopersicon esculentum*, est l'un des légumes frais les plus consommés dans les pays industrialisés et elle est largement utilisée par les industries alimentaires comme matière première pour divers produits dérivés (Herna, 2008), elle occupe une superficie de 5 millions d'hectares dans le monde, avec une production moyenne de 33 988 t/ha (Mândru et al., 2018). La montée de l'aisance mondiale a engendré une augmentation

substantielle de la demande en tomates, induisant ainsi un développement étendu de l'industrie de la tomate pour répondre à cette demande croissante. Parallèlement, l'essor de l'industrie de la restauration rapide a également exercé une influence notable sur la demande de produits dérivés de la tomate. Cette tendance devrait se maintenir à court terme, entraînant une augmentation continue de la consommation de tomates, en outre ces cultures sont sources de profits importants pour les agriculteurs et de possibilités d'emploi pour les travailleurs ruraux, du fait de leurs besoins en main-d'œuvre plus élevés par rapport à d'autres cultures (Tahir et *al.*, 2012).

### **I.2.5. Culture hors sol de la tomate**

La production de rendement en culture hydroponique a été signalée comme étant 11 fois supérieure à celle de l'agriculture traditionnelle (Richa et *al.*, 2020). La culture hydroponique est une technique dans laquelle les plantes sont cultivées dans l'eau sans aucun sol. Cette technique présente de nombreux avantages, tels que l'absence de besoin de sol, une croissance végétale plus rapide, un espace requis plus petit, des limitations saisonnières moindres, une applicabilité dans n'importe quel endroit, une consommation d'eau réduite, l'absence de besoin d'herbicide, une consommation réduite de pesticides, une diminution des ruissellements agricoles, un meilleur contrôle sur le contenu en nutriments, une propreté accrue, la possibilité de contrôler des caractéristiques spécifiques telles que la lumière, et des exigences en main-d'œuvre moindres par rapport à l'agriculture conventionnelle en raison de la facilité d'application des engrais, de l'absence de problème des adventices et de la possibilité d'appliquer des systèmes automatiques (Farhadi, 2021). Richa (2020), a ajouté que la culture hydroponique présente d'autres avantages à savoir :

- ✓ Préserver les ressources naturelles telles que l'eau et le sol ;
- ✓ Aide à relever les défis du changement climatique ;
- ✓ Fournir une productivité plus élevée de manière écologiquement durable.

Ces dernières décennies, la recherche en hydroponie a progressé de manière constante, en se concentrant particulièrement sur l'amélioration de la productivité des cultures et sur la résolution des limitations des systèmes hydroponiques. Plusieurs espèces de cultures ont été examinées dans des systèmes hydroponiques, comprenant des haricots, des concombres, de la laitue en utilisant différents substrats de croissance (Lee et *al.*, 2015).

### **I.2.6. Pathologie et ravageurs de la tomate**

Les maladies et les ravageurs sont l'un des concurrents significatifs des êtres humains pour les ressources générées par l'agriculture. Chaque année, ces ravageurs provoquent des pertes de plus de 15% de la production agricole mondiale. Ces pertes surviennent non



seulement avant la récolte, mais également pendant le stockage des produits (Basit et *al.*, 2021). La production de tomates est entravée par de nombreux facteurs biotiques et abiotiques qui réduisent de manière significative la qualité, la quantité et la productivité, parmi les facteurs biotiques, les insectes ravageurs et les maladies qui affectent la culture de la tomate entraînent des pertes importantes de production ainsi que des altérations de la qualité (Pandey et *al.*, 2022)

**Tableau 3 : Principaux ravageurs de la tomate**

<b>Ravageurs</b>	<b>Dégâts</b>	<b>Moyens de lutte</b>
Nématodes <i>Meloïdogyne incognita</i> <i>Meloidogyne arenaria</i> <i>Meloidogyne javanica</i>	Formation de galles sur racines Perturbation de l'absorption racinaire. Jaunissement des feuilles et la plante dépérit	Désinfection du sol Utilisation des variétés résistantes.
Acariens, <i>Tetranychusurticae</i>	Transmission de virus Dommage direct lorsqu'ils apparaissent en grand nombres sur la culture	Faire des lâches d'ennemis naturels.
Les thrips ( <i>Frankliniella occidentalis</i> )	Maladie bronzée de la tomate	Arracher les adventices
Pucerons vert du pêcher, <i>Myzuspersicae</i> , <b>Puceron de la pomme de terre</b>	Déformation des pousses tendres Apparition de taches sur les fruits, et vecteurs de maladies virales	
Mineuse des feuilles de la tomate, <i>Tuta absoluta</i> Meyrick, 1917	Mines sur feuilles qui se développent jusqu'à la destruction complète du limbe Nombreuses galeries surfolioles Infestation des baies de tomate	Installation des filets insect proof sur les ouvertures Détruire les adventices Emploi d'insectes auxiliaires
La mouche blanche ( <i>Bemisiatabaci</i> )	-Transmission de virus	Décaler les dates de semis par rapport à la période d'activité de l'insecte. Arracher les adventices

(Morsli, 2018)

## **Chapitre 3 : Acide salicylique**

### **I.3.1. Généralité**

Le nom de l'acide salicylique est dérivé du mot latin "*Salix*", qui signifie le saule, car cet acide a été isolé pour la première fois à partir de l'écorce de cet arbre en 1828. Les peuples amérindiens et eurasiens utilisaient depuis longtemps l'écorce de saule (*Salix*) pour soulager leurs maux et leurs douleurs (Raskin et *al.*, 1990). Il est également connu comme le précurseur de l'aspirine, l'acide acétylsalicylique (Mitchell et Broadhead, 1967). L'acide salicylique, également désigné sous le nom d'*acide 2-hydroxybenzoïque*, est une phytohormone appartenant à un groupe diversifié de composés phénoliques caractérisés par la présence d'un anneau aromatique comportant un groupe hydroxyle ou un dérivé fonctionnel, et synthétisés par les plantes (Khalil et *al.*, 2021). Cette phytohormone agit en tant que régulateur de croissance (Senaratna et *al.*, 2000). L'acide salicylique, ou acide ortho- hydroxybenzoïque, est un métabolite phénolique produit par les plantes. Sous forme de poudre cristalline, il présente un point de fusion de 157-159°C et une solubilité modérée dans l'eau, mais une forte solubilité dans les solvants organiques polaires. Son pH est de 2,4, avec un pKa de 2,98 (Raskin, 1992b).

### **I.3.2. Effet de l'acide salicylique sur la plante**

L'acide salicylique (AS) est un composé prometteur capable de réduire la sensibilité des plantes aux stress environnementaux en régulant le système de défense antioxydant, le mouvement transmembranaire et le taux de photosynthèse (Nazar et *al.*, 2015). Il est évident que AS est une molécule signal de stress qui active l'expression des gènes responsables du stress abiotique (Li et *al.*, 2013) et induit l'expression d'enzymes et de protéines de biosynthèse chez les plantes soumises à des stress environnementaux (Wang et *al.*, 2019). L'application de AS à faibles concentrations a généralement un effet semblable à l'acclimatation, conduisant à une tolérance accrue à différents types de stress abiotiques, principalement en raison d'une capacité antioxydante accrue (Horvath et *al.*, 2007; Hayat et *al.*, 2010; Bidabadi et *al.*, 2012). De plus, l'application exogène de l'AS peut améliorer la croissance en conditions de déficit hydrique dans plusieurs espèces (Marcínska et *al.*, 2013).

Les réponses des plantes à l'acide salicylique exogène dépendent de l'espèce, du stade de développement et du mode d'application de cet hormone (par exemple, pulvérisation foliaire, trempage des graines (hormoprimer), injection de tige, irrigation, ajout au milieu de culture ou à la solution hydroponique). Cependant, la connaissance des effets de l'acide salicylique sur les plantes n'était pas entièrement élucidée, étant donné qu'il existe de

nombreuses variations dans les réponses physiologiques avec les applications exogènes décrites dans la littérature (Khan et *al.*, 2015).

### **I.3.3. Effet de l'acide salicylique sur la croissance de la plante et la graine.**

L'acide salicylique joue un rôle crucial dans divers processus de croissance des plantes, notamment la thermogenèse, l'induction florale et l'absorption d'ions. Il influence la biosynthèse de l'éthylène, le mouvement des stomates et contrecarre les effets de l'acide abscissique (ABA) sur l'abscission des feuilles. De plus, il élève le niveau des pigments photosynthétiques, accroît le taux de photosynthèse et altère l'activité de certaines enzymes importantes, que ce soit dans des conditions de stress ou non (Miura et *al.*, 2014). Dans le cas où la salinité est élevée, peut entraîner de graves perturbations métaboliques chez les plantes, car elle génère des espèces réactives de l'oxygène (ROS) qui perturbent le système redox cellulaire en faveur de formes oxydées, créant ainsi un stress oxydatif qui peut endommager l'ADN (Grill, 2010).

L'acide salicylique présente un fort potentiel dans le contrôle des pertes post-récolte des cultures horticoles en influençant la croissance, le développement, et divers aspects de la décomposition post-récolte et de la résistance aux maladies (Asghari, 2010). Il améliore efficacement la croissance, la photosynthèse, l'activité des enzymes antioxydantes, ainsi que le développement des stomates et des chloroplastes chez le *Dianthus superbus* sous un stress salin modéré (Ma et *al.*, 2017). Egalement pour les plantes de radis, l'acide salicylique annule les contraintes de croissance soumises à un déficit hydrique modéré, ce qui entraîne une augmentation de la masse des tiges et des racines de stockage (Henschel et *al.*, 2022).

L'acide salicylique augmente la production de fleurs à une concentration de 120 mg/l ou la pigmentation des feuilles est améliorée plus les paramètres morpho métriques (Bisit. 2018) et aide les plants de poivrons à faire face au stress des nutriments à haute conductivité électrique et réduit les symptômes de carence en calcium dans les fruits dans la culture hydroponique (Sobczak et *al.*, 2023).

Des recherches ont montré que l'acide salicylique peut significativement améliorer la germination en présence de stress salin. Son application exogène peut induire une augmentation significative de la croissance des plantes, tant en conditions salines que non salines, notamment à une concentration de 500  $\mu\text{M/l}$  (Kováčik et *al.*, 2009). Le prétraitement des graines avec de l'acide salicylique à une concentration de 100  $\text{mg L}^{-1}$  a été associé à une amélioration de l'émergence et de la croissance précoce des plantules de concombre, ainsi qu'à

une augmentation de la germination et de la productivité du *Vicia faba* et du sésame (Tableau1).

**Tableau4** : Amorçage des graines avec de l'acide salicylique (SA) et réponse des espèces végétales

Crops	Stresses	Responses of Plants
Rice ( <i>Oryza sativa</i> )	Chromium	Increased chlorophyll content and proper nutrient uptake
	Water deficit	Decreased water stress
	Chilling	Enhanced antioxidant enzyme activities, detoxified ROS
	Salinity	Improved Na <sup>+</sup> /K <sup>+</sup> and maintaining membrane integrity
Safflower ( <i>Carthamus tinctorius</i> )	Drought	Enhanced antioxidant enzyme activities and reduced oxidative damage
Maize ( <i>Zea mays</i> )	Chilling	Increased $\alpha$ -amylase and antioxidant enzyme activities and endogenous SA content
	Chilling	Enhanced enzymatic antioxidant activities, high tissue water content
	Lead	Increased glycine betaine and nitric oxide content and regulation of gene expression
	Chromium and UV-B	Reduced the accumulation of chromium and ROS
Wheat ( <i>Triticum aestivum</i> )	Salinity	Decreased the electrolyte leakage
	Drought	Balanced nutrient uptake
	Osmotic	Resistance to osmotic stress
	Salinity	Higher contents of photosynthetic pigments, soluble sugar, and protein
	Boron toxicity	Increased photosynthetic pigments
	Cadmium	Modulates nutrient relations and photosynthetic attributes
Smooth vetch ( <i>Vicia dasycarpa</i> )	Water deficit	Higher accumulation of proline and glycine betaine
Okra ( <i>Abelmoschus esculentus</i> )	Chilling	Enhanced antioxidant enzyme activities and membrane integrity
Sorghum ( <i>Sorghum bicolor</i> )	Drought	Improved antioxidant defense system
Tomato ( <i>Solanum lycopersicum</i> )	Salinity	Decreased salinity stress
	Heat	Increased lycopene content

(Rhaman,2020)

Des observations ont été rapportées indiquant qu'un prétraitement similaire des graines de riz avec de l'acide salicylique, mais à une concentration de 100 ppm, a entraîné une augmentation de la germination et une croissance accélérée des plantules, favorisée par l'absorption ionique sous stress hydrique. De plus, ce prétraitement des graines de riz avec de l'acide salicylique a démontré une amélioration de la tolérance au froid en augmentant les activités des enzymes antioxydantes et en réduisant les dommages oxydatifs. L'acide

salicylique a également induit la fermeture stomatique et réduit la perte d'eau transpiratoire chez les plantes. Cependant, le rôle spécifique du prétraitement des graines avec de l'acide salicylique dans le mouvement stomatique reste à élucider, tout comme les mécanismes d'intégration avec d'autres phytohormones qui demeurent peu clairs (Ahmad,2019).

#### **I.3.4. Impact de l'acide salicylique sur les plantes exposées au stress.**

Les environnements stressants induisent la génération d'espèces réactives de l'oxygène dans les plantes, créant ainsi un état de stress oxydatif, cette augmentation du niveau des ROS dans les plantes entraîne des dommages oxydatifs aux biomolécules (Smirnoff, 1993; Gille et Singler, 1995). Lorsque l'Acide salicylique est appliqué de manière exogène à des concentrations appropriées, peut améliorer l'efficacité du système antioxydant chez les plantes (Knorzer et *al.*, 1999). Le traitement à l'acide salicylique s'est avéré atténuer le stress oxydatif induit par le paraquat, un herbicide à large spectre, chez le tabac et le concombre (Strobel et Kuc, 1995). De plus, ce traitement a temporairement réduit l'activité de la catalase et augmenté les niveaux de peroxyde d'hydrogène (Janda et *al.*, 2003), ce qui semble jouer un rôle essentiel dans l'induction de la résistance systémique acquise et la tolérance au stress oxydatif chez les plantes (Gechev et *al.*, 2002). L'acide salicylique a été observé pour augmenter les activités des enzymes antioxydantes telles que la catalase, la peroxydase et la superoxyde dismutase lorsqu'il est appliqué de manière exogène sur des plantes soumises à la sécheresse ou à la salinité (Hayat et *al.*, 2008; Yusuf et *al.*, 2008). De plus, l'application exogène d'acide salicylique a été associée à une augmentation des activités de l'ascorbate peroxydase et de la superoxyde dismutase, avec une diminution concomitante de l'activité de la catalase chez les plantes de maïs (Krantev et *al.*, 2008). Cependant, certaines études ont rapporté des résultats contradictoires, montrant une diminution des activités des enzymes antioxydantes chez le riz après un traitement de trempage des graines avec de l'acide salicylique (Choudhury et Panda, 2004).

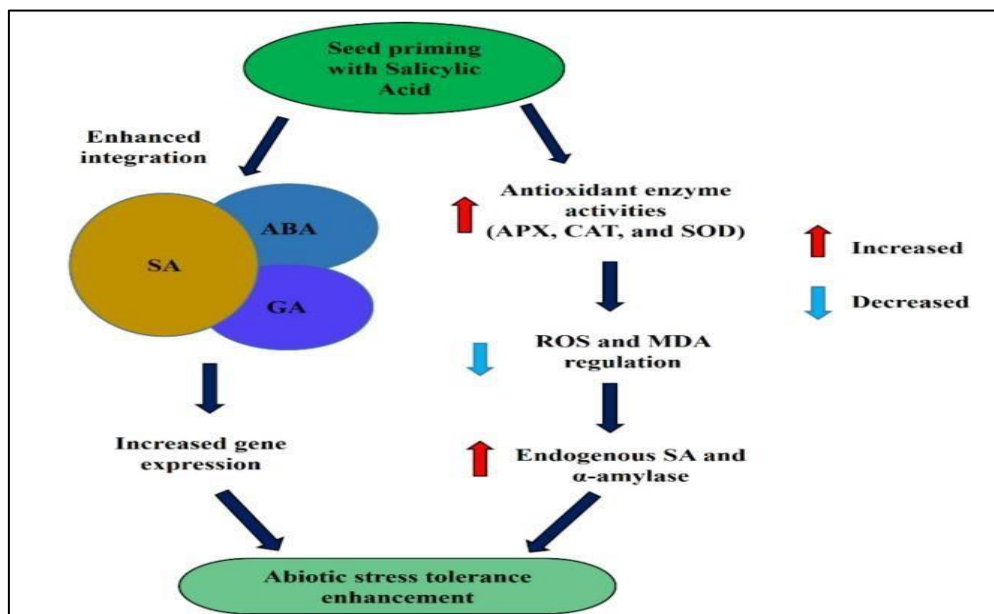
Les recherches sur l'effet de l'acide salicylique dans l'atténuation du stress salin suscitent encore des controverses. Par exemple, des études menées par Li et *al.*, (2014), et Arfan et *al.*, (2007) ont observés que l'application d'acide salicylique par pulvérisation pouvait contrecarrer l'inhibition de croissance induite par un stress salin modéré. Cependant, ces études n'ont pas montré d'amélioration notable à des concentrations élevées de sel. En revanche, les recherches de Cao et *al.*, (2009), ont suggérés que le déficit en acide salicylique pourrait protéger l'*Arabidopsis thaliana* contre un stress salin modéré. Ainsi, il est nécessaire de poursuivre les investigations pour clarifier si l'effet bénéfique de l'acide salicylique dans la mitigation du

stress salin dépend de la concentration en sel et des spécificités des espèces végétales concernées.

### I.3.5. Mécanisme d'action de l'acide salicylique dans la tolérance au stress salin

#### I.3.5.1. Chez les graines

Le prétraitement des graines avec de l'acide salicylique (SA) intervient dans la régulation de plusieurs mécanismes physiologiques qui confèrent une tolérance accrue au stress abiotique. Ces mécanismes incluent l'amélioration des activités enzymatiques antioxydantes telles que la catalase (CAT), la peroxydase ascorbate (APX) et la superoxyde dismutase (SOD), qui agissent en synergie pour neutraliser les espèces réactives de l'oxygène (ROS) produites lors de stress environnementaux. De plus, l'AS régule la peroxydation lipidique et la production de peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ), des processus clés impliqués dans la réponse au stress. Le prétraitement avec AS induit également une augmentation de la production d'osmolytes tels que la proline et la bétaine glycine, qui agissent comme des molécules protectrices contre le stress en régulant l'homéostasie osmotique et en stabilisant les structures cellulaires. En parallèle, cette phytohormone modifie l'homéostasie ionique et favorise l'absorption de nutriments essentiels, ce qui contribue à renforcer la résistance des plantes aux stress métalliques. De plus, le AS régule l'expression des gènes impliqués dans la biosynthèse des gibbérellines (GAs) et dans le catabolisme de l'acide abscissique (ABA), ce qui conduit à une intégration optimale des voies de signalisation hormonale associées à la tolérance au stress (Figure 5).

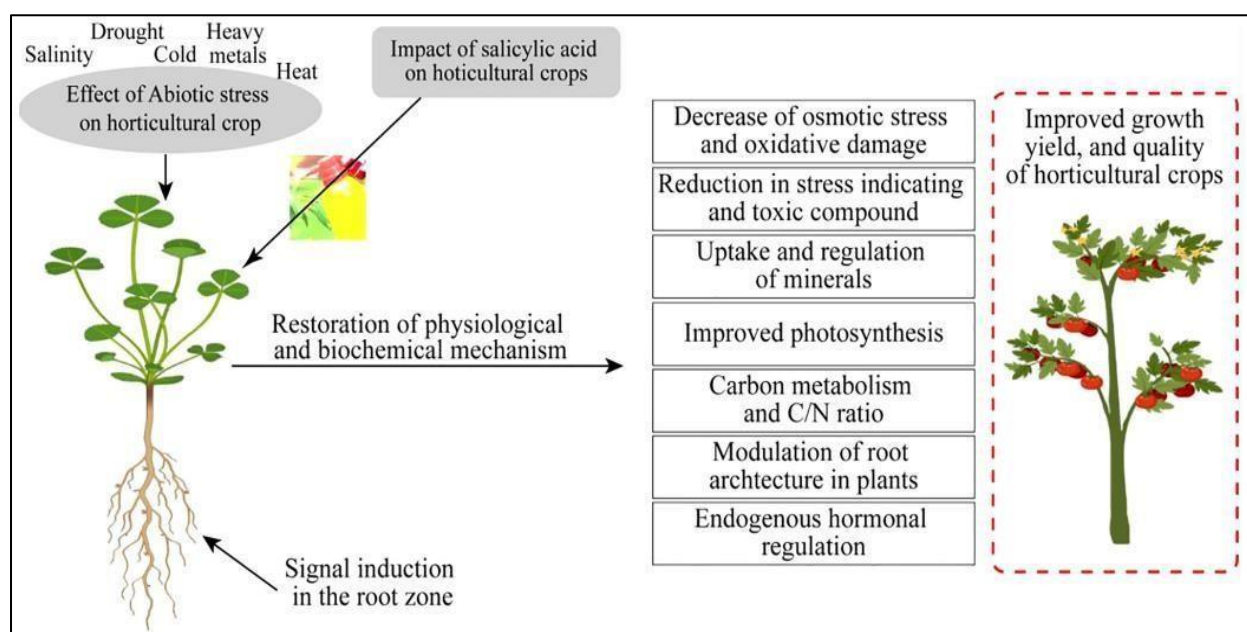


**Figure 5 :** Mécanismes du prétraitement à l'acide salicylique pour l'amélioration de la tolérance au stress abiotique (Rhaman,2020).

En résumé, le prétraitement des graines avec de l'acide salicylique confère une tolérance accrue au stress en orchestrant une série de réponses physiologiques qui protègent les plantules contre les conditions environnementales défavorables (Rhaman, 2020).

### I.3.5.2. Chez les plantes

L'acide salicylique (AS) est un composé bien documenté qui agit comme un régulateur de signalisation, offrant une protection contre les stress abiotiques dans les cultures horticoles (Figure 6). La détection précoce du stress abiotique est essentielle pour atténuer ses effets négatifs et garantir des rendements élevés et des produits de qualité. Étant donné que les cultures horticoles sont une source importante de minéraux et de vitamines essentiels pour la santé humaine, la mise en œuvre de pratiques de gestion appropriées est cruciale pour améliorer le potentiel de rendement de ces cultures. Les pressions croissantes liées au changement climatique et aux pratiques agricoles intensives accroissent la menace du stress abiotique sur la productivité des cultures horticoles (Connor, 2002).



**Figure 6 :** Impact de l'acide salicylique sur les cultures horticoles dans des conditions de stress abiotique (Chen *et al.*, 2023)

Par ailleurs, l'acide salicylique joue un rôle crucial dans la régulation et l'activation des mécanismes de défense des plantes contre le stress biotique, mais il est également reconnu pour son efficacité dans l'amélioration de la tolérance des cultures horticoles au stress abiotique. Cette notion a été discutée en détail dans l'étude de (Horváth *et al.*, 2007). Les applications fondamentales de l'acide salicylique (AS) dans l'amélioration de la résistance au stress abiotique reposent sur la génération et l'accumulation d'osmolytes, un processus médié

par le AS. Cette génération d'osmolytes contribue au maintien de l'homéostasie osmotique, à l'absorption et à la régulation des minéraux et des nutriments, ainsi qu'à l'augmentation de l'élimination des espèces réactives de l'oxygène (ROS), favorisant ainsi la productivité des métabolites secondaires (Wu et *al.*, 2016). La signalisation du AS active la production d'osmolytes nécessaires au maintien de nombreuses voies hormonales. Par conséquent, le AS est considéré comme une molécule de signalisation importante qui agit également comme un protecteur contre l'intolérance aux stress abiotiques chez les cultures horticoles cultivées dans des conditions climatiques extrêmes à l'échelle mondiale. (Ali et al., 2018).

Par ailleurs, le AS joue un rôle prépondérant dans l'expression des gènes liés aux pathogènes (PR), notamment PR<sub>1</sub>, PR<sub>2</sub> et PR<sub>5</sub>. Ces gènes PR, connus pour leur capacité à réduire les attaques pathogènes, sont également impliqués dans la réponse aux stress abiotiques. Des études ont montré que la surexpression du gène PR<sub>1</sub> chez les plantes transgéniques de tabac contribue à la tolérance aux métaux lourds, tandis que chez les poivrons, la surexpression de PR<sub>1</sub> est associée à une amélioration de la tolérance contre les stress de salinité et de sécheresse (Chen et *al.*, 2023). Cependant, malgré ces avancées, il reste nécessaire d'explorer davantage les approches moléculaires pour comprendre en détail les mécanismes d'action du AS dans la tolérance aux stress abiotiques, afin de développer des stratégies plus efficaces d'amélioration de cette tolérance.



### II.1. Objectif de travail

Le but de ce travail de recherche est de montrer d'une part l'impact de la salinité exercée par  $\text{MgSO}_4$  et le  $\text{MgCl}_2$  testé par deux concentrations (50 et 100 mM) sur la germination et la croissance de deux variétés de tomate « Saint-Pierre et Semillas de Alta Selecccion » cultivées en hydroponie dans des conditions semi-contrôlées. D'autre part, une correction de cette contrainte a été examinée par l'incorporation de l'acide salicylique testé par (0.25 et 0.50 mM) dans les solutions salines élaborées et ce dans le but est de déterminer la dose la plus stimulante et qui permis d'obtenir une régulation osmotique parfaite pour une meilleure germination et croissance des deux variétés étudiées. Les solutions sont préparées avec soin. Cette approche expérimentale permettra de contrôler précisément les niveaux de salinité auxquels les semences seront soumises, offrant ainsi une plateforme précise pour l'étude des réponses des plantes à ces conditions variables de salinité.

### II.2. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé durant notre expérimentation est la tomate (*Solanum Lycopersicum* M.) qui est classée parmi les produits légumiers les plus demandés sur le marché agricole algérien. Cette plante présente une sensibilité moyenne vis-à-vis de la salinité. Les deux variétés utilisées durant notre expérimentation sont la variété Saint-pierre et Semillas de Alta Selección dont les semences proviennent de l'institut technique de cultures maraichères et industrielles (ITCMI) de Staouali. La variété Saint-pierre est une variété fixée demi précoce et productive avec des fruits de forme cylindrique à couleur rougeâtres. La variété Semillas de altaselecccion est une variété hybride d'excellente saveur caractérisée par un cycle de vie moyen et de hauteur de 150 à 170 cm avec des fruits rose de très gros calibre.

### III.3. Présentation globale des zones d'étude

Les expérimentations réalisées dans ce travail ont été menées au niveau du laboratoire de recherche de biotechnologie des Productions végétales (LRBPV). Situé au sein du département de Biotechnologie set agroécologie de la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université de Blida 1 dont les coordonnées géographiques sont : 36°30'36.34" N et 2°52'26.05" E). Les expériences réalisées dans des conditions semi contrôlées.



**Figure 7 : Localisation des sites d'expérimentation** (google earth 2024)

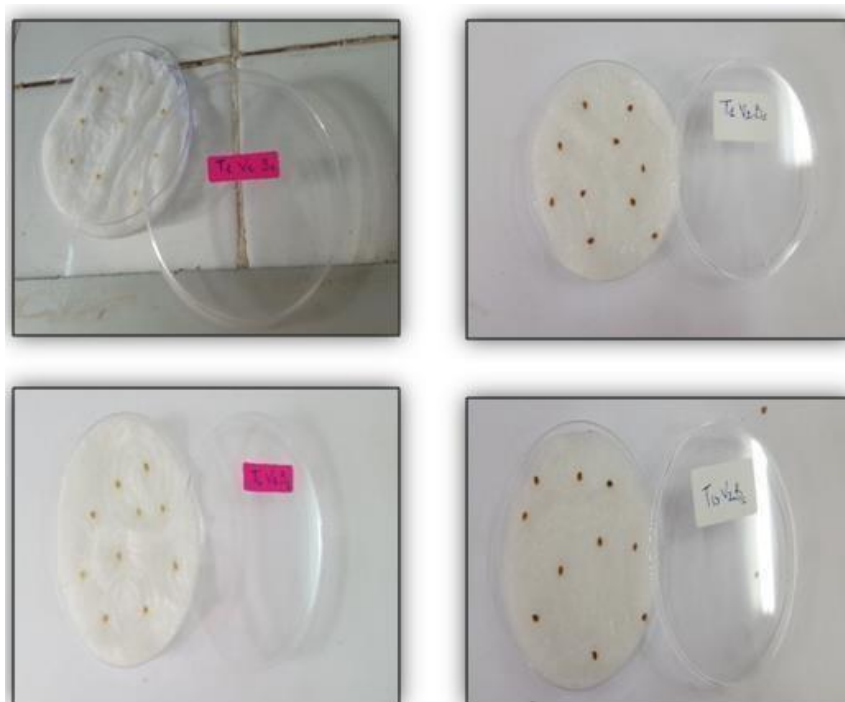
## **II.4. Conduite des essais en conditions contrôlées**

### **II.4.1. Stérilisation des graines**

La stérilisation des graines est une étape cruciale dans la préparation des semences pour la plantation, visant à garantir un environnement de croissance sain. Pour ce faire, un processus en trois étapes est suivi. Tout d'abord, les graines des deux variétés sont immergées dans de l'eau distillée pendant deux minutes, permettant de déloger les particules indésirables de leur surface. Ensuite, elles sont plongées dans une solution d'hypochlorite de sodium ( $\text{NaClO}$ ), communément connue sous le nom d'eau de Javel à 10%, pour une période de cinq minutes. Cette étape agit comme un agent désinfectant puissant, éliminant les micro-organismes potentiellement nuisibles. Enfin, les graines sont soigneusement rincées à l'eau distillée pour éliminer tout résidu de solution désinfectante. Ce processus rigoureux de stérilisation des graines garantit un départ propre et exempt de contaminants pour les cultures à venir, favorisant ainsi des rendements sains et robustes (Murashing et Skoog, 1962).

### **II.4.2. Protocole de germination**

L'expérimentation de germination a été menée en utilisant des boîtes de Pétri de 10 cm de diamètre, chacune contenant 10 graines. À l'intérieur de ces boîtes, nous avons placé du papier filtre imprégné de différentes solutions. Cette expérience a été conduite dans une étuve maintenue à une température constante de  $25^{\circ}\text{C}$ , et elle a débuté le 3 janvier 2021, s'étalant sur une période d'une semaine. Pour maintenir l'humidité nécessaire à la germination, des traitements supplémentaires ont été appliqués au papier filtre dès que nous avons observé un dessèchement. Cette approche visait à garantir des conditions de croissance optimales pour les graines tout au long de l'expérience. L'objectif de cette étude était d'évaluer l'impact des différentes solutions sur le processus de germination des graines, en utilisant des conditions contrôlées et une étude sur une semaine pour obtenir des résultats significatifs.



**Figure 8 : Dispositif expérimental des essais en conditions contrôlées**

## II.5. Conduite des essais en conditions semi-contrôlées (Croissance)

Cette étude vise à investiguer l'impact de la salinité, de l'acide salicylique, ainsi que de leur combinaison sur la croissance des plants de tomate, à partir du stade de la plantule, dans des conditions semi-contrôlées. Le semis des grains de deux variétés a été réalisé dans des boîtes de Pétri contenant du papier filtre saturé en eau, placées dans une étuve réglée à une température de 25°C pendant une durée d'une semaine. En cas de dessèchement du papier filtre, de l'eau distillée a été ajoutée pour maintenir un environnement adéquatement hydraté.



**Figure 9 : Essais de germination des graines de deux variétés de tomate étudiée**

La deuxième phase de l'expérimentation s'est déroulée dans une serre en polycarbonate, offrant des conditions semi-contrôlées. Une fois que les graines avaient germé, les jeunes

plantules ont été repiqués dans des pots carrés remplis de sable. Durant cette phase, les jeunes plantules ont été irriguées avec de l'eau tiède courante afin de favoriser leur adaptation et leur reprise. Le repiquage en place définitive a été réalisé le 24/01/2021



**Figure 10 : repiquage en place définitive**

Le 7 /02/2021, soit 14 jours après le repiquage pour la variété Saint-Pierre, et le 25/02/2021, soit 26 jours après le repiquage pour la variété Semillas de Alta Selección, des traitements différents ont été appliqués aux plants, à un stade où leur homogénéité était observée.



**Figure 11 : Irrigations avec les différents traitements**

### **II.6. Substrat et conteneurs**

#### **II.6.1. Substrat**

Dans notre expérimentation, nous avons utilisé du gravier roulé d'oued d'un diamètre de 3 à 8mm. Il provient de la carrière de Chebli, qui se trouve à 25 kilomètres d'Alger. Pour éliminer tout risque de contamination, une désinfection de ce substrat a été effectuée comme suit :



- 1/ Lavage à l'eau pour éliminer les débris terreux et végétaux ;
- 2/ Remplissez les pots de gravier lavé ;
- 3/ Désinfection du gravier en l'exposant à une solution d'hypochlorite de sodium diluée, initialement à une concentration de 12° ;
- 4/ Rinçage soigneux de tous les pots à l'eau courante, afin d'éliminer tout résidu de l'eau de javel, qui pourrait être nocif pour les jeunes plantes. Cette procédure de désinfection vise à assurer un environnement de culture exempt de contaminants potentiels pour le développement sain des plantes.



**Figure 12 : lavage du substrat à l'eau**

### II.6.2. Conteneurs





























































Nous avons employé des conteneurs en plastique de couleur marron d'une capacité de 5 litres. Ces conteneurs possèdent un orifice de drainage situés à leurs bases, ce qui permet l'élimination efficace de tout traitement en excès. Ces orifices de drainage jouent un rôle essentiel en évitant l'accumulation de liquide au fond des pots, garantissant ainsi un équilibre optimal de l'humidité dans le substrat de culture et contribuant ainsi au bien-être des plants de tomate tout au long de l'expérience.



**Figure 13 : Aspet générale des conteneurs utilisés pendant notre expérience**

## II.7. Dispositif expérimental

Durant notre expérimentation, le dispositif expérimental adopté est un plan complètement randomisé sans contrôle d'hétérogénéité avec un seul facteur étudié qui est la composition de la solution d'irrigation. Dans ce plan, la répartition des 15 traitements élaborés ont été effectués d'une manière aléatoire dans les différentes unités expérimentales en utilisant la table de permutations pour un nombre de 01 à 20. Chaque traitement testé est répété 4 fois dans ce dispositif, ce que nous donne 60 unités expérimentales testées au total pour la variété Saint-Pierre et le même nombre pour la variété Semillas de Alta Selección.

SS2+ AS2	SS3+ AS1	Témoin	Mgcl2 (100M m)	MgSo4 (100m M)	SS4+ AS2	SS3+ AS2	SS2+ AS1	SS1+ AS1	AS1	Mgcl2 (50Mm )	MgSo4 (50mM )	AS2	SS4+ AS1	SS1+ AS2
														
														
														
														

## II.8. Description des différents traitements

**Témoin** : Eau distillée (témoin)

**AS1** : Eau distillée + Acide salicylique (0.25 mM)

**AS2** : Eau distillée + acide salicylique (0.50 mM)

**SS1** : Eau distillée +  $MgCl_2$  (50 mM) soit 10,16g/l

**SS2** : Eau distillée +  $MgCl_2$  (100 mM) soit 20,33 g/l

**SS3** : Eau distillée +  $MgSO_4$  (50 mM) soit 6,01g/l

**SS4** : Eau distillée +  $MgSO_4$  (100 mM) soit 12,03 g/l

**SS1+AS1** : Eau distillée +  $MgCl_2$  (50 mM) + Acide salicylique (0.25 mM)

**SS1+AS2** : Eau distillée +  $MgCl_2$  (50 mM) + Acide salicylique (0.50 mM)

**SS2+AS1** : Eau distillée +  $MgCl_2$  (100 mM) + Acide salicylique (0.25 mM)

**SS2+AS2** : Eau distillée +  $MgCl_2$  (100 mM) + Acide salicylique (0.50 mM)

**SS3+AS1** : Eau distillée +  $MgSO_4$  (50 mM) + Acide salicylique (0.25 mM)

**SS3+AS2** : Eau distillée +  $MgSO_4$  (50 mM) + Acide salicylique (0.50 mM)

**SS4+AS1** : Eau distillée +  $MgSO_4$  (100 mM) + Acide salicylique (0.25 mM)

**SS4+AS1** : Eau distillée +  $MgSO_4$  (100 mM) + Acide salicylique (0.50 mM)

## II.9. Entretien de la culture

### II.9.1. Irrigation

Le choix du système d'irrigation adopté repose sur la méthode de percolation à circuit ouvert, qui permet d'assurer une évacuation efficace de l'eau en excès. Cette approche est particulièrement adaptée à la culture hors sol, où les plantes poussent dans des substrats inertes plutôt que dans le sol naturel. Dans ce contexte, il est essentiel de comprendre les besoins en eau quotidiens des cultures. Cette connaissance est cruciale pour une gestion rationnelle de l'irrigation, car elle permet d'ajuster les apports en eau en fonction des différentes étapes de cycle de vie des plantes, évitant ainsi les carences en eau d'un côté et les éventuels excès d'humidité de l'autre. La quantité d'eau nécessaire ainsi que la fréquence des arrosages varient considérablement tout au long du cycle de développement de la plante. Les besoins en eau augmentent généralement au fur et à mesure que la plante grandit et se développe. De plus, les conditions microclimatiques, notamment la température, jouent un rôle crucial dans la détermination de ces besoins en eau. Les périodes chaudes et ensoleillées augmentent la transpiration des plantes, ce qui nécessite une augmentation des apports en eau pour les maintenir en bonne santé et favoriser leur croissance.

En résumé, la gestion de l'irrigation en culture hors sol nécessite une compréhension approfondie des besoins en eau des plantes tout au long de leur cycle de développement, ainsi qu'une adaptation aux conditions environnementales locales. Cela permet de garantir des conditions optimales de croissance, d'éviter les problèmes liés à un excès ou à une carence en eau, et de maximiser la productivité et la qualité des cultures.

**Tableau 5 :** Doses et fréquences d'irrigation nécessaires pour la culture de la tomate.

Date	Stade végétatif	Dose des irrigations	Fréquence des irrigations
03/01/2021 au 24/01/2021	Germination au stade quatre feuilles	20ml	1 fois/jour
24/01/2021 la coupe 10/04/2021	Stade quatre feuilles début floraison	60ml	2 fois/jour

### II.9.2. Aération

Lorsque la température dépasse les 30°C, nous prenons des mesures pour atténuer les effets nocifs de la chaleur sur notre culture. Chaque matin, nous procédons à une ventilation

précoce afin de renouveler l'air à l'intérieur de la serre, ce qui contribue à abaisser les températures et à réduire le taux d'humidité ambiant.

### **II.9.3. Lessivage**

Nous avons procédé à un arrosage hebdomadaire en utilisant de l'eau du robinet afin d'éliminer les sels non assimilés par les plantes, évitant ainsi leur accumulation au fond des pots, ce qui pourrait entraîner des erreurs de concentration initiale.

## **II.10. Paramètres mesurés en conditions contrôlées**

### **II.10.1. Paramètres morphologiques pendant la phase de germination**

#### **II.10.1.1. Pourcentage de germination (TG%)**

Selon OSBORNE et NERCER, (2014), ce paramètre représente le pourcentage de germination final /nombre de jours à la germination finale. Le pourcentage de germination totale (PG) a été calculé selon la formule suivante :

$$PG\% = \frac{\text{Nombre de graines germées}}{\text{Nombre de graines semées}} \times 100$$

#### **II.10.1.2. Longueur des radicules et hypocotyles (cm)**

La longueur des hypocotyles (parties aériennes et des radicules (partie racinaire) exprimé en (cm), ont été estimés par analyse d'image réalisé par le logiciel Digimizer (image analysis software Digimizer ver. 3.0. MedCalc Software bv, Ostend, Belgium).

#### **II.10.1.3. Biomasse fraîche (g)**

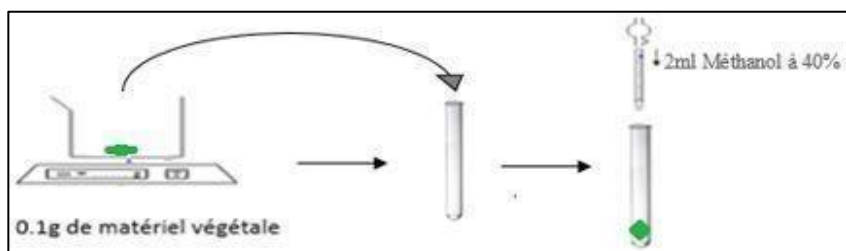
La Biomasse fraîche des parties aérienne et racinaire exprimé en (g), ont été mesurés par une balance de précisions.

## **II.10.2. Paramètres physiologiques mesurés**

### **II.10.2.1. Dosage de la proline dans les feuilles (µg/g MF) :**

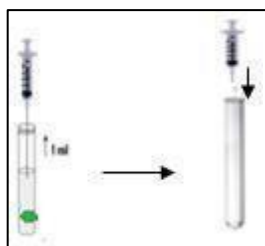
La proline est dosée selon la technique utilisée par TROLL et LINDESLY (1955) simplifiée et mise au point par GORING (1974) et modifiée par MONNEVEUX et NEMMAR (1986). Le principe est la quantification de la réaction proline-ninhydrine par mesure spectrophotométrie. La proline se couple avec la ninhydrine en formant un complexe coloré. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité de proline dans l'échantillon. La méthode consiste à mettre 100 mg de matière fraîche végétale dans des tubes essai puis ajouter 2 ml de Méthanol à 40 %.



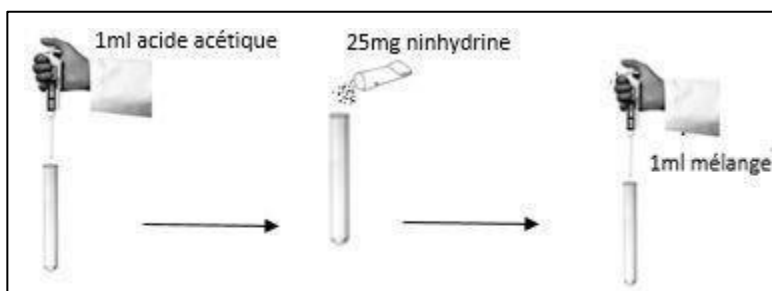


Les tubes couverts (pour éviter la volatilisation de l'alcool) sont portés à l'ébullition au bain-marie 85 °C pendant 60 min. (voir figure 32).

- ✓ Prélever 1 ml de la solution de chaque tube ;
- ✓ Mettre dans de nouveaux tubes ;



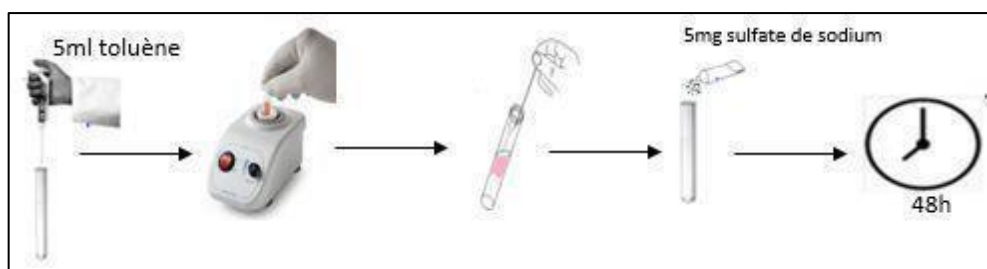
- ✓ Ajouter 1 ml d'acide acétique + 25 mg de ninhydrine + 1 ml d'un mélange contenant : 120 ml d'eau distillée, 300 ml d'acide acétique, 80 ml d'acide ortho phosphorique ;



- ✓ Porter les tubes à essai à ébullition au bain Marie durant 30 min.

Après refroidissement des solutions :

- ✓ Ajouter 5 ml de toluène dans chaque tube
- ✓ Après agitation au vortex deux phases apparaissent
- ✓ Prélever la phase supérieure
- ✓ Ajouter 5 mg du sulfate de sodium
- ✓ Laisser au repos pendant 48h.

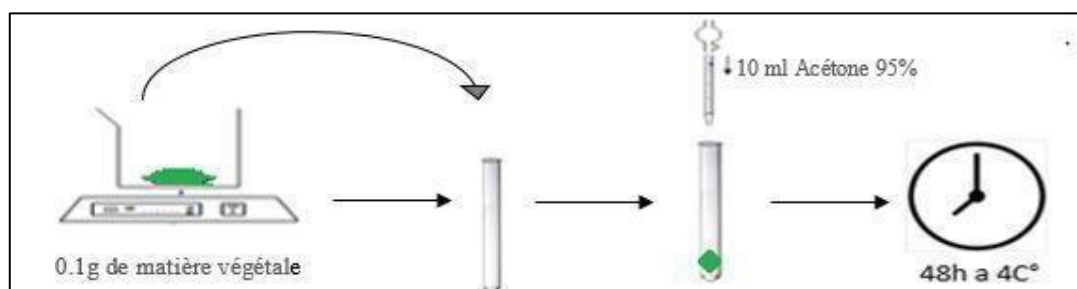


On procède à la lecture de la densité optique des échantillons avec le spectrophotomètre la longueur d'onde de 528 nm. La détermination de la teneur de la proline est réalisée selon la formule : **Proline ( $\mu\text{g/g MF}$ )** =  $\text{DO (528)} \times 0,62$

#### II.10.2.2. Dosage de la chlorophylle ( $\mu\text{g/g MF}$ )

Ce protocole permet de quantifier la concentration de chlorophylle dans les échantillons de feuilles, ce qui est essentiel pour évaluer la santé des plantes et leur activité photosynthétique. Les valeurs obtenues peuvent être utilisées dans des études comparatives ou pour suivre les variations de la chlorophylle au fil du temps.

Les teneurs en chlorophylle (a), (b) et caroténoïdes sont déterminées selon la méthode utilisée par LICHTENTHALER (1986) citée par HASSANI, (2014). Un échantillon de 100 mg de la partie médiane de feuille est mis en tube à essai en présence de 10 ml d'acétone à 95 % à 4°C dans l'obscurité pendant 48 heures.



**Figure 14 :** Schéma de dosage de la teneur des feuilles en chlorophylle.

La lecture de la densité optique (DO en nm) est faite à l'aide d'un spectrophotomètre UV à des longueurs d'onde respectives de 470, 645 et 663 nm qui correspondent aux pics d'absorption de la chlorophylle "a", "b" et des pigments caroténoïdes. Ensuite le calcul des quantités de chlorophylle "a", "b" (expérimenté en mg/ml) se fait à l'aide des formules suivantes :

- $\text{Chl a } (\mu\text{g/g MF}) = 12,25 (A_{663}) - 2,79 (A_{645})$
- $\text{Chl b } (\mu\text{g/g MF}) = 21,50 (A_{645}) - 5,10 (A_{663})$
- $\text{Chla+b } (\mu\text{g/g MF}) = 7,15 (A_{663}) + 18,71 (A_{645})$

#### II.10.2.3. Teneur en eau relative (TRE %)

La teneur en eau relative des feuilles est un indicateur important de la turgescence des tissus végétaux et constitue un élément clé pour évaluer le niveau de stress chez une plante. Elle est étroitement liée à la capacité de la plante à maintenir un niveau d'hydratation optimal, nécessaire pour assurer la continuité des processus métaboliques. Selon SCIPPA et *al.*, (2004), cette méthode consiste à couper une partie de la feuille à la base du limbe, puis à la peser immédiatement, ce qui donne le poids frais (PF). Ensuite, cette partie coupée est placée

dans de l'eau distillée, à l'abri de la lumière, à une température de 4°C pendant 48 heures. Après cette période, la partie de la feuille est récupérée, délicatement essuyée à l'aide d'un papier pour éliminer l'eau de surface, puis pesée à nouveau pour obtenir le poids en turgescence (PT). Enfin, la même partie de la feuille est séchée dans une étuve réglée à 80°C pendant 48 heures pour obtenir son poids sec (PS). Ce processus permet d'évaluer de manière précise la quantité d'eau présente dans les tissus de la feuille, ce qui donne des informations essentielles sur la santé et la capacité de la plante à maintenir son activité métabolique optimale. la teneur relative en eau est calculé selon la formule suivante :

$$\text{TRE}(\%) = \frac{(PE-PS)}{(PT-PS)} * 100$$

## **II.11. En conditions semi-contrôlées (expérience réalisée sous serre)**

### **II.11.1. Hauteur des plantes (cm)**

Afin d'évaluer le taux de croissance des plantes, nous avons régulièrement mesuré leur hauteur, en commençant depuis la base des plants et en allant jusqu'à l'apex, en utilisant une règle graduée. Les hauteurs définitives ont été enregistrées lors de la période de récolte à l'aide d'un mètre ruban.

### **II.11.2. Nombre de feuilles**

Lors des opérations de coupe, nous avons effectué un décompte du nombre de feuilles pour chaque plante dans chaque groupe de traitement.

### **II.11.3. Nombre de fleurs**

Lors des opérations de coupe, nous avons compté le nombre de fleurs de chaque plante dans chaque groupe de traitement.

### **II.11.4. La surface foliaire (cm<sup>2</sup>)**

Elle a été déterminée à l'aide du logiciel d'analyse d'images Digimizer ver. 3.0. (MedCalc Software bv, Ostend, Belgique)

### **II.11.5. Biomasse fraîche produite (g)**

Lors des procédures de coupe, nous avons utilisé une balance pour peser individuellement les deux parties de chaque plante, à savoir la partie aérienne et la partie souterraine, afin d'obtenir le poids frais de chaque plante pour les deux composantes.

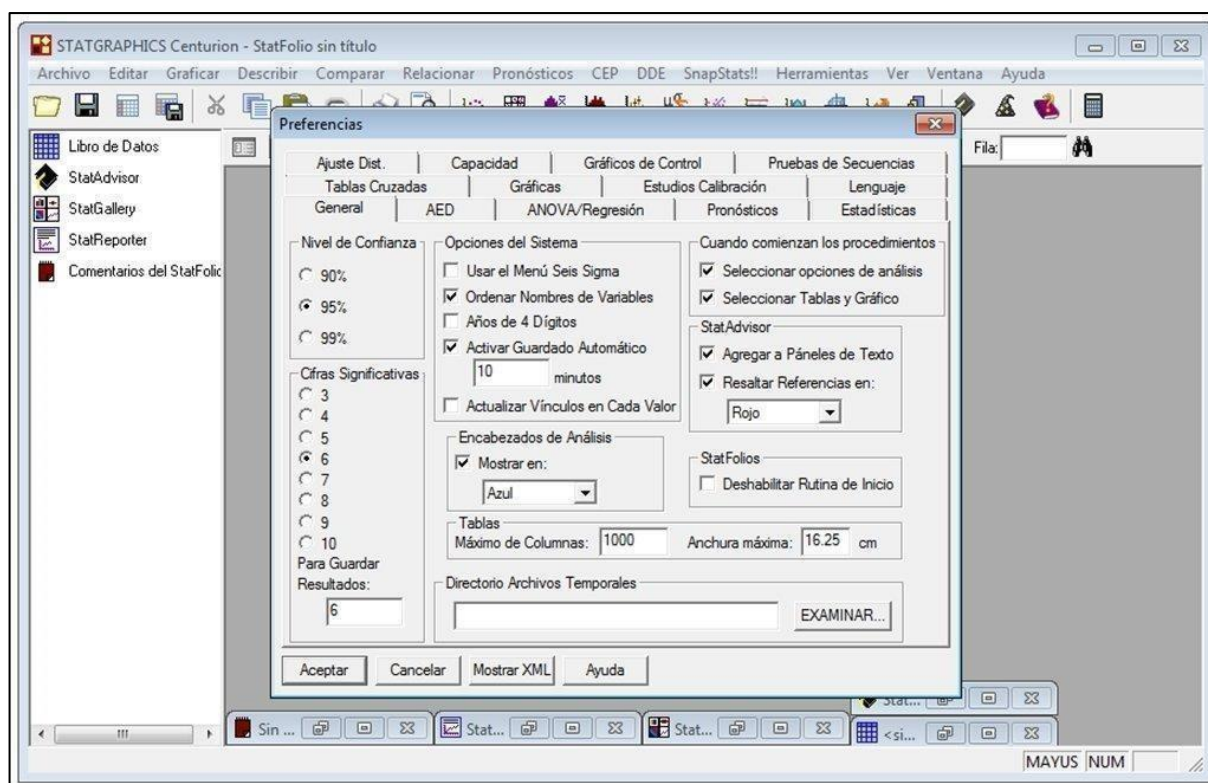
### **II.11.6. Biomasse sèche produite (g)**

Après avoir soumis la matière fraîche à un processus de séchage dans une étuve à 70°C jusqu'à stabilisation du poids sec, nous avons ensuite utilisé une balance pour peser

individuellement la partie aérienne et la partie souterraine de chaque plante, dans le but d'obtenir le poids sec de ces deux composantes pour chaque plante.

## II.12. Analyse statistique

Tous les essais ont été répétés quatre (04) fois, concernant les mesures des paramètres morpho-physiologiques en relation au stress saline appliquée par  $\text{MgSO}_4$  ou le  $\text{MgCl}_2$  associée ou non à l'acide salicylique. Les résultats, présentés sous forme d'histogrammes, rejoignent le plus souvent des valeurs moyennes encadrées par leurs écart-types. Les moyennes sont comparées selon la méthode de Newman et Keuls qui est basée sur la plus petite valeur significative (PPDS) réalisée par le logiciel STATGRAPHICS CENTURION version 13.31. Les résultats sont déclarés très hautement significatives lorsque la probabilité est inférieure à 0.0001 à un risque d'erreur  $\alpha = 0.05$ .



## PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSION

## Chapitre 1 : Résultats

## III.1.1. Impact sur les paramètres de germination

## III.1.1.1. Impact sur le pourcentage de germination (PG%)

Le tableau 6 représente une expérience sur des plants de deux variétés de tomate Saint-Pierre et Semillas de altaseleccion soumis à un stress salin en présence du  $\text{MgSO}_4$  et du  $\text{MgCl}_2$  à différentes concentrations, dans le but d'évaluer l'effet de l'acide salicylique (AS1 à 0,25 mM et AS2 à 0,5mM) comme inhibiteur de stress. Les résultats du tableau illustrent l'effet des deux sels,  $\text{MgCl}_2$  et  $\text{MgSO}_4$ , additionnés à l'acide salicylique, sur le pourcentage de germination des graines de tomate (*Solanum lycopersicum*) sous des conditions contrôlées.

**Tableau 6 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur le taux de germination des graines de tomate Saint-Pierre et Semillas de altaseleccion en milieu salin enrichi en  $\text{MgSO}_4$  et  $\text{MgCl}_2$ .

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
<b>Saint- Pierre</b>	77 ± 5,09 bc	87 ± 4,71 a	83 ± 1,92 ab	23 ± 5,09 e	0 ± 0,00 f	37 ± 5,09 d	10 ± 0,00 f	70 ± 5,77 c	47 ± 4,71 d	43 ± 5,09 d	43 ± 4,71 d	73 ± 3,85 bc	63 ± 4,71 c	43 ± 4,71 d	43 ± 4,71 d
<b>Semillas de alta seleccion</b>	100 ± 0 a	100 ± 0 a	100 ± 0 a	43,33 ± 4,71 c	36,67 ± 4,71 d	73,33 ± 4,71 b	40 ± 0 cd	100 ± 0 a	73,33 ± 4,71 b	73,33 ± 4,71 b	73,33 ± 4,71 b	100 ± 0 a	100 ± 0 a	93,33 ± 4,71 a	86,67 ± 4,71 a

Selon les résultats présentes dans le tableau 16, nous pouvons constater que les deux concentrations d'acide salicylique exercent un effet stimuleur significativement remarquable sur la germination des graines des deux variétés testées. Cependant, nous peuvent dire que quel que soit la concentration d'acide salicylique utilisée, un accroissement de la germination des graines de tomate est observé. Néanmoins sous des conditions témoins les graines des deux variétés de tomate Saint pierre et semillas de alta seleccion montrent des taux de germination de 77% et 100% respectivement. L'ajout d'acide salicylique à une concentration de 0,25 mM (AS1) améliore considérablement la germination, atteignant 87% et 100% pour saint pierre et semillas de alta seleccion. à 0,50 mM (AS2), la germination est légèrement inférieure à 80% pour Saint pierre est 100% pour semillas de alta seleccion, ce qui suggère que la concentration de 0,25 mM a un effet plus marqué sur la variétés Saint pierre. Néanmoins, sous conditions de stress salin, les résultats observés varient de manière marquée pour les deux variétés testées. En effet, l'application de 100 mM de  $\text{MgCl}_2$  a inhibé complètement la germination des graines de Saint Pierre est diminuer à 36.66% pour la variétés Semillas de alta seleccion, ce qui reflète la forte toxicité de ce sel. En revanche, lorsque la concentration de  $\text{MgSO}_4$  a atteint 100 mM,

l'inhibition de la germination était moins sévère, mais néanmoins notable, avec une réduction de 90% et 40% pour Saint pierre et Semillas de alta seleccion respectivement par rapport au témoin. Cependant l'adjonction d'acide salicylique a montré des effets bénéfiques. En présence de 50 mM de  $MgSO_4$  (SS3+AS1), l'application de 0,25 mM d'acide salicylique (AS1) a permis une amélioration notable de la germination des graines de tomate des deux variété , avec un taux de germination augmentant de 61% et de 48.05% respectivement par rapport au condition de stress seul pour la variétés Saint pierre est de 53.37% et 30% respectivement pour la variété Semillas de alta seleccion. Cela suggère que l'acide salicylique offre une protection efficace contre l'inhibition de la germination induite par le stress salin. Cependant, lorsque la concentration d'acide salicylique a été doublée à 0,50 mM (AS2) et appliquée avec des concentrations de sels (50mM de  $MgCl_2$  ou  $MgSO_4$ ), les résultats étaient moins favorables. Cela montre que bien que l'acide salicylique ait un effet protecteur, son efficacité peut diminuer lorsque deviennent trop élevées, notamment en présence de  $MgCl_2$ .

### **III.1.1.2. Hauteur des graines de tomate (cm)**

#### **III.1.1.2.1. Hauteur des hypocotyles (cm)**

Le tableau 7 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentration (AS1 : 0,25 mM et AS2 : 0,5mM) sur la hauteur des hypocotyles (en cm) des graines de tomates Saint pierre et Semillas de altaseleccion, en présence de sels tel que  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ . Les résultats relatifs aux effets des deux concentrations d'acide salicylique additionnées aux deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 7.

**Tableau 7 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la hauteur des hypocotyles des graines de tomate Saint pierre et Semillas de altaseleccion en milieu salin enrichi en  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ .

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
<b>Saint- Pierre</b>	7,68	9,54	9,84	2,41	0,00	4,28	2,41	5,95	4,30	4,29	3,56	7,51	7,40	6,44	6,06
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	1,16 b	1,09 a	1,58 a	0,14 g	0,00 h	0,85 f	0,24 g	0,62 d	0,41 e	0,16 ef	0,64 f	0,64 b	0,77 b	1,31 c	0,31 d
<b>Semillas de alta seleccion</b>	8,92	11,10	10,69	2,88	2,17	3,48	2,71	6,67	5,82	4,70	4,22	7,77	6,99	6,31	5,37
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,47 c	0,31 a	0,51 b	0,36 m	0,42 n	0,93 i	0,36 m	0,61 f	0,14 h	0,56 j	0,48 k	0,71 d	0,48 e	0,14 g	0,43 i

Selon les résultats présentes, nous pouvons constater que les deux concentrations d'acide salicylique exercent un effet significatif sur les deux types de sels étudiés. De ce constat, on peut dire que quel que soit la concentration d'acide salicylique utilisée, un accroissement de l'hypocotyles des graines de tomate est observé. Toutefois, l'application exogène de l'acide salicylique induit une augmentation significative de la hauteur des hypocotyles quelle que soit

la variété étudiée, pour 0.25mM (AS1) les hypocotyles atteignant 24.22% pour Saint-Pierre et de 24.57% pour Semillats de Alta Selección par rapport au témoin, ce qui suggère un effet stimulant de l'acide salicylique sur la croissance du paramètre étudié. À l'inverse, l'exposition au stress salin entraîne une réduction marquée de la croissance selon le type de sel et la variété, avec une diminution plus marquée induit par  $MgCl_2$  que  $MgSO_4$  et la variété Saint-Pierre semble plus affectée que Semillats de Alta Selección. Cette inhibition devient encore plus sévère sous 100 mM de  $MgCl_2$ , où la croissance est totalement nulle pour la variétés Saint pierre et atteignant 75.64% pour la variété Semillas de altaseleccion, témoignant d'un effet fortement délétère de cette concentration sur le développement des hypocotyles. Néanmoins, l'application d'acide salicylique permet une atténuation partielle des effets inhibiteurs du stress salin. En particulier,  $MgSO_4$  (SS3+AS1) et (SS4+AS1) semble améliorer significativement la croissance des hypocotyles avec une évolution de 47.97% et 46.41% respectivement chez la variété Semillas de Alta Selección et de 42.22% et 54.77% chez la variété comparativement aux conditions de stress, la dose de 0,25 mM d'AS induit l'effet le plus marqué. Cependant l'ajout de 0,50 mM d'acide salicylique en combinaison avec  $MgCl_2$  a entraîné une réduction significative de la hauteur des hypocotyles des graines des deux variétés.

### III.1.1.2.2. Hauteur des racicules (cm)

Le tableau 8 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentration (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,5mM) sur la hauteur des racicules (en cm) des graines de tomates Saint pierre et Semillas de altaseleccion, en présence de sels tel que  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ . Les résultats relatifs aux effets des deux concentrations d'acide salicylique sur les deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 8.

**Tableau 8 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la hauteur des racicules des graines de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ .

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
Saint- Pierre	1,64	3,11	1,66	0,29	0,00	0,31	0,00	0,38	0,37	0,34	0,32	0,73	0,72	0,66	0,33
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,13 b	0,21 a	0,18 b	0,05 e	0,00 f	0,05 de	0,00 f	0,04 d	0,12 D	0,08 de	0,32 de	0,73 c	0,10 c	0,12 c	0,03 de
Semillas de alta seleccion	2,00	2,38	2,29	0,30	0,19	0,38	0,22	1,48	0,42	0,51	0,37	1,71	1,43	0,31	0,29
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,30 b	0,20 a	0,33 a	0,04 fg	0,09 g	0,04 f	0,04 g	0,15 d	0,04 Ef	0,05 e	0,05 f	0,25 c	0,48 d	0,04 fg	0,05 fg

Les résultats obtenus montrent que les deux concentrations d'acide salicylique ont un impact notable significativement remarquable sur les deux types de sels étudiés. De ce constat, nous pouvons conclure que, quelle que soit la dose d'acide salicylique appliquée, une

augmentation de la hauteur des racines des graines de tomate des deux variétés est observée par rapport au témoin. En effet, en l'absence de stress, l'application de 0,25 mM d'AS (AS1) permet une augmentation notable de la hauteur des racines, atteignant une augmentation de 89,63% chez la variété Saint-Pierre et de 19% chez la variété Semillas de Alta Selección par rapport au témoin. Cependant, il est à noter que la concentration plus élevée de 0,50 mM d'AS a entraîné une légère amélioration de 1,22 % seulement chez Saint Pierre et de 14% chez Semillas de Alta Selección, montrant ainsi une stimulation comparable entre les deux concentrations. Ce qui suggère que cette concentration n'a pas un effet aussi prononcé que la concentration plus faible (AS1). En ce qui concerne l'effet du stress salin, l'application de 50mM de  $MgCl_2$  induit une réduction significative de la hauteur des racines soit une diminution de 82,31 % et de 85% chez les variétés Saint Pierre et Semillas de Alta Selección respectivement par rapport au témoin. Cette réduction est encore plus marquée avec 100 mM de  $MgCl_2$ , où la croissance des racines est complètement inhibée de 100 % chez la variété Saint-Pierre et de 90.5%. Confirmant l'impact délétère du  $MgCl_2$  à forte dose. En comparaison, le  $MgSO_4$  semble légèrement moins agressif : à 50 mM, la hauteur chute de 81% chez Saint Pierre et de 81.5% chez Semillas de Alta Selección, tandis qu'à 100 mM, elle est de 100% et de 89% pour Saint Pierre et Semillas de Alta Selección respectivement.

Néanmoins, l'application d'acide salicylique permet une atténuation partielle de ces effets inhibiteurs. Il est à souligner que les corrections les plus marquées sont observées avec 50 mM et 100 mM de  $MgSO_4$  en présence de 0,25 mM d'AS (SS3+AS1) (SS4+AS1) et chez la variété Saint Pierre, soit une amélioration de 25.61% et de 40.24%, pour la variété Semillas de Alta Selección la correction la plus marquée est de (SS3+AS1) avec une augmentation de 66.65% rapport à la condition stressée sans AS. En revanche, l'effet correcteur le plus faible est enregistré avec 50 mM de  $MgCl_2$  combiné à 0,50 mM d'AS (SS1+AS2) qui représente une amélioration modeste de 4.88% par rapport au stress seul pour la variété Saint Pierre et de 5.5% pour la variété Semillas de Alta Selección. Ces résultats soulignent que l'ajout de 0,25 mM d'acide salicylique semble être plus efficace que 0,50mM pour atténuer les effets du stress salin, particulièrement lorsque le stress est induit par  $MgCl_2$ .

### **III.1.1.3. Biomasse fraîche des graines de tomate (g)**

#### **III.1.1.3.1. Biomasse fraîche des hypocotyles (g)**

Le tableau 9 illustre l'effet combiné du stress salin et de l'acide salicylique, à deux concentrations (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,5mM), sur la biomasse fraîche des hypocotyles (en cm) des graines de tomate Saint Pierre et Semillas de Alta Selección, en présence des sels  $MgSO_4$



et  $MgCl_2$ . Les données concernant l'influence des deux concentrations d'acide salicylique sur les hypocotyles exposés à ces sels sont présentées dans la figure 9.

**Tableau 9 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la biomasse fraîche des hypocotyles des graines de tomate Saint pierre et Semillas de altaseleccion en milieu salin enrichi en  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ .

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl <sub>2</sub> 50mM	MgCl <sub>2</sub> 100mM	MgSo <sub>4</sub> 50mM	MgSO <sub>4</sub> 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
<b>Saint- Pierre</b>	0,032	0,040	0,039	0,011	0,000	0,017	0,000	0,022	0,019	0,018	0,018	0,030	0,028	0,027	0,024
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,005 b	0,005 a	0,005 a	0,004 f	0,000 g	0,003 f	0,000 F	0,005 f	0,005 cd	0,004 g	0,005 de	0,007 f	0,005 cd	0,006 bc	0,004 e
<b>Semillas de alta seleccion</b>	0,050	0,070	0,053	0,019	0,013	0,021	0,019	0,037	0,033	0,031	0,027	0,046	0,045	0,038	0,032
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,006 bc	0,089 a	0,005 ab	0,001 fgh	0,005 h	0,002 fgh	0,003 gh	0,004 bcdefg	0,004 cdefg	0,006 defg	0,004 efgh	0,005 bcd	0,006 bcdef	0,043 bcdef	0,005 cdefg

Les résultats montrent que les deux concentrations d'acide salicylique ont un effet significatif sur la réponse des plants de tomate aux deux types de sels testés. Quelle que soit la concentration appliquée, nous avons observés une augmentation de la biomasse fraîche des hypocotyles des deux variétés testées. Cependant, l'application exogène de 0,25 mM d'acide salicylique entraîne une augmentation significative de la biomasse fraîche de 42,97 % chez la variété Saint Pierre et de 41,75 % chez Semillas de Alta Selección. En parallèle, nous avons constatés une forte réduction de la biomasse produite des hypocotyles chez les deux variétés de tomate en conditions de stress salin. En particulier, l'application de  $MgCl_2$  et  $MgSO_4$  concentrés à 100 mM à réduire la synthèse de la biomasse fraîche des hypocotyles. Cette diminution peut atteindre jusqu'à 100 % chez Saint Pierre en présence de ces deux types de sels tandis que la réduction atteint 26,40 % et 37,35 % chez Semillas de Alta Selección en application de  $MgCl_2$  et  $MgSO_4$  respectivement par rapport au témoin. Ces résultats mettent en évidence l'impact néfaste du stress salin sur la croissance des plants. Néanmoins, l'adjonction d'acide salicylique permet d'atténuer cet effet négatif, bien que son efficacité dépende des conditions expérimentales. L'amélioration la plus marquée est obtenue avec 0,25 mM d'AS en présence de 50 mM et 100 mM de  $MgSO_4$  (SS3+AS1 et SS4+AS1) chez Saint Pierre, où la biomasse fraîche est presque doublée, atteignant une augmentation de 39,25% et 84,78%, respectivement. Chez la variété Semillas de Alta Selección, l'effet le plus prononcé est observé avec le traitement SS3+AS1, entraînant une hausse de 50,50 % par rapport à la condition stressée seule, ce qui illustre une atténuation significative des effets du sel. En revanche, sous un stress plus sévère, notamment avec 100 mM de  $MgCl_2$  et  $MgSO_4$  en présence de 0,50 mM d'AS (SS2+SA2 et SS4+SA2), la correction reste limitée. L'augmentation de la biomasse est très faible pour les

deux variétés, ce qui suggère que cette combinaison ne parvient pas à compenser efficacement l'effet toxique du sel.

### **III.1.1.3.2. Biomasse fraîche des racines (g)**

Le tableau 10 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentrations (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,5mM) sur la biomasse fraîche des racines (en g) des graines de tomates de Saint pierre et Semillas de altaselección, en présence de sels tel que  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ . Les résultats relatifs aux effets des deux concentrations d'acide salicylique sur les deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 10.

**Tableau 10 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la biomasse fraîche des racines des graines de tomate Saint pierre et Semillas de altaselección en milieu salin enrichi en  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ .

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
<b>Saint- Pierre</b>	0,002 ± 0,0005 c	0,003 ± 0,001 b	0,003 ± 0,001 a	0,001 ± 0,001 e	0,000 ± 0,000 f	0,001 ± 0,000 e	0,000 ± 0,000 f	0,002 ± 0,000 cd	0,002 ± 0,000 cd	0,002 ± 0,000 cde	0,001 ± 0,000 de	0,002 ± 0,001 cd	0,002 ± 0,001 cd	0,002 ± 0,001 cd	0,002 ± 0,000 cd
<b>Semillas de alta selección</b>	0,005 ± 0,001 ab	0,005 ± 0,001 a	0,005 ± 0,001 a	0,002 ± 0,001 e	0,002 ± 0,001 e	0,002 ± 0,001 e	0,002 ± 0,001 e	0,004 ± 0,001 abc	0,004 ± 0,007 bcd	0,003 ± 0,001 de	0,003 ± 0,001 de	0,004 ± 0,001 ab	0,004 ± 0,001 abc	0,003 ± 0,001 Cde	0,003 ± 0,001 de

Les résultats obtenus montrent que les deux concentrations d'acide salicylique exercent un effet significatif sur la réponse des graines de tomate Saint Pierre et Semillas de Alta Selección aux deux types de sels étudiés. De manière générale, quelle que soit la concentration d'acide salicylique appliquée, un accroissement de la biomasse fraîche des racines est observé. L'addition de 0,25 mM d'acide salicylique entraîne une augmentation notable de la biomasse fraîche des racines de 51,65% et 9,63% par rapport au témoin, mettant en évidence son rôle dans la stimulation de la croissance. Toutefois, cette amélioration reste supérieure à celle observée avec 0,50 mM, suggérant qu'une concentration plus élevée d'AS ne garantit pas nécessairement un effet plus bénéfique. Néanmoins, en présence de 100 mM de  $MgCl_2$  ou  $MgSO_4$  à révéler une réduction significativement remarquable atteignant une inhibition totale (100 %) chez Saint-pierre témoignant ainsi d'une toxicité extrême annihilant toute croissance des racines et de 36,10% et 44,58% respectivement chez Semillas de Alta Selección. L'application exogène de l'acide salicylique a améliorée la biomasse fraîche des racines surtout pour la variété Saint Pierre dont les améliorations varient entre 86,54% pour SS4+AS1 et 73,71% pour SS2+AS1 respectivement comparativement qu'en présence de 100mM de  $MgCl_2$ . Il est également notable que les graines exposées au  $MgSO_4$  quel que soit la concentration testée réagissent mieux à l'AS, notamment à la concentration de 0,25 mM, qui

montre une amélioration plus marquée que tous les autres traitements combinant l'AS. En revanche, sous des conditions de stress extrême, l'acide salicylique à 0,50 mM semble peu efficace. En présence de 50 mM de  $MgCl_2$  combiné à 0,50 mM d'AS (SS1+AS2), la biomasse fraîche des racines n'augmente que de 22,40% par rapport à la condition de stress. Pour la variété Semillas de Alta Selección, l'effet correcteur le plus significatif est observé avec SS3+AS1, où la biomasse fraîche augmente de 48,78%, suivi de SS2+AS2 avec 48,64 %. En revanche, la plus faible correction est enregistrée avec SS4+AS2, ne montrant qu'une amélioration de 11,65%. Enfin, Ces résultats suggèrent que l'apport de 0,50 mM d'AS ne présente aucun effet remarquable sur la biomasse fraîche des racines des graines de tomate, quelle que soit la variété.

### **III.1.2. Impact sur les paramètres morphologiques**

#### **III.1.2.1. Hauteur finale des plantes (cm)**

Le tableau 11 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentrations (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,5mM) sur la hauteur finale des plantes de tomates variété Saint pierre et Semillas de Alta Selección (en cm), en présence de sels tel que  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$

**Tableau 11 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la hauteur finale des plantes de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ .

Variétés	Témoin	AS1	AS2	$MgCl_2$ 50mM	$MgCl_2$ 100mM	$MgSO_4$ 50mM	$MgSO_4$ 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
<b>Saint- Pierre</b>	22,3 ±	24,0 ±	22,9 ±	15,8 ±	14,0 ±	17,4 ±	17,1 ±	19,1 ±	18,0 ±	18,0 ±	17,4 ±	22,0 ±	21,4 ±	21,0 ±	19,3 ±
	0,9 abc	2,9 a	0,8 ab	1,7 ef	2,2 f	1,1 def	1,2 def	1,3 bcde	5,4 cdef	5,4 cdef	1,0 def	1,5 abc	1,4 abcd	2,7 abcd	2,3 bcde
<b>Semillas de alta seleccion</b>	24.6 ±	31 ±	27,3 ±	11,0 ±	5,7 ±	13,2 ±	11,3 ±	18,3 ±	16,7 ±	16,5 ±	15,3 ±	23,2 ±	21,8 ±	20,7 ±	20,2 ±
	0,5 a	1.3 ab	2,8 ab	0,5 gh	1,8 h	2,0 fg	2,1 gh	2,1 cdefg	2,1 defg	2,6 defg	4,2 efg	0,8 bcd	3,8 bcd	3,1 bcde	0,3 bcde

Selon les résultats présentés dans le tableau 21, nous pouvons déduire que la hauteur finale de la tige sous les conditions témoins dépasse 22 cm chez la tomate Saint Pierre et 24 cm chez Semillas de Alta Selección. L'apport d'acide salicylique entraîne un effet remarquable sur les deux variétés testées. À une concentration de 0,25mM, la hauteur de la tige augmente de 7,48% chez Saint Pierre et de 25,65% chez Semillas de Alta Selección. En revanche, l'apport de 0,50mM d'acide salicylique à exercer une augmentation la plus faible qui peut arriver seulement à 2,55% et 10,81% respectivement par rapport au témoin. En revanche, les plus faibles hauteurs des tiges ont été observées dans des conditions de stress salin en présence de  $MgCl_2$  ou  $MgSO_4$  quelle que soit la concentration exercée. De plus, la culture de tomate semble plus vulnérable aux milieux enrichis en  $MgCl_2$  qu'à ceux contenant du  $MgSO_4$ , et ce, pour les deux variétés testées. L'analyse statistique de ce paramètre montre que l'adjonction d'acide

salicylique aux deux types d'eaux salines à base de  $MgCl_2$  et  $MgSO_4$  a une action significative sur la croissance en hauteur des plantes. En effet, à 0,25mM, l'AS stimule particulièrement la croissance dans les milieux enrichis en 50 mM de  $MgSO_4$ , avec une augmentation de 21,76 % (SS3+AS1) chez Saint Pierre. Chez Semillas de Alta Selección, la correction la plus marquée est observée dans les traitements (SS3+AS1) et (SS2+AS1), avec une augmentation de 40,54 % et 43,91 % respectivement. Ainsi, l'application d'AS à faible dose (0,25mM) en milieu salin semble favoriser une augmentation de la hauteur finale chez les deux variétés comparativement à la concentration de 0,50mM. Toutefois, la correction la plus faible est enregistrée dans les traitements (SS4+AS2) avec une augmentation de seulement 3,88% chez Saint Pierre, et (SS1+AS2) avec 22,97% chez Semillas de Alta Selección.

### III.1.2.2. Longueur racinaire des plantes de tomate (cm)

Le tableau 12 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentration (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,5mM) sur la longueur racinaire des plantes de tomates variété Saint pierre (en cm), en présence de sels tel que  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ . Selon les résultats présentés dans de tableau 22, nous pouvons déduire que l'impact de de différentes concentration d'acide salicylique (0,25mM et 0,50Mm) sur la longueur racinaire des plantes de tomate soumises à un stress salin induit par  $MgSO_4$  (50mM et 100mM) et  $MgCl_2$  (50mM et 100mM) exerce une action significative.

**Tableau 12 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la longueur racinaire des plantes de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección milieu salin enrichi en  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ .

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
Saint- Pierre	40,3	49,0	30,2	21,0	19,2	22,5	22,1	24,8	24,4	24,2	23,8	32,7	31,3	28,3	24,1
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	2,0 b	1,7 a	0,3 cd	1,0 fg	3,9 g	0,5 fg	3,0 fg	2,0 ef	1,5 f	0,8 f	1,0 f	1,2 c	1,5 cd	1,0 de	1,8 f
Semillas de alta seleccion	31,4	32,9	32,7	14,0	8,0	17,5	16,2	24,0	22,7	17,8	17,8	24,8	23,0	21,7	21,3
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,6 b	3,3 a	4,1 ab	1,0 gh	1,8 h	3,3 gh	2,9 gh	1,0 c	4,2 def	0,3 efgh	2,0 efgh	2,8 c	3,1 cd	1,5 de	3,1 ef

L'application de l'acide salicylique exerce un effet stimulant sur la croissance racinaire, en particulier à la concentration de 0,25 mM, qui induit une augmentation significative de 21,58 % par rapport au témoin chez Saint Pierre et de 4,78 % chez Semillas de Alta Selección. Toutefois, à 0,50 mM, bien que la croissance reste améliorée, l'effet est moins marqué pour ces deux variétés. En situation de stress salin, la réponse des racines varie en fonction du type et de la concentration du sel utilisé. L'application de  $MgCl_2$  concentrée à 50 mM provoque une réduction marquée de la longueur racinaire correspondraient à 47,87% et 55,37% chez la variété

Saint-Pierre et de Semillas de Alta Selección par rapport au témoin respectivement. Cette inhibition devient encore plus sévère à 100 mM, atteignant 52,44% et 75,66% respectivement.

À l'inverse, le  $MgSO_4$  semble être moins toxique avec des réductions plus modérées. Celles-ci correspondraient à 44,16 % et 46,75 % à 50 mM, et 45,07 % et 50,81 % à 100 mM, respectivement chez Saint Pierre et Semillas de Alta Selección comparativement au témoin. L'adjonction exogène d'acide salicylique en milieu salin modifie considérablement cette dynamique exprimée par la longueur de la partie racinaire. En présence de 50 mM de  $MgCl_2$  avec 0,25 mM d'AS (SS1+AS1) et de 50 mM de  $MgSO_4$  avec 0,25 mM d'AS (SS3+AS1), la longueur racinaire augmente respectivement de 28,38% et 22,31% chez Semillas de Alta Selección, indiquant une atténuation significative du stress. À l'inverse, chez Saint Pierre, le traitement SS3+AS1 accentue l'effet du stress, entraînant une diminution de 25,22%. En revanche, l'efficacité de l'acide salicylique diminue nettement à 0,50mM. Chez Saint Pierre, le traitement SS1+AS2 ne permet qu'une faible amélioration de 8,35 %, tandis que chez Semillas de Alta Selección, la plus faible correction est observée avec SS4+AS2, atteignant seulement 15,75%. Ces résultats soulignent l'influence positive de l'acide salicylique sur la croissance racinaire en conditions de stress salin, notamment à faible concentration (0,25mM). Son efficacité est plus marquée dans un milieu enrichi en  $MgSO_4$  que dans un milieu contenant du  $MgCl_2$ , bien qu'elle tende à diminuer à des concentrations salines plus élevées.

### III.1.2.3. Nombre de feuilles

Le tableau 13 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique testé par les deux concentrations (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,5mM) sur le nombre de feuilles par plante de tomates des deux variétés testées, en présence de  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$  exercé par 50mM et 100mM.

Les résultats relatifs aux effets des deux concentrations d'acide salicylique sur les deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 13.

**Tableau 13 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur le nombre de feuilles par plante de tomate Saint-Pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ .

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
Saint- Pierre	11,0	11,0	11,0	7,0	6,3	7,3	7,0	9,3	9,3	24,2	7,3	10,7	10,3	9,3	9,3
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,0 a	0,0 a	0,0 a	0,0 d	0,6 d	0,6 d	1,0 d	1,2 bc	0,6 bcd	1,7 c	1,5 d	0,6 ab	0,6 ab	0,6 bc	0,6 bc
Semillas de alta seleccion	7,3	8,7	7,7	5,0	4,7	5,0	5,0	7,0	7,0	6,3	6,0	8,0	7,0	7,0	7,0
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	1,2 abcd	0,6 a	0,6 abc	1,0 ef	4,7 f	0,0 ef	0,0 ef	2,0 bcd	1,0 bcd	0,6 cde	1,0 def	0,0 ab	0,0 bcd	0,0 bcd	1,0 bcd

Les résultats obtenus montrent que la salinité réduit significativement le nombre de feuilles par plante par rapport au témoin. L'évolution de la production foliaire varie en fonction des traitements appliqués, en présence ou en absence d'acide salicylique, mettant ainsi en évidence les différences entre les milieux testés. Selon nos observations, les deux concentrations d'acide salicylique ont un effet significatif sur les deux types de sels étudiés.

Quel que soit le dosage de cet phytohormone utilisé, une augmentation du nombre de feuilles de tomate est constatée. Cependant, l'application de l'acide salicylique à exercer une stimulation significative chez Semillas de Alta Selección comparativement à la variété Saint-Pierre surtout pour la dose de 0,25mM d'AS par rapport au témoin. Le stress salin induit par le  $MgCl_2$  et le  $MgSO_4$  a un impact notable sur la production foliaire. À 50 mM de  $MgCl_2$ , le nombre de feuilles diminue de 36,36% chez Saint-Pierre et de 31,81% chez Semillas de Alta Selección par rapport au témoin respectivement. À 100 mM, cette réduction atteint 42,73% et 36,36%, respectivement. Cependant, le stress salin causé par le  $MgSO_4$  quel que soit la concentration testée (50 ou 100 mM) a exercé une réduction modérée du nombre de feuille. Contrairement au  $MgCl_2$ , l'ajout d'acide salicylique semble atténuer partiellement ses effets.

Ainsi, sous traitement combiné  $MgSO_4$  exercé par 50 mM et AS1 (SS3+AS1), le nombre de feuilles augmente de 30,30% chez Saint-Pierre et de 40,90% chez Semillas de Alta Selección par rapport au stress salin seul. Néanmoins, l'efficacité de l'acide salicylique diminue en présence de concentrations élevées de sels. À 100 mM de  $MgCl_2$  avec AS2, l'amélioration reste limitée, avec une hausse de seulement 9,09% chez Saint-Pierre et de 18,81% chez Semillas de Alta Selección par rapport aux conditions de stress. Ces résultats suggèrent que l'acide salicylique ne suffit pas à compenser l'impact du stress salin à forte concentration. En conclusion, l'acide salicylique exerce un effet modéré sur la production foliaire, notamment en situation de stress salin léger et à faible concentration. Néanmoins, face à des concentrations plus élevées de sels et d'acide salicylique, son efficacité diminue, tandis que les effets du stress salin restent dominants.

#### **III.1.2.4. Nombre de fleurs par plante de tomate**

Le tableau 14 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentration (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,5mM) sur le nombre de fleurs par plante de tomate Saint-Pierre et Semillas de Alta Selección, en présence de sels tel que  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ .

Les résultats relatifs aux effets des deux concentrations d'acide salicylique sur les deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 14.

**Tableau 14 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur le nombre de fleurs par plante de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ .

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
<b>Saint- Pierre</b>	4,7	6,0	5,0	2,3	0,7	2,7	2,3	3,7	3,7	3,3	2,7	4,3	4,0	3,7	3,7
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,6 abcd	1,0 a	0,0 ab	0,6 e	1,2 f	1,2 de	0,6 e	1,5 bcde	0,6 bcde	0,6 cde	0,6 def	0,6 bc	0,0 bcd	1,2 bcde	0,6 bcde
<b>Semillas de alta seleccion</b>	5,3	6,7	5,7	3,0	1,3	4,3	3,3	4,3	4,3	4,3	4,3	5,0	4,7	4,7	4,3
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,6 Ab	0,6 a	0,6 ab	0,0 d	0,6 e	0,6 bcd	0,6 cd	0,6 bcd	0,6 bcd	0,6 bcd	0,6 bcd	0,0 b	0,6 bc	0,6 bc	0,6 bcd

Les résultats obtenus montrent que les deux concentrations d'acide salicylique exercent un effet significatif sur les deux types de sels étudiés. De ce fait, quelle que soit la concentration utilisée, une augmentation du nombre de fleurs de tomate est observée. Sous conditions témoins, le nombre de fleurs par plante dépasse 4 chez la variété Saint-Pierre et 5 chez Semillas de Alta Selección, représentant ainsi un niveau de floraison standard en l'absence de stress ou de traitement spécifique. L'adjonction exogène d'acide salicylique influence positivement la floraison, bien que son effet varie selon la concentration. En effet, à 0,25mM, une augmentation notable de 28,57 % est observée chez Saint-Pierre et de 25 % chez Semillas de Alta Selección.

À l'inverse, le stress salin réduit significativement la floraison. Le  $MgCl_2$  à 50mM entraîne une diminution de 50% chez Saint-Pierre et de 43,75 % chez Semillas de Alta Selección, tandis qu'à 100 mM, cette baisse atteint respectivement 85,74 % et 75 %. Le  $MgSO_4$ , semble être moins agressif, bien qu'il affecte également négativement la floraison. Néanmoins, l'addition exogène d'acide salicylique aux milieux salins modifie ces tendances. Ainsi, dans les traitements enrichis en AS, l'association (SS2+AS1) et (SS3+AS1) améliore la floraison de 57,14 % et 35,71 % chez Saint-Pierre par a l'application du sel respectivement. De même, chez Semillas de Alta Selección, le traitement (SS2+AS1) entraîne une augmentation de 56,25%. Cependant, sous un stress plus sévère ( $MgSO_4$  100mM) et en présence de 0,50 mM d'AS (SS4+AS2), l'amélioration est plus limitée, atteignant seulement 28,57% pour la variété Saint-Pierre. Par ailleurs, l'application de 0,50mM de  $MgSO_4$  a un effet moins agressif sur le nombre de fleurs chez la variété Semillas de Alta Selección. Ceci correspondrait à une augmentation de la floraison de 6,25% par rapport au stress salin. Ainsi, bien que l'acide salicylique joue un rôle modérateur face au stress salin, son efficacité semble dépendre à la fois de la concentration appliquée et de l'intensité du stress, 0,25mM se révélant généralement plus bénéfique que 0,50mM.

### III.1.2.5. Surface foliaire de plante de tomate (cm<sup>2</sup>) :

Le tableau 15 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentrations (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,5mM) sur la surface foliaire de plante de tomates Saint pierre et Semillas de Alta Selección, en présence de sels tel que MgSO<sub>4</sub> et MgCl<sub>2</sub>. Les résultats relatifs aux effets des deux concentrations d'acide salicylique sur les deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 15.

**Tableau 15 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la surface foliaire de plante de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en MgSO<sub>4</sub> et MgCl<sub>2</sub>.

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
Saint- Pierre	29,5	32,5	32,0	10,7	6,5	11,9	8,3	23,6	21,7	20,5	15,8	29,4	23,7	21,7	16,7
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,8 b	1,7 a	0,7 a	0,8 f	1,1 h	0,7 f	1,2 g	0,7 c	2,0 d	0,3 d	0,3 e	0,3 b	1,1 c	0,3 d	1,5 d
Semillas de alta seleccion	29,6	32,2	30,9	8,2	6,3	12,2	10,7	22,2	22,1	20,7	15,8	28,5	26,1	21,0	15,9
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,5 ab	2,2 a	1,4 a	1,2 fg	1,4 g	3,1 de	0,8 ef	2,4 c	5,1 c	0,6 c	2,7 d	1,9 ab	1,9 b	1,8 c	0,3 d

Les résultats montrent que l'acide salicylique influence significativement la surface foliaire des deux variétés testées. D'une part, en condition témoin, la surface foliaire est de 29,5cm<sup>2</sup> pour Saint-Pierre et de 29,6 cm<sup>2</sup> pour Semillas de Alta Selección, représentant ainsi la croissance normale en absence du stress. D'autre part, l'application de 0,25mM d'AS entraîné une légère augmentation de 10.15% et 8.78% chez Saint-Pierre respectivement. En outre, l'adjonction de 0,50mM d'AS a exercé une augmentation de 8.23% et 4.39%, ce qui suggère un effet plus modéré. En revanche, le stress salin induit par MgCl<sub>2</sub> réduit significativement la surface foliaire de 63.88% et 77.99% en présence de 50 ou 100 mM chez Saint-Pierre, tandis que chez Semillas de Alta Selección, les réductions étaient plus sévères de l'ordre de 72.29% et de 78.71% respectivement par rapport au témoin. Par ailleurs, bien que MgSO<sub>4</sub> soit généralement moins toxique que MgCl<sub>2</sub>, il provoque tout de même une réduction, avec des valeurs de 59.81% et 71.89% chez Saint-Pierre, contre 58.73% et 63.96% chez Semillas de Alta Selección. Néanmoins, l'ajout d'AS dans les milieux salins atténue ces effets. L'application de MgSO<sub>4</sub> à 50 mM combiné à 0.25mM d'AS (SS3+AS1), la surface foliaire remonte de 59.36% chez Saint-Pierre contre 55.18% chez Semillas de Alta Selección. Toutefois, sous un stress plus sévère exercé par 100mM de MgSO<sub>4</sub> combiné avec 0.50mM d'AS, l'amélioration est plus limitée, avec 16.36% pour Saint-Pierre et 17.56% pour Semillas de Alta Selección. De même, concernant MgCl<sub>2</sub>, l'ajout d'AS amélioré la surface foliaire, bien que de manière moins



marquée. Cependant, ces résultats indiquent que l'AS atténue les effets du stress salin. Cependant, son efficacité semble dépendre à la fois de la concentration appliquée et du type de sel utilisé.

### III.1.2.6. Biomasse fraîche produite

#### III.1.2.6.1. Biomasse fraîche des feuilles de tomate

Le tableau 16 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentrations (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,5mM) sur la biomasse fraîche des feuilles de tomates, en présence de sels tel que  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ . Les résultats relatifs aux effets des deux concentrations d'acide salicylique sur les deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 16.

**Tableau 16** : Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la biomasse fraîche des feuilles de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ .

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl <sub>2</sub> 50mM	MgCl <sub>2</sub> 100mM	MgSO <sub>4</sub> 50mM	MgSO <sub>4</sub> 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
Saint-Pierre	6,3	7,9	6,3	3,6	2,6	4,4	3,9	5,6	5,5	4,6	3,9	6,3	6,2	5,6	4,7
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,3 b	0,5 a	0,5 b	0,4 de	1,3 b	0,6 cd	1,2 de	0,4 bc	1,2 bc	0,4 cd	0,9 de	0,6 b	1,0 b	1,1 bc	0,3 cd
Semillas de alta seleccion	3,6	7,2	5,9	1,1	0,3	1,4	1,0	3,0	2,9	2,1	1,8	3,5	3,1	2,1	1,8
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,7 b	1,2 a	1,6 a	0,3 ef	0,4 f	0,9 def	0,4 ef	0,1 bcd	2,4 bcd	0,8 bcde	0,8 cdef	0,5 b	0,4 bc	1,3 bcde	0,6 cdef

L'application de l'acide salicylique entraîne une augmentation notable de la biomasse foliaire produite chez les deux variétés testées. À une concentration de 0,25mM, la biomasse atteint 7.93 g chez Saint-Pierre et 7.2 g chez Semillas de Alta Selección, traduisant une amélioration significative. Toutefois, lorsque la concentration est portée à 0,50mM, une légère diminution est observée, avec des valeurs respectives de 6.34 g et 5.94 g, indiquant que l'effet bénéfique de l'acide salicylique est plus marqué à la concentration la plus faible. L'exposition au  $MgCl_2$  à 50mM réduit la biomasse de 43.07% chez Saint-Pierre et de 68.65% chez Semillas de Alta Selección, témoignant d'un stress important. Une augmentation de la concentration à 100mM accentue cet effet, avec une diminution de la biomasse de 58.14% et 92.81% respectivement. En revanche, sous  $MgSO_4$ , la biomasse est légèrement moins affectée, confirmant une toxicité moindre du sulfate de magnésium par rapport au chlorure. L'ajout d'acide salicylique en conditions de stress salin atténue partiellement ces effets délétères. Sous  $MgSO_4$  à 50Mm combiné à AS1 (SS3+as1), la biomasse remonte de 30.06 % chez Saint-Pierre et de 59.32% chez Semillas de Alta Selección et ce par rapport aux conditions de stress confirmant un effet protecteur. De manière similaire, sous  $MgCl_2$  à 50mM, l'acide salicylique (AS1) (SS1+AS1) améliore la biomasse foliaire, de 32.73% chez Saint-Pierre et 52.05% chez

Semillas de Alta Selección. Toutefois, lorsque la concentration de SA augmente (SS4+AS2), la biomasse diminue (13.26 % et 22.66%), suggérant que AS1 est plus efficace. En conditions de stress sévère, l'acide salicylique offre une amélioration plus limitée. Ainsi, bien que l'acide salicylique joue un rôle protecteur contre le stress salin, son effet varie selon la concentration et le type de sel. Il s'avère plus efficace à 0,25mM et en présence de MgSO<sub>4</sub> plutôt que de MgCl<sub>2</sub>.

### III.1.2.6.2. Biomasse fraîche des tiges (g)

Le tableau 17 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentration (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,5mM) sur la biomasse fraîche des tiges de tomates Saint-Pierre et Semillas de Alta Selección, en présence de sels tel que MgSO<sub>4</sub> et MgCl<sub>2</sub>. Les résultats relatifs aux effets des deux concentrations d'acide salicylique sur les deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 17.

**Tableau 17 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la biomasse fraîche des feuilles de tomate Saint-pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en MgSO<sub>4</sub> et MgCl<sub>2</sub>.

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
<b>Saint- Pierre</b>	3,3 ± 0,3 bc	4,6 ± 0,9 a	3,4 ± 0,5 B	2,2 ± 0,2 def	1,5 ± 1,0 f	2,6 ± 0,5 bcde	2,2 ± 0,6 ef	3,2 ± 1,0 bcde	2,9 ± 0,6 bcde	2,5 ± 0,7 bcdef	2,7 ± 0,6 bcde	3,3 ± 0,6 bc	3,2 ± 0,4 bcd	3,2 ± 0,2 bcde	2,4 ± 0,5 cdef
<b>Semillas de alta seleccion</b>	3,7 ± 0,3 b	5,9 ± 1,6 a	5,7 ± 0,6 A	1,0 ± 0,4 f	0,9 ± 0,5 f	1,2 ± 0,4 f	1,0 ± 0,5 f	2,5 ± 0,4 cde	1,6 ± 0,3 def	1,5 ± 0,4 f	1,3 ± 0,5 F	3,4 ± 0,2 bc	2,6 ± 0,3 cd	1,5 ± 0,8 ef	1,4 ± 0,3 e

Les résultats obtenus montrent que, quel que soit la concentration d'acide salicylique utilisée, une augmentation significative de la biomasse fraîche des tiges de tomate est observée, confirmant son effet bénéfique sur la croissance des plantes. Toutefois, une amélioration notable est enregistrée dont la biomasse des tiges augmente de 39.16% pour Saint Pierre et de 61.85% pour Semillas de Alta Selección, traduisant un effet stimulant plus prononcé à cette concentration en présence d'AS concentré a 0,25mM. De même, avec AS2 concentré a 0,50mM, nous avons enregistrées une légère l'augmentation de la biomasse fraîche des tiges. Celle-ci correspondrait à 2.88% et 55.10% par rapport au témoin, ce qui suggère qu'une concentration plus élevée d'acide salicylique n'offre pas nécessairement un effet supplémentaire bénéfique. En revanche, l'exposition au stress salin entraîne une réduction marquée de la biomasse fraîche des tiges, particulièrement sous MgCl<sub>2</sub>, qui s'avère plus toxique que MgSO<sub>4</sub>. Ainsi, à 50mM de MgCl<sub>2</sub>, la biomasse chute de 32.86% pour Saint Pierre et de 71.57% pour Semillas de Alta Selección, illustrant un impact négatif plus sévère sur cette

dernière. À 100mM, cette diminution devient encore plus prononcée, avec des valeurs respectives de 56.34% et 76.11%. Confirmant que l'intensité du stress est proportionnelle à la concentration de sel appliquée. En comparaison, MgSO<sub>4</sub> affecte moins sévèrement la biomasse des tiges, avec des valeurs de 21.67% et 66.48% à 50mM, et de 35.06% et 73.56% à 100mM, ce qui souligne sa toxicité moindre par rapport à MgCl<sub>2</sub>. Néanmoins, lorsqu'un traitement à l'acide salicylique est appliqué en présence de sels, une atténuation des effets du stress est observée. Sous MgSO<sub>4</sub> à 50mM, la biomasse passe à 59.35% avec AS1 pour Semillas de Alta Selección, tandis que pour Saint-Pierre la biomasse augmente de 35.86%. Cela démontre que l'acide salicylique améliore la tolérance des plants au stress, à 100mM d'MgSO<sub>4</sub> (SS4+AS2), bien que l'acide salicylique permette une légère récupération, les valeurs restent faibles de 8.99% chez Saint- Pierre, un effet similaire est observé avec (SS2+AS2) ou la valeur augmente de seulement 10.62% pour Semillas de Alta Selección, soulignant que son efficacité diminue à des concentrations plus élevées et des niveaux de stress plus élevés. En conclusion, Il apparaît que AS1 (0,25mM) offre une meilleure protection que AS2 (0,50 mM), suggérant qu'une augmentation excessive de l'acide salicylique n'apporte pas nécessairement un avantage supplémentaire. De plus, MgCl<sub>2</sub> se révèle plus toxique que MgSO<sub>4</sub>, entraînant une réduction plus importante de la biomasse des tiges, en particulier chez la variété Semillas de Alta Selección, qui semble plus sensible au stress salin que la variété Saint-Pierre.

### **III.1.2.6.3. Biomasse fraîche racinaire (g)**

Le tableau 18 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentration (SA1 : 0,25mM et SA2 : 0,5mM) sur la biomasse fraîche racinaire de tomates Saint-Pierre et Semillas de Alta Selección, en présence de sels tel que MgSO<sub>4</sub> et MgCl<sub>2</sub>. Les résultats relatifs aux effets des deux concentrations d'acide salicylique sur les deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 18

**Tableau 18 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la biomasse fraîche racinaire de plante de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en MgSO<sub>4</sub> et MgCl<sub>2</sub>.

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
<b>Saint- Pierre</b>	6,0	8.8	6.2	2,2	1,5	2,8	2,3	4.3	3,9	3,3	2,8	4,9	4,5	3,9	2,9
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,3 b	0,5 a	0,8 b	0,2 Fg	0,4 f	0,7 efg	1.5 fg	1,8 cd	0,5 cde	0,2 def	0,4 efg	0,2 bc	1,2 cd	0,5 cde	0,7 efg
<b>Semillas de alta seleccion</b>	4,1	4,9	4,3	0,4	0,3	0,5	0,3	2,6	1,3	1,1	0,6	3,7	2,1	1,5	1,0
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,4 a	0,3 a	0,5 a	0,1 D	0,1 e	0,2 d	0,1 cd	0,9 b	0,5 b	0,2 bc	0,4 cd	0,2 b	1,0 b	0,6 bc	0,2 cd

L'analyse des résultats obtenus pour les variétés Saint Pierre et Semillas de Alta Selección met en évidence l'effet significatif de l'acide salicylique sur la biomasse racinaire, ainsi que l'impact du stress salin induit par le  $MgCl_2$  et le  $MgSO_4$ . Tout d'abord, en l'absence de stress salin, les témoins montrent une biomasse racinaire normale, avec des valeurs de 6 g pour la variété Saint-Pierre et 4.1g pour la variété Semillas de Alta Selección. Ensuite, l'application d'acide salicylique, quelle que soit la concentration, entraîne une augmentation de la biomasse racinaire dans les deux variétés. Cependant, l'effet du AS1 (0,25mM) est plus marqué que celui du AS2 (0,50mM), notamment chez Saint Pierre où la biomasse atteint une augmentation de 47.38% g sous AS1 contre 4.40% sous AS2. De même, chez Semillas de Alta Selección, une augmentation est observée, avec 19.09% pour AS1 et 4,14% pour AS2. D'un autre côté, l'effet du stress salin varie en fonction du type et de la concentration du sel. Globalement, l'application de  $MgCl_2$  provoque une réduction plus sévère de la biomasse racinaire comparée au  $MgSO_4$ , et cette tendance est observée pour les deux variétés. En effet, l'application de 50mM de  $MgCl_2$  a exercé une chute de la biomasse fraîche racinaire de 63.65% et 90.41% respectivement pour la variété Saint-Pierre et Semillas de Alta Selección, tandis que la concentration de  $MgCl_2$  à 100mM a révélé une diminution variée entre 74.63% et 93.09% pour la variété Saint-Pierre et Semillas de Alta Selección respectivement par rapport au témoin, confirmant une forte sensibilité au  $MgCl_2$ . À l'inverse, le  $MgSO_4$  semble moins toxique, avec des valeurs légèrement plus élevées : 53.95% et 86.83% à 50mM, et 61.87% et 91.63% à 100mM. Néanmoins, l'ajout d'acide salicylique sous stress salin atténue partiellement les effets négatifs des sels, bien que son efficacité dépende à la fois de la concentration et du type de sel, le AS1 permet d'améliorer davantage la biomasse racinaire fraîche sous stress modéré (36% et 77.82% avec  $MgSO_4$  concentré à 50mM chez Saint-Pierre et Semillas de Alta Selección respectivement. Toutefois, sous stress sévère (100 Mm), cette amélioration devient plus limitée, avec une biomasse qui reste inférieure à 9.75% pour  $MgSO_4$  chez la variété Saint-Pierre et 8.20% pour  $MgCl_2$  chez Semillas de Alta Selección.

### **III.1.2.7. Biomasse sèche produite (g)**

#### **III.1.2.7.1. Biomasse sèche de la partie aérienne (g)**

Le tableau 19 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentrations (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,5mM) sur la biomasse sèche aérienne de plante de tomates, en présence de sels tel que  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ . Les résultats relatifs aux effets des deux concentrations d'acide salicylique sur les deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 19.

D'une part, l'application de 0,25mM d'AS a exercé une légère augmentation de la biomasse sèche de la partie aérienne produite. Elle est de l'ordre de 7.24% pour la variété Saint-

Pierre, alors que nous avons remarqué une augmentation significativement remarquable de la biomasse sèche de la partie aérienne produite chez la variété Semillas de Alta Selección.

**Tableau 19 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la biomasse sèche aérienne de plante de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ .

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
<b>Saint- Pierre</b>	5,6	6,0	5,8	3,0	3,1	3,8	3,4	5,3	5,2	3,9	3,4	5,5	5,4	5,0	4,7
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,3 abc	0,3 a	0,4 ab	0,1 f	0,5 f	0,2 e	0,5 ef	0,1 bcd	0,2 bcd	0,3 e	0,4 ef	0,2 abc	0,2 bc	0,4 c	0,2 cd
<b>Semillas de alta seleccion</b>	2,43	4,0	3,8	1,2	0,9	1,3	1,0	2,4	1,7	1,5	1,4	2,8	2,3	1,7	1,5
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,1 bc	1,1 a	0,8 a	0,3 ef	0,9 f	0,3 ef	0,4 ef	0,4 bc	0,4 cde	0,2 def	0,4 Ef	0,3 b	0,3 bcd	0,2 cde	0,7 def

Cette augmentation était de l'ordre de 63.84% par rapport au témoin. D'autre part, l'application de 0,50mM d'AS n'a pas un effet significatif sur la biomasse sèche produite chez variété Semillas de Alta Selección et elle a une légère augmentation pour la variété Saint-Pierre. Ces résultats indiquent un effet bénéfique de l'acide salicylique sur la biomasse sèche de la partie aérienne exercé a des faibles concentrations. Par ailleurs, l'exposition au stress salin entraîne une diminution significative de la biomasse sèche de la parie aérienne pour les deux variétés testées.

Des chutes de la biomasse sèche de la partie aérienne de l'ordre de 45.88% pour la variété Saint-Pierre et 49.58% pour la variété Semillas de Alta Selección en présence de 50mM de  $MgCl_2$ , tandis que l'application de 100mM de  $MgCl_2$ , à réduire davantage la biomasse sèche produite de la parie aérienne pour atteindre respectivement 44.21% et 64.43% par rapport témoin. De même, l'application de 50mM de  $MgSO_4$  entraîne une diminution de la biomasse sèche aérienne de 31.79% pour la variété Saint-Pierre et 45.23% pour la variété Semillas de Alta Selección respectivement par rapport au témoin. Alors que l'application de 100mM de  $MgSO_4$  à révéler des réductions de 38.86% et 60.84% respectivement par rapport au témoin.

Ces résultats montrent que le  $MgCl_2$  provoque une réduction plus marquée de la biomasse par rapport au  $MgSO_4$ , bien que l'effet du stress soit présent dans les deux cas. Néanmoins, l'ajout d'acide salicylique en condition de stress salin permet d'atténuer ces effets négatifs. En effet, sous  $MgSO_4$  à 50mM+ AS1(SS3+AS1) et  $MgCl_2$  à 50mM+ AS1 (SS1+AS1), la biomasse augmente de 29.51% et 39.26% respectivement pour Saint-Pierre et de 58.88% pour la variété Semillas de Alta Selección ce qui témoigne de l'effet atténuateur le plus marqué. En revanche, La combinaison de 0,50mM d'AS avec 100mM de  $MgCl_2$  a exercé une légère augmentation

qui peut atteindre 4.35% et 20.12% pour Saint-Pierre et pour Semillas de Alta Selección respectivement.

### III.1.2.7.2. Biomasse sèche racinaire (g)

Le tableau 20 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentration (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,5mM) sur la biomasse sèche racinaire de plante de tomates, en présence de sels tel que  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ . Les résultats relatifs aux effets des deux concentrations d'acide salicylique sur les deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 20.

**Tableau 20 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la biomasse sèche racinaire de plante de tomate Saint-Pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ .

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl <sub>2</sub> 50mM	MgCl <sub>2</sub> 100mM	MgSo <sub>4</sub> 50mM	MgSO <sub>4</sub> 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
Saint- Pierre	1,7 ± 0,1 ab	2,3 ± 0,1 a	1,8 ± 0,1 Ab	0,7 ± 0,2 ef	0,7 ± 0,0 f	1,0 ± 0,6 cdef	1,0 ± 0,2 Def	1,1 ± 0,2 cdef	1,3 ± 0,1 bcde	1,2 ± 0,1 cde	1,0 ± 0,1 def	1,6 ± 0,2 abc	1,5 ± 0,1 abcd	1,4 ± 0,3 abcde	1,3 ± 0,4 bcde
Semillas de alta seleccion	1,3 ± 0,1 a	1,4 ± 0,2 a	1,4 ± 0,1 A	0,4 ± 0,1 de	0,2 ± 0,1 e	0,4 ± 0,3 de	0,2 ± 0,1 E	1,1 ± 0,4 ab	0,5 ± 0,2 de	0,5 ± 0,1 de	0,3 ± 0,1 e	1,2 ± 0,1 ab	0,9 ± 0,4 bc	0,7 ± 0,2 cd	0,7 ± 0,3 cd

Les résultats obtenus montrent que l'application de l'acide salicylique, quel que soit sa concentration, exerce un effet significatif sur l'atténuation des effets du stress salin chez les deux variétés de tomate étudiées. En effet, en l'absence de stress, la biomasse sèche racinaire des témoins était de 1,73 g pour Saint-Pierre et 1,30 g pour Semillas de Alta Selección. L'ajout d'acide salicylique améliore légèrement la biomasse sèche des racines avec des augmentations de la biomasse de 31.63% (AS1) et 5.99% (AS2) pour Saint-Pierre, tandis que pour Semillas de Alta Selección, les stimulations étaient de 6.81% (AS1) et 3.56% (AS2) par rapport au témoin respectivement. Sous stress salin, les effets varient en fonction du type et de la concentration du sel appliqué. Globalement, le  $MgCl_2$  exerce un impact plus nocif que le  $MgSO_4$ , entraînant une réduction plus marquée de la biomasse sèche racinaire. Chez Saint-Pierre, la biomasse chute de 58.99% sous  $MgCl_2$  concentré à 50mM et 62.49% en application de  $MgCl_2$  concentré à 100mM, tandis que sous  $MgSO_4$ , la biomasse sèche des racines a montré des réductions modérées de variant entre 39.02% en présence de 50mM de  $MgSO_4$  et 41.87% en présence de 100mM de  $MgSO_4$ . Chez Semillas de Alta Selección, l'effet du stress est encore plus prononcé, avec des réductions de la biomasse sèche racinaire variant entre 71.48% et 69.59% en présence de 50mM de  $MgCl_2$  ou  $MgSO_4$  respectivement par rapport au témoin, 82.92% et 82.52% en présence de 100mM de  $MgCl_2$  ou  $MgSO_4$  respectivement. Toutefois, l'application de l'acide salicylique permet une amélioration notable de la biomasse sèche

racinaire sous stress, bien que cette protection varie en fonction de la concentration appliquée. Il est à noter que l'application d'AS1 semble conférer un meilleur effet protecteur que AS2, surtout sous stress modéré (50mM). Chez Saint-Pierre, sous (SS1+SA1) (MgSO<sub>4</sub> 50mM+AS1 0,25 mM) et (SS2+AS1) (MgCl<sub>2</sub> 50mM + AS1 0.25Mm), la biomasse sèche racinaire a amélioré de 33.86% et 33.46% respectivement, montrant une atténuation significative du stress. Un effet similaire est observé Semillas de Alta Selección : sous (SS3+SA)1 la biomasse sèche racinaire augmente de 60.29% par rapport au (MgSO<sub>4</sub> seul), En revanche, on condition du stress sévère, nous avons remarqués que l'efficacité de l'acide salicylique a diminuée, notamment avec la combinaison de 0,50mM d'AS. Chez Saint-Pierre, la biomasse sous (SS4+SA2) (MgSo<sub>4</sub> 100mM+ AS2 0.50mM) augmente seulement avec 17.21% montrant une protection partielle mais limitée. De même, chez Semillas de Alta Selección, la biomasse racinaire sous SS2+AS2 (MgCl<sub>2</sub> 100Mm+AS2) augmente de 4.87%, indiquant une atténuation modérée du stress. En conclusion, bien que l'acide salicylique joue un rôle atténuateur face au stress salin, son efficacité dépend à la fois de sa concentration, du type de sel appliqué et de la sensibilité variétale des plants de tomate.

### **III.1.3. Mesures de paramètre physiologique**

#### **III.1.3.1. Teneur relative en eau (TRE%)**

Le tableau 21 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentration (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,50mM) sur la teneur relative en eau de plante de tomates, en présence de sels tel que MgSO<sub>4</sub> et MgCl<sub>2</sub>. Les résultats relatifs aux effets des deux concentrations d'acide salicylique sur les deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 21

**Tableau 21** : Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la teneur en eau relative de plante de tomate Saint-Pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en MgSO<sub>4</sub> et MgCl<sub>2</sub>.

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
<b>Saint- Pierre</b>	84,0 ± 0,4 b	89,8 ± 0,3 a	85,0 ± 1,1 B	65,4 ± 3,5 h	61,3 ± 1,1 i	70,6 ± 0,8 f	68,5 ± 0,5 fg	74,0 ± 1,0 e	69,5 ± 0,9 f	66,4 ± 0,6 gh	64,9 ± 0,6 h	83,8 ± 0,3 b	80,9 ± 3,8 c	78,6 ± 0,5 de	76,6 ± 0,3 d
<b>Semillas de alta seleccion</b>	90,7 ± 0,1 ab	95,9 ± 1,6 a	93,8 ± 5,41 A	80,3 ± 3,9 de	76,5 ± 5,1 e	80,7 ± 0,7 de	77,8 ± 1,3 e	89,3 ± 0,5 abc	86,2 ± 2,3 bcd	82,4 ± 4,9 cde	81,9 ± 0,1 de	90,2 ± 0,2 ab	89,3 ± 6,5 abc	86,5 ± 1,6 bcd	85,5 ± 1,9 bcd

Les résultats obtenus mettent en évidence l'effet significatif de l'acide salicylique sur la rétention d'eau des plants des deux variétés de tomate soumis au stress salin. En absence de stress, la teneur en eau relative (TRE) est de 84 % pour la variété Saint-Pierre et de 90,70 % pour Semillas de Alta Selección, reflétant une bonne hydratation des plantes dans des conditions

optimales. L'application de l'acide salicylique, indépendamment de la concentration utilisée, améliore la rétention d'eau, avec une TRE atteignant 89,80 % et 85 % en présence de 0,25mM et 0,50mM respectivement chez la variété Saint-Pierre, alors qu'elle varie entre 95,9% et 93,8% chez la variété Semillas de Alta Selección en présence de 0,25mM et 0,50mM d'acide salicylique. En condition saline, la teneur relative en eau (%) varie en fonction du type de sel et de sa concentration. Le  $MgCl_2$  entraîne une réduction plus marquée du TRE (%) par rapport au  $MgSO_4$ , indiquant un effet plus sévère sur l'équilibre hydrique des plantes. Chez Saint-Pierre, la TRE (%) a réduit de 22.15 % en présence de 50mM de  $MgCl_2$  et 27.04% en présence de 100mM, De plus, la teneur relative en eau en présence de  $MgSO_4$  était de 15.89% et 18.39% en présence de 50mM ou 100mM de  $MgSO_4$  respectivement par rapport au témoin. Une tendance similaire est observée chez Semillas de Alta Selección, où la TRE sous  $MgCl_2$  a diminué de 11.43 % en présence de 50mM de ce sel et 15.62 % en présence 100mM, alors qu'il est de 10.98 % (50mM) et 14.21% (100mM) sous  $MgSO_4$ , confirmant que le  $MgSO_4$  est moins perturbant pour l'équilibre hydrique des plantes que le  $MgCl_2$ . Néanmoins l'application exogène de l'acide salicylique atténue les effets du stress salin, avec une efficacité variable selon la concentration et le type de sel. Chez Saint-Pierre et Semillas de Alta Selección, sous SS3+AS1 ( $MgSO_4$  50mM+ AS1 0,25mM), La TRE remonte de 18.15 % et 10.40% respectivement par rapport aux conditions de stress seul, montrant un effet protecteur plus marqué de SA1. Tandis qu'il y'a une légère augmentation variante entre 4.38% et 5.87% respectivement sous SS2+SA2, confirmant que SA1 est plus efficace que SA2 pour préserver l'équilibre hydrique sous stress modéré et bien que l'acide salicylique limite les effets du stress, son efficacité diminue à forte concentration en  $MgCl_2$ .

### **III.1.4. Mesure des paramètres biochimiques**

#### **III.1.4.1. Teneur en chlorophylle (a)**

Le tableau 22 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentration (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,50mM) sur la teneur des feuilles en chlorophylle (a) des deux variétés de tomates étudiées, en présence de sels tel que  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$

Les résultats relatifs aux effets des deux concentrations d'acide salicylique sur les deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 22.

Les résultats obtenus pour les deux variétés de tomate, Saint Pierre et Semillas de Alta Selección, montrent que l'acide salicylique exerce un effet significatif sur l'amélioration de la teneur des feuilles en chlorophylle (a), notamment sous stress salin. En absence de stress (témoin), la teneur en chlorophylle a est de 4.84  $\mu g/mg$  pour Saint Pierre et 7.02  $\mu g/mg$  pour Semillas de Alta Selección, indiquant une variabilité naturelle entre les deux variétés.



**Tableau 22 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la teneur en chlorophylle a de plante de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ .

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
<b>Saint- Pierre</b>	4,8 ± 0,5 b	6,5 ± 0,5 a	5,7 ± 0,7 a	1,1 ± 0,1 h	1,1 ± 0,2 h	1,8 ± 0,1 fgh	1,5 ± 0,0 h	2,8 ± 0,1 de	2,5 ± 0,1 efg	2,5 ± 0,6 efg	1,7 ± 0,7 gh	3,9 ± 0,4 C	3,6 ± 0,7 cd	3,3 ± 1,1 cde	3,2 ± 0,0 cde
<b>Semillas de alta seleccion</b>	7,0 ± 1,0 bc	11,5 ± 1,5 a	8,3 ± 0,8 B	1,5 ± 0,2 gh	0,6 ± 0,3 h	2,1 ± 0,9 efgh	0,8 ± 0,2 h	4,0 ± 1,9 def	2,1 ± 1,0 efgh	1,8 ± 0,7 fgh	0,8 ± 0,0 h	5,0 ± 0,4 Cd	4,5 ± 2,8 de	3,7 ± 1,9 defg	3,6 ± 0,2 defg

L'application de l'acide salicylique améliore cette teneur dans les deux cas, de 34.10% (AS1) et 17.66% (AS2) pour Saint Pierre, tandis que pour Semillas de Alta Selección, elle atteint 63.54% (AS1) et 18.78% (AS2), montrant un effet plus marqué chez la variété citée. En revanche, une baisse significativement remarquable de la teneur des feuilles en chlorophylle (a) a été observé pour les deux variétés étudiées. Cependant, l'application de 100mM de  $MgCl_2$  a exercé une réduction de 77.14% chez la variété Saint-Pierre et de 91.29% chez la variété Semillas de Alta Selección, Or, l'application de 100mM de  $MgSO_4$  a exercé une diminution de 69.90% et 89.18% respectivement par rapport au témoin. L'intégration de l'acide salicylique permet d'atténuer ces effets négatifs. La combinaison de 0,25mM de cette phytohormone avec 50mM de  $MgSO_4$  a augmentée 4, la teneur des feuilles en chlorophylle (a) de 42.46% et de 41.16% pour Saint-Pierre et Semillas de Alta Selección respectivement par rapport à la condition du stress. A l'inverse, en présence de 100 mM de  $MgCl_2$  en combinaison avec 0,50mM d'AS, nous avons révélés des augmentations de la teneur des feuilles en chlorophylle (a) de l'ordre de 11.51% et 2.84% pour Saint Pierre et Alta Selección respectivement par rapport à la condition du stress.

### **III.1.4.2. Teneur en chlorophylle (b)**

Le tableau 23 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentration (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,50mM) sur la teneur des feuilles en chlorophylle (b) de plante de tomates, en présence de sels tel que  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ . Les résultats relatifs aux effets des deux concentrations d'acide salicylique sur les deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 23.

Les résultats des deux variétés, Saint Pierre et Semillas de Alta Selección, montrent que l'application d'acide salicylique exerce un effet stimulateur significativement remarquable améliorant ainsi la tolérance des plantes au stress salin.

**Tableau 23 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la teneur des feuilles en chlorophylle b de plante de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en MgSO<sub>4</sub> et MgCl<sub>2</sub>.

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
<b>Saint- Pierre</b>	2,5	3,3	2,9	0,7	0,5	0,9	0,8	1,4	1,4	1,0	0,9	2,2	2,1	1,9	1,8
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,4 cd	1,0 a	0,1 bc	0,0 i	0,0 i	0,1 ghi	0,6 hi	0,0 fg	0,0 fgh	0,0 ghi	0,2 ghi	0,2 de	0,2 de	0,0 ef	0,7 ef
<b>Semillas de alta seleccion</b>	4,1	4,5	4,4	0,7	0,2	1,3	0,2	1,8	1,6	0,9	0,5	3,1	2,8	1,9	2,0
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,1 a	0,5 a	0,2 a	0,3 efg	0,2 g	0,2 def	0,2 g	0,4 cd	0,4 de	0,3 defg	0,4 fg	0,4 b	1,3 bc	0,9 bc	0,4 cd

Nous avons remarqué également que l'application de l'acide salicylique a exercé une augmentation significative sur la teneur des feuilles en chlorophylle (b). Cependant, la présence de 0,25mM d'AS a stimulée les teneurs en chlorophylle (b) pour atteindre 30.70% par rapport au témoin pour la variété Saint Pierre et 9.48% pour la variété Semillas de Alta Selección ; tandis que pour AS2, la teneur est légèrement inférieure, avec une augmentation de 14.97% pour la variété Saint Pierre et 5.29% pour Semillas de Alta Selección, montrant une amélioration, mais moins marquée qu'avec AS1. Cependant l'effet du stress salin montre une diminution importante de la teneur des feuilles en chlorophylle (b) pour les deux variétés étudiées. En présence de 50mM de MgCl<sub>2</sub>, une réduction de 71.22% pour la variété Saint Pierre et 83.06% pour la variété Semillas de Alta Selección. Cette diminution est encore plus marquée sous une concentration de 100 mM de MgCl<sub>2</sub> dont les réductions atteignant 80.46% pour la variété Saint Pierre et 96.14% pour Semillas de Alta Selección par rapport au témoin. En contrepartie, la présence de 50mM de MgSO<sub>4</sub> à exercer une réduction de la teneur en chlorophylle (b) avec une diminution de 65.82% pour la variété Saint Pierre et 68.28% pour Semillas de Alta Selección par rapport au témoin respectivement. Toutefois, sous 100 mM de MgSO<sub>4</sub>, nous avons remarqué une diminution de l'ordre de 69.01% pour la variété Saint-Pierre et 95.63% pour Semillas de Alta Selección, montrant un effet moins agressif que le MgCl<sub>2</sub>.

Néanmoins l'ajout d'acide salicylique permet d'atténuer ces effets négatifs. Pour MgSO<sub>4</sub> à 50 mM (SS3+AS1), la teneur en chlorophylle (b) augmente de 53.64% pour la variété Saint Pierre et 43.68% pour la variété Semillas de Alta Selección, indiquant une amélioration la plus marquée.

#### **III.1.4.3. Teneur en caroténoïdes**

Le tableau 24 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentration (AS1 : 0,25mM et AS2 : 0,50mM) sur la teneur en caroténoïdes des deux variétés de tomate étudiées, en présence de sels tel que MgSO<sub>4</sub> et MgCl<sub>2</sub>. Les résultats relatifs aux effets

des deux concentrations d'acide salicylique sur les deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 24

**Tableau 24 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la teneur en caroténoïdes de plante de tomate Saint pierre et Semillas de Alta Selección milieu salin enrichi en  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ .

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
Saint- Pierre	1,2	0,3	0,4	5,0	6,3	4,4	4,5	3,0	3,3	3,4	4,0	2,0	2,7	2,7	2,9
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,2 de	0,1 e	0,1 e	1,0 ab	0,5 a	0,9 abc	2,9 ab	1,5 bcd	0,6 bcd	1,9 bcd	0,3 abc	0,6 cde	0,9 bcde	1,5 bde	0,8 bcd
Semillas de alta seleccion	0,4	0,4	0,4	2,0	2,0	1,7	2,0	1,1	1,4	1,4	1,7	0,6	0,7	0,9	0,9
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,0 g	0,0 g	0,0 g	0,2 ab	0,2 a	0,6 abc	0,1 ab	0,3 ed	0,0 cd	0,2 cd	0,0 bc	0,2 fg	0,1 fg	0,2 ef	0,2 ef

L'application de l'acide salicylique a entraîné une diminution de la teneur en caroténoïdes, atteignant 0.3  $\mu\text{g}/\text{mg}$  pour une concentration de 0,25mM et 0.4  $\mu\text{g}/\text{mg}$  pour une concentration de 0,50 mM d'As pour la variété Saint Pierre, tandis qu'elle était de 0.4  $\mu\text{g}/\text{mg}$  pour les deux concentrations de phytohormone appliquée pour la variété Semillas. En revanche, sous stress salin, une augmentation marquée des caroténoïdes, particulièrement avec  $MgCl_2$  concentré à 100 mM, où la teneur atteint 6.3  $\mu\text{g}/\text{mg}$  pour la variété Saint Pierre et 2.0  $\mu\text{g}/\text{mg}$  pour la variété Semillas de Alta Selección, démontrant une réponse plus accentuée de cette dernière. De plus, l'application de 100mM de  $MgSO_4$  à 100 mM a induit une accumulation moindre, avec 4.5  $\mu\text{g}/\text{mg}$  pour la variété Saint Pierre et 2.0  $\mu\text{g}/\text{mg}$  pour la variété Semillas de Alta Selección, révélant une différence d'intensité entre les deux sels. Par ailleurs, l'ajout exogène d'acide salicylique sous stress permet d'atténuer ses effets négatifs. La combinaison avec 50mM de  $MgSO_4$  à montrer une diminution remarquable de la teneur en caroténoïdes par rapport aux conditions de stress. Elles variaient entre 2.0  $\mu\text{g}/\text{mg}$  et 0.6  $\mu\text{g}/\text{mg}$  respectivement par rapport au témoin pour la variété Saint Pierre et Semillas de Alta Selección. En revanche en présence de 100mM de  $MgCl_2$  (SS2+AS2), l'effet de l'acide salicylique reste partiel, avec une diminution modérée des caroténoïdes par rapport aux conditions de stress, atteignant 4.0  $\mu\text{g}/\text{mg}$  pour la variété Saint Pierre et 1.7  $\mu\text{g}/\text{mg}$  pour la variété Semillas de Alta Selección,

#### III.1.4.4. Teneur en proline ( $\mu\text{g}/\text{g}$ MF)

Le tableau 25 montre l'impact du stress salin et de l'acide salicylique à deux concentration (AS1 : 0,25 mM et AS2 : 0,50 mM) sur la teneur en proline de plante de tomates, en présence de sels tel que  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ . Les résultats relatifs aux effets des deux concentrations d'acide salicylique sur les deux sels étudiés sont présentés dans le tableau 25.

**Tableau 25 :** Effet des deux concentrations d'acide salicylique sur la teneur des feuilles en proline chez la variété Saint pierre et Semillas de Alta Selección en milieu salin enrichi en  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ .

Variétés	Témoin	AS1	AS2	MgCl2 50mM	MgCl2 100mM	MgSo4 50mM	MgSO4 100mM	SS1+ AS1	SS1+ AS2	SS2+ AS1	SS2+ AS2	SS3+ AS1	SS3+ AS2	SS4+ AS1	SS4+ AS2
<b>Saint- Pierre</b>	0,004	0,003	0,004	0,046	0,060	0,046	0,051	0,020	0,030	0,034	0,040	0,008	0,010	0,012	0,018
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,002 g	0,000 g	0,000 g	0,010 bc	0,004 a	0,003 bc	0,015 ab	0,003 e	0,008 d	0,011 D	0,003 cd	0,001 fg	0,001 efg	0,001 efg	0,007 ef
<b>Semillas de alta seleccion</b>	0,024	0,013	0,013	0,100	0,192	0,099	0,179	0,052	0,081	0,094	0,098	0,043	0,043	0,048	0,049
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,012 ed	0,004 e	0,007 e	0,007 b	0,044 a	0,004 b	0,024 a	0,012 cd	0,031 bc	0,004 B	0,011 b	0,003 d	0,010 d	0,008 d	0,010 d

Selon les résultats obtenus, l'effet du stress salin varie en fonction de la nature du sel et de la variété étudiée. Chez la variété Saint Pierre, en condition témoin, la teneur en proline est de 0,004  $\mu\text{g/g}$  MF, représentant la valeur faible en l'absence de stress. Lors de l'application de 50mM de  $MgCl_2$ , une augmentation notable est observée, atteignant 0,046  $\mu\text{g/g}$  MF, tandis qu'à 100 mM de ce sel, cette teneur grimpe à 0,060  $\mu\text{g/g}$  MF, témoignant d'un stress accru. De même, sous l'application de 50mM de  $MgSO_4$ , la teneur des feuilles en proline atteint 0,046  $\mu\text{g/g}$  MF, puis augmente à 0,051  $\mu\text{g/g}$  MF sous l'application de 100 mM de même sel, traduisant une réponse adaptative au stress osmotique. Néanmoins en présence d'acide salicylique seul, la réaction reste limitée. À 0,25 mM (AS1), nous avons enregistré des faibles teneurs en proline.

Cette tendance se maintient avec 0,50 mM (AS2), suggérant que l'AS seul n'induit pas une accumulation significative de proline. Cependant, lorsqu'il est combiné au stress salin, son effet devient plus marqué. Avec 50mM de  $MgCl_2$  SS3+AS1), nous avons remarqué des chutes de la teneur en proline dans les feuilles qui arrive à 0,008  $\mu\text{g/g}$  MF par rapport aux conditions de stress, montrant une atténuation du stress. De même, l'application de 100mM de  $MgCl_2$  en combinaison avec AS2, la teneur atteint 0,040  $\mu\text{g/g}$  MF indiquant que la concentration 0.25mM d'AS réduit plus efficacement l'accumulation de proline que SA2. En revanche, Chez la variété Semillas de Alta Selección, une tendance similaire est observée. En condition témoin, la teneur en proline est de 0,024  $\mu\text{mol/mg}$ . En stress salin, l'application de 50mM de  $MgCl_2$  a entraîné une hausse significative de la teneur des feuilles en proline avec des valeurs de 0,099  $\mu\text{g/g}$  MF, tandis que l'application de 100 mM de  $MgCl_2$  maintient cette élévation à 0,192  $\mu\text{g/g}$  MF. En outre, l'application de 0,25mM d'AS en combinaison avec 50mM de  $MgSO_4$  a stimulé les teneurs des feuilles en proline pour atteindre 0,099  $\mu\text{g/g}$  MF, et sous la combinaison de 100 mM de  $MgSO_4$ , elle reste stable à 0,179  $\mu\text{g/g}$  MF. Cependant Lors de l'application de l'acide salicylique, nous avons observé une diminution avec  $MgSO_4$  50 mM + SA1 (SS3+AS1), la proline chute à 0,043  $\mu\text{g/g}$  MF confirmant l'effet atténuateur de l'AS, Tandis qu'avec

(SS2+AS2) la teneur en proline baisse seulement à 0.098 µg/g MF illustrant une meilleure efficacité de AS1.

## **Chapitre 2 : Discussion**

La stimulation de la germination des graines et des plantes sous les contraintes climatiques et l'amélioration de ses qualités sont considérées comme un challenge pour les chercheurs, car ils représentent un enjeu de haute importance agroéconomique. L'acide salicylique renferme des propriétés intéressantes, dans l'amélioration de la tolérance des plantes au stress salin, où ce ci sera inclinée vers cette hypothèse. Cette étude œuvre pour démontrer que l'utilisation de l'acide salicylique tant qu'agent de correction pour les sols salins permettant d'une part une augmentation du potentiel de germination des semences et d'autre part une amélioration de la tolérance des plantes.

### **III.2.1. Stade de germination**

De nombreuses études sur différentes espèces végétales ont démontré que l'acide salicylique agit positivement sur les indices germinatifs, suggérant un effet positif global sur la germination des graines.

Nos résultats démontrent un effet stimulant sur la germination des graines, même en absence de stress sous différentes concentrations AS1 et AS2. Cela confirme les effets bénéfiques bien documentés de l'acide salicylique sur la stimulation de la germination et la tolérance au stress salin, probablement via l'activation de mécanismes antioxydants et la régulation des phytohormones (Yusuf et al., 2011). L'application d'AS peut améliorer les taux de germination en stimulant la synthèse des enzymes impliquées dans la dégradation des réserves de graines, essentielles pour fournir l'énergie nécessaire au développement des plantules. (Entesari et al., 2012) ont rapporté que l'application d'AS, en combinaison avec des nitrates de potassium, augmentait le taux de germination et la croissance des plantules de haricot mungo (*Vigna radiata*) sous stress salin (Entesari et al., 2012).

Nos résultats indiquent également que l'acide salicylique (AS1 et AS2) améliore la tolérance des plants de tomates au stress salin, en termes d'effets sur la croissance des coléoptiles ainsi que la biomasse fraîche et sec des graines. (Moravcová, 2018) confirme nos résultats par son étude qui mentionne que l'acide salicylique influence le développement de la partie racinaire des graines de maïs cultivé sous stress en hydroponie. (Baghizadeh et Hajmohammadrezaei., 2011) ajoute par son étude qui mentionne la réduction du poids frais et sec de la radicule et de la plumule face à un stress hydrique par rapport au témoin des semis d'okra. Cependant, l'application d'acide salicylique augmente le poids frais et sec de la radicule et de la plumule, l'application d'AS améliore la croissance des coléoptiles de tomates en augmentant leur capacité à tolérer des concentrations élevées de sel (Ali et al., 2015). Cette

amélioration pourrait être due à la capacité de l'AS à moduler les niveaux d'auxines et à renforcer les mécanismes de défense des plantes contre le stress environnemental (Ali et al., 2016). (Liu et al., 2018) ont observé une augmentation significative de la biomasse sèche des graines de blé traitées avec de l'AS sous stress salin, suggérant que l'AS favorise l'accumulation de biomasse en améliorant l'efficacité des processus métaboliques et en réduisant les dommages oxydatifs (Liu et al., 2019). De plus, les travaux de (Sharma et al., 2019) ont montré que l'AS aide les plantes à maintenir une meilleure balance hydrique et une meilleure structure cellulaire en conditions de stress salin, ce qui contribue à une augmentation de la biomasse totale (Sharma et al., 2019), ajoute Anaya (2018) que l'application d'acide salicylique (AS) améliore la masse fraîche par rapport au traitement respectif avec salinité, en particulier avec l'application de 0,5 mM d'AS.

Des effets divergents concernant l'effet de l'acide salicylique (AS) sur la germination des graines, sont liés au fait que l'AS peut lui-même induire un stress oxydatif dans les cellules traitées (Borsani et al., 2001) que cette molécule peut soit inhiber, soit améliorer la germination des graines (Rajjou et al., 2006) de sorte que l'effet dépend des concentrations d'AS appliquées (Singh, 2010; Xiao et al., 2014). Dans des expériences précédentes réalisées sur le maïs, il a été constaté que l'AS appliqué à des concentrations de 0,5 à 1 mM stimule la croissance et la germination des embryons immatures isolés des graines et cultivés in vitro en présence d'AS (Krantev et al., 2008). Nos résultats mentionnent que l'acide salicylique améliore la germination, surtout à la concentration de 0,25 mM (AS1), mais son efficacité varie selon le type et la concentration de sel utilisé. La combinaison avec  $\text{MgSO}_4$  montre une meilleure réponse que celle avec  $\text{MgCl}_2$ , cet effet de dose est confirmé par Anaya (2018) la concentration la plus faible d'AS (0,25 mM) améliore le taux moyen de germination dans des conditions de NaCl à 90 et 120 mM, mais cet effet n'est pas observé à des concentrations de NaCl plus élevées (150 mM et 200 mM). En revanche, des concentrations plus élevées d'AS (0,5 mM et 1 mM) montrent une amélioration du taux moyen de germination en présence de concentrations élevées de NaCl (150 et 200 mM), tout en diminuant ce temps à des concentrations plus faibles de sel.

Ces observations sont cohérentes avec les travaux de (Reinhardt et Rost., 1995), qui soulignent que la plupart des plantes sont plus sensibles à la salinité lors de la germination et de la croissance des plantules. Ce phénomène pourrait s'expliquer par la manière dont la salinité perturbe l'absorption d'eau et les processus enzymatiques cruciaux pendant ces stades de développement. En effet, la capacité de l'AS à améliorer la tolérance des graines aux conditions de stress salin semble résulter de sa régulation de l'activité antioxydante dans les cellules

végétales. Des études antérieures ont montré que l'acide salicylique peut inhiber l'activité de la catalase, une enzyme clé dans la dégradation du peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) en eau et en oxygène. Cette inhibition, comme le suggèrent les travaux de (Nun et al., 2003), pourrait entraîner une accumulation de  $H_2O_2$ , ce qui, paradoxalement, semble améliorer la germination dans certaines conditions. Le peroxyde d'hydrogène joue un rôle central dans la signalisation cellulaire, en particulier dans la réponse des plantes au stress. Une légère augmentation de  $H_2O_2$  peut agir comme un signal favorisant les mécanismes de défense, stimulant ainsi la résistance au stress salin et améliorant les processus de germination.

Nos résultats montrent que l'application d'acide salicylique (AS), surtout à une concentration de 0,25 mM (AS1), aide à atténuer les effets négatifs du stress salin, en particulier lorsque le  $MgSO_4$  est utilisé. Ce constat est en accord avec les travaux de (Khan et al., 2014), qui ont observé que l'AS améliore la tolérance des racines au stress salin en modifiant les mécanismes de réponse au stress et en favorisant la croissance racinaire (Khan et al., 2014). En revanche, l'efficacité de l'AS semble diminuer avec l'augmentation de la concentration en sel, notamment avec le  $MgCl_2$ , ce qui pourrait être lié à l'interaction complexe entre l'AS et les différents types de sels (Hasegawa et al., 2000). Les différences observées dans l'efficacité de l'AS en présence de  $MgSO_4$  par rapport à  $MgCl_2$  peuvent être attribuées aux effets distincts de ces sels sur les mécanismes physiologiques des plantes. Le  $MgSO_4$  pourrait avoir un impact moins perturbant sur l'équilibre ionique et les mécanismes de transport, permettant ainsi une meilleure efficacité de l'AS dans la protection des racines (Zhu, 2002). En revanche, le  $MgCl_2$ , en raison de son effet osmotique plus prononcé, pourrait exacerber les symptômes de stress et réduire l'efficacité de l'AS (Munns, 2002). Ces résultats suggèrent que l'acide salicylique possède une capacité de protection modérée contre le stress salin, avec une performance plus favorable en présence de  $MgSO_4$  comparé au  $MgCl_2$ . Cela souligne l'importance de considérer le type de sel utilisé dans les expériences de stress salin, ainsi que la concentration d'AS, pour optimiser les stratégies de gestion du stress en agriculture, il est crucial de noter que les effets de l'AS peuvent varier en fonction des espèces végétales, des conditions environnementales, et des concentrations utilisées. Des études supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre ces variables et optimiser l'application de l'AS dans des contextes spécifiques (Zhao et al., 2020).

### **III.2.2. Stade de croissance**

#### **III.2.2.1. L'expression végétative**



De nombreuses études sur différentes espèces végétales ont démontré que l'acide salicylique agit positivement sur les indices de croissance des plantes, suggérant un effet bénéfique global sur leur développement, nos résultats affichent que l'acide salicylique (AS1), à une concentration de 0,25Mm (AS1), améliore plusieurs paramètres de croissance affectés par le stress salin, particulièrement avec le  $MgCl_2$ , réduit significativement la longueur des racines, la hauteur des tiges, la biomasse fraîche des feuilles et tiges, ainsi que le nombre de feuilles et de fleurs. Ce phénomène peut être attribué à l'accumulation de sels dans la zone racinaire, entraînant une diminution de l'absorption d'eau et des nutriments essentiels, tels que le potassium ( $K^+$ ) et le calcium ( $Ca^{2+}$ ), nécessaires à la croissance cellulaire (Munns et Tester, 2008). Les ions  $Cl^-$ , en particulier, sont connus pour perturber la structure membranaire et réduire l'efficacité des canaux ioniques, L'acide salicylique aide à atténuer cet effet en activant plusieurs mécanismes physiologiques. Il stimule l'expression des gènes liés aux systèmes antioxydants, réduisant ainsi les dommages oxydatifs causés par les radicaux libres sous stress (Horváth et *al.*, 2007). Cela permet de préserver l'intégrité des membranes cellulaires et de maintenir une meilleure absorption d'eau par les racines. En plus, l'AS favorise la synthèse d'osmoprotecteurs comme la proline, ce qui améliore la capacité des racines à tolérer des conditions de stress osmotique, ajoute Cramer et al. (2001) que des agents protecteurs comme l'AS peuvent moduler l'absorption ionique et améliorer la croissance racinaire. Cela rejoint les conclusions de (Simaei et *al.*, 2011), qui ont montré que le AS favorise l'activité des antioxydants comme la superoxyde dismutase (SOD) et la catalase (CAT), qui réduisent le stress oxydatif dans les racines. L'acide salicylique (AS) s'est révélé bénéfique dans l'atténuation des effets négatifs du stress salin sur la croissance racinaire, comme le montrent les résultats. À une concentration de 0,25mM, l'AS a permis de maintenir une longueur des racines plus élevée, surtout en présence de  $MgSO_4$ . Cet effet protecteur de l'AS peut s'expliquer par sa capacité à améliorer la signalisation antioxydante, réduisant ainsi les dommages oxydatifs induits par le stress salin (Khan et *al.*, 2015).

En comparaison, d'autres études, comme celles de (Szepesi et al., 2009), ont montré que l'application d'AS à faible concentration pouvait stimuler la croissance racinaire en améliorant la production d'enzymes antioxydantes. Cependant, ces effets diminuent lorsque les concentrations de sels, particulièrement le  $MgCl_2$ , sont plus élevées, un phénomène similaire à nos résultats.

L'application d'AS a permis de limiter la réduction du nombre de feuilles, en particulier sous  $MgSO_4$ . Cet effet pourrait être lié à la capacité de l'AS à réduire les dommages oxydatifs

causés par le stress salin, en augmentant la synthèse de pigments chlorophylliens et en réduisant la peroxydation lipidique des membranes (Khodary, 2004).

Nos résultats sont comparables à ceux de (Fariduddin et *al.*, 2003), qui ont montré que l'AS peut réduire la perte de feuilles sous stress salin modéré. Cependant, l'efficacité diminue sous des concentrations élevées de  $MgCl_2$ , ce qui est également rapporté dans la littérature, où les effets du stress dépassent les capacités d'atténuation de l'AS. (El-Tayeb 2005) a également observé une augmentation du nombre de feuilles chez des plants de maïs traités au AS sous stress salin.

Nos résultats montrent que l'AS améliore la formation des fleurs confirmé par (Jini and Joseph 2017), l'application de l'AS chez les plantes de haricot sous stress à améliorer la formation des fleurs et leurs fertilités. Il semble jouer un rôle protecteur en stimulant l'accumulation de métabolites secondaires et de composés phénoliques, qui améliorent la résistance au stress et permettent de maintenir la formation des fleurs même sous stress salin (Szepesi et *al.*, 2009). Cet effet peut être dû à la réduction de l'accumulation de composés réactifs de l'oxygène (ROS) dans les tissus floraux (Shakirova et *al.*, 2003). De plus, l'AS peut promouvoir l'expression de gènes liés à la floraison, tels que ceux impliqués dans la signalisation des gibbérellines, ce qui contribue à une floraison plus stable (Parida et Das, 2005).

La biomasse fraîche diminue souvent sous stress salin en raison de la perturbation des processus métaboliques. Ashraf (2004) et (Kaya et *al.*, 2003) ont montré une réduction significative de la biomasse des tiges et des feuilles sous stress salin.

Nos résultats montrent une atténuation de cette diminution, avec l'acide salicylique qui possède un effet protecteur sur la biomasse des tiges, notamment en présence de  $MgSO_4$ .

Confirmé par les travaux de (Hayat et *al.*, 2010), qui ont montré que le SA favorise l'accumulation de biomasse en stimulant les antioxydants et en stabilisant les systèmes photosynthétiques sous conditions de stress. Ceci peut s'expliquer par sa capacité à améliorer la photosynthèse et l'assimilation de l'eau, limitant ainsi l'impact négatif du stress salin sur la croissance des parties aériennes (Arfan et *al.*, 2007).

La surface foliaire est souvent réduite sous conditions de stress salin, car les feuilles sont des organes sensibles aux perturbations hydriques. Dans l'étude de (Munns and Tester 2008), une réduction de la surface foliaire sous stress salin est attribuée à la dégradation des complexes photosynthétiques.

Cependant, l'application de AS dans notre expérimentation semble atténuer ces effets et limiter la réduction de la surface foliaire sous stress, en particulier avec  $\text{MgSO}_4$ . Arfan et al. (2007) ont observé que l'AS améliore la surface foliaire en stimulant la synthèse de la chlorophylle et en réduisant les dommages dus à la salinité, Cet effet peut être lié à une meilleure rétention de l'eau et à une réduction des pertes en chlorophylle sous stress salin (Hayat et al., 2010), ajoute Khan et al. (2015), que le AS augmente la surface foliaire sous stress salin en favorisant l'accumulation d'osmoprotecteurs. Toutefois, nos résultats et ceux de la littérature indiquent que l'efficacité de l'AS est limitée en présence de  $\text{MgCl}_2$  à forte concentration, ce qui suggère une sensibilité plus élevée de la surface foliaire à ce sel.

L'absence d'effet significatif de l'AS sur la rétention d'eau dans nos résultats est intéressante. Cela pourrait indiquer que l'AS n'a pas un rôle majeur dans la régulation de la capacité hydrique sous stress salin à ces concentrations spécifiques. Cependant, cela contraste avec certaines études, telles que celles de Nazar et al. (2011), qui ont montré que l'AS peut augmenter la rétention d'eau sous stress en améliorant l'intégrité des membranes cellulaires.

Cette divergence pourrait être due à des différences dans les types de stress salin, la variété utilisée ou les concentrations d'AS utilisées, soulignant la complexité des mécanismes physiologiques impliqués.

#### **III.2.2.2. L'expression physiologique**

Le stress salin, particulièrement avec  $\text{MgCl}_2$ , entraîne une réduction significative de la chlorophylle a et b. L'acide salicylique à 0,25Mm atténue cet effet, surtout en présence de  $\text{MgSO}_4$ , où la chlorophylle a et b sont mieux conservées. Hayat et al. (2010), ont également trouvé que l'AS contribue à la préservation de la chlorophylle a et b sous stress. L'AS aide à améliorer la stabilité des pigments (Prasad,2021) en réduisant les dommages oxydatifs chlorophylliens aux pigments, ce qui favorise la photosynthèse (Joudeh et Al-Soufi, 2019). Tariq et al. (2019) ont trouvé que l'AS protège la chlorophylle en réduisant le stress oxydatif, bien que l'efficacité puisse diminuer sous des concentrations de sel élevées, ce qui est corroboré par tes résultats.

Le stress salin, en particulier avec  $\text{MgCl}_2$ , semble augmenter la teneur en caroténoïdes. L'acide salicylique aide à maintenir cette teneur, surtout à des concentrations plus élevées de  $\text{MgSO}_4$  et  $\text{MgCl}_2$ . L'augmentation des caroténoïdes peut être une réponse adaptative pour contrer les dommages oxydatifs en excès de stress salin, avec l'AS jouant un rôle protecteur en stabilisant ces pigments qui aident à contrer le stress oxydatif (Zhao et al., 2019). les caroténoïdes jouent un rôle crucial dans la protection contre le stress oxydatif. nos résultats sont

en accord avec les travaux de Poudel et al. (2020), qui ont trouvé que les caroténoïdes augmentent sous stress salin comme mécanisme de défense. Cependant, l'AS peut améliorer cette protection en stabilisant les caroténoïdes, comme rapporté par Fariduddin et al. (2003), bien que les effets soient plus prononcés en présence de  $\text{MgSO}_4$ . Cependant, il est important de noter que l'ajout d'acide salicylique peut également réduire l'accumulation de caroténoïdes dans certaines conditions. Des études, comme celles de (Kumar et al., 2024), ont montré que, bien que l'AS puisse stimuler les systèmes antioxydants enzymatiques tels que la SOD, la CAT et l'APX, cela peut réduire la nécessité d'une accumulation élevée de caroténoïdes en tant qu'antioxydants. Ainsi, la réallocation des ressources métaboliques pourrait limiter la production de ces pigments sous l'influence de l'AS.

La teneur en proline augmente de manière significative sous stress salin, particulièrement avec des concentrations élevées de  $\text{MgCl}_2$  et  $\text{MgSO}_4$ . L'acide salicylique aide à atténuer cette augmentation, ce qui indique une meilleure régulation osmotique et une réduction des dommages cellulaires (Gul et al., 2019).

Nos résultats sont soutenus par les études de (Li et al., 2018), qui ont montré que l'AS réduit les niveaux de proline en régulant les réponses osmotique et antioxydante sous stress. De plus, (Khan et al., 2021) ont trouvé que l'AS limite l'accumulation de proline en améliorant la tolérance au stress, bien que cette efficacité soit réduite à des niveaux de stress plus élevés. Cette réduction de proline peut s'expliquer par le fait que l'AS active d'autres mécanismes de défense, comme l'augmentation des enzymes antioxydantes (SOD, CAT, APX), qui réduisent la nécessité d'une accumulation élevée de proline pour contrer les espèces réactives de l'oxygène (Gholamnezhad et al., 2016).

### **III.2.2.3. Effet de dose de l'acide salicylique sur la tomate**

Nous avons observé que l'efficacité de l'acide salicylique diminue avec l'augmentation de la concentration en sel, notamment pour le  $\text{MgCl}_2$ . Cette tendance est cohérente avec les recherches récentes qui montrent que l'AS fonctionne de manière optimale à des concentrations modérées de stress salin, car des doses plus élevées de sel augmentent le stress osmotique au-delà des capacités de protection offertes par l'AS, ce qui limite son effet. À des niveaux de stress salin très élevés, les mécanismes antioxydants et de régulation osmotique activés par l'AS ne suffisent plus à protéger pleinement la plante. Ce phénomène a été observé dans diverses études sur la tolérance au stress salin, où l'AS présente une meilleure efficacité à des concentrations modérées de stress, mais perd son efficacité à des niveaux plus élevés de sel, notamment avec des sels comme le  $\text{MgCl}_2$  et le  $\text{NaCl}$  (Palma et al., 2013). La concentration de 0,25Mm (SA1)

semble être proche de la dose optimale pour réduire le stress salin, confirmé par (El-Desoky et al.,2019) l'AS protège efficacement les plantes sous stress salin jusqu'à des concentrations modérées, mais l'efficacité diminue lorsque le stress augmente. De plus, Khan et al. (2020) ont noté que des doses plus élevées d'AS peuvent induire une réponse de stress supplémentaire, perturbant les mécanismes de défense en provoquant des déséquilibres dans les métabolites secondaires (Parveen,2021). Ces résultats corroborent nos données expérimentales selon lesquelles la concentration de 0,25Mm est optimale pour atténuer le stress salin sans provoquer d'effets secondaires négatifs.

#### **III.2.2.4. Effet des types de Sels sur la tomate**

Le type de sel a un impact significatif sur les résultats, avec le  $MgCl_2$  montrant un effet plus néfaste que le  $MgSO_4$ . Les sels contenant des ions chlorure comme  $MgCl_2$  causent un stress ionique plus important en raison de l'accumulation excessive de  $Cl^-$  dans les tissus végétaux, perturbant ainsi l'équilibre ionique. En revanche, les sulfates comme  $MgSO_4$  sont généralement moins toxiques car ils n'introduisent pas ces ions nocifs. D'autres travaux confirment la toxicité de  $MgCl_2$  par rapport à  $MgSO_4$  et démontrent que les sels contenant des ions  $Cl^-$ , comme le  $MgCl_2$ , provoquent un stress ionique plus sévère comparé aux sulfates (Zhang,2020) qui ont expliqué ce qui augmentent les ions de chlorure et le stress osmotique perturbant ainsi les fonctions physiologiques des plantes (Munns et Tester 2008).

En revanche, Cramer et al. (2019) ont observé que les sulfates, tels que le  $MgSO_4$ , présentent une toxicité moindre et permettent une meilleure performance des plantes en termes de biomasse et de croissance des racines.

#### **III.2.2.5. Effet variétal de la tomate**

Nos résultats révèlent une similitude entre les deux variétés dans l'ensemble des paramètres étudiés concernant l'effet de l'acide salicylique dans l'amélioration de la graine et la plante vis-à-vis aux différents sels utilisés  $MgSO_4$  et  $MgCl_2$ , et la dose appliquée AS1. Cependant, il est important de noter une légère différence dans le comportement de la variété Semillas de Alta Selección, qui présente une résistance légèrement supérieure face aux conditions de stress.

Les tomates industrielles, comme celles de la variété Semillas de Alta Selección, sont sélectionnées pour leur tolérance aux conditions difficiles, telles que le stress salin, en raison de leur rôle dans la transformation agro-industrielle. La capacité à résister aux fluctuations environnementales est un facteur crucial dans ces cultures. Les recherches récentes montrent que ces variétés présentent des mécanismes d'adaptation au stress abiotique, en particulier au

stress salin, grâce à des processus physiologiques renforcés. Zhang et al. (2022) ont démontré que les tomates industrielles cultivées dans des conditions de stress salin optimisent la production de solutés compatibles tels que la proline et augmentent la synthèse de métabolites secondaires pour mieux tolérer les déséquilibres ioniques causés par le sel.

En comparaison, les tomates maraîchères comme Saint Pierre sont principalement sélectionnées pour leur goût et leur rendement dans des conditions optimales, ce qui les rend plus vulnérables aux stress abiotiques, y compris le stress salin. Plusieurs études récentes, notamment celle de Amini et al. (2021), ont rapporté que les variétés de tomates maraîchères montrent une sensibilité accrue à l'accumulation d'ions toxiques tels que  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ , entraînant une réduction plus importante de la croissance et du rendement par rapport aux variétés industrielles. Cette sensibilité peut être liée à la concentration d'osmolytes et à l'activité des systèmes antioxydants, qui sont souvent moins efficaces chez ces variétés lorsqu'elles sont soumises à des niveaux élevés de salinité.

Les différences observées entre ces deux types de tomates reflètent les objectifs distincts de sélection. Alors que les variétés industrielles, telles que Semillas de Alta Selección, sont améliorées pour la robustesse et la stabilité face aux contraintes environnementales, les tomates maraîchères comme Saint-Pierre ne bénéficient pas des mêmes améliorations en termes de tolérance au stress salin, privilégiant la qualité gustative et l'esthétique du fruit.

Les travaux de Li et al. (2023) montrent également que les variétés maraîchères présentent une plus grande sensibilité à la diminution de la photosynthèse sous stress salin, ce qui entraîne une réduction marquée de la biomasse, notamment au niveau des racines et des feuilles. Les tomates industrielles, en revanche, ont montré une meilleure adaptation en maintenant une efficacité photosynthétique relativement stable sous des conditions similaires, ce qui est crucial pour leur développement dans des environnements stressants.

En résumé, les variétés de tomates industrielles, comme Semillas de Alta Selección, sont plus aptes à gérer le stress salin grâce à des mécanismes physiologiques sophistiqués et à une sélection ciblée pour la robustesse, tandis que les tomates maraîchères comme Saint-Pierre restent plus vulnérables en raison de leur sélection principalement axée sur le goût et le rendement sous conditions optimales.

## Conclusion

### I. Stade germinatif

En général, l'acide salicylique (AS) améliore la tolérance des plants de tomate au stress salin, mais son efficacité dépend du type et la concentration de sel utilisé ( $\text{MgCl}_2$  ou  $\text{MgSO}_4$ ). La combinaison de l'AS avec  $\text{MgSO}_4$  produisent de meilleurs résultats pour la plupart des paramètres étudiés tandis que la combinaison de l'AS avec  $\text{MgCl}_2$ , particulièrement à des concentrations élevées, montrent une réponse plus limitée. Ces observations soulignent l'importance d'optimiser la concentration d'acide salicylique et de privilégier les conditions de stress modéré pour maximiser la tolérance des plants au stress salin.

Les résultats obtenus pour les variétés **Saint-Pierre** et **Semillas de Alta Selección**, dans cette étude confirment que le stress salin induit par  $\text{MgCl}_2$  est plus toxique pour les plants de tomate que celui causé par  $\text{MgSO}_4$ , en particulier à des concentrations élevées. Ce stress se manifeste par une réduction significative des taux de germination, de la hauteur des hypocotyles et des racines ainsi que de la biomasse fraîche de ces organes. L'acide salicylique, notamment à la concentration de 0,25mM (AS1), s'est révélé plus efficace pour atténuer les effets négatifs du stress salin, particulièrement lorsqu'il est associé à  $\text{MgSO}_4$ . Les résultats indiquent que AS1 aide à mieux préserver la croissance et la biomasse des plantes, tandis que AS<sub>2</sub> (0,50mM) montre une efficacité moindre surtout en présence de  $\text{MgCl}_2$ .

### II. Stade croissance

Les résultats de cette étude montrent que l'acide salicylique, en particulier à une concentration de 0,25 mM d'AS1 joue un rôle clé dans l'atténuation des effets négatifs du stress salin sur les plants de tomate. Son efficacité est particulièrement visible en présence de  $\text{MgSO}_4$ , où il permet de mieux préserver la croissance, la biomasse, et le développement des fleurs et des feuilles. En revanche, le  $\text{MgCl}_2$  induit un stress salin plus sévère, affectant plus profondément la hauteur des plantes, la longueur des racines, ainsi que la biomasse fraîche et sèche des feuilles, tiges et racines. À des concentrations élevées de  $\text{MgCl}_2$  combiné avec 0,50mM d'AS montre une efficacité limitée pour compenser les effets néfastes du stress.

Les plants soumis à  $\text{MgSO}_4$  ont montré de meilleures performances globales par rapport à ceux soumis à  $\text{MgCl}_2$ , illustrant une toxicité moindre du  $\text{MgSO}_4$ . En outre, l'acide salicylique a montré une capacité modérée à protéger les plantes contre le stress salin, AS<sub>1</sub> (0,25 mM) étant plus efficace que AS<sub>2</sub> (0,50 mM) dans la plupart des cas, notamment pour préserver la surface foliaire, le nombre de fleurs et de feuilles, ainsi que les niveaux de chlorophylle et de caroténoïdes. Cependant, bien que l'acide salicylique améliore la tolérance des plantes au stress, son efficacité diminue à des concentrations plus élevées de sel, en

particulier avec le  $\text{MgCl}_2$ , où son effet bénéfique reste limité. La capacité de rétention d'eau et l'accumulation de proline sous stress salin indique également une réponse des plantes au stress, mais l'acide salicylique aide à modérer ces effets, bien que son action soit plus prononcée dans des conditions de stress modéré.



## Conclusion générale

L'augmentation de la salinité des sols et des eaux, en particulier dans les zones arides et semi-arides constitue un obstacle majeur pour l'agriculture mondiale. En effet, la salinisation réduit la fertilité des terres et affecte directement les rendements agricoles, ce qui pose un défi considérable pour la sécurité alimentaire. Face à cette problématique, des stratégies de correction des sols et des eaux sont nécessaires pour garantir la productivité agricole dans ces environnements difficiles. Parmi les solutions étudiées, l'utilisation des phytohormones exogènes tels que l'acide salicylique (AS) s'est révélée prometteuse pour améliorer la tolérance des plantes au stress salin. Cette phytohormone joue un rôle important dans la régulation des réponses physiologiques des plantes au stress. Il permet de moduler des mécanismes tels que la production de proline, l'accumulation de caroténoïdes, ainsi que le maintien du contenu en eau des plantes, essentiels pour leur survie en milieu salin. En stimulant les défenses antioxydantes et les mécanismes de signalisation du stress, l'acide salicylique aide les plantes à atténuer les effets du stress salin, à préserver leur croissance et à maintenir leur capacité de production. Dans les zones arides ou semi arides, où les ressources en eau sont déjà limitées et où la qualité des sols est compromise, l'application d'acide salicylique offre un potentiel important pour améliorer la résilience des cultures aux conditions de salinité élevée. Cependant, le développement de solutions efficaces pour la gestion du stress salin demeure un challenge scientifique. Les chercheurs s'efforcent de comprendre les mécanismes complexes de la tolérance au sel et d'identifier les dosages optimaux et les conditions dans lesquelles l'acide salicylique peut maximiser ses effets bénéfiques. Bien que des progrès aient été réalisés, l'efficacité de l'acide salicylique peut varier en fonction du type de sel présent dans le sol, de la concentration du stress salin et du stade de développement de la plante, rendant cette solution difficile à généraliser à l'échelle agricole.

Dans cette étude, les résultats indiquent que l'acide salicylique, lorsqu'il est appliqué à une concentration modérée de 0,25 mM (AS1), aide à stimuler la hauteur des plantes, la longueur des racines, ainsi que la biomasse fraîche et sèche des parties aériennes et racinaires des plants de deux variétés de tomate étudiés. Les plantes soumises à  $\text{MgSO}_4$  répondent mieux à l'acide salicylique, avec une amélioration visible de leur croissance et de leur productivité par rapport à celles soumises à  $\text{MgCl}_2$ , où le stress est plus sévère. Ces résultats démontrent l'importance de l'acide salicylique comme outil pour atténuer les effets du stress salin dans les environnements arides, mais ils mettent également en évidence la variabilité de ses effets en fonction du type de sel et de la concentration. L'acide salicylique présente un

potentiel prometteur pour améliorer la tolérance des plantes au stress salin, plusieurs défis subsistent pour son adoption à grande échelle dans l'agriculture, notamment dans les zones arides et semi arides où la salinité des sols et des eaux limite la productivité. La formulation, l'optimisation des doses, et la combinaison avec d'autres substances représentent des perspectives importantes pour améliorer l'efficacité de l'acide salicylique. De plus, le développement de variétés résistantes et l'évaluation économique de son utilisation sont des étapes cruciales pour sa généralisation.

Ainsi, l'acide salicylique offre des opportunités significatives pour augmenter la résilience des cultures face au stress salin, mais son succès dépendra de la capacité à surmonter ces obstacles et à intégrer cette solution dans les pratiques agricoles actuelles. Les prochaines étapes consisteront à affiner cette approche par des recherches et des essais pratiques pour garantir que l'acide salicylique devienne un outil clé dans la gestion des sols salins et dans l'amélioration des rendements agricoles dans les environnements difficiles.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Abekoon, T., Sajindra, H., Jayakody, J. A. D. C. A., Samarakoon, E. R. J., & Rathnayake, U. (2024).** Image processing techniques to identify tomato quality under market conditions. *Smart Agricultural Technology*, 7(January), 100433.
2. **Abrahamian, P., Hammond, J., & Hammond, R. W. (2020).** Complete genome sequence of an American isolate of pepino mosaic virus. *Microbiology Resource Announcements*, 9(2), 10–1128.
3. **Acosta-Motos, J. R., Ortuño, M. F., Bernal-Vicente, A., Diaz-Vivancos, P., Sanchez-Blanco, M. J., & Hernandez, J. A. (2017).** Plant responses to salt stress : Adaptive mechanisms. *Agronomy*, 7(1), 1–38.
4. **Ahmad, F., Iqbal, S., Khan, M. R., Abbas, M. W., Ahmad, J., Nawaz, H., ... & Ali, M. (2019).** Influence of seed priming with salicylic acid on germination and early growth of sesame. *Pure and Applied Biology (PAB)*, 8(2), 1206–1213.
5. **Aletse, S., Zamora, M., García, L., Eduardo, I., Mendoza, M., Jacobo, R., & Macuil, D. (2024).** Early detection of the false root knot nematode (*Nacobbus aberrans*) infection in greenhouse cultivated tomatoes by infrared spectroscopy. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16(July 2023), 101115.
6. **Al-Hashash, H., Akbar, A., & Al-Ali, E. (2023).** Genome of Tomato Yellow Leaf Curl Virus (TYLCV) obtained from tomato leaves in Kuwait. *Microbiology Resource Announcements*, 12(7), e01155-22.
7. **Ali, S., Bharwana, S. A., Rizwan, M., Farid, M., Kanwal, S., Ali, Q., ... & Khan, M. D. (2015).** Fulvic acid mediates chromium (Cr) tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) through lowering of Cr uptake and improved antioxidant defense system. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 10601–10609.
8. **Ali, S., Ganai, B. A., Kamili, A. N., Bhat, A. A., Mir, Z. A., Bhat, J. A., ... & Tyagi, A. (2018).** Pathogenesis-related proteins and peptides as promising tools for engineering plants with multiple stress tolerance. *Microbiological Research*, 212, 29–37.
9. **Ali, S., Khan, A. S., Malik, A. U., & Shahid, M. (2016).** Effect of controlled atmosphere storage on pericarp browning, bioactive compounds and antioxidant enzymes of litchi fruits. *Food Chemistry*, 206, 18–29.
10. **Ali, Y., Ali, A., Sina, I., Khandker, S. S., Neesa, L., Tanvir, E. M., Kabir, A., Khalil, I., & Gan, S. H. (2021).** Nutritional composition and bioactive compounds in tomatoes and their impact on human health and disease: A review. *Foods*.
11. **Amini, A., Mohammadi, M., & Eshghi, S. (2021).** Physiological and biochemical responses of tomato cultivars to salt stress: A comparative study. *Journal of Plant Stress Biology*, 34(2), 87–95.
12. **Anapati, R. K. G., Aved, S. A. N., Afar, S. Z., Wensheng, W. A. N. G., & Jianlong, X. U. (2022).** Saline-Alkali Tolerance in Rice: Physiological Response, Molecular Mechanism, and QTL Identification and Application to Breeding. *ScienceDirect*, 29(December 2021), 412–434.
13. **Anaya, F., Fghire, R., Wahbi, S., & Loutfi, K. (2018).** Influence of salicylic acid on seed germination of *Vicia faba* L. under salt stress. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(1), 1–8.
14. **Anjali, Kumar, S., Korra, T., Thakur, R., Arutselvan, R., Kashyap, A. S., Nehela, Y., Chaplygin, V., Minkina, T., & Keswani, C. (2023).** Role of plant secondary metabolites in defence and transcriptional regulation in response to biotic stress. *Plant Stress*, 8(December 2022), 100154.
15. **Arfan, M., Athar, H. R., & Ashraf, M. (2007).** Does exogenous application of salicylic acid through the rooting medium modulate growth and photosynthetic capacity in two

- differently adapted spring wheat cultivars under salt stress? *Journal of Plant Physiology*, 164(6), 685–694.
16. **Ashraf, M. (2004).** Some important physiological selection criteria for salt tolerance in plants. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 199(5), 361–376.
  17. **Ashraf, M. & Foolad, M. R. (2007).** Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206–216
  18. **Astaneh, R. K., Bolandnazar, S., & Nahandi, F. Z. (2022).** Exogenous nitric oxide protects garlic plants against oxidative stress induced by salt stress. *Plant Stress*, 5(January), 100101.
  19. **Athar, H. U. R., Zulfiqar, F., Moosa, A., Ashraf, M., Zafar, Z. U., Zhang, L., Ahmed, N., Kalaji, H. M., Nafees, M., Hossain, M. A., Islam, M. S., El Sabagh, A., & Siddique, K. H. M. (2022).** Salt stress proteins in plants: An overview. *Frontiers in Plant Science*, 13(December), 1–23.
  20. **Awu, J. E., Nyaku, S. T., Amisah, J. N., Okorley, B. A., Agyapong, P. J. A., Doku, F. E., & Nkansah, G. O. (2023).** Grafting for sustainable management of *Fusarium* wilt disease in tomato production in Ghana. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14(December 2022), 100710.
  21. **Baghizadeh, A., & Hajmohammadrezaei, M. (2011).** Effect of drought stress and its interaction with ascorbate and salicylic acid on okra (*Hibiscus esculentus* L.) germination and seedling growth. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*, 7(1), 55–65.
  22. **Baharudin, N. F., & Osman, N. I. (2023).** Plant development, stress responses, and secondary metabolism under ethylene regulation. *Plant Stress*, 7(October 2022), 100146.
  23. **Basit, A. (2018).** Salicylic acid an emerging growth and flower inducing hormone in marigold (*Tagetes sp. L.*). *Pure and Applied Biology*.
  24. **Basit, A., Farhan, M., Abbas, M., Wang, Y., Zhao, D., Mridha, A. U., Rehman, A., Said, M., Amjad, M., Arif, M., Ahmed, S., Atalla, R., Metwally, D. M., & Khadragey, M. E. (2021).** Do microbial protein elicitors PeaT1 obtained from *Alternaria tenuissima* and PeBL1 from *Brevibacillus laterosporus* enhance defense response against tomato aphid (*Myzus persicae*)? *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(6), 3242–3248.
  25. **Baskin, J. M., and C. C. Baskin. (2004).** A classification system for seed dormancy. *Seed Science Research*, 14:1-16.
  26. **Bassel, D., & Bewley, J. D. (2010).** Seed germination and dormancy. *The Plant Cell*, 9, 1055–1066.
  27. **Benazzouk, S., Djazouli, Z. E., & Lutts, S. (2019).** Vermicompost leachate as a promising agent for priming and rejuvenation of salt-treated germinating seeds in *Brassica Napus*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(11), 1344–1357.
  28. **Bergougnoux, V. (2014).** The history of tomato: From domestication to biopharming. *Biotechnology Advances*, 32(1), 170–189.
  29. **Boas, A. A. D. C. V. (2018).** Comment piloter au champ la qualité de la tomate d'industrie ? : Impact du déficit hydrique, du génotype et des procédés sur la qualité finale des produits transformés (Doctoral dissertation, Université d'Avignon).
  30. **Britto, S. De, & Jogaiah, S. (2022).** Priming with fungal elicitor elicits early signaling defense against leaf spot of broccoli underlying cellular, biochemical and gene expression. *Microbiological Research*, 263(July), 127143.
  31. **Bybordi, A. (2012).** Effect of ascorbic acid and silicium on photosynthesis, antioxidant enzyme activity, and fatty acid contents in canola exposure to salt stress. *Journal of Integrative Agriculture*, 11(10), 1610–1620.
  32. **Cao, F. Y., Yoshioka, K., & Desveaux, D. (2011).** The roles of ABA in plant–pathogen interactions. *Journal of Plant Research*, 124, 489–499.
  33. **Carillo, P., Parisi, D., Woodrow, P., Pontecorvo, G., Massaro, G., Annunziata, M. G., Fuggi, A., & Sulpice, R. (2011).** Salt-induced accumulation of glycine betaine is inhibited by high light in durum wheat. *Functional Plant Biology*, 38(2), 139–150.

34. **Chen, S., Zhao, C. B., Ren, R. M., & Jiang, J. H. (2023).** Salicylic acid had the potential to enhance tolerance in horticultural crops against abiotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1141918.
35. **Chen, T., Shabala, S., Niu, Y., Chen, Z. H., Shabala, L., Meinke, H., Venkataraman, G., Pareek, A., Xu, J., & Zhou, M. (2021).** Molecular mechanisms of salinity tolerance in rice. *Crop Journal*, 9(3), 506–520.
36. **Chen, Z., Zheng, Z., Huang, J., Lai, Z., & Fan, B. (2009).** Biosynthesis of salicylic acid in plants. *Plant Signaling & Behavior*, 4(6), 493–496.
37. **Chetouani, M., Mzabri, I., Amar, A., Boukroute, A., Kouddane, N., & Berrichi, A. (2019).** Morphological-physiological and biochemical responses of *Rosemary* (*Rosmarinus officinalis*) to salt stress. *Materials Today: Proceedings*, 13, 752–761.
38. **Choudhury, F. K., & Panda, S. K. (2004).** Role of salicylic acid in regulating cadmium induced oxidative stress in *Oryza sativa* L. roots. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, 30(3-4), 95–110.
39. **Connor, D. (2002).** Climate change and global crop productivity. *Crop Science*, 42, 978.
40. **Cramer, G. R., Urano, K., Delrot, S., Pezzotti, M., & Shinozaki, K. (2011).** Effects of
41. abiotic stress on plants: a systems biology perspective. *BMC Plant Biology*, 11, 163.
42. **Cramer, G. R., Alberico, G. J., & Schmidt, C. (2001).** Salt tolerance is not associated with the sodium accumulation of two maize hybrids. *Australian Journal of Plant Physiology*, 28(3), 188–195.
43. **Daliakopoulos, I. N., Tsanis, I. K., Koutroulis, A., Kourgialas, N. N., Varouchakis, A. E., Karatzas, G. P., & Ritsema, C. J. (2016).** The threat of soil salinity: A European scale review. *Science of the Total Environment*, 573, 727–739.
44. **Dalziel, E. L., Lewandowski, W., & Merritt, D. J. (2020).** Increased salinity reduces seed germination and impacts upon seedling development in *Nymphaea* L. (*Nymphaeaceae*) from northern Australia's freshwater wetlands. *Aquatic Botany*, 165(March), 103235.
45. **Dhouib, H., Zouari, I., Ben, D., Belbahri, L., Taktak, W., Ali, M., & Tounsi, S. (2019).** Potential of a novel endophytic *Bacillus velezensis* in tomato growth promotion and protection against *Verticillium* wilt disease. *Biological Control*, 139(May), 104092.
46. **El-Mogy, M. M., & Alsanusi, B. W. (2012).** Cassia oil for controlling plant and human pathogens on fresh strawberries. *Food Control*, 28(1), 157–162.
47. **El-Tayeb, M. A. (2005).** Response of barley grains to the interactive effect of salinity and salicylic acid. *Plant Growth Regulation*, 45(3), 215–224.
48. **Entesari, M., Sharif-Zahed, F., Zare, S., Farhangfar, M., & Dashtaki, M. (2012).** Effects of seed priming on mung bean (*Vigna radiata*) cultivars with salicylic acid and potassium nitrate under salinity stress. *International Journal of Agriculture Research and Review*, 2, 926–932.
49. **Eslami, S., Hoekstra, P., Minderhoud, P. S. J., Trung, N. N., Hoch, J. M., Sutanudjaja, E. H., Dung, D. D., Tho, T. Q., Voepel, H. E., Woillez, M. N., & van der Vegt, M. (2021).** Projections of salt intrusion in a mega-delta under climatic and anthropogenic stressors. *Communications Earth and Environment*, 2(1), 1–11.
50. **Farhadi, R. (2021).** Elimination of chemical controls in hydroponic cultures using solar energy. *Journal of Cleaner Production*, 313(November 2020), 127861.
51. **Fariduddin, Q., Hayat, S., & Ahmad, A. (2003).** Salicylic acid influences net photosynthetic rate, carbohydrate metabolism, and growth in *Brassica juncea* L. under salt stress. *Photosynthetica*, 41(2), 281–284.
52. **Ge, W., Zhao, Y., Kong, X., Sun, H., Luo, M., Yao, M., ... & Ji, S. (2020).** Combining salicylic acid and trisodium phosphate alleviates chilling injury in bell pepper (*Capsicum annuum* L.) through enhancing fatty-acid desaturation efficiency and water retention. *Food Chemistry*, 327, 127057.

53. **Gechev, T. S., Van Breusegem, F., Stone, J. M., Denev, I., Laloi, C., & Mittler, R. (2002).** Reactive oxygen species as signals that modulate plant stress responses and programmed cell death. *BioEssays*, 24(10), 926–935.
54. **Gholamnezhad, J., Kafi, M., & Nezami, A. (2016).** Effect of salicylic acid on the activities of SOD, CAT, and APX in wheat under salt stress. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18(2), 227–239.
55. **Gilgenkrantz, S. (2012).** Histoire de la tomate à travers son génome. *Médecine/Sciences*, 28(11), 1000–1002.
56. **Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010).** Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12), 909–930.
57. **Gnancadja, L. S., Tonon, D. H., Faton, E. M., Kpindou, K. D., Dannon, E., & Akoegninou, A. (2015).** Efficacité de l'agent antagoniste *Trichoderma harzianum* sur *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, agent pathogène de la tomate. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(2), 770–782.
58. **Golzar, H. (2009).** First report of *Pyrenochaeta lycopersici*, causal agent of tomato corky root rot in Australia. *Australasian Plant Disease Notes*, 4(1), 126–128.
59. **Gomes Silveira, J. A., De Almeida Viégas, R., Almeida Da Rocha, I. M., De Oliveira Monteiro Moreira, A. C., De Azevedo Moreira, R. D., & Abreu Oliveira, J. T. (2003).** Proline accumulation and glutamine synthetase activity are increased by salt-induced proteolysis in cashew leaves. *Journal of Plant Physiology*, 160(2), 115–123.
60. **Gontijo, V. A., Hariharan, J., Ampatzidis, Y., & Roberts, P. D. (2023).** Early detection of tomato bacterial spot disease in transplant tomato seedlings utilising remote sensing and artificial intelligence. *Biosystems Engineering*, 234, 172–186.
61. **Gupta, B., & Huang, B. (2014).** Mechanism of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular characterization. *International Journal of Genomics*
62. **Guevara-gonz, G., Esquivel, K., Mercado-meza, D. Y., Carbajal-valenzuela, I., & Avila quezada, G. D. (2023).** Green silver nanoparticles display protection against *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* in tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.). *Plant Stress*, 10(September).
63. **Gunes, A., Inal, A., Alpaslan, M., Eraslan, F., Bagci, E. G., & Cicek, N. (2007).** Salicylic acid induced changes on some physiological parameters symptomatic for oxidative stress and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.) grown under salinity. *Journal of Plant Physiology*, 164(6), 728–736.
64. **Hasegawa, P. M., Bressan, R. A., Zhu, J.-K., & Bohnert, H. J. (2000).** Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 51, 463–499.
65. **Hassanzadeh, F., Shariatmadari, H., & Eskandari, H. (2022).** Soil salinity under climate change: Challenges for sustainable agriculture and food security. *Science of The Total Environment*, 789, Article 147964
66. **Hayat, Q., Hayat, S., Irfan, M., & Ahmad, A. (2008).** Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: A review. *Environmental and Experimental Botany*, 59(3), 1–6.
67. **Hayat, S., Hasan, S. A., Fariduddin, Q., & Ahmad, A. (2010).** Growth of tomato (*Lycopersicon esculentum*) in response to salicylic acid under water stress. *Journal of Plant Interactions*, 5(4), 297–304.
68. **Heidari, A., Bandehagh, A., & Toorchi, M. (2014).** Effects of NaCl stress on chlorophyll content and chlorophyll fluorescence in sunflower (*Helianthus annuus* L.) lines. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 24(2), 111–120.
69. **Henschel, J., Dantas, E., Soares, V., Santos, S., Santos, L., Dias, T., & Batista, D. (2022).** Salicylic acid mitigates the effects of mild drought stress on radish (*Raphanus sativus*) growth. *Functional Plant Biology*.
70. **Herna, M. (2008).** Chemical composition of tomato (*Lycopersicon esculentum*) from Tenerife, the Canary Islands. *Food Chemistry*, 106, 1046–1056.

71. **Horváth, E., Szalai, G., & Janda, T. (2007).** Induction of abiotic stress tolerance by salicylic acid signaling. *Journal of Plant Growth Regulation*, 26, 290–300. <https://doi.org/10.1007/s00344-007-9017-4>
72. **Hossain, M. S., Alam, M. U., Rahman, A., Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Al Mahmud, J., & Fujita, M. (2017).** Use of iso-osmotic solution to understand salt stress responses in lentil (*Lens culinaris Medik.*). *South African Journal of Botany*, 113, 346–354.
73. **Hou, J., Zhang, J., Liu, X., Ma, Y., Wei, Z., Wan, H., & Liu, F. (2023).** Effect of biochar addition and reduced irrigation regimes on growth, physiology and water use efficiency of cotton plants under salt stress. *Industrial Crops and Products*, 198(March), 116702.
74. **Huang, S., Zuo, T., & Ni, W. (2020).** Important roles of glycinebetaine in stabilizing the structure and function of the photosystem II complex under abiotic stresses. *Planta*, 251(2), 1–14.
75. **Hussain, M. I., Lyra, D., Farooq, M., Nikoloudakis, N., & Khalid, N. (2016).** Salt and drought stresses in safflower: A review. *Agronomy for Sustainable Development*.
76. **Janda, T., Szalai, G., Tari, I., & Páldi, E. (2003).** Hydroponic treatment with salicylic acid decreases the effects of chilling injury in maize (*Zea mays L.*) plants. *Planta*, 217(4), 566–574.
77. **Jini, D., & Joseph, B. (2017).** Physiological mechanism of salicylic acid for alleviation of salt stress in bean plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 39(10), 231.
78. **Karoune, S., Halis, Y., & Djellouli, A. (2017).** Effet du stress salin sur la morphologie, la physiologie et la biochimie de l'*Acacia albida*. *Agronomie*, 14, 60–73.
79. **Katuwal, K. B., Xiao, B., & Jespersen, D. (2020).** Physiological responses and tolerance mechanisms of seashore paspalum and centipedegrass exposed to osmotic and iso-osmotic salt stresses. *Journal of Plant Physiology*, 248(March 2019), 153154.
80. **Kaya, C., Kirnak, H., & Higgs, D. (2003).** Supplementary calcium enhances plant growth and fruit yield in salt-stressed tomato. *Journal of Plant Nutrition*, 26(3), 543–560.
81. **Ke-ke, W. E. I., Jie, L. I., Tian-bo, D., Tong-xian, L. I. U., & Dong, C. H. U. (2019).** Transmission characteristics of Tomato chlorosis virus (ToCV) by *Bemisia tabaci* MED and its effects on host preference of vector whitefly. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(9), 2107–2114.
82. **Kerepesi, I., & Galiba, G. (2014).** Osmotic and salt stress-induced alteration in soluble carbohydrate content in wheat seedlings. *Crop Science Journal*, 40(4), 482–487.
83. **Khalil, R., Haroun, S., Bassyoini, F., Nagah, A., & Yusuf, M. (2021).** Salicylic acid in combination with kinetin or calcium ameliorates heavy metal stress in *Phaseolus vulgaris* plant. *Journal of Agriculture and Food Research*, 5(June), 100182.
84. **Khan, M. I. R., Fatma, M., Per, T. S., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2015).** Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in Plant Science*, 6, 462.
85. **Khatrri, K., & Rathore, M. S. (2022).** Salt and osmotic stress-induced changes in physio-chemical responses, PSII photochemistry and chlorophyll a fluorescence in peanut. *Plant Stress*, 3, 100063.
86. **Khlaif, S., Mudalal, S., Ruiz-canales, A., & Abu-khalaf, N. (2024).** Electronic nose for detecting *Colletotrichum coccodes* causing anthracnose fruit rots in tomatoes. *Smart Agricultural Technology*, 8(March), 100451.
87. **Khodary, S. F. A. (2004).** Effect of salicylic acid on the growth, photosynthesis and carbohydrate metabolism in salt-stressed maize plants. *International Journal of Agriculture and Biology*, 6(1), 5–8.

88. **Khosravichenar, A., Aalijahan, M., Moaazeni, S., Lupo, A. R., Karimi, A., Ulrich, M., Parvian, N., Sadeghi, A., & Von Suchodoletz, H. (2023).** Assessing a multi-method approach for dryland soil salinization with respect to climate change and global warming – The example of the Bajestan region (NE Iran). *Ecological Indicators*, 154(June), 110639.
89. **Kohli, S. K., Khanna, K., Bhardwaj, R., Abd Allah, E. F., Ahmad, P., & Corpas, F. J. (2019).** Assessment of subcellular ROS and NO metabolism in higher plants: Multifunctional signaling molecules. *Antioxidants*, 8(12).
90. **Kováčik, J., Klejdus, B., & Backor, M. (2009).** Salicylic acid alleviates NaCl-induced changes in the metabolism of *Matricaria chamomilla* plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72(7), 2015–2023.
91. **Krantev, A., Yordanova, R., Janda, T., Szalai, G., & Popova, L. (2008).** Treatment with salicylic acid decreases the effect of cadmium on photosynthesis in maize plants. *Journal of Plant Physiology*, 165(9), 920–931.
92. **Kumar, P., Gupta, A., Singh, A., & Thakur, P. (2024).** Boosting Drought Tolerance in Tomatoes through Stimulatory Action of Salicylic Acid Imparted Antioxidant Defense Mechanisms. *Agronomy*, 14(6), 1227
93. **Kwon, S., Lee, Y., Cho, Y., Byun, H., & Seo, J. (2024).** Engineering of stable infectious cDNA constructs of a fluorescently tagged tomato chlorosis virus. *Virology*, 593(December 2023), 110010.
94. **Lebeda, A., Mieslerová, B., Jankovics, T., Kiss, L., & Van Der Linde, E. J. (2015).** First detection of tomato powdery mildew caused by *Oidium neolycopersici* in South Africa. *South African Journal of Botany*, 99, 153–157.
95. **Lee, Y. H., Yoon, C. S., Park, N. I., & Yeoung, Y. R. (2015).** Influence of various nutrient concentrations on the growth and yield of summer strawberry cultivars cultivated in a hydroponic system. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 56(4), 421–426.
96. **Legros, J.-P. (2009).** La Salinisation Des Terres Dans Le Monde. *Académie Des Sciences et Lettres de Montpellier, Conférence N° 4069*, 40, 257–269.
97. **Li, D., Zhang, T., Wang, M., Liu, Y., Brestic, M., Chen, T. H. H., & Yang, X. (2019).** Genetic engineering of the biosynthesis of glycine betaine modulates phosphate homeostasis by regulating phosphate acquisition in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 9(January), 1–13.
98. **Li, G., Peng, X., Wei, L., & Kang, G. (2013).** Salicylic acid increases the contents of glutathione and ascorbate and temporally regulates the related gene expression in salt-stressed wheat seedlings. *Gene*, 529(2), 321–325.
99. **Li, W., Zhao, F., Fang, W., Xie, D., Hou, J., Yang, X., & Zhao, Y. (2014).** Exogenous salicylic acid alleviates salt stress and increases antioxidant enzyme activity in *Lycium barbarum* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 78, 87–97.
100. **Li, Y., Wang, H., Zhang, Y., Martin, C., & Martin, C. (2018).** Can the world's favorite fruit, tomato, provide an effective biosynthetic chassis for high-value metabolites? *Plant Cell Reports*, 37(10), 1443–1450.
101. **Li, Z., Liu, S., Zhu, T., Wang, J., Sun, M., An, X., Wei, X., Liu, C., Chu, J., & Wan, X. (2023).** Jasmonic acid-mediated stress responses share the molecular mechanism underlying male sterility induced by deficiency of *ZmMs33* in maize. *Crop Journal*, 11(4), 1115–1127.
102. **Li, Z., Yu, T., Liu, W., & Hu, X. (2023).** Comparative analysis of salt stress tolerance between industrial and traditional tomato varieties. *Plant Physiology and Biochemistry*, 175, 149–160.



103. Liabes, D., Bel, D. E. S., Facult, A., Sciences, D. E. S., Naturede, D. E. L. A., Vie, L. A., & Laboratoire, E. (n.d.). Doctorat.
104. Liang, H., Shi, Q., Li, X., Gao, P., Feng, D., Zhang, X., Lu, Y., Yan, J., Shen, S., Zhao, J., & Ma, W. (2022). Synergistic effects of carbon cycle metabolism and photosynthesis in Chinese cabbage under salt stress. *Horticultural Plant Journal*, December.
105. Liang, W., Ma, X., Wan, P., & Liu, L. (2018). Plant salt-tolerance mechanism: A review. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 495(1), 286–291.
106. Lima, L. K. da S., Jesus, O. N. de, Soares, T. L., Santos, I. S. dos, Oliveira, E. J. de, & Coelho Filho, M. A. (2020). Growth, physiological, anatomical and nutritional responses of two phenotypically distinct passion fruit species (*Passiflora L.*) and their hybrid under saline conditions. *Scientia Horticulturae*, 263, 109037.
107. Ling, C., Huo, H., Smalle, J., Wang, S., Zhuang, Y., Wei, M., Ling, C., Liu, Y., Amin, A. K., Li, P., Li, P., & Hu, X. (2021). EGY3 mediates chloroplastic ROS homeostasis and promotes retrograde signaling in response to salt stress in *Arabidopsis*. *CellReports*, 36(2), 109384.
108. Liu, J., Li, L., Yuan, F., & Chen, M. (2019). Exogenous salicylic acid improves the germination of *Limonium bicolor* seeds under salt stress. *Plant Signaling & Behavior*, 14(10), e1644595.
109. Liu, Z., Alseekh, S., Brotman, Y., Zheng, Y., & Fei, Z. (2016). Identification of a *Solanum pennellii* Chromosome 4 fruit flavor and nutritional quality-associated metabolite QTL. *Frontiers in Plant Science*, 7(November), 1–15.
110. Lou, L., Su, X., Liu, X., & Liu, Z. (2020). Transcriptome analysis of *Luffa cylindrica* (L.) Roem response to infection with cucumber mosaic virus (CMV). *Gene*, 737(January), 144451.
111. Lourenço, V., & Quezado-duval, A. M. (2020). Field validation of TOMCAST modified to manage Septoria leaf spot on tomato in the central-west region of Brazil. *Crop Protection*, 138(May), 105333.
112. Lv, J., Deng, M., Li, Z., Zhu, H., Wang, Z., Yue, Y., Yang, Z., Xu, J., Jiang, S., Zhao, W., Li, J., & Zhao, K. (2023). Integrative analysis of the transcriptome and metabolome reveals the response mechanism to tomato spotted wilt virus. *Horticultural Plant Journal*, 9(5), 958–970.
113. Ma, X., Zheng, J., Zhang, X., Hu, Q., & Qian, R. (2017). Salicylic acid alleviates the adverse effects of salt stress on *Dianthus superbus* (Caryophyllaceae) by activating photosynthesis, protecting morphological structure, and enhancing the antioxidant system. *Frontiers in Plant Science*, 8.
114. Mândru, I., Costache, M., Hoza, D., & Cristea, S. (2018). Pathogens with economic importance for tomato crops growing in the field and their control. *Scientific Papers Series B Horticulture*, LXII, 499–506.
115. Martí, R., Roselló, S., & Cebolla-Cornejo, J. (2016). Tomato as a source of carotenoids and polyphenols targeted to cancer prevention. *Cancers*, 8(6), 1–28.
116. Miao, Y., Luo, X., Gao, X., Wang, W., Li, B., & Hou, L. (2020). Exogenous salicylic acid alleviates salt stress by improving leaf photosynthesis and root system architecture in cucumber seedlings. *Scientia Horticulturae*, 272.
117. Mitchell, J. R., & Broadhead, J. (1967). Salicylic acid and derivatives. *Chemical Reviews*, 67(2), 193–211.
118. Miura, K., & Tada, Y. (2014). Regulation of water, salinity, and cold stress responses by salicylic acid. *Frontiers in Plant Science*, 5, 4.

119. **Moodley, V., Naidoo, R., & Gubba, A. (2015).** Screening of pepper (*Capsicum annuum* L.) lines for resistance to an isolate of Potato virus Y (PVY) occurring in KwaZulu-Natal (KZN), Republic of South Africa. *Crop Protection*, 68, 36–40.
120. **Morard, P., Pujos, A., Bernadac, A., & Bertonni, G. (1996).** Effect of temporary calcium deficiency on tomato growth and mineral nutrition. *Journal of Plant Nutrition*, 19(1), 115–127.
121. **Moravcová, Š., Tůma, J., Dučaiová, Z. K., Waligórski, P., Kula, M., Saja, D., ... & Libík-Konieczny, M. (2018).** Influence of salicylic acid pretreatment on seeds germination and some defence mechanisms of *Zea mays* plants under copper stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 122, 19–30.
122. **Morsli, S. (2018).** Proposition d'un modèle de culture biologique Tomate/Datura et effet des biopesticides (métabolites secondaires) sur les bioagresseurs (Doctoral dissertation, ENSA).
123. **Mubarik, M. S., Khan, S. H., Sajjad, M., Raza, A., Hafeez, M. B., Yasmeen, T., Rizwan, M., Ali, S., & Arif, M. S. (2021).** A manipulative interplay between positive and negative regulators of phytohormones: A way forward for improving drought tolerance in plants. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 1269–1290.
124. **Munns, R. (2002).** Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell & Environment*, 25(2), 239–250.
125. **Munns, R., & Tester, M. (2008).** Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–681.
126. **Nazar, R., Iqbal, N., Masood, A., Khan, M. I. R., Syeed, S., & Khan, N. A. (2011).** Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under salt stress by enhancing nitrogen and sulfur assimilation in mustard. *Journal of Plant Physiology*, 168(8), 677–685.
127. **Nazar, R., Umar, S., Khan, N. A., & Sareer, O. (2015).** Salicylic acid supplementation improves photosynthesis and growth in mustard through changes in proline accumulation and ethylene formation under drought stress. *South African Journal of Botany*, 98, 84–94.
128. **Noreen, S., Sultan, M., Akhter, M. S., Shah, K. H., Ummara, U., Manzoor, H., Ulfat, M., Alyemeni, M. N., & Ahmad, P. (2021).** Foliar fertigation of ascorbic acid and zinc improves growth, antioxidant enzyme activity and harvest index in barley (*Hordeum vulgare* L.) grown under salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158, 244–254.
129. **Ose, J., Rodrigo-Moreno, A., & Shabala, S. (2014).** ROS homeostasis in halophytes in the context of salinity stress tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 65(5), 1241–1257.
130. **Palma, F., Lluch, C., Iribarne, C., García-Garrido, J., & Tejera García, N. (2013).** Salicylic acid improves the salinity tolerance of *Medicago sativa* in symbiosis with *Sinorhizobium meliloti* by preventing nitrogen fixation inhibition. *Plant Science*, 208, 75–82.
131. **Pandey, A. K., Kumar, A., Dinesh, K., Varshney, R., & Dutta, P. (2022).** The hunt for beneficial fungi for tomato crop improvement – Advantages. *Plant Stress*, 6(August), 100110.
132. **Pareek, A., Sopory, S. K., & Bohnert, H. J. (2009).** *Abiotic Stress Adaptation in Plants*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
133. **Parida, A. K., & Das, A. B. (2005).** Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324–349.
134. **Peng, J., Liu, J., Zhang, L., Luo, J., Dong, H., Ma, Y., Zhao, X., Chen, B., Sui, N., Zhou, Z., & Meng, Y. (2016).** Effects of soil salinity on sucrose metabolism in cotton leaves. *PLoS ONE*, 11(5), 1–19.

135. Rao, M. V., & Sen, M. (2021). Salicylic acid-induced enhancement of growth and physiological performance of plants under salinity stress. *Plant Growth Regulation*, 94(2), 209–224.
136. Raskin, I. (1992). Role of salicylic acid in plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 43(1), 439–463.
137. Raskin, I., Ribnicky, D. M., Komarnytsky, S., Ilic, N., Poulev, A., Borisjuk, N., ... & Brinker, A. (2002). Plants and human health in the twenty-first century. *Trends in Biotechnology*, 20(12), 522–531.
138. Raza, A., Charagh, S., Najafi-Kakavand, S., Abbas, S., Shoaib, Y., Anwar, S., Sharifi, S., Lu, G., & Siddique, K. H. M. (2023). Role of phytohormones in regulating cold stress tolerance: Physiological and molecular approaches for developing cold-smart crop plants. *Plant Stress*, 8(February), 100152.
139. Reinhardt, D. H., & Rost, T. L. (1995). Salinity accelerates endodermal development and induces an exodermis in cotton seedling roots. *Environmental and Experimental Botany*, 35(4), 563–574.
140. Rhaman, M. S., Imran, S., Rauf, F., Khatun, M., Baskin, C. C., Murata, Y., & Hasanuzzaman, M. (2020). Seed priming with phytohormones: An effective approach for the mitigation of abiotic stress. *Plants*, 10(1), 37.
141. Richa, A. (2020). Recent advances and perspectives in the treatment of hydroponic wastewater: A review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 9.
142. Riefler, M., Novak, O., Strnad, M., & Schmülling, T. (2006). Arabidopsis cytokinin receptors mutants reveal functions in shoot growth, leaf senescence, seed size, germination, root development, and cytokinin metabolism. *Plant Cell*, 18(1), 40–54.
143. Righini, H., Cetrullo, S., Bissoletti, I., Zuffi, V., Quintana, A. M., Flamigni, F., Francioso, O., & Roberti, R. (2023). Evaluating *Ecklonia maxima* water-soluble polysaccharides as a growth promoter of tomato seedlings and resistance inducer to *Fusarium* wilt. *Scientia Horticulturae*, 317(November 2022), 112071.
144. Sabharwal, U., & Subramanian, R. B. (2023). Variation in defense enzymes in GT-2 and GAT-5 varieties of tomato during infection with bacterial wilt disease in Central Gujarat, India. *Plant Stress*, 8(March), 100160.
145. Santner, A., Calderon-Villalobos, L. I. A., & Estelle, M. (2009). Plant hormones are versatile chemical regulators of plant growth. *Nature Chemical Biology*, 5(5), 301–307.
146. Sellami, S., Le Hir, R., Thorpe, M. R., Vilaine, F., Wolff, N., Brini, F., & Dinant, S. (2019). Salinity effects on sugar homeostasis and vascular anatomy in the stem of the *Arabidopsis thaliana* inflorescence. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(13).
147. Shahid, S. A., Zaman, M., & Heng, L. (2018). Soil salinity: Historical perspectives and a world overview of the problem. In *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques* (pp. 43–53).
148. Shakirova, F. M., Sakhabutdinova, A. R., Bezrukova, M. V., Fatkhutdinova, R. A., & Fatkhutdinova, D. R. (2003). Changes in the hormonal status of wheat seedlings induced by salicylic acid and salinity. *Plant Science*, 164(3), 317–322.
149. Shapiguzov, A., Julia, P., Wrzaczek, M., & Kangasjärvi, J. (2012). ROS-talk – how the apoplast, the chloroplast, and the nucleus get the message through abiotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 3(December), 1–9.
150. Sharma, P., & Dubey, R. S. (2020). Salicylic acid and its role in stress tolerance and growth of plants: A review. *Journal of Plant Physiology*, 245, 155–165.
151. Sharma, P., Jha, A. B., & Dubey, R. S. (2019). Oxidative stress and antioxidative defense system in plants growing under abiotic stresses. In *Handbook of Plant and Crop Stress, Fourth Edition* (pp. 93–136). CRC Press.

152. **Simaei, M., Khavari-Nejad, R. A., & Bernard, F. (2011).** Interactive effects of salicylic acid and nitric oxide on oxidative stress in salt-stressed soybean plants. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 17(4), 287–293.
153. **Sobczak, A., Kućko, A., Pióro-Jabrucka, E., Gajc-Wolska, J., & Kowalczyk, K. (2023).** Effect of salicylic acid on the growth and development of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) under standard and high EC nutrient solution in aeroponic cultivation. *Agronomy*.
154. **Soni, S., Kumar, A., Sehrawat, N., Kumar, A., Kumar, N., & Lata, C. (2021).** Effect of saline irrigation on plant water traits, photosynthesis and ionic balance in durum wheat genotypes. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(4), 2510–2517.
155. **Spedona. (2009).** Diffusion de la tomate [Image]. Wikipédia. Disponible sous la licence GNU Free Documentation License version 1.2 ou ultérieure.
156. **Strobel, N. E., & Kuc, J. (1995).** Chemical activation of acquired systemic resistance in cucumber to *Colletotrichum orbiculare* by DL-beta-aminobutyric acid and sodium salicylate. *Phytopathology*, 85(5), 1021–1027.
157. **Szepesi, Á., Csiszár, J., Bajkán, S., Gemes, K., Horváth, F., Erdei, L., ... & Tari, I. (2009).** Salicylic acid improves acclimation to salt stress by stimulating abscisic acid signaling in tomato. *Acta Physiologiae Plantarum*, 31(3), 361–372.
158. **Tahir, A., Shah, H., Sharif, M., Akhtar, W., & Akmal, N. (2012).** An overview of tomato economy of Pakistan: Comparative analysis. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 25(4), 288–294.
159. **Taïbi, K., Taïbi, F., Ait Abderrahim, L., Ennajah, A., Belkhodja, M., & Mulet, J. M. (2016).** Effect of salt stress on growth, chlorophyll content, lipid peroxidation and antioxidant defence systems in *Phaseolus vulgaris* L. *South African Journal of Botany*, 105, 306–312.
160. **Thomma, B. P. H. J., Van Esse, H. P., Crous, P. W., & De Wit, P. J. G. M. (2005).** *Cladosporium fulvum* (syn. *Passalora fulva*), a highly specialized plant pathogen as a model for functional studies on plant pathogenic Mycosphaerellaceae. *Molecular Plant Pathology*, 6(4), 379–393.
161. **Wang, L., Pan, D., Li, J., Tan, F., Hoffmann-Benning, S., Liang, W., & Chen, W. (2015).** Proteomic analysis of changes in the *Kandelia candel* chloroplast proteins reveals pathways associated with salt tolerance. *Plant Science*, 231, 159–172.
162. **Wu, H., Shabala, L., Shabala, S., & Giraldo, J. P. (2018).** Hydroxyl radical scavenging by cerium oxide nanoparticles improves *Arabidopsis* salinity tolerance by enhancing leaf mesophyll potassium retention. *Environmental Science: Nano*, 5(7), 1567–1583.
163. **Wu, J., Baldwin, I. T., & Newingham, B. (2016).** Priming for defense in *Nicotiana attenuata* enhances high carbon dioxide-mediated damage resistance. *Plant, Cell & Environment*, 39(4), 865–878.
164. **Xu, Y., Zhang, S., Shen, J., Wu, Z., Du, Z., & Gao, F. (2021).** The phylogeographic history of tomato mosaic virus in Eurasia. *Virology*, 554(December 2020), 42–47.
165. **Yan, F., Wei, H., Ding, Y., Li, W., Liu, Z., Chen, L., Tang, S., Ding, C., Jiang, Y., & Li, G. (2021).** Melatonin regulates antioxidant strategy in response to continuous salt stress in rice seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 165(February), 239–250.
166. **Yan, F., Zhang, J., Li, W., Ding, Y., Zhong, Q., Xu, X., Wei, H., & Li, G. (2021).** Exogenous melatonin alleviates salt stress by improving leaf photosynthesis in rice seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 163(April), 367–375.
167. **Yaronskaya, E. B., Gritskevich, E. R., Trukhanovets, N. L., & Averina, N. G. (2007).** Effect of kinetin on early stages of chlorophyll biosynthesis in streptomycin-treated barley seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology*, 54(3), 388–395.

168. **Yousaf, H. K., Shan, T., Chen, X., Ma, K., Shi, X., Desneux, N., Biondi, A., & Gao, X. (2018).** Impact of the secondary plant metabolite Cucurbitacin B on the demographical traits of the melon aphid, *Aphis gossypii*. *Scientific Reports*, 8(1), 1–10.
169. **Yusuf, M., Fariduddin, Q., & Hayat, S. (2008).** Growth enhancement and protection of *Lycopersicon esculentum* Mill. plants against environmental stress by salicylic acid. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30(5), 1–8.
170. **Zhang, F., Wang, H., & Zhang, L. (2022).** Mechanisms of salt tolerance in tomato: A comparative study of industrial and local varieties under saline conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(25), 7638–7648.
171. **Zhao, M., Cang, H., Chen, H., Zhang, C., Yan, T., Zhang, Y., Gao, P., & Xu, W. (2023).** Determination of quality and maturity of processing tomatoes using near-infrared hyperspectral imaging with interpretable machine learning methods. *LWT*, 183(May), 114861.
172. **Zhao, T., Liu, G., Li, S., Li, J., Jiang, J., Zhang, H., Kang, L., Chen, X., & Xu, X. (2015).** Differentially expressed gene transcripts related to the *Cf-19*-mediated resistance response to *Cladosporium fulvum* infection in tomato. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 89, 8–15.
173. **Zhou, H., Shi, H., Yang, Y., Feng, X., Chen, X., & Xiao, F. (2023).** *Journal of Genetics and Genomics*.
174. **Zhou, Y., Diao, M., Cui, J. X., Chen, X. J., Wen, Z. L., Zhang, J. W., & Liu, H. Y. (2018).** Exogenous GSH protects tomatoes against salt stress by modulating photosystem II efficiency, absorbed light allocation, and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-scavenging system in chloroplasts. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(10), 2257–2272.
175. **Zhu, J.-K. (2002).** Salt and drought stress signal transduction in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 53, 247–273.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.53.091701.162606>
176. **Zhu, M., Li, Q., Zhang, Y., Zhang, M., & Li, Z. (2022).** Glycine betaine increases salt tolerance in maize (*Zea mays* L.) by regulating Na<sup>+</sup> homeostasis. *Frontiers in Plant Science*, 13(September), 1–15.
177. **Zörb, C., Schmitt, S., & Dietz, K.-J. (2022).** Tomato salt tolerance mechanisms and their potential applications for fighting salinity: A review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 949541
178. **Zuhair, R., Thabet, Y., Moustafa, A., Mustafa, N. S. A., El-dahshouri, M. F., Zhang, L., & Ageba, M. F. (2022).** Efficacy of amended vermicompost for bio-control of root knot nematode (*Meloidogyne incognita*) infesting tomato in Egypt. *Environmental Technology & Innovation*, 27, 102397.

## Annexe n°01 : Variété (Saint-Pierre)

### I. Les paramètres de germinations Tableau 1 : Pourcentage de germination des plants

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	27120,0	14	1937,14	52.497%	36,32	0,0000
Within groups	1600,0	30	53,3333			
Total (Corr.)	28720,0	44				

### Tableau 2 : Hauteur des Hypocotyles

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	1840,68	14	131,477	51.6409%	228,09	0,0000
Within groups	129,697	225	0,576433			
Total (Corr.)	1970,38	239				

### Tableau 3 : Hauteur des Coléoptiles

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	152,641	14	10,9029	111.326%	948,72	0,0000
Within groups	2,58576	225	0,0114923			
Total (Corr.)	155,227	239				

### Tableaux 4 : Biomasse fraîche des Hypocotyles

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	0,03201	14	0,00228643	57.7435%	97,87	0,0000
Within groups	0,00525625	225	0,0000233611			
Total (Corr.)	0,0372663	239				

### Tableaux 5 : Biomasse fraîche des coléoptiles

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	0,000173058	14	0,0000123613	61.0819%	33,87	0,0000
Within groups	0,000082125	225	3,65E-7			
Total (Corr.)	0,000255183	239				

## II. Les paramètres de croissance :

### 1. Mesures des paramètres biométriques :

#### Tableaux 6 : Hauteur finale des plantes de tomate

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	343,198	14	24,5141	18.3067	3,55	0,0018
Within groups	207,34	30	6,91133			
Total (Corr.)	550,538	44				

#### Tableaux 7 : Longueur racinaire

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	2674,2	14	191,014	28.8029	36,03	0,0000
Within groups	159,067	30	5,30222			
Total (Corr.)	2833,27	44				

Tableaux 8 : Nombre de feuilles par plante

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	112,978	14	8,06984	19.26.86	12,10	0,0000
Within groups	20,0	30	0,666667			
Total (Corr.)	132,978	44				

Tableaux 9 : Nombre de fleurs par plante

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	69,2444	14	4,94603	4.562%	7,42	0,0000
Within groups	20,0	30	0,666667			
Total (Corr.)	89,2444	44				

Tableaux 10 : Surface foliaire

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	3036,65	14	216,904	41.1403	206,18	0,0000
Within groups	31,56	30	1,052			
Total (Corr.)	3068,21	44				

Tableaux 11 : Biomasse fraîche des feuilles

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	79,5072	14	5,67909	28.9305	9,17	0,0000
Within groups	18,5801	30	0,619338			
Total (Corr.)	98,0874	44				

Tableaux 12 : Biomasse fraîche de tige

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	22,8042	14	1,62887	30.7801	4,17	0,0005
Within groups	11,7293	30	0,390976			
Total (Corr.)	34,5335	44				

Tableaux 13 : Biomasse fraîche racinaire

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	151,571	14	10,8265	49.0941	16,44	0,0000
Within groups	19,7539	30	0,658464			
Total (Corr.)	171,325	44				

Tableaux 14 : Biomasse sèche aérienne

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	45,8671	14	3,27622	23.152%	22,29	0,0000
Within groups	4,40953	30	0,146984			
Total (Corr.)	50,2766	44				

Tableaux 15 : Biomasse sèche racinaire

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	7,90042	14	0,564316	37.0209%	6,65	0,0000
Within groups	2,54547	30	0,0848488			
Total (Corr.)	10,4459	44				

## 2. Paramètres physiologiques

Tableaux 16 : Conteneur relatif en eau

ANOVA Table for Teneur en eau by Traiement

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	3138,37	14	224,169	11.4779%	101,50	0,0000
Within groups	66,2581	30	2,2086			
Total (Corr.)	3204,62	44				

## 3. Paramètres biochimiques

Tableaux 17 : Teneur en Chlorophylle a

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	111,869	14	7,99067	53.6927	32,54	0,0000
Within groups	7,36698	30	0,245566			
Total (Corr.)	119,236	44				

Tableaux 18 : Teneur en Chlorophylle b

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	30,5908	14	2,18506	55.4802	15,39	0,0000
Within groups	4,25869	30	0,141956			
Total (Corr.)	34,8495	44				

Tableaux 19 : Teneur en Caroténoïdes

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	16,0948	14	1,14963	53.9804	23,12	0,0000
Within groups	1,49204	30	0,0497346			
Total (Corr.)	17,5868	44				

Tableaux 20 : Teneur en Proline

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	0,0157898	14	0,00112784	76.0991	29,63	0,0000
Within groups	0,001142	30	0,0000380667			
Total (Corr.)	0,0169318	44				



## Annexe n°02 : Variété (Semillas de Alta Selección)

### I. Les paramètres de germinations

Tableau 1 : Pourcentage de germination des plants

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	22897,8	14	1635,56	29.2126%	49,07	0,0000
Within groups	1000,0	30	33,3333			
Total (Corr.)	23897,8	44				

Tableau 2 : Hauteur des Hypocotyles

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	1727,38	14	123,385	45.5845%	527,60	0,0000
Within groups	52,6187	225	0,233861			
Total (Corr.)	1780,0	239				

Tableau 3 : Hauteur des Coléoptiles

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	0,0535875	14	0,00382768	83.4251	5,47	0,0000
Within groups	0,157519	225	0,000700083			
Total (Corr.)	0,211106	239				

Tableaux 4 : Biomasse fraîche des Hypocotyles

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	0,03201	14	0,00228643	57.7435%	97,87	0,0000
Within groups	0,00525625	225	0,0000233611			
Total (Corr.)	0,0372663	239				

Tableaux 5 : Biomasse fraîche des coléoptiles

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	0,000348225	14	0,0000248732	68.4008%	5,87	0,0000
Within groups	0,000953938	225	0,00000423972			
Total (Corr.)	0,00130216	239				

### II. Les paramètres de croissance :

#### 1. Mesures des paramètres biométriques :

Tableaux 6 : Hauteur finale des plantes de tomate

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	1892,41	14	135,172	40.7317%	6,83	0,0000
Within groups	594,0	30	19,8			
Total (Corr.)	2486,41	44				

Tableaux 7 : Longueur racinaire

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	108,197	14	7,72839	84.1655%	36,02	0,0000
Within groups	6,43753	30	0,214584			
Total (Corr.)	114,635	44				

Tableaux 8 : Nombre de feuilles par plante

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	61,6444	14	4,40317	20.8773%	6,19	0,0000
Within groups	21,3333	30	0,711111			
Total (Corr.)	82,9778	44				

Tableaux 9 : Nombre de fleurs par plante

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	69,2444	14	4,94603	4.562%	7,42	0,0000
Within groups	20,0	30	0,666667			
Total (Corr.)	89,2444	44				

Tableaux 10 : Surface foliaire

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	2969,43	14	212,102	41.7587%	42,92	0,0000
Within groups	148,26	30	4,942			
Total (Corr.)	3117,69	44				

Tableaux 11 : Biomasse fraiche des feuilles

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	143,862	14	10,2758	73.3655%	10,16	0,0000
Within groups	30,3541	30	1,0118			
Total (Corr.)	174,216	44				

Tableaux 12 : Biomasse fraiche de tige

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	114,417	14	8,17263	72.0001%	23,28	0,0000
Within groups	10,5323	30	0,351078			
Total (Corr.)	124,949	44				

Tableaux 13 : Biomasse fraiche racinaire

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	2048,63	14	146,33	33.2216%	18,12	0,0000
Within groups	242,307	30	8,07689			
Total (Corr.)	2290,93	44				

Tableaux 14 : Biomasse sèche aérienne

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	38,2249	14	2,73035	50.9688%	12,15	0,0000
Within groups	6,74385	30	0,224795			
Total (Corr.)	44,9688	44				

Tableaux 15 : Biomasse sèche racinaire

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	7,83653	14	0,559752	60.9062%	13,08	0,0000
Within groups	1,28395	30	0,0427982			
Total (Corr.)	9,12048	44				

## 2. Paramètres physiologiques

Tableaux 16 : Conteneur relatif en eau

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	1403,69	14	100,264	7.76887	5,45	0,0000
Within groups	551,847	30	18,3949			
Total (Corr.)	1955,54	44				

## 3. Paramètres biochimiques

Tableaux 17 : Teneur en Chlorophylle a

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	407,598	14	29,1142	85.9622%	13,48	0,0000
Within groups	64,8163	30	2,16054			
Total (Corr.)	472,414	44				

Tableaux 18 : Teneur en Chlorophylle b

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	93,9672	14	6,71195	75.12%	18,02	0,0000
Within groups	11,1711	30	0,372371			
Total (Corr.)	105,138	44				

Tableaux 19 : Teneur en Caroténoïdes

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	117,609	14	8,40064	65.961%	3,94	0,0008
Within groups	63,9175	30	2,13058			
Total (Corr.)	181,526	44				

Tableaux 20 : Teneur en Proline

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	cv	F-Ratio	P-Value
Between groups	0,123115	14	0,00879395	72.8459%	30,09	0,0000
Within groups	0,00876667	30	0,000292222			
Total (Corr.)	0,131882	44				